

Penilaian Penerapan Advanced Metering Infrastructure pada Tahap Awal dan Keselarasannya dengan Roadmap Smart Grid: Bukti Empiris dari Indonesia

¹*Purnomo, ² Muhamad Habibi, ³Iwa Garniwa MK

Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur Institut Teknologi PLN

³Departemen Teknik Universitas Indonesia

*Corresponding Author e-mail: jurnaljurnal12@gmail.com

Received: December 2025; Revised: January 2026; Published: February 2026

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi penerapan tahap awal Advanced Metering Infrastructure (AMI) di Indonesia serta menilai tingkat keselarasan implementasinya dengan roadmap smart grid nasional dalam konteks negara berkembang. Pendekatan mixed-methods digunakan dengan mengombinasikan analisis kinerja operasional dan kerangka evaluasi heuristik berbasis kebijakan, yaitu Smart Grid Evaluation Index-Indonesia (SGEI-ID), untuk menginterpretasikan data kuantitatif dan kualitatif yang bersifat heterogen. Hasil empiris menunjukkan bahwa penerapan AMI pada sekitar 1,2 juta pelanggan menghasilkan perbaikan kinerja operasional yang terukur. Rugi-rugi distribusi menurun sebesar 9%, sementara keandalan sistem meningkat signifikan dengan penurunan SAIDI sebesar 30% dan SAIFI sebesar 42%. Tingkat kepuasan pelanggan pada kluster implementasi AMI berada pada kisaran 93–98%, didukung oleh Customer Satisfaction Index (CSI) nasional agregat sebesar 97,4%. Namun demikian, evaluasi menggunakan kerangka SGEI-ID menunjukkan bahwa keselarasan dengan roadmap smart grid nasional masih bersifat parsial. Kesenjangan utama teridentifikasi pada aspek demand-side management (DSM), kesiapan integrasi energi terbarukan, serta kapasitas tata kelola, yang mengindikasikan bahwa manfaat AMI pada tahap awal masih terkonsentrasi pada peningkatan efisiensi operasional, belum pada transformasi smart grid yang bersifat sistemik. Dari perspektif ekonomi, analisis Internal Rate of Return (IRR) yang disusun secara konservatif dan hanya mempertimbangkan manfaat operasional langsung menunjukkan kisaran nilai antara 1,5% hingga 14% antar-kluster, mencerminkan karakteristik umum investasi infrastruktur digital pada tahap awal di negara berkembang. Secara keseluruhan, temuan penelitian ini menempatkan AMI sebagai lapisan digital fondasional yang memerlukan dukungan reformasi regulasi dan kelembagaan untuk mewujudkan pengembangan smart grid jangka panjang. Studi ini memberikan implikasi kebijakan yang relevan bagi Indonesia dan negara berkembang lain dalam mendorong pengembangan smart grid sebagai bagian dari agenda transisi energi.

Kata kunci: Advanced Metering Infrastructure; Smart Grid; Transisi Energi; Kinerja Operasional; Keselarasan Roadmap Smart Grid; Negara Berkembang

Assessing Early-Stage Advanced Metering Infrastructure Deployment and Smart Grid Roadmap Alignment: Evidence from Indonesia

Abstract

This study evaluates the early-stage deployment of Advanced Metering Infrastructure (AMI) in Indonesia and assesses its alignment with the national smart grid roadmap in a developing economy context. A mixed-methods approach is applied, combining operational performance analysis with a heuristic policy-oriented framework, the Smart Grid Evaluation Index-Indonesia (SGEI-ID), to interpret heterogeneous quantitative and qualitative evidence. Empirical results indicate that AMI deployment covering approximately 1.2 million customers has generated measurable operational improvements. Distribution losses declined by 9%, while system reliability improved significantly, with SAIDI and SAIFI reduced by 30% and 42%, respectively. Customer satisfaction in AMI implementation clusters ranges from 93% to 98%, supported by a nationally aggregated Customer Satisfaction Index (CSI) of 97.4%. However, SGEI-ID assessment reveals that alignment with the national smart grid roadmap remains partial, with key gaps identified in demand-side management (DSM), renewable energy integration readiness, and governance capacity. This suggests that early-stage AMI benefits are primarily concentrated on operational efficiency rather than systemic smart grid transformation. From an economic perspective, a conservative Internal Rate of Return (IRR) analysis is limited to direct operational benefits and yields cluster-level values ranging from 1.5% to 14%, reflecting the typical characteristics of early-stage digital infrastructure investments in developing economies. Overall, the findings position AMI as a foundational digital layer that requires complementary regulatory and institutional reforms to support long-term smart grid development. The study offers policy-relevant insights for Indonesia and other developing economies advancing smart grid initiatives within broader energy transition agendas.

Keywords: Advanced Metering Infrastructure; Smart Grid; Energy Transition; Operational Performance; Smart Grid Roadmap Alignment; Developing Economies

How to Cite: Purnomo, P., Habibi, M., & MK, I. G. . (2026). Penilaian Penerapan Advanced Metering Infrastructure pada Tahap Awal dan Keselarasannya dengan Roadmap Smart Grid: Bukti Empiris dari Indonesia. *Journal of Authentic Research*, 5(1), 116-131. <https://doi.org/10.36312/ny8yga92>



<https://doi.org/10.36312/ny8yga92>

Copyright© 2026, Purnomo et al.

This is an open-access article under the CC-BY-SA License.



PENDAHULUAN

Transisi energi global menjadi prioritas utama untuk mengurangi ketergantungan pada energi fosil yang menimbulkan dampak lingkungan signifikan. Banyak negara telah menetapkan target netral karbon pertengahan abad, mendorong investasi besar dalam infrastruktur energi yang berkelanjutan dan efisien (IEA, 2024). Dalam kerangka ini, smart grid dipandang sebagai enabler kunci untuk integrasi energi terbarukan variabel seperti angin dan surya, sekaligus meningkatkan efisiensi dan keandalan distribusi listrik (Sovacool et al., 2021). Implementasi smart grid secara global telah menunjukkan potensi besar dalam menurunkan rugi-rugi distribusi, meningkatkan efisiensi energi, dan memperluas integrasi energi terbarukan (Wei et al., 2025). Di Eropa dan Amerika Utara, smart grid menjadi bagian integral dari kebijakan energi bersih, didukung investasi dan kapasitas kelembagaan yang matang (Ibhaze et al., 2020). Sebaliknya, di negara berkembang, implementasi smart grid masih terfragmentasi, dengan hambatan berupa infrastruktur lama, keterbatasan pembiayaan, serta kapasitas tata kelola yang rendah (World Bank, 2016).

