

**PROPOSAL RISET DAN INOVASI UNTUK INDONESIA MAJU
KOMPETISI (RIIM KOMPETISI)**



BRIN
BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL



lpdp

lembaga pengelola dana pendidikan

**TEMA
KEDAULATAN ENERGI**

**MANAJEMEN ENERGI CERDAS BERBASIS MULTI-AGENT DEEP
REINFORCEMENT LEARNING UNTUK KETAHANAN SISTEM ENERGI
TERBARUKAN SKALA KOMUNAL DI WILAYAH 3T**

KETUA:

Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.

(Universitas Budi Luhur)

ANGGOTA:

Peby Wahyu Purnawan, S.T., M.T. (Universitas Budi Luhur)

Dion Setiawan, S.T., M.T. (Universitas Budi Luhur)

UNIVERSITAS BUDI LUHUR
TAHUN 2026

HALAMAN PENGESAHAN

PROPOSAL RISET DAN INOVASI UNTUK INDONESIA MAJU KOMPETISI

1. Tema : Kedaulatan Energi
2. Judul Proposal : Manajemen Energi Cerdas Berbasis
Multi-Agent Deep Reinforcement Learning untuk
Ketahanan Sistem Energi Terbarukan Skala
Komunal di Wilayah 3T
3. Ketua Periset
 - a. Nama Lengkap : Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.
 - b. NIP/NIK : 3671130702800002
 - c. Jabatan : Dosen (Lektor)
 - d. Institusi Periset : Universitas Budi Luhur
 - e. Unit Kerja Periset : Pusat Studi Energi Terbarukan - DRPM
 - f. Alamat : Jl. Raya Ciledug, Petukangan Utara,
Jakarta Selatan, 12260
 - g. No. HP/WA : 08111574710
 - h. Email : akhmad.musafa@budiluhur.ac.id
4. Mitra Riset : -
Alamat Mitra Riset : -
Peran Mitra Riset : -

5. Anggota Periset

No	Nama	Institusi	No. HP/WA	Email
1	Peby Wahyu Purnawan, S.T., M.T.	Universitas Budi Luhur	083870806172	peby.wahyup@budiluhur.ac.id
2	Dion Setiawan, S.T., M.T.	Universitas Budi Luhur	082124044378	dion.setiawan@budiluhur.ac.id

6. Keluaran

No	Uraian	Tahun 1	Tahun 2
1	Publikasi pada jurnal internasional Q2	1(satu) publikasi pada jurnal internasional Q2 dengan status Under Review	1(satu) publikasi pada jurnal internasional Q1 dengan status Accepted
2	Hak Cipta	1 (satu) Hak Cipta status Terdaftar	1 (satu) paten sederhana Terdaftar

7. Pendanaan

No	Tahapan	Usulan Anggaran	Dana Pendamping	Total Anggaran
1	Tahun 1	Rp 230.950.000	Rp 0	Rp 230.950.000
2	Tahun 2	Rp 202.160.000	Rp 0	Rp 202.160.000
Total Pengajuan Anggaran				Rp

Dengan ini menyatakan bahwa proposal yang diajukan bersifat orisinil dan belum pernah memperoleh pendanaan dari lembaga/sumber dana lain, serta tidak mengandung plagiasi.



Prof. Dr. Ir. Prudensius Maring, M.A.
NIP. 190043

Jakarta, 30 Juli 2026
Ketua Tim

Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.
NIP. 040056

ABSTRAK

Ketahanan energi di wilayah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T) Indonesia menghadapi tantangan serius. Sistem energi terbarukan yang telah dibangun sering mengalami kegagalan operasional akibat kerusakan komponen penyimpanan energi (baterai), minimnya tenaga teknis perawatan, serta kapasitas daya yang terbatas, sehingga listrik tidak dapat beroperasi penuh 24 jam. Akibatnya, masyarakat kembali bergantung pada generator diesel (PLTD) dengan biaya operasional tinggi dan pasokan bahan bakar terbatas. Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem manajemen energi cerdas berbasis Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL) untuk sistem hibrida konsentrator surya-fotovoltaik-biogas-pemanen curah hujan-diesel-baterai skala komunal di wilayah 3T.

Penelitian ini akan dilaksanakan dalam dua tahun dengan metodologi: (1) Tahun pertama difokuskan pada pemodelan sistem hibrida energi terbarukan (fotovoltaik, konsentrator surya, biogas, pemanen curah hujan, diesel, dan baterai) skala komunal, optimasi ukuran komponen, serta pengujian simulasi dengan pendekatan Hardware-in-the-Loop (HIL) untuk validasi model; (2) Tahun kedua difokuskan pada pengembangan konsep manajemen energi cerdas menggunakan MADRL untuk optimasi operasi real-time yang adaptif terhadap kerusakan baterai, keterbatasan SDM teknis, dan pasokan listrik yang tidak 24 jam, dengan pengujian HIL terintegrasi. Sistem dirancang untuk skala komunal (5-20 rumah tangga) di wilayah 3T dengan pembangkit diesel sebagai cadangan darurat jika sistem energi terbarukan mengalami gangguan.

Target luaran penelitian tahun pertama adalah model rancangan optimal sistem energi terbarukan hibrida, publikasi di jurnal internasional Q2, dan hak cipta. Sedangkan target luaran penelitian tahun kedua adalah purwarupa produk/teknologi SME teruji, publikasi di jurnal internasional Q1, dan paten sederhana untuk purwarupa yang dihasilkan. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan MADRL untuk sistem energi terbatas sumber daya sekaligus solusi ketahanan energi nasional.

Kata Kunci: Sistem Manajemen Energi; Multi-Agent Deep Reinforcement Learning; Hardware-In-the-Loop; Microgrid; Kedaulatan Energi.

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Ketahanan energi merupakan pilar fundamental pembangunan nasional yang berkelanjutan. Indonesia sebagai negara kepulauan dengan ribuan pulau menghadapi tantangan besar dalam menyediakan akses energi listrik yang merata, khususnya di wilayah 3T (Terdepan, Terluar, dan Tertinggal). Data menunjukkan bahwa ketergantungan pada pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) masih sangat tinggi di kawasan timur Indonesia, dengan kendala utama berupa keterbatasan pasokan bahan bakar yang menyebabkan jam operasi pembangkit tidak optimal dan biaya energi yang sangat tinggi.

Wilayah 3T di Indonesia menyimpan potensi energi terbarukan yang sangat besar namun belum dimanfaatkan secara optimal. Beberapa contoh wilayah dengan potensi spesifik adalah:

1. **Kepulauan Sangihe, Sulawesi Utara:** Memiliki potensi energi surya dengan radiasi rata-rata 4,5-5,2 kWh/m²/hari, potensi biogas dari limbah peternakan, serta curah hujan tahunan mencapai 2.500-3.000 mm. Wilayah ini merupakan daerah kepulauan terluar yang masih sangat bergantung pada PLTD.
2. **Pulau Alor, Nusa Tenggara Timur (NTT):** Mempunyai potensi surya yang sangat baik (radiasi 5,0-5,8 kWh/m²/hari) dengan musim kemarau panjang, namun juga memiliki curah hujan yang cukup tinggi pada musim hujan (1.200-1.800 mm/tahun). Potensi biogas dari peternakan dan limbah organik juga tersedia.
3. **Kabupaten Merauke, Papua Selatan:** Memiliki potensi surya yang stabil dan kombinasi curah hujan tinggi (2.000-2.500 mm/tahun) serta potensi biogas dari sektor pertanian dan peternakan yang berkembang. Wilayah ini merupakan daerah perbatasan yang menjadi prioritas pengembangan energi.

Namun, kenyataan di lapangan menunjukkan bahwa implementasi sistem energi terbarukan di wilayah 3T menghadapi permasalahan kritis. Sistem energi terbarukan yang telah dibangun sering mengalami kegagalan operasional akibat:

1. **Kerusakan komponen penyimpanan energi (baterai):** Baterai sebagai komponen penyimpanan energi utama memiliki umur pakai terbatas dan sangat sensitif terhadap kondisi operasi yang tidak optimal. Overcharging, deep discharging, dan suhu operasi ekstrem mempercepat degradasi baterai. Di wilayah 3T dengan keterbatasan

sistem monitoring, kerusakan baterai sering tidak terdeteksi dini hingga menyebabkan kegagalan sistem total.

2. **Minimnya tenaga teknis perawatan:** Wilayah 3T kekurangan teknisi lokal yang ahli dalam perawatan sistem energi terbarukan. Kurangnya kemampuan perawatan membuat kerusakan kecil pada sistem tidak segera tertangani dan akhirnya merembet menjadi kerusakan parah. Sebelum fasilitas rusak, sistem hanya mampu memikul beban terbatas.
3. **Kapasitas daya terbatas:** Sistem energi terbarukan skala kecil di wilayah 3T umumnya dirancang dengan kapasitas terbatas, sehingga listrik tidak dapat beroperasi penuh selama 24 jam. Ketidakmampuan sistem untuk mencatu beban puncak atau saat cuaca buruk memaksa sistem lebih mengandalkan pasokan dari generator diesel (PLTD).(Anwar, 2026).

2. Rumusan Masalah dan Hipotesis Solusi

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, **rumusan masalah** dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana merancang ukuran dan konfigurasi optimal sistem energi terbarukan hibrida (konsentrator surya-fotovoltaik-biogas-pemanen curah hujan-diesel-baterai) skala komunal yang memiliki ketahanan yang kuat (resilien) terhadap kerusakan komponen dan ketidakpastian pembangkitan?
2. Bagaimana mengembangkan sistem manajemen energi cerdas berbasis Multi-Agent Deep Reinforcement Learning yang mampu mengoptimalkan operasi mikro-grid secara real-time, meminimalkan biaya BBM, memperpanjang umur pakai baterai, serta mengatasi keterbatasan SDM teknis dengan intervensi minimal?
3. Bagaimana mengimplementasikan sistem tersebut di wilayah 3T dengan keterbatasan infrastruktur komunikasi dan sumber daya manusia?

Hipotesis solusi yang diajukan adalah pengembangan Sistem Manajemen Energi (SME) cerdas berbasis *Multi-Agent Deep Reinforcement Learning* (MADRL). Pendekatan ini memungkinkan setiap komponen utama mikrogrid bertindak sebagai agen cerdas yang belajar berkoordinasi secara mandiri untuk mencapai tujuan global (stabilitas, biaya minimum, umur baterai panjang) tanpa

memerlukan model matematis yang kompleks atau intervensi manual intensif (Alankrita et al., 2026) (Lyu et al., 2026).

3. State of the Art dan Kebaruan

State of the Art

Untuk mengetahui perkembangan terkini dari topik penelitian yang diusulkan, telah dilakukan studi terhadap penelitian terdahulu khususnya yang terkait dengan topik sistem energi terbarukan hibrida, optimasi ukuran sistem energi terbarukan hibrida, frame work *Multi-Agent Reinforcement Learning* (MARL) dan *Multi-Agent Deep Reinforcement Learning* (MADRL) pada sistem energi terbarukan hibrida, dan simulasi *Hardware-in-the-Loop* (HIL) pada sistem energi terbarukan hibrida.

- **Sistem energi terbarukan hibrida**

Sistem energi terbarukan hibrida (*Hybrid Renewable Energy Sources* (HRES)) telah muncul sebagai kerangka vital untuk mencapai infrastruktur energi yang berkelanjutan, efisien, dan tangguh dengan mengintegrasikan beragam sumber energi dan teknologi penyimpanan. Tinjauan sistematis komprehensif pada referensi periode 2020-2026 mengidentifikasi bahwa HRES menghadapi tantangan yang terus-menerus (*persistent*) termasuk intermitensi terbarukan, degradasi penyimpanan, kompleksitas integrasi multi-vektor, dan meningkatnya kerentanan terhadap ancaman siber (Ivan et al., 2026). Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem hibrida off-grid untuk elektrifikasi pedesaan mengintegrasikan panel surya (FOTOVOLTAIK), turbin angin (WT), generator diesel (DG), dan teknologi penyimpanan energi untuk meningkatkan keandalan sistem, fleksibilitas operasional, dan ketahanan terhadap sifat intermiten pembangkitan terbarukan (Bhol et al., 2021).

