

Prototipe Alat Ukur Untuk Analisis Stabilitas Transien Arus DC Pada PLTS *On-Grid*

Muhamad Sardi Sopian¹, I Made Ari Nrartha^{1*}, Sabar Nababan¹

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mataram
Jl. Majapahit No. 62 Mataram 83125
E-mail: nrartha@unram.ac.id

Naskah Masuk: 31 Januari 2025; Diterima: 16 Juli 2025; Terbit: 31 Agustus 2025

ABSTRAK

Abstrak - Stabilitas transien pada sisi DC dalam sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *on-grid* menjadi aspek penting dalam memastikan keandalan dan efisiensi konversi daya. Fluktuasi irradiansi matahari, perubahan beban, serta gangguan dapat mempengaruhi kestabilan tegangan dan arus di sisi DC, yang berpotensi menurunkan kinerja sistem secara keseluruhan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan prototipe alat ukur yang dapat digunakan untuk menganalisis stabilitas transien arus DC pada sistem PLTS atap *on-grid* 600 Wp yang terdiri dari dua modul PV dengan kapasitas masing-masing sebesar 300 Wp yang dirangkai secara paralel. Prototipe ini dirancang untuk memantau parameter listrik utama seperti tegangan, arus, serta respons sistem terhadap gangguan transien yang diakibatkan oleh masuk/lepasnya pengaman sisi DC, hubung singkat pada modul PV, masuk/lepasnya PLTS ke *grid* dan efek bayangan pada salah satu modul PV. Metode yang digunakan mencakup perancangan perangkat keras berbasis sensor tegangan dan arus (ACS712), serta pengolahan data secara real-time menggunakan Arduino Mega 2560 dan modul kartu micro SD untuk interface penyimpanan data ke SDCard. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ukur yang dikembangkan mampu mendeteksi transien arus DC pada sistem PLTS atap *on-grid* 600 Wp. Terdapat tiga sensor arus untuk menampilkan arus transien dengan kesalahan ukur rata-rata sebesar 2,17%, 2,38%, dan 4,61 % untuk sensor arus pada output modul surya 1, modul surya 2, dan arus dari gabungan output dua modul surya. Hasil pengujian sistem PLTS tersebut akibat masuk/lepasnya pengaman sisi DC, hubung singkat pada modul PV, masuk/lepasnya PLTS ke *grid*, dan efek bayangan pada salah satu modul PV mengakibatkan transien arus yang membutuhkan waktu untuk stabil/kondisi *steady state* yang variatif antara 0,002 sampai 10,8 detik.

Kata kunci: Stabilitas Transien Arus DC, Analisis Kestabilan, PLTS atap *on-grid* 600 Wp, Alat Ukur.

ABSTRACT

Abstract - Transient stability on the DC side of *on-grid* Solar Power Generation Systems (PLTS) is a crucial aspect in ensuring the reliability and efficiency of power conversion. Fluctuations in solar irradiance, load changes, and disturbances can affect the stability of voltage and current on the DC side, potentially degrading the overall performance of the system. This study aims to design and develop a prototype measuring device that can be used to analyze the transient stability of DC current in a 600 Wp rooftop *on-grid* solar power system, consisting of two PV modules each with a capacity of 300 Wp connected in parallel. The prototype is designed to monitor key electrical parameters such as voltage, current, and the system's response to transient disturbances caused by the connection/disconnection of DC-side protection, short circuits on the PV module, the connection/disconnection of the PLTS to the grid, and shading effects on one of the PV modules. The method used includes hardware design based on voltage and current sensors (ACS712), and real-time data processing using an Arduino Mega 2560 and a microSD card module for data storage. Test results show that the developed measuring device is capable of detecting DC current transients in the 600 Wp rooftop *on-grid* PLTS system. There are three current sensors used to display transient currents, with an average measurement error of 2.17%, 2.38%, and 4.61% for the current sensors on solar module 1 output, solar module 2 output, and the combined output current of both solar modules, respectively. The PLTS system test results due to DC-side protection switching, PV module short circuits, grid connection/disconnection, and shading on one PV module resulted in current transients that required stabilization (*steady-state* condition) times ranging from 0.002 to 10.8 seconds.

Keywords: DC Current Transient Stability, Stability Analysis, 600 Wp *on-grid* Rooftop PV System, Measuring Instrument.

Copyright © 2025 Jurnal Teknik Elektro dan Komputasi (ELKOM)

1. PENDAHULUAN

Pada era modern, pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi semakin penting untuk merealisasikan keberlanjutan energi baru terbarukan (EBT). Dewasa ini, sumber daya energi yang ramah lingkungan seperti PLTS sangat dibutuhkan dikarenakan dalam pengoperasian PLTS tidak memerlukan bahan bakar yang berasal dari fosil dan tidak menghasilkan polusi bagi lingkungan [1], menghasilkan emisi jejak karbon yang jauh lebih kecil dari pembakaran bahan bakar fosil [2]. Tetapi, transisi energi menuju penyimpanan energi surya membutuhkan banyak perspektif salah satunya biaya listrik, pengurangan manfaat dan menurunnya biaya penyimpanan energi surya [3].

Meskipun PLTS menawarkan keberlanjutan dan efisiensi, pengoperasiannya sangat bergantung pada iradiasi matahari yang bersifat fluktuatif, yang dapat mempengaruhi sistem kelistrikan, terutama ketika PLTS terhubung ke jaringan listrik (*grid*). Ketidakstabilan sistem terkait tegangan, frekuensi, dan sudut rotor menjadi faktor krusial dalam integrasi PLTS ke *grid* [4]. Analisis stabilitas transien pada sistem pembangkit listrik terbarukan yang menggunakan inverter dapat dilakukan dengan pemodelan optimasi ketidaksetaraan matriks linier, di mana simulasi menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan respons dinamis sistem [5]. Selain itu, analisis transien akibat efek shading secara eksperimental dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh bayangan terhadap tegangan dan arus DC yang dihasilkan oleh modul PV [6]. Eksperimen lanjutan membutuhkan alat ukur yang mampu menganalisis fenomena transien yang terjadi akibat gangguan dalam sistem PLTS *on-grid*.

