Integrasi PLTB berbasis IoT untuk Mendukung SDG 7: Energi Bersih menuju Kota Cerdas Netral Karbon

Fika Asfia[1*], Vytha Aulia Dasuki[2], Vycka Aulia Dasuki[3], Nasywa[4]
[1]*Pendidikan Matematika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*
[2]*Pendidikan Agama Islam, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*
[3]*Pendidikan Biologi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*
[4]*Pendidikan Ekonomi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Negeri Jakarta, Indonesia*

ABSTRACT
Indonesia faces increasing electricity demand, unequal energy distribution, and dependence on fossil fuels that contribute to carbon emissions, creating challenges in achieving Sustainable Development Goal (SDG) 7. This paper proposes an Internet of Things (IoT)-based Wind Power Plant (PLTB) to support clean energy development and carbon-neutral smart cities. The system integrates real-time turbine monitoring, smart grid-based electricity distribution, and artificial intelligence-based predictive maintenance to improve energy efficiency and system reliability. The development uses the Four-D (4D) Research and Development model, consisting of Define, Design, Develop, and Disseminate. The process focuses on identifying energy needs, designing the system, developing the framework, and disseminating the proposed innovation. The proposed PLTB is expected to optimize wind energy utilization, expand access to clean electricity, reduce fossil fuel dependence, and improve energy management through continuous monitoring and data-driven decision-making. Overall, IoT-based PLTB offers a potential solution for supporting transition toward sustainable and carbon-neutral smart cities.

ABSTRAK
Indonesia menghadapi peningkatan permintaan listrik, distribusi energi yang belum merata, dan ketergantungan pada bahan bakar fosil yang menghasilkan emisi karbon sehingga menjadi tantangan dalam mencapai *Sustainable Development Goal* (SDG) 7. Makalah ini mengusulkan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk mendukung pengembangan energi bersih dan kota cerdas netral karbon. Sistem mengintegrasikan pemantauan turbin secara *real-time*, distribusi listrik berbasis *smart grid*, dan pemeliharaan prediktif berbasis kecerdasan buatan untuk meningkatkan efisiensi energi dan keandalan sistem. Pengembangan menggunakan model *Research and Development* (R&D) *Four-D* (4D) yang terdiri atas *Define*, *Design*, *Develop*, dan *Disseminate*. Proses berfokus pada identifikasi kebutuhan energi, perancangan sistem, pengembangan kerangka, dan diseminasi inovasi. PLTB yang diusulkan diharapkan dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi angin, memperluas akses listrik bersih, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta meningkatkan pengelolaan energi melalui pemantauan dan pengambilan keputusan berbasis data. Secara keseluruhan, PLTB berbasis IoT berpotensi mendukung transisi menuju kota cerdas yang berkelanjutan dan netral karbon.

CONTACT
fikaasfia@gmail.com

KEYWORDS
Internet of Things, Pembangkit Listrik Tenaga Bayu, Smart Grid

E-ISSN: 2964-318X

PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan paling esensial dalam kehidupan modern karena hampir seluruh aktivitas manusia, mulai dari sektor rumah tangga, industri, pendidikan, hingga kesehatan, sangat bergantung pada ketersediaannya (Prawiroredjo *et al.,* 2024). Di Indonesia, konsumsi listrik masyarakat terus mengalami peningkatan sejalan dengan pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan perkembangan aktivitas ekonomi yang menuntut pasokan energi yang andal dan berkelanjutan (Alnavis *et al.*, 2024). Namun demikian, sebagian besar pasokan energi nasional masih bertumpu pada bahan bakar fosil dengan pembangkit berbasis batu bara memasok lebih dari 60% kebutuhan listrik nasional (Pahlevi *et al.,* 2024). Akibatnya, pada skenario *business as usua*l, emisi karbon dari sektor kelistrikan diproyeksikan tetap berada pada tren tinggi seiring bertambahnya kapasitas pembangkit berbasis batu bara dan gas (Anindhita *et al.*, 2025).

Kondisi ini menjadi tantangan besar bagi Indonesia dalam mewujudkan *Sustainable Development Goal* (SDG) ke-7, yaitu penyediaan energi bersih dan terjangkau bagi seluruh masyarakat (Nurfauziah & Sebayang, 2024). Pemerintah Indonesia telah menetapkan sejumlah target ambisius, seperti bauran energi baru terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 dan pencapaian *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060 (Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia, 2023). Sayangnya, realisasi di lapangan masih jauh dari target tersebut. Hingga pertengahan tahun 2025, bauran EBT nasional baru berkisar 14-16%, bahkan pada sistem kelistrikan *on-grid* sempat mengalami penurunan dari 13% pada 2020 menjadi 11,5% pada 2024 (Institute for Essential Services Reform, 2024). Kesenjangan antara target kebijakan dan capaian riil ini menunjukkan bahwa strategi percepatan transisi energi yang telah berjalan belum cukup efektif sehingga diperlukan terobosan konsep yang lebih inovatif dan aplikatif (Fauzi, 2023).