Khan et al. (2026) mengevaluasi kelayakan tekno-ekonomi sistem hibrida surya-angin-baterai-hidrogen pada sembilan konfigurasi menggunakan Rule-Based Heuristic Dispatch Algorithm (RB-HDA). Sistem hibrida surya-angin-baterai memenuhi 99,89% permintaan dengan LCOE 0,39-2,32 AUD/kWh, namun tetap terbatas pada defisit musiman. Integrasi penyimpanan hidrogen meningkatkan ketahanan hingga 99,999% demand met dengan hanya satu jam bahan bakar fosil cadangan per tahun, membuktikan peran hidrogen sebagai enabler otonomi energi jangka panjang (Ali et al., 2026).

Untuk elektrifikasi pedesaan Indonesia di wilayah 3T, missal studi kasus di Pulau Nain menunjukkan bahwa integrasi PLTS 300 kWp dengan pembangkit diesel eksisting 200 kW dapat memperpanjang layanan listrik menjadi 24 jam

tanpa tambahan bahan bakar, serta mengurangi emisi CO₂ sebesar 389 ton/tahun. Studi tentang sistem hibrida FOTOVOLTAIK-biogas di Desa Sempu, Jawa Timur, menghasilkan NPC \$309.767 dan LCOE \$0,14/kWh. Hal ini membuktikan bahwa penyimpanan biogas lebih hemat biaya dibandingkan baterai .

Hasil studi yang telah dilakukan menunjukkan penelitian HRES bergerak dari pendekatan single-objective (minimasi biaya) menuju multi-objective yang menyeimbangkan biaya, emisi, keandalan, dan ketahanan (Ivan et al., 2026). Namun, penelitian masih terfragmentasi, sering membahas aspek teknis, ekonomi, atau lingkungan secara terpisah tanpa kerangka yang terpadu (Saeed et al., 2026). Beberapa kelemahan yang belum teratasi pada paper referensi antara lain:

1. Belum adanya kerangka terpadu yang mengintegrasikan prediksi, optimasi, kontrol, dan koordinasi sumber dalam satu sistem koheren;
2. Minimnya validasi lapangan untuk kondisi operasional aktual di wilayah terpencil seperti 3T Indonesia;
3. Belum adanya pendekatan yang secara khusus mengatasi permasalahan kerusakan komponen dan keterbatasan SDM teknis di lapangan.

- **Optimasi Ukuran Sistem Energi Terbarukan Hibrida**

Optimasi ukuran komponen merupakan bagian krusial dari desain sistem hibrida yang ekonomis dan andal. Berbagai teknik optimasi telah dikembangkan, mulai dari metode klasik hingga metaheuristik, untuk memecahkan masalah desain sistem multi-objektif dengan berbagai kendala (Younes et al., 2026). Thiruvankadam et al. (2024) dalam papernya mengusulkan *Fuzzy-Puzzle Optimization Algorithm* (FPO) untuk optimasi alokasi pembangkit terdistribusi. Hasil studi menunjukkan superioritas FPO dalam pengurangan rugi daya dan perbaikan profil tegangan. Selanjutnya, Sujono & Musafa (2025) mengembangkan optimasi pelepasan beban menggunakan algoritma hibrida GWO-WOA untuk jaringan distribusi terisolasi, unggul dibanding GWO dan WOA standar.

Penelitian oleh Ramamurthy et al. (2025) memperkenalkan metode novel menggunakan *Parrot Optimization* (PO) dan *Rotation-Invariant Coordinate Convolutional Neural Network* (RICCNN) untuk prediksi beban dan optimasi HRES. Metode RICCNN-PO menurunkan NPC menjadi 28,618 dan COE menjadi 0,309/kWh, dengan penghematan biaya 83,7% dan peningkatan output energi

69,3% dibandingkan metode konvensional (Raghavendran et al., 2025). Pendekatan ini mengungguli PSO, *Salp Swarm Algorithm* (SSA), dan *improved Multi-Objective Particle Swarm Optimization* (M-MOPSO).

Sebuah studi perbandingan antara Puzzle Optimization Algorithm (POA), Particle Swarm Optimization (PSO), dan Grey Wolf Optimization (GWO) pada sistem FOTOVOLTAIK-PHS skala kecil menunjukkan bahwa PSO dan GWO memiliki performa lebih baik untuk rata-rata total energi PHS, LPSP, LOLE, dan EENS, sedangkan POA unggul dalam rata-rata stored energy dan carbon footprint (Korovushkin et al., 2025). Hasil ini menunjukkan bahwa POA memiliki keunggulan spesifik untuk aplikasi yang memprioritaskan penyimpanan energi dan jejak karbon, menjadikannya kandidat kuat untuk sistem hibrida yang diusulkan. Sedangkan studi kasus di Abu Minqar, Mesir, membandingkan Gray Langurs Optimizer (GLO), Grey Wolf Optimizer (GWO), dan Whale Optimization Algorithm (WOA) untuk sistem FOTOVOLTAIK-WT-FC-DG-baterai, di mana GLO mencapai kinerja terbaik dengan LCOE 0,2066 USD/kWh dan renewable fraction sebesar 90,0% (Younes et al., 2026).

Tinjauan sistematis menunjukkan bahwa optimasi multi-objektif telah menjadi tren utama, dengan fungsi objektif yang mencakup minimasi Net Present Cost (NPC), peningkatan keandalan sistem (LPSP), pengurangan emisi, dan maksimisasi utilisasi terbarukan (Ivan et al., 2026) (Younes et al., 2026). Namun, sebagian besar penelitian optimasi masih berfokus pada skenario ideal dengan asumsi semua komponen berfungsi normal.

Hasil studi menunjukkan bahwa perkembangan algoritma optimasi bergerak dari *single-objective* menuju *multi-objective*, dari metode klasik menuju metaheuristik dan *hybrid algorithms*. Terdapat beberapa kelemahan yang belum teratasi, antara lain:

1. Sebagian besar optimasi mengasumsikan semua komponen berfungsi normal tanpa mempertimbangkan skenario kerusakan atau degradasi komponen;
 2. Kurangnya integrasi antara optimasi ukuran statis dengan strategi operasi dinamis yang adaptif;
 3. Validasi optimasi masih dominan pada simulasi, minim pengujian hardware-in-the-loop atau implementasi lapangan.
- **Multi-Agent Reinforcement Learning (MARL) dan Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL) pada Sistem Energi Terbarukan Hibrida**

Deep Reinforcement Learning (DRL) menawarkan alternatif berbasis data yang menggabungkan persepsi dengan pengambilan keputusan sekuensial untuk mengatasi kompleksitas sistem energi modern (Mahmud et al., 2026). Tinjauan sistematis mengidentifikasi tren utama menuju multi-agent, multi-objective DRL, dan integrasi dengan hybrid energy storage systems, dengan tantangan persistensi meliputi dataset scarcity dan bias, generalisasi terbatas, computational cost, safety dan constraint handling, serta gap antara simulasi dan deployment lapangan (Korovushkin et al., 2025) (Rabbi, 2026). Selanjutnya pada paper (Mahmud et al., 2026) dilakukan tinjauan terhadap lebih dari 500 hasil penelitian (tahun 2020-2026) dan memetakan aplikasi DRL di berbagai subdomain energi, dengan tren utama menuju multi-agent, multi-objective DRL, dan integrasi dengan hybrid energy storage systems (HESS).

Alankrita et al. (2025) mengembangkan framework MARL untuk manajemen energi DC microgrid dengan FOTOVOLTAIK, wind turbine, dan energy storage system, mengevaluasi tiga algoritma (IDQN, VDN, QMIX). Mereka menemukan bahwa QMIX berbasis RNN unggul dalam skenario serangan siber dan respons transien plug-and-play (Mahmud et al., 2026). Selanjutnya Deng et al. (2025) mengusulkan safe multi-agent DRL untuk smart building energy management, di mana bangunan didekomposisi menjadi beberapa energy-local area networks (E-LANs). Metode ini menggunakan safety filter (SF) untuk memastikan keamanan aksi, dan tingkat pelanggaran terhadap batas SF diinkorporasikan ke dalam reward function. Hasil simulasi menunjukkan pengurangan total biaya 15,3% dan 19,5% dibandingkan MADDPG original dan MADDPG dengan SF saja (Deng et al., 2025). Sedangkan Lyu et al. (2025) mengusulkan Heterogeneous-Agent Attention Soft Actor-Critic (HAASAC) untuk manajemen energi mikro-grid multi-energi heterogen dengan shared energy storage, mengatasi non-stationarity melalui mekanisme sequential update dan attention-enhanced Critic (Lyu et al., 2025). Pandia Rajan et al. (2026) mengembangkan framework MADRL untuk meningkatkan ketahanan smart grid terhadap serangan siber melalui pembentukan mikro-grid dinamis, divalidasi pada sistem IEEE 300-bus.

Penelitian tentang *AI framework* untuk *simulated multi-agent reinforcement learning* dalam sistem control microgrid hibrida mengintegrasikan *LSTM recurrent neural networks* untuk prediksi kecepatan angin, *MADDPG actor-critic deep neural networks* untuk arbitrase penyimpanan pada baterai, dan *ARIMA models* untuk prediksi energi matahari. Validasi mencakup 26.280 jam operasional simulasi di Maroko (140,6% solar penetration), Denmark (291,7%

renewable integration), dan UAE (120,0% penetration). Hasil menunjukkan pengurangan LCOE ~12% dan penghematan \$0,9-1,1 miliar selama 10 tahun, dengan respons time 45 sampai 46 ms dan recovery time 3,2 sampai 4,1 detik di bawah kegagalan agen (Rabbi, 2026). Sedangkan pada penelitian tentang *knowledge-embedded DRL* (KE-PPO) untuk *real-time dispatch wind-solar-hydro hybrid systems* menunjukkan bahwa *embedding expert dispatch prior knowledge* melalui *supervised expert loss* dan *safety constraint prior knowledge* melalui *safety rule discrimination*, *action correction*, dan *regularization loss* secara signifikan meningkatkan *training efficiency*, *convergence speed*, dan *action safety* (Ge et al., 2026).

Berdasarkan hasil studi diketahui bahwa aplikasi MADRL berkembang dari single-agent ke multi-agent, dari homogeneous agents ke heterogeneous agents, dari single-objective ke multi-objective optimization, dan dari uncontrolled menuju safe/constrained RL. Terdapat beberapa kelemahan yang belum teratasi dari studi terdahulu, antara lain:

1. Sebagian besar penelitian MADRL masih pada tahap simulasi, dengan gap signifikan antara hasil simulasi dan implementasi lapangan
 2. Kurangnya penelitian yang mengintegrasikan *safety constraints* dan *fault-tolerance* secara bersamaan dalam satu framework .
 3. Belum ada pendekatan MADRL yang secara spesifik dirancang untuk mengatasi permasalahan operasional di wilayah 3T: kerusakan baterai, keterbatasan SDM, dan pasokan tidak 24 jam.
 4. Belum ada penelitian yang mengaplikasikan MADRL pada sistem hibrida dengan 5-6 sumber energi (konsentrator surya, FOTOVOLTAIK, biogas, pemanen hujan, diesel, baterai) secara terintegrasi.
- **Simulasi *Hardware-in-the-Loop* (HIL) pada Sistem Energi Terbarukan Hibrida**

Power Hardware-in-the-Loop (PHIL) telah muncul sebagai pendekatan eksperimental yang realistis untuk mengevaluasi kinerja sistem energi di bawah kondisi operasional dinamis. Sebuah studi tentang HESS berbasis baterai-flywheel menggunakan PHIL menunjukkan bahwa konfigurasi hybrid secara signifikan mengurangi power ramping dan depth of discharge, menghasilkan retensi kapasitas 10% lebih tinggi setelah 3 tahun dibandingkan dengan baterai standalone (Maroufi et al., 2026). Studi ini mengintegrasikan PHIL testing dengan accelerated aging experiments pada level sel tunggal, menggunakan

Opal-RT OP5700 real-time simulator dan *rainflow cycle counting* untuk analisis siklus *charge-discharge*.

