

Penerapan Smart Grid pada Sistem Distribusi Listrik di Sumatera Utara: Analisis Efisiensi Energi, Keandalan Pasokan, dan Tantangan Implementasi Teknologi Modern di Era Transisi Energi

Riko Putra Ananta Tarigan¹, Parlin Siagian², Dino Erivianto³

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Pembangunan Panca Budi, Medan
¹rikoputraananta889@gmail.com, ²parlinsiagian@dosen.pancabudi.ac.id, ³dinoer78@gmail.com

ABSTRACT

The rapid growth of electricity demand demands an efficient and reliable electricity distribution system. Conventional distribution systems in Indonesia still face various obstacles such as high power losses, low supply fulfillment, and uneven network infrastructure. Smart grids are present as an innovative solution through the integration of information and communication technology (ICT) in distribution systems, which allows real-time monitoring and control of power flow. This study aims to examine the effect of smart grid implementation on the efficiency and efficiency of electricity distribution systems, as well as identify the challenges and benefits of implementing them in Indonesia. The research method used is a descriptive qualitative approach based on literature studies from various journals, technical reports, and related policies. The results of the study show that smart grids are able to reduce losses by 3–6% and significantly reduce SAIDI and SAIFI values. In addition, this system increases consumer participation through demand response and facilitates the integration of renewable energy. The main obstacles identified include high investment costs, limited regulations, and low public awareness of this technology. These findings are expected to be a reference in developing a more modern and sustainable electricity distribution system in Indonesia.

Keywords: *Smart Grid, Distribution System, Energy Efficiency, Renewable Energy, SAIDI and SAIFI*

ABSTRAK

Pertumbuhan permintaan listrik yang pesat menuntut sistem distribusi listrik yang efisien dan andal. Sistem distribusi konvensional di Indonesia masih menghadapi berbagai kendala seperti susut daya yang tinggi, pemenuhan pasokan yang rendah, dan infrastruktur jaringan yang tidak merata. Smart grid hadir sebagai solusi inovatif melalui integrasi teknologi informasi dan komunikasi (TIK) dalam sistem distribusi, yang memungkinkan pemantauan dan pengendalian aliran daya secara real-time. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pengaruh penerapan smart grid terhadap efisiensi dan efektivitas sistem distribusi listrik, serta mengidentifikasi tantangan dan manfaat penerapannya di Indonesia. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kualitatif deskriptif berdasarkan studi literatur dari berbagai jurnal, laporan teknis, dan kebijakan terkait. Hasil penelitian menunjukkan bahwa smart grid mampu menekan susut daya hingga 3–6% dan menurunkan nilai SAIDI dan SAIFI secara signifikan. Selain itu, sistem ini meningkatkan partisipasi konsumen melalui respons permintaan dan memfasilitasi integrasi energi terbarukan. Kendala utama yang teridentifikasi antara lain biaya investasi yang tinggi, regulasi yang terbatas, dan rendahnya kesadaran masyarakat terhadap teknologi ini. Temuan ini diharapkan dapat menjadi acuan dalam mengembangkan sistem distribusi listrik yang lebih modern dan berkelanjutan di Indonesia.

Kata Kunci: *Smart Grid, Sistem Distribusi, Efisiensi Energi, Energi Terbarukan, SAIDI dan SAIFI*



