

Studi Penerapan Integrasi Sumber Energi Baru Terbarukan dengan *Smart grid* dan Sistem Pengendalian SCADA

Fadil Muhammad Noor^{1,*}, Adrian Fauzan Rahman²

^{1,2}Teknik Otomasi Listrik Industri, Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Depok 16425
E-mail : ^{1,*}fadil.muhammad.noor.te22@mhs.wpnj.ac.id; ²adrian.fauzan.toi21@polban.ac.id

ABSTRAK

Sumber energi baru terbarukan umumnya memiliki karakteristik yang berfluktuasi dan sulit diprediksi, tergantung pada faktor cuaca dan musiman. Tantangan muncul dalam menjaga keseimbangan antara pasokan dan permintaan energi akibat ketidakstabilan tersebut. *Smart grid* memiliki tujuan untuk meningkatkan keandalan sistem, mengurangi emisi karbon, mendiversifikasi sumber energi terbarukan, dan mengurangi biaya, dengan mendasarkan diri pada pelayanan kepada masyarakat. *Smart grid* merupakan pendekatan yang ideal untuk mengintegrasikan sumber daya energi baru terbarukan secara merata di tingkat masyarakat, serta memungkinkan partisipasi pelanggan dalam operasional perusahaan listrik. Pemanfaatan teknologi SCADA pada sistem jaringan listrik dapat memperluas ke penggunaan teknologi komunikasi dan informasi dua arah antar produsen dengan konsumen, dan otomatisasi dalam infrastruktur jaringan listrik. Komunikasi dalam sistem *smart grid* menggunakan *Power Line Communication* (PLC) sebagai metode yang diterapkan. Sementara itu, otomasi kontrol dan monitoring dilakukan melalui *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) sebagai *master station*. Penggunaan *smart grid* tersebut dalam sebuah area jaringan akan memberikan pengelolaan parameter yang optimal jika dapat didukung dengan keamanan sistem jaringan untuk mendapatkan komunikasi data dari sistem pengendali SCADA yang lebih akurat.

Kata Kunci

Integrasi, Energi Baru Terbarukan, Smart Grid, SCADA, Keamanan Sistem Jaringan.

1. PENDAHULUAN

Krisis energi global dan perubahan iklim telah mendorong kebutuhan akan pengembangan sistem energi yang lebih berkelanjutan. Sumber daya energi fosil yang terbatas dan dampak negatif yang dihasilkan dari penggunaannya telah mendorong peningkatan pemanfaatan sumber energi baru terbarukan, seperti energi surya, angin, hidro, dan biomassa. Sumber energi baru terbarukan menawarkan potensi yang besar dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil.

Namun, integrasi sumber energi baru terbarukan ke dalam jaringan listrik konvensional tidaklah mudah. Sumber energi terbarukan cenderung memiliki karakteristik yang fluktuatif dan tidak dapat diprediksi, seperti tergantung pada kondisi cuaca atau musim. Ketidakstabilan ini dapat menyebabkan tantangan dalam menjaga keseimbangan antara pasokan dan permintaan energi.

Kebijakan Energi Nasional menargetkan rasio pembangkitan listrik diharapkan dapat

mencapai sekitar 115 GW pada tahun 2025 dan 430 GW pada tahun 2050. Sedangkan konsumsi energi per kapita pada tahun 2025 ditargetkan sekitar 1,4 TOE/kapita (10,07 SBM/kapita) dan 3,2 TOE/kapita (23,02 SBM/kapita) pada tahun 2050 [1].

Hal ini menunjukkan bahwa harus ada perencanaan dan manajemen yang tepat dalam pembangkitan, transmisi dan distribusi. Dari banyak penelitian dan beberapa perusahaan sektor ketenagalistrikan menyarankan bahwa solusi yang mungkin adalah penerapan teknologi *smart grid*.

Untuk mengatasi tantangan ini, penggunaan *smart grid* telah diusulkan sebagai solusi yang potensial. *Smart grid* adalah sebuah konsep yang menggabungkan teknologi informasi dan komunikasi dengan infrastruktur energi konvensional. Dengan menggunakan sensor, perangkat pemantauan, dan sistem pengendalian otomatis, *smart grid* dapat memungkinkan pengoptimalan yang lebih cerdas dan efisien dalam pengelolaan energi.

