

Design and Analysis of Arduino-Based Automatic Switching Control for Hybrid PV–Grid Systems with Load Prioritization (salah make woi)

Article History:

Received

xx December 20xx

Revised

xx December 20xx

Accepted

xx January 20xx

MISBAHUL MUNIR, S.T., M.T.¹, ACHMAD BAYU HIJRIANTO², GALANG PRATAMA RAMSI³, AHMAD RAFI ATILA⁴, HANYA BELA KIRI⁵, NADINE AMELIA RAHMASARI⁶

^{1,2,3,4,5,6}Teknologi Rekayasa Pembangkit Energi, Universitas Negeri Malang, Indonesia
misbahul.munir.fv@um.ac.id

ABSTRAK

Peningkatan kebutuhan energi listrik mendorong pengembangan sistem energi terbarukan yang bekerja secara efisien serta mampu beroperasi secara otomatis. Penelitian ini merancang sistem hybrid antara PLTS dan PLN berbasis Arduino Uno dengan metode automatic switching dan load prioritization guna menjaga kestabilan pasokan listrik pada beban prioritas. Sistem memanfaatkan panel surya 200 WP, baterai 12V 100Ah, inverter 300W, sensor, dan relay sebagai pengatur distribusi daya. Beban yang digunakan meliputi WiFi router, CCTV, dan lampu LED dengan total konsumsi energi sebesar 660 Wh per hari. Hasil analisis menunjukkan kapasitas energi baterai yang dapat digunakan sebesar 840 Wh dan energi efektif panel surya sekitar 800 Wh per hari sehingga masih mampu memenuhi kebutuhan beban sistem. Sistem juga dirancang melakukan switching otomatis ke PLN saat tegangan baterai berada di bawah batas minimum untuk mencegah over-discharge.

Kata kunci: Hybrid System, Arduino, Automatic Switching, Load Prioritization

ABSTRACT

The increasing demand for electrical energy has encouraged the development of efficient and automatic renewable energy systems. This study designs an Arduino Uno-based hybrid PV–Grid system using automatic switching and load prioritization methods to maintain power continuity for priority loads. The system utilizes a 200 WP solar panel, a 12V 100Ah battery, a 300W inverter, sensors, and relays for power distribution control. The connected loads consist of a WiFi router, CCTV, and LED lighting with a total energy consumption of 660 Wh/day. Analysis results show that the usable battery energy reaches 840 Wh, while the effective solar energy is approximately 800 Wh/day, which is sufficient to support the system loads. The system automatically switches to the utility grid when the battery voltage drops below the minimum threshold to prevent over-discharge.

Keywords: Hybrid System, Arduino, Automatic Switching, Load Prioritization

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik di Indonesia mengalami peningkatan dari waktu ke waktu seiring bertambahnya jumlah penduduk, kemajuan teknologi, serta meningkatnya aktivitas ekonomi masyarakat. Namun, sebagian besar pasokan energi listrik saat ini masih bergantung pada sumber energi berbahan bakar fosil, sehingga diperlukan pengembangan energi terbarukan yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Kumar dkk. (Kumar et al., 2021) menjelaskan bahwa pemanfaatan energi surya menjadi salah satu solusi potensial untuk mendukung kebutuhan energi listrik modern.

Salah satu energi terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan adalah Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Li dkk. (Li et al., 2022) menyatakan bahwa sistem hybrid renewable energy mampu meningkatkan keandalan suplai energi melalui kombinasi beberapa sumber energi listrik. Sistem PLTS memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber utama pembangkit listrik dan dinilai lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan emisi secara langsung selama proses operasinya. Namun, Hasan dan Mekhilef (Hasan & Mekhilef, 2021) menjelaskan bahwa performa PLTS dipengaruhi oleh kondisi cuaca, intensitas penyinaran matahari, dan perubahan lingkungan sehingga energi listrik yang dihasilkan cenderung berubah-ubah. Oleh sebab itu, dibutuhkan suatu sistem pengelolaan energi yang mampu menjaga kestabilan suplai daya sekaligus meningkatkan efisiensi distribusi energi listrik.