1. Pendahuluan

Pertumbuhan populasi dunia yang pesat, diperkirakan mencapai lebih dari 9 miliar jiwa pada tahun 2050, serta laju urbanisasi yang semakin intensif, telah mendorong lonjakan permintaan terhadap energi, terutama energi listrik. Kebutuhan listrik ini tidak hanya dipicu oleh peningkatan jumlah penduduk, tetapi juga oleh perubahan gaya hidup modern yang semakin mengandalkan perangkat elektronik, perkembangan teknologi informasi, serta pertumbuhan sektor industri dan transportasi berbasis listrik [1]. Berdasarkan laporan World Energy Outlook dari International Energy Agency (IEA), konsumsi listrik global meningkat sekitar 2.5% per tahun selama dekade terakhir, dan tren ini diperkirakan akan terus berlanjut, terutama di negara-negara berkembang yang tengah mengalami percepatan pembangunan infrastruktur dan elektrifikasi wilayah terpencil [2]. Namun, meskipun kebutuhan listrik meningkat, sebagian besar pasokan energi dunia masih bergantung pada sumber energi konvensional berbasis fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam [3]. Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil telah menimbulkan berbagai konsekuensi serius, di antaranya peningkatan emisi gas rumah kaca yang mempercepat laju perubahan iklim global, polusi udara yang berdampak buruk terhadap kesehatan manusia, serta ancaman kelangkaan energi akibat sifat sumber daya tersebut yang tidak terbarukan. Laporan Global Status Report oleh REN21 (2023) mencatat bahwa lebih dari 70% emisi karbon global berasal dari sektor energi, menunjukkan bahwa sistem energi saat ini belum sejalan dengan target-target keberlanjutan global, seperti yang dirumuskan dalam Perjanjian Paris dan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs).

Krisis energi yang disebabkan oleh ketidakstabilan geopolitik, fluktuasi harga minyak, serta gangguan rantai pasok global seperti yang terjadi selama pandemi COVID-19 dan konflik Rusia Ukraina semakin menekankan pentingnya diversifikasi dan desentralisasi sumber energi. Sistem energi masa depan dituntut untuk tidak hanya mampu memenuhi kebutuhan listrik secara kuantitatif, tetapi juga harus efisien dalam distribusinya, tangguh terhadap gangguan, dan ramah lingkungan [4].

Di Indonesia, tren peningkatan konsumsi energi listrik juga menunjukkan kecenderungan yang signifikan, seiring dengan pertumbuhan ekonomi, urbanisasi, dan program pembangunan infrastruktur berskala nasional. Program elektrifikasi desa yang dicanangkan oleh pemerintah melalui Perusahaan Listrik Negara (PLN) telah berhasil meningkatkan rasio elektrifikasi nasional menjadi lebih dari 99% pada tahun 2023, namun tantangan pemerataan kualitas dan keandalan pasokan listrik masih menjadi persoalan penting, terutama di wilayah terpencil dan luar Jawa [5]. Peningkatan kebutuhan energi ini juga didorong oleh berkembangnya sektor industri dan digitalisasi di berbagai lini kehidupan, yang membutuhkan pasokan listrik yang stabil dan berkualitas. Meskipun begitu, sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia saat ini masih didominasi oleh struktur konvensional yang cenderung bersifat satu arah dan reaktif, sehingga kurang mampu merespons dinamika permintaan beban secara real-time. Salah satu kendala utama yang dihadapi adalah tingginya tingkat kehilangan daya (technical losses) dalam proses distribusi, yang mencapai rata-rata 8–10% dari total energi yang dibangkitkan, jauh di atas standar internasional [6]. Selain itu, sistem distribusi di banyak daerah masih rentan terhadap gangguan yang menyebabkan pemadaman listrik mendadak (blackout), baik akibat kerusakan peralatan, gangguan cuaca ekstrem, maupun keterbatasan sistem pemantauan dan pengendalian jaringan secara otomatis. Masalah lainnya adalah ketimpangan infrastruktur antara wilayah perkotaan dan pedesaan, di mana sebagian besar infrastruktur distribusi belum mengadopsi teknologi modern yang mampu meningkatkan efisiensi, transparansi, dan keandalan layanan kelistrikan secara menyeluruh.



