



Analisis Pengukuran Pentanahan Menggunakan Metoda 3 Titik Fuzzy Logic Mamdani pada Saluran Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500KV Gardu Induk Ngimbang

Yogy Sutoro^{1*}, Arief Marwanto Gunawan²

¹⁻² Universitas Islam Sultan Agung, Semarang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: sutoroyogy3@gmail.com

Abstract. The grounding system is an important part of an electrical power system, particularly in the 500 kV Extra High Voltage Overhead Transmission Line (SUTET), which functions to conduct fault currents into the ground and protect equipment and personnel. Grounding resistance values can be influenced by measurement and environmental conditions, requiring a method capable of considering such uncertainties. Therefore, this study applies the Mamdani Fuzzy Logic method to correct and evaluate grounding resistance measurements on the 500 kV SUTET at Ngimbang Substation. Measurements were conducted using the three-point method (Fall of Potential) with a Kyoritsu 4105A instrument. The Mamdani Fuzzy model uses two input variables, namely the potential electrode distance ratio P and the measured resistance value, with the output being the grounding resistance correction value. The processing stages include fuzzification, inference, aggregation, and defuzzification using the Centroid method implemented in MATLAB. The results showed an MAE value of 0.638Ω and an RMSE value of 0.834Ω . In the low-resistance case study, the evalfis result was 3.586Ω , with a difference of 0.3036Ω compared to the manual Centroid calculation of 3.283Ω . In the high-resistance case study, the evalfis result was 14.984Ω , with a difference of 0.0508Ω compared to the manual calculation of 14.933Ω . These results indicate that the Mamdani Fuzzy system can provide consistent correction results in evaluating grounding resistance conditions.

Keywords: 500 KV SUTET; Centroid; Grounding Resistance; Mamdani Fuzzy Logic; Three-Point Method.

Abstrak. Sistem pentanahan merupakan bagian penting pada sistem tenaga listrik, khususnya pada Saluran Udara Tegangan Ekstra Tinggi (SUTET) 500 kV, yang berfungsi menyalurkan arus gangguan ke tanah serta melindungi peralatan dan manusia. Nilai tahanan pentanahan dapat dipengaruhi oleh kondisi pengukuran dan lingkungan sehingga diperlukan metode yang mampu mempertimbangkan ketidakpastian tersebut. Penelitian ini menerapkan Fuzzy Logic Mamdani untuk mengoreksi dan mengevaluasi hasil pengukuran tahanan pentanahan pada SUTET 500 kV di Gardu Induk Ngimbang. Pengukuran dilakukan menggunakan metode tiga titik (Fall of Potential) dengan alat Kyoritsu 4105A. Pemodelan Fuzzy Mamdani menggunakan dua variabel input, yaitu rasio jarak elektroda potensial P dan nilai tahanan terukur, dengan output berupa nilai koreksi tahanan pentanahan. Proses pengolahan meliputi fuzzifikasi, inferensi, agregasi, dan defuzzifikasi menggunakan metode Centroid yang diimplementasikan melalui MATLAB. Hasil penelitian menunjukkan nilai MAE sebesar $0,638 \Omega$ dan RMSE sebesar $0,834 \Omega$. Pada studi kasus tahanan rendah, diperoleh hasil evalfis sebesar $3,586 \Omega$ dengan selisih $0,3036 \Omega$ terhadap perhitungan manual Centroid sebesar $3,283 \Omega$. Pada studi kasus tahanan tinggi, hasil evalfis sebesar $14,984 \Omega$ memiliki selisih $0,0508 \Omega$ terhadap perhitungan manual sebesar $14,933 \Omega$. Hasil tersebut menunjukkan bahwa sistem Fuzzy Mamdani dapat memberikan hasil koreksi yang konsisten dalam mengevaluasi kondisi tahanan pentanahan.

Kata kunci: Centroid; Fuzzy Logic Mamdani; Metode Tiga Titik; SUTET 500 KV; Tahanan Pentanahan.

