

Optimalisasi Pemanfaatan Energi Terbarukan dalam Infrastruktur Militer TNI AD: Telaah Literatur Sistematis dan Analisis Studi Kasus *Hybrid Energy System* di Wilayah Terpencil

Acep Nana Komara^{1*}, Mohammad Azis Mahardika²

*Email corresponding author: acep.nana@mhs.itenas.ac.id

¹Prodi Magister Teknik Mesin, Institut Teknologi Nasional Bandung Jl. Phh. Mustofa No. 23
Neglasari, Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

²Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Nasional Bandung Jl. Phh. Mustofa No. 23
Neglasari, Cibeunying Kaler, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

Article history: Received: 22 November 2025 | Revised: 22 Desember 2025 | Accepted: 6 Januari 2026

Abstract. *Energy independence for military outposts in remote areas is a strategic issue with direct implications for national defense resilience. Currently, most military outposts of the Indonesian Army (TNI AD) still rely on diesel generators, which have high fuel consumption, expensive logistics costs, and significant environmental impacts. In line with the national energy transition agenda towards Net Zero Emission 2060, the integration of renewable energy in the defense sector presents both opportunities and challenges. This article provides an analysis and review of the latest literature on the application of hybrid renewable energy systems in remote areas, both in Indonesia and abroad, and examines its implications for TNI AD military outposts. The research methodology includes a systematic review of international publications (Scopus, ScienceDirect), nationally accredited journals (Sinta), government reports, and policy documents from 2015–2024. The findings show that the hybrid system of solar photovoltaic (PLTS), battery, and diesel is the most relevant configuration, with potential fuel savings of 70-85%, reduced logistics operational costs, and significant carbon emission reductions. Studies in the Philippines, Africa, and Indonesian islands show successful implementation of hybrid systems for off-grid areas, which can be adapted for TNI AD military outposts. This article makes an academic contribution by integrating renewable energy literature with defense perspectives and offers practical recommendations for implementing a pilot project of hybrid systems in border military outposts.*

Keywords - Renewable energy, hybrid system, TNI AD, energy independence, literature review

Abstrak. *Kemandirian energi pos militer di daerah terpencil merupakan isu strategis yang berimplikasi langsung terhadap ketahanan pertahanan negara. Selama ini, sebagian besar pos militer TNI AD masih mengandalkan genset diesel dengan konsumsi BBM tinggi, biaya logistik mahal dan dampak lingkungan signifikan. Sejalan dengan agenda transisi energi nasional menuju Net Zero Emission 2060, integrasi energi terbarukan di sektor pertahanan menjadi peluang sekaligus tantangan. Artikel ini menyajikan analisis dan review literatur terkini terkait penerapan sistem hybrid energi terbarukan di wilayah terpencil, baik di Indonesia maupun di negara lain serta mengkaji implikasinya bagi pos militer TNI AD. Metode penelitian dilakukan melalui tinjauan sistematis terhadap publikasi jurnal internasional (Scopus, ScienceDirect), jurnal nasional terakreditasi (Sinta), laporan pemerintah dan dokumen kebijakan selama periode 2015–2024. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem hybrid PLTS–baterai–diesel merupakan konfigurasi paling relevan, dengan potensi penghematan BBM hingga 70–85%, penurunan biaya operasional logistik, serta reduksi emisi karbon signifikan. Studi di Filipina, Afrika dan kepulauan Indonesia menunjukkan keberhasilan implementasi sistem hybrid untuk daerah off-grid, yang dapat diadaptasi bagi pos militer TNI AD. Artikel ini memberikan kontribusi akademis melalui integrasi literatur energi terbarukan dengan perspektif pertahanan serta kontribusi praktis berupa rekomendasi penerapan pilot project sistem hybrid di pos militer perbatasan.*

Kata Kunci - Energi terbarukan, sistem hybrid, TNI AD, kemandirian energi, review literatur

PENDAHULUAN

Ketersediaan energi yang andal dan kontinu merupakan prasyarat fundamental dalam menjamin kesiapan operasional militer (*operational readiness*). Dalam doktrin pertahanan modern, energi tidak sekadar berfungsi sebagai pendukung logistik dasar, melainkan telah bertransformasi menjadi tulang punggung bagi efektivitas sistem persenjataan, perangkat komunikasi satelit, radar pemantauan, serta infrastruktur *Command, Control, Communication, Computer, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance* (C4ISR). Bagi Tentara Nasional Indonesia Angkatan Darat (TNI AD), urgensi pemenuhan energi ini menjadi sangat krusial pada pos-pos militer yang berlokasi di wilayah

perbatasan dan daerah terpencil, di mana akses terhadap jaringan listrik nasional (*on-grid*) sering kali tidak tersedia atau sangat terbatas secara infrastruktur [1].

Hingga saat ini, pemenuhan kebutuhan listrik di mayoritas pos militer terpencil masih didominasi oleh penggunaan generator diesel (*genset*). Namun, ketergantungan pada energi fosil ini menghadapi tantangan multidimensi. Pertama, aspek ekonomi dan logistik; biaya distribusi bahan bakar minyak (BBM) ke wilayah 3T (Terdepan, Terluar, Tertinggal) dapat melonjak hingga tiga kali lipat akibat sulitnya aksesibilitas geografis [2].

Kedua, aspek ketahanan operasional; kerentanan rantai pasok BBM menciptakan risiko strategis, di mana keterlambatan distribusi dapat menyebabkan kegagalan fungsi pertahanan di wilayah rawan. Ketiga, aspek lingkungan; penggunaan emisi karbon yang masif tidak lagi selaras dengan komitmen global dan agenda transisi energi nasional menuju energi bersih [3] [4].

