

IoT Design for Disaster Mitigation and Energy Efficiency in the Kaliandra Program

Desain IoT untuk Mitigasi Bencana dan Efisiensi Energi di Program Kaliandra

Abu Yazid Bustomi^{1*}, Muhammad Zayyan Abiyyusa Firdaus², Denny Saputra Ramadhan²

¹ Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Mulawarman, Samarinda, 75119, Kalimantan Timur, Indonesia.

² PT. Pertamina Patra Niaga Revinery Unit V, Balikpapan, Kalimantan Timur, Indonesia

* Alamat Koresponding. E-mail: abuyazidbustomi@student.unmul.ac.id (A.Y.B.); Tel. +6285189546412.

Dikirim: 15 Maret 2026

Direvisi: 24 April 2026

Diterima: 01 Mei 2026

Academic Editor: Widi Sunaryo

Catatan Penerbit: Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Mulawarman tetap netral sehubungan dengan klaim yurisdiksi dalam gambar ataupun rancangan yang diterbitkan pada jurnal ini.



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

ABSTRACT: The slope stability of the Kaliandra Program infrastructure is vulnerable to hydrological risks and energy inefficiencies caused by manual irrigation mechanisms that rely on human intervention. This community service activity designed a distributed automatic control system to overcome these issues. The core novelty of this intervention lies in the synergistic integration of a circular economy, localized edge computing, and preventive disaster mitigation. By repurposing discarded electronic set-top boxes into autonomous local cloud servers, the system effectively severs dependence on vulnerable public internet infrastructure. A distributed control architecture was developed utilizing the system development life cycle methodology. Empirical evaluations confirm that the wireless mesh topology guarantees robust data transmission across severe non-line-of-sight topographies, sustaining a perfect packet delivery ratio of 100 percent and a 210-millisecond latency despite a degraded signal strength of -81.33 decibel-milliwatts. Furthermore, the implementation of automated short-duration pulse drip irrigation mitigates critical soil saturation while yielding a verified net energy saving of 6.31 kilowatt-hours monthly. At a highly efficient capital expenditure of 4,919,650 Rupiah, the integration of software-defined protection and touchless interfaces eradicates electrical shock hazards for local facility operators.

KEYWORDS: Circular economy; community empowerment; disaster mitigation; edge computing; internet of things

ABSTRAK: Stabilitas lereng pada infrastruktur Program Kaliandra rentan terhadap risiko hidrologi dan inefisiensi energi akibat mekanisme irigasi manual yang bergantung pada intervensi manusia. Kegiatan pengabdian masyarakat ini merancang sistem kendali otomatis terdistribusi untuk mengatasi masalah tersebut. Kebaruan utama dari intervensi ini terletak pada integrasi sinergis antara ekonomi sirkular, komputasi tepi lokal, dan mitigasi bencana preventif. Dengan mendaur ulang kotak dekoder elektronik bekas menjadi peladen awan lokal yang otonom, sistem ini secara efektif memutus ketergantungan pada infrastruktur internet publik yang sangat rentan saat krisis. Arsitektur kendali terdistribusi dikembangkan menggunakan metodologi siklus hidup pengembangan sistem. Evaluasi empiris mengonfirmasi bahwa topologi jaringan nirkabel menjamin transmisi data yang kuat melintasi topografi perbukitan yang terhalang secara visual, mempertahankan rasio pengiriman paket sempurna sebesar 100 persen dan latensi 210 milidetik meskipun kekuatan sinyal terdegradasi hingga -81,33 desibel-miliwatt. Selanjutnya, penerapan irigasi tetes berdenyut durasi pendek otomatis memitigasi kejenuhan tanah kritis sekaligus menghasilkan penghematan

Cara mensitasi artikel ini: Bustomi, A.Y., Fidaus, M.Z.A., Ramadhan, D.S. IoT Design for Disaster Mitigation and Energy Efficiency in the Kaliandra Program (Desain IoT untuk Mitigasi Bencana dan Efisiensi Energi di Program Kaliandra). ANDIL Mulawarman J Comm Engag. 2026; 3(3): 143-159.

energi bersih terverifikasi sebesar 6,31 kilowatt-jam setiap bulan. Melalui pengeluaran modal yang sangat efisien sebesar 4.919.650 Rupiah, integrasi perlindungan sirkuit berbasis perangkat lunak dan antarmuka nirsentuh sepenuhnya memberantas bahaya sengatan listrik bagi operator fasilitas lokal.

Kata Kunci: Ekonomi sirkular; internet of things; komputasi tepi; mitigasi bencana; pemberdayaan masyarakat

1. PENDAHULUAN

Evolusi paradigma komputasi modern mendorong integrasi *Edge Computing* untuk mengatasi latensi data pada infrastruktur kritis guna menjamin respons sistem yang lebih cepat (Khan et al., 2019). Tren riset terbaru menunjukkan bahwa efisiensi energi pada sistem sirkulasi air menjadi fokus utama dalam pengembangan manajemen akuakultur cerdas (Nugraha & Desnanjaya, 2025). Di sisi lain, isu keberlanjutan global mendorong penerapan ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah elektronik (*e-waste*) sebagai perangkat komputasi tepi untuk menekan biaya investasi (Ardiansyah et al., 2022). Integrasi teknologi IoT dalam mitigasi bencana kini bergeser dari sekadar pemantauan menjadi tindakan preventif melalui manajemen air presisi guna menjaga keamanan geoteknik (Risaldi et al., 2024). Penekanan pada aspek preventif ini menjadi krusial dalam program pengabdian masyarakat untuk memastikan inovasi yang diimplementasikan mampu memberikan kontribusi penghematan energi yang nyata bagi mitra lokal (Arepalli & Naik, 2024).

Studi kasus pada Program Kaliandra yang diinisiasi oleh PT Pertamina Patra Niaga RU V Balikpapan menunjukkan bahwa intervensi vegetasi telah berhasil meningkatkan faktor keamanan (*Safety Factor*) lereng dari 1,967 menjadi 2,042. Meskipun secara administratif angka tersebut telah melampaui ambang batas kritis 1,5 sesuai standar SNI 8460:2017 (Nasional, 2017), stabilitas ini bersifat dinamis dan sangat rentan terhadap risiko hidrologi (Balikpapan, 2025). Lokasi pengabdian memiliki karakteristik tanah sedimen dengan koefisien permeabilitas rendah sebesar 6 10-6 m/s, sehingga infiltrasi air yang tidak terkendali dapat memicu kenaikan tekanan air pori secara drastis (Rahardjo et al., 2007). Kondisi ini diperparah oleh mekanisme operasional eksisting yang masih mengandalkan saklar manual dengan debit pompa mencapai 28 L/menit, yang meningkatkan risiko *human error* berupa akumulasi air permukaan atau *soil saturation* (Balikpapan, 2025). Oleh karena itu, diperlukan transisi menuju sistem kendali otomatis berbasis IoT guna menjamin presisi volume irigasi sekaligus menjaga margin keamanan lereng agar tetap stabil di atas standar nasional.

Permasalahan operasional di lokasi pengabdian terletak pada pengelolaan infrastruktur *urban farming* seluas 310 m² yang masih bergantung sepenuhnya pada metode konvensional (Balikpapan, 2025). Berdasarkan observasi lapangan, sistem catu daya yang terbagi menjadi kluster hibrida serta kluster jaringan PLN murni masih dioperasikan melalui mekanisme saklar dinding dan penyambungan stop kontak. Kelemahan metode ini adalah tingginya frekuensi kelalaian operator dalam memutus aliran listrik yang berpotensi menyebabkan pemborosan energi dan inefisiensi pemanfaatan daya surya. Selain itu, keterlambatan pemadaman pompa secara manual menimbulkan risiko limpasan air (*runoff*) yang dapat menjenuhkan tanah dan membatalkan efektivitas mitigasi bencana yang telah dibangun (Rahardjo et al., 2007).



Gambar 1. Potret inefisiensi pengeoperasian pompa dengan saklar steker berisiko tinggi

Desain inovasi ini bertujuan untuk merancang arsitektur sistem kendali terdistribusi berbasis *Local Cloud* guna mengatasi tantangan geografis dan keterbatasan latensi di lokasi Program Kaliandra. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi tiga pilar utama: penggunaan limbah elektronik *Set Top Box* (STB) ZTE HG680P sebagai *Edge Server* lokal yang ekonomis, implementasi protokol *Zigbee Mesh* untuk menjamin stabilitas konektivitas pada area *non-line-of-sight* (Gungor & Hancke, 2009), serta penerapan logika *Pulse Drip Irrigation* untuk menjaga stabilitas tanah secara otomatis (Carroll et al., 2024). Melalui pemrosesan data secara *real-time* di dekat sumber data, sistem ini mampu meminimalkan jeda waktu respon secara signifikan dibandingkan pemrosesan berbasis *Cloud* tradisional (Satyanarayanan, 2017). Dengan integrasi panel proteksi beban induktif dan manajemen energi, desain ini diharapkan dapat menghasilkan cetak biru otomatisasi yang efektif dalam menjaga stabilitas lereng melalui manajemen air presisi sekaligus meningkatkan efisiensi energi pada infrastruktur pengabdian masyarakat.

2. METODE DAN PELAKSANAAN KEGIATAN

Inovasi ini mengadopsi kerangka kerja *System Development Life Cycle* (SDLC) sebagai metodologi pengembangan sistem yang secara hierarkis mengintegrasikan rekayasa teknis dengan pendekatan sosial kemasyarakatan. Pemilihan protokol nirkabel *Zigbee Mesh* (IEEE 802.15.4) difokuskan pada kebutuhan transmisi data di area *Non Line of Sight* (NLOS). Selanjutnya, paradigma *Edge Computing* diimplementasikan menggunakan perangkat berbasis arsitektur ARM untuk meminimalkan latensi dan menjaga kontinuitas operasional navigasi bencana tanpa bergantung pada internet publik.