1. PENDAHULUAN

Pentanahan merupakan aspek fundamental dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi mengamankan peralatan dan manusia dari risiko gangguan listrik. Pada SUTET 500 kV, sistem pentanahan berperan menyalurkan arus gangguan ke tanah, mengurangi risiko tegangan lebih, serta menjaga keselamatan dari tegangan sentuh dan tegangan langkah. Oleh karena itu, pengukuran tahanan pentanahan yang akurat menjadi bagian penting dalam menjaga keandalan sistem. Pengukuran pentanahan pada SUTET umumnya menggunakan metoda tiga

titik (*Three-Point Method*) dengan alat *Kyoritsu 4105A*. Metoda ini memanfaatkan elektroda pentanahan, elektroda arus, dan elektroda potensial. Dalam praktiknya, hasil pengukuran dapat dipengaruhi variasi resistivitas tanah, kelembapan, kondisi tanah, dan gangguan *elektromagnetic*. Tanah yang tidak homogen atau kering dapat menghasilkan nilai tahanan yang lebih tinggi dan tidak konsisten. Untuk mengatasi ketidakpastian tersebut, penelitian ini menerapkan *Fuzzy Logic Mamdani* sebagai pendekatan koreksi dan evaluasi hasil pengukuran. *Fuzzy Mamdani* dapat memproses nilai yang berada pada daerah transisi antarkategori sehingga keputusan tidak hanya bergantung pada batas tegas. Penelitian dilaksanakan pada Gardu Induk Ngimbang dengan tujuan menganalisis penerapan metoda tiga titik dan menguji penggunaan model *fuzzy* untuk mengoreksi hasil pengukuran tahanan pentanahan.

Permasalahan penelitian meliputi bagaimana metoda tiga titik diterapkan pada pengukuran pentanahan SUTET 500 kV dan bagaimana *Fuzzy Logic* digunakan untuk memvalidasi serta mengoreksi hasil pengukuran agar diperoleh evaluasi yang lebih baik. Ruang lingkup dibatasi pada pengukuran menggunakan *Kyoritsu 4105A* di Gardu Induk Ngimbang dan data PT PLN Transmisi Jawa Bagian Timur dan Bali. Tujuan penelitian adalah menganalisis pengukuran metoda tiga titik dan menerapkan model *Fuzzy Logic* untuk mengoreksi hasil pengukuran.

2. LANDASAN TEORI

Sistem pentanahan digunakan untuk menghubungkan bagian tertentu dari instalasi listrik dengan tanah sehingga arus gangguan dapat dialirkan secara aman. Pada jaringan tegangan tinggi, pentanahan berfungsi memberikan jalur arus gangguan, membantu stabilitas tegangan, mengurangi dampak tegangan lebih, serta mendukung kerja sistem proteksi. Hasil pengukuran harus dievaluasi dengan mempertimbangkan kondisi instalasi dan lingkungan.

Metoda tiga titik atau *Fall of Potential Method* menggunakan tiga elektroda, yaitu elektroda pentanahan utama (E), elektroda arus (C), dan elektroda potensial (P). Arus dialirkan dari C menuju E, sedangkan beda potensial antara E dan P diukur untuk menentukan tahanan berdasarkan hukum Ohm. Elektroda P ditempatkan pada beberapa posisi di antara E dan C; posisi sekitar 61,8% dari jarak E–C digunakan sebagai salah satu acuan untuk memperoleh pembacaan yang stabil.

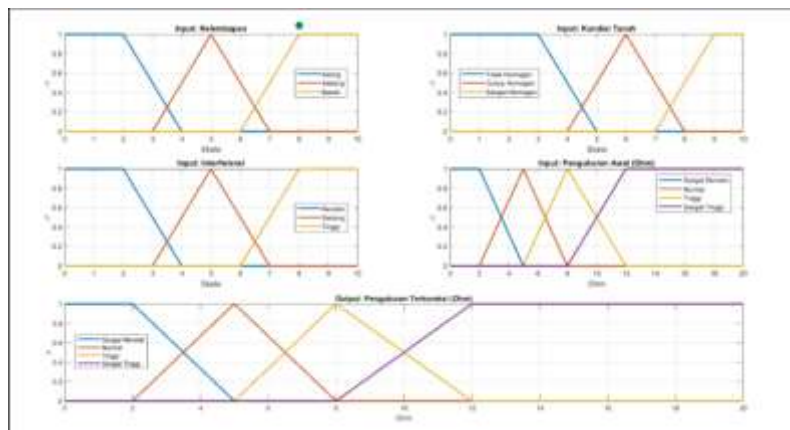
Fuzzy Logic Mamdani digunakan untuk menangani ketidakpastian pada data pengukuran. Dalam penelitian ini terdapat dua variabel input utama, yaitu rasio jarak elektroda potensial P (%) dan tahanan terukur $R (\Omega)$, sedangkan *output* berupa koreksi tahanan