Dalam menghadapi berbagai tantangan tersebut, dibutuhkan pendekatan baru dalam pengelolaan sistem tenaga listrik yang lebih cerdas dan adaptif, khususnya melalui pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi (TIK) dalam sistem kelistrikan nasional [7]. Transformasi ini tidak hanya ditujukan untuk memperkuat infrastruktur jaringan, tetapi juga untuk meningkatkan kemampuan sistem dalam mendeteksi, merespons, dan mengoptimalkan aliran energi secara real-time. Salah satu solusi modern yang mulai banyak dikembangkan dan diadopsi secara global adalah konsep smart grid, yaitu sistem jaringan listrik yang mengintegrasikan perangkat keras tenaga listrik dengan teknologi digital, sistem sensor, komunikasi data, dan analitik berbasis kecerdasan buatan (AI). Smart grid memungkinkan terjadinya interaksi dua arah antara produsen dan konsumen energi, serta mendukung pembentukan sistem kelistrikan yang lebih efisien, fleksibel, dan berkelanjutan. Fokus utama dari implementasi smart grid terletak pada peningkatan efisiensi energi melalui pengurangan rugi-rugi daya (losses), pengelolaan beban listrik secara dinamis, serta kemampuan untuk mengintegrasikan sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin ke dalam sistem distribusi [8]. Di samping itu, fitur otomatisasi dalam smart grid, seperti automated fault detection, self-healing networks, dan demand response systems, memungkinkan operator jaringan untuk mengantisipasi gangguan dan mempercepat proses pemulihan pasokan listrik, yang pada akhirnya meningkatkan keandalan dan kualitas layanan kepada konsumen [9].

Dalam konteks sistem tenaga listrik semua sistem distribusi menempati posisi yang sangat krusial karena berperan langsung dalam menyalurkan energi listrik dari gardu distribusi ke konsumen akhir [10]. Posisi ini menjadikan sistem distribusi sebagai titik terdepan sekaligus titik paling rentan terhadap berbagai gangguan operasional, baik yang bersifat teknis maupun non-teknis [11]. Ketidakstabilan pada sistem distribusi tidak hanya berdampak pada penurunan kualitas layanan listrik, tetapi juga dapat menyebabkan kerugian ekonomi yang besar, terutama bagi sektor industri dan bisnis yang sangat bergantung pada kontinuitas pasokan listrik. Penerapan teknologi smart grid pada sistem distribusi menawarkan berbagai potensi solusi untuk mengatasi permasalahan tersebut. Dengan dukungan infrastruktur digital dan sensor cerdas, smart grid mampu secara signifikan mengurangi rugi-rugi daya (losses) yang terjadi akibat resistansi jaringan atau distribusi beban yang tidak merata. Selain itu, melalui sistem pemantauan dan kontrol otomatis, smart grid juga meningkatkan keandalan sistem distribusi dengan mempercepat deteksi gangguan serta memperpendek durasi dan frekuensi pemadaman, yang tercermin dalam perbaikan indikator keandalan seperti SAIDI (System Average Interruption Duration Index) dan SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) [12]. Tidak hanya itu, smart grid memungkinkan pengelolaan beban secara real-time, sehingga operator dapat menyesuaikan suplai dan permintaan listrik dengan lebih akurat dan efisien, sekaligus membuka peluang bagi konsumen untuk berpartisipasi aktif dalam pengelolaan energi melalui skema demand response.

Meskipun konsep dan teknologi smart grid telah banyak dikembangkan serta diimplementasikan di berbagai negara maju, studi mendalam mengenai penerapan dan dampaknya pada sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia masih relatif terbatas, khususnya dalam konteks lokal yang mencerminkan karakteristik infrastruktur dan kebijakan nasional [13]. Sebagian besar kajian yang ada masih bersifat konseptual atau fokus pada aspek teknis tertentu, tanpa mengevaluasi secara menyeluruh sejauh mana smart grid mampu meningkatkan efisiensi energi dan keandalan pasokan listrik di tingkat distribusi. Padahal, analisis terhadap dampak nyata dari implementasi smart grid sangat penting sebagai dasar pengambilan kebijakan dan perencanaan investasi teknologi di sektor ketenagalistrikan Indonesia. Selain itu, belum banyak penelitian yang secara komprehensif membahas tantangan implementasi smart grid dalam konteks nasional, baik dari sisi kesiapan infrastruktur, kebutuhan sumber daya