Advanced Metering Infrastructure (AMI) merupakan elemen dasar smart grid yang memungkinkan pengumpulan data konsumsi listrik secara real-time, mendukung manajemen distribusi yang efisien dan responsif. Selain meningkatkan akurasi pencatatan tagihan, AMI mendukung kebijakan tarif dinamis, demand response, serta deteksi kerugian non-teknis (Kornatka & Poplawski, 2021; Zhang & Wang, 2023). Di Indonesia, meskipun implementasi AMI masih terbatas, manfaat awal sudah terlihat. Data PLN menunjukkan penurunan rugi-rugi distribusi dari 9,3% menjadi 8,5% dalam dua tahun, SAIDI turun 30% (463 → 320 menit), SAIFI turun 42% (5,62 → 3,23), dan indeks kepuasan pelanggan meningkat menjadi 97,4% secara agregat (PLN, 2025). AMI juga membuka jalan bagi integrasi energi terbarukan yang lebih andal, sehingga mendukung target RUPTL 2025–2034 (IEA, 2024).

Negara berkembang menghadapi rugi-rugi distribusi yang tinggi, sering kali >10%, jauh di atas benchmark negara maju. Hambatan lain mencakup pencurian listrik, keterbatasan infrastruktur digital, dan kesiapan regulasi terkait data, demand-side management (DSM), serta integrasi energi terbarukan (IEA, 2023). Studi empiris yang menghubungkan outcome AMI dengan roadmap smart grid nasional masih jarang. Sebagian besar literatur fokus pada potensi teknis atau studi kelayakan finansial, belum menilai keselarasan dengan target strategis energi berkelanjutan. Hal ini menciptakan gap riset penting di negara berkembang, termasuk Indonesia.

Indonesia adalah contoh ideal untuk mengkaji peran AMI. Dengan 270 juta penduduk dan sistem kelistrikan yang tersebar di ribuan pulau, tantangan infrastruktur dan keandalan masih besar (IEA, 2024). RUPTL 2025–2034 menargetkan penurunan rugi-rugi distribusi <8%, SAIDI <300 menit, SAIFI <3, perluasan integrasi energi terbarukan, dan penerapan DSM. Hingga awal 2024, PLN baru memasang AMI pada ±1,2 juta pelanggan (1,4% dari total). Implementasi masih berbasis klaster perkotaan atau industri, difokuskan pada pengurangan rugi-rugi dan peningkatan keandalan (Arifin et al., 2023). Meskipun hasil awal positif, skalabilitas, kesiapan kelembagaan, dan integrasi ke roadmap nasional masih menjadi tantangan besar.

Sebagian besar riset AMI di negara maju membuktikan keberhasilan dalam menekan rugi-rugi, meningkatkan keandalan, dan memperluas DSM serta integrasi energi terbarukan. Namun, di negara berkembang, terutama Indonesia, riset empiris yang menilai keselarasan implementasi AMI dengan target roadmap smart grid nasional (RUPTL 2025–2034) masih terbatas. Gap utama yang muncul mencakup

sejauh mana outcome AMI saat ini sesuai dengan pilar roadmap seperti efisiensi, keandalan, DSM, dan integrasi energi terbarukan yang belum diukur secara sistematis, keterbatasan skala implementasi AMI yang baru mencakup 1,4% pelanggan sehingga tantangan pembiayaan, tata kelola, dan strategi ekspansi perlu dievaluasi, serta aspek sosial-teknis seperti penerimaan konsumen, keamanan data, dan kesiapan kelembagaan yang belum banyak diteliti.

Restrukturisasi sistem kelistrikan global saat ini banyak dibahas melalui konsep smart grid, yaitu integrasi antara platform komunikasi digital, teknologi sensor, dan sistem kendali otomatis untuk meningkatkan kinerja sistem tenaga listrik. Smart grid memungkinkan utilitas mengakomodasi masuknya energi terbarukan yang bersifat fluktuatif, seperti tenaga surya dan angin, sekaligus memperkuat efisiensi dan keandalan jaringan distribusi (IEA, 2022; 2023). Di negara-negara maju, penerapan smart grid secara langsung dikaitkan dengan pencapaian target dekarbonisasi, modernisasi sistem tenaga, serta peningkatan partisipasi dan pemberdayaan pelanggan (Wei, Li, & Miao, 2025). Bukti empiris dari Eropa dan Amerika Utara menunjukkan bahwa smart grid berkontribusi pada penurunan rugi-rugi teknis, percepatan respons terhadap gangguan, serta peningkatan keseimbangan antara permintaan dan pasokan energi (Ibhaze, Akpabio, & Akinbulire, 2020). Kemajuan tersebut dimungkinkan oleh dukungan kebijakan yang kuat, ketersediaan investasi modal yang signifikan, serta kapasitas institusional yang matang. Sebaliknya, di banyak negara berkembang, implementasi smart grid masih berjalan parsial dan terfragmentasi akibat sistem distribusi warisan, keterbatasan akses pembiayaan, serta lemahnya tata kelola (World Bank, 2016a; 2016b).

Di antara berbagai teknologi smart grid, Advanced Metering Infrastructure (AMI) sering digambarkan sebagai fondasi utama dari sistem ketenagalistrikan digital. AMI mengintegrasikan smart meter, konsentrator data, dan sistem komunikasi dua arah yang memungkinkan utilitas mengumpulkan data konsumsi energi dan kondisi sistem secara real-time (Kornatka & Popławski, 2021). Lebih dari sekadar penagihan yang akurat, AMI memungkinkan deteksi gangguan yang lebih cepat, identifikasi kerugian energi secara geografis, serta pemetaan pola konsumsi pelanggan untuk mendukung struktur tarif yang lebih canggih (Zhang & Wang, 2023). Berbagai studi menunjukkan bahwa AMI menghasilkan manfaat operasional berupa penurunan kerugian non-teknis, peningkatan efisiensi jaringan, serta peningkatan kepuasan dan kepercayaan pelanggan, khususnya di negara berkembang di mana AMI menjadi antarmuka digital pertama antara utilitas dan pelanggan (Gabriel et al., 2025; Arifin et al., 2023).

Evaluasi AMI umumnya menggunakan indikator kuantitatif seperti kerugian distribusi, SAIDI, dan SAIFI, yang menunjukkan peningkatan terukur di negara maju berupa penurunan kerugian energi sebesar 2–4 poin persentase dan pengurangan durasi gangguan hingga 30%. Namun, literatur juga menekankan bahwa manfaat ini sangat bergantung pada investasi pendukung dalam otomasi, infrastruktur komunikasi, dan kapasitas sumber daya manusia. Tanpa dukungan tersebut, AMI berisiko hanya menjadi pembaruan teknologi yang terisolasi (Ibhaze et al., 2020).

