INCODING: Journal of Informatic and Computer Science Engineering
https://journal.mahesacenter.org/index.php/incoding/index || ISSN 2776-432X
6(1) 2026: 1-18

DOI: https://doi.org/10.34007/incoding.v6i2.1142



Perancangan Sistem PAPI Dual Circuit Berbasis Solar Cell untuk Meningkatkan Keandalan Operasional Bandara

Design of A Dual-Circuit PAPI System Based on Solar Cells to Improve Airport Operational Reliability

Muhammad Alif Rifqi, Ahmad Kosasih & S Kardi
Prodi Teknik Listrik Bandara, Politeknik Penerbangan Indonesia Curug, Indonesia

Diterima: Februari 2019; Disetujui: Maret 2019; Dipublish: April 2019
*Coresponding Email: alifrigqi@gmail.com

Abstrak

Sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) merupakan fasilitas bantu visual yang berperan penting dalam mendukung keselamatan pendaratan pesawat, khususnya pada kondisi malam hari dan visibilitas rendah. Pada kondisi eksisting di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere, sistem PAPI masih menggunakan konfigurasi single circuit yang bergantung pada satu Constant Current Regulator (CCR), sehingga gangguan pada jalur suplai daya berpotensi menyebabkan pemadaman total sistem. Penelitian ini bertujuan merancang sistem PAPI berbasis dual circuit yang terintegrasi dengan sistem energi solar cell untuk meningkatkan keandalan operasional penerangan pendekatan. Penelitian menggunakan metode engineering design research melalui observasi lapangan, studi dokumentasi, studi literatur, analisis kebutuhan sistem, serta perhitungan teknis komponen tenaga surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa konfigurasi dual circuit mampu meningkatkan redundansi sistem dan mengurangi risiko total blackout. Integrasi solar cell juga dinilai layak sebagai sumber energi cadangan berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan daya sistem. Selain itu, sistem monitoring dan kontrol berbasis web mampu mendukung pemantauan kondisi kelistrikan secara real time dan meningkatkan efektivitas pengawasan operasional sistem PAPI.
Kata Kunci: *dual circuit*; *solar cell*; PAPI system

Abstract

The Precision Approach Path Indicator (PAPI) system is a visual aid facility that plays an important role in supporting aircraft landing safety, particularly during nighttime operations and low-visibility conditions. At Fransiskus Xaverius Seda Maumere Airport, the existing PAPI system still uses a single circuit configuration supplied by one Constant Current Regulator (CCR), creating a risk of total system blackout when power supply disturbances occur. This study aims to design a dual circuit-based PAPI system integrated with a solar cell energy system to improve the reliability of approach lighting operations. The research employed an engineering design research method through field observation, documentation study, literature review, system requirement analysis, and technical calculations of solar power components. The results indicate that the proposed dual circuit configuration improves system redundancy and reduces the risk of total blackout. The integrated solar cell system was also found to be feasible as a backup power source based on the system power requirement calculations. In addition, the web-based monitoring and control system supports real-time electrical monitoring and improves operational supervision of the PAPI system.
Keywords: *dual circuit; solar cell; PAPI system*

How To Cite: Rifqi, M. A., Kosasih, A., & Kardi, S. (2026). Perancangan Sistem PAPI Dual Circuit Berbasis Solar Cell untuk Meningkatkan Keandalan Operasional Bandara. *INCODING: Journal of Informatic and Computer Science Engineering, 6(1), 1-18.*

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

PENDAHULUAN

Transportasi udara merupakan salah satu sektor strategis yang memiliki peran penting dalam mendukung mobilitas masyarakat, konektivitas antarwilayah, distribusi logistik, serta pertumbuhan ekonomi nasional. Dalam operasional penerbangan modern, aspek keselamatan penerbangan menjadi prioritas utama yang harus dijaga melalui ketersediaan fasilitas navigasi dan sistem pendukung operasional yang andal (Nugraha & Santoso, 2025; Oktavia et al., 2025). Salah satu fasilitas penting dalam sistem keselamatan penerbangan adalah airfield lighting system atau sistem penerangan Bandara, khususnya Precision Approach Path Indicator (PAPI) yang berfungsi sebagai alat bantu visual bagi pilot pada fase pendekatan akhir (final approach) sebelum proses pendaratan dilakukan. Sistem ini memberikan informasi visual mengenai sudut luncur pesawat sehingga pilot dapat mempertahankan jalur pendekatan yang aman menuju runway dan mengurangi risiko undershoot maupun overshoot saat pendaratan (Susanto et al., 2020; SYAHREZA, 2023). [1], [2], [3], [4]

Keberadaan sistem PAPI menjadi semakin penting terutama pada kondisi malam hari, hujan lebat, kabut, maupun kondisi cuaca dengan tingkat visibilitas rendah. Pada situasi tersebut, pilot sangat bergantung pada bantuan visual untuk menentukan sudut pendekatan yang sesuai terhadap runway. Oleh karena itu, gangguan pada sistem PAPI dapat berdampak langsung terhadap keselamatan operasional penerbangan. Dalam regulasi nasional, standar instalasi sistem penerangan Bandara diatur melalui Keputusan Direktur Jenderal Perhubungan Udara Nomor SKEP 114 Tahun 2002 serta Manual of Standard CASR Part 139 yang menegaskan bahwa fasilitas penerangan penerbangan harus memiliki tingkat keandalan tinggi dan mampu mendukung kontinuitas operasi penerbangan dalam berbagai kondisi operasional. Standar tersebut menunjukkan bahwa sistem penerangan Bandara tidak hanya dituntut memenuhi standar pencahayaan, tetapi juga harus memiliki sistem suplai daya yang stabil dan minim risiko kegagalan operasional (Salsabila, 2020). [5]

