

**PEMODELAN REKONFIGURASI JARINGAN SPINDLE DISTRIBUSI 20 kV  
BERBASIS SCADA UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI SISTEM DISTRIBUSI**

Yayan Sopian<sup>1</sup>, Dhami Johar Damiri<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Teknik Elektro Institut Teknologi PLN

<sup>1</sup>yayansopian91@gmail.com, <sup>2</sup>dhami@itpln.ac.id

**ABSTRACT**

*The growth of national electricity consumption, particularly in urban areas such as Jakarta, demands an efficient and reliable distribution system. The main challenges is the high level of technical losses, which reduces operational efficiency. This study develops a network reconfiguration model for a 20 kV spindle distribution system based on Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) to improve distribution efficiency. Reconfiguration is performed by automatically adjusting switch positions through SCADA to optimize real-time power flow. The study focuses on the GH272 spindle network in Central and West Jakarta, consisting of 15 feeders with varying load characteristics. System modeling was conducted using DlgSILENT PowerFactory, utilizing load data obtained from SCADA sensors and optimization through the Simulated Annealing (SA) algorithm. Simulation results over a 24-hour period indicate a reduction in power losses from 1.15 MWh to 0.97 MWh, (decrease 15.65%), with daily energy savings of 179 kWh (equivalent to IDR 258,601 per day). These results demonstrate that SCADA enhances distribution efficiency and supports an adaptive distribution system. The study recommends strengthening infrastructure by deploying additional sensors such as ADCU and integrating the Meter Data Management System (MDMS) with the Advanced Distribution Management System (ADMS) to enable more responsive decision-making.*

*Keywords: network reconfiguration, SCADA, distribution efficiency*

**ABSTRAK**

*Pertumbuhan konsumsi energi listrik nasional, khususnya di kawasan urban seperti Jakarta, menuntut sistem distribusi yang efisien dan andal. Salah satu tantangan utama adalah tingginya tingkat susut menurunkan efisiensi operasional. Penelitian ini melakukan pemodelan rekonfigurasi jaringan spindle 20 kV berbasis Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) terhadap efisiensi distribusi. Rekonfigurasi*

dilakukan dengan pengaturan posisi saklar secara otomatis melalui SCADA untuk mengoptimalkan aliran daya secara real-time. Rekonfigurasi jaringan Spindle GH272 di Jakarta Pusat dan Jakarta Barat, terdiri dari 15 penyulang dengan karakteristik beban bervariasi. Pemodelan sistem menggunakan DigSILENT PowerFactory, dengan data beban dari sensor SCADA dan optimasi menggunakan algoritma Simulated Annealing (SA). Hasil simulasi selama 24 jam menunjukkan penurunan rugi daya dari 1,15 MWh menjadi 0,97 MWh, atau 15,65%, dengan penghematan energi 179 kWh per hari (setara Rp 258.601/hari). Hasil ini menunjukkan bahwa pemodelan rekonfigurasi jaringan dengan SCADA meningkatkan efisiensi serta mendukung sistem distribusi yang adaptif. Penelitian merekomendasikan penguatan infrastruktur melalui sensor tambahan seperti ADCU dan integrasi MDMS dengan ADMS untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih responsif.

Kata Kunci: rekonfigurasi jaringan, SCADA, efisiensi energi

## **A. Pendahuluan**

Pertumbuhan konsumsi energi listrik nasional menunjukkan tren meningkat signifikan, terutama di wilayah perkotaan padat seperti Jakarta. Dalam satu dekade terakhir konsumsi listrik Indonesia meningkat sekitar 59%, dengan wilayah Jawa–Madura–Bali menjadi kontributor terbesar[1]. Peningkatan ini menuntut sistem distribusi tenaga listrik yang semakin andal, efisien, dan adaptif. Namun, salah satu permasalahan utama yang dihadapi adalah tingginya tingkat susut energi pada jaringan distribusi, yang berdampak langsung pada peningkatan biaya operasional

serta penurunan kualitas pelayanan kepada pelanggan.