Penelitian tentang experimental testbed HIL untuk validasi kontrol dan optimasi sistem energi hibrida yang mengintegrasikan FOTOVOLTAIK, baterai, elektroliser, dan inverter grid-tied, menunjukkan superioritas pendekatan ML dalam estimasi headroom FOTOVOLTAIK. Tinjauan komprehensif tentang arsitektur kontrol adaptif dan cerdas untuk smart microgrid mengidentifikasi kebutuhan mendesak untuk validasi holistik melalui hardware-in-the-loop testing (Korovushkin et al., 2025).

Omidi et al. (2025) mengembangkan experimental testbed HIL untuk validasi kontrol dan optimasi sistem energi hibrida di University of Vermont, mengintegrasikan FOTOVOLTAIK, baterai, elektroliser, dan inverter grid-tied. Wang & Julien (2025) dari NREL mengembangkan HIL testbed untuk evaluasi software kontrol FOTOVOLTAIK berbasis machine learning, menunjukkan superioritas pendekatan ML dalam estimasi headroom FOTOVOLTAIK. Sebuah tinjauan komprehensif tentang arsitektur kontrol adaptif dan cerdas untuk smart microgrid mengidentifikasi kebutuhan mendesak untuk validasi holistik melalui hardware-in-the-loop testing (Maroufi et al., 2026).

Selain itu, dalam penelitian lain dikembangkan sistem kontrol frekuensi adaptif untuk mengatasi *packet dropouts* dan kondisi ketidakpastian pada sistem tenaga hibrida menggunakan *data-driven predictive control* (DDPC). Metodologi yang digunakan terdiri dari karakterisasi ketidakpastian offline dan kontrol adaptif online, dengan *deep learning* untuk prediksi ketidakpastian beban dan *supervised machine learning* untuk karakterisasi fluktuasi energi terbarukan. Simulasi HIL mengkonfirmasi kelayakan praktis dan kekokohan metodologi, dengan deviasi frekuensi terbatas dalam 100 mHz meskipun terdapat ketidakpastian dan packet dropouts yang signifikan (Maroufi et al., 2026).

Penelitian selanjutnya tentang MPC (*Model Predictive Control*) untuk pengaturan daya aktif pada integrasi sistem turbin angin-FOTOVOLTAIK-storage power terintegrasi skala besar menggunakan HIL dengan *real-time digital simulator* (RTDS) dan PLC. Hasil HIL menunjukkan bahwa strategi MPC secara substansial meningkatkan performa dalam hal *tracking precision* dan kecepatan dibandingkan dengan strategi kontrol dasar (Zhang et al., 2026).

Benang merah dari beberapa hasil studi referensi menunjukkan bahwa HIL/PHIL berkembang dari validasi komponen individual menuju validasi sistem terintegrasi, dan dari pengujian fungsional menuju pengujian degradasi

jangka panjang. Beberapa kelemahan yang belum teratasi dari referensi adalah sebagai berikut:

- 1. Sebagian besar penelitian HIL fokus pada validasi kontrol dan optimasi, belum mencakup validasi sistem manajemen energi berbasis AI/MADRL secara terintegrasi;
- 2. Belum ada framework HIL yang dirancang khusus untuk mensimulasikan skenario kerusakan komponen dan keterbatasan operasional di wilayah 3T;
- 3. Kurangnya integrasi antara HIL dengan accelerated aging testing untuk memvalidasi strategi perpanjangan umur baterai pada sistem hibrida multi-sumber.

Berdasarkan ulasan *state of the art* di atas, terdapat celah penelitian yang menjadi dasar penelitian ini sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Celah penelitian hasil ulasan *state of the art*

Celah Penelitian	Deskripsi
Celah Penelitian-1: Integrasi Sistem Hibrida Multi Sumber	Belum ada penelitian yang mengintegrasikan 6 sumber energi (konsentrator surya, FOTOVOLTAIK, biogas, pemanen hujan, diesel, baterai) dalam satu sistem terpadu untuk wilayah 3T, sementara tinjauan sistematis menunjukkan diperlukan kerangka holistik yang mengoptimalkan tujuan tekno-ekonomi, lingkungan, sosial, dan ketahanan secara bersama
Celah Penelitian-2: Optimasi Resilien terhadap Kerusakan	Optimasi ukuran sistem masih mengasumsikan semua komponen berfungsi normal; belum mempertimbangkan skenario kerusakan dan degradasi komponen. Kesenjangan antara perencanaan jangka panjang dan operasi jangka pendek belum teratasi
Celah Penelitian-3: Metode MADRL untuk Permasalahan Lapangan di daerah 3T	Belum ada pendekatan MADRL yang secara spesifik dirancang untuk mengatasi kerusakan baterai, keterbatasan SDM teknis, dan pasokan tidak 24 jam. Gap antara simulasi dan deployment lapangan masih signifikan

Celah Penelitian-4: Validasi HIL untuk Manajemen Energi Berdasarkan AI	Belum ada framework HIL terintegrasi untuk memvalidasi sistem manajemen energi berbasis MADRL di bawah skenario kegagalan dan kondisi ekstrem. Penelitian HIL masih dominan pada kontrol tradisional dan belum mencakup validasi AI/MADRL terintegrasi
---	--

Kebaruan (*Novelty*) Penelitian

Berdasarkan celah penelitian yang ada, maka kebaruan dari penelitian ini adalah:

- Integrasi enam sumber energi dalam sistem hibrida skala komunal:** Penelitian ini merupakan yang pertama mengintegrasikan konsentrator surya, fotovoltaik, biogas, pemanen curah hujan, diesel (sebagai cadangan darurat), dan baterai dalam satu sistem terpadu skala komunal (5-20 rumah tangga) untuk elektrifikasi wilayah 3T, mengisi celah kerangka holistik yang diidentifikasi dalam tinjauan sistematis.
- Optimasi ukuran sistem multi-objektif yang mempertimbangkan ketahanan terhadap kerusakan:** Penelitian ini mengembangkan fungsi *fitness* optimasi yang tidak hanya mempertimbangkan *Loss of Power Supply Probability* (LPSP) dan *Levelized Cost of Energy* (LCOE), tetapi juga ketahanan sistem terhadap skenario kerusakan komponen (*fault-tolerance*), mengatasi kelemahan penelitian optimasi yang masih mengasumsikan semua komponen berfungsi normal.
- Sistem manajemen energi berbasis Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL) untuk mengatasi permasalahan lapangan:** Pengembangan konsep manajemen energi cerdas menggunakan MADRL dengan arsitektur QMIX atau HAASAC untuk optimasi operasi real-time yang adaptif terhadap: (a) kerusakan baterai melalui deteksi dini degradasi dan strategi operasi adaptif; (b) keterbatasan SDM teknis melalui sistem diagnosis otomatis dan antarmuka sederhana; (c) pasokan listrik tidak 24 jam melalui optimasi jadwal beban dan strategi transisi antar sumber.
- Validasi sistem dengan Hardware-in-the-Loop (HIL) untuk pengujian skenario lerusakan:** Pengujian sistem menggunakan pendekatan HIL untuk mensimulasikan berbagai skenario kegagalan

(kerusakan baterai, kegagalan komunikasi, cuaca ekstrem) dan memvalidasi kemampuan sistem manajemen energi cerdas dalam merespons gangguan secara real-time.

Dengan demikian, posisi penelitian yang diusulkan ini dalam *state of the art* sebagaimana digambarkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Posisi penelitian yang diusulkan dalam *state of the art*

Dimensi	State-of-the-Art Saat Ini	Posisi Penelitian Ini
Komponen Sistem	3-4 sumber (PV-wind-battery atau PV-biogas-battery)	6 sumber: Konsentrator surya + Fotovoltaik + Biogas + Pemanen Hujan + Diesel + Baterai
Objek Optimasi	LPSP, LCOE, NPC, emisi	LPSP + LCOE + Degradasi Baterai + Fault-Tolerance + Ketahanan Sistem
Algoritma Optimasi	PSO, GWO, WOA, OOA, GA	Puzzle Optimization Algorithm (unggul dalam stored energy dan carbon footprint , estimasi parameter PV error <1%)
Manajemen Energi	Rule-based, PID, MPC, DRL single-agent	Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (QMIX/HAASAC) dengan safety constraints dan fault-tolerance
Validasi	Simulasi offline, HIL untuk kontrol tradisional	HIL Terintegrasi dengan skenario kerusakan, accelerated aging, dan validasi MADRL

4. Tujuan dan Sasaran Kegiatan Riset

Tujuan dari penelitian ini adalah meningkatkan ketahanan sistem energi terbarukan di wilayah 3T melalui pengembangan sistem manajemen energi cerdas berbasis Multi-Agent Deep Reinforcement Learning untuk pembangkit listrik hibrida skala komunal yang mampu mengatasi kerusakan baterai, keterbatasan SDM, dan pasokan listrik tidak 24 jam.

Sasaran kegiatan **tahun pertama** adalah:

1. Mengembangkan model matematis sistem hibrida enam sumber energi (konsentrator surya-fotovoltaik-biogas-pemanen curah hujan-diesel-baterai) skala komunal dengan mempertimbangkan aspek dinamis cuaca, beban, dan skenario kerusakan komponen.
2. Mengembangkan model prediksi cuaca berbasis ANN/Bi-LSTM untuk peramalan radiasi surya, curah hujan, dan potensi biogas.
3. Mengoptimalkan ukuran dan konfigurasi komponen sistem menggunakan algoritma pembelajaran mesin dengan mempertimbangkan ketahanan terhadap kerusakan.
4. Melakukan pengujian simulasi dengan pendekatan *Hardware-in-the-Loop* (HIL) untuk validasi model masing-masing sub-sistem.

Sedangkan untuk **sasaran** kegiatan **tahun kedua** adalah:

1. Mengembangkan konsep sistem manajemen energi cerdas berbasis *Multi-Agent Deep Reinforcement Learning* (MADRL) untuk optimasi operasi real-time.
2. Mengimplementasikan algoritma MADRL untuk mengatasi permasalahan kerusakan baterai, keterbatasan SDM teknis, dan pasokan listrik yang tidak 24 jam.
3. Melakukan pengujian HIL terintegrasi untuk sistem manajemen energi cerdas.
4. Merumuskan model implementasi sistem di wilayah 3T dengan mempertimbangkan keterbatasan infrastruktur komunikasi dan SDM.