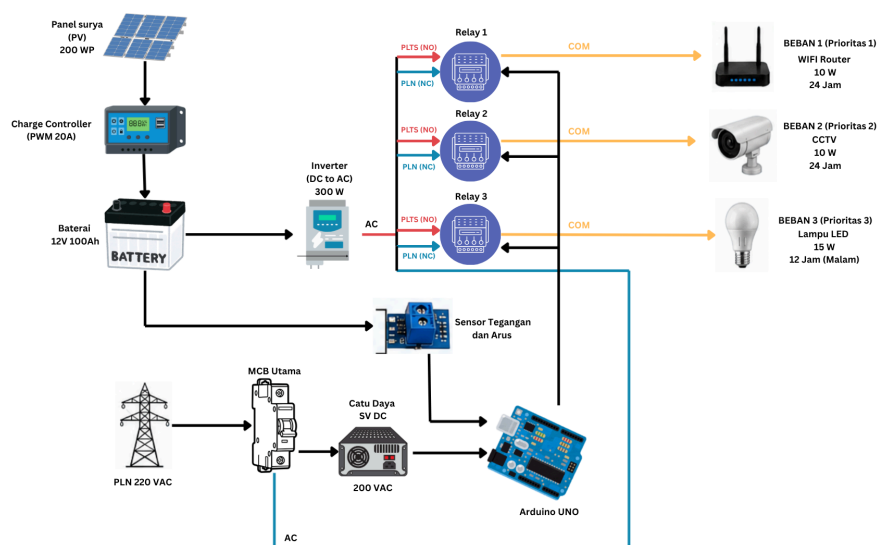
Salah satu pendekatan yang dapat digunakan yaitu penerapan sistem hybrid yang menggabungkan PLTS dengan jaringan listrik PLN. Li dkk. (Li et al., 2022) menjelaskan bahwa sistem hybrid memungkinkan pasokan listrik tetap tersedia ketika daya dari PLTS menurun atau saat kapasitas baterai berada pada kondisi rendah. Selain itu, Kurniawan dkk. (Kurniawan et al., 2024) menyatakan bahwa penggunaan sistem kendali berbasis mikrokontroler dapat membantu proses pengaturan distribusi energi dan perpindahan sumber daya secara otomatis. Hidayat dkk. (Hidayat et al., 2024) juga menjelaskan bahwa automatic transfer switch mampu melakukan perpindahan sumber daya listrik secara otomatis ketika suplai energi utama mengalami gangguan.

Beberapa penelitian terdahulu telah membahas pengembangan strategi manajemen energi serta sistem kontrol pada hybrid renewable energy systems guna meningkatkan efisiensi penggunaan energi. Rahman dkk. (Rahman et al., 2022) menjelaskan bahwa strategi manajemen energi diperlukan untuk menjaga kestabilan distribusi daya pada sistem hybrid. Akan tetapi, sebagian besar penelitian masih terfokus pada monitoring system dan automatic transfer switching tanpa memperhatikan prioritas penggunaan beban berdasarkan kondisi kapasitas baterai. Singh dkk. (Singh et al., 2026) menyatakan bahwa penerapan metode *load prioritization* mampu menjaga kontinuitas suplai listrik pada beban utama ketika kapasitas energi sistem mengalami penurunan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini merancang sistem hybrid PLTS–PLN berbasis Arduino Uno dengan menerapkan metode **automatic switching** dan **load prioritization**. Sistem dirancang agar mampu mengatur distribusi daya secara otomatis sesuai kondisi kapasitas baterai, sehingga pemanfaatan energi menjadi lebih efisien dan suplai listrik pada beban prioritas tetap terjaga.

2. METODA

2.1 Desain Sistem



Gambar 1. Blok Diagram Sistem Hybrid PLTS–PLN

Sistem yang dikembangkan merupakan sistem hybrid yang memadukan sumber energi dari PLTS dan PLN. Berdasarkan **Gambar 1**, energi listrik yang dihasilkan panel surya berkapasitas 200 WP dialirkan menuju *solar charge controller* PWM 20A untuk mengontrol proses pengisian baterai 12V 100Ah. Selanjutnya, energi yang tersimpan di dalam baterai dikonversi menjadi tegangan AC menggunakan inverter 300 W sebelum disalurkan ke beban. Dalam kondisi normal, PLTS berfungsi sebagai sumber energi utama untuk memenuhi kebutuhan daya sistem.

Pada bagian kontrol, Arduino Uno digunakan sebagai pusat kendali sistem dengan menerima masukan dari sensor tegangan dan sensor arus guna memantau kondisi daya secara *real-time*. Data tersebut kemudian digunakan Arduino Uno untuk mengendalikan relay pada proses *automatic switching* dan *load prioritization*. Sistem memanfaatkan tiga relay untuk mengatur penyaluran daya ke tiga kelompok beban sesuai tingkat prioritasnya. Masing-masing relay disusun dengan konfigurasi *Normally Open* (NO) untuk sumber PLTS dan *Normally Closed* (NC) untuk sumber PLN. Saat tegangan baterai turun di bawah batas minimum yang telah ditentukan, sistem akan secara otomatis memindahkan sumber suplai ke PLN melalui relay agar kontinuitas pasokan listrik pada beban prioritas tetap terjaga.