Susut jaringan, khususnya pada sistem distribusi, menjadi indikator rendahnya efisiensi energi akibat karakteristik teknis penghantar, peralatan, serta kompleksitas beban di wilayah urban. Pada tahun 2023, susut distribusi PT PLN (Persero) masih berada pada level signifikan, menunjukkan perlunya strategi pengelolaan jaringan yang lebih efektif. Kondisi ini semakin kompleks di Jakarta yang mayoritas menggunakan jaringan distribusi 20 kV tipe spindle, yaitu kombinasi pola radial dan ring, yang rentan terhadap ketidakseimbangan beban dan

peningkatan rugi daya akibat panjang saluran serta kepadatan beban yang tinggi[2].

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, PT PLN (Persero) mulai mengimplementasikan teknologi Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) untuk mendukung pengelolaan jaringan secara real-time[3]. Salah satu strategi penting dalam konteks ini adalah rekonfigurasi jaringan atau feeder reconfiguration (FRC), yaitu pengaturan ulang topologi jaringan melalui perubahan posisi saklar penghubung dan saklar penyekat guna mengoptimalkan aliran daya, menyeimbangkan beban, serta menurunkan susut. Rekonfigurasi berbasis SCADA memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih cepat dan fleksibel dibandingkan metode manual.

Berbagai penelitian sebelumnya telah membuktikan bahwa rekonfigurasi jaringan mampu menurunkan susut dan meningkatkan keandalan sistem distribusi. Beberapa studi menunjukkan efektivitas algoritma optimasi seperti *ant colony optimization* dan pendekatan kombinasi rekonfigurasi dengan penempatan kapasitor dalam

menurunkan susut hingga lebih dari 14% [4]. Pemanfaatan SCADA juga telah diterapkan pada sistem pembangkitan dan distribusi untuk mendukung pengambilan keputusan operasional. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada jaringan radial secara umum atau pendekatan konstruksional seperti pembangunan jaringan baru [5], serta belum banyak mengkaji karakteristik jaringan spindle 20 kV di kawasan perkotaan padat dengan pemanfaatan fasilitas *Remote Control* SCADA secara komprehensif.

Di sisi lain, data aset PLN UID Jakarta Raya menunjukkan adanya ratusan penyulang ekspres yang berada dalam kondisi siaga (*idle*) dan belum dimanfaatkan secara optimal. Potensi ini dapat diintegrasikan dalam strategi rekonfigurasi jaringan berbasis SCADA untuk mendukung redistribusi beban secara dinamis dan meningkatkan efisiensi sistem distribusi.

Berdasarkan kondisi tersebut, terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*) pada minimnya kajian yang secara spesifik memodelkan efektivitas rekonfigurasi jaringan spindle 20 kV berbasis SCADA di wilayah urban padat seperti Jakarta

[6]. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan dan menganalisis pengaruh strategi rekonfigurasi jaringan spindle 20 kV berbasis SCADA terhadap efisiensi sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya literatur terkait optimasi jaringan distribusi berbasis otomasi serta memberikan rekomendasi teknis yang aplikatif bagi pengelolaan sistem distribusi listrik perkotaan yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

#### 1. Jaringan Distribusi

Sistem tenaga listrik merupakan rangkaian terintegrasi yang mencakup pembangkitan, transmisi, dan distribusi energi listrik hingga pelanggan akhir [7]. Energi dari pembangkit disalurkan melalui jaringan tegangan ekstra tinggi dan tinggi, kemudian diturunkan melalui gardu induk menuju jaringan distribusi. Distribusi terdiri dari jaringan tegangan menengah (11–20 kV) dan tegangan rendah (380/220 V). Jaringan distribusi di Indonesia menggunakan beberapa konfigurasi, yaitu radial, loop, kluster, dan spindle. Sistem radial menggunakan satu jalur utama [8], sistem loop membentuk sirkuit tertutup [9], sistem kluster mengelompokkan beban dalam area

tertentu, sedangkan sistem spindle menggunakan feeder utama dan feeder express sebagai jalur alternatif pada jaringan 20 kV[7].