KERANGKA BERPIKIR DAN NILAI STRATEGIS

1. Kerangka Berpikir

Penelitian ini didasarkan pada premis bahwa ketahanan energi di wilayah 3T membutuhkan pendekatan holistik yang tidak hanya mencakup aspek teknis pembangkitan energi, tetapi juga aspek operasional, pemeliharaan, dan pengelolaan sumber daya manusia. Kerangka berpikir yang mendasari proposal ini adalah:

- Pertama, diversifikasi sumber energi merupakan kunci untuk mengatasi intermitensi. Integrasi konsentrator surya, fotovoltaik, biogas, dan pemanen curah hujan menyediakan pasokan energi yang lebih andal dibandingkan sumber tunggal. Biogas menyediakan pasokan kontinu yang tidak tergantung cuaca, menjadikannya komponen kritis untuk operasi malam hari atau musim hujan.
- Kedua, tantangan operasional di lapangan seperti kerusakan baterai, keterbatasan SDM, pasokan tidak 24 jam) memerlukan sistem manajemen energi cerdas yang mampu beradaptasi secara real-time dengan intervensi minimal. Algoritma *Multi-Agent Deep Reinforcement Learning* (MADRL) dengan arsitektur QMIX atau HAASAC memungkinkan koordinasi antar komponen sistem tanpa komunikasi eksplisit, sehingga cocok untuk wilayah dengan infrastruktur komunikasi terbatas (Lyu et al., 2025) (Alankrita et al., 2026).
- Ketiga, validasi melalui pendekatan *Hardware-in-the-Loop* (HIL) sangat penting untuk memastikan keandalan model sebelum implementasi lapangan. HIL memungkinkan pengujian berbagai skenario kegagalan dalam lingkungan terkendali dan mengurangi risiko kegagalan di wilayah 3T.
- Keempat, sistem dirancang untuk skala komunal (5-20 rumah tangga) karena pendekatan ini lebih efisien secara ekonomi dan memudahkan operasi pemeliharaan dibandingkan sistem individual, serta memungkinkan pengelolaan sumber daya secara terpusat dengan teknisi yang terbatas.
- Kelima, pembangkit diesel tetap dipertahankan sebagai cadangan darurat (*backup*) untuk menjamin pasokan listrik jika sistem energi terbarukan mengalami *black-out* total. Namun, sistem manajemen energi cerdas dirancang untuk meminimalkan penggunaan diesel melalui optimasi operasi yang adaptif.

2. Nilai Strategis

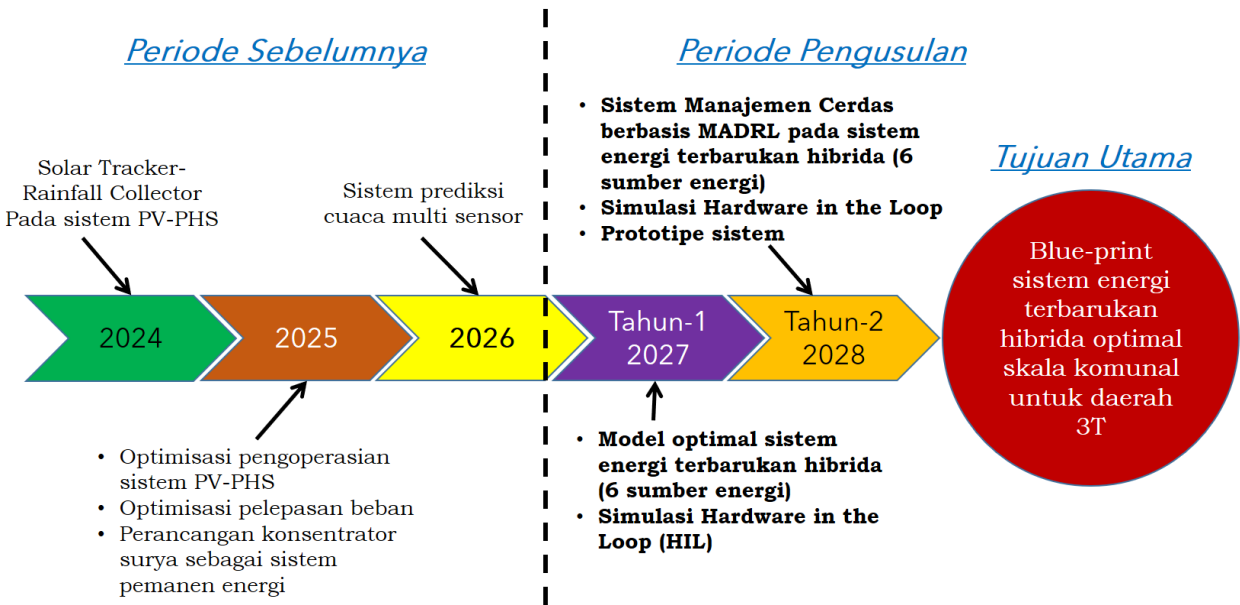
Nilai strategis dari hasil penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. **Kontribusi pada Target Energi Nasional:** Mendukung pencapaian target bauran energi terbarukan 23% pada 2025 dan 70% pada 2045 sebagaimana diamanatkan dalam RPJPN 2024-2045.
2. **Solusi Elektrifikasi Wilayah 3T:** Menyediakan model skala komunal yang dapat direplikasi untuk elektrifikasi di lebih dari 12.000 pulau terluar Indonesia yang masih kekurangan akses listrik.
3. **Pengurangan Emisi Karbon dan Biaya Operasional:** Optimalisasi operasi sistem dapat mengurangi konsumsi BBM diesel hingga >80% dibandingkan operasi PLTD penuh. Biaya energi (LCOE) ditargetkan < \$0,15/kWh, lebih rendah dari biaya PLTD di wilayah terpencil (\$0,30-0,50/kWh).
4. **Peningkatan Umur Pakai Baterai:** Melalui strategi operasi adaptif yang memperhatikan depth of discharge dan charge rate optimal, umur baterai dapat diperpanjang hingga >30% dibandingkan operasi konvensional, mengurangi biaya penggantian komponen yang signifikan.
5. **Penguatan Kapasitas Riset Nasional:** Pengembangan algoritma optimasi dan sistem manajemen energi cerdas berbasis MADRL memperkuat posisi Indonesia dalam inovasi teknologi energi.
6. **Daya Saing dan Kepemilikan Teknologi:** HaKI untuk algoritma optimasi dan manajemen energi, serta paten untuk purwarupa memberikan perlindungan kekayaan intelektual dan potensi komersialisasi.
7. **Solusi Keterbatasan SDM:** Sistem manajemen energi cerdas mengurangi ketergantungan pada keahlian teknis yang langka di wilayah 3T melalui otomatisasi, diagnosis otomatis, dan antarmuka sederhana yang dapat dioperasikan oleh tenaga lokal setelah pelatihan dasar.

PETA JALAN

Penelitian yang diusulkan untuk dilaksanakan dalam dua tahun ini didasarkan pada penelitian di bidang energi terbarukan dan pemanfaatan kecerdasan buatan dalam sistem energi terbarukan yang telah dilakukan sebelumnya . Hal ini sebagaimana ditunjukkan pada peta jalan penelitian yang disajikan

Gambar 1. 1.



Gambar 1. Peta jalan penelitian

Peta jalan penelitian sebelumnya yang telah dilakukan pada periode tahun 2024-2026 ditunjukkan pada Tabel 3. Sedangkan peta jalan penelitan yang akan dilakukan ditunjukkan pada Tabel 4. Penelitian yang diusulkan merupakan kelanjutan dari penelitian disertasi peneliti utama yang menghasilkan model STRC pada sistem PV-PHS-RS, dengan pengembangan pada:

- Integrasi sumber energi baru: **biogas** (terinspirasi dari studi Sari & Wardani 2026 tentang PV-biogas) dan **solar concentrator** untuk meningkatkan efisiensi
- Pengembangan **sistem manajemen energi berbasis MADRL** untuk mengatasi permasalahan operasional di lapangan (kerusakan baterai, keterbatasan SDM, pasokan tidak 24 jam)
- Skala **komunal** (bukan individual) untuk efisiensi ekonomi dan kemudahan operasi

Tabel 3. Peta jalan penelitian terdahulu

Tahun	Judul Publikasi	Penerbit	Keterangan
2024	Solar Tracker-Rainfall Collector on Small-	IEEE Access (Vol. 12, pp.	Jurnal internasional Q1; integrasi STRC

	Scale Hybrid Photovoltaic-Pumped Hydro Systems to Increase Stored Energy	184788-184802)	pada PV-PHS; peningkatan energi tersimpan 24.78–25.10%
2025	Optimizing Small-Scale Pumped Hydro Storage Operation for Off-Grid PV: Maximizing Stored Energy Under LPSP and Carbon Footprint Constraints	Jurnal JANAPATI (Vol.14, No.3)	Strategi operasi optimal PHS skala kecil dengan batasan LPSP dan jejak karbon
2025	Load-Shedding Optimization Using Hybrid Grey Wolf - Whale Algorithm to Improve The Isolated Distribution Networks	JURNAL INFOTEL (Vol. 17, No. 2, pp. 377–393)	Optimasi pelepasan beban dengan GWO-WOA untuk jaringan terisolasi; unggul dibanding GWO dan WOA standar
2025	Design and Construction of a Solar Concentrator System as a Small-Scale Electrical Energy Harvester	Jurnal ELKOMIKA Vol 13, No 2	Rancang bangun sistem konsentrator surya skala kecil bentuk parabolic
2026	Weather Predictions from Combined Parameters with Artificial Neural Network Algorithm Based on Multi-Sensor Weather Data	IJAIN (International Journal of Advances in Intelligent Informatics) Vol 12, No 2 (2026)	Penerapan metode ANN untuk prediksi cuaca kondisi multi sensor

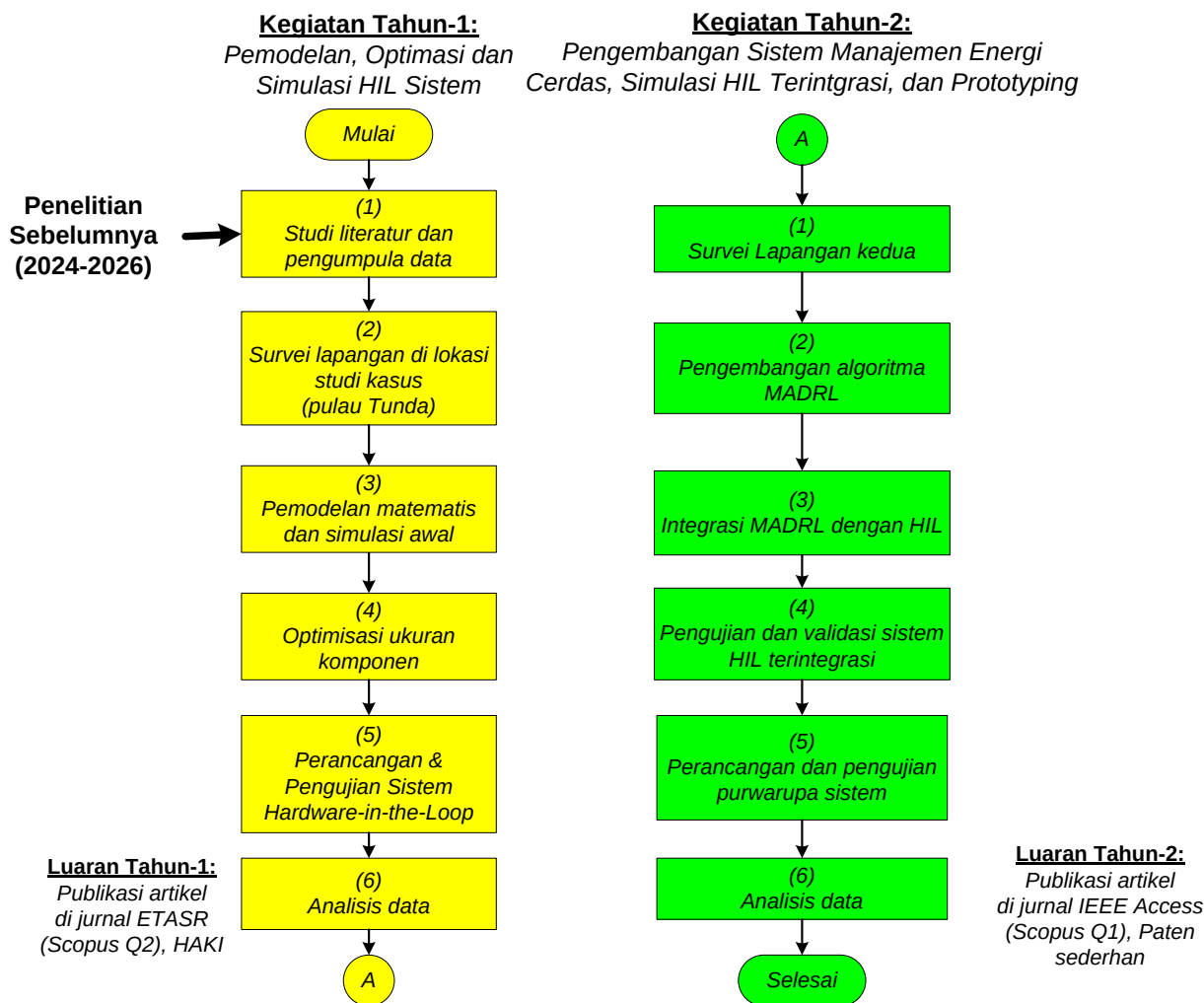
Tabel 4. Peta jalan penelitian yang akan dilaksanakan

Tahun	Fase	Output	Target
2027	Pengembangan Model dan Simulasi HIL	Model optimal sistem hibrida skala komunal	- Publikasi di jurnal ETASR (Scopus Q2) - HAKI program

		• Hasil simulasi HIL	simulasi model optimal sistem
2028	Pengembangan sistem manajemen energi cerdas and Carbon Footprint Constraints	• Konsep MADRL untuk manajemen energi adaptif • Validasi dengan simulasi HIL terintegrasi • Purwarupa sistem	• Publikasi di jurnal IEEE Access (Scopus Q1) • Paten sederhana purwarupa sistem sistem

METODOLOGI

Penelitian ini akan dilaksanakan selama dua tahun dengan ringkasan metode penelitian ditunjukkan dengan diagram alir pada Gambar 2.