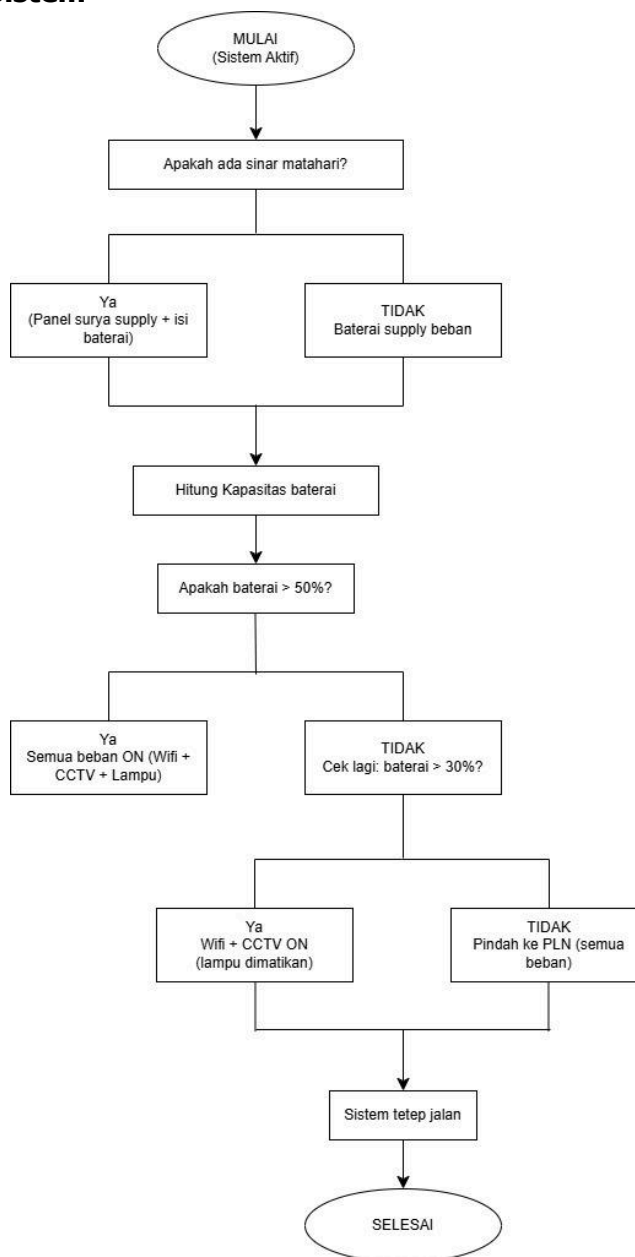
2.2 Spesifikasi Komponen

Komponen yang digunakan dalam penelitian ini meliputi perangkat pembangkit listrik, sistem penyimpanan energi, sistem kontrol, dan perangkat distribusi daya. Pemilihan spesifikasi setiap komponen dilakukan dengan mempertimbangkan kebutuhan daya beban serta kapasitas sistem hybrid yang dirancang. Rincian spesifikasi komponen utama yang digunakan pada sistem dapat dilihat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Spesifikasi Komponen Sistem Hybrid PLTS–PLN

Komponen	Spesifikasi
Panel Surya	200 WP
Baterai	12V 100Ah
Inverter	300W
Arduino	Arduino Uno
SCC	PWM 20A
Relay	3 Channel
Sensor Arus	ACS712
Sensor Tegangan	DC Voltage Sensor

2.3 Prinsip Kerja Sistem



Gambar 2. Diagram Alur Sistem Hybrid PLTS–PLN

Berdasarkan **Gambar 2**, sistem hybrid PLTS–PLN dirancang dengan memanfaatkan panel surya sebagai sumber energi utama dan baterai sebagai media penyimpanan energi listrik. Saat sistem beroperasi, sensor akan mendeteksi keberadaan cahaya matahari. Apabila sinar matahari tersedia, energi yang dihasilkan panel surya digunakan untuk menyuplai daya ke beban sekaligus mengisi baterai melalui *solar charge controller*. Sebaliknya, ketika sinar matahari tidak tersedia atau intensitasnya rendah, baterai akan mengambil alih fungsi sebagai sumber energi utama untuk memenuhi kebutuhan daya beban. Setelah itu, sistem akan memonitor kapasitas baterai untuk menentukan mekanisme distribusi daya yang sesuai.

Ketika kapasitas baterai masih berada di atas 50%, seluruh beban seperti WiFi router, CCTV, dan lampu LED tetap beroperasi secara normal. Namun, apabila kapasitas baterai turun hingga di bawah 50%, sistem menerapkan metode *load prioritization* dengan menonaktifkan beban non-prioritas berupa lampu LED, sementara WiFi router dan CCTV tetap menyala guna mengurangi konsumsi energi baterai. Selanjutnya, jika kapasitas baterai menurun hingga kurang dari 30%, sistem secara otomatis melakukan perpindahan sumber daya ke listrik PLN melalui relay. Mekanisme *automatic switching* tersebut dilakukan untuk menjaga kestabilan suplai listrik serta mencegah baterai mengalami *over-discharge* yang dapat memengaruhi umur dan performa baterai.

2.4 Metode Pengujian dan Analisis

Metode analisis sistem dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem hybrid PLTS–PLN dalam menyuplai kebutuhan energi beban berdasarkan kapasitas baterai dan energi yang dihasilkan panel surya. Analisis dilakukan melalui perhitungan kebutuhan energi beban, kapasitas energi baterai, arus beban, serta efisiensi sistem. Parameter beban yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Parameter Beban Sistem

Beban	Daya (W)	Waktu Operasi (Jam)	Energi (Wh)
WiFi Router	10	24	240
CCTV	10	24	240
Lampu LED	15	12	180
Total	35		660