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

manusia, keterbatasan regulasi, maupun tingkat adopsi teknologi oleh penyedia dan konsumen listrik [14]. Oleh karena itu, kajian yang menyoroti manfaat, hambatan, serta potensi pengembangan smart grid dalam sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia menjadi sangat penting dan relevan untuk menjawab tantangan energi masa depan yang lebih efisien dan berkelanjutan. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dampak implementasi smart grid terhadap efisiensi dan keandalan sistem distribusi tenaga listrik, serta mengidentifikasi berbagai manfaat dan tantangan yang muncul dalam proses penerapannya di lapangan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode studi literatur (library research), yang bertujuan untuk memperoleh pemahaman yang luas mengenai penerapan teknologi smart grid dalam sistem distribusi tenaga listrik, serta dampaknya terhadap efisiensi dan keandalan jaringan. Pendekatan ini dipilih karena fokus penelitian berada pada analisis konsep, data sekunder, dan kajian teoretis, bukan pada eksperimen laboratorium atau pengumpulan data lapangan secara langsung. Penelitian ini bersifat eksploratif dan analitis, dengan mengkaji berbagai sumber informasi ilmiah yang relevan sebagai dasar penyusunan argumentasi dan kesimpulan. Sumber data dalam penelitian ini meliputi jurnal ilmiah nasional dan internasional yang membahas implementasi smart grid, efisiensi energi, dan keandalan sistem distribusi seperti laporan resmi dari lembaga seperti PLN, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), International Energy Agency (IEA), serta dokumen kebijakan dan regulasi yang terkait dengan sistem tenaga listrik. Selain itu, buku teks dan publikasi akademik yang relevan dengan bidang teknik elektro dan teknologi energi juga digunakan sebagai referensi [15]. Teknik pengumpulan data dilakukan dengan studi pustaka (dokumentasi), yaitu membaca, menelaah, dan menganalisis isi dokumen yang berhubungan dengan fokus penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil kajian literatur yang dilakukan terhadap berbagai jurnal ilmiah, laporan institusional, dan dokumen teknis, diperoleh sejumlah temuan utama terkait implementasi smart grid dalam sistem distribusi tenaga listrik. Implementasi smart grid terbukti mampu memberikan peningkatan signifikan dalam efisiensi energi, khususnya pada sistem distribusi. Sejumlah studi menunjukkan bahwa teknologi smart grid, melalui pemanfaatan sensor, Advanced Metering Infrastructure (AMI), dan sistem otomatisasi distribusi, mampu mengurangi rugi-rugi daya (technical losses) hingga 3-6% dibandingkan sistem konvensional. Teknologi ini memungkinkan deteksi beban puncak dan penyebaran daya secara optimal, sehingga arus listrik dapat disalurkan melalui jalur yang paling efisien. Selain itu, kemampuan smart grid dalam melakukan load forecasting dan real-time load balancing juga mengurangi risiko overloading dan pemborosan energi.

Dalam hal keandalan, penerapan smart grid telah menunjukkan penurunan signifikan pada frekuensi dan durasi pemadaman listrik. Studi oleh menunjukkan bahwa indikator SAIDI dan SAIFI dapat menurun lebih dari 40% setelah penerapan otomatisasi sistem distribusi berbasis smart grid. Sistem ini memungkinkan deteksi gangguan secara otomatis dan isolasi area terdampak secara cepat, sehingga proses pemulihan jaringan (self-healing) dapat dilakukan dalam hitungan detik atau menit. Di beberapa negara yang telah mengadopsi smart grid secara



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

menyeluruh, seperti Korea Selatan dan Jerman, peningkatan keandalan pasokan listrik bahkan menjadi salah satu indikator keberhasilan utama transformasi digital sistem distribusi. Saat ini, meskipun manfaatnya cukup jelas, penerapan smart grid di Indonesia masih menghadapi sejumlah tantangan. Berdasarkan laporan PLN hambatan utama terletak pada tingginya biaya investasi awal, keterbatasan infrastruktur digital yang merata di seluruh wilayah, serta masih minimnya SDM yang terlatih di bidang teknologi smart grid. Selain itu, belum adanya regulasi teknis nasional yang secara khusus mengatur interoperabilitas perangkat dan standar komunikasi antar sistem juga menjadi penghambat utama dalam percepatan implementasi. Faktor lain seperti resistensi perubahan dari konsumen dan kurangnya edukasi publik juga memperlambat adopsi skema demand response dan AMI secara luas.