#### 2. Jenis Saluran Jaringan Distribusi

Saluran jaringan distribusi merupakan jaringan tegangan menengah yang menyalurkan energi listrik dari gardu induk ke gardu distribusi hingga pelanggan akhir. Komponen utamanya meliputi konduktor, tiang, kabel, gardu distribusi, serta perangkat pendukung lainnya. Di Indonesia, jaringan distribusi tegangan menengah terdiri dari beberapa jenis saluran. Saluran Udara Tegangan Menengah (SUTM) menggunakan konduktor di atas tiang dan beroperasi pada tegangan 11–20 kV, umumnya diterapkan di wilayah dengan jarak pelanggan yang berjauhan [10],[11]. Saluran Kabel Tegangan Menengah (SKTM) menggunakan kabel bawah tanah atau tertutup pada tegangan yang sama dan banyak digunakan di kawasan perkotaan. Medium Voltage Transmission in Cables (MVTIC) menggunakan kabel berisolasi dengan lapisan pelindung tambahan dan diterapkan pada wilayah dengan kepadatan beban tinggi [12], [13], [14].

### 3. *Smart Grid Distribution*

Smart Grid merupakan sistem distribusi tenaga listrik yang mengintegrasikan teknologi digital dan otomasi untuk mendukung pemantauan, pengendalian, dan komunikasi dua arah secara real-time. Implementasinya memanfaatkan teknologi seperti SCADA, smart meter, sensor pintar, dan remote control untuk mendukung operasi jaringan distribusi. Smart Grid juga memfasilitasi integrasi energi terbarukan serta infrastruktur kendaraan listrik. Pada jaringan distribusi 20 kV, pengembangan Smart Grid berfokus pada penerapan *Advanced Distribution Management System* (ADMS) sebagai platform terpusat yang mengintegrasikan sistem pendukung seperti GIS, OMS, dan MDMS guna mendukung pengelolaan jaringan distribusi secara terkoordinasi dan berbasis data [15], [16].

### 4. *SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)*

SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) merupakan sistem kendali terpusat untuk pemantauan, pengendalian, dan akuisisi data secara real-time pada infrastruktur distribusi tenaga listrik.

Sistem ini terdiri dari Master Station sebagai pusat kendali, Remote Terminal Unit (RTU) sebagai pengumpul data lapangan, serta Human Machine Interface (HMI) sebagai antarmuka operator. SCADA mendukung pengendalian jarak jauh (Remote Control), pemantauan beban, deteksi gangguan, serta pencatatan data historis untuk analisis kinerja jaringan. Dalam sistem distribusi, SCADA terintegrasi dengan perangkat seperti MV Cell, *Ground Fault Detector*, dan sistem catu daya DC. Model komunikasi SCADA meliputi *centralized*, *semi distributed*, dan *distributed*, dengan sistem *centralized* mengandalkan pusat kendali tunggal yang terhubung langsung dengan perangkat lapangan melalui media komunikasi seperti radio, 4G, dan serat optik.

### 5. Rekonfigurasi Jaringan

Pada konfigurasi awal, sistem spindle mengoperasikan penyulang berbeban sebagai jalur utama penyaluran daya melalui gardu hubung, sementara penyulang ekspres berada dalam kondisi siaga dan hanya digunakan saat terjadi gangguan. Kondisi ini menyebabkan beban terpusat pada penyulang tertentu dan potensi pemanfaatan

penyulang ekspres belum optimal. Melalui rekonfigurasi berbasis SCADA, penyulang ekspres dapat dioperasikan secara dinamis untuk redistribusi beban, sehingga penyulang utama tidak selalu menjadi satu-satunya jalur penyaluran daya. Rekonfigurasi ini memungkinkan distribusi beban yang lebih merata dan peningkatan efisiensi operasi jaringan distribusi.

#### 6. Efisiensi Sistem Distribusi

Efisiensi sistem distribusi listrik menunjukkan kemampuan jaringan menyalurkan energi dari gardu induk ke pelanggan dengan rugi-rugi daya minimal, kualitas tegangan terjaga, dan distribusi beban yang seimbang. Faktor utama yang mempengaruhi efisiensi meliputi susut daya, kualitas tegangan, dan keseimbangan beban. Rugi-rugi daya pada jaringan dihitung berdasarkan arus dan resistansi tiap segmen penyulang. Kualitas tegangan dinilai melalui batas tegangan minimum dan maksimum yang diizinkan di sisi pelanggan. Ketidakseimbangan beban meningkatkan susut dan dapat diatasi melalui rekonfigurasi jaringan berbasis SCADA dan ADMS. Efektivitas peningkatan efisiensi dievaluasi menggunakan parameter

*Energy Saved (ES)*, yaitu selisih rugi-rugi daya sebelum dan sesudah rekonfigurasi yang dikalikan waktu operasi, serta dapat dikonversi menjadi nilai ekonomis berdasarkan tarif listrik per kWh.