Perhitungan kebutuhan energi beban dilakukan menggunakan persamaan berikut:

$$E = P \times t \quad (1)$$

Kapasitas energi baterai dihitung menggunakan persamaan:

$$E = V \times Ah \quad (2)$$

Perhitungan arus beban dilakukan menggunakan persamaan:

$$I = \frac{P}{V} \quad (3)$$

Perhitungan arus beban dilakukan menggunakan persamaan:

$$\eta = \frac{E_{\text{beban}}}{E_{\text{sumber}}} \times 100\% \quad (4)$$

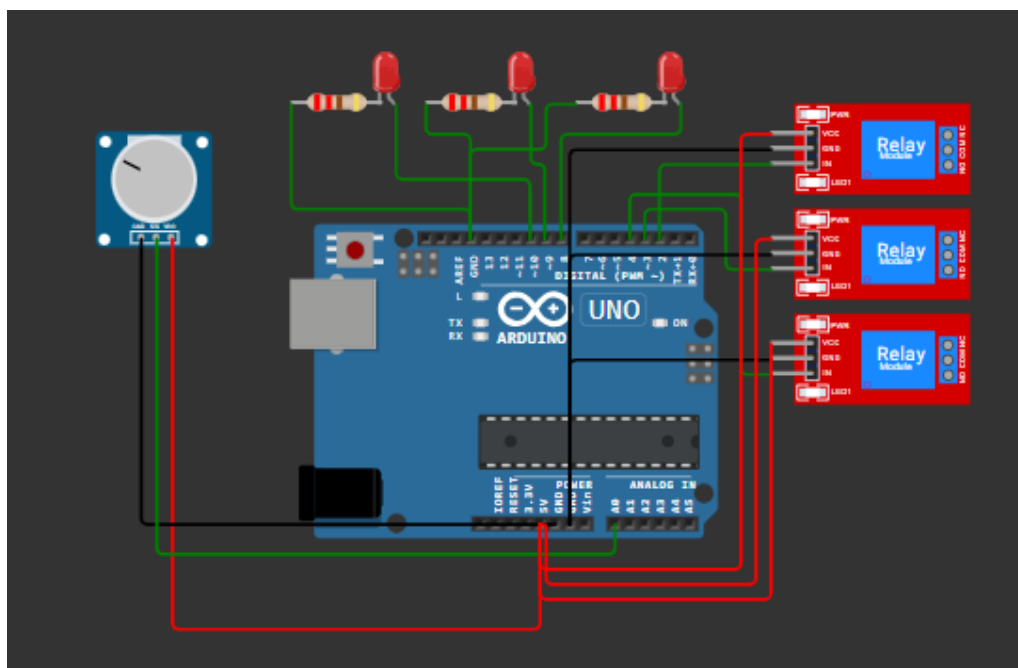
Hasil dari perhitungan tersebut digunakan untuk menganalisis kemampuan sistem dalam menjaga kontinuitas suplai daya, menentukan kapasitas energi yang tersedia, serta mengevaluasi efektivitas metode automatic switching dan load prioritization pada sistem hybrid PLTS–PLN.

2.5 Simulasi Sistem

Simulasi sistem dilakukan menggunakan platform Wokwi untuk memverifikasi logika kontrol pada sistem hybrid PLTS–PLN berbasis Arduino Uno. Simulasi ini bertujuan untuk menguji mekanisme *automatic switching* dan *load prioritization* berdasarkan nilai tegangan baterai yang terdeteksi oleh sensor. Dalam proses simulasi, Arduino Uno berperan sebagai pusat pengendali yang mengatur kerja relay sesuai dengan kondisi kapasitas baterai.

Pengujian simulasi dilakukan dalam beberapa skenario, meliputi kondisi baterai normal, kondisi saat kapasitas baterai mulai menurun, serta kondisi perpindahan sumber energi ke PLN. Pada saat tegangan baterai masih berada di atas batas minimum, seluruh beban tetap beroperasi menggunakan suplai energi dari PLTS. Kemudian, ketika kapasitas baterai turun melewati batas tertentu, sistem akan menonaktifkan beban non-prioritas berupa lampu LED untuk menghemat penggunaan energi. Jika tegangan baterai terus mengalami penurunan hingga berada di bawah batas minimum, relay akan secara otomatis mengalihkan sumber daya ke listrik PLN agar suplai daya tetap terjaga.

Selain digunakan untuk menguji mekanisme kerja sistem, simulasi juga dimanfaatkan untuk memantau status relay dan hasil pembacaan sensor melalui serial monitor Arduino Uno secara real-time. Hasil dari simulasi tersebut digunakan untuk memastikan bahwa logika kontrol yang dirancang telah bekerja sesuai dengan perencanaan sistem.



Gambar 3. Tampilan Simulasi Sistem pada Wokwi

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Analisis Kebutuhan Beban

Analisis kebutuhan beban dilakukan untuk mengetahui total konsumsi energi listrik harian pada sistem hybrid PLTS–PLN. Beban yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari WiFi router, CCTV, dan lampu LED yang dikategorikan sebagai beban prioritas. Perhitungan energi dilakukan berdasarkan daya masing-masing beban dan lama waktu penggunaan setiap harinya menggunakan Persamaan (1). Hasil perhitungan kebutuhan energi beban ditunjukkan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Analisis Kebutuhan Energi Beban

Beban	Daya (W)	Waktu Operasi (Jam/hari)	Energi (Wh/hari)
WiFi Router	10	24	240
CCTV	10	24	240
Lampu LED	15	12	180
Total	35		660

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 3, total konsumsi energi listrik sistem sebesar 660 Wh per hari. Kebutuhan energi terbesar berasal dari WiFi router dan CCTV karena kedua beban tersebut beroperasi secara terus-menerus selama 24 jam. Nilai total kebutuhan energi ini kemudian dijadikan acuan dalam menentukan kapasitas baterai, kapasitas panel surya, serta metode pengaturan distribusi daya pada sistem hybrid PLTS–PLN.