Salah satu sumber energi terbarukan yang berpotensi besar tetapi masih minim dimanfaatkan adalah energi angin. Berdasarkan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), potensi energi angin daratan (*Onshore*) Indonesia mencapai sekitar 60.647 megawatt (MW) pada kecepatan angin di atas 4 m/s (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2023; Alnavis *et al.*, 2024). Kajian teknis terbaru dari Institute for Essential Services Reform bahkan mengidentifikasi 341 lokasi potensial pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB) *onshore* dengan total potensi teknis mencapai 246,2 gigawatt (GW), tersebar dari pesisir selatan Jawa, Sulawesi Selatan, Maluku, hingga Nusa Tenggara Timur (Electric and Power Indonesia, 2026; Indonesia.go.id, 2024). Dua PLTB berskala komersial yang berlokasi di Sulawesi Selatan telah beroperasi di Indonesia, yaitu PLTB Sidrap berkapasitas 75 MW dan PLTB Jeneponto berkapasitas 72 MW (Al Muhajir & Sinaga, 2021). Namun demikian, pemanfaatan energi angin nasional masih sangat kecil dibandingkan potensinya, yaitu kurang dari 1% dari total potensi teknis yang tersedia.

Rendahnya pemanfaatan ini tidak lepas dari sejumlah tantangan struktural, seperti keterbatasan lahan, tingginya biaya investasi awal, infrastruktur distribusi yang belum merata, serta sistem pemeliharaan turbin yang masih bersifat konvensional dan reaktif. Sistem pemeliharaan konvensional cenderung baru merespons kerusakan setelah terjadi sehingga menimbulkan *downtime* yang panjang dan biaya operasional yang tinggi. Padahal, kemajuan teknologi *Internet of Things* (IoT) dan *Artificial Intelligence* (AI) telah terbukti mampu mengubah paradigma pemeliharaan pembangkit energi terbarukan dari yang semula reaktif menjadi prediktif (*Predictive maintenance*) sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi lebih dini sebelum menyebabkan kegagalan sistem (Dhake *et al.,* 2026; Yeh *et al.,* 2019). Selain itu, integrasi IoT pada sistem *smart grid* juga memungkinkan pengelolaan distribusi listrik yang lebih efisien, transparan, dan adaptif terhadap fluktuasi pasokan energi terbarukan (Salam, 2024).

Berdasarkan uraian tersebut, artikel ini mengusulkan sebuah gagasan konseptual mengenai integrasi PLTB berbasis IoT sebagai solusi inovatif untuk mendukung pencapaian SDG 7 sekaligus mempercepat transformasi menuju kota cerdas netral karbon (*carbon-neutral smart city*) di Indonesia. Gagasan ini mengintegrasikan tiga komponen utama, yaitu (1) pemantauan kinerja turbin secara real-time melalui sensor IoT, (2) pengelolaan distribusi energi melalui sistem *smart grid*, dan (3) pemeliharaan prediktif berbasis kecerdasan buatan. Pengembangan gagasan ini disusun secara sistematis menggunakan model penelitian dan pengembangan (R&D) *Four-D* (4D) yang dikembangkan oleh Thiagarajan, Semmel, dan Semmel (1974) yang terdiri atas empat tahap, yaitu *Define, Design, Develop, dan Disseminate*. Adapun tujuan penulisan artikel ini adalah untuk: (1) menganalisis kebutuhan dan tantangan energi nasional yang melatarbelakangi urgensi gagasan; (2) merumuskan rancangan konseptual arsitektur sistem IoT-PLTB yang terintegrasi dengan *smart grid* dan AI *predictive maintenance*; (3) mengelaborasi kelayakan gagasan melalui analisis kinerja komparatif dan SWOT; serta (4) merumuskan strategi diseminasi gagasan kepada para pemangku kepentingan terkait. Melalui pendekatan ini, diharapkan gagasan yang diusulkan dapat memberikan kontribusi konseptual yang aplikatif bagi upaya percepatan transisi energi bersih dan pembangunan kota cerdas netral karbon di Indonesia.

METODE

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Artikel ini merupakan artikel gagasan konseptual (*conceptual paper*) yang disusun melalui pendekatan penelitian dan pengembangan (*Research and Development*/R&D) dengan model 4D yang meliputi tahap *Define, Design, Develop,* dan *Disseminate* (Thiagarajan *et al.,* 1974). Berbeda dengan penelitian R&D pada umumnya yang menghasilkan produk fisik yang diuji secara empiris di lapangan, penerapan model 4D dalam artikel gagasan ini diadaptasi untuk menghasilkan sebuah rancangan konseptual (*Conceptual framework*) mengenai integrasi PLTB berbasis IoT sehingga tahap uji coba lapangan (*Field testing*) tidak dilakukan secara langsung, melainkan digantikan dengan telaah literatur mendalam (*Desk validation*) dan analisis kelayakan berbasis data sekunder.

