

Pengembangan Smart Grid dan Microgrid di Indonesia: Tantangan dan Arah Masa Depan

Erwin Budi Sulisty¹

¹Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

Email : erwinbudisulisty@gmail.com (EBS)

Abstrak : Transformasi global sistem ketenagalistrikan menuju desentralisasi dan digitalisasi telah mendorong munculnya konsep smart grid dan microgrid sebagai pilar utama infrastruktur energi masa depan. Penelitian ini mengkaji tantangan dan peluang pengembangan smart grid dan microgrid dengan fokus pada konteks Indonesia. Metode yang digunakan adalah studi literatur terhadap publikasi ilmiah periode 2020–2025 yang bersumber dari basis data Scopus, IEEE, dan MDPI. Hasil kajian menunjukkan bahwa tantangan utama meliputi aspek keamanan siber, interoperabilitas sistem, dan integrasi energi terbarukan. Peluang strategis terletak pada penerapan kecerdasan buatan, blockchain, serta pengelompokan multi-microgrid untuk memperkuat ketahanan energi nasional. Diperlukan kebijakan adaptif, regulasi interoperabilitas, dan kesiapan infrastruktur digital guna menjamin implementasi yang efektif.

Kata Kunci : Jaringan listrik cerdas, Jaringan listrik mikro, Energi terbarukan, Keamanan siber, Rantai blok, Kecerdasan buatan.

Abstract : The global transformation of power systems toward decentralization and digitalization has driven the emergence of smart grid and microgrid concepts as key pillars of future energy infrastructure. This study examines the challenges and opportunities in the development of smart grids and microgrids, with a specific focus on the Indonesian context. The methodology is based on a literature review of scientific publications from 2020 to 2025 sourced from the Scopus, IEEE, and MDPI databases. The results indicate that the main challenges include cybersecurity, system interoperability, and the integration of renewable energy. Strategic opportunities lie in the application of artificial intelligence, blockchain technology, and multi-microgrid clustering to strengthen national energy resilience. Adaptive policies, interoperability regulations, and digital infrastructure readiness are required to ensure effective implementation.

Keywords : Smart grid, Microgrid, Renewable energy, Cybersecurity, Blockchain, Artificial Intelligence.

Jurnal Energi Baru & Terbarukan, 2026, Vol. 7, No. 1, pp 1 – 10

Received : 6 Januari 2026

Accepted : 9 Februari 2026

Published : 2 Maret 2026



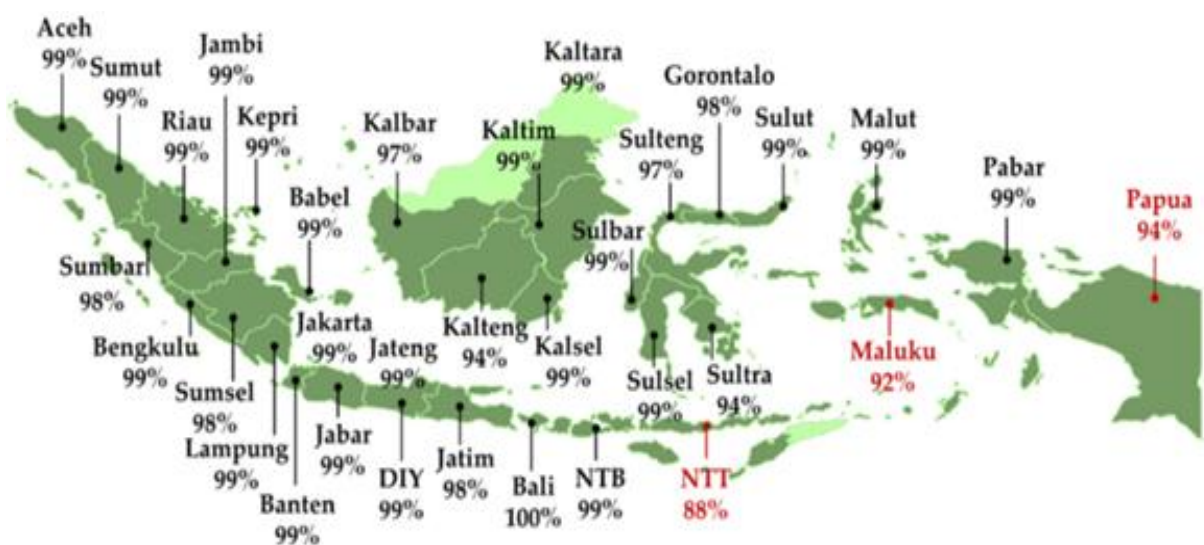
Copyright: © 2022 by the authors. [Jurnal Energi Baru dan Terbarukan](#) (p-ISSN: [2809-5456](#) and e-ISSN: [2722-6719](#)) published by Master Program of Energy, School of Postgraduate Studies. This article is an open access article distributed under the terms and condition of the [Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License](#) (CC BY-SA 4.0).

