

Perancangan Sistem Pemantauan Lokal dan Jarak Jauh bagi Panel Surya

Wahmisari Priharti, Sony Sumaryo, Desri Kristina Silalahi, dan Yendi Surya Agung
Universitas Telkom
Jl. Telekomunikasi, Bandung, Jawa Barat 40257
e-mail: wpriharti@telkomuniversity.ac.id

Abstrak—Pemantauan kinerja panel surya dapat dilakukan secara langsung atau lokal (*local monitoring*) untuk keperluan pengujian panel surya. Namun dalam prakteknya, pemantauan secara tidak langsung atau jarak jauh (*remote monitoring*) juga dibutuhkan karena panel surya biasanya dipasang di tempat yang tinggi, jauh atau sulit dicapai. Penelitian ini merancang suatu sistem pemantauan panel surya ganda yang dapat melakukan pemantauan secara lokal maupun jarak jauh. Sistem lokal terdiri dari sensor tegangan, arus, suhu dan intensitas cahaya yang diintegrasikan dalam suatu kit/perangkat yang disebut PVmeter. Data pada sistem lokal dapat ditampilkan langsung pada LCD atau pada monitor PC oleh *data logger*. Sedangkan pada sistem jarak jauh, data dikirimkan ke internet dan ditampilkan pada website Thinkspeak sehingga data dapat diakses kapanpun dan dimanapun. Pada sistem lokal, data yang dipantau berhasil ditampilkan bentuk file *.txt setiap 5 menit sekali. Sedangkan pada sistem jarak jauh, data berhasil ditampilkan pada website Thinkspeak dengan rata-rata kecepatan pengiriman data 52,5 detik.

Kata kunci: *data logger, internet of things, local monitoring, pvmeter, remote monitoring*

Abstract—Solar photovoltaic monitoring system can be directly conducted locally for the experimental purposes. However, indirect or remote monitoring is also needed since the solar panel are often installed in a high place, rural location, or remote area. This study offers a dual solar panel monitoring system i.e. local and remote. Local monitoring system consists of voltage, current, temperature and light intensity sensors that were integrated in a kit called PVmeter. The data in the local monitoring system were displayed on a LCD or on a PC monitor using data logger. While in the remote monitoring system, the data were uploaded to the internet and displayed on Thinkspeak website hence the data are accessible whenever and wherever needed. In the local system, monitored data were successfully displayed on *.txt file format for every 5 minutes. While in the remote system, the data were successfully displayed on Thinkspeak website with a mean transfer rate of 52.5 seconds.

Keywords: *data logger, internet of things, local monitoring, photovoltaic, remote monitoring*

Copyright © 2020 Jurnal Rekayasa Elektrika. All right reserved

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia dari tahun ke tahun semakin meningkat yang disebabkan oleh perkembangan ekonomi dan industri yang begitu cepat. Namun, sebagian besar pembangkit listrik di Indonesia masih memanfaatkan sumber energi yang berasal dari fosil seperti batu bara, minyak bumi dan gas alam yang jumlahnya terbatas. Selain itu, sumber energi fosil tersebut dapat menimbulkan dampak negatif terhadap kelestarian lingkungan. Oleh karena itu, pemerintah giat mencanangkan penggunaan sumber energi baru dan terbarukan (EBT) untuk mengatasi permasalahan ini.

Sumber EBT merupakan sumber energi yang ramah lingkungan dan jumlahnya tak terbatas. Di Indonesia, pemerintah menargetkan penggunaan EBT dari sumber energi air, angin, panas bumi, biomassa dan surya sebesar 45 MW pada tahun 2025. Energi surya sendiri memiliki potensi yang sangat besar yaitu hingga 207,8 GWp namun baru 0,085 GWp (0,04%) yang telah dimanfaatkan [1].

Selain itu, energi surya dapat diakses dimanapun bahkan di daerah terpencil yang tidak memiliki akses terhadap jaringan transmisi dan distribusi listrik dari Perusahaan Listrik Negara (PLN).

Pemanfaatan energi surya menjadi energi listrik dapat dilakukan menggunakan instrumen yang disebut sel surya. Sel surya merupakan suatu alat yang tersusun dari material semikonduktor yang dapat mengubah sinar matahari menjadi energi listrik menggunakan prinsip fotovoltaik. Sel surya fotovoltaik ini dipercaya merupakan solusi pemanen energi terbarukan yang menjanjikan karena pemasangannya mudah, dapat diandalkan, hanya memerlukan perawatan yang minimal dan tidak membutuhkan bahan bakar [2].

Akan tetapi, suatu sel surya hanya dapat menghasilkan keluaran energi yang kecil. Oleh karena itu dalam prakteknya, beberapa sel surya dirangkai menjadi suatu panel untuk mendapatkan keluaran energi yang lebih besar. Keluaran energi yang dihasilkan oleh panel surya ini dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain

besarnya iradiasi, sudut datang dan durasi penyinaran cahaya matahari, suhu panel dan juga beberapa kondisi lingkungan seperti cuaca, angin dan debu [3].

Faktor-faktor ini menyebabkan keluaran energi yang dihasilkan panel surya sangat fluktuatif. Oleh karena itu, pemantauan kinerja panel surya diperlukan untuk mengetahui bahwa panel surya telah terpasang dengan benar dan menghasilkan keluaran sesuai dengan yang diharapkan. Pemantauan ini dapat dilakukan dengan mengukur besar tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel surya dengan menggunakan multimeter atau sensor tegangan dan arus. Beberapa penelitian telah melaporkan hasil pemantauan ini menggunakan beberapa alat ukur yang berbeda seperti ditampilkan pada Tabel 1.

Dari Tabel 1, terlihat beberapa penelitian masih menggunakan multimeter dan perekaman data manual. Perekaman dengan cara manual ini tidak dapat memberikan data yang menyeluruh karena data hanya dapat diambil pada waktu-waktu tertentu dan memungkinkan juga terjadinya kesalahan dalam perekaman data. Oleh karena itu, pada beberapa penelitian terakhir, pengukuran dan perekaman data sudah dilakukan secara otomatis menggunakan sensor dan *data logger*. Hal ini memungkinkan pengambilan data yang lebih tepat, *real-time* dan terus menerus. Selain itu, untuk memastikan kinerja panel secara menyeluruh, faktor-faktor lingkungan yang berpengaruh juga turut diukur selain tegangan dan arus, yaitu intensitas cahaya, suhu, dan kelembapan.