3.2 Analisis Kapasitas Baterai

Analisis kapasitas baterai dilakukan untuk mengetahui kemampuan sistem dalam menyimpan dan menyuplai energi listrik ke beban. Pada penelitian ini digunakan baterai dengan spesifikasi 12 V 100 Ah. Perhitungan kapasitas energi baterai dilakukan menggunakan Persamaan (2). Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh kapasitas energi total baterai sebesar 1200 Wh. Namun, untuk menjaga umur pakai baterai dan mencegah terjadinya kondisi *over-discharge*, sistem menerapkan batas *Depth of Discharge* (DoD) sebesar 70%. Dengan demikian, energi baterai yang dapat dimanfaatkan (*usable energy*) sebesar 840 Wh.

Selanjutnya, estimasi waktu cadangan (*backup time*) dihitung berdasarkan total daya beban sebesar 35 W sehingga diperoleh waktu operasi baterai sekitar 24 jam. Hasil perhitungan tersebut menunjukkan bahwa kapasitas baterai yang digunakan telah mampu memenuhi kebutuhan daya beban dalam jangka waktu yang direncanakan. Hasil analisis kapasitas baterai ditampilkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Spesifikasi Komponen Sistem Hybrid PLTS–PLN

Parameter	Nilai
Tegangan Baterai	12 V
Kapasitas Baterai	100 Ah
Kapasitas Energi Total	1200 Wh
<i>Depth of Discharge</i>	70%
Energi yang Dapat Digunakan	840 Wh
Total Daya Beban	35 W
Estimasi <i>Backup time</i>	24 Jam

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, energi baterai yang dapat digunakan sebesar 840 Wh masih mampu memenuhi kebutuhan energi beban harian sebesar 660 Wh. Hal ini menunjukkan bahwa kapasitas baterai yang digunakan masih memadai untuk mendukung pengoperasian sistem hybrid PLTS–PLN pada beban prioritas dalam penelitian ini.

3.3 Analisis Energi Panel Surya

Analisis energi panel surya dilakukan untuk menentukan kemampuan sistem PLTS dalam menghasilkan energi listrik guna memenuhi kebutuhan daya beban. Pada penelitian ini digunakan panel surya dengan kapasitas 200 WP. Estimasi energi harian yang dihasilkan panel surya dihitung berdasarkan kapasitas panel, durasi penyinaran matahari efektif, serta efisiensi sistem. Pada penelitian ini digunakan asumsi lama penyinaran matahari efektif selama 5 jam per hari dengan efisiensi sistem sebesar 80%. Berdasarkan hasil perhitungan, energi efektif yang dihasilkan panel surya sebesar 800 Wh per hari.

Tabel 5. Analisis Energi Panel Surya

Parameter	Nilai
Kapasitas Panel Surya	200 WP
Lama Penyinaran Efektif	5 Jam/Hari
Efisiensi Sistem	80%
<i>Energi Teoritis Panel Surya</i>	1000 Wh/Hari
Energi Efektif Panel Surya	800 Wh/Hari
Kebutuhan Energi Beban	660 Wh/Hari

Berdasarkan hasil analisis, energi efektif yang dihasilkan panel surya sebesar 800 Wh per hari masih mampu memenuhi kebutuhan energi beban sistem sebesar 660 Wh per hari. Dengan demikian, kapasitas panel surya yang digunakan dinilai masih mencukupi untuk mendukung operasi sistem hybrid PLTS–PLN pada kondisi normal.

3.4 Analisis Automatic Switching

Analisis **automatic switching** dilakukan untuk mengetahui mekanisme perpindahan sumber energi listrik berdasarkan kondisi tegangan baterai. Pada sistem ini, Arduino Uno berfungsi sebagai pusat kendali yang memantau nilai tegangan baterai secara **real-time** melalui sensor tegangan. Berdasarkan data pembacaan sensor tersebut, Arduino Uno akan mengendalikan relay untuk menentukan sumber energi yang digunakan dalam menyuplai beban sistem.

Ketika tegangan baterai berada di atas 12 V, sistem menggunakan energi dari PLTS untuk menyuplai seluruh beban. Selanjutnya, saat tegangan baterai berada pada rentang 11,5 V hingga 12 V, sistem menerapkan metode **load prioritization** dengan menonaktifkan beban non-prioritas guna mengurangi konsumsi daya baterai. Namun, apabila tegangan baterai turun hingga di bawah 11,5 V, sistem akan secara otomatis melakukan perpindahan sumber daya ke PLN melalui relay. Mekanisme ini bertujuan untuk menjaga kontinuitas suplai listrik sekaligus mencegah terjadinya kondisi *over-discharge* pada baterai.