Salah satu manfaat utama dari penggunaan *smart grid* adalah kemampuannya untuk meningkatkan integrasi sumber energi baru

terbarukan. Dengan teknologi *smart grid*, produsen energi terbarukan dapat memantau dan mengelola pasokan energi mereka secara lebih efisien, memperhitungkan variabilitas produksi energi terbarukan, dan beradaptasi dengan perubahan permintaan energi. Selain itu, *smart grid* juga dapat memfasilitasi penyimpanan energi dan pengaturan beban yang lebih efisien, sehingga meningkatkan penggunaan energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil.

Energi fosil masih mendominasi penggunaan energi Indonesia dan cadangan bahan bakar fosil yang semakin menipis serta emisi bahan bakar yang merugikan, penggunaan energi berkelanjutan dan terbarukan tidak dapat dihindari. Meskipun negara telah menerapkan dan memperluas pemanfaatan energi terbarukan, kontribusi energi terbarukan di pembangkit listrik hanya sekitar 12,16% pada tahun 2021.

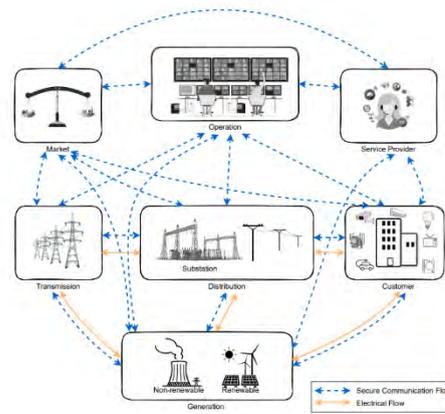
Tabel 1. Potensi Energi Terbarukan di Indonesia[1], [2]

Jenis Energi	Potensi	Kapasitas Terpasang
Panas Bumi	25.800 MW	2.131 MW
Hidro	75.000 MW	4.621 MW
Mini Hidro	19.385 MW	411 MW
Energi Surya	207.898 MW	105 MW
Energi Angin	60.647 MW	154 MW
Biomassa	32.654 MW	42 MW
Gelombang Laut	1.995,2 MW (Potensi Praktis)	-
Energi Panas Laut	41.012 MW (Potensi Praktis)	-
Pasang Surut	4.800 MW (Potensi Praktis)	-

Dalam *smart grid*, ketersediaan pasokan listrik tidak hanya bergantung pada pembangkitan, tetapi juga melibatkan respon dari beban listrik. Respon beban menjadi salah satu cara untuk menjaga keseimbangan antara pasokan dan permintaan listrik dengan mengurangi konsumsi listrik pada waktu-waktu tertentu [3]. Sudah saatnya Indonesia mengembangkan energi terbarukan mulai menerapkan teknologi pembangkit *smart grid* yang merupakan teknologi mengoperasikan sistem tenaga listrik dengan mengombinasikan teknologi komputer, komunikasi dan informasi dua arah, dan otomatisasi jaringan.

2. TINJAUAN PUSTAKA

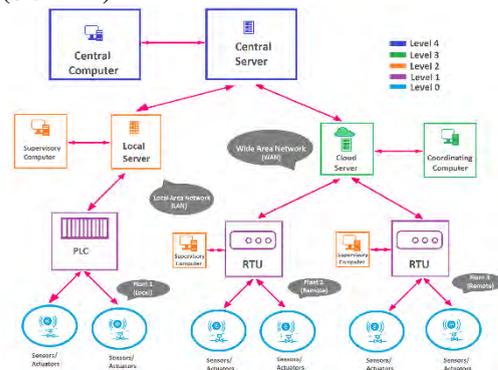
2.1 Smart Grid



Gambar 1. Model Konseptual Smart Grid [14]

Smart grid didefinisikan sebagai jaringan listrik cerdas yang dapat mengintegrasikan tindakan semua pengguna yang terhubung, seperti generator/pembangkit listrik, konsumen dan orang-orang yang melakukan keduanya dalam rangka untuk efisiensi dalam memberikan pasokan listrik yang berkelanjutan, ekonomis dan aman [4].