Gambar 2. Metodologi penelitian yang akan dilaksanakan

Metodologi penelitian ini dibagi menjadi dua tahap besar yang sesuai dengan peta jalan.

Tahun 1: Pemodelan, Optimasi, dan Simulasi HIL Sistem

Kegiatan tahun pertama penelitian difokuskan pada pemodelan dan validasi sistem hibrida energi terbarukan skala komunal yang terdiri dari konsentrator surya, fotovoltaik, biogas, pemanen hujan, diesel, dan baterai. Kegiatan diawali dengan studi literatur sistematis untuk mematangkan dasar teori mengenai sistem energi hibrida dan pendekatan Hardware-in-the-Loop (HIL), sekaligus pengumpulan data potensi energi terbarukan di wilayah 3T perwakilan, yaitu Pulau Tunda, Banten. Pulau Tunda merupakan satu-satunya wilayah di Banten yang belum tersentuh jaringan listrik PLN dan masih bergantung pada Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) dengan pasokan

bahan bakar terbatas. Saat ini, warga Pulau Tunda hanya dapat menikmati listrik 6-8 jam per hari karena mengandalkan PLTD yang bahan bakarnya sulit didapat dan harganya mahal. Penelitian menunjukkan bahwa kondisi ketidakstabilan pasokan listrik akibat ketergantungan pada PLTD yang hanya beroperasi selama 12 jam per hari menyebabkan tingginya biaya operasional serta dampak lingkungan yang signifikan. Kunjungan awal ke lokasi dilakukan untuk observasi lapangan, pengumpulan data profil beban listrik masyarakat (5-20 KK), infrastruktur kelistrikan eksisting, serta potensi sumber daya lokal seperti biomassa dan air hujan.

Selanjutnya dilakukan pemodelan matematis dinamis untuk masing-masing komponen sistem menggunakan Python/MATLAB Simulink. Pemodelan sistem energi hibrida mencakup formulasi masalah optimasi yang kompleks, di mana sistem harus mengintegrasikan berbagai sumber energi dengan karakteristik operasional yang berbeda-beda. Integrasi konsentrator surya dengan sistem biogas merupakan inovasi penting, mengingat penelitian menunjukkan bahwa sistem PVT-CPC (Photovoltaic Thermal-Compound Parabolic Concentrator) terintegrasi dengan digester biogas dapat menghasilkan energi termal, listrik, dan kimia secara simultan, dengan peningkatan produksi biomethane hingga 72,8% dibandingkan digester tanpa pemanasan. Optimasi ukuran komponen dilakukan menggunakan pendekatan HOMER atau algoritma metaheuristik untuk mencari konfigurasi optimal dengan biaya sistem minimum (NPC/COE). Studi kelayakan di Pulau Tunda menunjukkan bahwa skenario optimal integrasi PLTS dan BESS pada sistem PLTD menghasilkan kontribusi energi terbarukan 86%, LCOE 0,212 USD/kWh, dan mampu menurunkan emisi karbon hingga 85% dibandingkan PLTD eksisting.

Tahap krusial berikutnya adalah perancangan dan perakitan sistem HIL berbasis Teensy 4.1 sebagai simulator model real-time, STM32H7 sebagai co-processor, dan ESP32 sebagai pengendali EMS. Pendekatan HIL menjadi metode validasi yang semakin penting karena pengujian di lapangan aktual menghadapi tantangan biaya dan kompleksitas, sementara simulasi offline saja tidak cukup untuk menangkap faktor dunia nyata seperti non-linearitas, fluktuasi tegangan, dan penundaan switching. Perangkat daya seperti Programmable DC Power Supply dan DC Electronic Load digunakan untuk mensimulasikan profil keluaran pembangkit dan beban dinamis. Pengembangan perangkat lunak HIL dilakukan secara paralel dengan integrasi perangkat keras, mencakup kode Python di Host PC, kode di Teensy/STM32 untuk simulasi real-time, dan kode di ESP32 untuk algoritma kontrol dasar menggunakan MATLAB Embedded

Coder. Pengujian dan validasi sistem HIL dilakukan melalui uji coba open-loop untuk validasi model dan closed-loop untuk uji kontroler dasar. Validasi HIL penting untuk menjembatani kesenjangan antara strategi manajemen energi berbasis simulasi dan implementasi di dunia nyata. Kunjungan validasi kedua ke Pulau Tunda dilakukan untuk memverifikasi hasil pemodelan dengan kondisi aktual di lapangan. Tahun pertama ditutup dengan penyusunan laporan, publikasi di jurnal internasional Q2, dan pendaftaran hak cipta untuk model simulasi yang dihasilkan.

Tahun 2: Pengembangan Sistem Manajemen Energi Cerdas, Simulasi HIL Terintegrasi, dan Prototyping

Tahun kedua penelitian berfokus pada pengembangan konsep manajemen energi cerdas berbasis Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL) untuk optimasi operasi real-time yang adaptif terhadap tantangan di wilayah 3T. Kegiatan diawali dengan formulasi masalah manajemen energi sebagai Markov Game, di mana setiap agen (subsistem energi) berinteraksi dalam lingkungan bersama untuk mencapai tujuan global. Perancangan arsitektur MADRL menggunakan pendekatan Centralized Training with Decentralized Execution (CTDE), yang memungkinkan agen dilatih secara terpusat namun dieksekusi secara terdesentralisasi untuk menjaga privasi dan skalabilitas.

Algoritma yang diimplementasikan mencakup Multi-Agent Twin Delayed Deep Deterministic Policy Gradient (MATD3) yang terbukti memiliki keunggulan dalam mitigasi overestimation bias, stabilitas konvergensi, dan efektivitas kontrol dibandingkan MADDPG. Penelitian menunjukkan bahwa MATD3 dengan strategi Decentralized Training and Decentralized Execution (DTDE) memungkinkan prosumer mengelola permintaan dan sistem penyimpanan energi secara dinamis, dengan pencapaian tingkat kesalahan penjadwalan 9,8% dan 13,2%, serta peningkatan pendapatan 10%. Alternatif algoritma seperti QMIX juga menjanjikan untuk aplikasi DC Microgrid, di mana QMIX mengungguli metode lain dalam skenario serangan siber dan respons transien tercepat selama peristiwa plug-and-play. Pelatihan model memerlukan komputasi intensif sehingga memanfaatkan lisensi cloud computing GPU.

Integrasi MADRL dengan sistem HIL yang telah dibangun pada tahun pertama menjadi tahap penting, dengan implementasi skenario uji adaptif seperti kerusakan baterai, keterbatasan SDM teknis, dan pasokan listrik yang tidak 24 jam. Sistem HIL yang terintegrasi memungkinkan pengujian strategi kontrol di bawah berbagai skenario gangguan, termasuk variasi pembangkitan

dan permintaan, penundaan jaringan, serangan injeksi data palsu, gangguan tanah, dan perubahan topologi plug-and-play . Pengujian dan validasi sistem HIL terintegrasi dilakukan secara ekstensif untuk menganalisis performa MADRL dalam berbagai skenario gangguan dan ketidakpastian, dengan membandingkan hasilnya terhadap algoritma kontrol konvensional (PID, MPC). Pendekatan HIL terbukti efektif untuk memvalidasi strategi kontrol sebelum implementasi lapangan, mengingat pengujian di lapangan aktual menghadapi tantangan biaya dan kompleksitas . Kunjungan final ke Pulau Tunda dilakukan untuk diseminasi hasil penelitian kepada masyarakat dan pemerintah daerah serta evaluasi akhir implementasi sistem.

Tahun kedua menghasilkan purwarupa produk/teknologi SME yang teruji, publikasi di jurnal internasional Q1, dan paten sederhana untuk purwarupa yang dihasilkan. Penelitian ini berkontribusi pada pengembangan MADRL untuk sistem energi terbatas sumber daya sekaligus solusi ketahanan energi nasional di wilayah 3T. Sistem dirancang untuk skala komunal 5-20 rumah tangga dengan pembangkit diesel sebagai cadangan darurat jika sistem energi terbarukan mengalami gangguan. Pendekatan berbasis masyarakat menjadi kunci untuk mendorong pertumbuhan listrik dari sumber terbarukan di Indonesia Timur, di mana pembangunan kapasitas masyarakat lokal sangat penting.

JANGKA WAKTU PELAKSANAAN RISET

Penelitian ini direncanakan akan dilaksanakan dalam jangka waktu **2 (dua) tahun**, terhitung mulai bulan Januari 2027 hingga Desember 2028. Perinciannya sesuai dengan peta jalan di atas, di mana tahun pertama (Januari 2027 - Desember 2027) fokus pada pengembangan model, optimisasi model, dan simulasi HIL, dan tahun kedua (Januari 2028 - Desember 2028) fokus pada pengembangan sistem manajemen energi cerdas dan perancangan purwarupa.

KELUARAN DAN INDIKATOR KINERJA

Keluaran dan indikator keberhasilan kegiatan penelitian yang diusulkan ini terdiri atas luaran utama dan luaran tambahan. Luaran utama dari penelitian ini adalah publikasi di jurnal internasional terindeks *Scopus* (jurnal ETSR SJR: Q2) dengan status *Under Review* untuk tahun pertama dan jurnal *IEEE Access* SJR: Q1) dengan status *Accepted*. Luaran tambahan 1 hak cipta berupa program simulasi model optimal sistem dan 1 paten sederhana dengan status Terdaftar.