Tabel 6. Analisis Automatic Switching

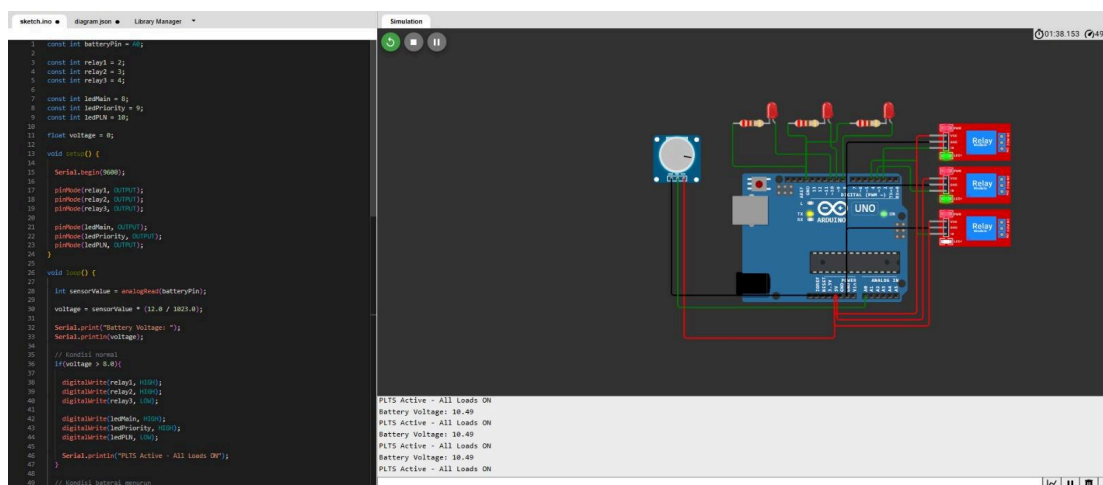
Tegangan Baterai	Kondisi Sistem	Waktu Operasi (Jam)
WiFi Router	Seluruh beban aktif	PLTS
CCTV	Beban non-prioritas dimatikan	PLTS
Lampu LED	<i>AUTOMATIC SWITCHING</i> AKTIF	PLN

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 6, sistem mampu mengatur perpindahan sumber daya secara otomatis sesuai kondisi kapasitas baterai. Metode automatic switching dan load prioritization yang diterapkan memungkinkan sistem menjaga kontinuitas suplai listrik pada beban prioritas sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan energi baterai.

3.5 Hasil Simulasi Sistem

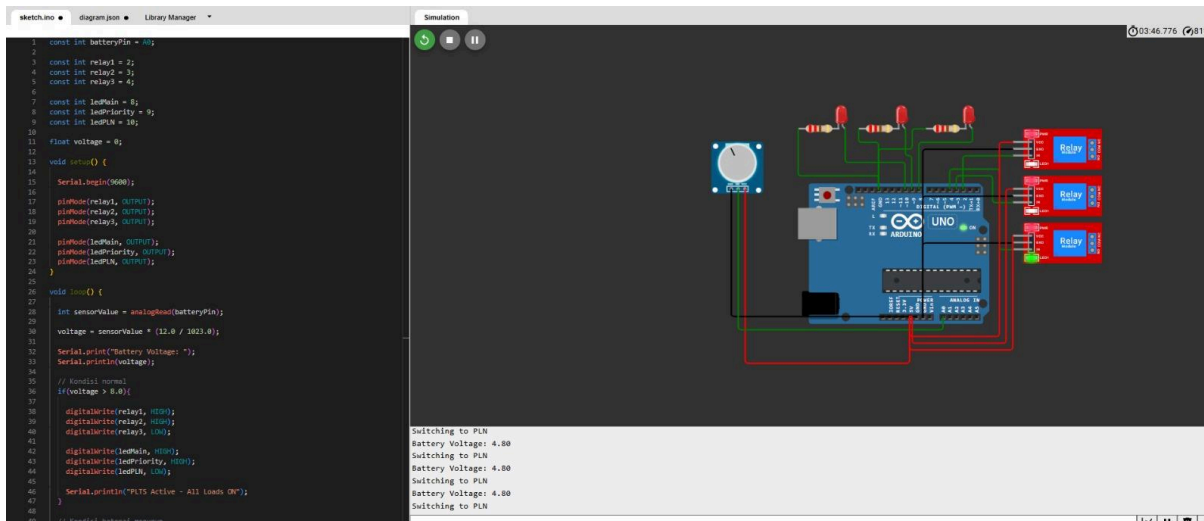
Simulasi sistem dilakukan menggunakan platform Wokwi untuk memverifikasi logika kontrol pada sistem hybrid PLTS–PLN berbasis Arduino Uno. Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi kondisi tegangan baterai untuk mengetahui mekanisme distribusi daya, status relay, serta proses *automatic switching* yang diterapkan pada sistem. Selain itu, simulasi juga dimanfaatkan untuk memantau hasil pembacaan sensor tegangan dan kondisi sistem melalui *serial monitor* secara *real-time*.

Pada kondisi normal, ketika tegangan baterai berada di atas 12 V, sistem menggunakan energi dari PLTS untuk menyuplai seluruh beban. Berdasarkan hasil simulasi pada **Gambar 4**, relay PLTS berada dalam kondisi aktif sehingga seluruh beban, seperti WiFi router, CCTV, dan lampu LED, dapat beroperasi dengan normal. Data pada *serial monitor* menunjukkan bahwa sistem mampu mendeteksi nilai tegangan baterai dan menjalankan proses distribusi daya sesuai dengan logika kontrol yang telah dirancang.