pentanahan. Proses inferensi terdiri atas *fuzzifikasi*, evaluasi aturan menggunakan operator MIN, agregasi menggunakan MAX, dan *defuzzifikasi* dengan metode *Centroid*.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif eksperimental. Data primer diperoleh melalui observasi dan pengukuran tahanan pentanahan menggunakan *Kyoritsu 4105A* pada PT PLN (Persero) Unit Induk Jawa Bagian Timur dan Bali, Gardu Induk Ngimbang. Pelaksanaan pengambilan data berlangsung pada 1 Februari–1 Maret 2025. Tahapan penelitian meliputi persiapan alat dan lokasi, pengukuran dengan metoda tiga titik, pengolahan data, pemodelan *Fuzzy Mamdani*, validasi hasil, serta penyusunan kesimpulan.

Model fuzzy dibangun dengan dua input: rasio jarak elektroda potensial P dan nilai tahanan terukur R. Himpunan *fuzzy* untuk P terdiri atas DEKAT, IDEAL, dan JAUH, sedangkan R terdiri atas RENDAH, SEDANG, dan TINGGI. Output merupakan nilai koreksi tahanan. Pemodelan dan evaluasi dilakukan menggunakan MATLAB. Untuk menguji konsistensi model, hasil evalfis dibandingkan dengan perhitungan manual *Centroid*.



Gambar 1. Membership function pada model *Fuzzy Mamdani*

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran menggunakan metoda tiga titik menunjukkan nilai tahanan pada beberapa titik pengukuran. Pada contoh pengujian konvensional, diperoleh nilai 4,50 Ω , 6,20 Ω , dan 5,80 Ω dengan nilai rata-rata 5,50 Ω . Nilai rata-rata tersebut berada di atas batas PUIL 5 Ω sehingga diperlukan evaluasi lanjutan menggunakan pendekatan fuzzy.

Tabel 1. Hasil pengukuran tahanan tanah metoda tiga titik

Parameter	Nilai	Satuan
Titik 1	4,50	Ω
Titik 2	6,20	Ω
Titik 3	5,80	Ω
Rata-rata	5,50	Ω
Standar PUIL	5,00	Ω

Analisis data juga menunjukkan pengaruh karakteristik tanah dan kondisi cuaca terhadap tahanan. Tanah lempung memiliki rata-rata tahanan sekitar 0,68 Ω , lebih rendah dibandingkan tanah aluvial sekitar 0,97 Ω dan tanah berbatu sekitar 1,22 Ω . Kondisi basah menghasilkan rata-rata sekitar 0,73 Ω , sedangkan kondisi kering meningkat menjadi sekitar 1,35 Ω . Temuan ini menunjukkan bahwa kelembapan dan karakteristik tanah perlu dipertimbangkan ketika menafsirkan hasil pengukuran.

Pemodelan dan Evaluasi *Fuzzy Mamdani*

Pada studi kasus I, nilai rata-rata tahanan 5,50 Ω dikombinasikan dengan parameter kelembapan 6, kondisi tanah 4, dan interferensi 7. Hasil *EvalFIS* menghasilkan 5,861 Ω , sedangkan perhitungan manual *Centroid* menghasilkan 5,543 Ω dengan selisih 0,3178 Ω . Nilai koreksi tetap menempatkan kondisi pentanahan di atas batas *PUIL* sehingga memerlukan perhatian teknis lebih lanjut.

Tabel 2. Parameter dan hasil *Fuzzy Mamdani* studi kasus I

Variabel	Nilai	Keterangan
Kelembapan	6	Skala 0–10
Kondisi tanah	4	Skala 0–10
Interferensi	7	Skala 0–10
R rata-rata	5,5	Ω
EvalFIS	5,861	Ω
Centroid manual	5,543	Ω

Pada studi kasus II, nilai rata-rata tahanan 3,50 Ω masih berada di bawah batas *PUIL* 5 Ω . Hasil *EvalFIS* sebesar 3,586 Ω dan *Centroid* manual sebesar 3,283 Ω memiliki selisih 0,3036 Ω . Nilai hasil koreksi tetap berada di bawah standar sehingga kondisi pentanahan dikategorikan memenuhi kelayakan dan tetap perlu dipantau secara berkala.