Sistem pemantauan yang sudah ada ini, sesuai digunakan untuk memantau kinerja panel surya pada waktu pengujian atau skala lab dimana akuisisi data dapat dilakukan secara langsung yaitu ditampilkan pada LCD atau ditampilkan dalam bentuk grafik menggunakan aplikasi PLX-DAQ. Namun dalam prakteknya, panel surya seringkali diletakkan di tempat yang tinggi dan sulit dicapai seperti pada atap atau di tempat terpencil. Hal ini tentu akan menyulitkan pengguna untuk melakukan pemantauan secara langsung. Teknologi komunikasi

yang disebut *Internet of Things* (IoT) dipercaya mampu menyelesaikan masalah ini. Melalui IoT, perangkat pemantauan yang sudah ada dapat dihubungkan kepada internet sehingga data kinerja panel surya dapat diakses oleh pengguna kapan saja dan dari mana saja [9].

Berdasarkan latar belakang tersebut, dalam penelitian ini dirancang suatu sistem pemantauan (*monitoring system*) kinerja panel surya dengan dua cara: (a) lokal (*local*), artinya sistem digunakan seperti multimeter secara langsung di tempat peletakan panel surya (sistem tidak memerlukan koneksi internet, data ditampilkan secara langsung pada LCD dan dapat disimpan dalam *SD card memory* oleh *data logger* serta dapat juga ditampilkan dalam bentuk grafik dalam Microsoft Excel oleh PLX-DAQ) dan (b) jarak jauh (*remote*), artinya sistem terintegrasi dengan internet sehingga bisa diakses dimana saja dan kapan saja (data ditampilkan pada website ThinkSpeak sebagai platform IoT dengan menggunakan NodeMCU ESP8266 sebagai *wireless transceiver*).

II. METODE

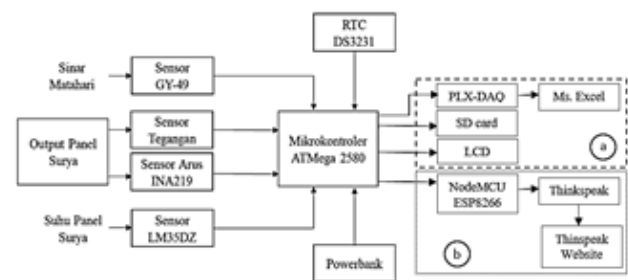
A. Diagram Blok Sistem

Gambar 1 menampilkan diagram blok dari sistem pemantauan kinerja panel surya. Sistem ini terdiri dari sensor tegangan DC yang digunakan untuk membaca tegangan listrik keluaran panel surya dan sensor INA219 untuk membaca arus listrik keluaran panel surya. Sinar matahari yang menyinari panel surya akan dibaca nilai intensitasnya dengan menggunakan sensor GY-49 dalam bentuk satuan lux serta suhu di sekitar panel surya akan dibaca oleh sensor LM35DZ. Semua nilai pembacaan sensor dikirim ke mikrokontroler Arduino ATmega2560 untuk diolah. Powerbank berkapasitas 3800 mAh digunakan sebagai penyuplai daya bagi sistem agar sistem pemantauan ini dapat bekerja secara mandiri.

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, sistem ini dirancang untuk dapat melakukan pemantauan melalui dua cara, yaitu: (a) lokal dan (b) jarak jauh. Pada sistem (a), nilai bacaan tegangan, arus, suhu dan intensitas cahaya dalam bentuk digital ditampilkan secara langsung pada LCD. RTC DS3231 digunakan sebagai patokan waktu untuk *data logger* yang akan menyimpan data pada *SD card memory*. Program PLX-DAQ digunakan sebagai antarmuka untuk menghubungkan mikrokontroler terhadap penampil data pada Microsoft Excel melalui

Tabel 1. Penelitian mengenai pemantauan kinerja panel surya

No	Parameter penelitian	Alat ukur	Penampil dan perekam data	Ref
1	Tegangan, arus dan intensitas cahaya	Multimeter dan luxmeter	LCD, Manual	[4]
2	Tegangan, arus dan intensitas cahaya	Voltmeter, amperemeter dan luxmeter	LCD, Manual	[5]
3	Tegangan dan arus	Sensor tegangan dan sensor arus	PLX-DAQ + Ms.Excel, Data logger	[6]
4	Tegangan, arus, suhu dan kelembapan	Sensor tegangan, sensor arus, sensor suhu dan kelembapan	LCD, Data logger	[7]
5	Tegangan, arus, suhu dan intensitas cahaya	Sensor tegangan, sensor arus, sensor suhu dan sensor intensitas cahaya	PLX-DAQ + Ms.Excel, Data logger	[8]



Gambar 1. Diagram blok sistem pemantauan kinerja panel surya

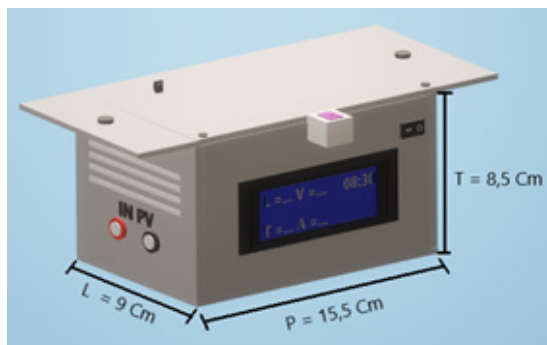
komunikasi serial. Data pada Microsoft Excel ditampilkan dalam bentuk grafik sehingga lebih memudahkan pengguna untuk mengevaluasi kinerja panel surya.

Pada sistem (b), data yang merupakan hasil bacaan sensor dikirim dari mikrokontroler ke *cloud* menggunakan *wireless transceiver* NodeMCU ESP8266. Thinkspeak digunakan sebagai platform IoT dimana data kemudian diolah, dianalisis dan ditampilkan dalam bentuk grafik pada Thinkspeak website. Untuk menggunakan fitur ini, pengguna harus memiliki satu akun atau alamat IP tertentu yang memiliki beberapa jalur berbeda bagi parameter-parameter yang dipantau oleh sistem.