2.2 Supervisory Control And Data Acquisition (SCADA)



Gambar 2. Arsitektur dan Blok Diagram SCADA

SCADA merupakan sistem kendali industri berbasis komputer yang dipakai untuk pengontrolan suatu proses, seperti manufaktur, produksi, dan sistem tenaga listrik [5]. SCADA berperan dalam mengumpulkan informasi dan data dari lokasi lapangan, dan kemudian mengirimkannya ke sebuah komputer pusat yang bertugas mengatur dan mengendalikan data tersebut dan manfaat yang signifikan dari sistem ini terutama terlihat pada saat pemeliharaan dan penormalan ketika terjadi gangguan.

3. METODE PENELITIAN

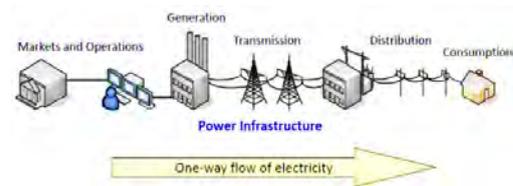
Pendekatan yang digunakan adalah penelitian deskriptif kualitatif. Secara garis besar penelitian menggunakan metode kualitatif dengan cara; mengumpulkan data kualitatif, kajian literatur dan menerapkan *best practice* atau standar untuk merancang panduan dalam rangka peningkatan sumber energi baru terbarukan menggunakan SCADA pada *smart grid*.

Langkah pertama adalah melakukan analisis data secara kualitatif dengan menggunakan pendekatan tematik dan melakukan kajian literatur untuk memahami teori, konsep, dan penelitian terkait yang telah dilakukan sebelumnya dalam bidang integrasi EBT, *smart grid*, dan sistem pengendalian SCADA. Hal ini membantu membangun pemahaman yang kokoh tentang topik penelitian dan mengidentifikasi celah pengetahuan yang dapat diteliti lebih lanjut.

Setelah langkah tersebut lalu menghubungkan temuan dengan teori dan literatur terkait untuk memperoleh pemahaman yang lebih dalam. Selanjutnya membuat kesimpulan yang terkait dengan efektivitas integrasi sumber energi baru terbarukan dengan *smart grid* dan sistem pengendalian SCADA dan menyoroti manfaat, tantangan, dan rekomendasi untuk penerapan yang lebih baik serta menggunakan referensi dan kutipan untuk mendukung temuan penelitian.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

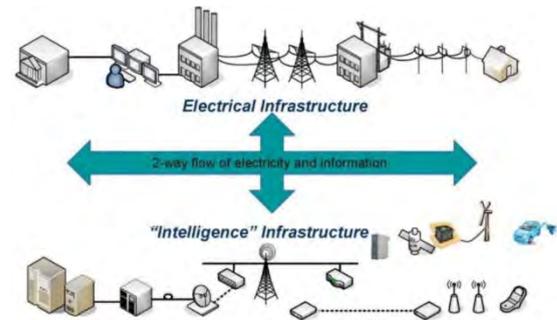
Pengembangan *smart grid* di Indonesia telah dimulai sejak lama. Inisiatif tersebut dimulai dengan pemanfaatan teknologi SCADA dalam sistem transmisi listrik dan kemudian meluas ke penggunaan teknologi komunikasi dan informasi dua arah, dan otomatisasi dalam infrastruktur jaringan listrik.



Gambar 3. Skema Jaringan Listrik Konvensional

Di Indonesia, jaringan listrik yang digunakan masih termasuk dalam kategori konvensional. Karakteristik umum dari jaringan listrik konvensional adalah aliran listrik yang searah, pembangkitan listrik yang terpusat, ketergantungan yang tinggi pada bahan bakar fosil, tingkat otomasi yang masih rendah, dan kurangnya pengelolaan penggunaan listrik yang dilakukan oleh konsumen [6].

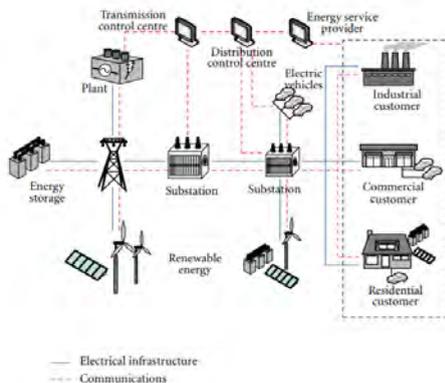
Terdapat beberapa kelemahan dalam jaringan listrik konvensional, salah satunya terkait dengan keandalan sistem. Rendahnya keandalan dapat dilihat dari frekuensi pemadaman listrik (*blackout*) yang tinggi. Salah satu penyebab pemadaman yang sering terjadi adalah kurangnya penerapan teknologi otomasi dalam jaringan listrik konvensional, sehingga sulit untuk mendeteksi tanda-tanda kegagalan dalam jaringan. Selain keandalan, efisiensi transmisi dan distribusi listrik juga menjadi masalah dalam jaringan konvensional.