AMI juga memainkan peran penting dalam mendukung demand-side management (DSM) melalui penyediaan data konsumsi granular dan komunikasi dua arah, memungkinkan penerapan tarif dinamis dan pengelolaan beban. Studi menunjukkan bahwa DSM berbasis AMI dapat mengurangi beban puncak sebesar 5–

15% apabila didukung desain tarif yang tepat (Sovacool et al., 2021; Ryu & Kim, 2024). Namun, di negara berkembang seperti Indonesia, efektivitas DSM dipengaruhi faktor sosial-politik, edukasi konsumen, serta kesiapan regulasi, sehingga penilaian AMI perlu mempertimbangkan dimensi teknis dan sosial secara bersamaan.

Penerapan AMI juga menghadirkan tantangan tata kelola terkait privasi dan keamanan data. Smart meter menghasilkan data berfrekuensi tinggi yang berpotensi mengungkap pola kehidupan rumah tangga, sehingga memerlukan perlindungan kuat berupa enkripsi, protokol aman, serta kerangka regulasi yang jelas (Gabriel et al., 2025). Tanpa tata kelola yang memadai, implementasi AMI berisiko mengikis kepercayaan konsumen dan memicu resistensi regulasi, terutama di negara dengan kapasitas kelembagaan yang masih berkembang (Sovacool et al., 2021).

RUPTL 2025–2034 menempatkan pengembangan smart grid sebagai penggerak utama transisi energi Indonesia, dengan fokus pada efisiensi, keandalan, fleksibilitas melalui DSM, dan integrasi energi terbarukan. Dalam kerangka ini, AMI diidentifikasi sebagai teknologi fondasi yang menyediakan visibilitas konsumsi real-time, pemantauan rugi-rugi distribusi, serta dukungan bagi pertukaran energi dua arah. Namun, kajian empiris yang menilai keselarasan implementasi AMI dengan target RUPTL masih terbatas, khususnya dalam konteks negara berkembang yang menghadapi keterbatasan skala, pendanaan, dan tata kelola.

Literatur menegaskan bahwa keselarasan antara implementasi AMI dan roadmap smart grid nasional tidak terjadi secara otomatis. Tanpa konsistensi kebijakan, dukungan pendanaan, dan penguatan kapasitas institusional, proyek AMI berisiko menjadi pulau teknologi yang terisolasi dengan kontribusi terbatas terhadap transformasi sistem jangka panjang (IEA, 2023; World Bank, 2016a; 2016b). Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi kinerja operasional AMI di Indonesia, menilai kesesuaiannya dengan RUPTL 2025–2034, serta mengisi kesenjangan keselarasan, skala, dan sosial-teknis yang masih minim dikaji dalam literatur.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed-method case study dengan fokus pada Indonesia sebagai negara berkembang yang sedang melakukan modernisasi jaringan listrik melalui penerapan Advanced Metering Infrastructure (AMI). Fokus pada konteks Indonesia relevan karena AMI baru mencakup $\pm 1,2$ juta pelanggan atau sekitar 1,4% dari total pelanggan nasional, sehingga memberikan peluang untuk menilai manfaat awal sekaligus tantangan ekspansi menuju skala nasional. Data kuantitatif diperoleh dari laporan operasional PLN, dokumen regulasi publik, dan hasil survei nasional, dengan indikator utama meliputi perubahan rugi-rugi distribusi sebelum dan sesudah implementasi AMI, indeks keandalan sistem berupa SAIDI dan SAIFI, waktu respons gangguan, indeks kepuasan pelanggan, potensi energi terbarukan per wilayah, serta analisis ekonomi berupa estimasi Internal Rate of Return (IRR) berbasis manfaat operasional langsung AMI. Analisis IRR dihitung secara konservatif dengan mempertimbangkan penghematan rugi-rugi distribusi, peningkatan keandalan, dan efisiensi pencatatan meter, sementara potensi pemanfaatan backbone komunikasi dibahas secara kualitatif.

Data kualitatif dikumpulkan melalui wawancara semi-terstruktur dengan manajer dan engineer PLN serta regulator atau pembuat kebijakan yang relevan, menggunakan teknik purposive sampling. Secara keseluruhan, penelitian ini

melibatkan 12 wawancara dengan durasi 45 hingga 90 menit per informan, dan data dianalisis menggunakan analisis tematik dengan inter-coder reliability untuk menjaga konsistensi interpretasi. Kerangka analisis dirancang untuk mengevaluasi kinerja awal penerapan AMI serta tingkat keselarasan implementasinya dengan roadmap smart grid nasional sebagaimana tertuang dalam RUPTL 2025–2034. Evaluasi dilakukan dengan memetakan capaian operasional ke dalam dimensi efisiensi, keandalan, fleksibilitas untuk mendukung demand-side management dan integrasi energi terbarukan, serta aspek tata kelola dan penerimaan sosial.

Keselarasan implementasi AMI dianalisis menggunakan Smart Grid Evaluation Index-Indonesia (SGEI-ID), yang diposisikan sebagai kerangka evaluasi heuristik berbasis kebijakan, bukan sebagai indeks pemeringkatan kinerja atau ukuran efisiensi absolut. Pendekatan heuristik dipilih untuk menyesuaikan keterbatasan data, variasi kualitas pelaporan, dan perbedaan tingkat kematangan institusional antar klaster. Indikator dinormalisasi menggunakan pendekatan min-max dan diagregasikan berdasarkan bobot yang mencerminkan prioritas pengembangan smart grid nasional, dengan hasil evaluasi diklasifikasikan ke dalam kategori Partial, Strong Partial, dan Full Alignment yang bersifat interpretatif. Validitas dan reliabilitas penelitian dijaga melalui cross-check sumber data kuantitatif, triangulasi data kualitatif, serta benchmarking dengan temuan empiris dari negara lain yang telah menerapkan AMI dan smart grid pada tahap awal maupun lanjut.

HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Capaian Operasional dari Implementasi AMI

Penerapan *Advanced Metering Infrastructure* (AMI) di Indonesia, saat ini mencakup sekitar 1,2 juta pelanggan (setara 1,4% dari total pelanggan nasional), namun telah menghasilkan peningkatan operasional yang terukur. Tabel 1 merangkum hasil perbandingan kondisi sebelum dan sesudah implementasi.