Pembuatan prototipe alat ukur atau perangkat lainnya saat ini semakin mudah berkat perkembangan mikrokontroler, termasuk keluarga Arduino yang menggunakan berbagai jenis mikrokontroler seperti ATmega328P, ATmega2560, ATmega32U4, AT91SAM3X8E, ATSAM21G18, ATSAM21, dan STM32H747 [7]. Di antara keluarga Arduino, yang paling populer adalah Arduino Uno dengan mikrokontroler ATmega328P. Arduino Uno banyak digunakan untuk berbagai aplikasi sistem, seperti prototipe alat pemilah dan penghancur sampah [8], sistem pengendalian kualitas kondisi ruangan ideal [9], sistem monitoring baterai [10], sistem identifikasi kandungan harmonisa pada beban listrik mobile [11], serta *smart energy* meter berbasis Arduino Uno yang diintegrasikan dengan Raspberry Pi [12]. Sementara itu, untuk rancangan sistem yang membutuhkan pemrograman lebih kompleks dengan kapasitas memori yang lebih besar, Arduino Mega 2560 dapat menjadi pilihan yang lebih sesuai [13].

Penelitian ini bertujuan untuk membuat prototipe alat ukur guna menganalisis stabilitas transien arus DC pada PLTS atap *on-grid* berkapasitas 600 Wp. Kinerja PLTS tersebut telah diukur berdasarkan pencatatan data menggunakan data logger [14], dengan parameter yang meliputi daya yang dihasilkan pada sisi DC dan AC, serta efisiensinya. Namun, data yang diperoleh hanya mencerminkan kondisi steady state, sehingga diperlukan penelitian lanjutan untuk menganalisis stabilitas transien arus DC, khususnya akibat berbagai gangguan, seperti masuk/lepasnya pengaman pada sisi DC, hubung singkat pada modul PV, masuk/lepasnya sistem PLTS ke *grid*, dan efek bayangan pada modul PV. Prototipe alat ukur ini dikembangkan menggunakan Arduino Mega 2560, yang memiliki kapasitas memori besar, sehingga dapat menghasilkan pengukuran yang lebih detail untuk tiga variabel arus DC, yaitu arus DC pada modul PV 1, modul PV 2, dan arus DC gabungan dari kedua modul PV tersebut.

2. KAJIAN PUSTAKA

2.1. PLTS *On-Grid*

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *on-grid* adalah sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan sinar matahari, di mana sel surya pada modul PV mengonversi radiasi foton matahari menjadi energi listrik DC. Listrik DC tersebut kemudian diubah menjadi listrik AC oleh inverter, dan keluaran inverter disalurkan langsung ke sistem distribusi PLN [15].

2.2. Arus Transien

Arus transien adalah arus bersifat sementara yang muncul sesaat dan tidak konstan, di mana besarnya akan mengecil seiring waktu. Gangguan transien arus pada PLTS *on-grid* terjadi akibat perubahan mendadak arus listrik yang dihasilkan oleh sistem fotovoltaik (PV), yang dapat disebabkan oleh berbagai faktor, baik faktor internal, seperti terputusnya fuse, maupun faktor eksternal, seperti bayangan akibat awan. Fluktuasi ini dapat mempengaruhi stabilitas dan efisiensi jaringan listrik, yang terlihat dari daya keluaran PLTS *on-grid* pada sisi DC maupun AC yang tidak optimal. Oleh karena itu, penting untuk memahami dan meminimalkan dampak gangguan transien agar sistem bekerja lebih stabil dan efisien [16].

2.3. Karakteristik Stabilitas Transien

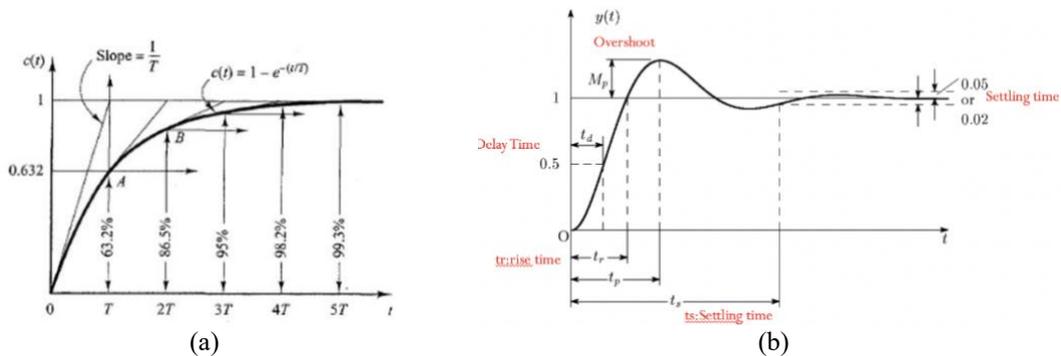
Respon transien dalam penilaian stabilitas sistem dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu sistem orde pertama dan sistem orde kedua. Pembagian ini didasarkan pada jumlah elemen penyimpanan dalam sistem. Sistem orde pertama memiliki satu elemen penyimpanan, yang dapat berupa kapasitor (C) atau

induktor (L). Sementara itu, sistem orde kedua memiliki dua elemen penyimpanan dalam satu rangkaian, yaitu induktor (L) dan kapasitor (C).

Salah satu karakteristik yang penting untuk analisis stabilitas transien orde pertama adalah kurva respon eksponensial $c(t)$, ketika $t = T$, maka dari $c(t)$ adalah 0,632, atau respon $c(t)$ telah mencapai nilai 63,2% dari nilai akhir. Hasil ini dapat dituliskan pada Persamaan 1 dengan mensubstitusikan $t = T$.

$$c(t) = 1 - e^{-(t/T)} = 0,632 = 63,2\% \tag{1}$$

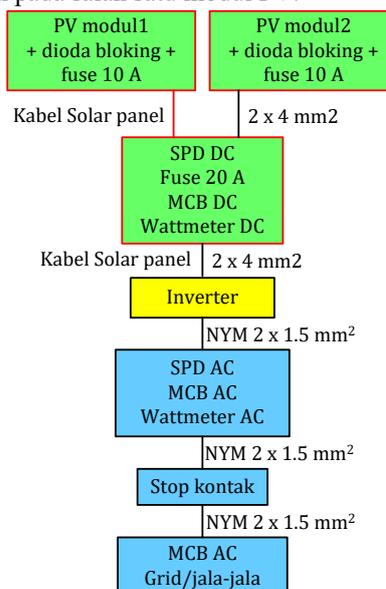
Respon sistem orde pertama ($c(t)$) akibat perubahan tiba-tiba sebesar 1 dapat ditunjukkan pada Gambar 1(a), sedangkan respon orde dua ($y(t)$) akibat perubahan input yang tiba-tiba sebesar 1 ditunjukkan pada Gambar 1(b). Analisis stabilitas transien orde kedua memerlukan beberapa parameter untuk mengetahui karakteristik transien berupa delay time, overshoot, peak time dan settling time [17].