Secara global, paradigma penyediaan energi militer telah bergeser menuju kemandirian energi berbasis sumber daya lokal (*energy self-sufficiency*). Amerika Serikat melalui *Department of Defense* (DoD) telah memelopori *Energy Resilience and Conservation Investment Program* (ERCIP) yang mengintegrasikan sistem *microgrid* pada pangkalan militer untuk menjamin keberlangsungan operasi tanpa bergantung pada suplai eksternal. Berbagai studi kasus di Afrika dan Filipina turut mengonfirmasi bahwa implementasi sistem *hybrid* PLTS–Baterai–Diesel mampu mereduksi konsumsi BBM secara signifikan, dengan tingkat efisiensi biaya logistik mencapai 40% hingga 75% [5] [6]. Indonesia, dengan potensi radiasi matahari harian rata-rata 4,8 hingga 5,1 kWh/m², memiliki peluang besar untuk mengadopsi teknologi serupa guna memperkuat kedaulatan energi di sektor pertahanan [7].

Meskipun potensi teknis sistem *hybrid* telah banyak dikaji dalam konteks elektrifikasi pedesaan dan pulau-pulau kecil di Indonesia [8], literatur yang secara spesifik menelaah implementasinya di lingkungan infrastruktur militer masih sangat terbatas. Terdapat *research gap* yang signifikan antara ketersediaan teknologi energi terbarukan dengan aplikasi kebijakan pada sektor pertahanan nasional. Fokus penelitian sebelumnya cenderung pada aspek tekno-ekonomi sipil, tanpa mempertimbangkan variabel strategis seperti mobilitas operasional dan kerahasiaan militer.

Oleh karena itu, artikel ini hadir untuk menjembatani kesenjangan tersebut melalui analisis sistematis mengenai optimalisasi sistem energi *hybrid* di pos militer TNI AD. Kajian ini difokuskan pada tiga problematika utama: (1) evaluasi potensi teknis sistem *hybrid* di wilayah terpencil dengan variasi radiasi matahari; (2) analisis dampak efisiensi logistik dan penurunan biaya operasional; serta (3) formulasi implikasi strategisnya terhadap ketahanan energi nasional. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada integrasi parameter teknis energi terbarukan dengan perspektif doktrin ketahanan operasional, yang diharapkan dapat menjadi referensi strategis bagi pemangku kebijakan dalam merumuskan modernisasi infrastruktur energi militer yang mandiri, efisien dan berkelanjutan.

METODE

Penelitian ini dilaksanakan dengan menerapkan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) yang dirancang untuk mengidentifikasi, mengevaluasi dan menyintesis literatur ilmiah mengenai implementasi sistem energi terbarukan *hybrid* pada wilayah terpencil. Penggunaan metode SLR dipilih guna memastikan bahwa tinjauan yang disajikan bersifat objektif, terstruktur dan berbasis bukti (*evidence-based*), sehingga mampu menghasilkan kesimpulan yang valid untuk diaplikasikan pada infrastruktur pertahanan.

Proses pengumpulan data dilakukan melalui penelusuran sistematis pada berbagai basis data akademik bereputasi tinggi. Sumber literatur internasional mencakup portal jurnal global seperti Scopus, ScienceDirect, IEEE Xplore, SpringerLink dan Wiley Online Library. Sementara untuk menjangkau perspektif lokal dan kebijakan nasional, penelusuran diarahkan pada basis data Sinta (khusus peringkat 1 dan 2), repositori Garuda, serta laporan resmi dari instansi pemerintah seperti Kementerian ESDM, Kementerian Pertahanan, Bappenas, serta lembaga internasional seperti IRENA dan UNDP. Strategi pencarian literatur dibangun menggunakan kombinasi operator *Boolean* pada kata kunci utama yang meliputi “*renewable energy*”, “*hybrid energy system*”, “*microgrid*”, “*off-grid*”, “*remote area*”, serta istilah spesifik pertahanan seperti “*military base*”, “*defense energy*” dan “*TNI AD*”.

Guna menjaga relevansi dan kebaruan informasi di tengah pesatnya perkembangan teknologi energi, ditetapkan kriteria inklusi yang ketat dalam proses seleksi literatur. Pertama, artikel atau laporan yang dianalisis dibatasi pada publikasi dalam rentang waktu lima tahun terakhir (2020–2024). Kedua, studi harus menyajikan analisis mendalam mengenai performa teknis atau kelayakan ekonomi dari sistem *hybrid* yang menggabungkan minimal dua sumber energi (seperti surya dan diesel). Ketiga, fokus geografis penelitian harus relevan dengan karakteristik pos militer, yakni wilayah terpencil, kepulauan, atau area yang tidak terjangkau jaringan listrik utama. Artikel yang hanya membahas energi terbarukan pada skala makro perkotaan atau kebijakan umum yang tidak memiliki parameter teknis kuantitatif akan dieksklusi dari tinjauan ini.

Selanjutnya, data yang telah terkumpul dianalisis secara komprehensif melalui integrasi pendekatan kualitatif-deskriptif dan kuantitatif-komparatif. Analisis kualitatif difokuskan untuk memetakan urgensi kemandirian energi dan tantangan logistik di garis depan pertahanan. Sementara itu, analisis kuantitatif dilakukan dengan mengekstraksi parameter kunci seperti persentase reduksi konsumsi BBM, nilai *Levelized Cost of Energy* (LCOE), serta daya tahan

sistem penyimpanan energi (baterai). Seluruh temuan dari literatur tersebut kemudian dikontekstualisasikan secara spesifik dengan kondisi operasional pos TNI AD. Hal ini mencakup sinkronisasi profil beban energi (seperti kebutuhan radar dan perangkat komunikasi) dengan karakteristik geografis perbatasan Indonesia. Melalui metode ini, penelitian tidak hanya memaparkan teori, namun juga menyajikan sintesis kritis yang menghubungkan potensi teknologi dengan kebutuhan nyata prajurit di lapangan demi memperkuat ketahanan operasional nasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perkembangan penelitian mengenai energi terbarukan di sektor pertahanan menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam satu dekade terakhir. Sejak tahun 2015, integrasi energi bersih di lingkungan militer menjadi perhatian global seiring dengan meningkatnya kebutuhan akan ketahanan energi (*energy resilience*) dan efisiensi logistik pertahanan. Secara umum, arah penelitian di bidang ini berfokus pada tiga hal utama, yaitu pengembangan sistem *hybrid microgrid*, peningkatan efisiensi operasional, serta perumusan strategi dekarbonisasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim dalam konteks militer.