### **B. Metode Penelitian**

#### 1. Lokasi dan Periode Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada sistem distribusi tegangan menengah 20 kV milik PT PLN (Persero) Unit Induk Distribusi Jakarta Raya, dengan studi kasus pada jaringan spindle Gardu Hubung GH272 yang melayani wilayah Jakarta Pusat dan Jakarta Barat. Spindle GH272 terdiri dari 15 penyulang dengan karakteristik beban yang bervariasi. Penelitian dilaksanakan selama enam bulan, yaitu dari November 2024 hingga April 2025.

#### 2. Desain dan Pendekatan Penelitian

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode pemodelan dan simulasi. Tujuan utama penelitian adalah menganalisis pengaruh strategi rekonfigurasi jaringan spindle 20 kV berbasis SCADA terhadap efisiensi sistem distribusi tenaga listrik. Penelitian bersifat eksplanatori dengan membandingkan kondisi jaringan

sebelum dan sesudah rekonfigurasi berdasarkan parameter teknis yang terukur.

### 3. Data dan Sumber Data

Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari Unit Pelaksana Pengatur Distribusi (UP2D) Jakarta. Data meliputi topologi jaringan (Single Line Diagram), data beban penyulang dan gardu distribusi, lokasi peralatan yang terintegrasi dengan *remote control* SCADA, serta data operasional SCADA. Selain itu, studi literatur dilakukan untuk memperoleh landasan teoritis dan hasil penelitian terdahulu yang relevan dengan rekonfigurasi jaringan dan efisiensi sistem distribusi.

### 4. Metode Pemodelan dan Analisis

Pemodelan jaringan distribusi dilakukan menggunakan perangkat lunak DlgSILENT PowerFactory dengan merepresentasikan kondisi aktual jaringan spindle 20 kV GH272. Simulasi rekonfigurasi jaringan dilakukan dengan mengubah status saklar normally open (NO) dan normally closed (NC) sesuai skenario operasi berbasis SCADA. Analisis difokuskan pada perubahan aliran daya dan perhitungan rugi-rugi daya. Efektivitas rekonfigurasi dievaluasi

melalui perbandingan susut energi dan tingkat efisiensi sistem sebelum dan sesudah rekonfigurasi jaringan.

## C. Hasil Penelitian dan Pembahasan

### 1. Model Jaringan Spindle GH272

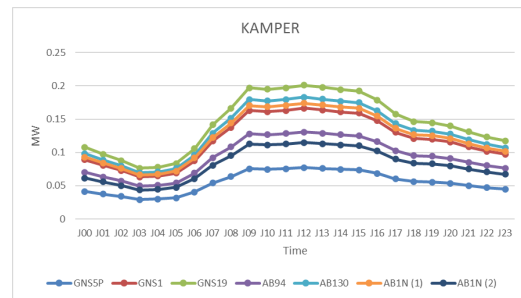
Jaringan distribusi spindle GH272 dimodelkan menggunakan DlgSILENT *PowerFactory* dengan merepresentasikan kondisi aktual jaringan, meliputi topologi penyulang, jenis dan panjang saluran SKTM, serta lokasi gardu distribusi yang dilengkapi fasilitas *remote control* (RC) SCADA. Spindle GH272 terdiri atas 15 penyulang, dengan 13 penyulang berbeban dan 2 penyulang ekspres (Timor dan Lucu) sebagai feeder cadangan. Gardu distribusi yang memiliki fasilitas RC menjadi titik utama dalam pelaksanaan rekonfigurasi jaringan.