Guna merespons kebutuhan integrasi sosio-teknis dan kejelasan tahapan kerja, seluruh pelaksanaan dirangkum dalam matriks SDLC pada tabel 1 yang memadukan luaran teknis dan evaluasi penerimaan masyarakat.

Tabel 1. Ringkasan Tahapan SDLC Integrasi Sosio-Teknis

Tahapan SDLC	Aktivitas Teknis Utama	Evaluasi dan Relevansi Sosial
Analisis Kebutuhan	Observasi lapangan, pemetaan geospasial <i>drone</i> , audit kelistrikan NOS	Dialog partisipatif dengan responden kader dan identifikasi hambatan literasi digital
Perancangan Sistem	Desain topologi <i>Zigbee Mesh</i> dan <i>Software Defined Protection</i>	Pembuatan desain UI responsif (<i>mobile-friendly</i>) untuk mengakomodasi pengguna lansia.
Implementasi	Perakitan peladen <i>Edge</i> (STB Daur Ulang) dan node proteksi MCB IP65.	Pelibatan pemuda karang taruna dalam proses instalasi untuk inisiasi transfer pengetahuan.
Pengujian	Uji reliabilitas propagasi sinyal <i>multi-hop</i> dan uji beban arus mula (<i>inrush</i>).	Evaluasi kenyamanan kader saat menggunakan aplikasi untuk intervensi manual kendali air.
Operasionalisasi	Otomatisasi jadwal <i>Pulse Drip Irrigation</i> dan penerangan Fasum	Peningkatan efisiensi waktu warga dan reduksi kecemasan terhadap bahaya tersengat listrik.

2.1 Analisis Infrastruktur dan Pemetaan Geospasial

Tahap awal dilakukan dengan memetakan sebaran titik infrastruktur kritis di lokasi Program Kaliandra menggunakan survei lapangan dan dokumentasi foto udara guna mendapatkan akurasi data spasial yang optimal. Observasi lapangan dilaksanakan pada tanggal 15 November 2025, dengan durasi spesifik antara pukul 14:00 hingga 16:00 WITA. Survei ini melibatkan 10 responden (kader Posyandu, pengelola kebun binaan, dan Ketua RT) untuk menjangkau sentimen komunal terkait keamanan instalasi listrik.

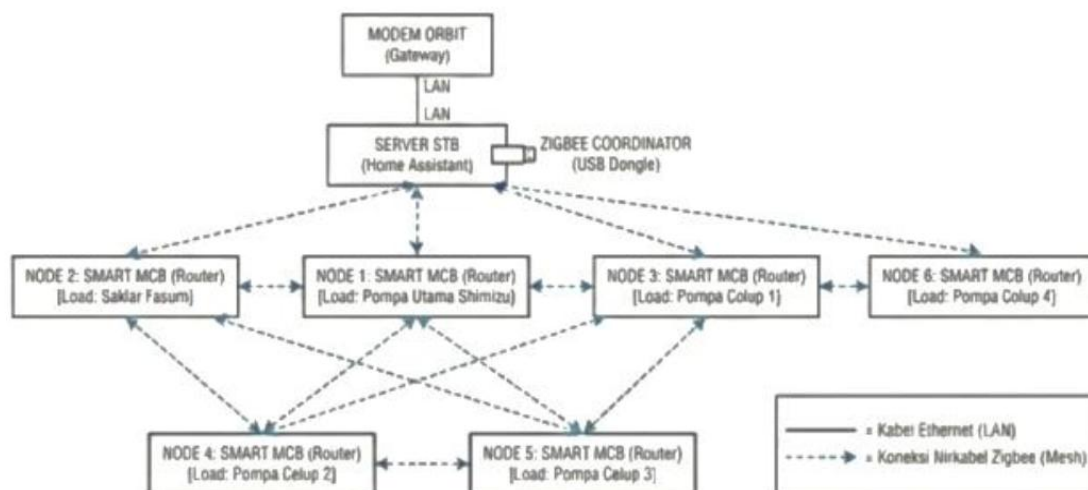
Berdasarkan pemetaan, area implementasi mencakup 5 (lima) titik pompa air yang tersebar di zona *urban farming* dan kolam budidaya, serta 1 (satu) titik kendali untuk penerangan fasilitas umum (Fasum). Seperti divisualisasikan pada **Gambar 2**, Gedung Posyandu ditetapkan sebagai Titik Sentral (*Node Koordinator*). Keputusan ini didasarkan pada ketersediaan daya listrik yang stabil, serta bertujuan untuk mendekatkan pusat inovasi dengan aktivitas harian guna menumbuhkan rasa kepemilikan warga.



Gambar 2. Peta sebaran infrastruktur sistem kendali Kaliandra di lingkungan NLOS

2.2 Perancangan Arsitektur Jaringan Terdistribusi

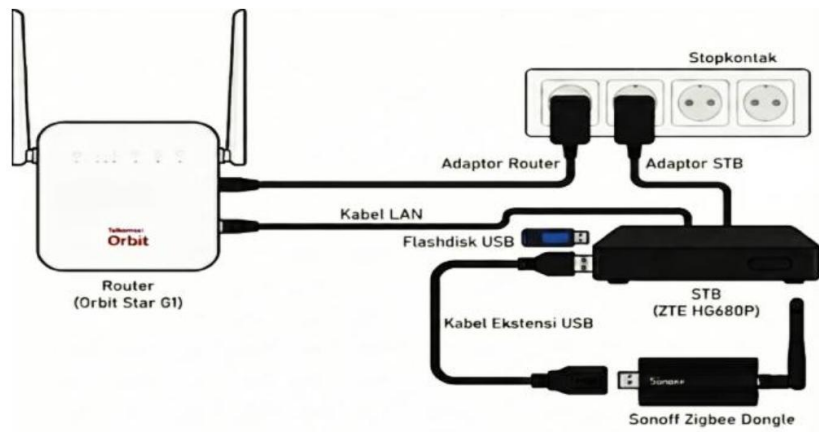
Guna mengatasi kendala topografi berbukit dan kepadatan bangunan yang menciptakan hambatan visual, inovasi ini merancang topologi jaringan *Zigbee Mesh* seperti diilustrasikan pada Gambar 3. Berbeda dengan topologi *Star* konvensional pada Wi-Fi, arsitektur Mesh memungkinkan setiap perangkat *Smart MCB* di lapangan berfungsi ganda sebagai aktuator (pemutus arus) dan sebagai *Router Node* (penguat sinyal) (Ruliyanta et al., 2024). Server STB di Posyandu bertindak sebagai koordinator utama. Jika jalur komunikasi langsung ke pompa terjauh terhalang bangunan, instruksi akan secara otomatis "melompat" (*multi-hop*) melalui titik terdekat, menjamin reliabilitas pengiriman perintah (*ON/OFF*) tetap terjaga secara mandiri tanpa internet (Prabha, 2020).



Gambar 3. Desain arsitektur jaringan nirkabel Zigbee Mesh dengan ilustrasi rute *multi-hop*.

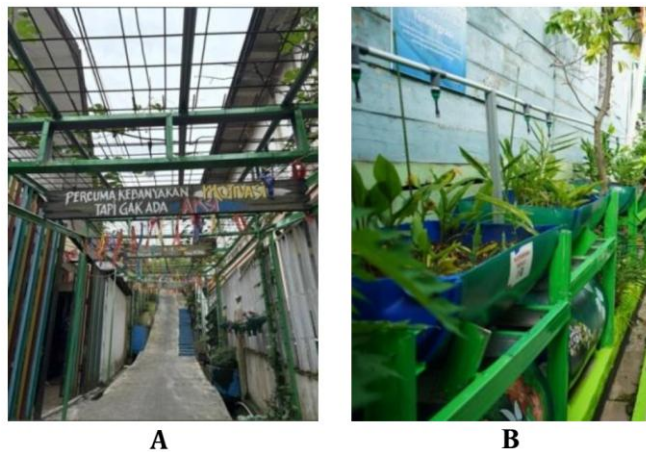
2.3 Implementasi Sistem dan Konfigurasi Perangkat Lunak

Sistem ini mengintegrasikan perangkat *edge computing* memanfaatkan limbah elektronik STB ZTE HG680P Gambar 4. Konfigurasi ini dirancang untuk mengotomatisasi 6 titik beban kritis dengan pembagian sebagai berikut:



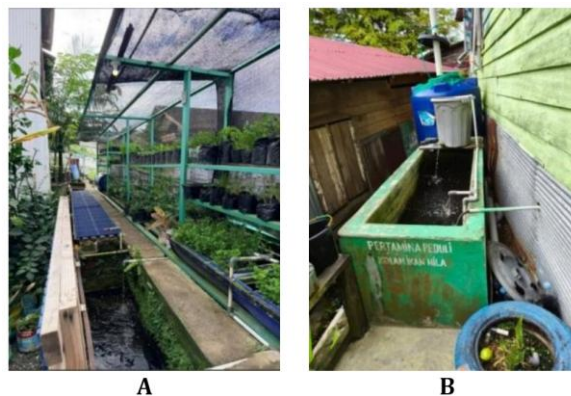
Gambar 4. Integrasi perangkat keras Edge Server (STB) dan Zigbee Dongle pada mode Headless

2.3.1 Satu Unit Pompa Irigasi Utama (330 Watt): Melayani area *urban farming* seluas 310 m² dengan logika *Time Based Control* (Pukul 07.00 & 17.00 WITA) selama 15 menit menggunakan pendekatan *Pulse Drip Irrigation* Gambar 5. Metode irigasi durasi pendek ini secara signifikan meningkatkan efisiensi penyimpanan air tanah dan memitigasi risiko longsor lereng akibat kejenuhan tanah.