Namun, pada implementasinya masih terdapat sistem penerangan Bandara yang menggunakan konfigurasi suplai daya dengan tingkat redundansi yang terbatas. Berdasarkan hasil observasi pada Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere, sistem PAPI yang digunakan masih menggunakan konfigurasi single circuit yang disuplai oleh satu Constant Current Regulator (CCR). Kondisi tersebut menyebabkan seluruh sistem penerangan pendekatan bergantung pada satu jalur suplai daya. Apabila terjadi gangguan pada CCR, kabel distribusi, maupun komponen kelistrikan lainnya, maka seluruh sistem PAPI berpotensi mengalami pemadaman total. Situasi ini menjadi cukup krusial karena pemadaman sistem PAPI dapat mengganggu proses pendekatan pesawat, terutama ketika kondisi cuaca tidak mendukung atau visibilitas rendah. Selain berdampak pada keselamatan penerbangan, gangguan sistem penerangan pendekatan juga dapat memengaruhi kelancaran operasional Bandara secara keseluruhan (DARMA, n.d.; FEBIANTARA, 2023). [6], [7]

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

Dalam sistem kelistrikan kritis, konsep redundansi merupakan salah satu pendekatan utama untuk meningkatkan keandalan sistem. Redundansi dilakukan dengan menyediakan jalur suplai cadangan atau jalur independen agar sistem tetap dapat beroperasi ketika salah satu jalur mengalami gangguan (Faizin et al., 2026; Sukadana et al., 2026). Salah satu bentuk redundansi yang banyak diterapkan pada sistem kelistrikan adalah konfigurasi dual circuit. Konfigurasi ini memungkinkan pembagian beban ke dalam dua jalur independen sehingga gangguan pada salah satu circuit tidak menyebabkan seluruh sistem berhenti beroperasi. Selain penerapan dual circuit, integrasi sumber energi alternatif seperti solar cell juga menjadi solusi yang mulai banyak digunakan untuk meningkatkan kontinuitas suplai daya pada sistem kelistrikan kritis. Pemanfaatan energi surya melalui photovoltaic (PV) dinilai mampu menyediakan sumber energi cadangan yang lebih efisien, ramah lingkungan, serta mendukung konsep pembangunan infrastruktur berkelanjutan (Adhiem et al., 2021; Rauf, 2023a). [8]–[11]

Beberapa penelitian sebelumnya telah membahas pengembangan sistem monitoring, kontrol, dan efisiensi energi pada sistem penerangan maupun sistem berbasis kelistrikan. Pinto (2022) mengembangkan sistem monitoring sudut kemiringan PAPI berbasis Internet of Things (IoT) untuk membantu pemantauan kondisi sistem secara real time. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa integrasi monitoring mampu meningkatkan efektivitas pengawasan operasional sistem PAPI. Penelitian lain yang dilakukan oleh Mulyadi (2019) membahas pengendalian lampu berbasis Arduino dengan sistem dimmer sebagai upaya meningkatkan efektivitas kontrol sistem penerangan. Sementara itu, Effendi & Puspitaningrum (2021) mengembangkan sistem monitoring berbasis LoRa untuk pemantauan penggunaan air dan kualitas air secara real time dengan pendekatan monitoring jarak jauh berbasis jaringan nirkabel. Penelitian terkait pemanfaatan energi alternatif juga dilakukan pada beberapa sistem kelistrikan berbasis solar cell untuk meningkatkan efisiensi energi dan kontinuitas suplai daya (Asminar, 2023; Rauf, 2023b). [12]–[15]

Meskipun penelitian-penelitian tersebut memiliki kontribusi dalam pengembangan monitoring, kontrol, maupun pemanfaatan energi alternatif, masih terdapat beberapa keterbatasan. Penelitian Pinto (2022) lebih berfokus pada monitoring sudut kemiringan PAPI dan belum membahas aspek redundansi suplai daya. Penelitian mengenai sistem kontrol penerangan berbasis mikrokontroler lebih menitikberatkan pada mekanisme pengendalian lampu tanpa mengintegrasikan sistem backup energy. Selain itu, penelitian terkait pemanfaatan solar cell umumnya masih berorientasi pada efisiensi energi dan belum secara spesifik diterapkan pada sistem PAPI berbasis dual circuit. Dengan demikian, penelitian sebelumnya masih cenderung membahas monitoring, kontrol, dan energi alternatif secara terpisah serta belum mengintegrasikan seluruh aspek tersebut dalam satu sistem penerangan pendekatan penerbangan. [12], [13], [15]

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

Dari telaah penelitian terdahulu tersebut, dapat diketahui bahwa masih terdapat research gap pada pengembangan sistem PAPI yang mengintegrasikan konfigurasi dual circuit, sistem energi cadangan berbasis solar cell, serta monitoring–kontrol dalam satu rancangan sistem yang terpadu. Selain itu, penelitian terkait implementasi redundansi sistem PAPI pada Bandara regional di Indonesia juga masih relatif terbatas. Padahal, Bandara regional memiliki tantangan tersendiri terkait keandalan sistem kelistrikan dan kontinuitas operasional fasilitas penerangan penerbangan. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan rekayasa yang tidak hanya berfokus pada peningkatan efisiensi energi, tetapi juga mampu meningkatkan keandalan sistem secara menyeluruh melalui integrasi redundansi suplai daya dan sistem monitoring operasional.

Penelitian ini berfokus pada perancangan penambahan circuit Precision Approach Path Indicator (PAPI) menggunakan konfigurasi dual circuit yang terintegrasi dengan sistem energi berbasis solar cell sebagai sumber daya cadangan pada Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere. Perancangan dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi eksisting sistem penerangan, kebutuhan operasional Bandara, serta standar teknis instalasi penerangan penerbangan sipil. Selain itu, penelitian ini juga mengembangkan sistem monitoring dan kontrol untuk mendukung pemantauan kondisi kelistrikan secara real time sehingga kondisi operasional sistem dapat diketahui secara lebih cepat dan akurat.