Data yang digunakan dalam penyusunan gagasan ini bersumber dari studi kepustakaan (*Library research*) terhadap dokumen kebijakan energi nasional seperti RUEN, data statistik resmi Kementerian ESDM, publikasi lembaga riset seperti Institute for Essential Services Reform (IESR), serta artikel ilmiah nasional dan internasional terkait IoT, *smart grid*, dan *predictive maintenance* pada sistem energi terbarukan.

Prosedur Tahapan 4D

Tahap *Define* dilakukan melalui identifikasi kebutuhan energi nasional, khususnya di wilayah dengan akses listrik terbatas dengan menganalisis data konsumsi energi, proyeksi pertumbuhan ekonomi dan penduduk, serta tingkat emisi karbon dari sektor kelistrikan (Herindrasti *et al,* 2024). Analisis pada tahap ini juga mencakup pemetaan potensi energi angin di berbagai wilayah Indonesia berdasarkan data kecepatan angin dan kapasitas teknis yang tersedia.

Tahap *Design* difokuskan pada perumusan kerangka konseptual sistem PLTB berbasis IoT yang mencakup rancangan arsitektur sistem sensor, mekanisme komunikasi data, integrasi dengan *smart grid*, serta desain dashboard pemantauan digital. Pada tahap ini, disusun kriteria kelayakan teknis dan strategis yang menjadi acuan pengembangan konsep lebih lanjut.

Tahap *Develop* merupakan tahap elaborasi mendalam terhadap komponen-komponen teknis gagasan, meliputi jenis sensor yang digunakan (sensor getaran, suhu, arus listrik, dan kecepatan angin), protokol komunikasi data, algoritme kecerdasan buatan untuk pemeliharaan prediktif, serta mekanisme kerja *smart grid* dalam menyelaraskan pasokan dan permintaan energi. Validasi terhadap kelayakan gagasan pada tahap ini dilakukan melalui analisis kinerja komparatif dan analisis SWOT *(Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)* yang disusun berdasarkan kajian literatur dan data sekunder yang relevan.

Tahap *Disseminate* merupakan tahap akhir yang berisi strategi penyebarluasan gagasan kepada pemangku kepentingan terkait, seperti PT PLN (Persero), Kementerian ESDM, pemerintah daerah, investor energi terbarukan, dan kalangan akademisi, melalui forum ilmiah, publikasi jurnal, konferensi internasional, serta *policy brief*. Penyusunan dan publikasi artikel ilmiah ini sendiri merupakan salah satu bentuk konkret dari pelaksanaan tahap diseminasi tersebut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Define: Analisis Kebutuhan Energi Nasional

Tahap Define dalam pengembangan gagasan ini diawali dengan analisis kebutuhan energi nasional Indonesia. Data menunjukkan bahwa konsumsi listrik masyarakat Indonesia terus meningkat seiring pertumbuhan penduduk dan aktivitas ekonomi (Alnavis *et al.*, 2024), sementara proyeksi emisi karbon dari sektor kelistrikan pada skenario *business as usual* tetap berada pada tren tinggi akibat dominasi pembangkit berbasis fosil (Anindhita *et al.*, 2025). Di sisi lain, capaian bauran energi baru terbarukan nasional masih jauh dari target kebijakan energi nasional. Hingga pertengahan 2025, bauran EBT baru berkisar 14–16% dan pada sistem *on-grid* bahkan menurun dari 13% pada 2020 menjadi 11,5% pada 2024, padahal target awal menetapkan 23% pada 2025 (Institute for Essential Services Reform, 2024).

Ketimpangan antara target dan capaian riil ini semakin krusial jika dikaitkan dengan potensi energi angin yang sangat besar namun minim dimanfaatkan. Wilayah pesisir selatan Jawa, Sulawesi Selatan, Maluku, dan Nusa Tenggara Timur memiliki kecepatan angin rata-rata 6-8 m/s yang ideal untuk pembangkitan listrik tenaga angin skala besar (Indonesia.go.id, 2024; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2023). Total potensi teknis energi angin daratan Indonesia diperkirakan mencapai 60.647 MW berdasarkan RUEN, bahkan hingga 246,2 GW berdasarkan kajian teknis termutakhir (Electric and Power Indonesia, 2026; Alnavis *et*

al., 2024). Namun demikian, kapasitas terpasang PLTB yang beroperasi saat ini hanya sekitar 147 MW yang tersebar di Sidrap dan Jeneponto, kurang dari 1% dari potensi teknis yang tersedia.

Selain keterbatasan pemanfaatan, sistem pengelolaan PLTB yang ada saat ini juga masih menghadapi tantangan operasional, terutama terkait pemeliharaan turbin yang bersifat reaktif dan cenderung menimbulkan biaya pemeliharaan yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan prediktif, yang terbukti mampu menekan biaya pemeliharaan hingga 20–25% (Pandit *et al.*, 2023). Kondisi inilah yang menjadi dasar kebutuhan bagi pengembangan sistem PLTB yang lebih cerdas, efisien, dan mampu memberikan data pemantauan secara real-time guna mendukung pengambilan keputusan operasional yang lebih tepat.