Gambar 4. Skema Smart Grid

Kelemahan yang terdapat dalam jaringan listrik konvensional telah mendorong pentingnya pengembangan jaringan listrik yang lebih unggul. Salah satu konsep yang telah mengalami pemodernan adalah jaringan listrik pintar atau *Smart grid*. *Smart grid* merupakan sebuah jaringan listrik yang terintegrasi dengan teknologi informasi dan telekomunikasi, memungkinkan adanya komunikasi dua arah antara produsen dan konsumen listrik. Konsep ini bertujuan untuk meningkatkan pemantauan, pengendalian, dan komunikasi dalam rantai pasok listrik, dengan harapan dapat meningkatkan efisiensi listrik dan keandalan jaringan listrik secara keseluruhan.

Komunikasi dalam sistem *smart grid* menggunakan *Power Line Communication* (PLC) sebagai metode yang diterapkan. Sementara itu, otomatisasi kontrol dan monitoring dilakukan melalui *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) sebagai *master station*. Untuk menjaga stabilitas sumber energi terbarukan yang bersifat intermiten dalam jaringan, penggunaan baterai (*battery storage*) menjadi pendukung yang penting.



Gambar 5. *Smart Grid Chart*

Tabel 2. Perbandingan *Smart grid* dengan Jaringan Listrik Konvensional

Parameter	Jaringan Konvensional	<i>Smart grid</i>
Komunikasi	Satu arah, tidak <i>real time</i>	Dua arah, <i>real time</i>
Pengukuran	Elektromekanik	Digital
Pembangkitan	Terpusat	Terpusat dan tersebar
Kontrol aliran energi	Terbatas	Menyeluruh
Kehandalan	Rawan pemadaman	Perlindungan yang proaktif secara <i>real time</i>
Perbaikan	Manual	<i>Self-healing</i>
Topologi	Radial	Jaringan
Interaksi konsumen	Terbatas	Tidak terbatas

Energi baru terbarukan menawarkan sumber energi alternatif yang pada umumnya bebas

polusi, memiliki biaya pemeliharaan yang lebih rendah, biaya operasional yang rendah, ramah lingkungan, membantu mengurangi emisi gas rumah kaca, dll [7]. Penetrasi energi terbarukan tidak hanya memengaruhi harga pasar lokal, tetapi juga membantu mengurangi harga listrik dengan sistem terhubung yang berdekatan. Sumber energi baru terbarukan yang bervariasi membantu meningkatkan konsistensi sistem dengan persentase rendah, tetapi kesulitan muncul akibat penetrasi tinggi oleh energi baru terbarukan ke dalam *smart grid*. Oleh karena itu, pemerintah, utilitas, dan komunitas riset bekerja sama untuk mengembangkan sistem tenaga cerdas yang memiliki potensi untuk meningkatkan integrasi antara berbagai sumber energi baru terbarukan dengan *smart grid*. Setiap perangkat yang terhubung ke *smart grid* harus memenuhi persyaratan kualitas daya yang terstandarisasi. Untuk memastikan Kualitas Daya yang memadai dalam jaringan pintar, menjadi perhatian utama untuk mengurangi masalah-masalah berikut ini:

a. Fluktuasi Tegangan

Terdapat pengamatan umum bahwa pembangkitan listrik tenaga angin dan tenaga surya mengalami *intermittency* yang disebabkan oleh kombinasi fitur non-kontrol variabilitas dan kecenderungan tidak dapat diprediksi secara penuh dari sumber daya angin dan surya [8].