Tujuan penelitian ini adalah merancang konfigurasi sistem PAPI berbasis dual circuit untuk meningkatkan keandalan operasional penerangan pendekatan, mengintegrasikan sistem solar cell sebagai sumber energi cadangan pada sistem PAPI, serta menghasilkan rancangan monitoring dan kontrol yang mampu mendukung pemantauan kondisi sistem secara real time. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat menjadi model implementasi sistem penerangan Bandara berbasis redundansi dan energi terbarukan yang dapat diterapkan pada Bandara regional dengan karakteristik serupa.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode engineering design research atau penelitian perancangan rekayasa yang berorientasi pada pengembangan solusi teknis untuk meningkatkan keandalan sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere. Pendekatan ini

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

dipilih karena penelitian tidak hanya berfokus pada identifikasi permasalahan sistem penerangan, tetapi juga menghasilkan rancangan teknis berupa konfigurasi dual circuit yang terintegrasi dengan sistem energi berbasis solar cell. Proses penelitian dilakukan melalui tahapan analisis kondisi eksisting, identifikasi kebutuhan sistem, penyusunan desain teknis, perhitungan kebutuhan daya, serta verifikasi rancangan sistem berdasarkan kebutuhan operasional penerbangan dan standar instalasi penerangan bandara.

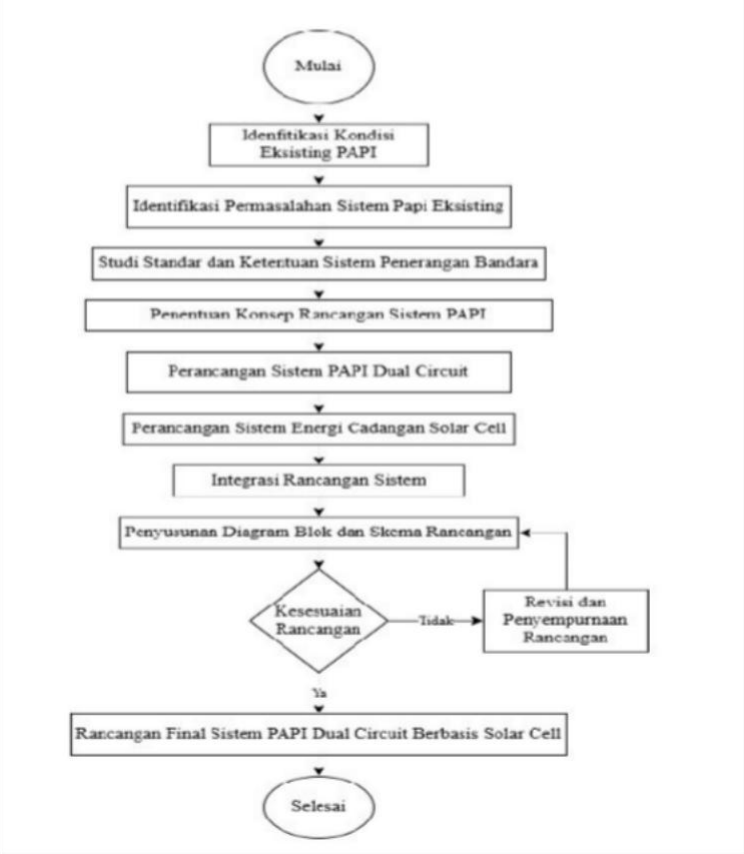
Penelitian dilaksanakan di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere dengan objek penelitian berupa sistem PAPI, jalur distribusi daya, Constant Current Regulator (CCR), serta sistem monitoring dan kontrol penerangan pendekatan. Pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, studi dokumentasi, dan studi literatur. Observasi dilakukan secara langsung untuk mengetahui kondisi eksisting sistem penerangan pendekatan yang masih menggunakan konfigurasi single circuit sehingga seluruh sistem bergantung pada satu jalur suplai daya. Selain itu, dilakukan pengumpulan data teknis terkait tata letak fasilitas, konfigurasi jalur kabel, spesifikasi sistem penerangan, dan kebutuhan daya operasional sistem PAPI. Studi literatur dilakukan dengan mengkaji regulasi penerbangan, standar instalasi sistem penerangan Bandara, jurnal ilmiah, serta referensi teknis terkait redundansi sistem kelistrikan, runway lighting system, dan teknologi solar photovoltaic sebagai dasar dalam penyusunan rancangan sistem.

Tahap analisis dan perancangan dilakukan dengan mengevaluasi kelemahan sistem single circuit eksisting serta menentukan kebutuhan teknis sistem redundansi berbasis dual circuit. Setelah analisis dilakukan, penelitian dilanjutkan dengan penyusunan rancangan layout kabel, diagram sistem daya, serta integrasi sistem energi berbasis solar cell yang terdiri dari panel surya, Maximum Power Point Tracking (MPPT), baterai, dan inverter. Penentuan kapasitas komponen dilakukan melalui perhitungan kebutuhan energi harian sistem, estimasi produksi energi panel surya berdasarkan nilai Global Horizontal Irradiation (GHI), serta analisis kapasitas penyimpanan energi baterai sesuai kebutuhan operasional sistem PAPI. Selain itu, penelitian juga mengembangkan sistem monitoring dan kontrol berbasis web untuk memantau parameter kelistrikan secara real time dan mendukung pencatatan aktivitas (logging) sistem.

Sebagai gambaran tahapan penelitian, alur proses perancangan divisualisasikan dalam bentuk flowchart yang menunjukkan hubungan antar tahapan mulai dari

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

identifikasi masalah, analisis sistem eksisting, penyusunan rancangan dual circuit, integrasi sistem solar cell, hingga pengujian monitoring dan kontrol sistem. Verifikasi rancangan dilakukan melalui pengujian fungsi monitoring, pengujian kontrol jalur circuit, serta pemantauan arus listrik pada masing-masing jalur sistem untuk memastikan sistem mampu bekerja sesuai rancangan dan mendukung peningkatan keandalan operasional penerangan pendekatan di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere.