Gambar 1. Respon transien sistem, (a). orde pertama, (b). orde dua

3. METODE PENELITIAN

Sistem PLTS *on-grid* yang dijadikan objek penelitian adalah sistem PLTS atap *on-grid* 600 Wp yang berada di Gedung B, Fakultas Teknik, Universitas Mataram [18] yang ditunjukkan dengan diagram blok pada Gambar 2. Terdapat dua modul PV monocrystalline yang dirangkai secara paralel dengan kapasitas masing-masing adalah 300 Wp. Pada sistem PLTS tersebut terdapat 2 kotak panel, yaitu kotak panel DC dan AC. Analisis stabilitas transien arus DC dengan melakukan beberapa simulasi gangguan seperti lepas/masuknya modul PV ke sistem, hubung singkat pada salah satu modul PV, masuk/lepasnya sistem PLTS ke *grid*, dan efek bayangan pada salah satu modul PV.

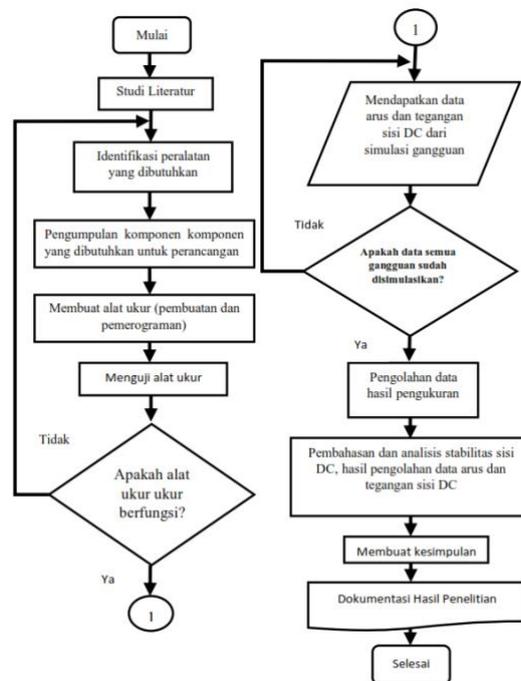


Gambar 2. Blok diagram PLTS 600 Wp *on-grid*

Prototipe alat ukur digunakan untuk mengukur perubahan arus (transien) sekaligus mensimulasikan gangguan untuk mengetahui respon transien arus DC pada sistem PLTS *on-grid* 600 Wp. Prototipe alat ukur menggunakan Arduino Mega 2560 yang mempunyai kapasitas memori terbesar (SRAM, dan EEPROM sebesar 8 KB, dan 4 KB) diantara semua keluarga Arduino. *Analog to Digital Conversion* (ADC) Arduino untuk konversi pengukuran analog dari sensor ke nilai digital adalah 10 bit dan dapat membaca data maksimum sebanyak 10.000 data per detik [19]. Prototipe alat ukur dilengkapi dengan 2 buah solid state relay (SSR) pada output masing-masing modul PV untuk simulasi gangguan, 3 sensor arus ACS712, sensor tegangan 50 Volt DC, relay AC untuk gangguan sisi AC, Real Time Clock (RTC) untuk mencatat waktu, 3 push button untuk setting simulasi gangguan yang diberikan pada sistem dan modul kartu micro SD dengan SD Card untuk menyimpan hasil pengukuran.

3.1. Alur Penelitian

Alur penelitian ditampilkan dalam diagram alir pada Gambar 3. Penelitian diawali dengan studi literatur yang membahas prototipe alat ukur untuk analisis kestabilan transien. Tahapan selanjutnya adalah identifikasi kebutuhan peralatan, pengumpulan bahan, dan perancangan alat ukur. Setelah alat selesai dirancang, dilakukan pengujian fungsional serta kalibrasi sensor menggunakan alat ukur standar (multimeter) sebagai pembanding. Kalibrasi sensor arus dan tegangan dilakukan melalui uji reliabilitas terhadap sejumlah data hasil pengukuran sensor terhadap alat ukur standar keluaran pabrikan. Dari hasil uji tersebut, disusun persamaan linier dengan korelasi yang kuat untuk digunakan secara kontinu dalam proses konversi sinyal analog dari sensor menjadi data digital. Setelah sensor dinyatakan memiliki reliabilitas yang baik, penelitian dilanjutkan ke tahap simulasi gangguan. Data arus DC yang diukur selama simulasi direkam dan disimpan dalam SD Card pada prototipe alat ukur. Selanjutnya, data diolah menggunakan perangkat lunak MATLAB untuk divisualisasikan dalam bentuk grafik. Analisis terhadap grafik dilakukan untuk memahami karakteristik transien arus DC berdasarkan skenario gangguan yang telah ditentukan. Berdasarkan hasil simulasi dan analisis tersebut, disusun kesimpulan serta dokumentasi akhir penelitian.



Gambar 3. Diagram alir penelitian

3.2. Diagram Blok Prototipe Alat Ukur

Diagram blok prototipe alat ukur ditampilkan pada Gambar 4. Proses simulasi gangguan menggunakan prototipe alat ukur terdiri dari tiga tahap, yaitu input, proses, dan output. Penjelasan masing-masing tahap adalah sebagai berikut:

1. Tahap Input

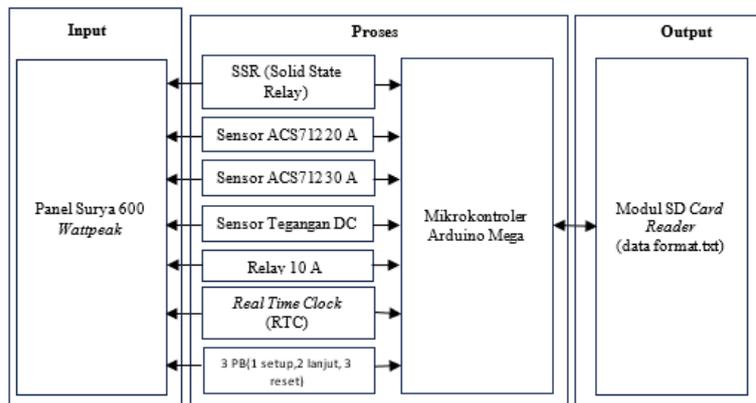
Tiga relay, yaitu SSR1, SSR2, dan relay AC, menerima input atau pengaturan melalui tiga push button. Setiap push button memiliki fungsi tertentu, yaitu push button 1 untuk tombol setup, push button 2 untuk tombol lanjut, dan push button 3 untuk tombol reset.