Gambar 5. Infrastruktur irigasi di Lorong Hijau: (A) Lanskap *Vertical Garden* di sepanjang Lorong Hijau yang menjadi target otomatisasi irigasi; (B) Detail instalasi pipa distribusi dan *nozzle sprinkler* di atas media tanam.

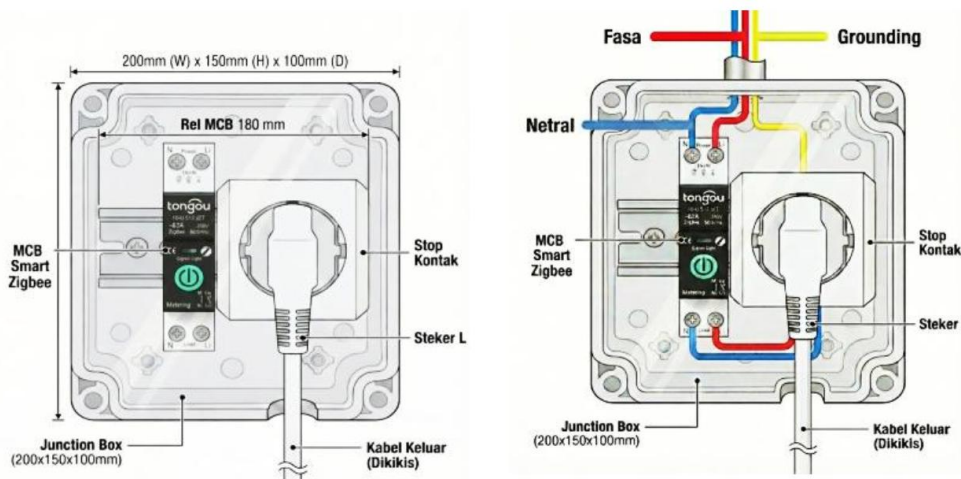
2.3.2 Empat Unit Pompa Sirkulasi Mikro (25 Watt): Melayani 5 kolam budidaya (Gambar 6) dengan jadwal menyala serentak 60 menit pada tiga siklus waktu (06.00, 12.00, 18.00 WITA) disinkronkan dengan pemberian pakan, sehingga menekan konsumsi energi tanpa mengorbankan kualitas hidup ikan (Putri et al., 2025).



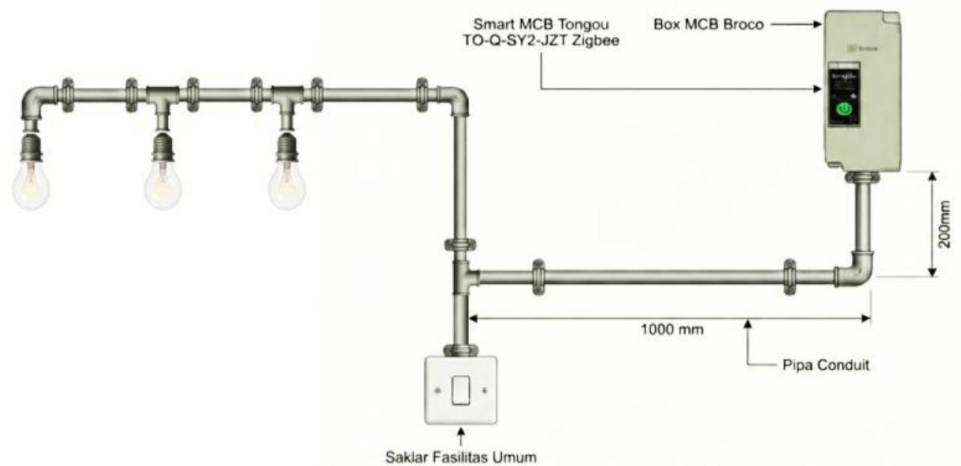
Gambar 6. Variasi infrastruktur budidaya perikanan di lokasi: (A) Kolam parit yang memanjang; (B) Bak penampungan untuk budidaya Nila.

2.3.3 Satu Grup Penerangan Fasilitas Umum (Posyandu): Mengendalikan pencahayaan interior dan teras Gedung Posyandu secara otomatis.

Untuk mitigasi keamanan warga, sistem menerapkan *Independent Circuit Protection* dengan menempatkan *Smart MCB* ke dalam *Junction Box* IP65 (**Gambar 7 dan 8**). Secara kelistrikan, sistem menggunakan MCB dengan pemutusan fisik 63 Ampere demi durabilitas kontak dari percikan api, namun dikontrol oleh sistem *Software Defined Protection*. Sistem cerdas ini akan memutus daya dalam milidetik jika mendeteksi lonjakan arus di atas ambang digital, melindungi operator dari risiko tersetrum.



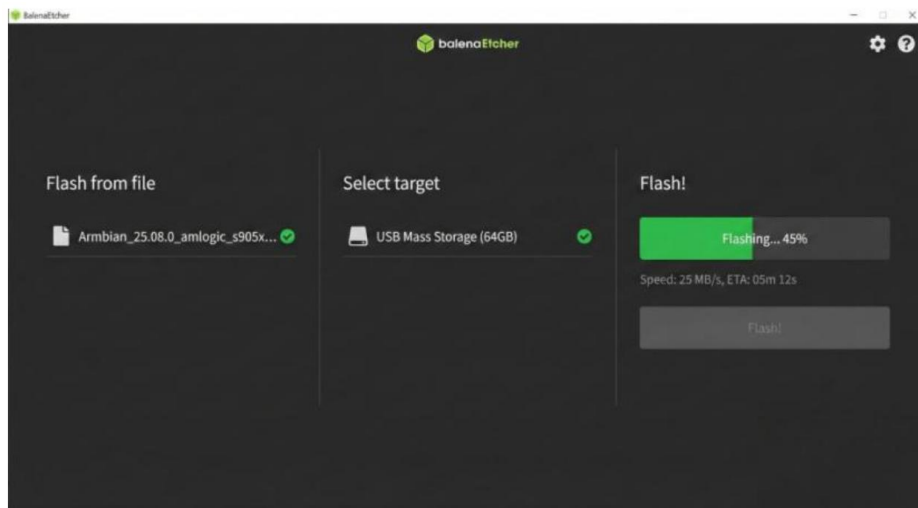
Gambar 7. Desain rancangan dan pengkabelan (*wiring*) pada Node Kendali Pompa



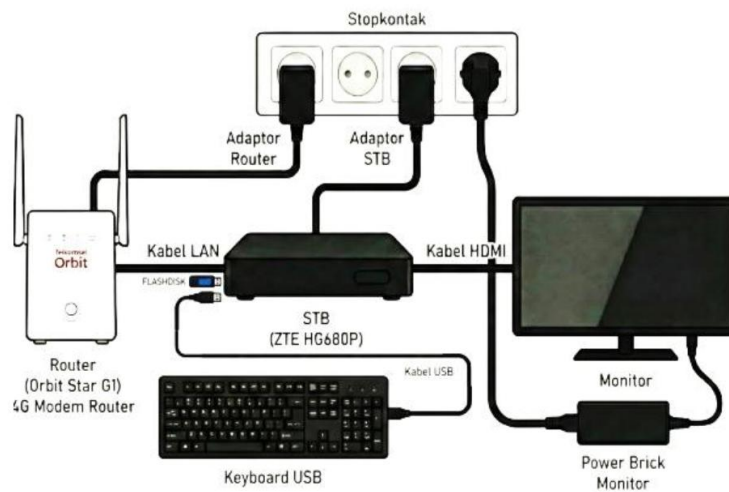
Gambar 8. Rancangan panel untuk saklar Fasilitas Umum yang terintegrasi dengan *Smart MCB Zigbee* untuk pengendalian pencahayaan area dalam dan teras Posyandu.

2.4 Implementasi dan Konfigurasi Perangkat Lunak

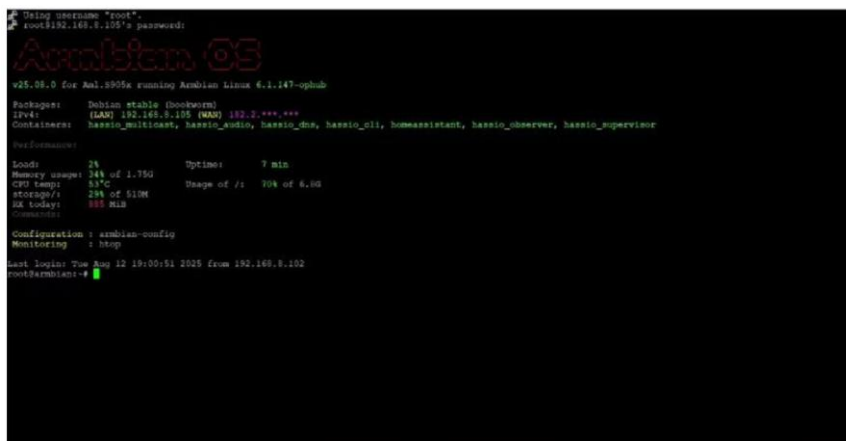
Instalasi OS *Armbian 25.08 Linux* dilakukan melalui *USB Flashdrive (external boot)* untuk menjaga memori bawaan STB (**Gambar 9, 10, dan 11**). Setelah konfigurasi *headless*, pengelolaan lingkungan IoT dipusatkan melalui *Home Assistant* dan *MQTT Broker*. Untuk menjembatani kesenjangan literasi digital pada pengelola yang didominasi lansia, antarmuka pengguna (UI) dirancang dengan konsep responsif (Mutiarani, 2023). Seperti pada **Gambar 12**, mode layar sentuh ponsel dioptimalkan untuk pengoperasian lapangan dengan satu tangan, dilengkapi logika *Open Loop Control* yang memungkinkan warga melakukan intervensi manual dengan mudah.