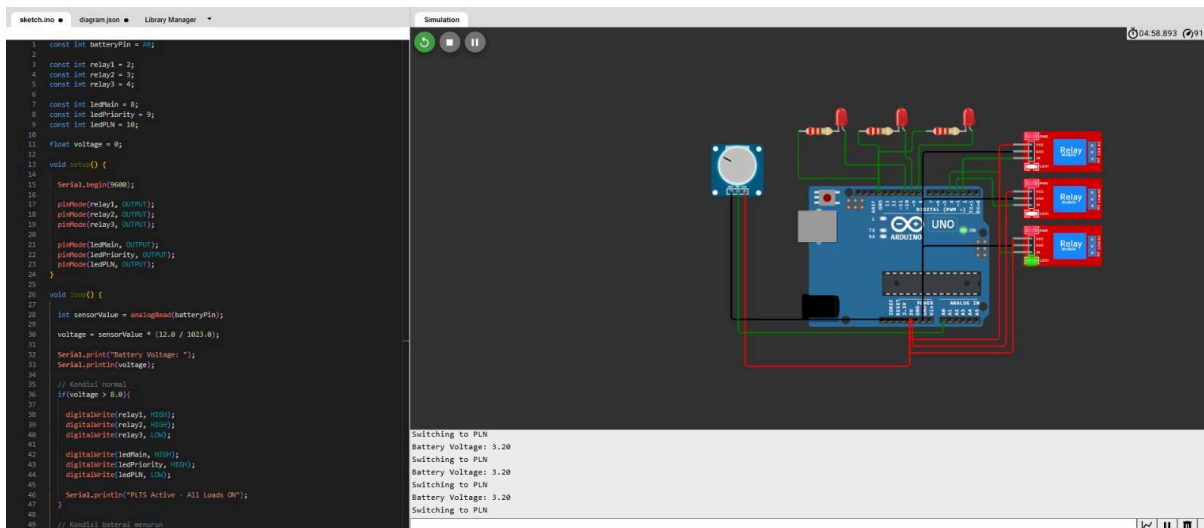
Gambar 4. Kondisi Sistem Saat PLTS Menyuplai Seluruh Beban

Selanjutnya, ketika tegangan baterai menurun pada rentang 11,5 V hingga 12 V, sistem menerapkan metode *load prioritization* dengan menonaktifkan beban non-prioritas berupa lampu LED. Berdasarkan hasil simulasi pada **Gambar 5**, relay untuk beban non-prioritas berada pada kondisi tidak aktif, sedangkan relay untuk beban utama tetap aktif menggunakan sumber energi dari PLTS. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sistem mampu mengurangi konsumsi energi baterai guna mempertahankan suplai daya pada beban prioritas.



Gambar 5. Kondisi *Load Prioritization* pada Sistem

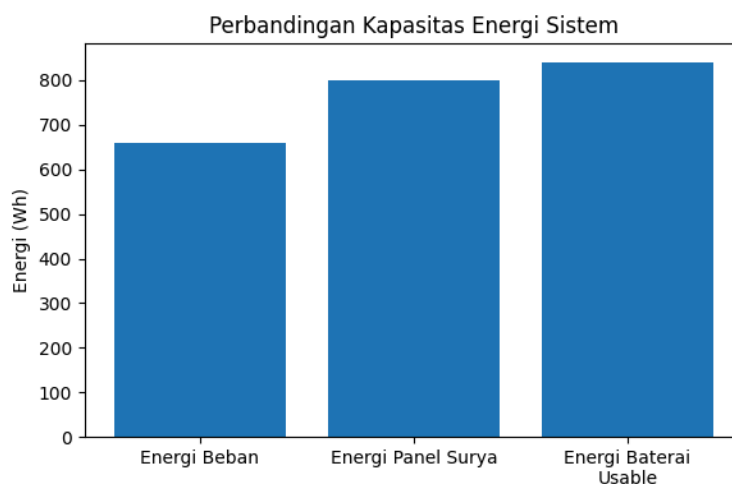
Apabila tegangan baterai turun hingga di bawah 11,5 V, sistem akan secara otomatis melakukan perpindahan sumber daya ke PLN melalui relay. Berdasarkan hasil simulasi pada **Gambar 6**, relay PLN aktif secara otomatis sehingga suplai daya beban berpindah dari PLTS ke PLN. Hasil pemantauan melalui *serial monitor* memperlihatkan bahwa proses perpindahan sumber daya berlangsung sesuai dengan logika kontrol yang telah dirancang. Dengan demikian, hasil simulasi membuktikan bahwa sistem mampu menjalankan proses monitoring, *load prioritization*, dan *automatic switching* secara otomatis berdasarkan kondisi kapasitas baterai.



Gambar 6. Proses *Automatic Switching* ke PLN

3.6 Pembahasan Sistem

Berdasarkan hasil analisis dan simulasi yang telah dilakukan, sistem hybrid PLTS–PLN berbasis Arduino Uno mampu beroperasi sesuai dengan rancangan yang telah dibuat. Sistem dapat memanfaatkan energi dari panel surya sebagai sumber daya utama untuk menyuplai beban sekaligus mengisi baterai melalui solar charge controller. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa energi efektif yang dihasilkan panel surya sebesar 800 Wh per hari masih mampu memenuhi kebutuhan energi beban sebesar 660 Wh per hari. Selain itu, kapasitas energi baterai yang dapat digunakan sebesar 840 Wh juga dinilai cukup untuk mendukung operasional sistem pada kondisi normal.