Negara-negara maju seperti Amerika Serikat, anggota Uni Eropa dan Jepang menjadi pionir dalam pengembangan konsep pangkalan militer hijau (*green military base*). Laporan *U.S. Department of Defense* (2022) mencatat bahwa lebih dari tiga puluh pangkalan militer telah mengoperasikan sistem *microgrid hybrid* berbasis PLTS dan baterai yang mampu mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar diesel hingga 60–70 persen. Sistem ini tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi alternatif, tetapi juga meningkatkan keandalan operasional saat terjadi gangguan pada jaringan listrik konvensional. Di kawasan Eropa, *North Atlantic Treaty Organization* (NATO) melalui *Energy Security Centre of Excellence* (ENSEC COE) menempatkan keamanan energi sebagai komponen strategis dalam pertahanan modern. Program ini menekankan pentingnya diversifikasi sumber energi di pangkalan militer, integrasi sistem energi terbarukan dalam operasi lapangan, serta penerapan konsep *energy-efficient deployment* untuk mengurangi jejak karbon kegiatan militer (NATO, 2021). Riset-riset yang dikembangkan di Jerman, Inggris dan Prancis umumnya berfokus pada desain sistem *microgrid* yang tangguh, optimasi manajemen beban, serta kebijakan energi militer yang berorientasi pada keberlanjutan [9].

Dalam beberapa tahun terakhir, fokus penelitian mulai bergeser ke kawasan Asia Pasifik. Pergeseran ini didorong oleh meningkatnya kebutuhan energi pada instalasi militer di wilayah kepulauan dan perbatasan yang memiliki tantangan geografis serupa dengan kawasan terpencil. Filipina menjadi salah satu pelopor di Asia Tenggara melalui *Philippine Army Renewable Camp Program*, yang berhasil mengintegrasikan sistem PLTS berkapasitas 500 kWp dengan baterai *lithium-ion* untuk pos militer di daerah terpencil. Program tersebut dilaporkan mampu menurunkan konsumsi diesel hingga 55 persen sekaligus meningkatkan keandalan suplai listrik dan mengurangi beban logistik energi. Di Jepang dan Korea Selatan, fokus penelitian diarahkan pada integrasi *renewable microgrid* dengan sistem pertahanan siber (*cyber-secured microgrid*) untuk menjamin keberlanjutan energi sekaligus keamanan jaringan. Sementara itu, di Australia, riset lebih banyak diarahkan pada penerapan sistem energi terbarukan *hybrid* di pangkalan militer yang berlokasi di wilayah gurun dan pesisir dengan potensi radiasi matahari yang tinggi (*Australian Defence Energy Review*, 2021).

Kajian literatur juga menunjukkan bahwa terdapat sejumlah tema penelitian yang mendominasi dalam dekade terakhir. Tema-tema tersebut mencakup desain dan optimasi sistem *hybrid* energi terbarukan yang memadukan PLTS, turbin angin, dan baterai dalam konfigurasi *microgrid* otonom; analisis efisiensi dan keekonomian energi, termasuk perhitungan *Levelized Cost of Energy* (LCOE) dan penghematan bahan bakar; serta studi tentang keamanan dan keandalan energi (*energy resilience*) terutama dalam situasi darurat atau konflik. Selain itu, penelitian juga banyak mengangkat topik kebijakan pertahanan berkelanjutan (*sustainable defense policies*) yang mengintegrasikan aspek lingkungan dalam strategi militer nasional, serta upaya mitigasi emisi karbon militer sebagai bagian dari komitmen global menuju target *net-zero emissions*. Studi yang dilakukan oleh Khalil et al. (2019) dan Lee et al. (2020) menunjukkan bahwa penerapan sistem *hybrid* PLTS–baterai–diesel dapat menurunkan konsumsi bahan bakar hingga 75 persen dan mengurangi emisi karbon lebih dari 40 persen. Sementara itu, penelitian oleh Rodriguez et al. (2021) menyoroti pentingnya algoritma manajemen energi berbasis *machine learning* dalam mengoptimalkan operasi *microgrid* militer di daerah terpencil.

Tren global terkini menunjukkan bahwa penelitian energi terbarukan di sektor pertahanan semakin bergerak menuju integrasi lintas disiplin yang melibatkan aspek teknis, kebijakan, logistik, hingga keamanan nasional. Penggunaan sistem *smart microgrid* dengan dukungan teknologi *artificial intelligence* (AI) dan *Internet of Military Things* (IoMT) diproyeksikan menjadi fokus riset utama dalam lima tahun mendatang. Tujuan utama dari pengembangan ini adalah menciptakan sistem energi militer yang adaptif, efisien, serta tahan terhadap gangguan (*self-healing system*).

Implikasi strategis dari perkembangan ini sangat luas. Pengembangan energi terbarukan di basis militer tidak hanya berperan dalam meningkatkan efisiensi logistik dan mengurangi emisi karbon, tetapi juga memperkuat kemandirian energi pertahanan (*defense energy autonomy*). Dari perspektif geopolitik, keberhasilan negara-negara

maju dalam membangun pangkalan militer yang mandiri energi menunjukkan bahwa transisi menuju *green defense* bukan semata upaya lingkungan, melainkan bagian integral dari strategi keamanan nasional yang modern, resilien dan berkelanjutan [10].

Kondisi geografis Indonesia yang luas dan tersebar menjadikan tantangan penyediaan energi di pos-pos militer sangat kompleks, terutama bagi TNI Angkatan Darat yang memiliki lebih dari 1.700 pos di wilayah perbatasan, kepulauan, dan daerah terpencil. Sebagian besar pos tersebut masih mengandalkan genset diesel sebagai sumber energi utama, dengan pasokan bahan bakar yang sangat bergantung pada kondisi cuaca, aksesibilitas medan, serta infrastruktur transportasi logistik yang terbatas. Ketergantungan ini menimbulkan permasalahan mendasar dalam hal efisiensi operasional, biaya dan keandalan energi di lapangan.