2. Tahap Proses

Pada tahap ini, Arduino Mega 2560 mengeksekusi simulasi gangguan setelah push button 2 ditekan, sesuai dengan jenis gangguan yang diatur melalui push button 1. Eksekusi gangguan dilakukan dengan mengaktifkan atau menonaktifkan relay SSR1, SSR2, dan relay AC dalam kombinasi tertentu. Selanjutnya, sensor ACS712 dan sensor tegangan mengukur arus serta tegangan pada masing-masing rangkaian.

3. Tahap Output

Hasil pengukuran arus dan tegangan pada tahap ini disimpan dalam SD Card. Format nama file yang digunakan pada SD Card adalah "hari(1-31)menit(1-60)KodeRelay(1-8).txt".



Gambar 4. Diagram blok alat ukur

3.3. Rancangan dan kode program prototipe alat ukur

1. Rancangan

Gambar 5 menunjukkan rancangan prototipe alat ukur arus DC transien menggunakan mikrokontroler Arduino Mega 2560. Komponen yang digunakan meliputi dua buah *Solid State Relay* (SSR) yang dipasang secara seri pada terminal positif (+), berfungsi untuk mensimulasikan masuk dan lepasnya pengaman pada sisi DC. Terdapat dua buah sensor ACS712 20A untuk mengukur arus transien akibat gangguan pada terminal modul PV, serta satu sensor ACS712 30A untuk mengukur arus total dari kedua modul PV. Prototipe alat ukur juga dilengkapi dengan sensor tegangan berbasis pembagi tegangan, SD card sebagai media penyimpanan data, Real-Time Clock (RTC) untuk mencatat waktu (hari, jam, menit, dan detik), serta sebuah LCD 16x2 yang menampilkan jenis simulasi yang ditetapkan dan kondisi prototipe alat ukur.

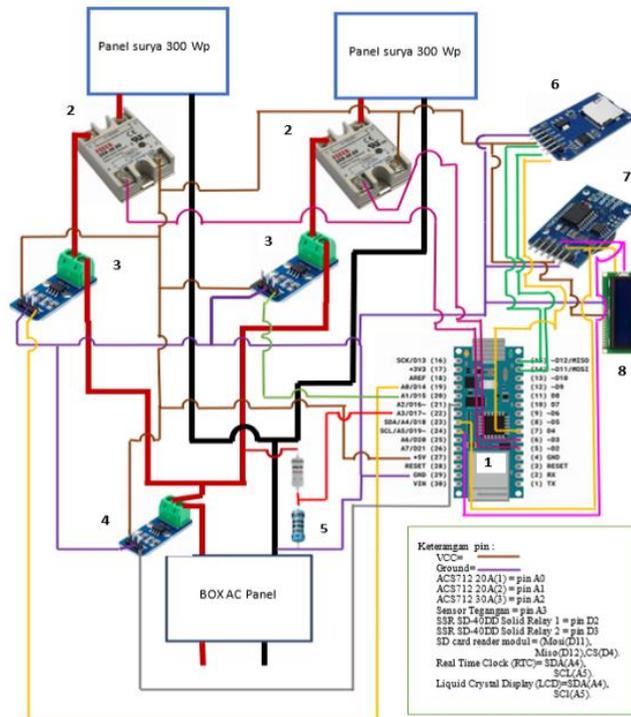
2. Kode program

Pemrograman prototipe alat ukur dilakukan menggunakan Arduino IDE dengan bahasa C++. Pengukuran arus DC transien pada Arduino memerlukan beberapa logika pemrograman, mulai dari deklarasi variabel, perulangan (looping), pembacaan dan konversi data, hingga penyimpanan data.

Deklarasi variabel berisi deklarasi variabel status awal relay pada posisi-1 (posisi sebelum disetel). Status awal relay adalah false, yang berarti relay diatur dalam kondisi normally open saat simulasi pengamanan aktif. Sebaliknya, ketika simulasi putusnya pengaman, relay diatur dalam kondisi normally closed. Proses setup relay dan dimulainya simulasi diatur dalam kondisi false, yang berarti belum dijalankan. Selanjutnya, variabel untuk menyimpan arus DC dari sensor ACS712 diset sebagai array dengan kapasitas 300 data untuk masing-masing sensor.

Perulangan (*looping*) dalam program digunakan untuk menjalankan perintah berdasarkan input dari variabel "tombolReset" (push button 3) dan "tombolLanjut" (push button 2) setiap kali tombol ditekan. Ketika kondisi relayAktif mencapai nilai 2 (penekanan ketiga), simulasi dimulai, dan proses pengukuran sensor arus ACS712 dijalankan dengan perulangan "for (int i = 0; i <= 3; i++)". Setelah perulangan sebanyak empat kali tersebut, eksekusi relay dilakukan, dan sensor ACS712 tetap melakukan pengukuran untuk memperoleh data sebelum dan sesudah eksekusi relay. Pengukuran sensor ACS712 dilanjutkan untuk iterasi "for (int i = 4; i <= 299; i++)" dan pengukuran sensor tegangan setelah eksekusi relay (sesuai dengan status relay yang telah disetel sebelumnya). Pengukuran masing-masing sensor arus dilakukan secara berulang tidak menggunakan sampling rate yang ditetapkan secara eksplisit. Waktu pengambilan data pengukuran sensor arus bergantung pada kemampuan pembacaan ADC Arduino, yang mampu