Gambar 7. Grafik Perbandingan Kapasitas Energi Sistem

Penerapan metode automatic switching dan load prioritization terbukti mampu menjaga kontinuitas suplai listrik serta meningkatkan efisiensi penggunaan energi baterai. Berdasarkan hasil simulasi, relay dapat melakukan perpindahan sumber daya secara otomatis dari PLTS ke PLN ketika tegangan baterai berada di bawah batas minimum. Di sisi lain, beban non-prioritas akan dinonaktifkan saat kapasitas baterai mulai menurun sehingga penggunaan energi dapat lebih dihemat. Sistem yang dirancang memiliki beberapa keunggulan, seperti pengendalian distribusi daya secara otomatis, penggunaan komponen yang relatif sederhana, serta kemampuan menjaga suplai listrik pada beban utama. Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian sistem belum dilakukan secara langsung di lapangan dan masih sebatas menggunakan simulasi sebagai tahap validasi awal.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, analisis, dan simulasi yang telah dilakukan, sistem hybrid PLTS–PLN berbasis Arduino Uno dengan metode *automatic switching* dan *load prioritization* mampu beroperasi sesuai dengan tujuan penelitian. Sistem dapat memanfaatkan energi dari panel surya sebagai sumber daya utama serta melakukan perpindahan sumber energi secara otomatis ke PLN ketika tegangan baterai berada di bawah batas minimum. Selain itu, metode **load prioritization** yang diterapkan mampu menjaga kontinuitas suplai listrik pada beban prioritas dengan cara memutuskan beban non-prioritas saat kapasitas baterai mulai menurun.

Hasil analisis menunjukkan bahwa energi efektif yang dihasilkan panel surya sebesar 800 Wh per hari dan kapasitas energi baterai yang dapat digunakan sebesar 840 Wh masih mampu memenuhi kebutuhan energi beban sebesar 660 Wh per hari. Berdasarkan hasil simulasi menggunakan Wokwi, sistem juga berhasil melakukan pemantauan tegangan baterai, pengendalian relay, serta proses *automatic switching* sesuai dengan logika kontrol yang telah dirancang. Dengan demikian, sistem yang dikembangkan dinilai layak untuk diterapkan sebagai solusi pengelolaan energi listrik skala kecil berbasis energi terbarukan.

DAFTAR RUJUKAN

Rujukan Jurnal (Wajib 80% dari total referensi):

- Kumar, A., et al. (2021). Recent Advances in Solar Photovoltaic Systems. *Renewable Energy*.
- Li, H., et al. (2022). Hybrid Renewable Energy Systems. *IEEE Access*.
- Hasan, M., & Mekhilef, S. (2021). PV Performance under Varying Conditions. *Energy Reports*.
- Kurniawan, M. R., et al. (2024). Microcontroller-Based Control System. *Journal of Electrical Engineering*.
- Hidayat, M., et al. (2024). Automatic Transfer Switch for Power Systems. *IJPEDS*.
- Almalag, A., Alsharif, M. A., & Kim, M. (2025). Comprehensive Control Strategy for Standalone Photovoltaic Systems with Integrated Optimum Power Harvesting. *Scientific Reports*, 15.
- Li, H., Wan, Z., & He, Y. (2022). Hybrid Renewable Energy Systems: A Review. *IEEE Access*, 10, 1–20.
- Khan, M. A., Haque, A., & Kurukuru, V. S. B. (2021). Dynamic Voltage Support for Low-Voltage Ride-Through Operation in Single-Phase Grid-Connected Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 36(10), 12102–12111.
- Nguyen, Q., Vallem, M. R., Vyakaranam, B., Tbaileh, A., Ke, X., & Samaan, N. (2021). Control and Simulation of a Grid-Forming Inverter for Hybrid PV-Battery Plants in Power System Black Start. *IEEE Access*, 9, 1–12.
- Rahman, M. M., Rahman, M. H., & Hannan, M. A. (2022). Energy Management Techniques for Hybrid Renewable Energy Systems: A Review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 52, 102–118.

- Hannan, M. A., Rasul, M. G., & Hussain, A. (2023). Optimization Techniques for Hybrid Renewable Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 169, 112–126.
- Ma, K., Wang, H., & Blaabjerg, F. (2023). Reliability Assessment of Grid-Connected Photovoltaic Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38(2), 2101–2115.
- Merabet, A., Ahmed, K. T., & Ibrahim, H. (2023). Smart Energy Management System for Photovoltaic-Battery Hybrid Systems. *IEEE Access*, 11, 55612–55628.
- Alharbi, M. T., & Bhattacharya, S. (2025). Hybrid Renewable Energy Systems for Smart Grid Applications: Recent Trends and Future Prospects. *Renewable Energy*, 224, 119–135.
- Singh, A. K., Kumar, R., & Sharma, P. (2026). Adaptive Energy Management Strategy for Photovoltaic-Grid Hybrid Systems Using Intelligent Load Prioritization. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 162, 109–124.