Variabilitas yang tidak dapat dikontrol ini dapat menyebabkan fluktuasi tegangan dan frekuensi pada sistem transmisi. Fluktuasi dalam pembangkitan listrik ini membutuhkan energi tambahan untuk menyeimbangkan pasokan dan permintaan jaringan listrik secara instan, yang membutuhkan pemantauan konstan terhadap regulasi frekuensi dan dukungan tegangan.

b. Sags dan swells Tegangan

Fungsionalitas jaringan pintar bergantung pada kemampuannya untuk berkoordinasi antara perangkat, pelanggan, generator distribusi, dan operator jaringan pintar. Penurunan tegangan terjadi ketika magnitudo tegangan RMS berkurang antara 10 hingga 90 persen dari tegangan RMS nominal untuk durasi 0,5 siklus hingga 1 menit. Hal ini bisa terjadi akibat gangguan pada jaringan transmisi/distribusi. Penurunan tegangan juga bisa terjadi akibat gangguan pada instalasi konsumen, penghubungan beban berat, dan pengoperasian motor besar [9].

c. Harmonic Distortion

Integrasi sumber energi baru terbarukan dalam skala besar menghasilkan distorsi harmonik arus dan tegangan akibat perangkat elektronik

daya serta inverter yang terhubung ke sumber energi terbarukan. Inverter yang terhubung dengan sumber energi terbarukan, beban pelanggan non-linier, dan perangkat elektronik daya menghasilkan harmonik dalam jaringan distribusi yang menyebabkan pemanasan berlebih pada transformator dan pemutus sirkuit yang mengurangi umur peralatan terhubung.

Oleh karena itu, harmonik merupakan salah satu atribut yang paling dominan dan perlu dijaga pada tingkat minimum untuk memastikan kualitas daya jaringan seimbang [10]. Standar yang berlaku adalah IEEE 519-1992, IEC 61000-4-30, dan EN50160. IEEE 519-1992 mengatur praktik dan persyaratan pengendalian harmonik dalam sistem tenaga listrik. Standar tersebut menentukan batasan tegangan harmonik dan arus harmonik pada titik sambungan umum antara pengguna akhir dan utilitas distribusi.

d. Kompensasi Daya Reaktif

Pembangkit energi terbarukan yang terhubung dengan konverter elektronik daya semakin banyak diintegrasikan ke dalam jaringan listrik pintar. Dengan tingkat penetrasi energi terbarukan yang tinggi, salah satu parameter utama sistem tenaga yaitu daya reaktif terpengaruh, yang menyebabkan masalah stabilitas tegangan dalam keadaan mantap maupun dinamis/transien.

Oleh karena itu, penting untuk menjaga dan mengelola cadangan daya reaktif yang memadai untuk memastikan kestabilan dan kehandalan *smart grid*. Koordinasi daya reaktif antara perangkat dukungan dan kapasitas optimal mereka sangat penting untuk pengelolaan yang efisien dan stabil dari jaringan listrik.

e. Sinkronisasi

Sinkronisasi frekuensi, tegangan, dan fasa jaringan adalah tantangan penelitian yang menjanjikan dalam mengendalikan kualitas daya. Keluaran dari sumber energi terbarukan selalu berubah-ubah secara alami. Hal ini membutuhkan inklusi antarmuka seperti inverter terkait jaringan yang disinkronkan, untuk menyinkronkan dan mengendalikan sumber energi terbarukan dengan jaringan [11]. Untuk mencapai sinkronisasi jaringan, metode sinkronisasi jaringan yang paling populer adalah *Phase Locked Loop* (PLL).

Teknik lain untuk sinkronisasi meliputi pendeteksian persilangan nol tegangan jaringan atau menggunakan kombinasi filter yang dikaitkan dengan transformasi nonlinier. Kondisi utama yang harus dipenuhi untuk

integrasinya ke dalam *smart grid* adalah frekuensi daya harus sejajar dengan frekuensi jaringan, magnitudo tegangan terminal harus sesuai dengan jaringan, urutan fase dari dua tegangan tiga fasa harus sama, dan sudut fase antara kedua tegangan harus berada dalam rentang 5 persen [12].

f. Gangguan Jaringan Listrik

Masalah kualitas daya lain yang memengaruhi integrasi energi baru terbarukan adalah gangguan pada jaringan listrik. Persyaratan jaringan untuk pembangkit listrik terbarukan yang terhubung ke jaringan terus berkembang melalui evolusi berkelanjutan untuk memastikan operasi sistem tenaga yang handal. Sifat *intermittent* dari sumber energi terbarukan dan kemampuan pengiriman terbatas membutuhkan operator jaringan untuk menjaga cadangan berputar tambahan. Peramalan generasi surya diperlukan untuk memungkinkan komitmen unit dan cadangan berputar, penjadwalan, dan pengiriman.