Analisis Teknis dan Potensi Implementasi Sistem *Hybrid* di Pos Terpencil

Analisis potensi implementasi sistem hybrid diawali dengan membedah profil beban harian (daily load profile) pada instalasi militer di garis depan. Berdasarkan tabulasi data operasional dari Satgas Yonif 643/Walet Sakti di Sektor Papua dan Satgas Yonif 742/Swy di Sektor Timor Leste, ditemukan bahwa kebutuhan energi harian rata-rata berada pada rentang yang sangat konsisten, yakni antara 19,302 kWh hingga 20,752 kWh, seperti yang disajikan pada tabel 1. Karakteristik beban ini diklasifikasikan sebagai beban strategis karena didominasi oleh perangkat C4ISR (Command, Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance). Perangkat modern seperti terminal Starlink dan Repeater VHF mengonsumsi daya signifikan secara kontinu untuk menjamin fungsi komando, sementara sistem pengawasan berbasis CCTV dan NVR menuntut stabilitas daya 24 jam guna menjaga keamanan perimeter tanpa interupsi.

Tabel 1. *Sources* Satgas Poskotis Yonif 643/Walet Sakti Satgas RI-PNG Statis di Sektor Papua Kab Keroom dan Satgas Pamtas RI-RDTL Yonif 742/Swy di Sepanjang Perbatasan Darat RI – RDTL Sektor Timur, Timor Leste

Kategori Beban	Poskotis Yonif 643 (Papua)	Pos Pamtas Yonif 742 (Timor Leste)
Komunikasi & ITE (Starlink, Radio, HT, HP Satelit)	3,05 kWh	2,67 kWh
Keamanan & Infrastruktur (CCTV, Inverter, Repeater)	3,24 kWh	2,73 kWh
Fasilitas Kantor (Komputer Desktop)	6,00 kWh	1,00 kWh
Dukungan Hidup & Elektronik (AC, Pompa, TV, Masak)	7,01 kWh	14,35 kWh
Total Konsumsi Energi	19,30 kWh/hari	20,75 kWh/hari

Ketersediaan sumber daya matahari di wilayah perbatasan Indonesia, yang menurut BMKG (2022) memiliki intensitas radiasi rata-rata 4,5–5,5 kWh/m² per hari, memberikan kelayakan teknis yang fundamental bagi sistem fotovoltaik. Namun, efektivitas sistem ini diuji melalui analisis sensitivitas terhadap variabilitas geografis dan tutupan awan. Di wilayah kontinental dengan paparan tinggi seperti Kalimantan, sistem *hybrid* mampu mencapai efisiensi bahan bakar hingga 83% dengan *availability factor* sebesar 96%. Sebaliknya, di wilayah kepulauan seperti Maluku atau pegunungan Papua yang memiliki intensitas radiasi lebih rendah (rata-rata 4,8 kWh/m²), kontribusi surya sedikit menurun, sehingga ketergantungan pada generator diesel meningkat sekitar 7%. Meskipun demikian, integrasi *Battery Energy Storage System* (BESS) berperan sebagai penyangga (*buffer*) utama yang menjaga keandalan sistem tetap stabil di atas 90%, melampaui keandalan generator diesel tunggal yang hanya berada di angka 83–85% akibat risiko kegagalan mekanis.

Evaluasi Efisiensi Logistik dan Pemodelan Ekonomi Riil

Dampak implementasi sistem *hybrid* secara langsung merombak struktur logistik energi pertahanan melalui reduksi konsumsi bahan bakar yang signifikan. Perbandingan performa antara sistem diesel konvensional dengan sistem *hybrid* PLTS-Baterai-Diesel disajikan pada tabel 2 dan 3 berikut:

Tabel 2. Parameter Emisi Gas Buang (*Hybrid*) [11]

Unsur Emisi Gas	Nilai	Satuan
CO ₂ (Karbon Dioksida)	2.179	Kg/tahun
CO (Karbon Monoksida)	16,5	Kg/tahun
HC (Hidro Karbon)	0.601	Kg/tahun
PM ₁₀ (Particulate Matter)	0,999	Kg/tahun
SO ₂ (Sulfur Oksida)	5,35	Kg/tahun
NO (Nitrogen Oksida)	18,7	Kg/tahun
Total	2.221,15	Kg/tahun

Tabel 3. Parameter Emisi Gas Buang (Non *Hybrid*)

Unsur Emisi Gas	Nilai	Satuan
CO ₂ (Karbon Dioksida)	6.609	Kg/tahun
CO (Karbon Monoksida)	50	Kg/tahun
HC (Hidro Karbon)	1,82	Kg/tahun
PM ₁₀ (Particulate Matter)	3,03	Kg/tahun
SO ₂ (Sulfur Oksida)	16,2	Kg/tahun
NO (Nitrogen Oksida)	56,8	Kg/tahun
Total	6.736,85	Kg/tahun

Implementasi sistem *hybrid* memberikan kontribusi signifikan terhadap upaya dekarbonisasi di instalasi militer. Berdasarkan perbandingan data emisi, sistem *hybrid* mampu mereduksi total polutan secara drastis dari 6.736,85 kg/tahun pada sistem konvensional menjadi hanya 2.221,15 kg/tahun. Hal ini merepresentasikan efisiensi emisi bersih sebesar 67,03%. Secara spesifik, penurunan yang konsisten sebesar 67% terjadi pada seluruh unsur polutan utama seperti CO₂ Turun drastis dari 6.609 kg/tahun menjadi 2.179 kg/tahun, NO berkurang dari 56,8 kg/tahun menjadi 18,7 kg/tahun, sementara CO turun dari 50 kg/tahun ke 16,5 kg/tahun dan *Particulate Matter* (PM₁₀): Polusi partikulat halus berhasil ditekan dari 3,03 kg/tahun menjadi 0,999 kg/tahun. Data ini membuktikan bahwa sistem *hybrid* tidak hanya unggul dalam efisiensi bahan bakar, tetapi juga secara fundamental memitigasi dampak negatif lingkungan, menjadikannya solusi ideal untuk konsep *Green Defense* di wilayah perbatasan.