1. Pengaruh Implementasi Smart Grid Terhadap Efisiensi Energi Sistem Distribusi

Dalam hasil kajian ini menunjukkan bahwa smart grid berkontribusi signifikan dalam meningkatkan energi pada sistem distribusi tenaga listrik. Teknologi seperti Advanced Metering Infrastructure (AMI), sensor jaringan, dan sistem kendali otomatis memungkinkan identifikasi beban berlebih, deteksi titik rugi-rugi daya (losses), serta pengalihan aliran listrik secara lebih optimal. Sistem konvensional cenderung statis dan tidak memiliki visibilitas terhadap real time, sehingga lebih rentan terhadap pemborosan energi dan distribusi yang tidak efisien. Dengan smart grid, operator jaringan dapat memonitor beban dan konsumsi secara akurat, sehingga distribusi energi dapat disesuaikan dengan kebutuhan aktual. Beberapa studi mencatat pengurangan loss hingga 3-6% setelah implementasi smart grid, yang tidak hanya berdampak pada efisiensi teknis tetapi juga penghematan biaya operasional jaringan.

2. Dampak Smart Grid terhadap Keandalan Pasokan Listrik

Keandalan sistem distribusi mengalami peningkatan signifikan adopsi smart grid, terutama pada penurunan nilai SAISI dan SAIFI. Sistem ini memungkinkan deteksi gangguan secara otomatis dan isolasi area terdampak tanpa perlu intervensi manual, melalui fitur yang dikenal sebagai self-healing network. Ketika terjadi gangguan seperti hubungan singkat atau kerusakan jaringan, sistem smart grid dapat secara otomatis menutup pemutus sirkuit yang sesuai, mengalihkan suplai melalui jalur lain, dan memberi sinyal ke pusat kendali untuk diperbaiki cepat. Hal ini sangat berbeda dengan sistem konvensional yang memerlukan waktu lama untuk pelacakan dan perbaikan gangguan. Dengan demikian, frekuensi dan durasi pemadaman dapat ditekan secara signifikan, meningkatkan kualitas layanan dan kepuasan pelanggan.

Salah satu bentuk implementasi smart grid yang mulai diterapkan oleh PLN di wilayah Medan adalah melalui proyek pemasangan smart meter dan integrasi sistem SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) pada gardu distribusi di beberapa kawasan industri dan pemukiman padat penduduk. Berdasarkan informasi dari PLN Unit Induk Wilayah Sumatera Utara (UIW Sumut), program ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi distribusi serta mengurangi gangguan jaringan akibat beban puncak yang tidak merata. Hasil evaluasi internal PLN menunjukkan bahwa sejak dilakukannya uji coba smart grid di kawasan Medan Johor dan Tanjung Morawa, terjadi penurunan susut daya rata-rata sebesar 4,2%, serta peningkatan keandalan sistem yang ditunjukkan oleh penurunan indeks gangguan SAIDI dari 98 menit menjadi 61 menit per pelanggan per tahun. Selain itu, penggunaan smart meter juga memungkinkan konsumen untuk memantau penggunaan listrik secara mandiri, yang berdampak pada pengurangan konsumsi energi sebesar 3-5% di segmen rumah tangga (PLN UIW Sumut, 2023). Implementasi ini menunjukkan bahwa wilayah Medan memiliki potensi besar untuk



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

menjadi kawasan percontohan smart grid di luar Pulau Jawa, dengan didukung oleh kesiapan infrastruktur dan tingkat konsumsi listrik yang tinggi.

Implementasi smart grid oleh PLN UIW Sumatera Utara I beberapa wilayah Medan didukung oleh data operasional berikut. Berdasarkan laporan internal PLN UIW Sumut (2023), pada tahun 2021 sebelum implementasi smart grid, rata-rata indeks gangguan listrik SAIDI SAIDI (System Average Interruption Duration Index) di wilayah Medan Johor adalah 98 menit/pelanggan/tahun, dan SAIFI (System Average Interruption Frequency Index) sebesar 2,3 kali/pelanggan/tahun. Setelah uji coba smart grid melalui sistem SCADA dan smart meter di 2022, indeks SAIDI turun menjadi 61 menit, dan SAIFI menjadi 1,1 kali/pelanggan/tahun, menunjukkan peningkatan keandalan layanan sebesar lebih dari 35%.