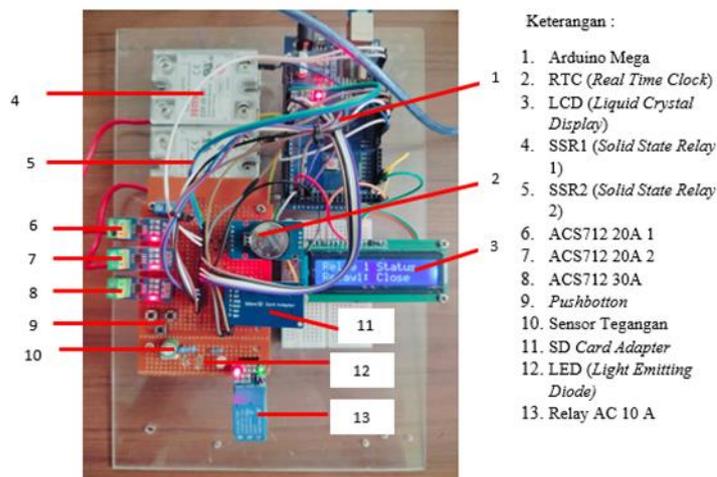
membaca hingga 10.000 data per detik. Waktu pengukuran arus transien ditentukan berdasarkan selang waktu antara eksekusi relay hingga terkumpul 300 data pengukuran dari masing-masing sensor arus. Waktu total pengambilan data sensor arus dihitung menggunakan rumus waktuTotal = waktuSelesai - waktuMulai, untuk mengetahui durasi proses iterasi sebanyak 300 data arus per sensor ACS712 “(i = 0; i <= 299; i++)” dengan delay 75 milidetik, hingga pesan "ukur selesai" ditampilkan pada LCD dan indikator LED menyala sebagai indikator proses pengukuran arus transien selesai dilakukan. Selanjutnya, data arus yang telah diperoleh akan dikonversi dari nilai analog ke nilai digital dalam satuan Ampere. Hasil konversi kemudian disimpan dalam variabel simpanData(arus1, arus2, arus3, tegangan).



Gambar 5. Rancangan prototipe alat ukur

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bentuk fisik prototipe alat ukur untuk analisis stabilitas transien arus DC pada PLTS atap *on-grid* 600 Wp ditunjukkan pada Gambar 6. Setiap nomor yang ditampilkan pada Gambar 6 menunjukkan komponen-komponen yang digunakan pada prototipe alat ukur.



Gambar 6. Tampilan fisik prototipe alat ukur

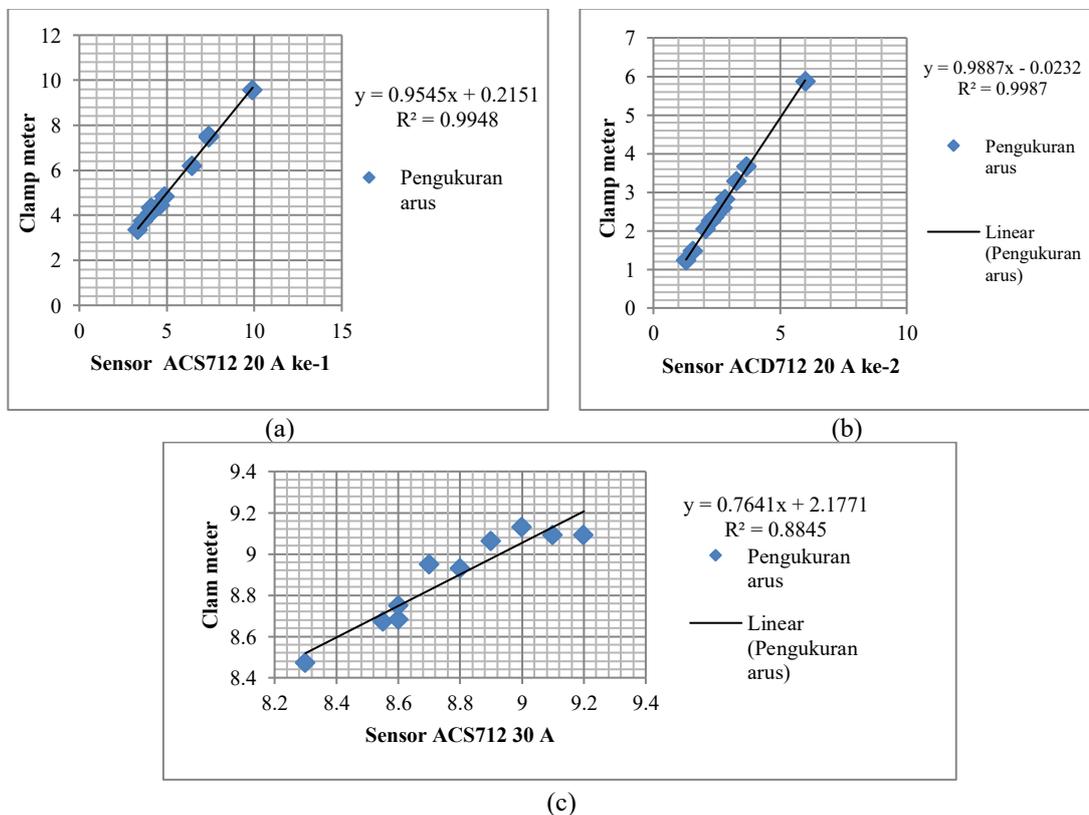
4.1. Kalibrasi Sensor ACS712 Pada Prototipe Alat Ukur

Gambar 7 menunjukkan beberapa peralatan yang digunakan untuk kalibrasi sensor arus ACS712 20A dan 30A. Peralatan yang digunakan mencakup clamp meter (tang ampere) sebagai alat ukur standar pembandingan, sehingga arus DC yang terukur oleh sensor ACS712 dapat disesuaikan dengan hasil pengukuran arus DC dari clamp meter. Beban yang digunakan dalam proses kalibrasi terdiri dari beban resistor (Gambar 7(a)) dan arus DC yang dihasilkan dari output modul PV PLTS atap *on-grid* (Gambar 7(b)).



Gambar 7. Kalibrasi sensor arus ACS712, (a). hasil pengukuran arus DC menggunakan beban resistor, (b). hasil pengukuran arus DC dari PLTS *on-grid*

Gambar 8 adalah hasil pendekatan linear untuk tiga sensor arus yang digunakan pada prototipe. Gambar 8(a), (b) dan (c) adalah pendekatan linear untuk sensor ACS712 20A ke-1, sensor ACS712 20A ke-2, dan sensor ACS712 30A. Pendekatan linear hasil pengukuran sensor setelah kalibrasi menggunakan faktor sensitifitas sensor ACS712 dari datasheet dibandingkan dengan alat ukur clamp meter menunjukkan model linear berdasarkan sebaran data aktual pengukuran sensor mempunyai R^2 mendekati satu. Sensor ACS712 20A ke-1 dan ke-2 mempunyai nilai R^2 rentang 0.90 – 1.00, menunjukkan model linear untuk hasil pengukuran sensor tersebut sangat cocok dan sangat konsisten. Sensor ACS712 30 A mempunyai nilai R^2 rentang 0.75 – 0.89, menunjukkan model linear untuk hasil pengukuran sensor tersebut masih menunjukkan pola konsisten.