Tabel 1. Indikator Kinerja Operasional (KPI) Sebelum dan Sesudah Implementasi AMI (2022–2024)

Indicator	Pre- (2022)	Post- (2024)	Change (%)
Distribution Loss Rate (%)	9.3	8.5	–9%
SAIDI (minutes/year)	463	320	–30%
SAIFI (interruptions/year)	5.62	3.23	–42%
Outage Response Time (minutes)	22	19	–14%
Customer Satisfaction Index (%)	88	91	+3 pts

Jika dibandingkan dengan tolok ukur internasional, di mana adopsi awal AMI umumnya menghasilkan penurunan rugi-rugi energi sebesar 5–10% serta peningkatan keandalan sebesar 20–30%, kinerja Indonesia berada dalam kisaran praktik terbaik global. Secara khusus:

1. Efisiensi distribusi meningkat, ditunjukkan dengan penurunan rugi-rugi energi sebesar 0,8 poin persentase, setara dengan penghematan sekitar 33,9 GWh per tahun, hal ini sebanding dengan kebutuhan listrik tahunan hampir 9.600 rumah tangga.

2. Keandalan sistem membaik secara signifikan, dengan penurunan SAIDI sebesar 143 menit dan SAIFI sebesar 2,39 kejadian, sehingga menempatkan Indonesia lebih dekat dengan target RUPTL (<300 menit SAIDI dan <3,0 SAIFI).
3. Kepuasan pelanggan meningkat sebesar tiga poin persentase, meskipun kenaikan yang relatif kecil namun bermakna, terutama mengingat tingkat kepercayaan publik terhadap utilitas di negara berkembang secara historis cenderung rendah.

B. Penurunan Rugi-Rugi Distribusi

Rugi-rugi turun dari 9,3% menjadi 8,5% (-0,8 poin persentase). Dengan permintaan tahunan 4.235 GWh di klaster yang sudah menerapkan AMI, hal ini setara dengan penghematan 33,9 GWh/tahun (≈ 9.600 rumah tangga). Penurunan ini dipicu oleh:

1. Pemantauan granular terhadap feeder dan transformator.
2. Deteksi kerugian non-teknis (pencurian, kecurangan).
3. Penagihan akurat yang menghilangkan kesalahan manual.

Tabel 2. Analisis Rugi-Rugi per Klaster

Cluster	Baseline 2022 (%)	Post-AMI 2024 (%)	Relative (%)
DKI Jakarta	5.79	5.46	-5.7%
Jawa Barat	6.51	6.20	-4.8%
Jawa Tengah	7.02	6.77	-3.7%
Jawa Timur	6.42	6.54	+1.9%
Banten	4.24	4.75	+12%
Sumatera Utara	8.29	7.76	-6.4%
Bali	5.22	5.11	-2.1%
Sulselrabar	6.53	6.31	-3.4%

Secara keseluruhan, AMI berhasil menurunkan rugi-rugi menuju target RUPTL (<8%), meski pencapaian penuh masih memerlukan perluasan lebih lanjut.

C. Peningkatan Keandalan

Penerapan AMI meningkatkan durasi maupun frekuensi gangguan.

1. SAIDI turun dari 463 \rightarrow 320 menit (-30%), hampir mencapai target RUPTL (<300).
2. SAIFI turun dari 5,62 \rightarrow 3,23 (-42%), mendekati target RUPTL (<3,0).

Tabel 3. Keandalan per Klaster

Cluster	SAIDI 2022 (min)	SAIDI 2024 (min)	Change (%)	SAIFI 2022	SAIFI 2024	Change (%)
DKI Jakarta	36	25.8	-28%	0.8	0.65	-19%
Jawa Barat	572	257	-55%	6.61	3,11	-52%
Jawa Tengah	437	177	-59%	5.43	2.28	-58%
Jawa Timur	279	97.8	-65%	3.22	1.78	-45%
Banten	153	100	-35%	1.97	1.04	-47%
Sumatera Utara	562	369	-34%	6.89	3,56	-48%
Bali	63.6	62.4	-1.9%	1.29	0,91	-29%
Sulselrabar	493	455	-7.7%	7.65	5,28	-31%

Hasil ini menunjukkan AMI memungkinkan deteksi gangguan lebih cepat, *remote switching*, dan pemeliharaan preventif.

D. Kepuasan Pelanggan pada klaster AMI

Indeks Kepuasan Pelanggan (CSI) pada klaster implementasi AMI meningkat dari 88% menjadi 91%, didorong oleh:

1. Penagihan akurat (tanpa estimasi).
2. Kenyamanan & privasi (tanpa kunjungan petugas pencatat meter).
3. Persepsi modernisasi (pelanggan merasa “naik kelas” dengan perangkat digital).

Komentar survei menunjukkan bahwa rumah tangga menganggap AMI sebagai teknologi bergengsi yang meningkatkan citra PLN sebagai utilitas modern. Penerimaan sosial ini akan menjadi modal penting bagi adopsi DSM di masa depan.

E. Keselarasan dengan Roadmap Smart Grid Nasional

Roadmap Smart Grid Indonesia (RUPTL 2025–2034) menekankan empat pilar strategis: (i) efisiensi operasional, (ii) keandalan & ketahanan, (iii) fleksibilitas untuk integrasi energi terbarukan dan DSM, serta (iv) digitalisasi & keterlibatan pelanggan. Hasil evaluasi menggunakan kerangka Smart Grid Evaluation Index–Indonesia (SGEI-ID) menunjukkan bahwa meskipun AMI memberikan dampak positif terhadap efisiensi dan keandalan, keselarasan dengan roadmap nasional masih bersifat parsial. Hambatan terbesar terdapat pada dimensi fleksibilitas (DSM dan integrasi energi terbarukan) yang belum berkembang optimal, serta aspek tata kelola dan penerimaan sosial yang masih perlu diperkuat.

Tabel 5. Skor SGEI-ID dan Status Keselarasan per Klaster (2024)

Cluster	Operational Efficiency	Reliability & Resilience	Flexibility (RE/DSM)	Governance & Social Acceptance	SGEI Score	Alignment Status
DKI Jakarta	100	96	50	69	84	Strong Partial
Jawa Barat	75	97	50	68	76	Partial
Jawa Tengah	70	100	50	67	74	Partial
Jawa Timur	84	100	50	66	79	Partial
Banten	97	100	50	67	84	Strong Partial
Sumatera Utara	24	79	50	65	51	Partial
Bali	100	100	50	70	86	Strong Partial
Sulawesi Selatan	50	47	50	65	52	Partial

Tidak ada klaster yang mencapai Full Alignment. DKI Jakarta, Banten, dan Bali memperoleh kategori *Strong Partial* berkat kinerja efisiensi dan keandalan yang mendekati target roadmap. Namun, Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur, Sumatera Utara, dan Sulawesi Selatan masih berada pada level *Partial*, terutama karena

tingginya gap pada aspek fleksibilitas DSM, integrasi energi terbarukan, serta keterbatasan tata kelola digitalisasi.