Untuk memastikan kualitas daya, standar internasional seperti IEEE 1159-2009 dikembangkan untuk mempertahankan kualitas daya pada tingkat yang dapat diterima. Standar ini menyediakan definisi dan karakteristik gangguan kualitas daya; serta rekomendasi tentang desain, instalasi, dan pemeliharaan peralatan yang sensitif [13].

Pada tahun 2014, standar IEEE 1547a merilis definisi baru untuk pengaturan pemutusan tegangan *sag* yang akan memungkinkan peralatan tetap terhubung selama terjadinya penurunan tegangan. Standar ini *mencakup distribution generation* untuk tidak memutus hubungan jika durasi penurunan tegangan *sag* berada antara pengaturan default dan pengaturan maksimum, dan kesepakatan dibuat antara pemilik sumber daya terdistribusi dan perusahaan utilitas setempat. Salah satu contohnya adalah kemampuan bertahan saat gangguan (*fault ride through*), yang membantu memperkuat keamanan sistem tenaga karena peningkatan integrasi tenaga angin belakangan ini. Ini mensyaratkan agar pembangkit tetap terhubung dalam kemungkinan adanya gangguan pada jaringan karena turbin angin yang baru dipasang dirancang sesuai dengan persyaratan koneksi jaringan yang dikenal sebagai kode jaringan yang menuntut agar turbin angin dapat bertahan selama gangguan [13].

Sistem Pengendalian *Supervisory Control and Data Acquisition* (SCADA) umumnya digunakan untuk mengawasi dan mengendalikan operasi yang terletak di lokasi geografis yang cukup jauh. Meskipun

teknologi ini memberikan sejumlah manfaat yang banyak, penggunaannya juga membawa risiko baru yang perlu diperhatikan, terutama terkait dengan potensi terciptanya vektor serangan baru yang dapat dieksploitasi oleh pihak-pihak yang tidak bertanggung jawab. Banyak *stakeholder* yang tidak menyadari pentingnya masalah keamanan yang terkait dengan sistem SCADA tersebut.

Hal tersebut dapat terjadi di Pembangkit Listrik, transmisi maupun sistem distribusi seperti *smart grid* control sistem, gangguan dan pemblokiran lalu lintas informasi dan *smart grid* terinfeksi oleh *malware*. Contoh dampak dari serangan siber tersebut seperti tabel dibawah ini.

Tabel 3. Dampak Serangan Keamanan *Smart grid*

Jenis Serangan	Lokasi	Dampak
SCADA	LAN	Confidentiality, denial of service, integrity
<i>Smart Meter</i>	LAN/Jaringan Mitra	Confidentiality, integrity, availability, non-repudiation
Layer Fisik	LAN/Jaringan Mitra/ WAN	Data integrity, denial of service, confidentiality
Data injection dan replay attacks	LAN/Jaringan Mitra/ WAN	Confidentiality
Basis jaringan	LAN/Jaringan Mitra/ WAN	Availability, confidentiality

Dampak serangan siber tersebut dapat mengakibatkan gangguan pada infrastruktur *smart grid* yang berhubungan dengan operasional pasokan energi, yang pada gilirannya dapat menyebabkan terjadinya pemadaman listrik dan mengakibatkan situasi *chaos* dalam berbagai aspek kegiatan ekonomi, bisnis, politik, dan sosial.

Mengacu pada NIST, IEEE membagi *smart grid* menjadi delapan domain yang terdiri dari

pembangkit massal dan non-massal, pelanggan, distribusi, sistem pendukung dasar, pasar, operasi, penyedia layanan dan transmisi. Standarisasi memiliki peranan krusial dalam implementasi *smart grid*. Oleh karena itu, pemerintah, melalui Badan Standarisasi Nasional (BSN), memiliki tanggung jawab untuk mengembangkan standar *smart grid* sendiri atau mengadopsi standar yang telah digunakan secara internasional agar keandalan dan keamanan penggunaan *smart grid* dan SCADA terjaga.