Gambar 1. *Flowchart* Perancangan Sistem *Dual Circuit* dan *Solar Cell* untuk PAPI

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Perancangan Dual Circuit pada Sistem PAPI

Hasil perancangan menunjukkan bahwa peningkatan keandalan sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) dapat dilakukan melalui penerapan konfigurasi dual circuit yang memisahkan jalur suplai daya menjadi dua circuit independen. Konsep ini dirancang berdasarkan hasil analisis kondisi eksisting sistem PAPI di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere yang masih menggunakan konfigurasi single circuit dengan satu Constant Current Regulator (CCR) sebagai sumber suplai utama. Pada konfigurasi eksisting tersebut, seluruh lampu PAPI bergantung pada satu jalur distribusi daya

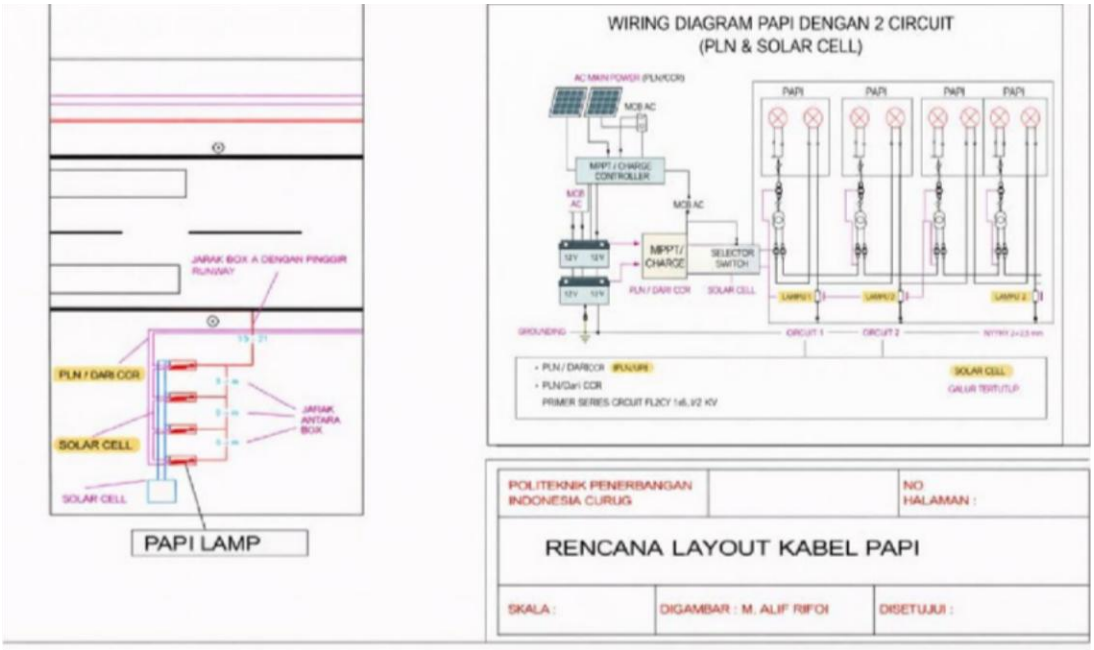
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

sehingga apabila terjadi gangguan pada CCR, kabel distribusi, maupun komponen pendukung lainnya, maka seluruh sistem penerangan pendekatan dapat mengalami pemadaman total. Kondisi ini dinilai memiliki risiko cukup tinggi terhadap keselamatan operasional penerbangan, terutama pada malam hari atau saat visibilitas rendah ketika pilot sangat bergantung pada sistem bantu visual untuk menentukan sudut pendekatan pesawat.

Perancangan dual circuit dilakukan dengan membagi sistem suplai daya ke dalam dua jalur independen yang mampu bekerja secara terpisah. Dengan konfigurasi tersebut, apabila salah satu circuit mengalami gangguan, maka circuit lainnya masih dapat beroperasi sehingga sistem PAPI tidak mengalami pemadaman total. Pendekatan ini diterapkan untuk meningkatkan reliabilitas sistem penerangan pendekatan tanpa melakukan perubahan besar terhadap infrastruktur eksisting Bandara. Rancangan tetap memanfaatkan jalur instalasi dan fasilitas yang telah tersedia sehingga implementasi sistem menjadi lebih realistis dan efisien dari sisi teknis maupun operasional. Selain itu, pemisahan jalur suplai juga memungkinkan distribusi beban listrik menjadi lebih stabil karena masing-masing circuit memiliki jalur kerja yang lebih terkontrol dibandingkan sistem single circuit.

Tahap perancangan dimulai dengan penyusunan layout kabel berdasarkan kondisi lapangan, posisi lampu PAPI, serta jalur distribusi daya yang tersedia di Bandara. Perencanaan layout dilakukan untuk memastikan jalur kabel pada masing-masing circuit dapat bekerja secara independen dan tetap memenuhi standar instalasi sistem penerangan penerbangan. Selain mempertimbangkan efisiensi distribusi daya, penempatan jalur kabel juga dirancang agar memudahkan proses pemeliharaan dan identifikasi gangguan pada masing-masing jalur sistem. Hasil rancangan layout kabel PAPI menunjukkan adanya pemisahan jalur suplai antara circuit utama dan circuit cadangan sehingga kontinuitas operasi sistem penerangan pendekatan dapat lebih terjamin.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

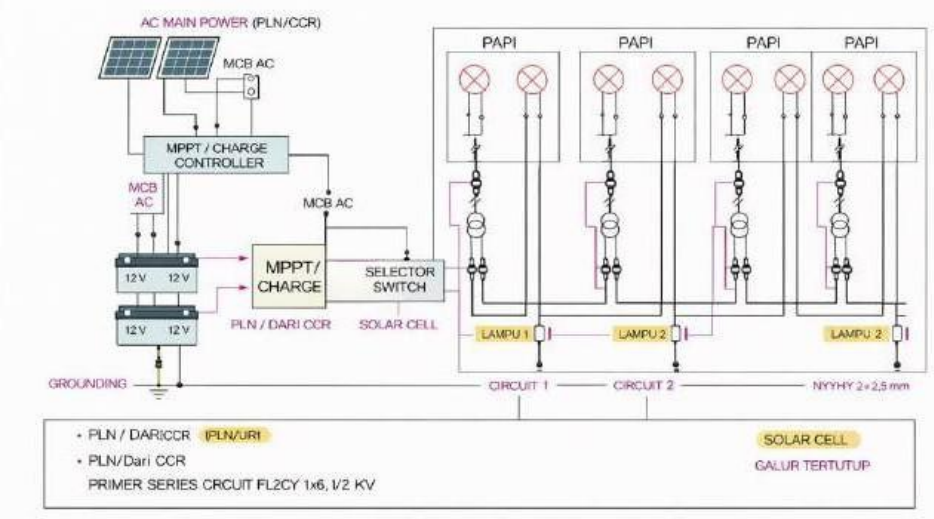


Gambar 2. Rencana Layout Kabel PAPI

Berdasarkan layout yang dirancang, masing-masing jalur circuit memiliki distribusi daya yang lebih terstruktur sehingga apabila salah satu jalur mengalami gangguan, jalur lainnya masih dapat mempertahankan operasional sistem PAPI. Konfigurasi tersebut juga mendukung proses inspeksi dan pemeliharaan karena identifikasi gangguan dapat dilakukan secara lebih cepat pada masing-masing jalur suplai. Dengan adanya pemisahan jalur distribusi, tingkat ketergantungan terhadap satu sumber suplai daya dapat dikurangi dibandingkan dengan konfigurasi eksisting yang masih menggunakan single circuit.