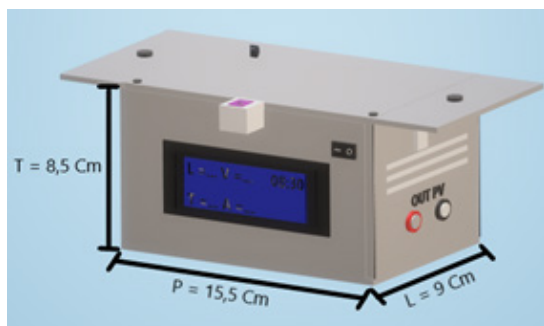
B. Perancangan perangkat keras

Perangkat keras sistem pemantauan kinerja panel surya dirancang sedemikian rupa dalam bentuk suatu kit agar mudah digunakan pengguna. Kit ini bersifat praktis dan portabel seperti halnya multimeter sehingga dapat juga disebut sebagai PVmeter. Kit ini berdimensi $(15,5 \times 9 \times 8,5)$ cm³ seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Pada Gambar 2(a), terdapat lubang positif dan negatif bagi masukan panel surya di bagian kiri kit, sedangkan pada Gambar 2(b), terdapat lubang positif dan negatif keluaran dari kit. Kedua lubang ini dapat langsung dihubungkan kepada beban. Selain itu, lubang *input* arduino juga disediakan untuk memudahkan pengguna menghubungkan sistem ke komputer.

Di dalam kit ini terdapat sensor tegangan dan arus yang berfungsi untuk mengukur tegangan dan arus keluaran panel surya. Selain itu, terdapat juga sensor intensitas

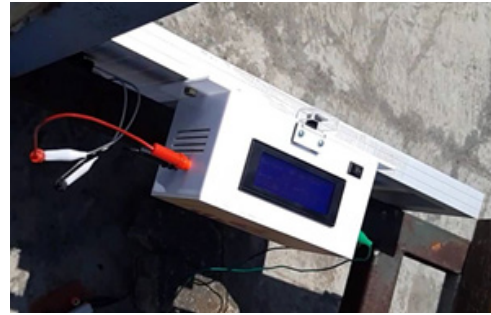


(a)



(b)

Gambar 2. Kit sistem pemantauan kinerja panel surya (PVmeter): (a) tampak kiri, (b) tampak kanan.



Gambar 3. Kit sistem pemantauan kinerja panel surya (PVmeter) dipasang pada bagian belakang panel surya

cahaya yang diletakkan pada depan kit, agar sensor dapat membaca nilai intensitas cahaya matahari ketika proses pengambilan data dilakukan. Sensor suhu diletakkan di atas kit agar perubahan suhu pada bagian belakang panel surya dapat terdeteksi.

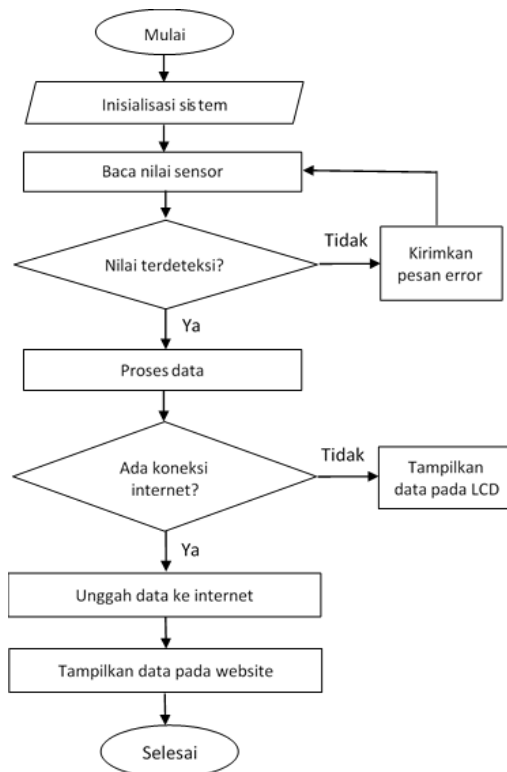
LCD sebagai penampil data diletakkan pada depan bagian depan kit. LCD ini akan menampilkan nilai-nilai dari olahan mikrokontroler, yaitu tegangan, arus, intensitas cahaya, suhu dan juga waktu pembacaan. Tombol *switch on/off* disertakan pada bagian depan sehingga pengguna tidak kesulitan untuk mengaktifkan sistem. Pada bagian kanan dan kiri kit juga terdapat lubang ventilasi yang berfungsi untuk mengalirkan sirkulasi udara di dalam kit agar sistem tidak *overheat*.

Pada pemakaiannya, kit ini dipasang melekat pada bagian belakang panel surya seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Oleh karena itu pada bagian kiri dan kanan atas kit ini, disediakan dua lubang tempat memasang mur dan baut agar kit dapat dilekatkan pada panel surya. Selama pemantauan, sistem tidak berpindah tempat untuk mencegah terjadinya kesalahan pembacaan oleh sistem karena kabel sensor yang longgar atau terlepas akibat gerakan/perpindahan.

Panel surya yang digunakan dalam pengujian sistem ini merupakan jenis *polycrystalline* berdimensi $(485 \times 360 \times 25)$ mm³ dengan spesifikasi daya maksimum, P_{max} 20 W, arus daya maksimum, I_{mp} 1.08 A, tegangan daya maksimum, V_{mp} 18,5 V, arus *short circuit*, I_{sc} 1,16 A dan tegangan *open circuit*, V_{oc} 22,14 V. Agar arus listrik dapat mengalir melalui rangkaian, suatu resistor dengan rating 20 W 20 Ω digunakan sebagai beban.