Gambar 8. Pendekatan linear sensor arus dan hasil uji R^2 dari *trendline* tersebut, (a). ACS712 20A ke-1, (b). ACS712 20A ke-2, (c). ACS712 30A.

Tabel 1 menunjukkan kesalahan pengukuran sensor ACS712 dibandingkan dengan hasil pengukuran arus menggunakan alat ukur standar (clamp meter), Hasil pengukuran sensor pada Tabel 1 adalah hasil model pendekatan linear yang digunakan untuk konversi pada pemrograman Arduino IDE. Pengukuran arus DC adalah pada rentang 0–10 Ampere.

Tabel 1. Persentase kesalahan ukur sensor ACS712 terhadap hasil ukur clamp meter

No	ACS712 20 A ke-1	ACS712 20 A ke-2	ACS712 30 A
1	3,88	5,43	3,23
2	1,46	6,12	3,34
3	4,04	1,34	7,93
4	0,40	4,88	6,63
5	0,83	2,22	3,70
6	3,82	0,00	5,67
7	4,64	0,49	5,96
8	0,00	2,13	0,77
9	0,00	0,82	3,30
10	2,67	0,35	5,61
Rerata	2,17	2,38	4,61

Tabel 1 menunjukkan kesalahan ukur sensor ACS712 setelah dilakukan kalibrasi menggunakan faktor sensitifitas dari rekomendasi datasheet sensor ACS712 dan pendekatan lienar menunjukkan kesalahan ukur rata-rata sebesar 2,17%, 2,38% dan 4,61% untuk hasil pengukuran arus dari ACS712 20 A ke-1, ACS712 20 A ke-2, dan ACS712 30 A.

4.2. Hasil Pengukuran Transien Arus DC Akibat Gangguan

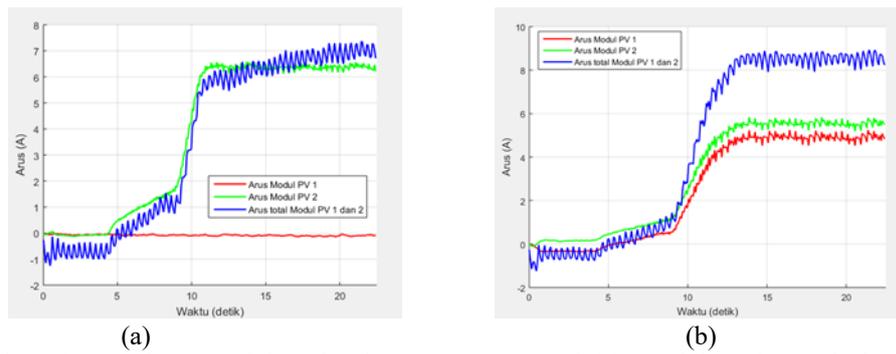
Simulasi gangguan yang diberikan pada sistem PLTS atap 600 Wp *on-grid* untuk mengetahui stabilitas transien arus DC meliputi lepas/masuknya salah satu modul PV dari sistem, hubung singkat pada salah satu modul PV, lepas/masuknya sistem PLTS ke *grid*, dan efek bayangan pada salah satu modul PV. Gambar 9 menunjukkan posisi prototipe alat ukur pada kotak panel DC untuk mensimulasikan gangguan-gangguan tersebut.



Gambar 9. Posisi prototipe alat ukur pada kotak panel DC

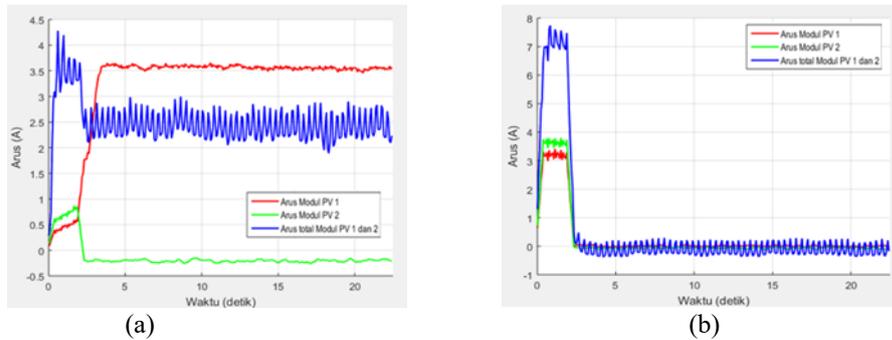
1. Masuk/Lepasnya Modul PV Pada Sistem PLTS *On-Grid*

Simulasi pengukuran transien arus DC akibat masuknya salah satu atau dua modul PV secara simultan ditunjukkan pada Gambar 10(a) dan 10(b). Gambar 10(a) menunjukkan kondisi di mana modul PV 2 masuk ke sistem (on), sementara arus DC dari modul PV 1 ke sistem bernilai nol karena modul PV 1 dalam kondisi off. Arus DC dari modul PV 2 mengalami proses transien, dimulai dengan nilai arus 0,12 A yang meningkat menuju 6,5 A dalam waktu 5 detik. Arus total yang masuk ke *grid* mengalami keterlambatan dibandingkan arus dari modul PV 2, dengan kecenderungan transien yang serupa. Gambar 10(b) menunjukkan kondisi di mana kedua modul PV, yaitu PV 1 dan PV 2, masuk secara simultan ke *grid*, menghasilkan arus total yang merupakan penjumlahan dari arus kedua modul. Waktu transien dari kondisi awal hingga mencapai kondisi steady state sekitar 4 detik.



