

Analisa Pengaruh Arus Bocor terhadap Penurunan Daya Tahan Dielektrik pada Isolator Bersih 150 kV

Rahmadhania¹ Yusreni Warmi² Sitti Amalia³ Sepannur Bandri⁴ Arfita Yuana Dewi⁵
Program Studi Teknik Elektro Sarjana, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Padang, Kota
Padang, Provinsi Sumatera Barat, Indonesia^{1,2,3,4,5}
Email: 2020310014.rahmadhania@itp.ac.id¹

Abstrak

Saluran transmisi 150 kV Koto Panjang – Payakumbuh di Sumatera Barat sering terganggu akibat sambaran petir karena tingginya kepadatan petir di wilayah tersebut. Flashover pada isolator, baik akibat polusi maupun kondisi ekstrem di lingkungan, dapat memicu terjadinya arus bocor sehingga menurunkan daya tahan dielektrik dan mempengaruhi kinerja jaringan. Penelitian ini menganalisis pengaruh arus bocor terhadap daya tahan dielektrik pada isolator bersih yang mengalami flashover, menggunakan metode Hileman dengan memasukkan nilai ESDD, NSDD, dan data eksperimen dari laboratorium tegangan tinggi UGM. Hasil penelitian ini menunjukkan peningkatan arus bocor menurunkan daya tahan dielektrik; penurunan terbesar daya tahan dielektrik berdasarkan eksperimen adalah 0,95% dari nilai standar BIL ketika arus bocor meningkat 12,56%, sementara metode Hileman memprediksi penurunan 0,92% ketika peningkatan arus bocor sebesar 11,98%. Studi ini menggarisbawahi pentingnya perbaikan desain dan pemeliharaan isolator serta strategi mitigasi untuk meningkatkan keandalan jaringan di wilayah rawan petir.

Kata Kunci: Arus Bocor, Daya Tahan Dielektrik, ESDD, NSDD

Abstract

The 150 kV Koto Panjang - Payakumbuh transmission line in West Sumatra is often disrupted by lightning strikes due to the high density of lightning in the region. Flashover on insulators, either due to pollution or extreme conditions in the environment, can trigger leakage currents that reduce dielectric resistance and affect network performance. This study analyzes the effect of leakage current on dielectric resistance in clean insulators that experience flashover, using Hileman's method by inputting ESDD, NSDD, and experimental data from the UGM high voltage laboratory. The results of this study show an increase in leakage current decreases dielectric durability; the largest decrease in dielectric durability based on experiments is 0.95% of the BIL standard value when leakage current increases by 12.56%, while Hileman's method predicts a decrease of 0.92% when leakage current increases by 11.98%. This study underscores the importance of improved insulator design and maintenance as well as mitigation strategies to increase grid reliability in lightning-prone regions.

Keywords: Leakage Current, Dielectric resistance, ESDD, NSDD



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

PENDAHULUAN

Saluran transmisi 150 kV Koto Panjang – Payakumbuh di Sumatera Barat sering mengalami gangguan akibat tingginya kepadatan petir, terutama di wilayah perbukitan yang mencatat 82% terjadinya insiden flashover (Warmi & Azzahra, 2022). Flashover pada isolator, dapat mengakibatkan kerusakan pada permukaan isolator sehingga dapat memberikan jalan yang lebih mudah untuk dialiri arus yang dapat mengakibatkan peningkatan arus bocor dan juga berpengaruh terhadap daya tahan dielektrik dari isolator tersebut yang secara langsung dapat mengurangi keandalan jaringan transmisi (Warmi & Ismail, 2018). Isolator listrik merupakan salah satu elemen terpenting yang menentukan keandalan jalur transmisi dan distribusi (Shaojie et al., 2020). Isolator yang rusak menjadi salah satu penyebab utama

pemadaman listrik, mengganggu kontinuitas penyaluran daya dan menurunkan keandalan sistem transmisi (Shaojie et al., 2020). Daya tahan kekuatan dielektrik dari isolator dapat menyebabkan kegagalan dalam isolasi yang berakibat terhentinya pelayanan dalam operasi tenaga Listrik (Bloom & Reenen, 2013). Isolator harus mampu menahan tegangan operasi normal, tegangan berlebih di atas level tertentu, dan tekanan mekanis (Dimitropoulou et al., 2015), sehingga Isolator yang baik harus mempunyai daya tahan dielektrik yang besar agar dapat menjalankan fungsinya dengan baik sehingga diharapkan bisa membuat kinerja sistem lebih handal dan optimal (Rasyid & Murdiya, 2017)