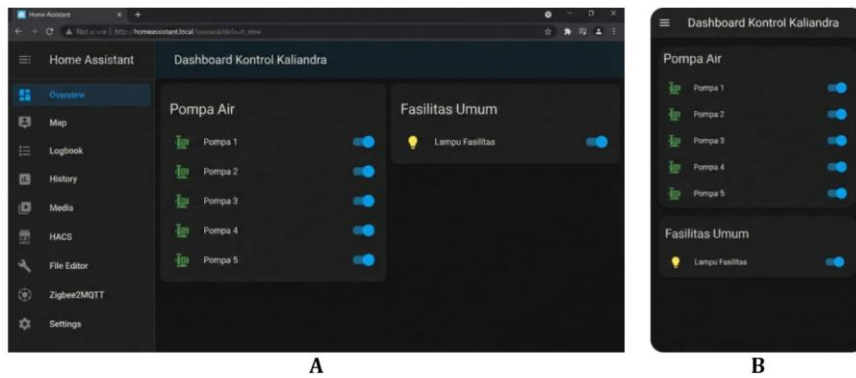
Gambar 9. Proses pembuatan media bootable Armbian Linux pada USB Flashdrive menggunakan perangkat lunak Balena Etcher.



Gambar 10. Skema konfigurasi awal server (Maintenance Mode). STB booting melalui USB Flashdrive dan dihubungkan ke monitor serta keyboard untuk pengaturan sistem dasar.



Gambar 11. Tampilan antarmuka CLI Armbian Linux yang berjalan dari media penyimpanan USB, menunjukkan status sistem aktif dan alamat IP lokal yang telah terkonfigurasi.

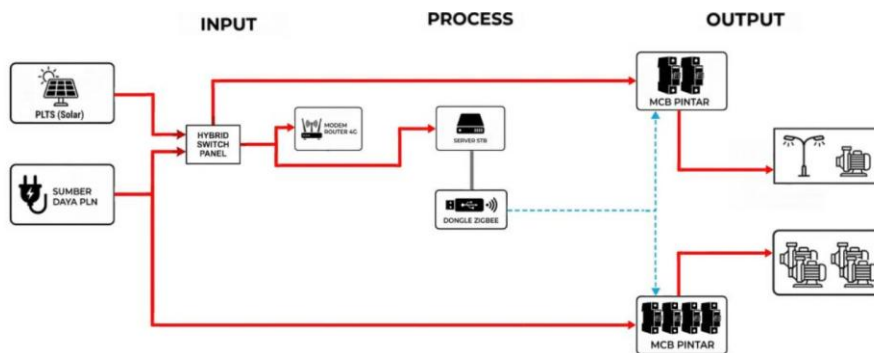


Gambar 12. Rancangan antarmuka pengguna sistem kendali: (A) Tampilan mode *Desktop* pada laptop administrator untuk pemantauan detail; (B) Tampilan mode *Mobile* yang responsif pada *smartphone* untuk kemudahan operasional lapangan.

2.5 Visualisasi Arsitektur dan Logika Kendali Sistem

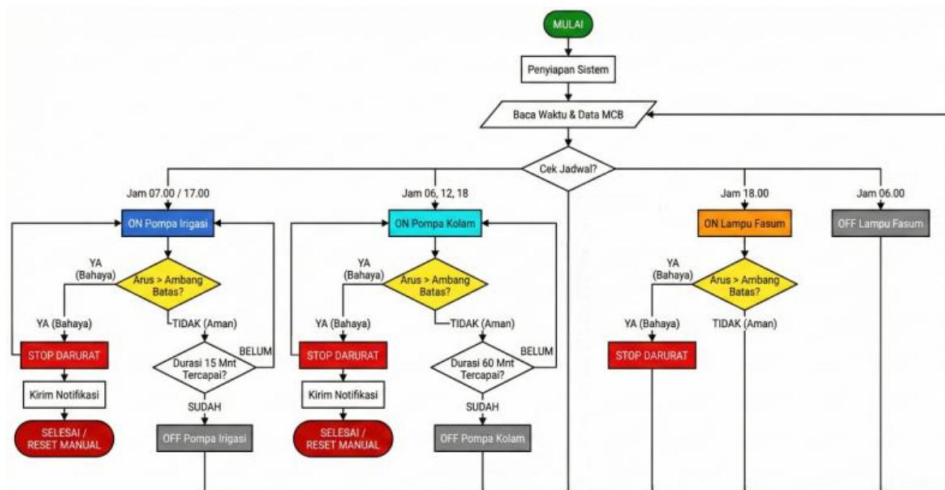
Keterhubungan sistem dijabarkan melalui dua diagram utama:

2.5.1 *System Block Diagram* (**Gambar 13**): Memetakan kluster hibrida kelistrikan (PLN & PLTS) dan memisahkannya dari jalur perambatan sinyal jaringan lokal untuk memastikan intervensi teknologi tidak mengganggu infrastruktur listrik murni bangunan.



Gambar 13. Diagram blok sistem yang memisahkan jalur distribusi daya (*Power Line*) dan jalur komunikasi data nirkabel (*Signal Line*).

2.5.2 *Control Flowchart* (**Gambar 14**): Menjabarkan struktur paralel algoritma, di mana sistem mengeksekusi perintah pewaktuan sirkadian secara simultan dengan pembacaan sensor keselamatan arus listrik.



Gambar 14. Diagram alir (*Flowchart*) logika kendali otomatis yang mengintegrasikan penjadwalan waktu dan proteksi arus lebih (*overcurrent protection*).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menguraikan hasil akhir dari perancangan sistem secara komprehensif. Pembahasan diawali dengan analisis kebaruan dan kontribusi ilmiah, dilanjutkan dengan visualisasi antarmuka perangkat lunak dan pemodelan logika kendali. Selanjutnya, dijabarkan analisis beban instalasi kelistrikan beserta validasi data empiris terhadap kinerja proteksi arus dan performa jaringan nirkabel di lingkungan nyata. Bagian akhir bab ini merangkum estimasi penghematan energi, evaluasi keekonomian sistem, serta implikasinya terhadap konektivitas sosial dan kebijakan publik.

3.1. Analisis Kebaruan dan Kontribusi Ilmiah

Berdasarkan tinjauan literatur mutakhir, rancangan sistem ini menawarkan pembaruan substansial melalui integrasi tiga pilar utama: arsitektur *Internet of Things* (IoT) preventif, *circular economy* (ekonomi sirkular), dan *edge computing* (komputasi tepi). Kombinasi ketiganya belum banyak diteliti secara bersamaan dalam konteks mitigasi bencana dan efisiensi energi di Indonesia. Kontribusi ilmiah ini menjembatani kesenjangan antara teknologi otomasi tingkat industri dan aksesibilitas teknologi untuk masyarakat akar rumput.

1. Otomasi Preventif untuk Stabilitas Lereng: Sistem bergeser dari sekadar pemantauan pasif menjadi instrumen intervensi fisik yang aktif. Infiltrasi air yang tidak terkendali dapat memicu kejenuhan tanah yang secara drastis menurunkan nilai Factor of Safety dan memicu longsor (Alam et al., 2024). Sistem memitigasi risiko ini secara otomatis melalui implementasi irigasi tetes berdenyut (*pulse drip irrigation*) yang membatasi perkolasi air ke lapisan dalam, sehingga kekuatan geser tanah penyusun lereng tetap terjaga.
2. Kemandirian Komputasi Tepi (*Edge Computing Lokal*): Mengingat koneksi internet terpusat (*cloud*) sangat rentan lumpuh saat terjadi bencana, sistem ini memproses data secara mandiri di lokasi kejadian (Khomenko & Babichev, 2025). Penggunaan arsitektur lokal berbasis *Home Assistant* menjamin latensi yang sangat rendah, menghemat energi, dan memastikan aktuatur keselamatan tetap beroperasi dengan andal tanpa bergantung pada internet publik (Khomenko & Babichev, 2025).
3. Penerapan Ekonomi Sirkular (Limbah Elektronik): Inovasi ini mendekonstruksi paradigma pengadaan infrastruktur IoT komersial yang mahal dengan mendaur ulang (*repurposing*) limbah elektronik *Set-Top Box* (STB) bekas sebagai server komputasi lokal (Ardiansyah et al., 2022). Pendekatan ini tidak hanya memangkas biaya investasi secara radikal agar teknologi lebih inklusif untuk masyarakat, tetapi juga secara signifikan mengurangi jejak karbon akibat sampah elektronik (da Luz et al., 2024).

3.2. Desain Antar Muka dan Logika Kendali

Keberhasilan sebuah *dashboard* kontrol IoT sangat bergantung pada penyajian visual yang akurat serta desain antarmuka yang memperhatikan aspek estetika, ergonomi, dan efektivitas interaksi pengguna (Dimiyati et al., 2025). Mengacu pada prinsip tersebut (**Gambar 12**), arsitektur antarmuka dirancang dengan tata letak yang sangat responsif untuk mendukung mode akses yang adaptif terhadap berbagai ukuran layar perangkat.