Gambar 10. Masuknya modul PV ke sistem PLTS *on-grid*, (a). Modul PV 2 masuk sistem, (b). Modul PV

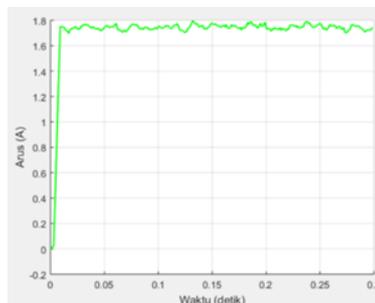
Simulasi pengukuran transien arus DC akibat lepasnya salah satu atau dua modul PV secara simultan ditunjukkan pada Gambar 11(a) dan 11(b). Gambar 11(a) menunjukkan kondisi di mana modul PV 2 tiba-tiba lepas dari sistem, yang mengakibatkan arus total yang dikirim ke *grid* berkurang. Namun, arus dari modul PV 1 meningkat. Waktu transien untuk gangguan ini lebih singkat dibandingkan dengan saat masuknya modul PV ke sistem, yaitu sekitar 1,78 detik. Gambar 11(b) menunjukkan kondisi di mana modul PV 1 dan 2 secara simultan keluar dari sistem. Akibatnya, arus yang masuk ke *grid* tiba-tiba hilang dalam waktu 0,58 detik.



Gambar 11. Lepasnya modul PV ke sistem PLTS *on-grid*, (a). Modul PV 2 keluar sistem, (b). Modul PV 1 & 2 keluar sistem secara simultan

2. Hubung Singkat Pada Salah Satu Modul PV

Simulasi pengukuran transien arus DC akibat hubung singkat pada modul PV 2 ditunjukkan pada Gambar 12. Gambar 12 menunjukkan hubung singkat pada modul PV 2 menghasilkan arus hubung singkat 1,83 pada irradiansi 437,8 W/m² (hasil ukur solar power meter) dengan suhu panel 48°C (hasil ukur termogan). Waktu transien arus DC adalah 0,002 detik untuk gangguan hubung singkat.

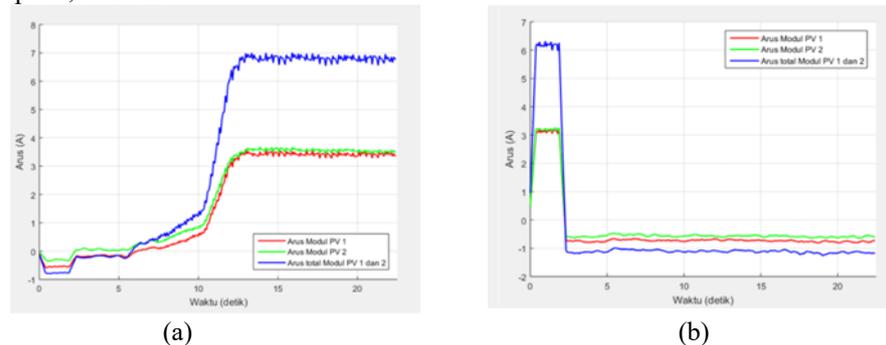


Gambar 12. Hubung singkat pada modul PV 2

3. Masuk/Lepasnya Sistem PLTS Ke Grid

Simulasi pengukuran transien arus DC akibat masuk dan lepasnya sistem PLTS ke *grid* ditunjukkan pada Gambar 13.(a) dan (b). Gambar 13.(a) waktu transien yang dibutuhkan sampai nilai steady state arus DC yang masuk inverter menuju *grid* cukup lama sekitar 10,8 detik.

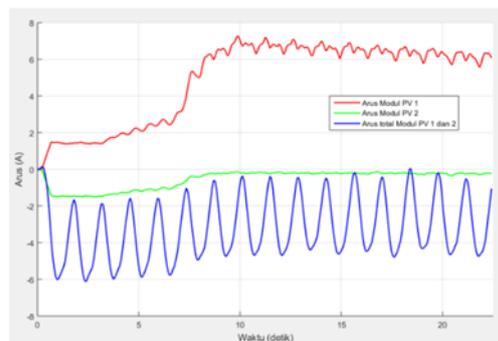
Sedangkan Gambar 13.(b) menunjukkan waktu transien arus DC pada saat PLTS keluar dari *grid* cukup cepat 0,17 detik.



Gambar 13. Koneksi sistem PLTS ke *grid*, (a). Masuknya sistem PLTS ke *grid*, (b). Keluarnya sistem PLTS ke *grid*

4. Efek Bayangan Pada Salah Satu Modul PV

Simulasi pengukuran transien arus DC akibat modul PV 2 yang tertutup sepenuhnya oleh bayangan ditunjukkan pada Gambar 14. Bayangan pada modul PV 2 diciptakan dengan menutup seluruh permukaan modul secara tiba-tiba menggunakan kain hitam. Hasil pengukuran arus DC menunjukkan bahwa arus dari modul PV 2 menjadi negatif, seolah-olah arus dari modul PV 1 mengalir ke modul PV 2. Arus total yang dihasilkan mengalir ke sistem *grid* melalui inverter dan beresilasi selama periode pengukuran 24 detik. Efek bayangan pada modul PV 2 juga mempengaruhi modul PV 1, menyebabkan arus DC yang diberikan ke *grid* mengalami transien selama 4 detik.



Gambar 14. Hasil pengukuran arus DC akibat modul PV 2 mendapatkan efek bayangan sepenuhnya

4.3. Analisis Hasil Pengukuran Transien Arus DC

Berdasarkan hasil pengukuran arus DC pada beberapa simulasi gangguan dapat dianalisis hasil pengukuran transien arus DC sebagai berikut:

1. Waktu transien arus DC akibat lepasnya pengaman sisi DC dan PLTS ke *grid* mempunyai waktu transien lebih singkat kurang dari 2 detik dari pada masuknya pengaman sisi DC dan PLTS ke *grid* yang membutuhkan waktu hampir 11 detik.
2. Waktu transien tersingkat sebesar 0,002 detik pada saat modul PV mengalami gangguan hubung singkat.
3. Efek bayangan sangat berpengaruh terhadap modul PV yang dirangkai secara paralel dan menghasilkan arus negatif pada modul PV yang mendapatkan efek bayangan. Arus total yang masuk ke *grid* beresilasi selama terjadinya efek bayangan.
4. Bentuk transien arus DC pada semua simulasi gangguan pada penelitian ini, menunjukkan sistem PLTS atap *on-grid* 600 Wp mempunyai karakteristik respon gangguan orde pertama.