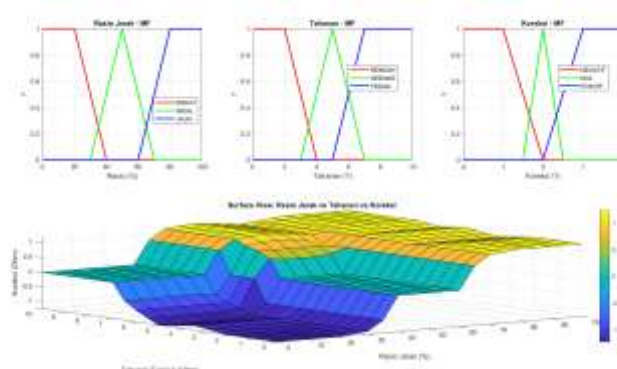
Tabel 3. Perbandingan hasil pengukuran dan evaluasi studi kasus II

Parameter	Nilai (Ω)
Pengukuran awal	3,500
Hasil EvalFIS	3,586
Centroid manual	3,283
Selisih	0,3036

Pada studi kasus III, rata-rata tahanan 13,50 Ω jauh melebihi batas PUIL. Hasil EvalFIS sebesar 14,984 Ω dan Centroid manual sebesar 14,933 Ω memiliki selisih 0,0508 Ω . Kedekatan kedua hasil menunjukkan konsistensi proses inferensi dan defuzzifikasi. Hasil koreksi yang tetap tinggi menegaskan bahwa kondisi pentanahan tidak layak dan memerlukan tindakan perbaikan, seperti penambahan elektroda atau perbaikan kualitas tanah.

Tabel 4. Parameter dan hasil Fuzzy Mamdani studi kasus III

Parameter	Nilai	Keterangan
Kelembapan	8	Skala 0–10
Kondisi tanah	2	Skala 0–10
Interferensi	8	Skala 0–10
R rata-rata	13,5	Ω
EvalFIS	14,984	Ω
Centroid manual	14,933	Ω



Gambar 2. Visualisasi membership function dan surface view sistem Fuzzy Mamdani Simulasi MATLAB menggunakan input Rasio Jarak P = 40% dan Tahanan Terukur R = 6 Ω . Nilai Rasio P memiliki derajat keanggotaan 0,5 pada himpunan IDEAL, sedangkan R = 6 Ω berada pada transisi SEDANG dan TINGGI dengan derajat keanggotaan masing-masing 0,5. Dari sembilan aturan yang tersedia, dua aturan aktif dengan *firing strength* 0,5. Setelah *implikasi*, *agregasi*, dan *defuzzifikasi Centroid*, diperoleh nilai koreksi 0,829 Ω dan tahanan terkoreksi 6,829 Ω .

Tabel 5. Contoh pengujian skenario input model Fuzzy Mamdani

Rasio P (%)	R (Ω)	Koreksi (Ω)	Hasil terkoreksi (Ω)
40	6	0,829	6,829
30	3	-1,129	1,871
50	8	1,233	9,233
45	6	0,829	6,829
35	4	0	4,000

Evaluasi Akurasi Model

Evaluasi dilakukan menggunakan Mean Absolute Error (MAE) dan Root Mean Square Error (RMSE) untuk membandingkan hasil pengukuran konvensional dengan nilai hasil evaluasi fuzzy. Berdasarkan data pengujian, diperoleh MAE sebesar 0,638 Ω dan RMSE

sebesar 0,834 Ω . Nilai RMSE yang sedikit lebih besar daripada MAE menunjukkan adanya beberapa skenario dengan kesalahan lebih tinggi, tetapi model tetap menunjukkan kestabilan secara keseluruhan.

Tabel 6. Evaluasi akurasi model Fuzzy berdasarkan MAE dan RMSE

No	Konvensional (Ω)	Fuzzy (Ω)	Error Absolut	Error ²
1	5,00	5,000	0,000	0,000
2	3,00	1,871	1,129	1,274
3	8,00	9,233	1,233	1,520
4	6,00	6,829	0,829	0,687
5	4,00	4,000	0,000	0,000
Rata-rata			MAE 0,638	RMSE 0,834