1. Aksesibilitas *Multi-Platform* dan Ergonomi Pengguna
Implementasi arsitektur *Local Cloud* yang dibangun di atas pelantar *Home Assistant* memungkinkan aksesibilitas kendali yang komprehensif, mampu menangani beban komputasi terdistribusi, serta meminimalkan latensi respons di jaringan lokal (Aavild et al., 2024). Pendekatan ini membagi fungsionalitas antarmuka menjadi dua mode utama berdasarkan studi ergonomi pengguna:
 - a. Mode *Desktop*: Memberikan visibilitas penuh (*full-screen*) terhadap parameter metrik secara *real-time* untuk kebutuhan analisis dan pemantauan efisiensi energi oleh administrator (Wibowo et al., 2024)
 - a. Mode *Mobile*: Berdesain vertikal yang ergonomis untuk navigasi satu tangan (*one handed operation*), memfasilitasi kemudahan mobilitas operator saat inspeksi di area perbukitan yang menantang (Dimiyati et al., 2025).
2. Validasi Logika Kendali dan Keselamatan Kerja (K3)
Secara visual, antarmuka ini telah mengakomodasi seluruh logika kendali yang dibutuhkan, yaitu tombol manual (*On/Off*) untuk setiap pompa dan lampu, serta indikator status yang terhubung dengan algoritma penjadwalan. Desain ini secara fungsional menjawab permasalahan operasional manual, di mana operator tidak perlu lagi melakukan kontak fisik dengan *stop kontak* bertegangan tinggi.

3.3. Analisis Beban dan Kapasitas Proteksi Kelistrikan

Analisis mendalam terhadap rekayasa daya ini bertujuan untuk mengkuantifikasi parameter keselamatan serta mengkalkulasi titik penghematan energi. Pendekatan yang digunakan adalah studi komparatif beban listrik

(*electrical load*) eksisting dengan bersandar pada spesifikasi teknis aktual dari pabrikan aktuator, serta menyelaraskannya dengan standar regulasi ketenagalistrikan yang mengikat secara yuridis dan operasional.

1. Analisis Reayasa Beban Pompa Air

Perhitungan sistematis ini diinisiasi untuk memastikan bahwa kapasitas daya maksimum yang dialokasikan mampu menjaga ketahanan komponen keras (*hardware*) dari ancaman kerusakan akibat beban puncak atau anomali harmonisa.

a. Analisis Daya Pompa Irigasi Utama (Sentral)

Mengacu pada ketentuan ketahanan infrastruktur kelistrikan yang dirilis melalui SPLN T3.002-1: 2022, perancangan ini secara ketat menerapkan *Safety Margin* minimum sebesar 20% (ekivalen dengan faktor pengali 1,2) (Persero), 2022). Toleransi ini diterapkan secara sadar guna mengompensasi fluktuasi penurunan tegangan (*voltage drop*) yang lumrah terjadi pada ujung saluran distribusi jaringan pedesaan (Arepalli & Naik, 2024)

$$P_{design} = P_{input} \times 1,2$$

Dimana P_{design} merupakan daya perancangan dalam metrik Watt, P_{input} merupakan konsumsi daya input spesifik kelistrikan pompa sentral yakni sebesar 330 W (merujuk pada spesifikasi plat nama Shimizu PS-135 E), dan 1,2 adalah rasio *margin of safety* (Nusantara, 2026).

$$P_{design} = 330 \text{ W} \times 1,2 = 396 \text{ W}$$

b. Analisis Daya Pompa Sirkulasi Mikro (*Submersible*)

Berbeda dengan pompa sentral, pompa sirkulasi kolam merupakan jenis motor induksi bertorsi rendah. Mengacu pada standarisasi proteksi peralatan *National Electrical Code* (NEC) 2023 Tabel 430.52, motor induksi berskala mikro harus dikalibrasi dengan faktor kelonggaran yang ekstrem, yakni 250% (faktor 2,5) (Association, 2011). Peraturan NEC memberlakukan rasio kelonggaran yang tinggi ini semata-mata untuk menjamin bahwa sistem asutan (*start-up*) mampu mengalahkan torsi inersia air statis tanpa memicu gangguan pada sirkuit pelindung.

$$P_{design} = 25 \text{ W} \times 2,5 = 62,5 \text{ W}$$

2. Analisis Beban Pemetaan Penerangan (*Lighting Load Analysis*)

Penentuan kapasitas intensitas pencahayaan dihitung melalui parameter fotometri yang didapatkan dari kunjungan dan pemetaan spasial di fasilitas Program Kaliandra. Area observasi difokuskan pada fasilitas Posyandu dengan luas total 42 m², yang selanjutnya dipecah menjadi dua wilayah dengan kebutuhan lumen yang dikustomisasi demi mencapai indeks efisiensi energi (IKE) sesuai regulasi SNI 6197:2020 tentang Konservasi Energi pada Sistem Pencahayaan (Nasional, 2020).

Formula penetapan jumlah lampu (N) yang dibutuhkan untuk mencapai iluminasi minimum digambarkan sebagai berikut:

$$N = \frac{E \times A}{\phi \times CU \times LLF}$$

Dimana N adalah total unit lumener yang wajib dipasang, E melambangkan target kuat penerangan (direkomendasikan 60 Lux untuk teras dan koridor sesuai SNI), ϕ adalah dimensi area (m²), merupakan fluks cahaya total per lampu (*Lumen*), CU adalah *Coefficient of Utilization* (dipatok konservatif pada rasio 0,65), dan LLF merupakan *Light Loss Factor* yang mendepresiasi penyusutan luminansi akibat penumpukan debu lingkungan sebesar 0,8 (Indonesia, 2024).

a. Kawasan Teras Observasi (18 m²): Menggunakan spesifikasi produk Philips LED 10W yang mampu menghasilkan *output* 1.050 lm (Indonesia, 2024).

$$N = \frac{60 \times 18}{1.050 \times 0,65 \times 0,8} = \frac{1080}{546} = 1,97 \text{ unit}$$

Angka matematis 1,97 secara teknis dibulatkan menjadi 2 unit penyebaran cahaya untuk mencegah terbentuknya titik buta (*blind spot*) saat malam hari.

- b. Ruang Pelayanan Posyandu (24 m²): Mengaplikasikan lampu Philips LED Bright 20W dengan kemampuan fluks superior sebesar 2.350 lm (Indonesia, 2024).

$$N = \frac{60 \times 24}{2.350 \times 0,65 \times 0,8} = \frac{1440}{1222} = 1,17 \text{ unit}$$

Hasil memungkinkan pembulatan menjadi 1 unit pusat pencahayaan.

3. Kalkulasi Parameter Arus Nominal (I_{nominal})

Kapasitas gawai proteksi sirkuit miniatur cerdas (*Smart MCB Zigbee*) tidak dapat diputuskan secara empiris tanpa menjabarkan nilai arus kerja ekuilibrium beban (I_{nominal}) (Penyusun, 2014). Perhitungan arus ini diharmonisasikan dengan karakter inersia *inrush current* dari pedoman Persyaratan Umum Instalasi Listrik (PUIL) 2011 dan regulasi keselamatan internasional NEC 2023.

$$I_{\text{nominal}} = \frac{P}{V \times \cos \phi}$$

Faktor daya ($\cos \phi$) diasumsikan berada di angka 0,8 untuk perangkat yang mengandung gulungan induktif (motor pompa), serta diasumsikan konservatif pada rentang 0,5 untuk kompensasi *driver* LED generasi menengah. Tegangan operasi (V) yang ditetapkan merujuk pada standar pasokan negara yakni 230 Volt ((Persero), 2022).

- a. Aktuator Pompa Irigasi Utama (330 Watt)

$$I_{\text{nominal}} = \frac{330}{230 \times 0,8} = 1,79 \text{ Ampere}$$

- b. Aktuator Pompa Sirkulasi Mikro (25 Watt)

$$I_{\text{nominal}} = \frac{25}{230 \times 0,8} = 0,13 \text{ Ampere}$$

- c. Aktuator Sistem Penerangan

$$\text{Lampu Teras (2 unit x 10 W): } I_{\text{nominal}} = \frac{10}{230 \times 0,5} = 0,087 \text{ A per unit}$$

$$\text{Lampu Posyandu (1 unit x 20 W): } I_{\text{nominal}} = \frac{20}{230 \times 0,5} = 0,174 \text{ A}$$

Total kumulatif rekapitulasi pada panel penerangan: $(2 \times 0,087) + 0,174 = 0,348 \text{ Ampere}$.

4. Diagnostik Arus Asutan Dinamis (*Locked Rotor Current - LRC*)

Kendala utama otomasi mesin air bersumber pada karakteristik fisika motor induksi yang menyedot energi kinetik listrik dengan skala masif di persekian detik pertama. Berdasarkan kurva kalibrasi konversi teknis yang diterbitkan NEC 2023 pada sub-tabel 430.251(A) (Eaton, 2024), faktor konstan dari lonjakan asutan rotor statis fasa tunggal berikisar di rasio 6 kali dari titik arus kerja permanennya.

$$I_{\text{start}} = I_{\text{nominal}} \times 6$$

Melalui pengaplikasian konstanta rasio standar internasional *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA) ini, maka lonjakan teoretis didapatkan:

$$\text{Pompa Sentral Irigasi: } I_{\text{start}} = 1,79 \text{ A} \times 6 = 10,74 \text{ Ampere}$$

$$\text{Pompa Submersible: } I_{\text{start}} = 0,13 \text{ A} \times 6 = 0,78 \text{ Ampere}$$

5. Validasi Konfigurasi Ambang Batas (*Threshold*) Proteksi Digital

Penentuan ambang batas pemutusan (*tripping threshold*) pada *Smart MCB* dilakukan untuk menyeimbangkan antara perlindungan lilitan motor dan kelancaran operasional saat asutan awal.