Selain penyusunan layout kabel, dilakukan pula perancangan diagram sistem daya untuk menggambarkan hubungan antarkomponen pada sistem dual circuit yang diusulkan. Diagram sistem daya menunjukkan bahwa masing-masing sirkuit memiliki jalur suplai dan distribusi tersendiri sehingga tidak saling bergantung secara langsung. Konfigurasi ini memberikan tingkat redundansi yang lebih baik dibandingkan sistem eksisting. Pada sistem single circuit, gangguan pada satu komponen utama dapat menyebabkan seluruh sistem berhenti beroperasi. Sementara pada konfigurasi dual circuit, gangguan hanya akan memengaruhi salah satu jalur sehingga jalur lainnya masih dapat mempertahankan operasional sistem penerangan pendekatan.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0



Gambar 3. Diagram Sistem Daya Dual Circuit

Diagram sistem daya juga menunjukkan bahwa pembagian beban pada masing-masing circuit dilakukan secara terpisah sehingga distribusi arus listrik menjadi lebih stabil dan terkontrol. Penerapan konfigurasi ini tidak hanya meningkatkan kontinuitas suplai daya, tetapi juga meningkatkan fleksibilitas operasional sistem. Ketika salah satu jalur mengalami proses pemeliharaan atau gangguan teknis, jalur lainnya tetap dapat digunakan untuk mendukung operasional penerbangan. Hal tersebut menjadi salah satu keuntungan utama dari penerapan konsep redundansi pada sistem penerangan bandara.

Secara teknis, hasil perancangan menunjukkan bahwa konfigurasi dual circuit mampu meningkatkan reliabilitas sistem PAPI dibandingkan dengan konfigurasi single circuit eksisting. Penerapan dua jalur suplai independen membuat sistem lebih adaptif terhadap gangguan operasional dan mengurangi risiko total blackout pada sistem penerangan. Konsep redundansi yang diterapkan dalam penelitian ini sejalan dengan prinsip keandalan pada sistem kelistrikan kritis yang menekankan pentingnya kontinuitas operasi dan pengurangan risiko kegagalan total sistem. Oleh karena itu, rancangan dual circuit yang diusulkan dinilai layak untuk diterapkan sebagai solusi peningkatan keandalan sistem PAPI di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere maupun di bandara regional lainnya dengan karakteristik serupa.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

2. Perhitungan dan Implementasi Sistem Solar Cell

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa sistem energi berbasis solar cell yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan energi operasional sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) pada konfigurasi dual circuit. Perancangan sistem tenaga surya dilakukan sebagai sumber energi cadangan (backup power) untuk meningkatkan kontinuitas suplai daya ketika terjadi gangguan pada sumber listrik utama. Integrasi solar cell pada sistem penerangan pendekatan dinilai penting karena sistem PAPI merupakan bagian dari fasilitas keselamatan penerbangan yang membutuhkan suplai daya stabil dan berkelanjutan. Oleh karena itu, rancangan sistem energi tidak hanya mempertimbangkan kebutuhan daya operasional, tetapi juga memperhatikan aspek keandalan, efisiensi energi, dan kemampuan sistem dalam mendukung operasional penerbangan secara kontinu.

Perhitungan kebutuhan energi dilakukan berdasarkan estimasi konsumsi daya harian sistem PAPI serta asumsi lama operasional sistem. Data awal yang digunakan dalam estimasi produksi energi panel surya adalah nilai Global Horizontal Irradiation (GHI) sebesar 2112,9 kWh/m^2/tahun yang dikonversi menjadi 5,79 kWh/m^2/hari sebagai dasar estimasi energi harian panel surya. Dengan menggunakan panel surya berkapasitas 300 Wp dan faktor derating sebesar 75% untuk memperhitungkan rugi-rugi sistem, energi harian yang dihasilkan setiap panel diperkirakan sebesar 1302,75 Wh/hari atau sekitar 1,30 kWh/hari. Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan energi harian sistem, jumlah panel yang dibutuhkan untuk mendukung operasional sistem ditetapkan sebanyak enam panel surya 300 Wp. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem solar cell yang dirancang mampu menyediakan suplai energi yang sesuai dengan kebutuhan operasional sistem PAPI berbasis dual circuit.

Selain perhitungan kapasitas panel surya, penelitian juga melakukan analisis terhadap kebutuhan sistem penyimpanan energi. Sistem menggunakan konfigurasi baterai 24 V dengan asumsi Depth of Discharge (DoD) sebesar 50%. Berdasarkan hasil perhitungan, kapasitas baterai minimum yang dibutuhkan adalah sekitar 533,2 Ah, sehingga direkomendasikan penggunaan baterai minimal 24 V 550 Ah atau alternatif dua unit baterai LiFePO4 24 V 300 Ah yang dipasang secara paralel. Penggunaan baterai pada sistem ini berfungsi untuk menjaga kontinuitas suplai daya ketika energi dari panel surya tidak mencukupi atau ketika terjadi gangguan pada sumber listrik utama. Dengan adanya

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

sistem penyimpanan energi, sistem PAPI tetap dapat beroperasi dalam kondisi darurat sehingga risiko terganggunya operasional penerbangan dapat diminimalkan.