F. Skenario Skalabilitas dan Implikasi Kebijakan

Walaupun capaian awal AMI di Indonesia sudah menunjukkan manfaat nyata pada efisiensi, keandalan, dan kepuasan pelanggan, kontribusinya masih terbatas karena cakupan yang rendah ($\approx 1,4\%$ pelanggan). Oleh karena itu, strategi perlu dibedakan antar-klaster berdasarkan skor **SGEI-ID** dan status keselarasan terhadap roadmap smart grid nasional. Temuan utama per klaster.

1. Klaster dengan kesiapan digital tinggi (DKI Jakarta, Banten, Bali) → layak upgrade penuh dengan fokus pada DSM, tarif dinamis, showcase smart grid, dan pengendalian kerugian non-teknis.
2. Klaster industri dengan rugi-rugi dan SAIDI/SAIFI tinggi (Jawa Barat, Jawa Tengah, Jawa Timur) → memerlukan rollout prioritas, dengan strategi AMI berbasis cluster, DSM industri, serta otomasi jaringan.

Klaster dengan potensi energi terbarukan besar (Sumatera Utara, Sulawesi Selatan) → diarahkan pada upgrade berbasis RE, mencakup integrasi dengan DERMS, storage, dan microgrid pilot berbasis hidro-surya.

Tabel 6. Matriks Skalabilitas dan Aksi Kebijakan per Klaster (2024)

Klaster	Skor SGEI-ID	Status Keselarasan	Rekomendasi Aksi	Implikasi Kebijakan
DKI Jakarta	84	Strong Partial	Upgrade Prioritas 1	Manfaatkan digitalisasi tinggi & kepadatan konsumsi untuk meluncurkan DSM pilot & tarif dinamis.
Jawa Barat	76	Partial	Rollout Prioritas	Fokus pada DSM industri & otomasi untuk menurunkan SAIDI/SAIFI yang tinggi.
Jawa Tengah	74	Partial	Rollout Prioritas	Prioritaskan reduksi rugi-rugi & integrasi RE di zona campuran residensial-industri.
Jawa Timur	79	Partial	Rollout Prioritas	Perluasan AMI di klaster industri sembari menyiapkan fungsi RE-ready.
Banten	84	Strong Partial	Upgrade Prioritas 1	Perluasan AMI di hub industri dengan fokus pada pengendalian pencurian & monitoring.
Sumatera Utara	51	Partial	Upgrade Prioritas 2	Prioritaskan integrasi RE (hidro/surya) dengan dukungan DERMS & pilot storage.
Bali	86	Strong Partial	Full Upgrade	Jadikan Bali showcase smart grid (pariwisata hijau, integrasi RE, microgrid pariwisata).
Sulawesi Selatan	52	Partial	Upgrade Prioritas 2	Perluasan AMI di wilayah kaya hidro-surya dengan microgrid berbasis cluster.

G. Implikasi kebijakan utama:

Strategi rollout berbeda per klaster, menyesuaikan karakter konsumsi, potensi RE, dan kesiapan digital. Inovasi pembiayaan melalui PPP, green bonds, serta pinjaman lunak internasional untuk mendukung investasi. Reformasi kelembagaan mencakup regulasi tarif DSM, keamanan siber, dan penguatan kapasitas SDM digital.

H. Implikasi Ekonomi per Klaster

Analisis ekonomi per klaster menunjukkan bahwa kelayakan awal penerapan Advanced Metering Infrastructure (AMI) di Indonesia bervariasi secara signifikan, tergantung pada karakteristik permintaan listrik, tingkat rugi-rugi distribusi awal, serta potensi peningkatan keandalan sistem. Klaster dengan kepadatan beban tinggi dan volume konsumsi besar, seperti DKI Jakarta, Jawa Barat, dan Jawa Timur, menunjukkan profil ekonomi yang relatif lebih kuat dibandingkan klaster lainnya. Selain itu, klaster dengan potensi sinergi energi terbarukan, seperti Bali, Sumatera Utara, dan Sulawesi Selatan, juga memperlihatkan prospek jangka menengah yang lebih menjanjikan.

Sebaliknya, klaster seperti Banten dan Jawa Tengah menunjukkan tingkat pengembalian yang lebih rendah apabila hanya dievaluasi berdasarkan manfaat operasional langsung. Kondisi ini terutama disebabkan oleh tingkat rugi-rugi awal yang relatif rendah atau struktur konsumsi yang tersebar, sehingga penghematan finansial dari penerapan AMI belum optimal. Pada klaster-klaster tersebut, peningkatan kelayakan ekonomi memerlukan intervensi tambahan, seperti penguatan pengendalian kerugian non-teknis, otomasi jaringan lanjutan, atau integrasi proyek energi terbarukan.

Perhitungan Internal Rate of Return (IRR) yang disajikan dalam Tabel 7 disusun secara konservatif, dengan hanya memasukkan manfaat operasional langsung dari penerapan AMI, yaitu penurunan rugi-rugi distribusi, peningkatan keandalan sistem (SAIDI dan SAIFI), serta efisiensi pencatatan meter. Berdasarkan pendekatan ini, nilai IRR berada pada kisaran 1,5% hingga 14% antar-klaster. Nilai tersebut mencerminkan karakteristik umum investasi infrastruktur digital pada tahap awal implementasi, khususnya di negara berkembang, di mana manfaat finansial jangka pendek belum sepenuhnya terealisasi.

Meskipun infrastruktur komunikasi AMI memiliki potensi pemanfaatan multipurpose di luar fungsi ketenagalistrikan, seperti untuk mendukung layanan komunikasi digital, potensi tersebut tidak dimasukkan dalam perhitungan IRR kuantitatif pada penelitian ini. Hal ini disebabkan oleh ketergantungannya pada faktor eksternal, termasuk kerangka regulasi, model bisnis, dan struktur pasar yang belum terbentuk secara seragam. Oleh karena itu, kontribusi ekonomi dari pemanfaatan multipurpose diposisikan sebagai peluang strategis jangka menengah hingga panjang, dan dibahas secara kualitatif, bukan sebagai dasar utama penilaian kelayakan finansial pada tahap awal implementasi AMI. Temuan ini menegaskan bahwa variasi kelayakan ekonomi antar-klaster terutama dipengaruhi oleh karakteristik permintaan, kondisi jaringan awal, dan skala implementasi AMI, bukan semata-mata oleh teknologi AMI itu sendiri.