C. Perancangan Perangkat Lunak

Gambar 4 merupakan diagram alir perancangan perangkat lunak dari sistem pemantauan panel surya. Ketika proses dimulai, mikrokontroler akan menginisialisasi port yang digunakan seperti sensor intensitas cahaya, sensor arus, sensor tegangan, sensor suhu, LCD, RTC dan SD Card Memory. setelah penginisialisasian selesai, sensor akan membaca tegangan listrik, arus listrik, suhu dan intensitas cahaya pada panel surya. Sensor tegangan dan sensor suhu akan memberikan input analog bagi mikrokontroler, nilai input analog akan diubah menjadi nilai ADC oleh mikrokontroler dan nilai ADC akan diolah dengan menggunakan rumus hingga mendapatkan nilai



Gambar 4. Diagram alir perancangan perangkat lunak sistem pemantauan kinerja panel surya

pengukuran yang diinginkan, sedangkan sensor intensitas cahaya dan sensor arus yang menggunakan IC yang telah diprogram sehingga pengguna tidak harus mencantumkan rumus untuk mendapatkan nilai pengukuran yang diinginkan. Pada sistem (a), setelah nilai pembacaan sensor diolah, mikrokontroler akan memberikan data olahan ke sistem data logger untuk diakuisisi, mikrokontroler juga memberikan data ke aplikasi penampil atau LCD untuk mencetak nilai pengukuran sensor dari data yang telah diolah oleh mikrokontroler. Sedangkan pada sistem (b), setelah nilai pembacaan sensor diolah, mikrokontroler akan mengirim data olahan ke *cloud* melalui platform Thinkspeak, selanjutnya Thinkspeak mengolah dan menampilkan data tersebut pada website.

D. Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor bertujuan untuk mengecek dan mengatur tingkat performa dari sensor, dengan cara membandingkan nilai pembacaan sensor dan nilai pembacaan instrumen pembanding yang telah memiliki standar pabrikasi dengan tingkat keakurasian yang lebih tinggi, sehingga sensor dapat dipastikan memiliki standar yang sama dengan instrumen pembanding. Kalibrasi dilakukan dengan dua metode, yaitu:

- 1) Input berulang: Memberikan input yang konstan pada sensor dan alat pembanding secara bersamaan untuk mendapatkan hasil nilai eror dan akurasi sensor.
- 2) Input tak berulang/berubah-ubah: Memberikan input naik (dari nilai terkecil hingga terbesar) dan input turun (nilai terbesar hingga terkecil) pada sensor dan

instrumen pembanding untuk mendapatkan grafik histerisis sensor.

Akurasi atau ketelitian adalah beda maksimum antara penunjukan instrumen dengan nilai sebenarnya. Akurasi sering disebut juga dengan eror maksimum. Persamaan untuk mendapatkan nilai akurasi ditunjukkan pada (1).

$$Akurasi = \left(\frac{V_r - V_a}{V_a} \right) \times 100\% \quad (1)$$

dimana V_r adalah hasil pengukuran dan V_a adalah harga atau nilai sebenarnya dari besaran yang diukur [10].

Eror atau kesalahan dalam pengukuran dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu kesalahan statis dan dinamis. Kesalahan statis disebabkan oleh pembatasan-pembatasan alat ukur atau hukum-hukum fisika yang mengatur tingkah laku alat ukur tersebut, sedangkan kesalahan-kesalahan dinamis disebabkan oleh ketidakmampuan instrumen untuk memberikan respons (tanggapan) yang cukup cepat bila terjadi perubahan-perubahan dalam variabel ukur.

Salah satu cara untuk menentukan kesalahan-kesalahan acak secara statis pada suatu alat ukur ialah dengan menggunakan standar deviasi atau σ . deviasi merupakan akar dari penjumlahan semua penyimpangan (deviasi, d) setelah dikuadratkan dibagi dengan banyaknya pembacaan. Secara matematis dituliskan seperti pada (2):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2}{n}} = \sqrt{\frac{d_1^2 + d_2^2 + d_3^2 + \dots + d_n^2}{n}} \quad (2)$$

Sedangkan kesalahan dinamis dapat dicitrakan dengan menggunakan grafik histerisis, yang di mana histerisis merupakan perbedaan antara nilai output pengukuran bila diberi input naik dan input turun secara bertahap.