5. KESIMPULAN

Prototipe alat ukur untuk analisis stabilitas transien arus DC pada PLTS untuk kapasitas kecil yang diterapkan pada sistem PLTS atap *on-grid* 600 Wp berfungsi dengan baik. Seluruh komponen, baik perangkat lunak maupun perangkat keras, beroperasi dengan baik dan mampu mengukur transien arus DC pada gangguan-gangguan yang mungkin terjadi pada sistem PLTS atap *on-grid* tersebut. Sensor arus (ACS712) memenuhi kualitas pengukuran dengan persentase kesalahan kurang dari 5%. Prototipe alat ukur

ini juga mampu mengukur besaran transien arus DC dalam rentang waktu 1 hingga 75 milidetik berdasarkan kapasitas memori Arduino Mega yang digunakan pada rancangan prototipe. Waktu transien arus DC akibat lepasnya pengaman sisi DC dan PLTS ke *grid* mempunyai waktu transien lebih singkat daripada masuknya pengaman sisi DC dan PLTS ke *grid*. Waktu transien tersingkat terjadi pada saat modul PV mengalami gangguan hubung singkat. Efek bayangan sangat berpengaruh terhadap modul PV yang dirangkai secara paralel dan menghasilkan arus negatif pada modul PV yang mendapatkan efek bayangan. Arus total yang masuk ke *grid* beresilasi selama terjadinya efek bayangan. Bentuk transien arus DC pada semua simulasi gangguan pada penelitian ini, menunjukkan sistem PLTS atap *on-grid* 600 Wp mempunyai karakteristik respon

Saran untuk penelitian berikutnya yaitu prototipe perlu dikembangkan untuk pengukuran sistem PLTS yang memiliki kapasitas yang lebih besar. Selain itu, prototipe hasil penelitian ini dapat digunakan untuk mengetahui lebih dalam pengaruh komponen-komponen pengaman seperti *blocking* dioda dan *bypass* dioda terhadap stabilitas transien arus DC pada sistem PLTS kapasitas kecil.

REFERENSI

- [1] M. Bošnjaković, R. Santa, Z. Crnac, dan T. Bošnjaković, “Environmental Impact of PV Power Systems,” *Sustain.*, vol. 15, no. 15, pp. 1–26, 2023.
- [2] M. Tawalbeh, A. Al-Othman, F. Kafiah, E. Abdelsalam, F. Almomani, dan M. Alkasrawi, “Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook,” *Sci. Total Environ.*, vol. 759, p. 143528, 2021.
- [3] N. Jayaraj, A. Klarin, dan S. Ananthram, “The transition towards solar energy storage: a multi-level perspective,” *Energy Policy*, vol. 192, p. 114209, 2024.
- [4] G. B. Patil, S. S. Raghuvanshi, dan L. D. Arya, “Stability Analysis of Grid-Integrated PV Systems,” *Int. J. Eng. Trends Technol.*, vol. 72, no. 4, pp. 51–66, 2024.
- [5] W. Tang, B. Li, S. Hou, X. Shao, dan H. Yu, “Transient Stability Analysis for Grid-Connected Renewable Power Generation Systems Based on LMI Optimization Modelling,” *Electronics*, vol. 13, no. 24, 2024.
- [6] A. S. Saidi, M. Ben Slimene, dan M. A. Khlifi, “Transient Stability Analysis of Photovoltaic System with Experimental Shading Effects,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 8, no. 6, pp. 3592–3597, 2018.
- [7] “Arduino.” <https://www.arduino.cc/>
- [8] I. D. Rahman dan M. A. Auliq, “Prototipe Alat Pemilah dan Penghancur Sampah Berbasis Mikrokontroler Arduino UNO R3 Sebagai Bahan Pupuk Organik,” *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 6, pp. 245–254, 2024.
- [9] S. D. Nursyahuda dan B. Hariadi, “Rancang Bangun Sistem Pengendalian Kualitas Kondisi Ruangan Ideal Berbasis Arduino Uno Dengan Metode Fuzzy logic,” *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 6, no. 1, pp. 36–47, 2024.
- [10] R. H. Saputra, K. Sugiarto, dan M. F. Lesmana, “Perancangan Plant Automation untuk Battery Monitoring System Menggunakan Arduino Uno,” *J. Tek. Elektro dan Komputasi*, vol. 6, no. 1, pp. 125–135, 2024.
- [11] A. B. Muljono, I. M. A. Nrartha, I. M. Ginarsa, dan I. M. B. Sukmadana, “Identifikasi dan Pengolahan Kandungan Harmonisa Sinyal Arus pada Beban Listrik Mobile Berbasis Arduino UNO,” *J. Otomasi Kontrol dan Instrumentasi*, vol. 9, no. 2, 2017.
- [12] A. B. Muljono, I. M. A. Nrartha, I. M. Ginarsa, dan I. M. B. Sukmadana, “Rancang Bangun Smart Energy Meter Berbasis UNO dan Raspberry Pi,” *J. Rekayasa Elektr.*, vol. 14, no. 1, pp. 9–18, 2018.
- [13] “Mega 2560 Rev3.” <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560/>
- [14] I. M. A. Nrartha, A. A. Mahendra, I. M. Ginarsa, dan A. B. Muljono, “Performance Analysis of On-Grid Rooftop Solar Power Plant with 600 Wp Capacity Based on Data Logger,” *J. Renew. Energy, Electr. Comput. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 131–141, 2024.
- [15] A. Ardiansyah, I. N. Setiawan, dan I. W. Sukerayasa, “Perancangan PLTS Atap on-grid System Pada Kantor Badan Perencanaan Pembangunan Daerah Penelitian Dan Pengembangan Kota Probolinggo,” *J. SPEKTRUM*, vol. 8, no. 4, pp. 200–209, 2022.
- [16] W. Widyaningsih *et al.*, “Analisis Arus, Tegangan dan Daya Automatic Transfer Switch pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya Dengan Kapasitas 1200 WP,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 18, p. 519, Dec. 2023.
- [17] K. Ogata, *Modern control engineering*, 4th edition. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [18] A. Deniarahman, Sultan, and I. M. A. Nrartha, “Perencanaan pembangkit listrik tenaga surya rooftop kapasitas 600 Wp on-grid,” *Jeitech*, vol. 2, no. 2, pp. 22–33, 2024.
- [19] Arduino, “Arduino - Reference,” *Language Reference*, 2016. <https://www.arduino.cc/en/Reference/HomePage>.