Tabel 1. Gardu Distribusi Spindle  
GH272

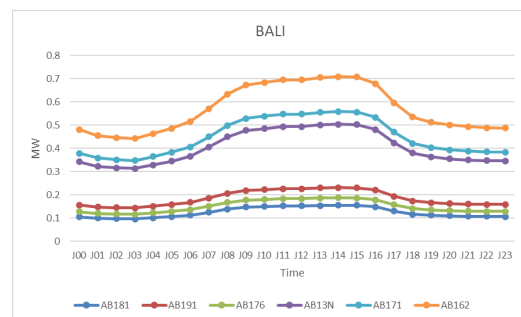
No	Penyulang	Gardu Fasilitas Distribusi
1	Kamper	GNS1
2	Veloz	AB160
3	Damar	AB11C, AB11D

4	Bali	AB191, AB13N
5	Cendana	AB14, AB35, AB12
6	Timor	-
7	Terano	AB77, B248
8	Jawa	AB9, B435, AB236, AB111,
9	Rush	-
10	Keruing	-
11	Volvo	B249, AB34, AB34A
12	Nissan	B254, AB235
13	Terminal	AB17, AB18N, AB128
14	Sungkai	AB25N, AB93
15	Lucu	-

Model Karakteristik Beban Jaringan. Karakteristik beban setiap penyulang disusun berdasarkan data operasional gardu distribusi dan dimasukkan ke dalam model jaringan. Komposisi pelanggan bervariasi antara komersial, perumahan, dan pemerintahan, yang menghasilkan profil beban harian berbeda pada setiap penyulang.



**Gambar 1. Karakteristik Beban Penyulang Kamper**



**Gambar 2. Karakteristik Beban Penyulang Bali**

### Simulasi Rekonfigurasi GH272 pada DiG SILENT PowerFactory

Setelah pemodelan jaringan spindle GH272 pada DiG SILENT PowerFactory, dilakukan simulasi load flow dan quasi dynamic simulation selama 24 jam pada kondisi operasi normal. Hasil awal menunjukkan total beban sebesar 625,41 MWh/hari dengan rugi-rugi daya sebesar 1,15 MWh/hari. Selanjutnya dilakukan optimasi rekonfigurasi jaringan menggunakan metode *Tie Open Optimization* berbasis *Simulated Annealing* (SA) dengan tujuan meminimalkan losses. Rekonfigurasi



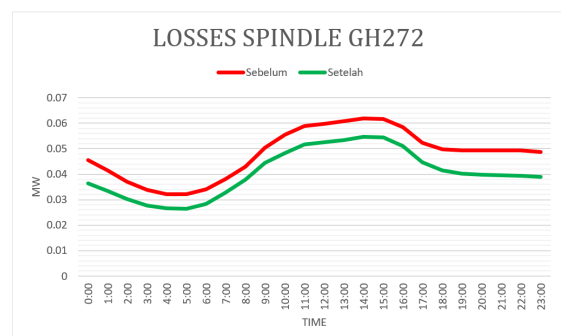
dilakukan melalui pengaturan saklar *Remote Control (RC) SCADA* sehingga penyulang ekspres ikut memikul beban.

Hasil simulasi pasca rekonfigurasi menunjukkan total beban tetap sebesar 625,41 MWh/hari, sedangkan losses menurun menjadi 0,97 MWh/hari atau terjadi penurunan sebesar 15,65%. Energi yang terselamatkan mencapai 179 kWh per hari, setara dengan Rp 258.601 per hari atau sekitar Rp 7,76 juta per bulan (tarif Rp 1.444,70/kWh). Hasil ini menunjukkan bahwa rekonfigurasi jaringan berbasis SCADA efektif meningkatkan efisiensi dan memberikan manfaat teknis serta ekonomis yang signifikan bagi sistem distribusi 20 kV di wilayah urban [6].

Tabel 1. Gardu Distribusi Spindle GH272

Jam	Energi Terselamatkan	Rupiah
0:00	9	13,278
1:00	8	11,654
2:00	7	9,977
3:00	6	8,915
4:00	6	8,210
5:00	6	8,061
6:00	6	8,108

7:00	6	7,735
8:00	5	7,466
9:00	6	8,816
10:00	7	10,364
11:00	7	10,496
12:00	7	10,633
13:00	7	10,792
14:00	7	10,569
15:00	7	10,435
16:00	7	10,705
17:00	8	11,032
18:00	8	11,912
19:00	9	13,210
20:00	10	13,800
21:00	10	14,139
22:00	10	14,291
23:00	10	14,011
Jumlah	179	258.601