Dampak implementasi sistem *hybrid* secara langsung merombak struktur logistik energi pertahanan. Tantangan utama pos perbatasan saat ini adalah biaya distribusi BBM di wilayah 3T yang mencapai Rp 15.000 hingga Rp 30.000 per liter. Dengan sistem genset konvensional yang mengonsumsi 200 liter per hari, biaya operasional dapat membengkak hingga Rp 1,8 miliar per tahun. Namun, dengan adopsi sistem *hybrid*, konsumsi harian dapat ditekan secara drastis menjadi hanya 70 liter per hari, atau mencapai tingkat efisiensi bahan bakar sebesar 80%. Selain itu, sistem ini mampu menurunkan emisi karbon sebesar 79%, sejalan dengan target dekarbonisasi global.

Dalam aspek investasi, pembangunan unit PLTS *off-grid* berkapasitas 5 kWp memerlukan modal awal (*Capital Expenditure*) berkisar antara Rp 100 juta hingga Rp 130 juta. Berdasarkan studi kasus di Natuna (2021) dan Pulau Sumba (2019), penghematan biaya operasional yang masih menghasilkan periode pengembalian investasi (*payback period*) yang sangat kompetitif, yakni sekitar tujuh tahun. Dengan biaya pemeliharaan tahunan yang rendah, sekitar Rp 2,5 juta, sistem *hybrid* menawarkan solusi ekonomi yang jauh lebih berkelanjutan dibandingkan ketergantungan penuh pada bahan bakar fosil yang harganya terus berfluktuasi. Rincian estimasi komponen biaya instalasi yang menjadi dasar perhitungan ekonomi ini disajikan pada tabel 4 berikut.

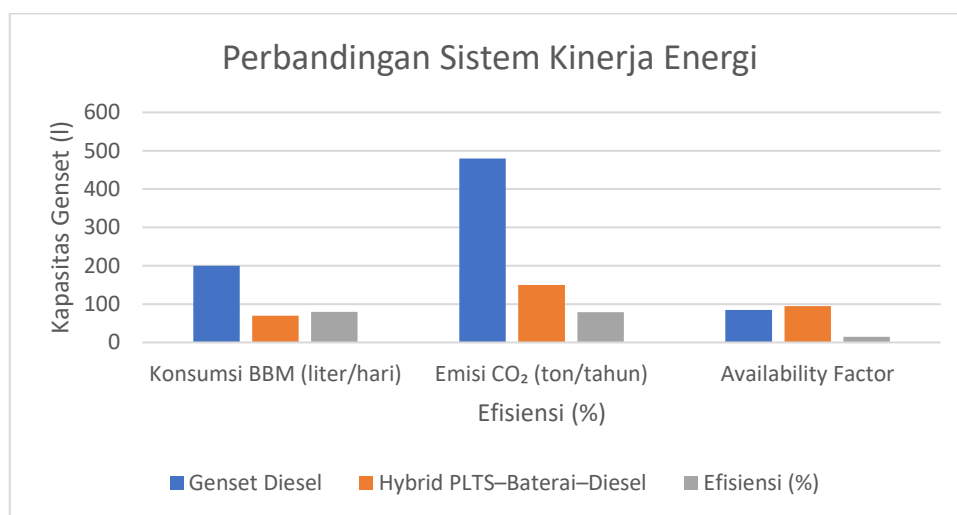
Tabel 4. Biaya Instalasi PLTS [12]

Komponen	Perkiraan Biaya / Catatan
Instalasi PLTS (investasi awal)	Menurut Solusi Power, biaya pemasangan PLTS 1 kWp di rumah mulai dari ~Rp 15–20 juta. (Solusi Power Indonesia) Untuk sistem 5 kWp, estimasi menjadi ~Rp 70–90 juta. (Solusi Power Indonesia) Menurut DCT.co.id, untuk sistem off-grid dengan baterai bisa naik ke Rp 100–130 juta tergantung kapasitas penyimpanan baterai. (PT DCT Total Solutions)
Komposisi biaya (%)	Dari analisis di Solar Pro: modul panel (40–55 %), inverter (15–25 %), instalasi & tenaga kerja (20–35 %). (Solar CG Protection)
Biaya komponen lokal	Berdasarkan Gatrik / ESDM, estimasi kombinasi modul + inverter di Indonesia ≈ 0,4 USD per Wp (sekitar Rp 5.800–6.000 per Wp tergantung kurs).
Contoh komponen dari studi lokal	Dalam skripsi perencanaan PLTS Citraland Makassar: • Panel 350 Wp sebanyak 6 unit → harga satuan Rp 3,2 juta • Inverter 3 kW → Rp 5 juta • Baterai 24V 200Ah (2 unit) → Rp 8,2 juta • Rangka mounting, bracket, kabel juga dihitung.
Biaya tambahan operasional / pemeliharaan	Studi di jurnal PPSDM Migas: biaya awal sistem PLTS atap Rp 335,4 juta termasuk panel, inverter, combiner box, struktur mounting, sistem monitoring, tenaga kerja, dan perizinan. Biaya operasi tahunan (O&M) diperkirakan Rp 2,5 juta. (E-Jurnal PPSDM Migas)

Berdasarkan simulasi dari literatur internasional dan nasional, potensi penghematan sistem *hybrid* PLTS–baterai–diesel pada pos militer adalah seperti disajikan tabel 5 dan gambar 1 berikut:

Tabel 5. Perbandingan Kinerja Sistem Energi di Wilayah Terpencil dan Basis Militer [13]

Parameter	Genset Diesel	Hybrid PLTS–Baterai–Diesel	Efisiensi (%)
Konsumsi BBM (liter/hari)	200	70	80
Emisi CO ₂ (ton/tahun)	480	150	79
Availability Factor	85	95	15



Gambar 1. Perbandingan Sistem Kinerja Energi

Berdasarkan data perbandingan antara sistem genset diesel konvensional dan sistem *hybrid* PLTS–baterai–diesel, dapat dijelaskan bahwa penerapan sistem *hybrid* menunjukkan peningkatan kinerja yang signifikan dalam berbagai aspek efisiensi energi dan keandalan operasional.