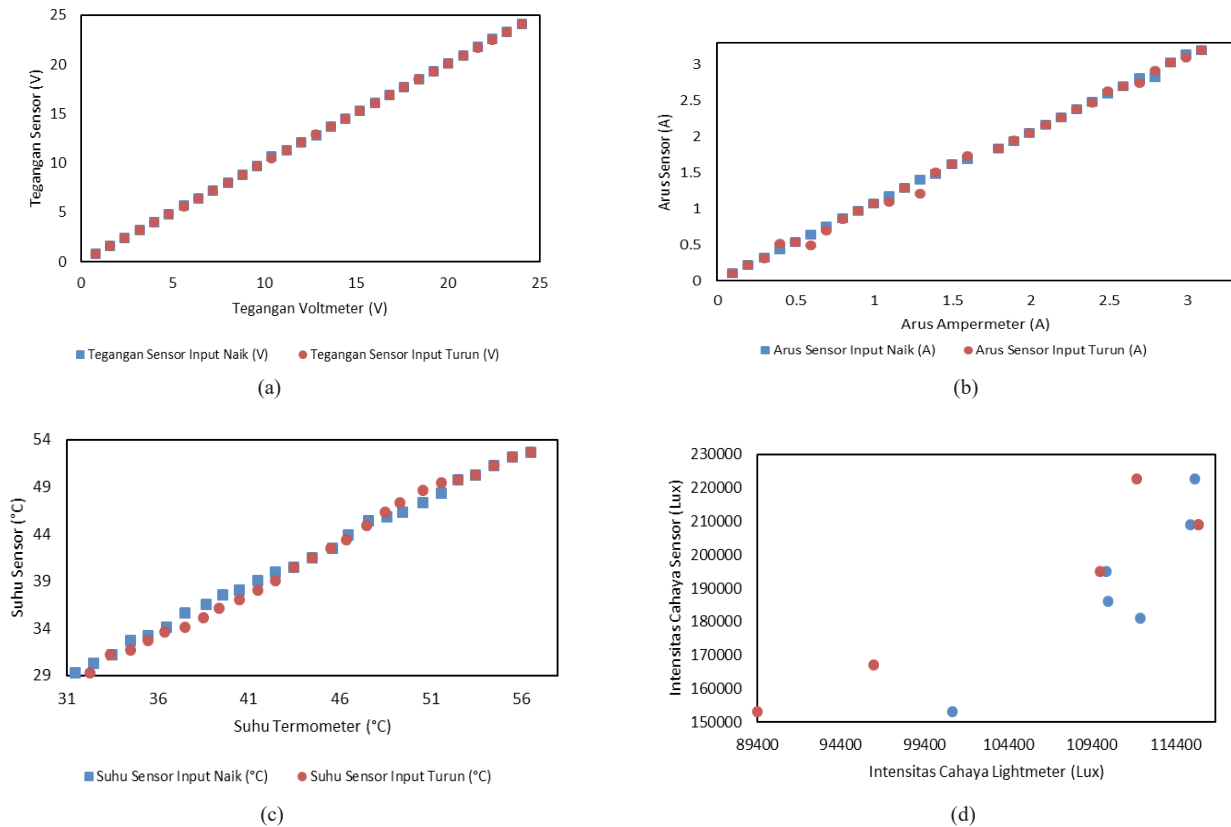
E. Pengujian Sistem

Pengujian kit sistem pemantauan kinerja panel surya dilakukan selama 3 hari, dengan durasi pengujian 8 jam dimulai dari pukul 08:00 hingga pukul 16:00. Lokasi pengujian adalah di *rooftop* Gedung N kampus Universitas Telkom Bandung dengan koordinat *latitude* S 6°58'36.71" (-6.97687°) dan *longitude* E 107°37'45.45" (107.62929°). Pengujian ini menggunakan sistem penyangga tetap (*fixed*) namun sudut pemasangan panel disesuaikan dengan arah datangnya matahari yang dibagi kepada tiga kategori waktu. Pada pukul 08.00-10.30, panel di pasang menghadap kearah utara dengan sudut altitude 48,83°; pada pukul 10.30-13.30 sudut altitude 90°; serta pada pukul 13.30-16.00 sudut altitude 50,69°. Data nilai sudut didapat dari kompilasi bulanan sudut datang matahari yang diambil dari website suncalc.org dan dikalkulasikan dengan menggunakan aplikasi Microsoft Excel.

Dari tiap pengujian, nilai tegangan V , arus I , suhu T dan intensitas cahaya I_v direkam. Hasil dari nilai tegangan dan arus ini digunakan untuk menghitung besar daya yang dihasilkan panel surya melalui (3).

$$P = V \cdot I \quad (3)$$

Sedangkan besar energi yang dihasilkan oleh panel surya



Gambar 5. Grafik kalibrasi input tak berulang naik dan turun bagi sensor: (a) tegangan, (b) arus, (c) suhu dan (d) intensitas cahaya

pada waktu t tertentu dihitung menggunakan (4).

$$W = P \cdot t = V \cdot I \cdot t \quad (4)$$

Besar daya yang dihasilkan panel surya, P_{out} dibandingkan dengan besar daya yang diterima dari pancaran radiasi matahari, P_{in} untuk mendapatkan nilai efisiensi panel surya, η seperti pada (5).

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{radiasi\ matahari} \times Luas\ Panel} \times 100\% \quad (5)$$

dimana I_{max} dan V_{max} masing-masing adalah besarnya nilai arus dan tegangan maksimum panel surya.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Kalibrasi Sensor

Kalibrasi sensor dilakukan menggunakan dua metode yaitu input berulang dan input tak berulang. Kalibrasi input berulang digunakan untuk memperoleh nilai akurasi dan eror/kesalahan statis sensor melalui perhitungan standar deviasi. Sedangkan kalibrasi input tak berulang naik dan turun digunakan untuk memperoleh citra kesalahan dinamis sensor melalui grafik histeresis. Nilai akurasi dan standar deviasi bagi setiap sensor (tegangan, arus, suhu dan intensitas cahaya) ditunjukkan pada Tabel 2. Sedangkan grafik histeresis bagi keempat sensor tersebut ditunjukkan oleh masing-masing Gambar 5 (a), (b), (c) dan (d).

Nilai akurasi dalam pengujian ini merepresentasikan nilai eror maksimum suatu sensor. Dapat dilihat dari Tabel

2, nilai akurasi atau eror maksimum bagi keempat sensor lebih kecil dari 5%, artinya semua sensor berfungsi dengan baik dan layak digunakan dalam pengujian.

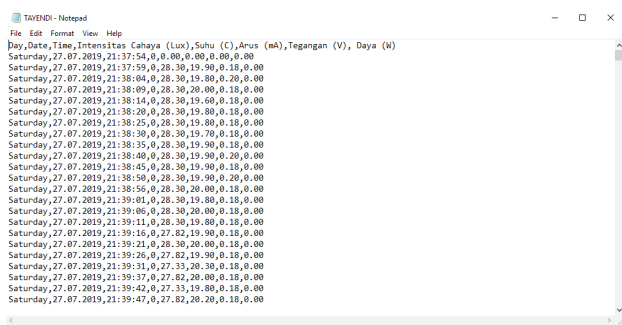
Gambar 5 (a), (b) dan (c) menunjukkan bahwa hasil kalibrasi sensor tegangan, arus dan suhu tidak menunjukkan gejala histeresis. Tidak wujudnya histeresis berarti bahwa respon atau tanggapan sensor tegangan, arus dan suhu tetap sama ketika diberikan input naik maupun turun.

Hasil berbeda ditunjukkan oleh grafik tanggapan sensor intensitas cahaya seperti ditunjukkan oleh Gambar 5 (d). Dari grafik ini terlihat adanya perbedaan tanggapan sensor ketika diberikan input naik dan input turun. Namun berdasarkan analisis regresi linear, grafik ini masih memiliki nilai koefisien determinasi yang baik yaitu 0,85 dan 0,89 bagi masing-masing input naik dan turun.

B. Analisis Kapasitas SD Card Memory

Tabel 2. Hasil kalibrasi sensor

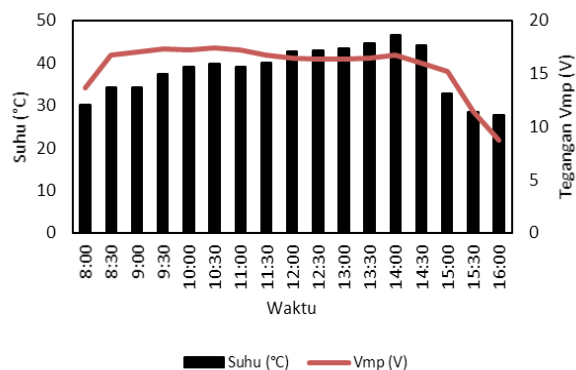
Jenis sensor	Nilai akurasi dan eror ($\mu \pm \sigma$ %)
Tegangan	$0,52 \pm 0,081$
Arus	$2,00 \pm 0,001$
Suhu	$3,72 \pm 0,290$
Intensitas cahaya	$0,91 \pm 0,000$