Indikator Kinerja Kegiatan					
Tahun I					
No	Luaran	Status	Jumlah	Target	Deskripsi
1	Publikasi pada jurnal internasional Q2	Under Review	1	100%	1 publikasi pada jurnal internasional ETASR Scopus Q2 dengan status Under Review
2	Hak Cipta	Terdaftar	1	100%	1 pengajuan Hak Cipta dengan status Terdaftar
Tahun 2					
1	Publikasi pada jurnal internasional Q1	Accepted	1	100%	1 publikasi pada jurnal internasional IEEE Access Scopus Q1 dengan status Accepted
2	Paten Sederhana	Terdaftar	1	100%	1 pengajuan Paten Sederhana dengan status Terdaftar

JADWAL KEGIATAN RISET

Jadwal Kegiatan Tahun-1

No.	Kegiatan/ Aktivitas	Uraian Kegiatan	Waktu Pelaksanaan	Keterangan
1	Studi Literatur & Pengumpulan Data	- Tinjauan pustaka sistematis mengenai sistem hibrida (konsentrator surya, PV, biogas, diesel, baterai) dan HIL. - Data potensi energi terbarukan (radiasi surya, potensi biomassa) di wilayah 3T (Pulau Tunda, Banten).	Bulan 1-2	Dilakukan oleh seluruh tim untuk mematangkan dasar teori dan spesifikasi teknis.
2	Kunjungan Awal ke Lokasi 3T	- Observasi lapangan dan pengumpulan data primer: - Profil beban listrik masyarakat (5-20 KK) - Infrastruktur kelistrikan eksisting (PLTD) - Potensi sumber daya lokal (biomassa, air hujan)	Bulan3	Tim peneliti (3 orang + 1 asisten dan 1 admin) melakukan survei awal untuk memvalidasi asumsi model dengan kondisi nyata di lapangan.
3	Pemodelan Matematis & Simulasi Awal	- Model matematis dinamis untuk masing-masing komponen sistem (PV, konsentrator, biogas, diesel, baterai, pemanen hujan) - Simulasi awal menggunakan Python/Simulink untuk verifikasi perilaku mode	Bulan 3 – 5	Dipimpin oleh Ketua dan Anggota. Hasilnya berupa draft model awal sistem energi hibrida.
4	Optimasi Ukuran Komponen Sistem	- Konfigurasi optimal kapasitas setiap komponen pembangkit (kWp PV, kapasitas baterai kWh, ukuran genset, dll.) untuk skala 5-20 KK	Bulan 6-7	Menggunakan pendekatan optimasi (HOMER atau algoritma metaheuristik) untuk mencari biaya sistem minimum (NPC/COE).
5	Perancangan & Perakitan	- Purwarupa HIL berbasis Teensy 4.1 (sebagai	Bulan 7-8	Tim asisten dan

	Sistem Hardware-in-the-Loop (HIL)	simulator model real-time) dan STM32H7/ESP32 (sebagai kontroler fisik) - Perangkat daya: Programmable DC Power Supply, DC Electronic Load, Baterai LiFePO4 - Pengkondisi sinyal: DAC, ADC, Optocoupler, Solid State Relay, Custom PCB		anggota melakukan integrasi hardware dan mengimple mentasikan protokol komunikasi serial (UART) & jaringan (TCP/IP).
6	Pengembangan Perangkat Lunak HIL	- Kode Python di Host PC untuk menjalankan model dinamis dan antarmuka - Kode di Teensy/STM32 untuk simulasi real-time - Kode di ESP32 untuk menjalankan algoritma kontrol dasar	Bulan 8	Pengembangan software secara paralel dengan perakitan hardware. Menggunakan MATLAB/Si mulink + Embedded Coder untuk generate kode
7	Pengujian & Validasi Sistem HIL Tahun I	- Laporan hasil uji coba open-loop (validasi model) dan closed-loop (uji kontroler dasar) - Data pembandingan antara simulasi murni dan hasil HIL	Bulan 9	Pengujian dilakukan untuk memvalidasi bahwa sistem HIL dapat merepresen tasikan sistem fisik secara akurat.
8	Publikasi Luaran	- Menyusun draft artikel - Submit artikel	Bulan 10-11	Jurnal ETASR
9	Laporan Kemajuan	- Penyusunan laporan kemajuan	Bulan 6-7	
10	Laporan Akhir	- Penyusunan laporan kemajuan	Bulan 11-12	

Jadwal Kegiatan Tahun-2

No.	Kegiatan/	Uraian Kegiatan	Waktu	Keterangan
-----	-----------	-----------------	-------	------------

	Aktivitas		Pelaksanaan	
1	Kunjungan Validasi ke Lokasi 3T (Pulau Tunda)	- Verifikasi hasil pemodelan dan optimasi dengan kondisi aktual di lapangan - Diskusi dengan masyarakat dan stakeholder lokal terkait rancangan sistem - Data potensi energi terbarukan (radiasi surya, potensi biomassa) di wilayah 3T (Pulau Tunda, Banten).	Bulan 1	Tim peneliti (3 orang) melakukan kunjungan kedua untuk memastikan model yang dikembangkan sesuai dengan kebutuhan dan kondisi di Pulau Tunda.
2	Pengembangan Algoritma MADRL	- Formulasi masalah manajemen energi sebagai Markov Game - Perancangan arsitektur Multi-Agent Deep Reinforcement Learning (MADRL) dengan Centralized Training with Decentralized Execution (CTDE) - Implementasi algoritma (misal: MAPPO, QMIX, atau MATD3) untuk mengoptimalkan operasi real-time yang adaptif terhadap kerusakan baterai dan keterbatasan SDM	Bulan 2-5	Dipimpin oleh Ketua dan Anggota. Pengembangan dilakukan di Host PC dan diuji secara terintegrasi dengan HIL.
3	Integrasi MADRL dengan Sistem HIL	- Penghubungan algoritma MADRL yang telah dilatih dengan sistem HIL yang sudah ada - Implementasi skenario uji adaptif (kerusakan baterai, pasokan tidak 24 jam)	Bulan 5-7	Mengintegrasikan MADRL sebagai "kecerdasan" yang mengendalikan model di HIL.
4	Pengujian & Validasi Sistem HIL Terintegrasi	- Pengujian kinerja MADRL dalam berbagai skenario gangguan dan ketidakpastian - Analisis performa (biaya operasional, stabilitas,	Bulan 7-8	Pengujian ekstensif untuk membuktikan keunggulan

		keandalan pasokan) - Perbandingan dengan algoritma kontrol konvensional (PID, MPC)		n MADRL dalam manajemen energi adaptif di wilayah 3T.
5	Publikasi Luaran	- Menyusun draft artikel - Submit artikel	Bulan 8-9	Jurnal IEEE Access
6	Laporan Kemajuan	Penyusunan laporan kemajuan	Bulan 6-7	
7	Laporan Akhir	Penyusunan laporan akhir	Bulan 10-11	

ANGGARAN KEGIATAN

0									TAHUN 1		
Judul Riset		: Manajemen Energi Cerdas Berbasis Multi-Agent Deep Reinforcement Learning untuk Ketahanan Sistem Energi Terbarukan Skala Komunal di Wilayah 3T									
Fokus/ Skema Rise		: Kedaulatan Energi									
Ketua Periset		: Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.									
Asal Institusi		: Universitas Budi Luhur									
Mitra Riset		:									
Total Usulan Waktu		: 2 tahun									
No	Komponen Biaya Riset/ Aktivitas Riset/ Justifikasi Kebutuhan	Keterangan/Indikator Kinerja Riset/Luaran	Volume	Frekuensi	Harga Satuan (Rp)	Satuan	Jumlah (LPDP + Mitra)	Proporsi Pendanaan			
								LPDP		Mitra	
								Tahun I		Tahun I	
I. BIAYA LANGSUNG - Minimum 95% dari Total Biaya											
A. BIAYA LANGSUNG PERSONIL - Maksimum 25% dari total Pendanaan											
Gaji/ Upah/ Honorarium											
	1	Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.	Ketua	1	12	1.500.000	OB	18.000.000	18.000.000		
	2	Peby Wahyu Purnawan, S.T., M.T.	Anggota	1	12	1.000.000	OB	12.000.000	12.000.000		
	3	Dion Setiawan, S.T., M.T.	Anggota	1	12	1.000.000	OB	12.000.000	12.000.000		
	4	Iman Permana, S.Kom., M.Kom.	Asisten	1	12	750.000	OB	9.000.000	9.000.000		
	5	Rismawandi, S.E., M.Akt.	Administrator	1	12	500.000	OB	6.000.000	6.000.000		
Total Biaya Langsung Personil								57.000.000	57.000.000	0	

B. BIAYA LANGSUNG NON PERSONIL										
B.1	Indikator A Simulator Hardware-in-the-Loop									
B.1.1	Barang Modal									
	1	Teensy 4.1 Dev Board	Unit simulator utama pengolah model matematika sistem hibrida (600 MHz)	2	1	1.800.000	Unit	3.600.000	3.600.000	
	2	STM32H7 Nucleo Board	Co-processor pendamping manajemen I/O cepat dan konversi protokol komunikasi	2	1	1.600.000	Unit	3.200.000	3.200.000	
	3	ESP32 DevKit V4	Unit keras pengendali EMS (Energy Management System) eksternal yang diuji	12	1	250.000	Unit	3.000.000	3.000.000	
	4	Programmable DC Power Supply (30V/10A)	Meniru profil keluaran tegangan/arus Panel Surya, SC, Biogas, Pemanen Hujan & Diesel Generator secara dinamis	6	1	2.600.000	Unit	15.600.000	15.600.000	
	5	Programmable DC Electronic Load (400W)	Mensimulasikan konsumsi beban listrik gedung/beban dinamis konsumen secara real-time	4	1	5.000.000	Unit	20.000.000	20.000.000	
	6	Baterai LiFePO4 12V 12Ah + Smart BMS	Komponen media penyimpan daya fisik aktual yang dipantau status pengisiannya (SoC)	4	1	1.500.000	Unit	6.000.000	6.000.000	
	7	Power Supply Bench Laboratory (5V/3.3V)	Penyuplai daya ter-regulasi khusus untuk menyalakan modul mikrokontroler dan sensor	2	1	750.000	Unit	1.500.000	1.500.000	
	8	DC-AC Pure Sine Wave Inverter	Inverter hibrida pintar dengan kontrol eksternal untuk simulasi grid	1	1	3.500.000	Unit	3.500.000	3.500.000	
	9	Gigabit Ethernet Switch & Router	Jaringan lokal khusus transfer data ultra-low latency	1	1	1.000.000	Unit	1.000.000	1.000.000	
	Total Sub Item							57.400.000	57.400.000	0

B.1.2	Jasa dan Lisensi									
	1	MATLAB Student Suite + Simulink	Perangkat lunak permodelan matematis dasar dan blok diagram Simulink	1	1	2.500.000	Paket	2.500.000	2.500.000	
	2	MATLAB Embedded Coder Add-on	Men-generate algoritma dari Simulink langsung menjadi kode bahasa C untuk Teensy/STM32	1	1	1.500.000	Paket	1.500.000	1.500.000	
	3	Simscape Electrical Add-on	Ekstensi Simulink khusus permodelan interkoneksi jaringan grid hibrida terdistribusi	1	1	1.500.000	Paket	1.500.000	1.500.000	
	4	NI LabVIEW Student Edition	Digunakan untuk membangun GUI dashboard monitoring terpusat di PC	1	1	1.500.000	Paket	1.500.000	1.500.000	
	5	Jasa Pembuatan Software HIL	Pengembangan kode program untuk komunikasi HIL (Python, C++)	1	1	7.000.000	Paket	7.000.000	7.000.000	
	6	Biaya Pengiriman, Pajak, & Dana Cadangan	Antisipasi fluktuasi harga komponen atau biaya pengapalan logistik	1	1	5.000.000	Paket	5.000.000	5.000.000	
	Total Sub Item							19.000.000	19.000.000	0

B.2	Indikator B Luaran Publikasi Q2									
B.2.1	Biaya Publikasi									
	1	Article Processing Charge (APC)	Biaya publikasi di jurnal internasional bereputasi (target Q2).	1	1	30.000.000	Paket	30.000.000	30.000.000	
	2	Jasa Proofreading & Editing	Jasa proofreading naskah internasional oleh native speaker	1	1	2.000.000	Paket	2.000.000	2.000.000	
	Total Sub Item							32.000.000	32.000.000	0
B.2.2	Konsumsi									
	1	Konsumsi koordinasi	Biaya konsumsi koordinasi penyusunan artikel ilmiah	5	2	50.000	kali	500.000	500.000	
	Total Sub Item							500.000	500.000	0
	Total Sub Indikator							32.500.000	32.500.000	0
B.3	Indikator C Hak Cipta									
B.3.1	Pendaftaran Hak Kekayaan Intelektual									
	1	Pendaftaran Hak Cipta	Untuk model simulasi dan/atau kode program sistem hibrida.	1	1	600.000	Paket	600.000	600.000	
	2	Konsultasi Hukum HAKI	Konsultasi dengan ahli hukum untuk pendaftaran Hak Cipta	1	1	1.500.000	Paket	1.500.000	1.500.000	
	Total Sub Item							2.100.000	2.100.000	0
	Total Sub Indikator							2.100.000	2.100.000	0