Pertama, dari aspek konsumsi bahan bakar, sistem *hybrid* hanya memerlukan sekitar 70 liter per hari, jauh lebih rendah dibandingkan dengan genset diesel murni yang mengonsumsi 200 liter per hari. Penurunan konsumsi sebesar 80% ini menunjukkan efektivitas sistem PLTS dalam menggantikan sebagian besar beban energi yang sebelumnya sepenuhnya bergantung pada bahan bakar fosil. Efisiensi ini berdampak langsung terhadap penghematan biaya logistik dan operasional, terutama untuk pos-pos militer di daerah terpencil yang menghadapi kendala suplai BBM.

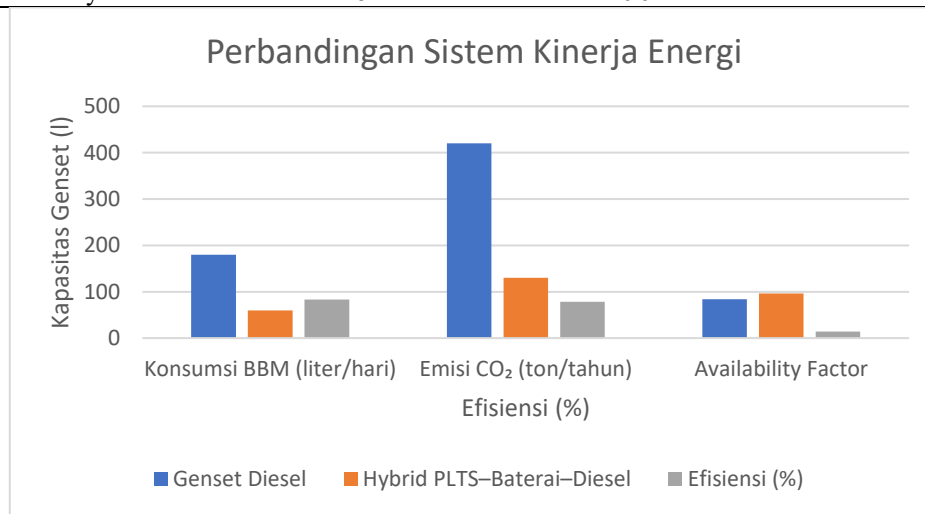
Kedua, dari sisi emisi karbon (CO_2), sistem *hybrid* menghasilkan sekitar 150 ton per tahun, jauh lebih rendah dibandingkan 480 ton per tahun pada sistem diesel konvensional. Dengan demikian, sistem *hybrid* mampu menurunkan emisi karbon hingga 79%, sejalan dengan upaya dekarbonisasi sektor pertahanan dan komitmen terhadap target transisi energi nasional menuju *net zero emissions*.

Ketiga, dari aspek keandalan sistem (*availability factor*), sistem *hybrid* menunjukkan peningkatan dari 85% menjadi 95%, atau meningkat sekitar 15% dibandingkan genset konvensional. Artinya, ketersediaan energi listrik di pos dengan sistem *hybrid* lebih stabil dan berkelanjutan, terutama saat terjadi gangguan pasokan bahan bakar atau kondisi cuaca ekstrem.

Implikasi Strategis terhadap Ketahanan Nasional

Tabel 6. Perbandingan Sistem Kinerja Energi Wilayah Perbatasan Kalimantan (Radiasi $5,2 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$) [14]

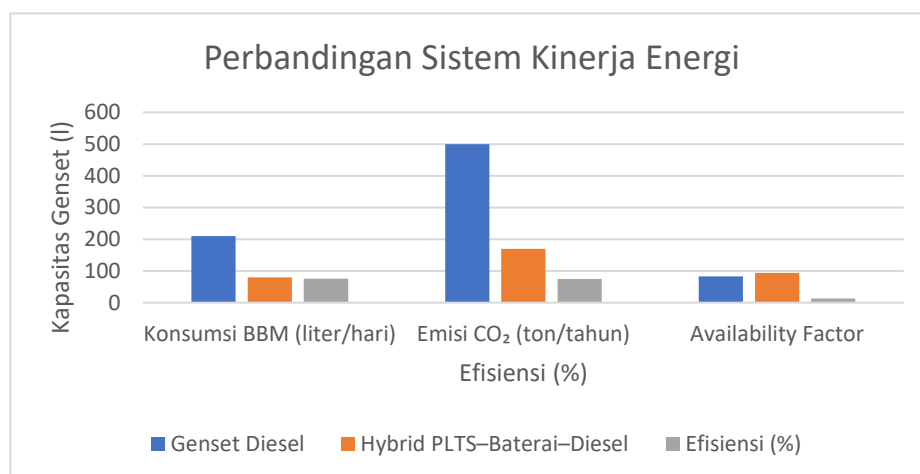
Parameter	Genset Diesel	Hybrid PLTS–Baterai–Diesel	Efisiensi (%)
Konsumsi BBM (liter/hari)	180	60	83
Emisi CO_2 (ton/tahun)	420	130	78
Availability Factor	84	96	14



Gambar 2. Perbandingan Sistem Kinerja Energi

Tabel 7. Perbandingan Sistem Kinerja Energi Wilayah Kepulauan Maluku (Radiasi $4,8 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$) [15]

Parameter	Genset Diesel	Hybrid PLTS–Baterai–Diesel	Efisiensi (%)
Konsumsi BBM (liter/hari)	210	80	76
Emisi CO_2 (ton/tahun)	500	170	75
Availability Factor	83	94	13



Gambar 3. Perbandingan Sistem Kinerja Energi

Berdasarkan dua set data yang berasal dari wilayah dengan karakteristik geografis dan potensi energi surya berbeda, yaitu Perbatasan Kalimantan dan Kepulauan Maluku, dapat disimpulkan bahwa penerapan sistem *hybrid* PLTS–baterai–diesel secara konsisten memberikan peningkatan efisiensi energi dan keandalan pasokan listrik dibandingkan penggunaan genset diesel konvensional.