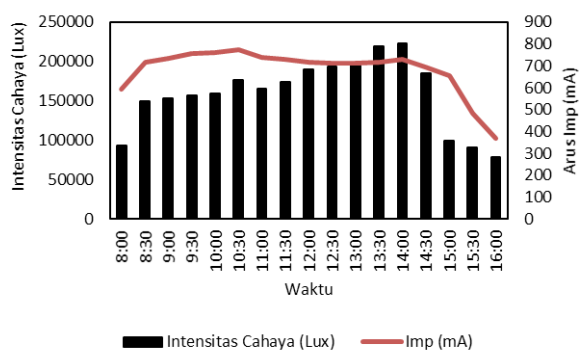
Gambar 6. Tampilan file.txt data logger

Modul *SD card memory* digunakan sebagai media penyimpanan data pada sistem pemantauan on site. Semua hasil pembacaan sensor dan waktu dari RTC akan disimpan setiap 5 menit sekali dengan menggunakan format file.txt. Gambar 6 merupakan tampilan dari file.txt dimana pada file tersebut terdapat hari, tanggal, jam dari RTC serta nilai pembacaan dari semua sensor.

Setelah dilakukan pengujian penyimpanan data pada modul *SD card memory*, diperoleh rata-rata penyimpanan data pada *SD card* sebesar 7 KB selama 10 menit. Jika sistem pemantauan kinerja panel surya hanya dihidupkan selama 8 jam per hari, maka hanya akan menghabiskan ruang penyimpanan memori sebesar 336 KB per harinya. Apabila sistem *logger* ini menggunakan *memory card* sebesar 8 MB yang memiliki kapasitas penyimpanan data maksimal sebesar 7,20 MB, maka kartu memori dapat menyimpan data akuisisi selama lebih kurang 61 tahun.



(a)



(b)

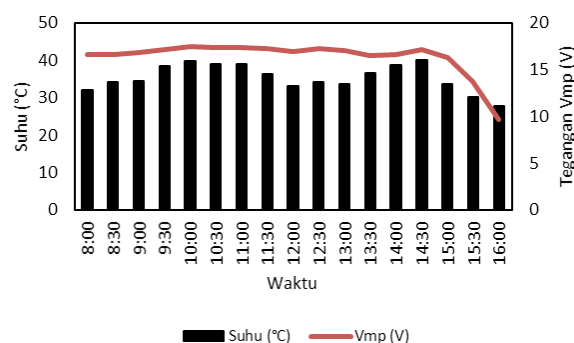
Gambar 7. Hasil pengujian hari pertama: (a) tegangan vs suhu, (b) arus vs intensitas cahaya

C. Analisis Kinerja Sistem Pemantauan

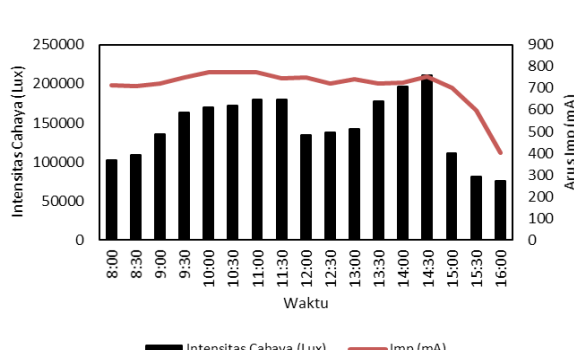
Hasil pengujian sistem pada hari pertama ditampilkan pada Gambar 7 (a) dan (b). Gambar 7 (a) menunjukkan besar tegangan yang dihasilkan panel surya dibandingkan dengan besar intensitas cahaya matahari. Tegangan maksimum dihasilkan pada pukul 14.00 sebesar 16,79 V dengan suhu pada panel sebesar 46,58°C, sedangkan tegangan minimum dihasilkan pada pukul 16.00 sebesar 8,76 V dengan suhu 27,84°C.

Gambar 7 (b) menunjukkan nilai arus yang dihasilkan panel surya dibandingkan dengan intensitas cahaya matahari yang menyinari panel. Intensitas cahaya maksimum berada pada pukul 14.00 sebesar 223120 lux dengan arus yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 731,55 mA, sedangkan intensitas cahaya minimum berada pada pukul 16.00 sebesar 78910 lux dengan arus yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 370,63 mA.

Hasil pengujian sistem pada hari kedua ditampilkan pada Gambar 8 (a) untuk besar tegangan yang dihasilkan panel surya dibandingkan dengan besar intensitas cahaya matahari dan (b) untuk nilai arus yang dihasilkan panel surya dibandingkan dengan intensitas cahaya matahari yang menyinari panel. Tegangan maksimum dihasilkan pada pukul 10.00 sebesar 17,45 V dengan suhu pada panel sebesar 39,96°C, sedangkan tegangan minimum dihasilkan pada pukul 16.00 sebesar 9,66 V dengan suhu 27,76°C. Intensitas cahaya maksimum berada pada pukul 10.00 sebesar 210762 lux dengan arus yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 755,4 mA, sedangkan intensitas

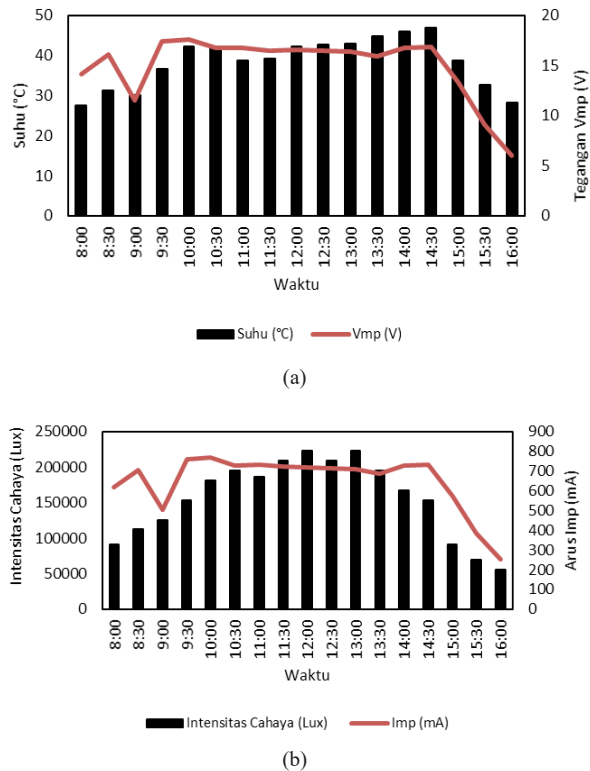


(a)



(b)

Gambar 8. Hasil pengujian hari kedua: (a) tegangan vs suhu, (b) arus vs intensitas cahaya



Gambar 9. Hasil pengujian hari ketiga: (a) tegangan vs suhu, (b) arus vs intensitas cahaya

cahaya minimum pada pukul 16.00 sebesar 75240 lux dengan arus yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 400,92 mA.