B.1.3 Bahan Habis Pakai										
	1	Modul DAC MCP4725 & ADC ADS1115	Mengubah parameter virtual menjadi sinyal analog, serta membaca balik parameter fisik	4	1	500.000	Paket	2.000.000	2.000.000	
	2	Optocoupler 8-Ch & Solid State Relay	Isolasi pengaman sirkuit kontrol mikrokomputer dari interferensi sirkuit daya tinggi	4	1	500.000	Paket	2.000.000	2.000.000	
	3	Custom PCB Fabrication & Komponen Pasif	Pembuatan sirkuit pengkondisi sinyal permanen (Resistor, Cap, Terminal Blok)	1	1	1.000.000	Paket	1.000.000	1.000.000	
	4	Industrial Panel Enclosure & Accessories	Box panel, kabel AWG, rel DIN, dan saklar darurat (emergency stop)	2	1	1.500.000	Paket	3.000.000	3.000.000	
	5	Sensor Arus & Tegangan Presisi	Sensor efek Hall (LEM/Allegro) + internal ADC/DAC	2	1	1.200.000	Paket	2.400.000	2.400.000	
	6	Solid State Relay (SSR) & Driver	Saklar elektronik untuk switching grid hibrida	4	1	300.000		1.200.000	1.200.000	
	7	Kabel dan Konektor Industri	Kabel AWG, terminal blok, konektor untuk interkoneksi sistem	4	1	1.500.000		6.000.000	6.000.000	
	Total Sub Item							17.600.000	17.600.000	0
Total Sub Indikator								94.000.000	94.000.000	0

B.4	Indikator D	Operasional Penelitian								
B.4.1	ATK & Konsumsi									
	1	ATK	ATK untuk mendukung kegiatan penelitian.	1	12	300.000	Bulan	3.600.000	3.600.000	
	2	Konsumsi rapat	Snack dan makan siang untuk rapat koordinasi tim	5	6	50.000	kali	1.500.000	1.500.000	
	Total Sub Item							5.100.000	5.100.000	0
B.4.2	Pelaporan									
	1	Penjilidan & Penggandaan Laporan	Biaya penggandaan dan penjilidan laporan kemajuan dan akhir penelitian.	5	1	250.000	Buku	1.250.000	1.250.000	
	2	Cetak Poster dan Materi Diseminasi	Biaya cetak poster, banner, dan materi presentasi	1	1	1.500.000	Paket	1.500.000	1.500.000	
	Total Sub Item							2.750.000	2.750.000	0
	Total Sub Indikator							7.850.000	7.850.000	0
B.5	Indikator E	Survei dan Validasi Lapangan								
B.5.1	Perjalanan Dinas ke Pulau Tunda (1 kunjungan)									
	1	Transportasi Darat (Jakarta - Pelabuhan Karangantu)	3 orang x 1 kunjungan (PP)	1	2	1.000.000	Org/kali	2.000.000	2.000.000	
	2	Sewa Kapal Nelayan (Pelabuhan Karangantu - Pulau Tunda)	Kapal untuk rombongan 3 orang, PP	1	2	2.000.000	Kapal	4.000.000	4.000.000	
	3	Akomodasi (Homestay)	3 orang x 2 malam x 1 kunjungan	5	4	500.000	Org/malam	10.000.000	10.000.000	
	4	Uang harian	3 orang x 3 hari x 1 kunjungan	5	5	300.000	Org/hari	7.500.000	7.500.000	
	5	Transportasi Lokal & Dokumentasi	Selama di Pulau Tunda untuk survei dan validasi.	1	1	1.000.000	Paket	1.000.000	1.000.000	
	6	Konsumsi FGD dengan Stakeholder	Focus Group Discussion dengan masyarakat dan stakeholder Pulau Tunda	1	1	3.000.000	kali	3.000.000	3.000.000	
	Total Sub Item							27.500.000	27.500.000	0
	Total Sub Indikator							27.500.000	27.500.000	0
I Biaya Langsung Non Personil								163.950.000	163.950.000	0
AL I (BIAYA LANGSUNG) - Minimum 95% dari Total Biaya								220.950.000	220.950.000	0

YA TIDAK LANGSUNG BERDASARKAN AKTIVITAS									
TIDAK LANGSUNG - Maksimum 5 % dari Total Biaya									
Kegiatan A	Monitoring Internal	Tuliskan Indikator Kinerja Riset/Luaran yang akan dihasilkan dari aktivitas tersebut							
1	Honor reviewer internal	Honorarium untuk reviewer internal yang melakukan monitoring dan evaluasi capaian penelitian	3	1	1.000.000	OK	3.000.000	3.000.000	
2	Snack rapat monitoring	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	2	500.000	kali	1.000.000	1.000.000	
3	Makan siang rapat monitoring	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	2	500.000	kali	1.000.000	1.000.000	
Sub Total II.A							5.000.000	5.000.000	0
Aktivitas B	Evaluasi Mandiri oleh Internal Institusi	Tuliskan Indikator Kinerja Riset/Luaran yang akan dihasilkan dari aktivitas tersebut							
1	Honor evaluator internal	Honorarium untuk evaluator internal yang melakukan evaluasi mandiri	3	1	1.000.000	kali	3.000.000	3.000.000	0
2	Snack rapat monitoring	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	2	500.000	kali			
3	Makan siang rapat monitoring	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	2	500.000	kali	1.000.000	1.000.000	0
Sub Total II.B							4.000.000	4.000.000	0
Aktivitas C	Administrasi Penelitian	Tuliskan Indikator Kinerja Riset/Luaran yang akan dihasilkan dari aktivitas tersebut							
1	Administrasi Penelitian	Biaya administrasi dan pengelolaan penelitian di institusi	1	1	1.000.000	kali	1.000.000	1.000.000	0
Sub Total II.B							1.000.000	1.000.000	0
AYA TIDAK LANGSUNG) - Maksimum 5 % dari Total Biaya							10.000.000	9.000.000	0
A (I + II)							230.950.000	229.950.000	0

RINCIAN USULAN RAB									TAHUN 2	
Judul Riset		: Manajemen Energi Cerdas Berbasis Multi-Agent Deep Reinforcement Learning untuk Ketahanan Sistem Energi Terbarukan Skala Komunal di Wila								
Fokus/ Skema Rise		: Kedaulatan Energi								
Ketua Periset		: Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.								
Asal Institusi		: Universitas Budi Luhur								
Mitra Riset		:								
Total Usulan Waktu		: 2 tahun								
No	Komponen Biaya Riset/ Aktivitas Riset/ Justifikasi Kebutuhan	Keterangan/Indikator Kinerja Riset/Luaran	Volume	Frekuensi	Harga Satuan (Rp)	Satuan	Jumlah (LPDP + Mitra)	Proporsi Pendanaan		
								LPDP	Mitra	
								Tahun I	Tahun I	
I. BIAYA LANGSUNG - Minimum 95% dari Total Biaya										
A. BIAYA LANGSUNG PERSONIL - Maksimum 25% dari total Pendanaan										
Gaji/ Upah/ Honorarium										
	1	Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.	Ketua	1	10	1.500.000	OB	15.000.000	15.000.000	
	2	Peby Wahyu Purnawan, S.T., M.T.	Anggota	1	10	1.000.000	OB	10.000.000	10.000.000	
	3	Dion Setiawan, S.T., M.T.	Anggota	1	10	1.000.000	OB	10.000.000	10.000.000	
	4	Iman Permana, S.Kom., M.Kom.	Asisten	1	10	750.000	OB	7.500.000	7.500.000	
	5	Rismawandi, S.E., M.Akt.	Administrator	1	10	500.000	OB	5.000.000	5.000.000	
Total Biaya Langsung Personil								47.500.000	47.500.000	0

B. BIAAYA LANGSUNG NON PERSONIL										
B.1	Indikator A MADRL & Integrasi									
B.1.1	Bahan Habis Pakai									
	1	Modul Sensor Arus & Tegangan Presisi Tinggi	Mengukur parameter degradasi baterai	2	1	1.200.000		2.400.000	2.400.000	
		Modul Komunikasi Gateway IoT (Modbus/4G)	Transmisi data nirkabel dari controller	2	1	850.000		1.700.000	1.700.000	
		Suku Cadang Elektronik Ekstra & Jumper Wire	Komponen cadangan jika terjadi short-circuit	2	1	1.500.000		3.000.000	3.000.000	
		ATK, Logbook, Harddisk Eksternal (Data Log)	Penyimpanan dataset pelatihan MADRL	1	1	1.310.000		1.310.000	1.310.000	
	Total Sub Item							8.410.000	8.410.000	0
B.1.2	Jasa dan Lisensi									
	1	Lisensi Cloud Computing (GPU)	Untuk pelatihan dan tuning model Deep Reinforcement Learning yang memerlukan komputasi intensif.	1	1	5.000.000	Paket	5.000.000	5.000.000	
	2	Lisensi Python Library (RLlib, PyTorch)	Library open-source, namun biaya untuk support/enterprise jika diperlukan.	1	1	3.000.000	Paket	3.000.000	3.000.000	
	3	Jasa Pembuatan Software HIL dengan MADRL	Pengembangan kode program untuk komunikasi HIL dengan MADRL (Python, C++)	1	1	10.000.000	Paket	10.000.000	10.000.000	
	Total Sub Item							18.000.000	8.000.000	0

	Total Sub Indikator							26.410.000	16.410.000	0
	B.2	Indikator B Luaran Publikasi Q2								
	B.2.1	Biaya Publikasi								
		1	Article Processing Charge (APC)	Biaya publikasi di jurnal internasional bereputasi (target Q1).	1	1	36.000.000		36.000.000	36.000.000
		2	Jasa Proofreading & Editing	Jasa proofreading naskah internasional oleh native speaker	1	1	2.000.000	Paket	2.000.000	2.000.000
		Total Sub Item						38.000.000	38.000.000	0
	B.2.2	Konsumsi								
		1	Konsumsi koordinasi	Biaya konsumsi koordinasi penyusunan artikel ilmiah	5	2	50.000	Paket	500.000	500.000
		Total Sub Item						500.000	500.000	0
	Total Sub Indikator							38.500.000	38.500.000	0
	B.3	Indikator C Paten Sederhana								
	B.3.1	Pendaftaran Paten								
		1	Pendaftaran Paten Sederhana	Untuk purwarupa produk/teknologi SME yang dihasilkan.	1	1	5.000.000	Paket	5.000.000	5.000.000
		2	Konsultasi Hukum Paten	Konsultasi dengan ahli hukum untuk pendaftaran Paten	1	1	2.000.000	Paket	2.000.000	2.000.000
		3	Biaya Pencarian Dokumen Prior Art	Pencarian dokumen paten sejenis untuk analisis kebaruan	1	1	1.000.000	Paket	1.000.000	1.000.000
		Total Sub Item						5.000.000	5.000.000	0
	Total Sub Indikator							5.000.000	5.000.000	0

B.4	Indikator D	Operasional Penelitian								
B.4.1	ATK & Konsumsi									
	1	ATK	ATK untuk mendukung kegiatan penelitian.	1	10	250.000	Bulan	2.500.000	2.500.000	
	2	Konsumsi rapat	Snack dan makan siang untuk rapat koordinasi tim	5	6	50.000	kali	1.500.000	1.500.000	
	Total Sub Item							4.000.000	4.000.000	0
B.4.2	Pelaporan									
	1	Penjilidan & Penggandaan Laporan	Biaya penggandaan dan penjilidan laporan kemajuan dan akhir penelitian.	5	1	250.000	Buku	1.250.000	1.250.000	
	2	Biaya Seminar Hasil Penelitian	Biaya perjalanan dan kegiatan mengikuti seminar internasional diseminasi hasil penelitian	2	2	5.000.000	Paket	20.000.000	20.000.000	
	Total Sub Item							21.250.000	1.250.000	0
	Total Sub Indikator							25.250.000	5.250.000	0