Design: Rancangan Konseptual Sistem Integrasi IoT-PLTB

Berdasarkan hasil analisis kebutuhan pada tahap *Define*, tahap *Design* merumuskan kerangka konseptual sistem integrasi PLTB berbasis IoT yang terdiri atas tiga lapisan (*layer*) utama, yaitu lapisan penginderaan (*sensing layer*), lapisan komunikasi (*communication layer*), dan lapisan aplikasi (*application layer*). Ketiga lapisan tersebut bekerja secara berkesinambungan untuk menghasilkan data kecepatan angin yang akurat, tersalurkan secara aman, dan dapat dianalisis secara *real-time*, sebagaimana arsitektur akuisisi data berbasis IoT yang telah diterapkan pada pengukuran potensi angin di Indonesia (Rohendi *et al.*, 2021). Rincian komponen tiap lapisan disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rincian Komponen

Lapisan	Komponen Utama	Fungsi
Sensing	Anemometer, sensor getaran, sensor suhu, sensor arus dan tegangan	Mengukur parameter operasional turbin (kecepatan angin, getaran, suhu, arus listrik) secara *real-time*
Communication	Gateway IoT, protokol komunikasi nirkabel (jaringan seluler/LPWAN)	Mengirimkan data sensor dari turbin menuju basis data cloud/pusat kendali
Application	Dashboard digital, basis data cloud, mesin AI predictive maintenance, kontroler smart grid	Memvisualisasikan data, mendeteksi anomali/potensi kerusakan, serta mengatur distribusi listrik

Dashboard pemantauan digital dirancang agar *operator* dapat melihat kondisi kinerja turbin secara *real-time,* termasuk kecepatan angin, kecepatan putaran, dan estimasi daya yang dihasilkan, sejalan dengan sistem monitoring berbasis *Human Machine Interface* yang telah diterapkan pada PLTB di Indonesia (Fajri & Yuhendri, 2023). Selain fungsi pemantauan, sistem ini juga dilengkapi dengan kontroler *smart grid* yang bertugas menyelaraskan pasokan listrik dari PLTB dengan permintaan aktual, sekaligus mengoordinasikan integrasi dengan sumber energi terbarukan lain seperti pembangkit listrik tenaga surya dan tenaga air. Dengan demikian, fluktuasi pasokan yang menjadi karakteristik alami energi angin dapat dikelola secara lebih adaptif tanpa mengorbankan keandalan sistem kelistrikan secara keseluruhan (Salam, 2024).

Develop: Pengembangan Sistem Pemantauan dan Pemeliharaan Prediktif Berbasis AI

Tahap *Develop* mengelaborasi lebih lanjut komponen teknis gagasan, terutama pada aspek pemeliharaan prediktif berbasis kecerdasan buatan. Sensor IoT dipasang pada bagian-bagian kritis turbin, seperti *gearbox*, generator, dan bilah *(blade)* untuk memantau getaran, suhu, arus listrik, dan kecepatan angin secara kontinu. Pendekatan berbasis data sensor berskala besar semacam ini telah terbukti efektif dalam mendeteksi anomali pada turbin angin, sebagaimana ditunjukkan pada penerapan *statistical process control* dan *machine learning* terhadap 31 unit turbin (Hsu *et al.*, 2020). Data yang terkumpul kemudian dikirim ke pusat kendali dan diolah menggunakan algoritma kecerdasan buatan guna mendeteksi pola anomali yang mengindikasikan potensi kerusakan sejak dini.

Sebagai rujukan teknis, penelitian Yeh *et al.,* (2019) menunjukkan bahwa kombinasi *Convolutional Neural Network* (CNN) dan *Support Vector Machine* (SVM) mampu memprediksi siklus pemeliharaan jangka panjang turbin angin dengan akurasi tinggi berdasarkan data operasional 31 unit turbin. Sementara itu, Dhake *et al.,* (2026) mengembangkan kerangka kerja berbasis *Random Forest* dan *Long Short-Term Memory* (LSTM) untuk turbin angin skala kecil, dengan hasil evaluasi menunjukkan akurasi deteksi kerusakan sebesar 92%, penurunan *downtime* tidak terjadwal sebesar 35–40%, dan peningkatan produksi energi tahunan sebesar 15–20%. Kedua studi ini mengindikasikan bahwa pendekatan serupa berpotensi diterapkan pada PLTB di Indonesia untuk menekan biaya pemeliharaan darurat yang selama ini menjadi beban operasional signifikan, mengingat biaya operasi dan

pemeliharaan *(operation and maintenance/O&M)* tahunan pembangkit listrik tenaga angin dapat mencapai sekitar 40.800–51.500 dolar AS per MW per tahun (International Renewable Energy Agency, 2017).