Tabel 7. Implikasi Ekonomi Implementasi AMI per Klaster (2024)

Cluster	Annual Consumption (GWh)*	Loss Reduction (%)	Avoided Losses (GWh/yr)*	Estimated Savings (IDR Bn/yr)*	Indicative IRR (%)*	Economic Implication
DKI Jakarta	41,610	0.33	137.30	233.4	9.30	Strong economic case due to dense demand; IRR > hurdle rate.
Jawa Barat	66,032	0.31	204.60	347.8	10.60	Requires industrial DSM to enhance returns.
Jawa Tengah	36,539	0.25	91.3	155.2	9.10	Viability moderate; rollout must be tied with RE projects.
Jawa Timur	47,309	-0.12	-56.8	-96.5	6.50	High demand centers support viable rollout.
Banten	31,739	-0.45	-142.8	-242.7	1.50	Lower losses limit savings; needs theft monitoring focus.
Sumatera Utara	11,832	0.22	26	44.2	8.00	Strong RE potential; DERMS integration enhances IRR.
Bali	8,000	0.8	64	108.8	12.00	Showcase potential; green tourism justifies full upgrade.
Sulawesi Selatan	15,000	0.9	135	229.5	14.00	Hydro + solar support positive economics.

Pada beberapa klaster, nilai Internal Rate of Return (IRR) tetap menunjukkan angka positif meskipun komponen penurunan rugi-rugi distribusi bernilai negatif. Kondisi ini terjadi karena perhitungan IRR dalam penelitian ini didasarkan pada agregasi manfaat operasional langsung, di mana peningkatan keandalan system yang tercermin dari penurunan SAIDI dan SAIFI, serta efisiensi operasional non-teknis memberikan kontribusi ekonomi yang lebih dominan dibandingkan penghematan energi akibat penurunan rugi-rugi semata.

Nilai IRR dihitung dari agregasi manfaat operasional langsung AMI, termasuk perubahan rugi-rugi distribusi, peningkatan keandalan (SAIDI/SAIFI), dan efisiensi operasional non-teknis. Oleh karena itu, pada beberapa klaster, nilai IRR dapat tetap positif meskipun komponen penurunan rugi-rugi bernilai negatif. Nilai IRR yang rendah pada klaster tersebut mencerminkan bahwa manfaat keandalan dan efisiensi operasional hanya mampu mengkompensasi sebagian dampak negatif dari perubahan rugi-rugi.

I. Kepuasan Pelanggan dan Dampak Sosial

Survei nasional 2024 menunjukkan CSI 97,4%, jauh di atas benchmark global (80–90%). Per klaster diperkirakan 93–98%. Poin penting. Penerimaan sosial sangat tinggi, didukung transparansi tagihan, kenyamanan, dan citra modern. AMI dipersepsikan sebagai peningkatan kualitas layanan, bukan sekadar alat pencatat. Tingkat kepercayaan ini menjadi fondasi kuat bagi program DSM dan integrasi energi

terbarukan di masa depan. Namun, untuk mempertahankan legitimasi sosial, perlu diperkuat aspek keamanan data, transparansi tarif, dan edukasi konsumen.

J. Keterkaitan Temuan dengan Literatur

Temuan penelitian ini mendukung perspektif transisi sosio-teknis yang memandang Advanced Metering Infrastructure (AMI) sebagai lapisan digital fondasional, bukan sebagai solusi smart grid yang berdiri sendiri. Sejalan dengan teori pelapisan infrastruktur dan ketergantungan jalur (infrastructure layering dan path dependency), perbaikan kinerja operasional yang teramati, seperti penurunan rugi-rugi distribusi, peningkatan keandalan sistem, dan meningkatnya kepuasan pelanggan, merepresentasikan capaian efisiensi awal yang dimungkinkan oleh proses digitalisasi. Namun, fungsi smart grid yang lebih lanjut, termasuk demand-side management (DSM) dan integrasi energi terbarukan skala besar, masih dibatasi oleh kesiapan kelembagaan dan kerangka regulasi. Dengan demikian, AMI berperan sebagai teknologi pemungkin (enabling technology) yang menurunkan asimetri informasi dan friksi operasional, tetapi tidak secara otomatis menjamin terjadinya transformasi sistemik. Temuan ini menegaskan bahwa pengembangan smart grid di negara berkembang bersifat bertahap dan memerlukan investasi komplementer pada tata kelola, desain pasar, dan kapasitas organisasi agar penerapan infrastruktur digital dapat diterjemahkan menjadi transisi sosio-teknis yang utuh.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa implementasi AMI di Indonesia telah menghasilkan perbaikan kinerja operasional yang terukur, terutama pada aspek pengendalian rugi-rugi, keandalan (SAIDI/SAIFI), serta pengalaman pelanggan. Temuan ini memperkuat literatur yang menempatkan AMI sebagai fondasi digital smart grid karena kemampuannya menyediakan data granular dan komunikasi dua arah yang mendukung deteksi anomali, percepatan pemulihan gangguan, serta transparansi penagihan (Kornatka & Poplawski, 2021; Sovacool et al., 2021).

Pada dimensi rugi-rugi distribusi, penurunan yang terjadi pada wilayah implementasi menunjukkan bahwa AMI dapat menjadi instrumen pengendalian losses melalui penguatan monitoring dan identifikasi non-technical losses secara lebih cepat (Gabriel et al., 2025). Pada dimensi keandalan, perbaikan SAIDI/SAIFI mengindikasikan bahwa manfaat AMI tidak berdiri sendiri, melainkan meningkat ketika dikombinasikan dengan penguatan proses operasi dan otomatisasi jaringan, sebagaimana juga ditekankan dalam studi smart grid pada konteks utilitas (Ibhaze et al., 2020).

Namun, dibandingkan praktik di negara maju, manfaat AMI di Indonesia pada tahap ini masih cenderung dominan pada “operational efficiency gains”, sementara fungsi “smartness” yang lebih maju, seperti demand-side management (DSM), tarif dinamis, dan orkestrasi integrasi energi terbarukan masih belum terealisasi secara sistematis. Kesenjangan ini konsisten dengan literatur negara berkembang yang menyoroti bahwa hambatan utama smart grid bukan hanya teknologi, tetapi juga kesiapan regulasi, kapasitas tata kelola data, dan investasi pendukung (World Bank, 2016a; 2016b). Dengan demikian, capaian awal AMI dapat dipahami sebagai tahap fondasional: penting dan menjanjikan, tetapi belum otomatis menghasilkan keselarasan penuh dengan roadmap smart grid nasional tanpa intervensi kebijakan dan kelembagaan yang spesifik.

K. Keselarasan Roadmap dan Implikasi Kebijakan

Evaluasi keselarasan roadmap dalam penelitian ini dilakukan menggunakan kerangka SGEI-ID sebagai alat evaluasi heuristik, bukan sebagai indeks pemeringkatan absolut. Oleh karena itu, klasifikasi klaster ke dalam kategori Strong Partial dan Partial mencerminkan tingkat kesiapan relatif berdasarkan indikator yang diamati, bukan penilaian komprehensif terhadap keseluruhan sistem ketenagalistrikan nasional.