1. Pendahuluan

Peningkatan kebutuhan energi nasional serta komitmen terhadap upaya dekarbonisasi telah mempercepat transisi menuju sistem ketenagalistrikan yang lebih cerdas, efisien, dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, smart grid dan microgrid berperan sebagai solusi strategis untuk mendukung integrasi sumber energi terbarukan, meningkatkan keandalan pasokan listrik, serta memperkuat ketahanan energi nasional. Selain itu, penerapan sistem kelistrikan cerdas memungkinkan pengelolaan energi yang lebih adaptif melalui pemanfaatan teknologi digital dan sistem kendali berbasis data.

Namun demikian, implementasi smart grid dan microgrid masih menghadapi berbagai tantangan yang kompleks, antara lain variabilitas daya dari sumber energi terbarukan, keterbatasan infrastruktur komunikasi dan teknologi informasi, serta meningkatnya ancaman keamanan siber terhadap sistem kelistrikan. Tantangan-tantangan tersebut berpotensi menghambat kinerja sistem, menurunkan keandalan operasional, dan meningkatkan risiko gangguan pasokan energi apabila tidak ditangani secara komprehensif.

Dalam konteks Indonesia, penerapan smart grid masih berada pada tahap awal, yang ditandai dengan beberapa proyek percontohan di wilayah Jawa–Bali serta program elektrifikasi pedesaan yang memanfaatkan microgrid berbasis energi terbarukan. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menyajikan sintesis terkini mengenai tantangan teknis dan peluang pengembangan smart grid dan microgrid di Indonesia, sekaligus mengidentifikasi arah penelitian serta kerangka kebijakan yang diperlukan guna mendukung percepatan pengembangannya secara berkelanjutan.



Gambar 1. Sebaran Rasio Elektrifikasi Provinsi di Indonesia pada Tahun 2020

Sumber: Diadaptasi dari Sulaeman et al. (2021), “Remote Microgrids for Energy Access in Indonesia —Part I: Scaling and Sustainability Challenges and a Technology Outlook”, *Energies*, MDPI (CC BY 4.0).

Gambar 1 menunjukkan masih adanya kesenjangan rasio elektrifikasi di beberapa wilayah Indonesia bagian timur, yang menegaskan pentingnya pengembangan microgrid berbasis energi terbarukan sebagai solusi elektrifikasi yang adaptif dan berkelanjutan.

Selain tantangan teknis dan operasional tersebut, pengembangan smart grid dan microgrid juga menuntut kesiapan kelembagaan, regulasi, serta sinergi antar pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, operator sistem tenaga, industri, dan institusi riset. Integrasi teknologi digital seperti

kecerdasan buatan, sistem komunikasi cerdas, dan keamanan siber yang andal perlu diimbangi dengan kebijakan yang adaptif dan standar interoperabilitas yang jelas agar implementasi dapat berjalan efektif dan berkelanjutan. Dengan demikian, kajian yang komprehensif terhadap aspek teknis, teknologi digital, dan kebijakan menjadi penting sebagai dasar perumusan strategi pengembangan sistem ketenagalistrikan cerdas yang sesuai dengan karakteristik geografis dan kebutuhan energi Indonesia.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk menyusun pemahaman yang komprehensif dan terstruktur mengenai pengembangan smart grid dan microgrid dalam mendukung integrasi energi terbarukan, khususnya pada konteks negara berkembang seperti Indonesia. Pendekatan SLR dipilih karena mampu mengidentifikasi pola, tantangan utama, serta peluang solusi secara sistematis berdasarkan temuan ilmiah terkini, sekaligus meminimalkan bias subjektif penulis.