Selain itu, data teknis menunjukkan penurunan rugi daya (technical losses) dari rata-rata 9,6% menjadi 5,3% dalam enam bulan. Data ini didapat dari pengukuran energi yang dibangkitkan di Gardu Induk Medan Baru dan energi yang tercatat masuk ke smart meter di konsumen akhir. Di sisi konsumen, pemakaian listrik rumah tangga tercatat menurun sebesar rata-rata 4,7% setelah edukasi penggunaan smart meter.

Indikator	Sebelum Smart Grid	Sesudah Smart Grid	Persentase Perubahan
SAIDI (Menit)	98	61	-37,7
SAIFI (Kali)	2,3	1,1	-52,2
Rugi Daya (%)	9,6	5,3	-44,8
Konsumsi Listrik Rumah Tangga (kWh/bulan)	274	261	-4,7

Dari data ini menunjukkan bahwa implementasi smart grid tidak hanya berpengaruh secara konseptual, tetapi juga perbaikan nyata dalam performa sistem distribusi listrik PLN di wilayah Medan.

3. Manfaat Implementasi Smart Grid dalam Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Selain meningkatkan efisiensi dan keandalan, smart grid memberikan berbagai manfaat lain bagi penyedia dan konsumen listrik. Bagi penyedia, smart grid membuka peluang pengelolaan beban secara dinamis melalui skema demand response, yang memungkinkan distribusi beban lebih seimbang pada saat puncak. Di sisi konsumen, teknologi ini memberikan visibilitas terhadap pola konsumsi listrik melalui meter pintar (smart meter), sehingga mendorong perilaku konsumsi yang lebih hemat dan sadar energy. Manfaat jangka panjang lainnya adalah kemudahan integrasi energi terbarukan seperti tenaga tata surya dan angin, yang sebelumnya sulit dikendalikan dalam sistem konvensional. Smart grid juga mendukung efisiensi operasional perusahaan listrik dengan mengurangi biaya pemeliharaan, gangguan tak terduga, dan kehilangan pendapatan akibat kesalahan pencatatan konsumsi.

4. Tantangan dan Kendala Implementasi smart Grid di Indonesia

Meskipun potensi smart grid sangat besar, implementasinya di Indonesia masih menghadapi berbagai tantangan. Salah satu hambatan utama adalah kebutuhan investasi awal yang tinggi, baik untuk perangkat keras (seperti sensor, smart meter, kontrol otomatis) maupun perangkat lunak (sistem pemrosesan data dan komunikasi jaringan). Selain itu, keterbatasan infrastruktur digital, terutama di daerah terpencil dan Pulau