- a. Pompa Utama: Mengacu pada NEC 2023 Pasal 430.52 (*Exception 2*), proteksi motor induksi diperbolehkan disetel hingga 400% dari arus nominal untuk menahan lonjakan awal (Eaton, 2024). Mengingat arus asutan (I_{start}) pompa mencapai 10,74 A, maka threshold digital dikunci pada 11 Ampere.

Hal ini mencegah *nuisance tripping* tanpa mengabaikan perlindungan terhadap kemacetan rotor (*locked rotor*).

- b. Pompa Celup & Penerangan: Meskipun arus nominal gabungan sangat rendah ($< 1 \text{ A}$), threshold proteksi digital ditetapkan pada 2 Ampere. Penetapan nilai ambang batas ini sangat krusial untuk menjaga stabilitas sensor dan mencegah pemutusan sirkuit secara keliru akibat adanya gangguan noise pada sinyal pengukuran (Mumtaz et al., 2023).

Tabel 2. Hasil Analisis Beban Listrik dan Parameter Digital

Klasifikasi Beban Terintegrasi	Daya Konsumsi Pabrikasi (W)	Daya Toleransi Rancang (W)	Beban Arus Nominal Aktual (A)	Estimasi Arus Start LRC (A)	Konfigurasi Threshold Smart MCB (A)
Pompa Irigasi Sentrdal	330	396	1,79	10,74	11
Pompa Sirkulasi Mikro (Celup)	25	62,5	0,13	0,78	2
Lampu LED Teras (2 Pcs)	20	20	0,174	-	-
Lampu LED Ruang Dalam (1 Pcs)	20	20	0,174	-	2
Total	385	498,5	2,26	11,52	-

3.5. Performa Jaringan Zigbee Mesh pada Kondisi NLOS

Guna memvalidasi keandalan sistem proteksi, dilakukan komparasi fungsional antara pemutus sirkuit pintar (*Smart MCB*) dan MCB mekanis konvensional berdasarkan data empiris sekunder. Keterbatasan utama MCB konvensional adalah kebutuhannya terhadap intervensi manusia untuk menyalakan kembali saklar secara mekanis setelah terjadi pemutusan (*trip*). Sebaliknya, pengujian empiris pada prototipe *Smart MCB* membuktikan bahwa perangkat mampu mendeteksi anomali dan mengambil tindakan proteksi secara otomatis tanpa campur tangan manusia (Yadav & Sharma, 2023). Dalam pengujiannya, sistem ini menggunakan sensor tegangan AC berbasis pembagi tegangan resistif (*resistive voltage divider*) untuk memantau stabilitas sirkuit. Apabila terjadi anomali kelistrikan yang melampaui batas aman, seperti lonjakan tegangan di atas 240 V, mikrokontroler akan langsung memutus aliran listrik. Selain pemutusan otomatis, keunggulan *Smart MCB* dibuktikan melalui fitur kapabilitas IoT yang mampu mengirimkan notifikasi peringatan secara seketika kepada pengguna melalui email via layanan IFTTT saat terjadi anomali tegangan tinggi (Yadav & Sharma, 2023). Data ini secara empiris membuktikan bahwa integrasi *Smart MCB* sangat relevan untuk diterapkan pada infrastruktur Kaliandra guna mengeliminasi ketergantungan pada operator manual dan meningkatkan respons mitigasi bahaya jarak jauh.

3.5 Analisis Empiris Performa Jaringan Zigbee Mesh dalam Kondisi Geografis NLOS

Tantangan utama komunikasi nirkabel di lokasi Kaliandra adalah topografi berbukit dan hambatan fisik (vegetasi dan bangunan) yang menciptakan kondisi transmisi *Non-Line of Sight* (NLOS). Guna memvalidasi keandalan protokol *Zigbee Mesh* (IEEE 802.15.4), digunakan komparasi data empiris pengujian jaringan *multihop* di area hutan pegunungan yang memiliki karakteristik serupa (Booranawong et al., 2024). Hasil pengujian pada tabel 3 menunjukkan bahwa meskipun kekuatan sinyal (RSSI) mengalami redaman di kisaran -80 hingga -81 dBm pada setiap titik pantul (*hop*), sistem perutean otomatis Zigbee terbukti mampu mempertahankan rasio keberhasilan pengiriman paket (*Packet Delivery Ratio / PDR*) secara sempurna di angka 100%.

Tabel 3. Data Empiris Kualitas Propagasi Zigbee Mesh di Lingkungan Hutan Pegunungan

Skenario Lompatan (Hop)	Stabilitas Sinyal Rata-Rata RSSI (dBm)	Keberhasilan Pengiriman PDR (%)
Hop 1 (Transmitter ke Relay 1)	-80,44	100
Hop 2 (Relay 1 ke Relay 2)	-80,38	100
Hop 3 (Relay 2 ke Receiver)	-81,33	100

Dari sisi efisiensi waktu, uji coba tersebut mencatat penundaan transmisi (*End-to-End Delay / ETED*) rata-rata hanya sebesar 210 milidetik per paket komando. Fakta ini diperkuat oleh dokumen pengujian pabrikan yang memvalidasi bahwa latensi transmisi *multi-hop Zigbee* untuk ukuran paket kecil (50 bytes) akan tetap stabil di bawah 140 milidetik meskipun harus melewati hingga 6 lompatan antartitik (Labs, 2025). Bukti empiris ini menyimpulkan bahwa implementasi topologi *Zigbee Mesh* sangat andal untuk menjaga konektivitas sistem mitigasi di lanskap perbukitan tanpa menimbulkan latensi yang mengganggu algoritma perlindungan.

3.6 Estimasi Penghematan Energi dan Komputasi Tepi

Keberhasilan transisi menuju sistem IoT pada Program Kaliandra sangat bergantung pada kemampuan sistem dalam memberikan nilai tambah berupa penghematan energi yang terukur. Evaluasi ini dilakukan dengan membandingkan potensi pemborosan akibat kelalaian operasional manual terhadap konsumsi daya statis dari perangkat *Edge Server* yang bekerja secara kontinu.

1. Analisis Inefisiensi Energi pada Operasional Konvensional

Tingkat inefisiensi energi pada metode manual sangat dipengaruhi oleh konsistensi operator dalam mematuhi jadwal operasional perangkat. Berdasarkan observasi, terdapat 6 siklus pensaklaran harian (irigasi pagi/sore, sirkulasi kolam 3 kali, dan penerangan fasum). Ketergantungan pada intervensi manusia ini menimbulkan risiko teknis berupa keterlambatan pemadaman perangkat (*delay off*) yang memicu konsumsi energi nir-manfaat. Audit manajemen energi dilakukan dengan memproyeksikan deviasi waktu operasional kumulatif sebesar 1 jam per hari. Potensi kehilangan energi harian hingga bulanan (E_{waste}) dihitung berdasarkan beban puncak gabungan sebesar 498,5 Watt menggunakan persamaan dasar audit energi:

$$E_{waste} = P_{load} \times t_{delay} \times \text{Hari}$$

Keterangan derivatif rumus:

- Beban Daya Gabungan Fasilitas (P_{load}) = Merupakan daya puncak dari seluruh beban induktif dan yakni sebesar 498,5 Watt (0,498 Kilowatt).
- Interval Waktu Tunda Harian (t_{delay}) = Proyeksi probabilitas keterlambatan manusia yakni 1 jam/hari.
- Skala Periode Observasi (Hari) = Siklus audit manajemen 30 hari operasi bulanan.

$$E_{waste} = 0,498 \text{ kW} \times 1 \text{ jam/hari} \times 30 \text{ hari} = 1495 \text{ kWh}$$

Ini membuktikan bahwa ketergantungan yang tidak efisien pada pengawasan tenaga fisik memiliki probabilitas menderivasikan pemborosan setidaknya 14,95 Kilowatt-hour secara bulanan hanya dari kelalaian.

2. Analisis Konsumsi Daya Operasional *Edge Computing*

Implementasi arsitektur IoT *Smart Grid* pada Program Kaliandra memerlukan unit komputasi data yang mampu beroperasi secara kontinu selama 24 jam penuh. Evaluasi kebutuhan daya pada unit ini didasarkan pada *Rating Output* resmi dari adaptor bawaan perangkat STB (ZTE HG680P). Merujuk pada hukum Ohm untuk arus searah (DC), perangkat dengan tegangan 12 Volt dan arus maksimum 1 Ampere memiliki ambang batas daya (*Safety Margin*) sebesar 12 Watt. Nilai ini digunakan sebagai acuan tertinggi untuk menjamin reliabilitas sistem saat prosesor bekerja pada beban maksimal (*full load*). Kalkulasi serapan beban energi konstan peranti sistem secara penuh (30 hari) dihitung melalui tahapan berikut:

$$\text{Pergeseran Desimal Daya Server: } P_{server} = 12 \text{ W}/1000 = 0,012 \text{ kW}$$

$$\text{Jejak Konsumsi Periodik Harian: } E_{daily} = 0,012 \text{ kW} \times 24 \text{ jam} = 0,288 \text{ kWh}$$

$$\text{Proyeksi Konsumsi Sebulan Penuh: } E_{total} = 0,288 \text{ kWh} \times 30 \text{ hari} = 8,64 \text{ kWh/bulan}$$

Dapat divalidasi bahwa jejak serapan karbon energi statis dari sistem komputasi ini sangat efisien dan konstan, yakni hanya berkisar di nilai 8,64 kWh setiap bulannya.