Pelaksanaan SLR dalam penelitian ini mengacu pada kerangka PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) yang terdiri atas empat tahapan utama, yaitu identification, screening, eligibility, dan inclusion. Kerangka ini memastikan bahwa proses seleksi literatur dilakukan secara transparan, terukur, dan dapat direplikasi oleh peneliti lain.

Pada tahap identification, pencarian literatur dilakukan melalui basis data ilmiah bereputasi, yaitu Scopus, IEEE Xplore, dan MDPI, dengan menggunakan kombinasi kata kunci “smart grid”, “microgrid”, “cybersecurity”, dan “renewable energy integration”. Pemilihan basis data ini didasarkan pada relevansinya terhadap bidang ketenagalistrikan, teknologi energi, dan sistem digital. Pencarian difokuskan pada publikasi yang terbit dalam rentang waktu 2020–2025 untuk memastikan kebaruan dan relevansi temuan yang dianalisis.

Tahap screening dilakukan dengan menyaring artikel berdasarkan judul dan abstrak. Pada tahap ini, artikel duplikat, artikel yang tidak secara langsung berkaitan dengan pengembangan smart grid dan microgrid, serta publikasi di luar rentang tahun yang ditetapkan dieliminasi. Proses ini bertujuan untuk mempersempit cakupan literatur agar tetap fokus pada topik inti penelitian.

Selanjutnya, pada tahap eligibility, artikel yang lolos penyaringan awal dianalisis secara menyeluruh melalui penelaahan teks penuh (full-text review). Kriteria inklusi mencakup artikel jurnal yang membahas integrasi teknologi digital dalam sistem ketenagalistrikan, manajemen energi, interoperabilitas sistem, dan keamanan siber, serta studi yang relevan dengan implementasi di negara berkembang. Artikel yang hanya bersifat konseptual tanpa keterkaitan dengan sistem energi atau implementasi praktis dikeluarkan dari analisis.

Pada tahap akhir, yaitu inclusion, sebanyak 20 artikel ilmiah terpilih dimasukkan dalam proses analisis tematik. Analisis dilakukan dengan mengelompokkan temuan penelitian ke dalam tiga tema utama, yaitu keamanan siber, interoperabilitas sistem, dan integrasi energi terbarukan. Melalui pendekatan ini, penelitian mampu mengidentifikasi tantangan kunci, solusi teknologi yang potensial, serta implikasi kebijakan yang relevan untuk mendukung pengembangan smart grid dan microgrid di Indonesia secara berkelanjutan.

Melalui analisis tematik terhadap 20 artikel ilmiah tersebut, hasil kajian selanjutnya dipaparkan dan dibahas secara rinci pada bagian Hasil dan Pembahasan, guna memetakan hubungan antara tantangan teknis, solusi teknologi yang diusulkan, serta kesiapan kebijakan dalam mendukung implementasi sistem ketenagalistrikan cerdas yang adaptif terhadap dinamika transisi energi.

Tabel 1.
Daftar 25 Artikel Ilmiah yang Direview

No	Penulis & Tahun	Fokus Utama Penelitian	Tema Dominan
1	(Sulaeman et al., 2021)	Remote microgrid dan elektrifikasi Indonesia	Integrasi EBT
2	(Ali et al., 2023)	Kendali frekuensi sistem pulau	Integrasi EBT
3	(Jamil et al., 2021)	Keamanan siber pada microgrid	Keamanan Siber
4	(Ragab et al., 2025)	AI & federated learning untuk deteksi ancaman	Keamanan Siber
5	(Irmak et al., 2023)	Transformasi digital microgrid	Keamanan Siber
6	(Kaur et al., 2022)	Protokol komunikasi & latensi data	Interoperabilitas
7	(Mchirgui et al., 2024)	Digital twin pada smart grid	Interoperabilitas
8	(Sampath Ediriweera et al., 2022)	Desain & proteksi klaster microgrid	Integrasi EBT
9	(Amiruddin et al., 2024)	Super grid & ESS Indonesia	Integrasi EBT
10	(Worku, 2022)	Energy storage system	Integrasi EBT
11	(Benitez et al., 2025)	Peramalan energi berbasis AI	Integrasi EBT
12	(Pambudi et al., 2023)	Potensi energi terbarukan Indonesia	Integrasi EBT
13	(Judijanto et al., 2024)	Dampak smart grid terhadap EBT	Integrasi EBT
14	(Arévalo et al., 2025)	Model manajemen microgrid cerdas	Interoperabilitas
15	(Zou et al., 2022)	Privasi dan pertukaran data aman pada smart grid	Keamanan Siber
16	(Matulin et al., 2022)	Kendali microgrid berbasis SCADA	Interoperabilitas
17	(Aldabbagh et al., 2021)	Gateway IoT & latensi komunikasi	Interoperabilitas
18	(Kumari et al., 2022)	Blockchain untuk transaksi energi dan data	Keamanan Siber
19	(Nyangaresi et al., 2021)	Skema pertukaran data aman di smart grid berbasis ECC	Keamanan Siber
20	(Khan et al., 2024)	Strategi manajemen energi microgrid	Integrasi EBT