Besar tegangan yang dihasilkan panel surya dibandingkan dengan besar intensitas cahaya matahari dan besar nilai arus yang dihasilkan panel surya dibandingkan dengan intensitas cahaya matahari yang menyinari panel pada hari ketiga ditunjukkan masing-masing pada Gambar 9 (a) dan (b). Tegangan maksimum dihasilkan pada pukul 10.00 sebesar 17,64 V dengan suhu pada panel sebesar 42,32°C, sedangkan tegangan minimum dihasilkan pada pukul 16.00 sebesar 6,00 V dengan suhu 28,14°C. Intensitas cahaya maksimum berada pada pukul 10.00 sebesar 222822 lux dengan arus yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 721,25 mA, sedangkan intensitas cahaya minimum pada pukul 16.00 sebesar 55705 lux dengan arus yang dihasilkan oleh panel surya sebesar 253,23 mA.

Berdasarkan hasil pembacaan sensor yang didapat selama tiga hari, rata-rata penyinaran cahaya matahari maksimal berada pada pukul 10.00 hingga 14.30 WIB. Data yang ditampilkan oleh grafik pada Gambar 7, 8 dan 9 menunjukkan karakteristik panel surya yang apabila intensitas cahaya pada keadaan yang maksimal, maka suhu serta daya keluaran pada panel juga ikut meningkat, sedangkan jika intensitas cahaya matahari berkurang, maka suhu dan daya keluaran pada panel ikut berkurang.

Jika dilihat pada grafik perbandingan suhu terhadap tegangan keluaran panel surya, suhu dapat mempengaruhi tegangan keluaran pada panel surya, dimana bila suhu panel mengalami peningkatan maka tegangan keluaran

Tabel 3. Hasil Pengujian Sistem

Hari ke-	Jam	Vmax (V)	Imax (mA)	Pmax (W)	Tmax (°C)	Ev max (lux)	Total Emax (Wh)
1	14.00	16,79	731,55	12.28	46,58	223120	745,07
2	10.00	17,45	755,40	13.18	39,86	210762	799,58
3	10.00	17,64	721,25	12.72	42,32	222822	695,16
Mean	-	17.29	736.07	12.73	42.92	218901	746,60

Ket: V_{max} : Tegangan maksimum, I_{max} : Arus maksimum, P_{max} : Daya maksimum, T_{max} : Suhu maksimum, $E_{v,max}$: Intensitas cahaya maksimum, E_{max} : Keluaran energi maksimum (dalam sehari)

menurun, namun ketika suhu panel menurun, maka tegangan keluaran akan mengalami peningkatan. Hasil ini sesuai dengan pengujian yang dilakukan oleh El-Shaer dkk pada tahun 2014 [11].

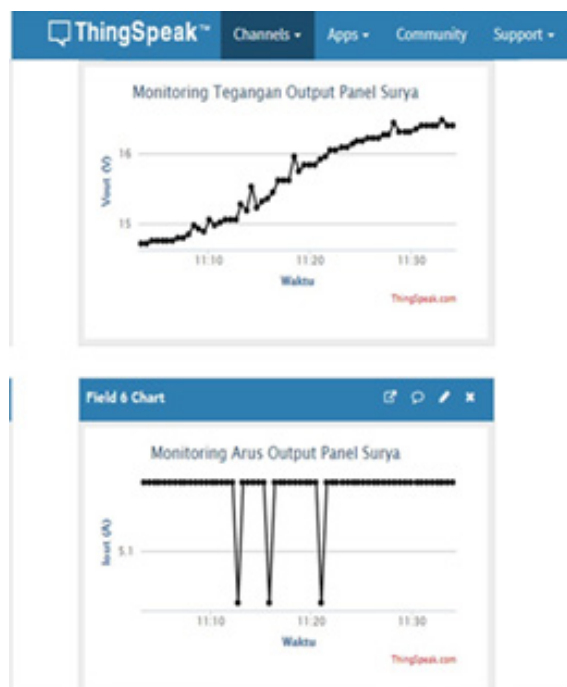
Melalui grafik perbandingan intensitas cahaya terhadap arus keluaran panel surya, dapat diperhatikan bahwa perubahan intensitas cahaya matahari akan mempengaruhi arus keluaran pada panel surya, dimana bila intensitas cahaya semakin tinggi maka arus keluaran juga semakin tinggi, sedangkan jika intensitas cahaya yang menyinari panel surya semakin rendah maka arus keluaran panel surya juga semakin rendah.

Kesimpulan hasil pengujian sistem pada hari 1,2 dan 3 ditunjukkan pada Tabel 3. Dari tabel ini dapat dilihat bahwa kinerja panel surya tidak persis sama setiap harinya namun nilai maksimum yang direkam memiliki kemiripan. Nilai energi yang dihasilkan dipengaruhi oleh suhu dan intensitas cahaya pada hari tersebut. Nilai tertinggi energi total maksimum yang dihasilkan panel surya selama satu hari dicatatkan pada hari kedua, yaitu sebesar 799,58 Wh. Sedangkan energi rata-rata dari total tiga hari pengujian sebesar 746,60 Wh dengan lama pengujian masing-masing 8 jam per hari.

Sesuai dengan data yang ditampilkan pada Tabel 3, diperoleh daya rata-rata maksimum yang dihasilkan per hari sebesar 12.73 W, dengan bidang panel surya sebesar 0.167 m² dan iradiasi rata-rata yang dipancarkan matahari per hari sebesar 1000 W/m² (pada keadaan cuaca cerah). Maka dapat diperoleh nilai efisiensi, η rata-rata panel surya sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% = \frac{17,23}{167} \times 100\% = 8\%$$

Panel surya yang dipasang pada sudut tetap merupakan salah satu penyebab rendahnya efisiensi yang dicapai pada pengujian ini. Peletakan panel pada sudut tetap ini mengakibatkan matahari tidak selalu berada tegak lurus terhadap panel surya sehingga daya yang dihasilkan menjadi berkurang. Walaupun begitu, nilai efisiensi ini dianggap cukup baik, sebagaimana yang dilaporkan oleh Shukhla et. al. bahwa efisiensi panel surya jenis *polycrystalline* dapat berkisar antara 7,15–11,19% [12]. Penggunaan pelacak surya dengan axis tunggal atau ganda diyakini dapat meningkatkan energi yang dihasilkan panel surya sebesar masing-masing 22% dan 60% [13], [14].