5. KESIMPULAN

Smart grid akan menjadi tren pengembangan jaringan listrik generasi berikutnya yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas energi listrik secara optimal dalam setiap jaringan. Selain itu, *smart grid* juga bertujuan untuk meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem energi baru terbarukan. Makalah ini membahas konsep dan karakteristik dari *smart grid*, serta melakukan perbandingan antara jaringan listrik saat ini dan masa depan. Melalui analisis tersebut, makalah ini akan mengidentifikasi faktor pendorong dalam penerapan integrasi sumber energi baru terbarukan yang sangat diperlukan untuk meningkatkan efisiensi, kehandalan dengan penggunaan *smart grid* pada sistem tenaga listrik di Indonesia.

Penggunaan *smart grid* tersebut dalam sebuah area jaringan akan memberikan pengelolaan parameter yang optimal jika dapat didukung dengan keamanan sistem jaringan untuk mendapatkan komunikasi data dari sistem pengendali SCADA yang akurat. Butuhnya dorongan yang kuat dari pemerintah dalam infrastruktur untuk menggunakan energi baru terbarukan secara luas, potensi energi batu bara yang besar serta inisiatif pengembangan *smart grid* yang telah dimulai menjadi peluang sekaligus kekuatan dalam penerapan *smart grid*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), *Outlook Energi Indonesia 2015*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2015.
- [2] Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), *Indonesia Energy Outlook 2021*. Jakarta: Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), 2021.

- [3] C. Febri Nugraha dan L. Subekti, "Optimisasi Penjadwalan Pembangkit pada Microgrid dengan Mempertimbangkan Respons Beban," *Jurnal Listrik, Instrumentasi, dan Elektronika Terapan (JuLIET)*, vol. 3, no. 1, 2022.
- [4] Smart Grid Strategic Group, "IEC Smart Grid Standardization Roadmap; Edition 1.0," 2010.
- [5] W. Primaandika, M. Faridl Daffa, T. Mahendra, M. Dwiyanti, dan S. Nasution, "Aplikasi Inverter Pada Sistem Pengendalian Dan Pemantauan Kecepatan Motor," *Prosiding Seminar Nasional Teknik Elektro*, vol. 6, 2021.
- [6] M. G. Rianta, "Mengenal Smart Grid sebagai Sistem Jaringan Listrik di Masa Depan," 21 September 2021. <https://indonesiare.co.id/id/article/mengenal-smart-grid-sebagai-sistem-jaringan-listrik-di-masa-depan> (diakses 2 Juni 2023).
- [7] A. Q. Al-Shetwi, "Sustainable development of renewable energy integrated power sector: Trends, environmental impacts, and recent challenges," *Science of the Total Environment*, vol. 822. 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153645.
- [8] X. Liang, "Emerging Power Quality Challenges Due to Integration of Renewable Energy Sources," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 53, no. 2, 2017, doi: 10.1109/TIA.2016.2626253.
- [9] O. Ceaki, G. Seritan, R. Vatu, dan M. Mancasi, "Analysis of power quality improvement in smart grids," dalam *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering, ATEE 2017*, 2017. doi: 10.1109/ATEE.2017.7905104.
- [10] A. Khan, S. Memon, dan T. P. Sattar, "Analyzing Integrated Renewable Energy and Smart-Grid Systems to Improve Voltage Quality and Harmonic Distortion Losses at Electric-Vehicle Charging Stations," *IEEE Access*, vol. 6, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2830187.
- [11] A. Kavitha, N. S. Kumar, dan N. Vanaja, "Design and control of grid synchronization of renewable energy sources," dalam *Proceedings of IEEE International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies, ICCPCT 2016*, 2016. doi: 10.1109/ICCPCT.2016.7530115.
- [12] A. Sajadi, R. W. Kenyon, dan B. M. Hodge, "Synchronization in electric power networks with inherent heterogeneity up to 100% inverter-based renewable generation," *Nat Commun*, vol. 13, no. 1, 2022, doi: 10.1038/s41467-022-30164-3.
- [13] Y. B S dan Dr. K. Thippeswamy, "Improvement of Power Quality in Wind Energy Conversion Systems," *Int J Res Appl Sci Eng Technol*, vol. 10, no. 5, 2022, doi: 10.22214/ijraset.2022.41877.
- [14] T. Zheng, M. Liu, D. Puthal, P. Yi, Y. Wu, dan X. He, "Smart Grid: Cyber Attacks, Critical Defense Approaches, and Digital Twin," Mei 2022, [Daring]. Tersedia pada <http://arxiv.org/abs/2205.11783>