Pada Data 1 (Perbatasan Kalimantan), dengan intensitas radiasi matahari rata-rata 5,2 kWh/m²/hari, konsumsi bahan bakar pada sistem *hybrid* hanya 60 liter per hari, menurun drastis dari 180 liter per hari pada sistem diesel murni. Pengurangan ini mencerminkan efisiensi bahan bakar sebesar 83%, menunjukkan bahwa sistem *hybrid* sangat efektif di wilayah dengan paparan surya tinggi. Emisi karbon juga turun signifikan dari 420 ton menjadi 130 ton per tahun, atau efisiensi emisi sekitar 78%. Selain itu, *availability factor* meningkat dari 84% menjadi 96%, menandakan keandalan sistem yang lebih baik dengan gangguan pasokan listrik yang lebih sedikit.

Sementara itu, pada Data 2 (Kepulauan Maluku) dengan intensitas radiasi sedikit lebih rendah, yaitu 4,8 kWh/m²/hari, efisiensi sistem masih menunjukkan hasil yang positif meskipun sedikit menurun dibandingkan wilayah Kalimantan. Konsumsi bahan bakar berkurang dari 210 liter menjadi 80 liter per hari, atau efisiensi sebesar 76%. Emisi karbon berkurang dari 500 ton menjadi 170 ton per tahun (efisiensi 75%), dan *availability factor* meningkat dari 83% menjadi 94%, menunjukkan sistem yang lebih stabil dan andal dibandingkan genset konvensional.

Perbedaan tingkat efisiensi antara kedua wilayah tersebut disebabkan oleh variasi intensitas radiasi surya, kondisi geografis, serta kapasitas penyimpanan baterai yang digunakan. Namun, hasil di kedua lokasi sama-sama menegaskan bahwa sistem *hybrid* PLTS–baterai–diesel mampu memberikan penghematan bahan bakar di atas 70%, mengurangi emisi karbon hingga 75–78%, dan meningkatkan keandalan pasokan energi sebesar 13–15%.

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa penerapan sistem *hybrid* energi terbarukan pada pos militer memberikan sejumlah implikasi strategis bagi TNI Angkatan Darat. Pertama, dari aspek kemandirian energi pertahanan, integrasi sistem ini berperan penting dalam mengurangi ketergantungan terhadap pasokan bahan bakar minyak (BBM) yang kerap kali rentan terhadap gangguan logistik, terutama di wilayah terpencil atau rawan konflik. Kedua, dari sisi efisiensi anggaran, penggunaan energi terbarukan dapat menekan biaya operasional pos militer secara signifikan, sehingga alokasi anggaran dapat dialihkan untuk mendukung program prioritas lain seperti modernisasi alat utama sistem senjata (alutsista). Ketiga, penerapan sistem ini turut berkontribusi terhadap pencapaian target *Net Zero Emission* 2060, sejalan dengan komitmen nasional dalam transisi energi bersih. Hal ini juga memperkuat citra TNI sebagai institusi pertahanan yang adaptif terhadap perkembangan teknologi dan memiliki kepedulian terhadap lingkungan. Keempat, dari aspek resiliensi operasional, keberadaan sistem *microgrid hybrid* memastikan pos militer tetap dapat beroperasi secara mandiri dan berkelanjutan, bahkan ketika terjadi gangguan pasokan BBM atau bencana alam. Dengan demikian, integrasi sistem energi *hybrid* tidak hanya meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan, tetapi juga memperkuat daya tangguh operasional pertahanan negara.

KESIMPULAN

Hasil kajian literatur dan analisis sistematis menunjukkan bahwa penerapan sistem *hybrid* energi terbarukan pada pos militer TNI Angkatan Darat di daerah terpencil memiliki potensi strategis yang signifikan, baik dari aspek teknis, ekonomi, lingkungan maupun pertahanan. Dari aspek teknis, sistem *hybrid* PLTS–baterai–diesel terbukti memiliki keandalan yang lebih tinggi dibandingkan ketergantungan penuh pada genset diesel konvensional. Berbagai studi nasional dan internasional menunjukkan peningkatan *availability factor* mencapai 95–99%, dengan risiko gangguan suplai energi yang jauh lebih rendah.

Dari aspek ekonomi, penerapan energi terbarukan dalam sistem *hybrid* mampu menekan konsumsi BBM sebesar 65–80%, yang berdampak langsung pada penghematan biaya operasional tahunan pos militer hingga mencapai Rp 1,2–1,4 miliar per pos. Selain itu, investasi awal sistem ini dapat kembali dalam jangka waktu relatif singkat, yaitu sekitar 5–8 tahun, menjadikannya solusi yang efisien secara finansial.

Selanjutnya, dari aspek lingkungan, sistem *hybrid* memberikan kontribusi nyata terhadap pengurangan emisi karbon dioksida (CO₂) hingga 70–80% dibandingkan dengan penggunaan genset murni. Hal ini sejalan dengan komitmen Indonesia dalam mencapai target *Net Zero Emission* 2060, sekaligus mendukung peran TNI sebagai institusi yang berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim.

Sementara dari aspek pertahanan, sistem ini memperkuat ketahanan energi di pos militer, mengurangi ketergantungan terhadap logistik bahan bakar yang rawan gangguan, serta meningkatkan kemampuan operasi mandiri di daerah terpencil. Penerapan ini juga mencerminkan prinsip *sustainable defense*, yaitu pendekatan pertahanan berkelanjutan yang mulai diadopsi oleh militer di berbagai negara maju.

Berdasarkan temuan kajian, beberapa rekomendasi yang dapat diajukan adalah sebagai berikut: Hasil rekomendasi strategis dari kajian ini menekankan pentingnya langkah konkret dalam mempercepat penerapan sistem *hybrid* PLTS–baterai–diesel di lingkungan TNI Angkatan Darat melalui lima inisiatif utama yang bersifat terintegrasi dan berkelanjutan.