Jawa, menyulitkan implementasi teknologi ini secara merata. Dari segi regulasi, Indonesia belum memiliki standar teknis nasional yang mendukung interoperabilitas antar perangkat smart grid, yang dapat memperlambat integrasi berbagai sistem dari vendor berbeda. Di samping itu, pemahaman dan kesadaran masyarakat terhadap manfaat smart grid juga masih rendah, sehingga adopsi teknologi seperti AMI dan demand response belum optimal. Oleh karena itu, implementasi smart grid membutuhkan pendekatan bertahap yang mencakup peningkatan kapasitas SDM, penyusunan regulasi yang mendukung, serta insentif pemerintah bagi penyedia dan konsumen.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kajian yang dilakukan, dapat disimpulkan bahwa implementasi smart grid pada sistem distribusi tenaga listrik memberikan dampak positif yang signifikan terhadap efisiensi dan keandalan jaringan. Teknologi smart grid memungkinkan pengurangan rugi-rugi daya (losses) secara efektif melalui pengelolaan beban berbasis data real-time serta distribusi energi yang lebih optimal. Selain itu, keandalan pasokan listrik juga meningkat dengan adanya sistem otomatisasi yang mampu mendeteksi dan mengisolasi gangguan secara cepat, sebagaimana terlihat dari penurunan nilai SAIDI dan SAIFI di wilayah yang telah mengadopsi smart grid. Secara kuantitatif, penerapan smart grid menunjukkan perbaikan kinerja yang nyata, seperti penurunan SAIDI sebesar 37,7%, SAIFI sebesar 52,2%, dan rugi daya sebesar 44,8%. Hal ini membuktikan bahwa smart grid tidak hanya efektif secara konseptual, tetapi juga memberikan hasil nyata dalam peningkatan efisiensi distribusi dan keandalan pasokan listrik. Manfaat tambahan dari sistem ini mencakup peningkatan fleksibilitas dalam pengelolaan konsumsi energi, integrasi yang lebih baik terhadap sumber energi terbarukan, serta peningkatan kesadaran konsumen melalui teknologi seperti smart meter dan demand response. Namun demikian, implementasi smart grid di Indonesia masih menghadapi tantangan yang cukup besar, terutama terkait dengan kebutuhan investasi awal yang tinggi, keterbatasan infrastruktur digital, minimnya regulasi yang mendukung, dan rendahnya tingkat adopsi masyarakat. Dengan mempertimbangkan manfaat dan tantangan tersebut, implementasi smart grid perlu didorong secara bertahap dan strategis melalui kolaborasi antara pemerintah, penyedia energi, sektor swasta, dan masyarakat. Penguatan regulasi, pengembangan kapasitas sumber daya manusia, serta pemberian insentif bagi adopsi teknologi menjadi kunci sukses transformasi sistem distribusi tenaga listrik di Indonesia menuju sistem yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

REFERENSI

- [1] R. S. Widjaya, "ANALISIS EFISIENSI SOLAR CHARGE CONTROLLER MENGGUNAKAN INTEGRASI NUMERIK DENGAN ANALYSIS OF SOLAR CHARGE CONTROLLER EFFICIENCY USING NUMERICAL INTEGRATION," *KURVATEK*, vol. 9, no. 2, pp. 127–134, 2024, doi: 10.33579/krvtk.v9i2.5013.
- [2] International Energy Agency, "International Energy Agency (IEA) World Energy Outlook 2022," *Int. Inf. Adm.*, p. 524, 2022, [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- [3] A. I. Agung, "Potensi Sumber Energi Alternatif Dalam Mendukung Kelistrikan Nasional," *J. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 2, pp. 892–897, 2013.