Secara keseluruhan, hasil pengukuran menunjukkan bahwa sebagian besar titik berada pada kategori bagus dan sedang, dengan variasi yang dipengaruhi jenis tanah, kelembapan, dan cuaca. *Integrasi Fuzzy Mamdani* memberikan koreksi adaptif terhadap hasil pengukuran dan menghasilkan keluaran yang relatif konsisten dengan perhitungan manual. Pada contoh $P = 40\%$ dan $R = 6 \Omega$, model memberikan koreksi positif sehingga tahanan terkoreksi menjadi 6,829 Ω . Hal ini menunjukkan bahwa *fuzzy* dapat digunakan sebagai alat bantu interpretasi hasil pengukuran pada kondisi lapangan yang memiliki ketidakpastian.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa metoda tiga titik menggunakan *Kyoritsu 4105A* dapat diterapkan untuk mengukur tahanan pentanahan pada SUTET 500 kV Gardu Induk Ngimbang. Hasil pengukuran memperlihatkan sebagian besar titik berada pada kategori bagus dan sedang, sedangkan karakteristik tanah dan kondisi cuaca berpengaruh terhadap nilai tahanan. Pemodelan *Fuzzy Mamdani* memberikan koreksi adaptif terhadap data pengukuran. Evaluasi model menghasilkan MAE 0,638 Ω dan RMSE 0,834 Ω . Pada studi kasus tahanan rendah, *EvalFIS* menghasilkan 3,586 Ω dengan selisih 0,3036 Ω terhadap Centroid manual 3,283 Ω , sedangkan pada tahanan tinggi diperoleh 14,984 Ω dengan selisih 0,0508 Ω terhadap perhitungan manual 14,933 Ω . Hasil tersebut menunjukkan konsistensi model dalam mengevaluasi kondisi pentanahan.

Pemantauan sistem pentanahan perlu ditingkatkan dan pengukuran berkala setiap enam bulan sebaiknya disertai pemantauan kondisi yang lebih mendalam. Pengambilan data juga perlu mencakup variasi musim dan jenis tanah. Untuk penelitian selanjutnya, model *Fuzzy Mamdani* dapat dikembangkan dengan menambahkan parameter resistivitas tanah, konfigurasi elektroda, dan kondisi lingkungan agar evaluasi semakin *representatif*.

DAFTAR PUSTAKA

- Setiawan, R. D., & Rijanto, T. (2020). Pengaruh penambahan bentonit untuk mereduksi nilai resistansi pentanahan. *Jurnal Teknik Elektro*, 8(2).
- Mahabbah, R., Permata, E., & Mardillah, L. R. (2023). Pemeliharaan pentanahan pada tower transmisi milik PT PLN Persero ULTG Cikupa. *Jurnal Penelitian Rumpun Ilmu Teknik*, 2(4), 165–173. <https://doi.org/10.55606/juprit.v2i4.3082>
- Alfa, E. H., Anshar, C. N., & Ridal, Y. (2024). Analisa kelayakan tahanan pembumian menara transmisi SUTT 150 KV. *Jurnal MESIL*, 5(2), 106–167.
- Gunawan, R., Yulisman, Y., & Kamil, M. (2021). Analisis pengaruh penambahan elektroda terhadap nilai tahanan pentanahan tower 105 SUTT 150 kV. *Ensiklopedia Research and Community Service Review*, 1(1), 75–88. <https://doi.org/10.33559/err.v1i1.1090>
- Pontiawan, H., Hasto, K., & Margono, M. (2020). Analisa sistem pentanahan kaki menara SUTT 150 kV Pati-Jekulo. *Prosiding Seminar Nasional NCIET*, 227–241.
- Faisal, A., Amril, M., Hidayat, J., & Hasnita, U. (2020). Studi pengukuran tahanan pentanahan menara SUTT 150 KV Sidikalang-Salak. *JET*, 4(3), 130–134.
- Tauhid, G. F., et al. (2025). Fuzzy logic dalam keputusan jumlah produksi berbasis website dengan metode Mamdani. *Jurnal Inovasi Komputer (INOKOM)*, 1(2). <https://doi.org/10.71200/inokom.v1i2.34>
- Hamdani, M. W., Stefanie, A., & Saragih, Y. (2022). Perancangan dan implementasi metode kontrol fuzzy logic Mamdani pada sistem kontrol TDS dan pH hidroponik. *JTT*, 10(2), 171–183. <https://doi.org/10.32487/jtt.v10i2.1555>
- Fitrianto, H., Mubarak, A., & Edwar, K. (2023). Analisis statistik gangguan akibat sambaran petir pada saluran transmisi. *Jurnal Energi dan Ketenagalistrikan*, 1(2), 145–156. <https://doi.org/10.33322/juke.v1i2.16>
- Muha, T. S. R., Warmi, Y., & Dewi, A. Y. (2024). Optimalisasi sistem pentanahan untuk mengurangi back flashover. *Bulletin of Community Engagement*, 4(3), 322–333.
- Samanhudi, H. W. A. (2022). *Transmisi dan distribusi*. Penerbit P4I.
- Arifin, J. (2021). Pengukuran nilai grounding terbaik pada kondisi tanah berbeda. *Jurnal ELTIKOM*, 5(1), 40–47. <https://doi.org/10.31961/eltikom.v5i1.251>
- Markoni. (2022). *Teknik infrastruktur jaringan distribusi tenaga listrik*. Penerbit Andi.
- Wahyudi, I., Fauzan, F., & Mahalla, M. (2022). Studi sistem pentanahan GI Juli 150 kV PT. PLN (Persero) Wilayah Aceh. *Jurnal TEKTRON*, 6(1).
- Nurdiana, N., & Radeli, R. (2022). Pengaruh kondisi tanah terhadap tahanan pentanahan kaki menara 150 kV Kramasan-Mariana. *Jurnal Surya Energy*, 6(2), 62–66. <https://doi.org/10.32502/jse.v6i2.3774>
- Idris, A. R., Usman, U., & Suyono, W. (2021). Analisis pengaruh pemasangan counterpoise pada tower transmisi SUTT 70 kV. *SNTEI*, 104–109.
- Ahleyani, M., et al. (2025). Eksperimen pengaruh kelembapan dan jarak elektroda terhadap pentanahan. *Jurnal Sains, Sosial, dan Studi Agama*, 1(2), 169–190.
- Ramelan, A., Iftadi, I., & Sari, D. M. (2024). Design of IoT-based ground resistance monitoring and control systems. *2024 FORTEI-ICEE*, 124–129. <https://doi.org/10.1109/FORTEI-ICEE64706.2024.10824381>