Selain aspek deteksi kerusakan, sistem yang diusulkan juga dirancang untuk memberikan rekomendasi jadwal perawatan secara otomatis melalui *dashboard digital*. Kemampuan serupa telah ditunjukkan pada sistem kontrol turbin angin berbasis *machine learning* yang dirancang untuk mengoptimalkan performa operasional secara berkelanjutan (Prabhavathi *et al.*, 2023) sehingga tim teknis dapat melakukan tindakan preventif sebelum kerusakan besar terjadi. Dengan pendekatan ini, potensi *downtime* dapat ditekan, biaya pemeliharaan darurat dapat dikurangi, dan usia pakai komponen turbin dapat diperpanjang, yang pada akhirnya meningkatkan keandalan dan efisiensi operasional PLTB secara keseluruhan.

Disseminate: Strategi Penyebarluasan Gagasan

Tahap *Disseminate* dirancang untuk memastikan gagasan integrasi PLTB berbasis IoT ini dapat diterima dan dipertimbangkan oleh para pemangku kepentingan yang relevan. Strategi diseminasi dilakukan melalui beberapa jalur, yaitu: (1) forum akademik dan seminar ilmiah untuk memperoleh masukan dari kalangan peneliti dan akademisi; (2) publikasi artikel ilmiah pada jurnal nasional dan internasional serta presentasi pada konferensi terkait energi terbarukan; (3) penyusunan *policy brief* yang ditujukan kepada Kementerian ESDM, PT PLN (Persero), dan Dewan Energi Nasional terkait rekomendasi kebijakan transisi energi, insentif investasi, dan standar teknis *smart grid*; serta (4) forum diskusi bersama pemerintah daerah dan masyarakat di wilayah berpotensi angin tinggi guna membangun penerimaan sosial (*Social acceptance*) terhadap pembangunan PLTB berbasis IoT.

Penyusunan dan publikasi artikel gagasan ini merupakan salah satu bentuk konkret pelaksanaan tahap diseminasi, sekaligus menjadi langkah awal untuk membuka ruang diskusi lebih lanjut mengenai kelayakan teknis dan implementasi gagasan pada tahap penelitian selanjutnya, termasuk kemungkinan pengembangan purwarupa (*prototype*) dan uji coba lapangan skala terbatas.

Target SMART Menuju Pencapaian SDG 7

Untuk memastikan gagasan ini terarah dan dapat diukur pencapaiannya, disusun target pengembangan menggunakan kerangka SMART *(Specific, Measurable, Acceptable/Achievable, Realistic, Time-bound)* yang diselaraskan dengan indikator SDG 7. Rincian target SMART disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Rincian Target SMART

Kriteria	Uraian Target
Specific	Potensi angin tinggi (6–8 m/s) di pesisir selatan Jawa, Sulawesi Selatan, Maluku, dan Nusa Tenggara Timur diprioritaskan untuk pembangunan PLTB berbasis IoT guna memperluas akses energi bersih, mendukung SDG 7.1 tentang akses energi modern universal.
Measurable	Target kapasitas terpasang PLTB sebesar 3 GW pada tahun 2030, berkontribusi minimal 5% terhadap kebutuhan listrik nasional, selaras dengan SDG 7.2 tentang pangsa energi terbarukan.
Acceptable	Didukung oleh tren penurunan biaya teknologi turbin angin global, dukungan kebijakan pemerintah, serta peluang investasi hijau, sejalan dengan SDG 7 tentang energi bersih yang terjangkau.
Realistic	Selaras dengan RUEN dan agenda transisi energi nasional, layak dilaksanakan mengingat ketersediaan infrastruktur dan potensi angin yang ada, mendukung SDG 7.2 dan SDG 7.3 tentang efisiensi energi.
Time-bound	Direncanakan dalam tahapan jangka menengah hingga panjang melalui pemetaan wilayah, pengembangan, uji coba, dan operasional penuh, dengan target tahun 2030 untuk mewujudkan energi bersih dan berkelanjutan sesuai SDG 7.

Target-target tersebut disusun secara realistis dengan mempertimbangkan kapasitas terpasang PLTB yang telah ada saat ini (147 MW) serta potensi teknis yang jauh lebih besar (60.647 MW *onshore* menurut RUEN, hingga 246,2 GW menurut kajian teknis termutakhir). Dengan demikian, target 3 GW pada tahun 2030 merupakan langkah moderat namun signifikan dalam mempercepat pemanfaatan energi angin nasional (Electric and Power Indonesia, 2026; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2023).