Pada sisi pengkondisian daya, total daya panel surya yang digunakan dalam sistem adalah sebesar 1800 Wp dengan konfigurasi array 3S2P untuk menjaga tegangan kerja photovoltaic (PV) sesuai kebutuhan Maximum Power Point Tracking (MPPT). Konfigurasi tersebut menghasilkan tegangan kerja string sekitar 110 V sehingga sistem dapat bekerja lebih stabil dan efisien dalam proses pengisian baterai. Selain itu, pemilihan konfigurasi PV juga mempertimbangkan efisiensi distribusi arus serta kemampuan sistem dalam menjaga kestabilan suplai daya pada masing-masing circuit.

Tabel 1. Rekomendasi Konfigurasi PV dan MPPT

Maximum Power Point Tracking (MPPT)	
MPPT INPUT	MPPT OUTPUT ke baterai 24 V
PV voltage rating min 150 Vdc Optimal 250 –450 Vdc	Total daya panel = 1800 W Arus ke baterai 24 V
PV current rating minimal 20 A	Arus ke baterai $I = \frac{P}{V} = \frac{1800}{24} = 75$ A MPPT harus mampu output minimal 75 A MPPT yang paling aman adalah 100 A 24 Vdc, max PV 2000 – 2500 W PV input voltage ≥ 150V dc Power rating ≥ 1800 W

Tabel konfigurasi PV dan MPPT menunjukkan bahwa sistem membutuhkan MPPT dengan kemampuan output minimal 75 A pada sistem baterai 24 V. Oleh karena itu, digunakan rekomendasi MPPT 100 A 24 Vdc dengan kemampuan input tegangan minimal 150 Vdc dan kapasitas daya antara 2000–2500 W. Pemilihan spesifikasi tersebut dilakukan agar sistem memiliki margin keamanan yang cukup ketika terjadi fluktuasi produksi energi panel surya maupun perubahan beban operasional sistem PAPI. Selain itu, penggunaan MPPT juga membantu mengoptimalkan proses konversi energi dari panel surya menuju baterai sehingga efisiensi sistem dapat ditingkatkan.

Selanjutnya dilakukan analisis konfigurasi array panel surya untuk menentukan susunan PV yang paling sesuai dengan kebutuhan sistem. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa konfigurasi 3S2P memiliki karakteristik tegangan dan arus yang lebih optimal dibandingkan dengan konfigurasi 2S3P karena menghasilkan tegangan array yang lebih tinggi dengan arus yang lebih stabil. Konfigurasi ini dinilai lebih sesuai untuk mendukung proses pengisian baterai melalui sistem MPPT serta menjaga kestabilan suplai daya pada sistem PAPI berbasis dual circuit.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

Tabel 2. Parameter dan Hasil Perhitungan Sistem PV

Parameter	2S3P	3S2P
Jumlah Panel	6	**6**
Vmp array	64 V	**96 V**
Voc array	80 V	**120 V**
Imp array	28.2 A	**18.8 A**
Daya total	**±1.8 kW**	**±1.8 kW**

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 2, konfigurasi 3S2P menghasilkan tegangan kerja (Vmp array) sebesar 96 V dan tegangan terbuka (Voc array) sebesar 120 V dengan arus sebesar 18,8 A. Konfigurasi tersebut dinilai lebih efektif karena mampu menghasilkan distribusi daya yang lebih stabil dibandingkan konfigurasi 2S3P. Dari sisi implementasi, hasil perancangan menunjukkan bahwa integrasi sistem solar cell pada sistem PAPI berbasis dual circuit mampu meningkatkan kontinuitas suplai daya sekaligus mendukung efisiensi energi pada sistem penerangan pendekatan penerbangan. Selain itu, penggunaan energi terbarukan juga mendukung konsep pembangunan infrastruktur bandara yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

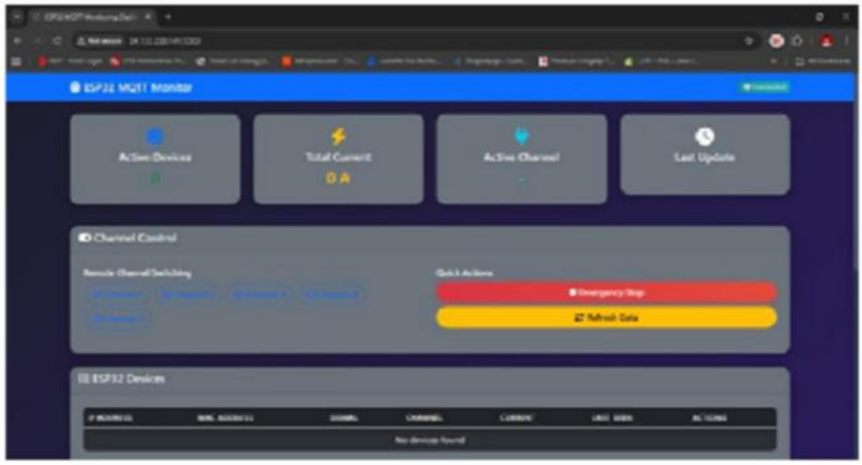
3. Verifikasi Sistem Monitoring dan Kontrol

Tahap verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa rancangan sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) berbasis dual circuit dan solar cell telah sesuai dengan desain teknis yang direncanakan serta mampu mendukung kebutuhan operasional penerangan pendekatan di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere. Verifikasi tidak hanya difokuskan pada aspek distribusi daya dan redundansi sistem, tetapi juga pada fungsi monitoring dan kontrol yang dirancang untuk mendukung pengawasan kondisi sistem secara real time. Pengujian dilakukan untuk memastikan bahwa setiap komponen pada sistem mampu bekerja sesuai fungsi yang direncanakan, termasuk respons sistem terhadap perubahan mode operasi dan proses pengendalian jalur circuit.