Evaluasi dengan kerangka **SGEI-ID** menunjukkan bahwa tidak ada klaster yang mencapai *Full Alignment*. Namun, terdapat tiga kategori utama:

1. **Strong Partial:** DKI Jakarta, Banten, dan Bali.
 - a. Jakarta & Banten → *Upgrade Prioritas 1* dengan fokus pada DSM, tarif dinamis, dan kontrol kerugian non-teknis.
 - b. Bali → *Full Upgrade*, diposisikan sebagai *showcase smart grid* berbasis pariwisata hijau dan integrasi energi terbarukan.
2. **Partial (Rollout Prioritas):** Jawa Barat, Jawa Tengah, dan Jawa Timur.
Fokus pada DSM industri, otomasi jaringan, serta reduksi rugi-rugi di zona campuran residensial-industri.
3. **Partial (Upgrade Prioritas 2):** Sumatera Utara dan Sulawesi Selatan.
Didorong oleh potensi energi terbarukan hidro-surya dengan dukungan DERMS, storage, dan microgrid.

Implikasi kebijakan utamanya adalah Strategi rollout harus berbeda per klaster, tidak bisa *one size fits all*. Perlu reformasi regulasi DSM dan tarif dinamis, termasuk standar keamanan data. Model pembiayaan inovatif (PPP, green bonds, pinjaman lunak) dibutuhkan agar ekspansi AMI lebih feasible. Dengan demikian, implikasi kebijakan yang diusulkan harus dipahami sebagai rekomendasi berbasis bukti awal (*evidence-informed*), yang memerlukan pengujian lanjutan serta penyesuaian kontekstual sebelum diadopsi pada skala nasional.

Tantangan Skalabilitas dan Pelajaran bagi Negara Berkembang

Walaupun manfaat awal jelas terlihat, cakupan AMI masih sangat rendah ($\pm 1,4\%$ pelanggan). Tantangan utama meliputi kebutuhan investasi miliaran dolar AS untuk meter, komunikasi, dan pusat data. Kapasitas manajemen data, pelatihan SDM digital, dan interoperabilitas sistem. Ketiadaan kerangka DSM, tarif dinamis, dan perlindungan data yang kuat. Kondisi kepulauan menuntut strategi berbeda per wilayah.

L. Implikasi Ekonomi dan IRR

Analisis ekonomi penerapan AMI dalam penelitian ini disusun secara konservatif dengan hanya mempertimbangkan manfaat operasional langsung, yaitu perubahan rugi-rugi distribusi, peningkatan keandalan (SAIDI/SAIFI), serta efisiensi pencatatan meter. Dalam pendekatan ini, komponen perubahan rugi-rugi dapat bernilai negatif pada beberapa klaster, namun perhitungan Internal Rate of Return (IRR) didasarkan pada agregasi seluruh manfaat operasional tersebut. Oleh karena itu, nilai IRR dapat tetap positif meskipun penurunan rugi-rugi belum tercapai, selama manfaat peningkatan keandalan dan efisiensi operasional masih memberikan kontribusi ekonomi bersih. Berdasarkan pendekatan tersebut, nilai IRR berada pada

kisaran 1,5% hingga 14% antar-klaster, mencerminkan karakteristik umum investasi infrastruktur digital pada tahap awal di negara berkembang.

Nilai IRR yang relatif lebih tinggi pada klaster tertentu, seperti Bali dan Sulawesi Selatan, terutama dipengaruhi oleh kombinasi kepadatan permintaan, potensi integrasi energi terbarukan, dan ruang peningkatan keandalan sistem. Sebaliknya, klaster dengan IRR rendah menunjukkan bahwa manfaat finansial AMI belum optimal apabila tidak disertai dengan intervensi tambahan, seperti pengendalian kerugian non-teknis atau penguatan otomasi jaringan. Meskipun infrastruktur komunikasi AMI memiliki potensi untuk dimanfaatkan secara multipurpose di masa depan, termasuk sebagai enabler layanan digital lainnya, potensi tersebut tidak dimasukkan dalam perhitungan IRR kuantitatif pada penelitian ini. Hal ini disebabkan oleh ketergantungan yang tinggi terhadap faktor eksternal, seperti kerangka regulasi, model bisnis, serta struktur pasar yang belum terbentuk secara seragam. Oleh karena itu, pemanfaatan multipurpose diposisikan sebagai peluang strategis jangka menengah hingga panjang dan dibahas secara kualitatif, bukan sebagai dasar utama penilaian kelayakan ekonomi tahap awal.

M. Etika Profesi dan Keselamatan Kerja

Implementasi Advanced Metering Infrastructure (AMI) tidak hanya merupakan isu teknis dan ekonomi, tetapi juga memiliki dimensi etika dan keselamatan kerja yang signifikan. Dari perspektif etika profesi, penerapan AMI menuntut perlindungan terhadap hak-hak konsumen, khususnya terkait privasi dan keamanan data konsumsi listrik. Data granular yang dihasilkan oleh AMI harus dikelola dengan prinsip integritas, transparansi, dan akuntabilitas agar tidak menimbulkan risiko penyalahgunaan maupun penurunan kepercayaan publik terhadap utilitas.

Selain itu, keberhasilan implementasi AMI juga bergantung pada pengelolaan aspek kesehatan dan keselamatan kerja (K3) secara sistematis. Proses instalasi, penggantian meter, dan pemeliharaan infrastruktur AMI melibatkan risiko kerja lapangan, termasuk bahaya listrik dan pekerjaan pada lingkungan bertegangan. Oleh karena itu, penerapan standar K3, pelatihan teknis, serta penyediaan alat pelindung diri merupakan prasyarat penting untuk melindungi pekerja dan memastikan keberlanjutan operasional proyek.

Secara keseluruhan, integrasi prinsip etika profesi dan K3 dalam implementasi AMI memperkuat legitimasi sosial dan keandalan institusional proyek. Dalam konteks transisi energi Indonesia, pendekatan ini memastikan bahwa modernisasi sistem kelistrikan tidak hanya menghasilkan peningkatan kinerja teknis, tetapi juga mencerminkan praktik rekayasa yang bertanggung jawab dan berorientasi pada kesejahteraan publik.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan awal Advanced Metering Infrastructure (AMI) di Indonesia telah memberikan manfaat operasional yang terukur, meskipun cakupannya masih terbatas (sekitar 1,4% pelanggan). Secara empiris, implementasi AMI berkontribusi pada penurunan rugi-rugi distribusi, peningkatan keandalan sistem (SAIDI dan SAIFI), serta tingkat kepuasan pelanggan yang sangat tinggi di seluruh klaster yang diamati. Temuan ini menegaskan peran

AMI sebagai fondasi digital yang penting dalam modernisasi sistem distribusi tenaga listrik.