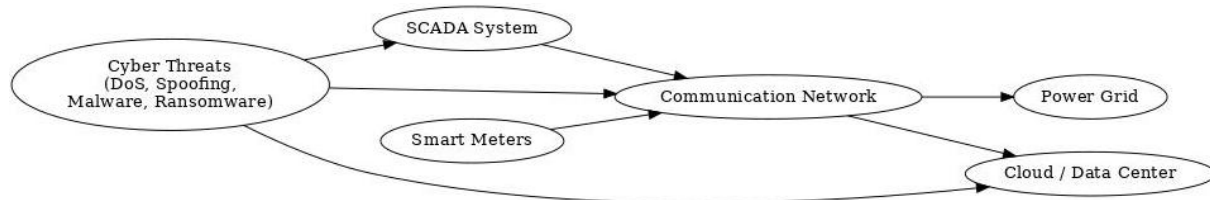
Catatan: Klasifikasi tema ditentukan berdasarkan fokus dominan masing-masing artikel, meskipun beberapa studi memiliki irisan antar tema.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan Tabel 1, fokus penelitian paling dominan berada pada integrasi energi terbarukan dengan total 9 artikel, diikuti oleh keamanan siber sebanyak 6 artikel, serta interoperabilitas sistem sebanyak 5 artikel. Distribusi ini menunjukkan bahwa peningkatan penetrasi energi terbarukan masih menjadi isu utama dalam pengembangan smart grid dan microgrid di Indonesia. Namun demikian, keberhasilan integrasi tersebut sangat bergantung pada kesiapan sistem digital, khususnya dalam aspek keamanan siber dan kemampuan interoperabilitas antarperangkat dan platform, yang berperan penting dalam menjamin keandalan, stabilitas, dan keberlanjutan sistem energi cerdas.

3.1 Keamanan Siber

Transformasi sistem ketenagalistrikan menuju smart grid telah meningkatkan ketergantungan terhadap infrastruktur komunikasi digital dan sistem kendali berbasis data. Integrasi smart meter, sistem Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA), serta pusat data berbasis komputasi awan membuka berbagai potensi kerentanan siber baru yang dapat mengganggu keberlanjutan pasokan energi (Jamil et al., 2021).



Gambar 2. Arsitektur Keamanan Siber pada Smart Grid

Jenis serangan siber yang umum terjadi meliputi Denial-of-Service (DoS), pemalsuan data (data spoofing), injeksi malware, serta serangan ransomware yang secara khusus menargetkan infrastruktur energi. Insiden-insiden tersebut dapat menurunkan keandalan sistem, menyebabkan kesalahan pada data konsumsi energi, dan dalam kondisi ekstrem berpotensi memicu pemadaman listrik berskala besar. Upaya mitigasi ancaman siber dilakukan melalui penerapan berbagai teknologi digital canggih (Ragab et al., 2025), antara lain:

- Blockchain: Membentuk buku besar terdistribusi untuk menjamin integritas dan transparansi data energi.
- Federated Learning: Memungkinkan model kecerdasan buatan dilatih pada berbagai node tanpa memindahkan data mentah, sehingga menjaga privasi dan mengurangi risiko kebocoran data.
- Kriptografi Tahan-Kuantum (Quantum-Safe Cryptography): Dirancang untuk menghadapi ancaman sistem komputasi kuantum di masa depan serta menjamin keamanan jangka panjang komunikasi dan pertukaran data dalam jaringan smart grid.