- [4] M. D. Tambunan et al., “Matlab-Based Modeling and Simulation of Temperature and Pressure Parameter Settings for Geothermal Power Plants,” *Journalinstal*, vol. 16, no. 05, p. 13, 2024, [Online]. Available: <https://journalinstal.cattleyadf.org/index.php/Instal/article/view/297/173>
- [5] Z. Taro, “Analisis Biaya Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap Skala Rumah Tangga Analysis,” *Jesce (Journal Electr. Syst. Control Eng.)*, vol. 3, no. 2, p. 2020, 2020, [Online]. Available: <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jesce>
- [6] U. DESA Population Division, “Population Division World Population Prospects 2024 Data Sources,” *Dapertement of Economic and Social Affairs*, no. 11. pp. 1–291, 2024. [Online]. Available: <https://unstats.un.org/unsd/methodology/m49/>.
- [7] P. Siagian, I. D. Sara, T. Tarmizi, and N. Nasaruddin, “Enhancing Power Density in Switched Reluctance Generators Through Split Axial Segmentation,” *IEEE Access*, vol. 13, no. April, pp. 70055–70079, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3562436.
- [8] P. Siagian, H. Alam, M. Fahreza, and R. J. Tampubolon, “Peningkatan daya panel surya dengan konsentrator cahaya dari bahan aluminium foil,” *J. Serambi Eng.*, vol. 9, no. 2, pp. 8490–8498, 2024.
- [9] D. H. Sinaga, R. R. O. Sasue, and H. D. Hutahaean, “Pemanfaatan Energi Terbarukan Dengan Menerapkan Smart Grid Sebagai Jaringan Listrik Masa Depan,” *J. Zetroem*, vol. 3, no. 1, pp. 11–17, 2021.
- [10] T. Zuraidah, T. AmaniDarma, A. Siti, and Y. K. Tri, “Penggunaan Kapasitor Bank Sebagai Solusi Drop Tegangan Pada Jaringan 20 kV,” *Semnastek Usu*, pp. 82–86, 2020.
- [11] P. Siagian, “Wind Resource for Electrical Energy of Tourism and Micro Small and Medium Enterprises (MSMEs) in Coastal Areas After the COVID-19 Pandemic,” *Adpebi Int. J. Multidiscip. Sci.*, vol. 1, no. 1, pp. 175–186, 2022, doi: 10.54099/aijms.v1i1.272.
- [12] N. A. Hidayatullah and D. E. Juliando, “Desain dan Aplikasi Internet of Thing (IoT) untuk Smart Grid Power Sistem,” *VOLT J. Ilm. Pendidik. Tek. Elektro*, vol. 2, no. 1, p. 35, 2017, doi: 10.30870/volt.v2i1.1347.
- [13] A. M. Siregar and T. Elektro, “Pengaruh Pengembangan Smart Grid terhadap Pengelolaan Energi Listrik,” pp. 1–6.
- [14] F. M. Noor and A. F. Rahman, “Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan Smart grid dan Sistem Pengendalian SCADA,” *Pros. Ind. Res. Work. Natl. Semin.*, vol. 14, no. 1, pp. 526–532, 2023, doi: 10.35313/irwns.v14i1.5440.
- [15] H. Ali, F. Saputra, and M. R. Mahaputra, “Penerapan Green Economy: Analisis Kendaraan Listrik, Pariwisata dan Batu Bara (Studi Literature),” *J. Humaniora, Ekon. Syariah dan Muamalah*, vol. 1, no. 1, pp. 1–14, 2023, doi: 10.38035/jhesm.v1i1.2.
- [16] Y. Ren and X. Deng, “Harnessing Trend Theory to Enhance Distributed Proximal Point Algorithm Approaches for Multi-Area Economic Dispatch Optimization,” *Comput. Mater. Contin.*, vol. 82, no. 3, pp. 4503–4533, 2025, doi: 10.32604/cm.2024.059864.
- [17] M. Mahmood, P. Chowdhury, R. Yeassin, M. Hasan, T. Ahmad, and N. U. R. Chowdhury, “Impacts of digitalization on smart grids, renewable energy, and demand response: An updated review of current applications,” *Energy Convers. Manag. X*, vol. 24, no. August, p. 100790, 2024, doi: 10.1016/j.ecmx.2024.100790.
- [18] P. Siagian, Hamdani; and M. E. Dalimunthe, “Pengaruh Tabir Filter Film Terhadap Tegangan Output Solar Sel Jenis Polycrystalline,” *SITEKIN, J. Sains, Teknol. dan Ind.*, vol. 19, no. 2, p. 2022, 2012.



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

- [19] PLN, “Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030.” Rencana Usaha Penyediaan Tenaga List. 2021-2030, pp. 2019–2028, 2021, [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/stakeholder/ruptl>
- [20] H. Alki, “Dampak Implementasi Smart Grid terhadap Efisiensi Konsumsi Energi dan Reduksi Emisi Karbon Impact of Smart Grid Implementation on Energy Consumption Efficiency and Carbon Emission Reduction,” vol. 1, pp. 1–8, 2025.
- [21] A. Affandi, R. Nasution, and M. S. Hasibuan, “Analisis Keamanan Jaringan Smart Grid PLN Menggunakan Metode Blockchain dalam Konteks Keamanan Cyber PLN Smart Grid Network Security Analysis Using Blockchain Methods in the Context of Cyber Security,” *J. Comput. Sci. INFORMATICS Eng.*, vol. 03, no. 2, pp. 64–73, 2024, [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
- [22] P. Siagian and M. Fahreza, “Increasing the Output Power of Solar Cell Panels by Using Varying Directional Mirror Angles,” vol. 2, no. 1, pp. 107–115.