- Noordin, M. I. I., & Othman, N. A. (2023). The experimental analysis for different rod configurations of grounding system. *Evolution in Electrical and Electronic Engineering*, 4(2), 215–224.
- Putri, S. I. (2022). Perancangan logika fuzzy metode Mamdani Singleton pada panel surya otomatis. *Jurnal Sosial Teknologi*, 2(6), 560–566. <https://doi.org/10.59188/jurnalsostech.v2i6.353>
- Alptekin, B., & Kahraman, N. (2024). Fuzzy logic-based safe speed calculation method for maritime autonomous surface ship. 2024 *HORA*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/HORA61326.2024.10550736>
- Idris, A. R., Alfira, W. P., Razak, I., & Suyono, W. (2021). Analisis pengaruh pemasangan counterpoise dan direct grounding. *SNP2M*, 6(1), 109–114.
- Sunanto, S., Firdaus, R., & Siregar, M. S. (2021). Implementasi logika fuzzy Mamdani pada kendali suhu dan kelembaban ruang server. *Jurnal CoSciTech*, 2(2), 128–136. <https://doi.org/10.37859/coscitech.v2i2.3362>
- Ardyanti, A. A. A. P., et al. (2021). Penyiraman tanaman otomatis dengan metode fuzzy Mamdani. *Jurnal Teknologi Informasi dan Komputer*, 7(1). <https://doi.org/10.36002/jutik.v7i1.1304>
- Anggita, E., Dewatama, D., & Fauziyah, M. (2023). Pengimplementasian tegangan keluaran panel surya dengan topologi Zeta konverter menggunakan kontrol logika fuzzy. *TESLA*, 25(1), 92–102. <https://doi.org/10.24912/tesla.v25i1.23307>
- Cahyandaru, H. P. (2022). Rugi-rugi daya dan susut tegangan pada saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET) 500 kV Ungaran-Pedan. *SENASTER*, 3(2).
- Joedo, L. A., & Darmawan, I. P. (2020). Peningkatan batas aman induksi elektromagnetik SUTET 500 kV. *Kilat*, 9(1), 49–56. <https://doi.org/10.33322/kilat.v9i1.780>
- Rahmayanti, S., Maulani, E., Chandra, Y., & Fithra, H. (2023). Pengaruh pergerakan kaki tower terhadap struktur tower transmisi SUTET 500 KV. *Prosiding Senastesia*, 25.
- Nabila, A. (2022). Analisis kerugian energi pada saluran udara transmisi ekstra tinggi 500 kV Gandul-Kembangan. *KOLONI*, 1(4), 883–890.