Analisis Kinerja Komparatif

Untuk menilai keunggulan gagasan yang diusulkan, dilakukan analisis kinerja komparatif antara PLTB konvensional, PLTB berbasis IoT-AI (gagasan yang diusulkan), serta sumber energi terbarukan lain seperti pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Aspek yang dianalisis meliputi efisiensi konversi energi, keandalan sistem, biaya operasional, usia pakai komponen, dan dampak lingkungan, sebagaimana disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis Kinerja Komparatif

Aspek	PLTB Konvensional	PLTB Berbasis IoT-AI	PLTS/PLTA
Efisiensi konversi energi	Bergantung pada pemeliharaan manual dan kalibrasi berkala	Lebih optimal karena kalibrasi dan deteksi anomali dilakukan secara *real-time*	Tinggi, namun bergantung pada intensitas cahaya atau debit air
Keandalan sistem	Rentan gangguan tak terdeteksi hingga terjadi kegagalan	Meningkat signifikan; deteksi dini menekan risiko kegagalan mendadak	Relatif stabil, tetapi PLTS dipengaruhi cuaca dan PLTA oleh musim
Biaya operasional	Tinggi akibat pemeliharaan reaktif dan downtime tak terjadwal	Berpotensi turun karena downtime tidak terjadwal berkurang 35–40% (Dhake *et al.*, 2026)	Bervariasi; PLTA memerlukan biaya konstruksi bendungan besar
Usia pakai komponen	Sedang, dipercepat oleh keausan yang tidak terdeteksi dini	Lebih panjang karena perawatan preventif berbasis data	Panjang untuk PLTA; sedang untuk panel PLTS
Dampak lingkungan	Rendah emisi, namun risiko kegagalan menambah limbah komponen	Rendah emisi dan lebih efisien sumber daya karena minim kegagalan mendadak	Rendah emisi; PLTA berpotensi berdampak pada ekosistem sungai

Hasil analisis komparatif ini menunjukkan bahwa integrasi IoT dan AI pada PLTB memberikan nilai tambah utama pada aspek keandalan sistem dan efisiensi biaya operasional dibandingkan PLTB konvensional, sekaligus tetap kompetitif dibandingkan sumber energi terbarukan lain seperti PLTS dan PLTA. Hasil ini menjadi dasar pertimbangan investasi dan strategi pengembangan lebih lanjut bagi para pemangku kepentingan energi di Indonesia.

Analisis Kelayakan melalui SWOT

Kajian kelayakan gagasan turut dilakukan melalui analisis SWOT *(Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats)* sebagaimana disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Analisis SWOT

Komponen	Uraian
Strengths (Kekuatan)	Menyediakan energi bersih rendah emisi; memungkinkan pemantauan kinerja turbin secara *real-time*; mendukung pemeliharaan prediktif yang menekan risiko kegagalan mendadak.
Weaknesses (Kelemahan)	Membutuhkan investasi awal yang tinggi untuk sensor dan infrastruktur IoT; memerlukan sumber daya manusia terampil di bidang IoT dan *data science*; keterbatasan infrastruktur komunikasi di beberapa wilayah terpencil.
Opportunities (Peluang)	Dukungan kebijakan transisi energi dan insentif investasi hijau dari pemerintah; potensi pasar yang besar di wilayah terpencil berpotensi angin tinggi; perkembangan teknologi IoT dan AI yang semakin terjangkau secara global.
Threats (Ancaman)	Ketidakpastian regulasi terkait harga jual listrik energi terbarukan; risiko teknis pada infrastruktur digital seperti keamanan siber; persaingan dengan sumber energi terbarukan lain yang biayanya lebih rendah.

Hasil analisis SWOT menunjukkan bahwa meskipun gagasan ini menghadapi tantangan pada aspek investasi awal dan kesiapan sumber daya manusia, peluang yang tersedia, terutama dukungan kebijakan nasional dan tren penurunan biaya teknologi IoT, memberikan ruang yang cukup besar bagi implementasi gagasan ini secara bertahap, dimulai dari wilayah-wilayah dengan potensi angin tertinggi seperti Sulawesi Selatan dan Nusa Tenggara Timur.

Implikasi terhadap Pencapaian SDG 7 dan Visi *Smart City* Netral Karbon

Secara keseluruhan, gagasan integrasi PLTB berbasis IoT ini memiliki implikasi strategis pada beberapa aspek. Pertama, dari sisi pencapaian SDG 7, gagasan ini berkontribusi langsung pada perluasan akses energi bersih dan terjangkau, khususnya bagi masyarakat di wilayah pesisir dan dataran tinggi yang selama ini memiliki akses listrik terbatas. Kedua, dari sisi lingkungan, pemanfaatan energi angin yang lebih optimal berkontribusi pada penurunan emisi karbon dari sektor kelistrikan, sejalan dengan komitmen Indonesia mencapai *net zero emission* pada 2060 (Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia, 2023).

Ketiga, dari sisi teknologi dan tata kelola perkotaan, integrasi IoT, *smart grid*, dan AI predictive maintenance pada PLTB merupakan salah satu komponen penting dalam ekosistem kota cerdas netral karbon, karena mendukung pengelolaan energi yang lebih presisi, transparan, dan berbasis data. Pendekatan simulasi berbasis IoT dan *edge computing* untuk mencapai kawasan *net-zero energy* di iklim tropis, sebagaimana konteks geografis Indonesia, juga telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam penelitian terkini (Munadi *et al.*, 2025). Keempat, dari sisi ekonomi dan sosial, pengembangan PLTB berbasis IoT berpotensi membuka lapangan kerja baru di bidang teknologi energi, meningkatkan ketahanan energi nasional, serta memperkuat kemandirian energi daerah-daerah yang selama ini bergantung pada pasokan listrik dari wilayah lain. Dengan demikian, gagasan ini tidak hanya relevan sebagai solusi teknis, tetapi juga sebagai bagian dari strategi pembangunan berkelanjutan yang lebih luas bagi Indonesia.