Beberapa proyek percontohan yang dikembangkan oleh PLN, seperti Smart Grid Bali Pilot Project dan Jakarta Smart Distribution System, telah menerapkan sistem pemantauan real-time berbasis Internet of Things (IoT). Namun demikian, penerapan arsitektur ketahanan siber yang komprehensif dan terintegrasi secara nasional masih tergolong terbatas. Oleh karena itu, kolaborasi antara PLN, Badan Siber dan Sandi Negara (BSSN), perguruan tinggi, serta lembaga penelitian seperti BPPT/BRIN perlu diperkuat guna mengembangkan kerangka keamanan siber nasional yang mampu melindungi infrastruktur energi kritis.

3.2 Interoperabilitas Sistem

Interoperabilitas telah menjadi isu krusial karena sistem ketenagalistrikan di Indonesia menggunakan peralatan dari berbagai produsen yang menerapkan protokol komunikasi yang berbeda-beda. Ketidakcocokan antarprotokol seperti Modbus, DNP3, dan IEC 61850 sering menimbulkan permasalahan sinkronisasi data serta meningkatkan risiko kesalahan dalam proses kendali otomatis. Selain itu, keterbatasan kapasitas gateway Internet of Things (IoT) dalam menangani volume data yang besar sering menyebabkan latensi komunikasi yang tinggi, sehingga berpotensi mengganggu stabilitas operasi kendali real-time pada sistem tenaga listrik (Kaur et al., 2022).

Untuk mencapai interoperabilitas sistem secara menyeluruh, diperlukan beberapa pendekatan utama, antara lain:

- Standarisasi komunikasi melalui penerapan standar IEC 61850, MQTT, dan OPC-UA guna memungkinkan komunikasi yang terbuka, aman, dan andal antarperangkat dalam jaringan kelistrikan.
- Lapisan middleware, yaitu lapisan perantara khusus yang mampu menerjemahkan berbagai protokol komunikasi ke dalam format data yang seragam, sehingga menjamin kompatibilitas sistem secara menyeluruh.
- Integrasi digital twin, yakni penerapan teknologi digital twin untuk melakukan pengujian kompatibilitas lintas sistem secara virtual sebelum diterapkan pada lingkungan operasional yang sebenarnya (Mchirgui et al., 2024).

Sebagian besar proyek microgrid di Indonesia masih beroperasi dalam konfigurasi stand-alone. Oleh karena itu, pembentukan kerangka standarisasi data dan interoperabilitas nasional di bawah koordinasi PLN dan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) merupakan langkah strategis untuk menjamin interkoneksi sistem tenaga listrik antarwilayah secara efisien. Pengembangan Open Energy Data Platform Indonesia (OEDPI) direkomendasikan untuk mempercepat integrasi data lintas sistem sekaligus mendukung kebijakan transisi energi berbasis digitalisasi. Sementara sebagian besar negara ASEAN, seperti Malaysia dan Thailand, telah menerapkan interoperabilitas berbasis SCADA secara lebih maju, Indonesia masih bergantung pada sistem berskala percontohan. Kondisi ini menegaskan perlunya percepatan standarisasi nasional dan peningkatan kesiapan infrastruktur digital.

3.3 Integrasi Energi Terbarukan

Sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin secara alami bersifat intermiten, sehingga sering menyebabkan ketidakseimbangan daya dalam jaringan listrik. Kondisi ini dapat menimbulkan deviasi tegangan, penurunan tegangan (voltage sag), serta kesulitan dalam mempertahankan kestabilan frekuensi sistem. Selain itu, kapasitas Energy Storage System (ESS) di Indonesia masih relatif terbatas, terutama di wilayah kepulauan yang belum didukung oleh infrastruktur jaringan listrik yang kuat dan andal. Keterbatasan ini memperbesar tantangan dalam menjaga keandalan dan stabilitas sistem tenaga berbasis energi terbarukan (Amiruddin et al., 2024).

Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk mengatasi tantangan integrasi energi terbarukan, antara lain:

- Energy Storage System (ESS), yaitu pemanfaatan baterai lithium-ion dan flow battery untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik serta meredam fluktuasi pembangkitan energi (Worku, 2022)
- Peramalan berbasis kecerdasan buatan (AI-based forecasting), yang memanfaatkan prediksi cuaca dan produksi energi untuk membantu operator jaringan dalam menyesuaikan pola beban serta mengoptimalkan proses dispatch energi (Benitez et al., 2025).
- Pengelompokan microgrid (microgrid clustering), yaitu penghubungan beberapa microgrid regional untuk memungkinkan berbagi daya dan mengurangi ketergantungan terhadap jaringan utama (Sampath Ediriweera et al., 2022).

Potensi energi terbarukan Indonesia diperkirakan mencapai lebih dari 400 GW, dengan kontribusi terbesar berasal dari energi surya dan biomassa. Penerapan microgrid hibrida dengan konfigurasi PV–baterai–diesel telah terbukti efektif pada proyek percontohan di wilayah Nusa Tenggara Timur dan Maluku. Integrasi Smart Energy Management System (SEMS) berbasis kecerdasan

buatan diproyeksikan mampu menurunkan biaya operasional sebesar 20–25% serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi lokal secara signifikan (Pambudi et al., 2023).

Gambar 3 di bawah menunjukkan tren peningkatan yang konsisten dan telah mendekati 100%. Capaian ini mengindikasikan bahwa secara nasional akses listrik telah tercapai dengan sangat baik. Namun demikian, tingginya rasio elektrifikasi tersebut tidak secara langsung mencerminkan kesiapan sistem dalam mengakomodasi integrasi sumber energi terbarukan, khususnya pada aspek stabilitas dan keandalan sistem tenaga.

Dalam konteks peningkatan rasio elektrifikasi justru menandai pergeseran tantangan dari sekadar penyediaan akses listrik menuju peningkatan kualitas pasokan energi. Wilayah dengan rasio elektrifikasi tinggi, terutama di daerah kepulauan dan terpencil, masih menghadapi keterbatasan infrastruktur jaringan dan ketergantungan pada pembangkit diesel. Kondisi ini membuka peluang penerapan microgrid berbasis energi terbarukan yang didukung oleh Energy Storage System (ESS) untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik dan meredam variabilitas daya akibat sifat intermiten energi surya dan angin.

Dengan demikian, grafik ini memperkuat argumen bahwa keberhasilan elektrifikasi nasional harus diikuti oleh strategi integrasi energi terbarukan yang berfokus pada stabilitas sistem, efisiensi energi, dan keberlanjutan pasokan. Penerapan sistem microgrid hibrida yang dikombinasikan dengan teknologi manajemen energi cerdas menjadi solusi strategis untuk menjawab tantangan integrasi energi terbarukan dalam sistem ketenagalistrikan Indonesia.



Gambar 3. Rasio Elektrifikasi Nasional Indonesia Periode 2019–2024

Sumber: Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan, Kementerian ESDM (Statistik Ketenagalistrikan) dan Badan Pusat Statistik (BPS)

Sebagai rangkuman dari hasil analisis dan pembahasan yang telah diuraikan, **Tabel 2** berikut menyajikan sintesis tantangan kritis dan solusi potensial dalam pengembangan smart grid di Indonesia. Tabel ini merangkum keterkaitan antara aspek teknis utama, pendekatan teknologi yang relevan, serta implikasinya terhadap sistem energi nasional, sehingga memberikan gambaran komprehensif

mengenai arah pengembangan smart grid dan microgrid dalam mendukung transisi energi yang berkelanjutan.

Tabel 2.

Tantangan Kritis dan Solusi Potensial Pengembangan Smart Grid di Indonesia

Aspek Utama	Tantangan Kritis	Solusi Potensial	Relevansi Nasional
Keamanan Siber	Serangan digital pada SCADA dan IoT	Blockchain, Federated Learning, keamanan berbasis AI	Perlindungan infrastruktur energi nasional (PLN–BSSN)
Interoperabilitas Sistem	Ketidakcocokan protokol & latensi	IEC 61850, middleware, digital twin	Integrasi sistem tenaga regional & smart grid PLN
Integrasi Energi Terbarukan	Variabilitas daya & keterbatasan ESS	ESS, peramalan berbasis AI, klaster microgrid	Elektrifikasi pulau kecil & peningkatan bauran energi bersih