	B.5	Indikator E	Survei dan Validasi Lapangan								
	B.5.1	Pembuatan Mini Plan (Purwarupa) Sistem Energi Terbarukan									
		1	Mini Plan Sistem PV (Photovoltaic)	Pembuatan model fisik miniatur sistem panel surya skala laboratorium untuk pengujian HIL, meliputi panel surya mini (50-100 Wp), mounting, dan konektor	1	1	5.000.000	Unit	5.000.000	5.000.000	
		2	Mini Plan Sistem Solar Concentrator	Pembuatan model fisik konsentrator surya skala lab menggunakan cermin cekung/flat concentrator dengan struktur sederhana	1	1	5.000.000	Unit	5.000.000	5.000.000	
		3	Mini Plan Sistem Biogas	Pembuatan digester biogas skala laboratorium dari bahan PVC/tangki dengan kapasitas kecil (50-100 L), meliputi reaktor, pipa gas, dan kompor mini, mengikuti prinsip biodigester yang dapat menggantikan septic tank dan menghasilkan energi	1	1	5.000.000	Unit	5.000.000	5.000.000	
		4	Mini Plan Sistem Pemanen Hujan	Pembuatan model pemanenan air hujan skala lab meliputi talang, pipa, filter, dan tangki penyimpanan (100-200 L), yang dapat mengurangi ketergantungan pada sumber air konvensional hingga 30%	1	1	5.000.000	Unit	5.000.000	5.000.000	
		5	Mini Plan Sistem Diesel	Pembuatan model genset diesel skala laboratorium menggunakan genset mini (500-1000 W) atau simulator motor diesel dengan sistem kontrol dan pengukuran konsumsi bahan bakar	1	1	5.000.000	Unit	5.000.000	5.000.000	
		6	Mini Plan Sistem Baterai	Pembuatan model sistem penyimpanan energi skala lab menggunakan baterai LiFePO4 12V 20Ah dengan BMS, inverter, dan sistem monitoring SoC	1	1	5.000.000	Unit	5.000.000	5.000.000	
		7	Biaya Fabrikasi dan Integrasi Mini Plan	Biaya perakitan, pengelasan, pembuatan rangka, panel kontrol, dan integrasi keenam mini plan menjadi satu sistem terintegrasi	1	39	10.000.000	Paket	10.000.000	10.000.000	
		Total Sub Item							25.000.000	25.000.000	0
		Total Sub Indikator							25.000.000	25.000.000	0

B.6	Indikator E	Survei dan Validasi Lapangan								
B.6.1	Perjalanan Dinas ke Pulau Tunda (1 kunjungan)									
	1	Transportasi Darat (Jakarta - Pelabuhan Karangantu)	3 orang x 1 kunjungan (PP)	1	2	1.000.000	Org/kali	2.000.000	2.000.000	
	2	Sewa Kapal Nelayan (Pelabuhan Karangantu - Pulau Tunda)	Kapal untuk rombongan 3 orang, PP	1	2	2.000.000	Kapal	4.000.000	4.000.000	
	3	Akomodasi (Homestay)	3 orang x 2 malam x 1 kunjungan	5	4	500.000	Org/malam	10.000.000	10.000.000	
	4	Uang harian	3 orang x 3 hari x 1 kunjungan	5	5	300.000	Org/hari	7.500.000	7.500.000	
	5	Transportasi Lokal & Dokumentasi	Selama di Pulau Tunda untuk survei dan validasi.	1	1	1.000.000	Paket	1.000.000	1.000.000	
	6	Konsumsi FGD dengan Stakeholder	Focus Group Discussion dengan masyarakat dan stakeholder Pulau Tunda	1	1	3.000.000	kali	3.000.000	3.000.000	
	Total Sub Item							24.500.000	24.500.000	0
	Total Sub Indikator							24.500.000	24.500.000	0
Total Biaya Langsung Non Personil								144.660.000		
TOTAL I (BIAYA LANGSUNG) - Minimum 95% dari Total Biaya								192.160.000		

URAIAN BIAYA TIDAK LANGSUNG BERDASARKAN AKTIVITAS											
II. BIAYA TIDAK LANGSUNG - Maksimum 5 % dari Total Biaya											
	A.	Kegiatan A	Monitoring Internal	Tuliskan Indikator Kinerja Riset/Luaran yang akan dihasilkan dari aktivitas tersebut							
		1	Honor reviewer internal	Honorarium untuk reviewer internal yang melakukan monitoring dan evaluasi capaian penelitian	2	1	1.000.000	OK	2.000.000	2.000.000	
		2	Snack rapat monitoring	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	1	500.000	kali	500.000	500.000	
		3	Makan siang rapat monitoring	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	1	500.000	kali	500.000	500.000	
		Sub Total II.A							3.000.000	3.000.000	0
	B.	Aktivitas B	Evaluasi Mandiri oleh Internal Institusi	Tuliskan Indikator Kinerja Riset/Luaran yang akan dihasilkan dari aktivitas tersebut							
		1	Honor evaluator internal	Honorarium untuk evaluator internal yang melakukan evaluasi mandiri	2	1	1.000.000	kali	2.000.000	2.000.000	0
		2	Snack rapat evaluasi	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	1	500.000	kali			
		3	Makan siang rapat evaluasi	Konsumsi rapat untuk kegiatan monev internal.	1	1	500.000	kali	500.000	500.000	0
		Sub Total II.B							2.500.000	2.500.000	0
	C.	Aktivitas C	Administrasi Penelitian	Tuliskan Indikator Kinerja Riset/Luaran yang akan dihasilkan dari aktivitas tersebut							
		1	Administrasi Penelitian	Biaya administrasi dan pengelolaan penelitian di institusi	1	1	1.000.000	kali	1.000.000	1.000.000	0
		Sub Total II.B							1.000.000	1.000.000	0
TOTAL II (BIAYA TIDAK LANGSUNG) - Maksimum 5 % dari Total Biaya									10.000.000	10.000.000	0
TOTAL BIAYA (I + II)									202.160.000	10.000.000	0

DAFTAR PUSTAKA

- Alankrita, A., Pati, A., & Adhikary, N. (2026). Multiagent deep reinforcement learning-based distributed control strategy for energy management in DC Microgrid. *Computers and Electrical Engineering*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2025.110927>.
- Ali, W., Pakseresht, A., Chua, C., & Yavari, A. (2026). Energy resilience and decarbonization via hybrid renewable energy systems: A techno-economic study \$. *International Journal of Hydrogen Energy*, 217(January). <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2026.153765>
- Anwar, K. (2026). *Warga Pulau Tunda Keluhkan PLTS Rusak, PLN Janji Bangun Tahun Ini*. <https://banten.idntimes.com/news/banten/warga-pulau-tunda-keluhkan-plts-rusak-pln-janji-bangun-tahun-ini-00-95741-jkn00r>
- Bhol, S., Sahu, N. C., & Nanda, A. B. (2021). Optimal Dispatch of a Hybrid Renewable Energy System Using Modified PSO Algorithm. *2021 International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology (APSIT)*. <https://doi.org/10.1109/APSIT52773.2021.9641473>
- Deng, J., Wang, X., & Meng, F. (2025). A novel safe multi-agent deep reinforcement learning-based method for smart building energy management. *Energy and Buildings*, 347(Part A). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.116256>.
- Ge, Y., Xie, J., Feng, S., Chang, J., & Fu, D. (2026). Knowledge-embedded deep reinforcement learning for real-time dispatch of wind-solar-hydro hybrid generation systems. *Journal of Cleaner Production*, 558. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.148255>.
- Ivan, K., Maina, A. G., Nanu, D. E., Lukose, J., Thang, K. F., Maghami, M. R., Mazlan, M., & Mutambara, A. (2026). A Comprehensive Systematic Review of Hybrid Energy Systems: Addressing Challenges and Future Direction. *Results in Engineering*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.112165> This
- Korovushkin, V., Boichenko, S., Artyukhov, A., ´Cwik, K., Wróblewska, D., & Jankowski, G. (2025). Modern Optimization Technologies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Systematic Review of Research Gaps and Prospects for Decisions. *Energies*, 18. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/en18174727>
- Lyu, Z., Hu, B., Wei, Z., Zhou, H., Bao, H., Guo, Z., Xu, J., & Shi, L. (2025). Deep reinforcement learning-based energy management strategy for heterogeneous interconnected multi-energy microgrid systems with shared energy storage. *Electric Power Systems Research*, 252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112375>
- Lyu, Z., Hu, B., Wei, Z., Zhou, H., Bao, H., Guo, Z., Xu, J., & Shi, L. (2026). Deep reinforcement learning-based energy management strategy for heterogeneous interconnected multi-energy microgrid systems with shared energy storage. *Electric Power Systems Research*, 252. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2025.112375>
- Mahmud, S., Nabil, A., Himeur, Y., Nhlabatsi, A., & Bensaali, F. (2026). A comprehensive review of deep reinforcement learning applications from centralized power generation to modern energy internet frameworks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226(August 2025). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116481>

- Maroufi, S. M., Pelosi, D., Barelli, L., & Carne, G. De. (2026). Power hardware in the loop-based lifetime assessment of hybrid energy storage systems : A novel realistic approach. *Journal of Energy Storage*, 145(August 2025). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2025.119910>
- Rabbi, M. F. (2026). Artificial Intelligence Framework for Simulated Multiagent Reinforcement Learning in Hybrid Microgrid Control. *Results in Engineering*, 29(August 2025). <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2026.109744>
- Raghavendran, C. R., Kumar, P. M., Kesavan, T., & Geethamaha, L. G. (2025). Design and performance analysis of hybrid renewable energy systems using a novel approach for efficient load demand prediction and cost minimization. *Journal of Energy Storage*, 123. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2025.116742>.
- Saeed, R. S., Raja, A. A., Iqbal, R., Nizami, I. F., Shahzad, M. S., & Yaseen, M. (2026). Adaptive and intelligent control architectures for smart microgrid Systems : A comprehensive review. *Energy Conversion and Management : X*, 30(December 2025). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2026.101772>
- Younes, M. S., Sultan, H. M., Diab, A. A. Z., Mossa, M. A., & Abdelaziz, A. Y. (2026). Optimization and Energy Management Strategies for Hybrid Renewable Energy Systems: A Comprehensive Review. In *Distributed Generation - Technologies, Control and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/https://doi.org/10.5772/intechopen.1016714>
- Zhang, Z., Lin, Z., Zhou, J., Qu, C., & Li, R. (2026). An application-oriented model predictive control strategy for optimal active power regulation of integrated large-scale wind–photovoltaic–storage power plant with hardware-in-the-loop test. *Journal of Energy Storage*, 150. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.est.2026.120512>.

LAMPIRAN

KOMPETENSI TIM PERISET

No	Nama	Pendidikan	Kepakaran	Peran dalam Kegiatan Riset	SCOPUS Profile (url)
1.	Dr. Akhmad Musafa, S.T., M.T.	S3, Teknik Elektro	Sistem energi terbarukan, aplikasi <i>machine learning</i> pada sistem energi terbarukan	Mengkoordinasikan kegiatan penelitian, pemodelan sistem, dan membangun kerangka kerja, simulasi HIL, merancang SME cerdas	https://www.scopus.com/pages/authors/57206890934
2.	Peby Wahyu Purnawan, S.T., M.T.	S2, Teknik Elektro	Teknologi Telekomunikasi, Renewable Energy (Solar Panel)	Merancang sistem energi terbarukan hibrida	https://www.scopus.com/pages/authors/57170885600
3.	Dion Setiawan, S.T., M.T.	S2, Teknik Elektro	Kecerdasan Buatan, Robotik, dan IoT	Merancang sistem elektronika untuk HIL, pemrograman sistem	https://www.scopus.com/pages/authors/58575837900