Gambar 10. Contoh tampilan data pada website Thingspeak

D. Analisis Kecepatan Pengiriman Data

Waktu yang dibutuhkan untuk mengirimkan data sensor dari mikrokontroler hingga ditampilkan ke website Thingspeak cukup bervariasi tergantung pada kecepatan internet. Pada kecepatan 7,3 Mbps, waktu yang dibutuhkan hanya 32 detik sedangkan jika kecepatan kurang dari 7,3 Mbps, waktu yang dibutuhkan hingga 100 detik. Rata-rata kecepatan pengiriman data dalam pengujian ini adalah 52,5 detik. Contoh tampilan data pada website Thingspeak ditunjukkan pada Gambar 10.

IV. KESIMPULAN

Sistem pemantauan lokal dan jarak jauh yang terdiri dari sensor tegangan, arus, suhu dan intensitas cahaya berhasil dirancang dan diimplementasikan dalam pengujian ini. Hasil kalibrasi bagi sensor tegangan, arus, suhu dan intensitas cahaya memberikan nilai akurasi sebesar masing-masing 0,52, 2,00, 3,72 dan 0,91%. Data nilai tegangan, arus, suhu dan intensitas cahaya berhasil direkam oleh data logger dan ditampilkan bentuk file *.txt setiap 5 menit sekali pada sistem pemantauan lokal. Sedangkan pada sistem pemantauan jarak jauh, data berhasil ditampilkan pada website Thingspeak dengan rata-rata kecepatan pengiriman data 52,5 detik.

Hasil pengujian kinerja panel surya *polycrystalline* 20 Wp selama tiga hari diperoleh rata-rata energi total yang dapat dihasilkan sebesar 746,60 Wh dengan efisiensi sebesar 8%. Nilai energi total dipengaruhi oleh tegangan dan arus yang dihasilkan panel surya. Tegangan yang

dihasilkan pula berbanding terbalik terhadap suhu panel surya sedangkan arus berbanding lurus terhadap intensitas cahaya.

Berdasarkan data-data yang telah dihasilkan dapat disimpulkan bahwa sistem pemantauan kinerja panel surya ini bekerja dengan baik dan panel surya memberikan keluaran sesuai dengan yang diharapkan.

REFERENSI

- [1] ESDM, "Kejar Target Bauran Energi 2025, Dibutuhkan Investasi EBT Hingga USD36,95 Miliar," 2019.
- [2] C. A. Mellit, A. M. Pavan, and S. A. Kalogirou, "Fault detection method for grid-connected photovoltaic plants," *Renew. Energy*, vol. 66, p. 99, 2014.
- [3] S. Irvine, "Solar Cells and Photovoltaics," in *Springer Handbook of Electronic and Photonic Materials*, Canada: Springer, 2017.
- [4] A. Hasyim Asy'ari, Jarmiko, "Intensitas Cahaya Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Sel Surya," *Simp. Nas. RAPI XI FT UMS*, p. 57, 2012.
- [5] S. Yuliananda, "Pengaruh Perubahan Intensitas Matahari Terhadap Daya Keluaran Panel Surya," *J. Pengabd. LPPM Untag Surabaya*, vol. 1, no. 2, pp. 193 – 202, 2015.
- [6] M. R. Fachri, I. D. Sara, Y. Away, M. R. Fachri, I. D. Sara, and Y. Away, "Pemantauan Parameter Panel Surya Berbasis Arduino secara Real Time," *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 11, no. 4, pp. 123-128, 2015.
- [7] H. Suryawinata, D. Purwanti, and S. Sunardiyo, "Sistem Monitoring pada Panel Surya Menggunakan Data logger Berbasis ATmega 328 dan Real Time Clock DS1307," *J. Teknik Elektro*, vol. 9, no. 1, 2017.
- [8] Putriani, M. Basyir, and Muhaimin, "Sistem Monitoring Alat Uji Karakteristik Panel Surya Berbasis Mikrokontroler," *J. Tektro*, vol. 3, no. 2, pp. 1–10, 2019.
- [9] W. Priharti, A. F. K. Rosmawati, and I. P. D. Wibawa, "IoT based photovoltaic monitoring system application," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1367, no. 1, 2019.
- [10] W. D. Cooper, *Instrumentasi Elektronik dan Teknik Pengukuran*. Jakarta: Erlangga, 1994.
- [11] A. El-Shaer, M. T. Tadros, and M. A. Khalifa, "Effect of Light intensity and Temperature on Crystalline Silicon Solar Modules Parameters," *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 4, no. 8, pp. 311–318, 2014.
- [12] K. N. Shukla, S. Rangnekar, and K. Sudhakar, "A comparative study of exergetic performance of amorphous and polycrystalline solar PV modules," *Int. J. Exergy*, vol. 17, no. 4, pp. 433–455, 2015.
- [13] I. H. Rosma, I. M. Putra, D. Y. Sukma, E. Safrianti, A. A. Zakri, and A. Abdulkarim, "Analysis of single axis sun tracker system to increase solar photovoltaic energy production in the tropics," *Proc. - 2018 2nd Int. Conf. Electr. Eng. Informatics Towar. Most Effic. W. Mak. Deal. with Futur. Electr. Power Syst. Big Data Anal. ICon EEI 2018*, pp. 183–186, 2018.
- [14] I. H. Rosma, J. Asmawi, S. Darmawan, B. Anand, N. D. Ali, and B. Anto, "The implementation and analysis of dual axis sun tracker system to increase energy gain of solar photovoltaic," *Proc. - 2018 2nd Int. Conf. Electr. Eng. Informatics Towar. Most Effic. W. Mak. Deal. with Futur. Electr. Power Syst. Big Data Anal. ICon EEI 2018*, pp. 187–190, 2018.