Pengujian awal dilakukan pada sistem monitoring berbasis web yang digunakan untuk menampilkan kondisi operasional sistem PAPI. Sistem monitoring dirancang agar teknisi dapat memantau parameter kelistrikan dan status operasional sistem secara langsung melalui antarmuka berbasis web. Tampilan monitoring mencakup informasi kondisi sistem, status jalur circuit, serta parameter pendukung lainnya yang digunakan untuk membantu proses pengawasan operasional penerangan pendekatan. Dengan adanya sistem monitoring ini, proses identifikasi gangguan dapat dilakukan secara lebih

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

cepat sehingga tindakan penanganan dapat segera dilakukan sebelum gangguan berkembang menjadi kegagalan sistem yang lebih besar.



Gambar 4. Tampilan Web Monitoring

Berdasarkan hasil pengujian, sistem monitoring mampu menampilkan kondisi operasional sistem secara real time dan memberikan informasi yang cukup bagi teknisi dalam melakukan pengawasan sistem penerangan pendekatan. Selain mempermudah proses monitoring, penggunaan antarmuka berbasis web juga meningkatkan fleksibilitas pengawasan karena informasi sistem dapat diakses secara lebih praktis dibandingkan metode monitoring konvensional. Implementasi monitoring berbasis web pada penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi sistem digital mampu mendukung peningkatan efektivitas pengelolaan fasilitas penerangan Bandara.

Selain pengujian monitoring, dilakukan pula pengujian pada sistem kontrol untuk memastikan bahwa perintah operasi dapat diterima dan dijalankan oleh sistem sesuai rancangan. Pengujian dilakukan menggunakan rangkaian kontrol berbasis push button untuk mengaktifkan maupun menonaktifkan jalur circuit pada sistem PAPI. Sistem kontrol dirancang agar masing-masing circuit dapat dikendalikan secara terpisah sehingga fleksibilitas operasional sistem menjadi lebih baik. Melalui pengujian ini, respons sistem terhadap perubahan kondisi operasi dapat diamati secara langsung.

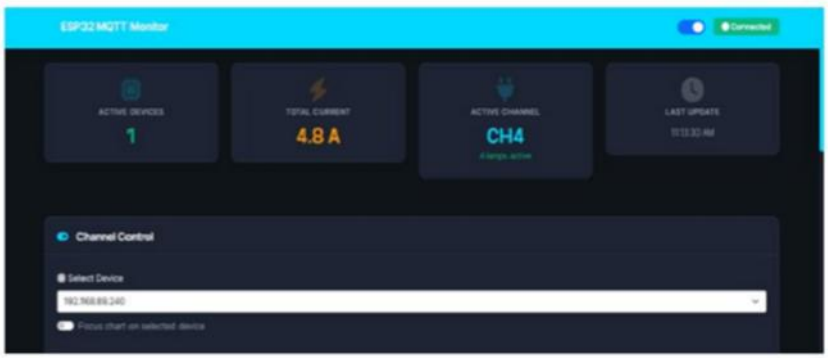
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0



Gambar 5. Rangkaian Kontrol

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu merespons setiap input kontrol dengan baik. Aktivasi dan perpindahan mode operasi pada masing-masing jalur circuit dapat berjalan sesuai perintah yang diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa sistem kontrol yang dirancang telah mampu mendukung pengoperasian dual circuit secara efektif. Selain itu, keberadaan sistem kontrol juga memberikan kemudahan bagi teknisi dalam melakukan pengaturan jalur suplai daya sesuai kebutuhan operasional maupun proses pemeliharaan sistem.

Untuk memperkuat verifikasi fungsi kontrol, dilakukan pengujian operasional menggunakan sistem monitoring berbasis web yang terhubung dengan sistem kontrol. Pengujian ini bertujuan memastikan bahwa perubahan kondisi operasi yang dilakukan melalui push button dapat terbaca dan ditampilkan secara langsung pada sistem monitoring. Dengan demikian, sinkronisasi antara sistem monitoring dan sistem kontrol dapat dievaluasi secara menyeluruh.



Gambar 6. Proses Pengujian Menggunakan Web

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

Berdasarkan hasil pengujian, sistem monitoring mampu menampilkan perubahan status operasi secara langsung ketika terjadi perubahan kondisi pada jalur circuit. Hal tersebut menunjukkan bahwa integrasi monitoring dan kontrol pada sistem telah berjalan sesuai rancangan. Integrasi ini menjadi penting karena memungkinkan teknisi memantau sekaligus mengendalikan sistem dalam satu platform operasional sehingga proses pengawasan sistem menjadi lebih efektif dan terstruktur.

Pengujian berikutnya dilakukan melalui pemantauan arus listrik secara real time pada masing-masing jalur circuit. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa perubahan kondisi operasi memberikan respons kelistrikan yang sesuai terhadap sistem PAPI. Melalui monitoring arus, perubahan beban pada masing-masing jalur dapat diamati secara langsung sehingga teknisi dapat mengetahui kondisi operasional sistem secara lebih objektif.



Gambar 7. Real-Time Current Monitoring

Hasil pemantauan menunjukkan bahwa sistem mampu menampilkan data arus secara kontinu dan stabil selama proses pengoperasian berlangsung. Data arus yang ditampilkan secara real time membantu proses evaluasi kondisi sistem dan mendukung identifikasi dini terhadap potensi gangguan kelistrikan. Dari sisi operasional, fitur monitoring arus juga memberikan keuntungan dalam proses pemeliharaan karena teknisi dapat mengetahui perubahan karakteristik beban pada masing-masing sirkuit tanpa harus melakukan pemeriksaan manual secara langsung.