Pertama, diperlukan implementasi proyek percontohan (*pilot project*) di pos militer perbatasan yang representatif, seperti Natuna, Entikong atau Skouw Papua. Lokasi-lokasi tersebut mencerminkan kondisi geografis dan tantangan logistik yang kompleks di wilayah terpencil, sehingga dapat menjadi model nasional dalam penerapan sistem *hybrid* energi terbarukan. Uji coba ini akan menjadi dasar empiris untuk menilai efektivitas dan efisiensi sistem dalam mendukung kemandirian energi pertahanan.

Kedua, penerapan sistem ini menuntut adanya kerja sama lintas sektor antara Kementerian Pertahanan, TNI AD, Kementerian ESDM, BUMN energi seperti PLN dan Pertamina, serta lembaga riset dan universitas. Kolaborasi ini penting untuk memastikan kelancaran proses mulai dari pengadaan, instalasi, pemeliharaan, hingga keberlanjutan operasional sistem *hybrid* di berbagai pos militer.

Ketiga, perlu dikembangkan kebijakan energi pertahanan (*Defense Energy Security Policy*) yang secara eksplisit memasukkan energi terbarukan sebagai bagian integral dari strategi militer nasional. Kebijakan ini akan menjadi landasan hukum dan pedoman teknis bagi penerapan sistem energi berkelanjutan, dengan prioritas utama pada pos militer di daerah perbatasan dan wilayah terisolasi.

Keempat, riset dan inovasi teknologi harus terus dikembangkan melalui kerja sama antara universitas, lembaga penelitian dan sektor industri. Fokus riset diarahkan pada pengembangan model teknis dan ekonomis sistem *hybrid* yang adaptif terhadap kondisi lapangan militer, termasuk peningkatan teknologi penyimpanan energi yang tangguh terhadap iklim ekstrem. Selain itu, penelitian juga perlu mencakup analisis biaya dan efisiensi jangka panjang untuk memberikan dasar ilmiah dalam penyusunan kebijakan energi pertahanan.

Kelima, sistem energi terbarukan perlu diintegrasikan dengan konsep *Smart Military Base*, yaitu pangkalan militer cerdas yang menggabungkan teknologi digital seperti sistem C4ISR (*Command, Control, Communication, Computers, Intelligence, Surveillance and Reconnaissance*). Integrasi ini menjadikan energi tidak hanya sebagai sumber daya listrik, tetapi juga sebagai elemen strategis dalam mendukung efisiensi, keamanan dan keberlanjutan operasional pertahanan.

REFERENSI

- [1] Ali S, Jang CM. Optimum design of *hybrid* renewable energy system for sustainable energy supply to a remote Island. *Sustain*. 2020;12(3).
- [2] Emezirinwune MU, Adejumbi IA, Adebisi OI, Akinboro FG. Synergizing *hybrid* renewable energy systems and sustainable agriculture for rural development in Nigeria. *e-Prime - Adv Electr Eng Electron Energy*. 2024;7.
- [3] Xu X, Zhang Z, Yuan J, Shao J. Design and multi-objective comprehensive evaluation analysis of PV-WT-BG-Battery *hybrid* renewable energy systems in urban communities. *Energy Convers Manag* X. 2023;18.
- [4] Fahrudin, Arasy; Ichsani, Djatmiko; Taufany, Fadlilatul; Widodo, Budi U.K.; Widodo, Wawan A. . (2020). The effect of baffle shape on the performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell with a biometric flow field. *International Journal of Hydrogen Energy*, (), S0360319920330548-. doi:10.1016/j.ijhydene.2020.08.054
- [5] Saritha P, Devi V, Babu A, Praveen RP. Design and analysis of multiple input single output converter for *hybrid* renewable energy system with energy storage capability. *Ain Shams Eng J*. 2023;14(10).
- [6] Sohail M, Afrouzi HN, Mehranzamir K, Ahmed J, Mobin Siddique MB, Tabassum M. A comprehensive scientometric analysis on *hybrid* renewable energy systems in developing regions of the world. *Results Eng*. 2022;16.
- [7] Hassane AI, Didane DH, Tahir AM, Mouangue RM, Tamba JG, Hauglustaine JM. Comparative analysis of *hybrid* renewable energy systems for off-grid applications in chad. *Int J Renew Energy Dev*. 2022;11(1).
- [8] Rahman MM, Shakeri M, Tiong SK, Khatun F, Amin N, Pasupuleti J, et al. Prospective methodologies in *hybrid* renewable energy systems for energy prediction using artificial neural networks. Vol. 13, *Sustainability* (Switzerland). 2021.
- [9] Lassalle JM, Martínez DF, Fernández LV. Optimisation of *hybrid* renewable energy systems on islands: A review. *Isl Stud J*. 2022;17(1).
- [10] Gajewski P, Pieńkowski K. Control of the *hybrid* renewable energy system with wind turbine, photovoltaic panels and battery energy storage. *Energies*. 2021;14(6).
- [11] Raja Harahap, Sadrah Siahhaan. Studi Perencanaan Sistem Pembangkit Listrik *Hybrid* (Panel Surya Dan Diesel Generator) Pada Kapal Nelayan Di Pelabuhan Perikanan Samudera (Pps) Belawan. *Bul Utama Tek*. 2023;18(3).
- [12] Perbandingan Biaya Perancangan Plts On-Grid Dan Off-Grid Pada Laboratorium Listrik PPSDM Migas. *Pros Semin Nas NCIET*. 2020;1(1).
- [13] Abdullah AG, Hakim DL, Sugito NT, Zakaria D. Investigating Evolutionary Trends of *Hybrid* Renewable Energy Systems: A Bibliometric Analysis from 2004 to 2021. *Int J Renew Energy Res*. 2023;13(1).

- [14] Abdullah HM, Park S, Seong K, Lee S. *Hybrid Renewable Energy System Design: A Machine Learning Approach for Optimal Sizing with Net-Metering Costs*. Sustain. 2023;15(11).
- [15] Fikri E, Firmansyah YW. A Short Communication: Contamination and Toxicity Pigment Red 53, Rhodamine B, and Sudan III in Indonesian Cosmetics. J Serambi Eng. 2023;8(3).