3.4 Gap Penelitian dan Arah Penelitian Selanjutnya

Kajian-kajian terkini mengenai pengembangan smart grid dan microgrid di Indonesia masih menghadapi sejumlah kesenjangan penelitian. Sebagian besar penelitian masih berfokus pada optimasi pada tingkat komponen, sementara koordinasi pada tingkat sistem antara sumber energi terbarukan, sistem penyimpanan energi, dan jaringan listrik nasional masih terbatas. Kerangka keamanan siber yang dikembangkan umumnya masih bersifat konseptual dan memerlukan implementasi nyata di lapangan, khususnya dengan penerapan metode berbasis kecerdasan buatan dan kriptografi tahan-kuantum. Selain itu, standar interoperabilitas dan tata kelola data masih memerlukan kajian lebih lanjut, terutama dalam konteks integrasi sistem multi-vendor. Oleh karena itu, penelitian di masa mendatang perlu menekankan pengembangan simulasi digital twin, pengelompokan multi-microgrid, serta analisis tekno-ekonomi yang komprehensif guna mendukung transisi energi yang aman, andal, dan berkelanjutan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian literatur yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengembangan smart grid dan microgrid di Indonesia memiliki peran strategis dalam mendukung transformasi sistem ketenagalistrikan menuju sistem yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan. Adapun poin-poin utama kesimpulan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tantangan utama dalam pengembangan smart grid dan microgrid di Indonesia meliputi aspek keamanan siber, interoperabilitas sistem, dan integrasi sumber energi terbarukan, yang secara langsung mempengaruhi keandalan dan keamanan operasi sistem energi.
2. Keberhasilan implementasi sistem energi cerdas sangat bergantung pada kesiapan infrastruktur digital, termasuk sistem komunikasi, pusat data, dan mekanisme kendali berbasis data yang terintegrasi.
3. Penerapan teknologi digital canggih, seperti blockchain untuk perlindungan data, kecerdasan buatan untuk peramalan dan pengelolaan energi, serta sistem kendali terintegrasi, merupakan solusi kunci dalam mengatasi kompleksitas pengelolaan smart grid dan microgrid.
4. Pengembangan klaster multi-microgrid menjadi pendekatan strategis untuk meningkatkan ketahanan energi, khususnya di wilayah kepulauan dan daerah terpencil yang memiliki keterbatasan infrastruktur jaringan utama.

5. Smart grid dan microgrid memiliki relevansi yang sangat kuat bagi Indonesia dalam mendukung transisi energi berkelanjutan, meningkatkan ketahanan energi nasional, serta mempercepat pencapaian target Net Zero Emission.
6. Secara keseluruhan, keberhasilan pengembangan smart grid dan microgrid di Indonesia memerlukan sinergi yang kuat antara pengembangan teknologi, kebijakan yang adaptif, dan kolaborasi lintas sektor agar implementasinya dapat berjalan secara efektif dan berkelanjutan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada seluruh dosen Magister Teknik Fisika ITS dan rekan mahasiswa angkatan 2024 yang telah memberikan bantuan dan dorongan kepada penulis hingga tahap publikasi penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Aldabbagh, G., Dimitriou, N., Alkhurairi, S., & Bamasag, O. (2021). Radio coverage and device capacity dimensioning methodologies for Iot Lorawan and NB-IOT deployments in urban environments. *Future Internet*, 13(6). doi: 10.3390/fi13060144
- Ali, Y. A., Ouassaid, M., Cabrane, Z., & Lee, S. H. (2023). Enhanced Primary Frequency Control Using Model Predictive Control in Large-Islanded Power Grids with High Penetration of DFIG-Based Wind Farm. *Energies*, 16(11). doi: 10.3390/en16114389
- Amiruddin, A., Dargaville, R., & Gawler, R. (2024). Optimal Integration of Renewable Energy, Energy Storage, and Indonesia's Super Grid. *Energies*, 17(20). doi: 10.3390/en17205061
- Arévalo, P., Benavides, D., Ochoa-Correa, D., Ríos, A., Torres, D., & Villanueva-Machado, C. W. (2025). Smart Microgrid Management and Optimization: A Systematic Review Towards the Proposal of Smart Management Models. In *Algorithms* (Vol. 18, Issue 7). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/a18070429
- Benitez, I. B., & Singh, J. G. (2025). A comprehensive review of machine learning applications in forecasting solar PV and wind turbine power output. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 12(1). doi: 10.1186/s43067-025-00239-4
- Irmak, E., Kabalci, E., & Kabalci, Y. (2023). Digital Transformation of Microgrids: A Review of Design, Operation, Optimization, and Cybersecurity. In *Energies* (Vol. 16, Issue 12). MDPI. doi: 10.3390/en16124590
- Jamil, N., Qassim, Q. S., Bohani, F. A., Mansor, M., & Ramachandramurthy, V. K. (2021). Cybersecurity of microgrid: State-of-the-art review and possible directions of future research. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 11, Issue 21). MDPI. doi: 10.3390/app11219812
- Judijanto, L., & Tahir, U. (2024). The Effect of Smart Grid Implementation on the Integration of New Renewable Energy in Indonesia's Electricity System Article Info ABSTRACT. In *West Science Nature and Technology* (Vol. 2, Issue 04).
- Kaur, R., Gholamhosseini, H., Sinha, R., & Lindén, M. (2022). Melanoma Classification Using a Novel Deep Convolutional Neural Network with Dermoscopic Images. *Sensors*, 22(3). doi: 10.3390/s22031134
- Khan, M. R., Haider, Z. M., Malik, F. H., Almasoudi, F. M., Alatawi, K. S. S., & Bhutta, M. S. (2024). A Comprehensive Review of Microgrid Energy Management Strategies Considering Electric Vehicles, Energy Storage Systems, and AI Techniques. In *Processes* (Vol. 12, Issue 2). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/pr12020270