Selain monitoring real-time, sistem juga dilengkapi dengan fitur pencatatan aktivitas (logging system) yang berfungsi merekam perubahan status dan aktivitas operasional sistem. Fitur ini digunakan untuk menyimpan riwayat pengoperasian sehingga proses evaluasi dan penelusuran gangguan dapat dilakukan secara lebih sistematis.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0



Gambar 8. Aktivitas yang Sudah Terekam

Berdasarkan hasil pengujian, sistem logging mampu merekam aktivitas operasional dan perubahan status sistem secara otomatis. Data yang tersimpan dapat digunakan sebagai bahan evaluasi terhadap kondisi operasional sistem maupun sebagai dokumentasi ketika terjadi gangguan pada sistem penerangan pendekatan. Secara keseluruhan, hasil verifikasi menunjukkan bahwa integrasi sistem monitoring dan kontrol pada rancangan PAPI berbasis dual circuit dan solar cell telah mampu mendukung peningkatan keandalan operasional sistem. Kombinasi redundansi suplai daya, monitoring real-time, serta sistem kontrol terintegrasi memberikan dukungan yang lebih baik terhadap kontinuitas operasional dan keselamatan penerbangan di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan yang telah dilakukan, penerapan konfigurasi dual circuit pada sistem Precision Approach Path Indicator (PAPI) di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere mampu meningkatkan keandalan sistem penerangan pendekatan dibandingkan konfigurasi single circuit eksisting. Pemisahan jalur suplai daya menjadi dua circuit independen memungkinkan sistem tetap beroperasi ketika salah satu jalur mengalami gangguan, sehingga risiko pemadaman total dapat diminimalkan. Selain itu, rancangan layout kabel dan diagram sistem daya menunjukkan bahwa konsep redundansi yang diterapkan mampu mendukung kontinuitas operasional sistem penerangan penerbangan secara lebih stabil dan aman.

Hasil perhitungan dan implementasi sistem energi berbasis solar cell menunjukkan bahwa sistem tenaga surya yang dirancang mampu memenuhi kebutuhan energi operasional sistem PAPI berbasis dual circuit. Penggunaan enam panel surya 300 Wp dengan konfigurasi sistem baterai 24 V dan dukungan Maximum Power Point Tracking

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

(MPPT) dinilai layak untuk digunakan sebagai sumber energi cadangan (backup power). Integrasi sistem solar cell tidak hanya meningkatkan kontinuitas suplai daya ketika terjadi gangguan pada sumber utama, tetapi juga mendukung efisiensi energi dan penerapan konsep infrastruktur Bandara yang lebih berkelanjutan melalui pemanfaatan energi terbarukan.

Selain aspek redundansi dan energi cadangan, hasil verifikasi sistem monitoring dan kontrol menunjukkan bahwa rancangan mampu mendukung pemantauan kondisi kelistrikan secara real time serta pengendalian sistem secara lebih efektif. Sistem monitoring berbasis web, pemantauan arus listrik, dan fitur logging activity mampu membantu proses pengawasan, evaluasi, serta identifikasi gangguan operasional secara lebih cepat dan terstruktur. Secara keseluruhan, kombinasi konfigurasi dual circuit, integrasi solar cell, dan sistem monitoring–kontrol pada penelitian ini memberikan solusi rekayasa yang aplikatif dalam meningkatkan keandalan operasional sistem PAPI serta mendukung keselamatan penerbangan di Bandara Fransiskus Xaverius Seda Maumere maupun bandara regional lainnya dengan karakteristik serupa.

DAFTAR PUSTAKA

[1] B. Nugraha and A. D. Santoso, “Peran transportasi multimoda dalam meningkatkan konektivitas dan efisiensi logistik di Pulau Jawa,” *Innovative: Journal of Social Science Research*, vol. 5, no. 2, pp. 1935–1948, 2025.
[2] A. Oktavia, L. Judijanto, D. N. Afni, M. A. Silova, and H. Firdaus, *Pengantar Teknik Transportasi*. PT Sonpedia Publishing Indonesia, 2025.
[3] P. C. Susanto, R. F. J. Sakti, and P. Widiyanto, “Alat bantu pendaratan visual di airport untuk mendukung keselamatan pesawat,” *Aviasi: Jurnal Ilmiah Kedirgantaraan*, vol. 17, no. 1, pp. 35–44, 2020.
[4] K. M. S. I. Syahreza, “Unjuk kerja sistem Constant Current Regulator (CCR) pada lampu Precision Approach Path Indicator (PAPI),” 2023.
[5] N. I. Salsabila, “Optimalisasi fasilitas Airfield Lighting System sebagai penunjang pelayanan navigasi dan keselamatan penerbangan di Bandar Udara Tambolaka,” in *Prosiding SNITP (Seminar Nasional Inovasi Teknologi Penerbangan*, vol. 4, 2020.
[6] I. M. D. W. I. P. Darma, “Rancang bangun kontrol dan monitoring floodlight apron berbasis mikrokontroler,” n.d.
[7] K. Febiantara, “Analisis sistem jaringan distribusi pada terminal di Bandar Udara Kelas II Fransiskus Xaverius Seda Maumere,” 2023.
[8] K. N. Faizin *et al*., *Analisis Sistem Elektro Daya*. CV Rey Media Grafika, 2026.
[9] I. W. Sukadana, I. N. Suartika, and I. W. Sutama, *Operasi dan Keandalan Jaringan Distribusi dengan LBS Motorized Key Point*. Hang Tuah University Press, 2026.
[10] M. A. Adhiem, S. H. Permana, and B. M. Faturahman, *Pembangkit Listrik Tenaga Surya bagi Pembangunan Berkelanjutan*. Publica Indonesia Utama, 2021.
[11] R. Rauf, *Matahari sebagai Energi Masa Depan: Panduan Lengkap Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)*. Penerbit Kita Menulis, 2023.
[12] T. J. P. D. S. L. Pinto, “Rancang bangun monitoring sudut kemiringan PAPI (Precision Approach Path Indicator) menggunakan NodeMCU berbasis IoT (Internet of Things),” 2022. [Online]. Available: https://repo.poltekbangsby.ac.id/

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0

[13] C. D. Mulyadi, "Perancangan pengendalian lampu menggunakan berbasis Arduino Uno dengan dimmer lampu," *Techno-Socio Ekonomika*, vol. 12, no. 1, pp. 5–13, 2019, doi: 10.32897/TECHNO.2019.12.1.277.
[14] H. Effendi and R. Puspitaningrum, "Rancang bangun sistem monitoring pemakaian air PAM dan mutu air pada komplek perumahan dengan jaringan nirkabel LoRa berbasis Arduino Uno," *Sinusoida*, vol. 23, no. 1, pp. 50–60, 2021, doi: 10.37277/S.V23I1.1021.
[15] Asminar, "Desain koordinasi dan optimisasi pembangkit listrik berbasis energi terbarukan dengan sistem baterai dalam konteks microgrid," 2023.

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0