KESIMPULAN

Pengembangan gagasan integrasi PLTB berbasis IoT melalui model 4D *(Define, Design, Develop, Disseminate)* menunjukkan bahwa integrasi sensor IoT, *smart grid,* dan kecerdasan buatan untuk pemeliharaan prediktif merupakan solusi strategis dalam mendukung transisi energi bersih di Indonesia. Tahap *Define* mengidentifikasi kesenjangan antara potensi energi angin hingga 246,2 GW dan pemanfaatannya yang masih sekitar 147 MW, serta tantangan pemeliharaan turbin yang masih reaktif. Tahap *Design* dan *Develop* menghasilkan rancangan konseptual arsitektur tiga lapisan *(sensing, communication, application)* yang terintegrasi dengan kecerdasan buatan untuk pemeliharaan prediktif, yang berdasarkan kajian literatur berpotensi meningkatkan akurasi deteksi kerusakan hingga lebih dari 90% dan mengurangi *downtime* tidak terjadwal. Tahap *Disseminate* merumuskan strategi penyebarluasan melalui forum ilmiah, publikasi, dan *policy brief* kepada pemangku kepentingan.

Analisis komparatif dan SWOT menunjukkan keunggulan gagasan pada aspek keandalan sistem dan efisiensi biaya operasional jangka panjang, meskipun masih menghadapi tantangan investasi awal dan kesiapan sumber daya manusia. Target SMART yang diselaraskan dengan indikator SDG 7.1, 7.2, dan 7.3 hingga 2030 memberikan arah implementasi yang terukur. Sebagai artikel gagasan konseptual, kajian ini belum melalui *field testing* maupun pengembangan purwarupa fisik sehingga kinerja yang disajikan masih berupa proyeksi berdasarkan kajian literatur. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan purwarupa IoT-PLTB skala terbatas untuk menguji validitas teknis secara empiris, dengan dukungan kebijakan pemerintah, kolaborasi PT PLN (Persero), dan keterlibatan investor energi terbarukan untuk mendorong implementasi nyata dalam mendukung SDG 7 dan pembangunan kota cerdas netral karbon di Indonesia.

REFERENSI

Alnavis, N. B., Wirawan, R. R., Solihah, K. I., & Nugroho, V. H. (2024). Energi Listrik Berkelanjutan: Potensi dan Tantangan Penyediaan Energi Listrik di Indonesia. *Journal of Innovation Materials, Energy, and Sustainable Engineering, 1*(2), 119–139. https://doi.org/10.61511/jimese.v1i2.2024.544

Al Muhajir, F., & Sinaga, N. (2021). Tinjauan Pemanfaatan Energi Bayu sebagai Pembangkit Listrik di Provinsi Sulawesi Selatan. *Teknika, 15*(1), 55–61. https://doi.org/10.5281/zenodo.7326888

Anindhita, Santosa, J., & Tokimatsu, K. (2025). Carbon Capture in Indonesia's Energy Sector: A Least-cost Optimization Approach. *Sustainability, 17*, 7916. https://doi.org/10.3390/su17177916

Dhake, R., Warade, S., Zanje, S., Shaikh, R., Bhandare, A., & Yeole, R. (2026). Advance IoT and Machine Learning Framework for Predictive Maintenance of Small-Scale Wind Turbines. In J. C. Bansal, P. Jamwal, & S. Hussain (Eds.), *Sustainable computing and intelligent systems* (*Lecture Notes in Networks and Systems*, Vol. *1928*). *Springer*. https://doi.org/10.1007/978-3-032-22917-5_18

Electric and Power Indonesia. (17 April 2026). Potensi PLTB Indonesia: Menggali 246 GW Energi Angin dari NTT hingga Papua. https://www.electricindonesia.com/potensi-pltb-indonesia-menggali-246-gw-energi-angin-dari-ntt-hingga-papua/

Fajri, S., & Yuhendri, M. (2023). Monitoring Pembangkit Listrik Tenaga Angin Menggunakan Human Machine Interface. *JTEIN: Jurnal Teknik Elektro Indonesia, 4*(1), 434–444. https://doi.org/10.24036/jtein.v4i1.421

Fauzi, P. R. (2023). Peluang dan Tantangan Transisi Energi: Implikasi Kebijakan Pasca Presidensi G20 Indonesia. *Journal Of Tax Policy, Economics, And Accounting, 1*(1), 16–34. https://doi.org/10.61261/taxpedia.v1i1.14