3. Akumulasi Keuntungan Penghematan Bersih (*Net Saving*)

Parameter utama dalam mengevaluasi efisiensi sistem ini adalah nilai penghematan bersih, yang diperoleh dari selisih antara potensi pemborosan akibat kelalaian operasional manual dengan beban listrik statis dari server IoT. Kalkulasi keuntungan energi tersebut dirumuskan sebagai berikut:

$$E_{saving} = E_{waste} - E_{server}$$

$$E_{saving} = 14,95 \text{ kWh} - 8,64 \text{ kWh} = 6,31 \text{ kWh per bulan}$$

Hasil audit energi menunjukkan bahwa integrasi skema cerdas *edge computing* mampu memberikan kontribusi penghematan listrik sebesar 6,31 kWh per bulan. Otomatisasi ini berhasil meminimalisir

inefisiensi operasional harian sekaligus menjaga konsumsi daya sistem tetap berada pada ambang batas yang rendah, sehingga mendukung keberlanjutan infrastruktur energi pada Program Kaliandra.

3.7 Evaluasi Keekonomian dan Implementasi Sistem

Implementasi sistem otomasi pada Program Kaliandra mengedepankan efisiensi biaya melalui pemanfaatan perangkat komputasi bekas dan komponen IoT yang ekonomis. Bagian ini menjabarkan rincian harga per unit untuk setiap komponen yang digunakan dalam rancangan sistem.

1. Daftar Komponen dan Harga Satuan

Penentuan estimasi biaya dilakukan berdasarkan survei harga pasar pada *platform* digital tahun 2025. Rincian kebutuhan biaya untuk membangun satu unit *Edge Server* dan enam titik *Actuator Node* dijabarkan pada tabel 4.

Tabel 4 Rincian Estimasi Biaya Otomasi Kaliandra (Estimasi Harga Pasar Tahun 2025)

No.	Komponen	Spesifikasi Teknis	Volume	Harga Satuan	Total Biaya
1	Server				
	Main Unit Server	STB ZTE HG680P (Bekas)	1 buah	Rp. 200.000	Rp. 200.000
	Modul Komunikasi	Sonoff Zigbee 3.0 USB Dongle	1 buah	Rp. 314.500	Rp. 314.500
	Media Penyimpanan	USB Flashdrive 64 GB	1 buah	Rp. 100.900	Rp. 100.900
	Kabel Jaringan	Kabel LAN UTP Cat5E (2 Meter)	1 buah	Rp. 9.000	Rp. 9.000
	Ekstensi Sinyal	Kabel ekstensi USB 2.0 (2 Meter)	1 buah	Rp. 22.900	Rp. 22.900
2	Perangkat				
	Kontroller Beban	Smart MCB Zigbee 63 A	6 buah	Rp. 351.000	Rp. 2.106.000
	Box Pelindung	Junction Box (200x150x100mm) Waterproof IP 65	5 buah	Rp. 276.000	Rp. 1.380.000
		Stop kontak 1 lubang	5 buah	Rp. 7.400	Rp. 37.000
		Steker L	5 buah	Rp. 10.800	Rp. 54.000
		Rel MCB Box panel (2 meter)	1 buah	Rp. 40.000	Rp. 40.000
		Baut	1 set	Rp. 12.000	Rp. 12.000
		Pipa Conduit 20 mm (2 Meter)	1 buah	Rp. 9.000	Rp. 9.000
	Material Instalasi	Sambungan T (<i>T-Junction</i>) Conduit 20 mm	3 buah	Rp. 5.000	Rp. 15.000
		Sambungan L (<i>Elbow</i>) Conduit 20 mm	3 buah	Rp. 850	Rp. 2.550
		Klem Pipa 20 mm	1 set	Rp. 27.000	Rp. 27.000
		Box MCB Broco	1 buah	Rp. 6.800	Rp. 6.800
		Kabel NYA 1 x 1,5 (Fasa)	1 rol	Rp. 194.000	Rp. 194.000
		Kabel NYA 1 x 1,5 (Netral)	1 rol	Rp. 194.000	Rp. 194.000
		Kabel NYA 1 x 1,5 (<i>Grounding</i>)	1 rol	Rp. 195.000	Rp. 195.000
		Total			Rp. 4.919.650

2. Analisis Kelayakan Finansial dan Paradigma Siklus-Hidup

Data pada tabel 4 menunjukkan bahwa sistem IoT yang diusulkan menawarkan efisiensi kapital yang signifikan dengan mereduksi ketergantungan pada perangkat kontrol industri konvensional yang berbiaya tinggi. Analisis kelayakan finansial sistem ini didasarkan pada tiga parameter utama:

- Inovasi ini memanfaatkan *motherboard* STB bekas yang dikonfigurasi ulang menjadi *Local Cloud Server* berbasis *Linux*. Pendekatan ini tidak hanya menekan biaya pengadaan server hingga Rp200.000, tetapi juga menjadi solusi preventif terhadap penumpukan limbah elektronik global. Strategi ini menciptakan rantai nilai hijau yang menghubungkan pengurangan jejak karbon pasca-konsumsi dengan pemanfaatan teknologi komputasi berkinerja tinggi.
- Pemilihan aktuator didasarkan pada ketahanan operasional jangka panjang, bukan sekadar efisiensi biaya awal. Penggunaan *Smart MCB* 63A dengan plat kontak tembaga industrial bertujuan untuk menangani daya kejut induktif (*inrush current*) dari pompa irigasi. Spesifikasi ini menjamin usia pakai perangkat yang lebih lama dan meminimalkan biaya pemeliharaan operasional (*maintenance cost*) akibat kerusakan relay yang sering terjadi pada perangkat kelas rumahan.
- Meskipun penghematan energi sebesar 6,31 kWh/bulan memberikan kontribusi finansial langsung yang relatif kecil, nilai ekonomi utama sistem ini terletak pada aspek mitigasi bencana. Dengan total investasi Rp4.919.650, sistem ini mampu mencegah kerugian makro akibat kerusakan infrastruktur

lereng yang dipicu oleh limpasan air (*run off*). Rasio pengembalian investasi (ROI) diukur dari besarnya biaya rehabilitasi fasilitas yang berhasil dihindari melalui manajemen air yang presisi.

3.7 Evaluasi Keekonomian dan Implementasi Sistem

Inovasi teknologi IoT harus ditransformasikan menjadi instrumen strategis dalam pembangunan masyarakat rural yang berkelanjutan.

1. Manajemen Bencana Partisipatif Berbasis Komunitas
Sistem kendali terdistribusi berbasis *edge computing* mengubah infrastruktur irigasi menjadi mitigasi bencana preventif guna mencegah kejenuhan tanah pemicu longsor. Inisiatif ini mendukung pilar Desa Tangguh Bencana (Destana) yang mengedepankan ketangguhan kolektif dan kemandirian masyarakat dalam mengelola risiko secara partisipatif (Wacana, 2021).
2. Transformasi Literasi Digital Masyarakat
Antarmuka ponsel cerdas berfungsi sebagai katalis pendidikan teknis bagi warga, termasuk kader posyandu dan karang taruna. Melalui sistem ini, masyarakat bertransformasi dari objek bantuan menjadi aktor kunci dalam pengambilan keputusan berbasis data lingkungan (Wacana, 2021).
3. Dukungan Kebijakan Ekonomi Sirkular dan Keberlanjutan
Penggunaan *Set Top Box* bekas sebagai unit komputasi membuktikan bahwa efisiensi energi dan kemandirian teknologi dapat dicapai melalui ekonomi sirkular. Inovasi ini sangat relevan diintegrasikan ke dalam RPJMDes, mengingat prioritas Dana Desa saat ini mencakup mitigasi bencana alam dan lingkungan (Wacana, 2021).

4. KESIMPULAN

Inovasi sistem IoT berbasis Local Cloud ini berhasil memodernisasi infrastruktur Program Kaliandra melalui integrasi teknologi yang efisien dan inklusif. Kesimpulan utama dari penelitian ini adalah:

Inovasi sistem kendali terdistribusi berbasis komputasi tepi lokal ini telah berhasil memodernisasi infrastruktur Program Kaliandra melalui integrasi teknologi yang efisien dan inklusif. Secara ilmiah, penelitian ini menetapkan kebaruan melalui perpaduan antara arsitektur kendali preventif, penerapan ekonomi sirkular melalui pemanfaatan limbah elektronik, dan komputasi tepi. Pendekatan ini terbukti mampu mendemokratisasi teknologi industri, secara radikal memangkas biaya investasi keseluruhan menjadi hanya Rp4.919.650.

Secara teknis, penggunaan jaringan *Zigbee Mesh* menjamin transmisi data tetap stabil dengan *Packet Delivery Ratio* 100% meskipun berada di medan sulit. Stabilitas ini memastikan algoritma irigasi tetes bekerja presisi dalam menjaga kelembapan tanah, sehingga keamanan lereng mencapai angka 2,042 jauh melampaui standar nasional SNI untuk mencegah longsor.

Sistem ini dilengkapi *Software Defined Protection* yang mampu memutus lonjakan listrik dalam hitungan milidetik, menjamin keamanan warga dari risiko sengatan listrik. Selain meningkatkan keselamatan kerja, transisi ke otomatisasi nirsentuh ini juga mencegah kelalaian manual dan memberikan penghematan energi terverifikasi sebesar 6,31 kWh per bulan.