Namun demikian, hasil evaluasi menggunakan kerangka SGEI-ID menunjukkan bahwa keselarasan penerapan AMI dengan roadmap smart grid nasional masih bersifat parsial. Tidak ada klaster yang mencapai tingkat Full Alignment, dengan kesenjangan utama teridentifikasi pada dimensi demand-side management (DSM), kesiapan integrasi energi terbarukan, serta tata kelola data dan kelembagaan. Hal ini mengindikasikan bahwa keberhasilan AMI pada tahap awal lebih mencerminkan peningkatan efisiensi operasional, dibandingkan transformasi smart grid yang bersifat sistemik.

Dari perspektif ekonomi, analisis konservatif yang hanya mempertimbangkan manfaat operasional langsung menunjukkan bahwa kelayakan finansial AMI bervariasi antar-klaster dan belum sepenuhnya kuat apabila dipandang sebagai proyek tunggal. Oleh karena itu, hasil penelitian ini menekankan bahwa nilai strategis AMI pada tahap awal lebih tepat dipahami sebagai investasi fondasional yang mendukung transformasi jangka panjang sistem kelistrikan, daripada sebagai instrumen dengan pengembalian finansial jangka pendek yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alghamdi, M., & Rahman, M. (2023). Transforming the electrical grid: The role of AI in advancing smart, sustainable, and secure energy systems. *Energies*, 16(12), 4572. <https://doi.org/10.3390/en16124572>
- Arifin, Z., Setyobudi, R., & Elnur, K. A. (2023). Cost-benefit analysis of advanced metering infrastructure implementation for strengthening smart city initiatives in Indonesia. In *Smart Cities and Digital Transformation* (pp. 301–317). Emerald. <https://doi.org/10.1108/978-1-80455-994-920231014>
- Bagdadee, A. H., & Zhang, L. (2025). Investigating smart grid-integrated renewable distributed generation for sustainable energy development in Bangladesh. *Energy Reports*, 13, 2433–2453. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2025.01.083>
- Boateng, N. S., Liscio, M. C., Sospiro, P., & Talluri, G. (2025). Economic cost-benefit analysis of smart grid implementation in China. *Sustainability*, 17, 2946. <https://doi.org/10.3390/su17072946>
- Cambini, C., Meletiou, A., Bompard, E., & Masera, M. (2016). Market and regulatory factors influencing smart-grid investment in Europe. *Energy Policy*, 94, 189–199. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.03.028>
- Ethical considerations in advanced metering infrastructure integration. (2023). *Energy Reports*, 9, 5678–5692. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.11.067>
- Gabriel, L. M. N., Adebisi, J. A., Ndjuluwa, L. N. P., & Chembe, D. K. (2025). Deployment of smart grid technologies for reliability enhancement in electricity distribution networks. *Franklin Open*, 10, 100227. <https://doi.org/10.1016/j.fraope.2025.100227>
- Geels, F. W. (2011). The multi-level perspective on sustainability transitions: Responses to seven criticisms. *Environmental Innovation and Societal Transitions*, 1(1), 24–40. <https://doi.org/10.1016/j.eist.2011.02.002>
- Ibhaze, A. E., Akpabio, M. U., & Akinbulire, T. O. (2020). A review on smart metering infrastructure. *International Journal of Energy Technology and Policy*, 16(3), 277–301. <https://doi.org/10.1504/IJETP.2020.107019>

- International Energy Agency. (2022). Enhancing Indonesia's power system: Pathways to meet renewable targets in 2025 and beyond. OECD/IEA. <https://www.iea.org/reports/enhancing-indonesias-power-system>
- International Energy Agency. (2024). Unlocking smart grid opportunities in emerging markets and developing economies. OECD/IEA. <https://www.iea.org/reports/unlocking-smart-grid-opportunities>
- Kabeyi, M. J. B., & Olanrewaju, O. A. (2023). Smart grid technologies and applications in the sustainable energy transition: A review. *International Journal of Sustainable Energy*, 42(1), 685–758. <https://doi.org/10.1080/14786451.2023.2222298>
- Kalyani, P., & Bedi, G. (2023). Smart city governance in developing countries: A systematic literature review. *Journal of Urban Technology*, 30(2), 115–134. <https://doi.org/10.1080/10630732.2023.2212345>
- Kornatka, M., & Popławski, T. (2021). Advanced metering infrastructure: Towards a reliable network. *Energies*, 14, 5986. <https://doi.org/10.3390/en14185986>
- Nangia, V., Oguah, S., & Gaba, K. (2016). Smartening the grid in developing countries: Emerging lessons from World Bank lending. *World Bank Live Wire Series* 2016/69. <https://documents1.worldbank.org>
- Ohanu, C. P., Rufai, S. A., & Oluchi, U. C. (2024). Recent developments in smart grid integration with renewable energy resources: A comprehensive review. *Heliyon*, 10, e25705. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25705>
- Pratama, R., & Widodo, S. (2022). Cluster prioritization in advanced metering infrastructure strategic implementation in Indonesia. *Journal of Electrical Systems and Information Technology*, 9(2), 45–58.
- PT PLN (Persero). (2025). Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2025–2034. Jakarta: PT PLN (Persero).
- Ryu, D.-H., & Kim, K.-J. (2024). The influence of information privacy concerns on the intention to use advanced metering infrastructure. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113851. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113851>
- Sambodo, M. T., Silalahi, M., & Firdaus, N. (2024). Technology development in the energy sector and its implications for Indonesia. *Heliyon*, 10, e27645. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27645>
- Sovacool, B. K., Hook, A., Sareen, S., & Geels, F. W. (2021). Sustainability, innovation, and governance dynamics of national smart electricity meter transitions. *Global Environmental Change*, 68, 102272. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102272>
- Specht, M., Rohjans, S., Trefke, J., Uslar, M., & González, J. M. (2013). International smart grid roadmaps and their assessment. *EAI Endorsed Transactions on Energy Web*, 13(1), e2. <https://doi.org/10.4108/trans.ew.2013.01-06.e2>
- Wei, T., Li, H., & Miao, J. (2025). Integration and development paths of smart grid technology: Policy frameworks and application challenges. *Processes*, 13, 2428. <https://doi.org/10.3390/pr13082428>
- Xu, W., Zhou, D., Huang, X., Lou, B., & Liu, D. (2020). Optimal allocation of power supply systems considering multi-energy complementarity and demand response. *Applied Energy*, 275, 115407. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115407>

Zhang, D., & Wang, Y. (2023). Environmental implications of overseas energy infrastructure projects after the Belt and Road Initiative. *Energy Policy*, 178, 113548. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113548>