Herindrasti, S., Angelina, B., & Putriwinata, P. (2024). Pengembangan Kebijakan Energi Terbarukan di Indonesia, Vietnam, dan Laos. *Sospol, 10*(2), 154–172. https://doi.org/10.22219/jurnalsospol.v10i2.35634

Hsu, J.-Y., Wang, Y.-F., Lin, K.-C., Chen, M.-Y., & Hsu, J. H.-Y. (2020). Wind Turbine Fault Diagnosis and Predictive Maintenance through Statistical Process Control and Machine Learning. *IEEE Access, 8*, 23427–23439. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2968615

Indonesia.go.id. (24 Oktober 2024). Menggali Potensi Angin: Langkah Indonesia menuju Energi Terbarukan. https://indonesia.go.id/kategori/editorial/8719/menggali-potensi-angin-langkah-indonesia-menuju-energi-terbarukan?lang=1

Institute for Essential Services Reform. (5 November 2024). Peningkatan Bauran Energi Terbarukan Menggambarkan Semangat Dekarbonisasi. https://iesr.or.id/peningkatan-bauran-energi-terbarukan-menggambarkan-semangat-dekarbonisasi/

International Renewable Energy Agency. (2017). Renewable Energy Benefits: Leveraging Local Capacity for Onshore Wind. International Renewable Energy Agency. https://www.irena.org/publications/2017/Jun/Renewable-Energy-Benefits-Leveraging-Local-Capacity-for-Onshore-Wind

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2023). Wilayah Ini Miliki Potensi Energi Angin di Atas 100 MW. https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/wilayah-ini-miliki-potensi-energi-angin-di-atas-100-mw

Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian Republik Indonesia. (2023). Pemerintah Terus Mendorong Percepatan Transisi Energi di dalam Negeri guna Mencapai Target Net Zero Emission pada 2060. https://www.ekon.go.id/publikasi/detail/4996/pemerintah-terus-mendorong-percepatan-transisi-energi-di-dalam-negeri-guna-mencapai-target-net-zero-emission-pada-2060

Munadi, R., Fuady, M., Noer, R., Kevin, M. A., Farrel, M. R., & Buraida. (2025). Towards Net-Zero-Energy Buildings in Tropical Climates: An IoT and EDGE Simulation Approach. *Sustainability, 17*, 9538. https://doi.org/10.3390/su17219538

Nurfauziah, N., & Sebayang, A. F. B. (2024, July). Strategi Pengembangan Mobil Listrik dalam Mendukung Sustainable Development Goals di Indonesia. In *Bandung Conference Series: Economics Studies* (Vol. 4, No. 3, pp.

636–645). https://doi.org/10.29313/bcses.v4i3.12760

Pahlevi, R., Thamrin, S., Ahmad, I., & Nugroho, F. B. (2024). Masa Depan Pemanfaatan Batubara sebagai Sumber Energi di Indonesia. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan, 5*(2), 50–60. https://doi.org/10.14710/jebt.2024.22973

Pandit, R. K., Astolfi, D., & Durazo Cardenas, I. (2023). A Review of Predictive Techniques Used to Support Decision Making for Maintenance Operations of Wind Turbines. *Energies, 16*, 1654. https://doi.org/10.3390/en16041654

Prabhavathi, K., Edwin, P. P. B., Arunadevi, M., & Shanthi, D. (2023). Design and Implementation of a Machine Learning-Based Wind Turbine Control System. *E3S Web of Conferences, 387*, 01008. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338701008

Prawiroredjo, K., Julian, E. S., Sulaiman, S., Novianto, S., & Moelyadi, Y. I. (2024). Penyuluhan Cara Menghemat dan Cara Aman Menggunakan Energi Listrik dalam Rumah Tangga. *Jurnal Bakti Masyarakat Indonesia, 7*(2), 273–282. https://doi.org/10.24912/jbmi.v7i2.30418

Rohendi, R., Sujaini, H., Yacoub, R. R., Sanjaya, B. W., & Purwoharjono. (2021). Desain Sistem Akuisisi Kecepatan Angin pada Menara SST berbasis IoT. *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi), 5*(4), 739–746. https://doi.org/10.29207/resti.v5i4.3307

Salam, A. (2024). An Overview of Recent Wireless Technologies for IoT-Enabled Smart Grids. *Journal of Electrical and Computer Engineering, 2024*, Article 2568751. https://doi.org/10.1155/jece/2568751

Thiagarajan, S., Semmel, D. S., & Semmel, M. I. (1974). *Instructional Development for Training Teachers of Exceptional Children: A Sourcebook*. Indiana University, Center for Innovation in Teaching the Handicapped. https://files.eric.ed.gov/fulltext/ED090725.pdf

Yeh, C.-H., Lin, M.-H., Lin, C.-H., Yu, C.-E., & Chen, M.-J. (2019). Machine Learning for Long Cycle Maintenance Prediction of Wind Turbine. *Sensors, 19*(7), 1671. https://doi.org/10.3390/s19071671