- Kumari, A., Sukharamwala, U. C., Tanwar, S., Raboaca, M. S., Alqahtani, F., Tolba, A., Sharma, R., Aschilean, I., & Mihaltan, T. C. (2022). Blockchain-Based Peer-to-Peer Transactive Energy Management Scheme for Smart Grid System. *Sensors*, 22(13). doi: 10.3390/s22134826
- Matulin, L., Hrga, A., & Capuder, T. (2022). *The Development and Implementation of a Microgrid SCADA System Simulator*.
- Mchirgui, N., Quadar, N., Kraiem, H., & Lakhssassi, A. (2024). The Applications and Challenges of Digital Twin Technology in Smart Grids: A Comprehensive Review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 23). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). doi: 10.3390/app142310933
- Nyangaresi, V. O., & Affane Moundounga, A. R. (2021). Secure Data Exchange Scheme for Smart Grids. *6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry, RTSI 2021 - Proceedings*, 312–316. doi: 10.1109/RTSI50628.2021.9597276
- Pambudi, N. A., Firdaus, R. A., Rizkiana, R., Ulfa, D. K., Salsabila, M. S., Suharno, & Sukatiman. (2023). Renewable Energy in Indonesia: Current Status, Potential, and Future Development. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 15, Issue 3). MDPI. doi: 10.3390/su15032342
- Ragab, M., Ashary, E. B., Alghamdi, B. M., Aboalela, R., Alsaadi, N., Maghrabi, L. A., & Allehaibi, K. H. (2025). Advanced artificial intelligence with federated learning framework for privacy-preserving cyberthreat detection in IoT-assisted sustainable smart cities. *Scientific Reports*, 15(1). doi: 10.1038/s41598-025-88843-2
- Sampath Ediriweera, W. E. P., & Lidula, N. W. A. (2022). Design and protection of microgrid clusters: A comprehensive review. *AIMS Energy*, 10(3), 375–411. doi: 10.3934/energy.2022020
- Sulaeman, I., Simatupang, D. P., Noya, B. K., Suryani, A., Moonen, N., Popovic, J., & Leferink, F. (2021). Remote microgrids for energy access in indonesia—part i: Scaling and sustainability challenges and a technology outlook. *Energies*, 14(20). doi: 10.3390/en14206643
- Worku, M. Y. (2022). Recent Advances in Energy Storage Systems for Renewable Source Grid Integration: A Comprehensive Review. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 14, Issue 10). MDPI. doi: 10.3390/su14105985
- Zou, B., Zeng, X., & Wang, F. (2022). Research on Modulation Signal Recognition Based on CLDNN Network. *Electronics (Switzerland)*, 11(9). doi: 10.3390/electronics11091379