Gambar 3. Grafik Losses Sebelum dan Setelah Rekonfigurasi

#### D. Kesimpulan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemodelan rekonfigurasi

jaringan spindle 20 kV berbasis SCADA efektif meningkatkan efisiensi sistem distribusi tenaga listrik di Jakarta. Rekonfigurasi jaringan mampu menurunkan rugi-rugi daya sebesar 15,65% dengan penghematan energi sebesar 179 kWh per hari atau setara Rp 7,76 juta per bulan. Untuk mendukung implementasi yang lebih optimal, diperlukan penguatan infrastruktur pemantauan beban melalui integrasi sensor pada sisi tegangan rendah dan transformator distribusi ke dalam sistem SCADA. Penambahan sensor seperti Analog Data Control Unit (ADCU) direkomendasikan guna meningkatkan akurasi dan ketersediaan data real-time. Selain itu, integrasi Meter Data Management System (MDMS) dengan Advanced Distribution Management System (ADMS) perlu dikembangkan untuk memperkuat representasi kondisi aktual jaringan dan mendukung pengambilan keputusan operasional yang lebih responsif.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- PLN. (2024). *Laporan tahunan 2023*.
- Afrida, Y. (2024). Pengaruh panjang jaringan terhadap drop tegangan pada penyulang Duku dan Kurma PT. PLN (Persero) ULP Rumbia. *Electrician: Jurnal Rekayasa dan Teknologi Elektro*, 18(1), 33–40.
- Primadianto, A., Monica, K., Waberta, R., & Maranatha, A. L. (2023). Distribution automation system field test in Jakarta MV network. In *IET Conference Proceedings CP823* (pp. 1391–1395).
- Daud, J. G., Kondojo, M., & Patabo, M. (2018). Reconfiguration distribution network with ant colony. In *2018 International Conference on Applied Science and Technology (iCAST)* (pp. 349–353).
- Singh, S. P., Raju, G. S., Rao, G. K., & Afsari, M. (2009). A heuristic method for feeder reconfiguration and service restoration in distribution networks. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 31(7–8), 309–314.
- Mishra, A., Tripathy, M., & Ray, P. (2024). A survey on different techniques for distribution network reconfiguration. *Journal of Energy Reports*.

- <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.001>
- Suswanto, D. (2009). *Sistem distribusi tenaga listrik*. Padang: Universitas Negeri Padang.
- Novialifiah, R. W., Soeprijanto, A., & Wibowo, R. S. (2014). Algoritma aliran daya untuk sistem distribusi radial dengan beban sensitif tegangan. *Jurnal Teknik ITS*, 3(1), B7–B11.
- Rizki, E. N. (2021). Simulasi modifikasi konfigurasi jaringan spindel menjadi loop tertutup untuk meningkatkan keandalan sistem distribusi menggunakan software ETAP. *Energi & Kelistrikan*, 13(1), 33–39.
- Agustian, D. (2024). Pemeliharaan jaringan distribusi saluran udara tegangan menengah (SUTM) 20 kV dengan metode right of way (ROW) di PT PLN (Persero) ULP Serang. *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan*, 12.
- Sulistiyowati, R., Ramadhan, M. N., Suheta, T., Putra, N. P. U., Rohiem, N. H., & Masfufiah, I. (2022). Keandalan sistem distribusi 20 kV pada penyulang sistem distribusi PT. PLN UP3 Surabaya Utara dengan metode reliability network equivalent approach (RNEA). In *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*.
- K. U. P. Tegangan. (2016). *Analisis perbandingan sistem saluran kabel udara tegangan menengah (SKUTM) dan saluran kabel tanah tegangan menengah (SKTM)*.
- Tanjung, A. (2012). Analisis sistem distribusi 20 kV untuk memperbaiki kinerja dan keandalan sistem distribusi menggunakan electrical transient analysis program. In *Seminar Nasional Teknologi Informasi Komunikasi dan Industri*.
- Kusuma, W., Joto, R., Mieftah, M., & Setiawan, A. (2022). Analisis keandalan sistem distribusi 20 kV pada penyulang Pujon PT. PLN (Persero) ULP Batu. *Elposys: Jurnal Sistem Kelistrikan*, 9(3), 188–193.
- Suganda, S., Prasetyo, M. R. A., & Effendi, H. (2022). Analisa keandalan pada sistem distribusi 20 kV. *SINUSOIDA*, 24(1), 43–54.
- Jamborsalamati, P., Sadu, A., Ponci, F., & Monti, A. (2015).

Implementation of an agent based distributed FLISR algorithm using IEC 61850 in active distribution grids. In 2015 *International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (pp. 606–611)