Secara sosiologis, pemanfaatan barang bekas sebagai peladen lokal telah mengubah masyarakat lansia menjadi aktor lingkungan yang literat digital. Inovasi interdisipliner ini menjadi landasan kuat bagi pemerintah dan swasta untuk mereplikasi model mitigasi bencana yang partisipatif menuju terwujudnya ekosistem Desa Tangguh Bencana (Destana) yang berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih: Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT atas selesainya karya tulis mengenai desain sistem IoT untuk Program Kaliandra ini. Saya mengucapkan terima kasih kepada PT Pertamina Patra Niaga RU V Balikpapan atas dukungan data dan akses observasi pada infrastruktur Program Kaliandra di Kampung Baru Ilir. Terima kasih juga saya sampaikan kepada masyarakat setempat yang telah membantu proses pemetaan geospasial dan validasi lapangan. Semoga inovasi ini bermanfaat bagi pengembangan teknologi mitigasi bencana di Indonesia.

Kontribusi Penulis: Konsep – Abu Yazid Bustomi, Muhammad Zayyan Abiyyusa Firdaus, Denny Saputra Ramadhan; **Desain** – Abu Yazid Bustomi; **Supervisi** – Abu Yazid Bustomi; **Bahan** – Abu Yazid Bustomi; **Koleksi Data dan/atau Proses** – Abu Yazid Bustomi; **Analisis dan/atau Interpretasi** – Abu Yazid Bustomi; **Pencarian Pustaka** – Abu Yazid Bustomi; **Penulisan** – Abu Yazid Bustomi; **Ulasan Kritis** – Abu Yazid Bustomi

Sumber Pendanaan: -

Konflik Kepentingan: Para penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan

Referensi

- Aavild, A.P., de Lasson, A.R., Andersen, C.M., Christensen, E., Moreschini, S., Hästbacka, D., Taibi, D., Albano, M. Distributed Home Automation with Home Assistant. In *Proceedings of the 14th International Conference on the Internet of Things (IoT '24)*, Association for Computing Machinery, **2024**, 206-212. <https://doi.org/10.1145/3703790.3703828>
- Alam, M.J.B., Manzano, L.S., Debnath, R., Ahmed, A.A. Monitoring Slope Movement and Soil Hydrologic Behavior Using IoT and AI Technologies: A Systematic Review. *Hydrology*, **2024**, *11*(8), 111.
- Anonim. AN1138: Zigbee Mesh Network Performance. Silicon Laboratories. **2025**. <https://docs.silabs.com/zigbee/latest/zigbee-mesh-network-performance/>
- Anonim. Community-Based Disaster Risk Management (CBDRM) Policy Review in Indonesia: Final Report. In *SIAP SIAGA: Kemitraan Indonesia Australia untuk Kesiapsiagaan Bencana*. Petrasa Wacana & SIAP SIAGA. **2021**.
- Anonim. SNI 6197:2020: Konservasi energi pada sistem pencahayaan. Badan Standardisasi Nasional. **2020**. <http://www.bsn.go.id>
- Anonim. NFPA 70: National Electrical Code (2011 Edition). National Fire Protection Association. **2011**. <https://www.nfpa.org/codes-and-standards/all-codes-and-standards/list-of-codes-and-standards/detail?code=70>
- Anonim. Petunjuk Penggunaan Pompa Air Listrik Otomatis Model: PS-135 E. PT. Tirta Intimizu Nusantara. **2026**. <http://www.shimizu.co.id>
- Anonim. (2014). *Penjelasan Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2011 (PUIL 2011)*. Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Anonim. *Praktik CSR PT Kilang Pertamina Internasional Refinery Unit V Balikpapan: Overview Program KALIANDRA (Kampung Baru Ilir Mandiri, Indah, & Sejahtera)*. **2025**. <https://www.pertamina.com>
- Anonim. *Katalog Produk Philips LED 2024*. Signify Holding. **2024**. <https://lighting.philips.co.id>
- Anonim. SNI 8460:2017: Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standardisasi Nasional. **2017**. <https://www.bsn.go.id>
- Ardiansyah, M.F., Diansyah, T.M., Liza, R. Penggunaan Set top box Bekas untuk Dimanfaatkan sebagai Cloud Server. *Blend Sains Jurnal Teknik*, **2022**, *1*(2), 88-96.
- Arepalli, P.G., Naik, K.J. An IoT based smart water quality assessment framework for aqua-ponds management using Dilated Spatial-temporal Convolution Neural Network (DSTCNN). *Aquacultural Engineering*, **2024**, *104*(102373), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2023.102373>
- Booranawong, A., Hirunkitangsri, P., Buranapanichkit, D., Pochaiya, C., Jindapetch, N., Saito, H. A 2.4 GHz IEEE 802.15.4 Multi-Hop Network for Mountainous Forest and Watercourse Environments: Sensor Node Deployment and Performance Evaluation. *Signals*, **2024**, *5*(4), 774-793. <https://doi.org/10.3390/signals5040043>
- Carroll, J. L., Orr, S.T., Benedict, C.A., DeVetter, L.W., Bryla, D.R. Feasibility of Using Pulse Drip Irrigation for Increasing Growth, Yield, and Water Productivity of Red Raspberry. *HortScience*, **2024**, *59* IS-3, 332-339. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI117467-23>
- da Luz, G.P.C.P., Sato, G.M., Gonzalez, L.F.G., Borin, J.F. Repurposing of TV Boxes for a Circular Economy in Smart Cities Applications. *Research Square (Preprint)*. **2024**. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4619533/v1>
- Dimiyati, A.N., Purwantoro, Primajaya, A. Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis Internet of Things (IoT) dengan Visualisasi Data pada Aplikasi Android (Studi Kasus: PT. South Pacific Viscose). *JITET (Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan)*, **2025**, *13*(3), 523-536.
- Eaton. *2023 National Electrical Code updates and additions: Field guide*. Eaton. **2024**. <http://eaton.com/nec>
- Gungor, V.C., Hancke, G.P. Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, **2009**, *56*(10), 4258-4265. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2015754>
- Khan, W.Z., Ahmed, E., Hakak, S., Yaqoob, I., Ahmed, A. Edge computing: A survey. *Future Generation Computer Systems*, **2019**, *97*, 219-235. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.02.050>
- Khomenko, Y., Babichev, S. Modular IoT Architecture for Monitoring and Control of Office Environments Based on Home Assistant. *IoT*, **2025**, *6*(4), 69. <https://doi.org/10.3390/iot6040069>
- Mumtaz, F., Imran, K., Abusorrah, A., Bukhari, S.B.A. Harmonic Content-Based Protection Method for Microgrids via 1-Dimensional Recursive Median Filtering Algorithm. *Sustainability*, **2023**, *15*(1), 164.
- Mutiarani, R.A. Digitalisasi pelayanan kesehatan di Indonesia: Peluang dan tantangan. *Diakses dari https://www.researchgate.net*. **2023**.
- Nugraha, I.M.A., Desnanjaya, I.G.M.N. Energy Efficiency in Aeration Systems For Aquaculture Ponds: A Comprehensive Review. *Jurnal Riset Akuakultur*, **2025**, *20*(1), 1-25. <https://doi.org/10.15578/jra.20.1.2025.1-25>
- Prabha, K. Performance Assessment and Comparison of Efficient Ad Hoc Reactive and Proactive Network Routing Protocols. *SN Computer Science*, **2020**, *1*(13). <https://doi.org/10.1007/s42979-019-0015-y>
- PT. PLN (Persero). *SPLN T4.002-1: 2022 Konstruksi Gardu Induk Tegangan Tinggi Bagian 1: Konfigurasi Sistem Peralatan Elektromekanik*. PT PLN (Persero). **2022**. <https://www.pln.co.id>
- Putri, V.L.B., Priyadi, A., Pujiantara, M., Anam, S., Agustinah, T. Inovasi Aerator Diffuser Otomatis Berbasis IoT Bertenaga Hybrid Solar System Guna Meningkatkan Kualitas dan Profitabilitas Produksi Budidaya Perikanan Desa Wringinrejo,

- Banyuwangi. *SEWAGATI, Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat*, **2025**, 9(6), 1489–1501. <https://doi.org/10.12962/j26139960.v9i6.8607>
- Rahardjo, H., Ong, T.H., Rezaur, R.B., Leong, E.C. Factors Controlling Instability of Homogeneous Soil Slopes under Rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **2007**, 133(12), 1532–1543. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2007\)133:12\(1532\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133:12(1532))
- Risaldi, A., Ali, M.Y., Marufa, M., Rahmat, A., Antaria, S. Efektivitas Penerapan Irigasi Tetes (Drip Irrigation) Pada Tanaman Cabai Merah. *Jurnal Teknik Hidro*, **2024**, 17(1), 14–22.
- Ruliyanta, R., Kusuma, I., Fathoni, M. Review of Wireless Communication Layer Interface on Advanced Metering Infrastructure. *Journal of Advanced Computing Technology and Application (JACTA)*, **2024**, 6(2), 40–59.
- Satyanarayanan, M. The Emergence of Edge Computing. *Computer*, **2017**, 50(1), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.9>
- Wibowo, F., Suheri, Yugianus, P. An IoT-Enabled Smart Energy Management System to Improve Energy Efficiency in University Laboratory. *Sinkron: Jurnal dan Penelitian Teknik Informatika*, **2024**, 8(2), 1038–1046. <https://doi.org/10.33395/sinkron.v8i2.13584>
- Yadav, A., Sharma, V.K. Smart MCB Design using Embedded and IOT system. In *2023 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, **2023**, 1–5. <https://doi.org/10.1109/ICCCI567452023.10128488>

This is an open access article which is publicly available on our journal's website under Institutional Repository at <https://e-journals2.unmul.ac.id/index.php/ANDIL/index>