Penelitian sebelumnya banyak berfokus pada dampak polusi terhadap isolator. Studi oleh [8] berfokus pada pengaruh polutan pada penurunan daya tahan dielektrik isolator di daerah transmisi. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa debu, asap industri, dan garam laut yang menempel pada permukaan isolator menyebabkan flashover yang signifikan, terutama di wilayah dengan tingkat polusi yang tinggi. Studi ini menunjukkan bagaimana kontaminasi menjadi penyebab utama penurunan daya tahan dielektrik isolator, tetapi tidak membahas secara detail isolator bersih. Selain itu, penelitian [9] menyoroti bagaimana lumut pada isolator porselen dalam kondisi basah meningkatkan risiko flashover. Namun, penelitian tentang isolator bersih yang tetap mengalami flashover akibat kondisi lingkungan ekstrem atau kepadatan petir tinggi masih sangat terbatas. Sementara itu, penelitian seperti [7] mengungkapkan bahwa kondisi atmosfer memengaruhi kekuatan dielektrik, tetapi belum mencakup analisis mendalam pada isolator bersih yang mengalami flashover.

Kesenjangan penelitian ini terletak pada kurangnya studi tentang pengaruh arus bocor terhadap daya tahan dielektrik isolator bersih yang mengalami flashover. Sebagian besar penelitian lebih berfokus pada isolator yang terkontaminasi, sementara isolator bersih yang menghadapi risiko flashover akibat faktor lingkungan di wilayah dengan kepadatan petir tinggi belum dibahas secara menyeluruh. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi baru dalam memahami perilaku isolator bersih pada kondisi tersebut, yang relevan untuk meningkatkan keandalan saluran transmisi di daerah rawan petir. Kebaruan yang dibahas dalam penelitian ini berfokus pada analisis pengaruh arus bocor terhadap daya tahan dielektrik isolator bersih yang mengalami flashover, khususnya di saluran transmisi 150 kV Koto Panjang – Payakumbuh yang memiliki tingkat kepadatan petir tinggi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisa pengaruh arus bocor terhadap daya tahan dielektrik pada isolator bersih yang telah mengalami flashover, khususnya pada saluran transmisi 150 kV Koto Panjang – Payakumbuh. Penelitian ini menggunakan metode Hileman dalam menghitung arus bocor dan daya tahan dielektrik pada isolator. Meskipun metode ini sering digunakan untuk menganalisa pengaruh backflashover pada saluran transmisi akibat sambaran petir, penelitian ini lebih berfokus pada analisis isolator bersih yang mengalami flashover. Dengan demikian, penelitian ini akan memberikan wawasan baru terkait isolator bersih yang juga dapat mengalami flashover akibat pengaruh lingkungan di daerah dengan kepadatan petir yang tinggi.

METODE PENELITIAN

Jenis penelitian ini adalah studi eksperimental untuk mengetahui pengaruh arus bocor terhadap daya tahan dielektrik dari isolator bersih yang mengalami flashover, yang mana terdapat data primer dan data sekunder dalam metode pengambilan datanya.

1. Data primer, yaitu data yang diambil dari pengujian / eksperimen yang telah dilakukan, berupa data pengujian berat dari kontaminan yang menempel pada permukaan isolator (ESDD dan NSDD) menggunakan metode *swab technique*, kemudian data nilai arus bocor hasil eksperimen dengan melakukan pengujian menggunakan alat MWB Jerman 100 kV

2. Data sekunder, pengumpulan data yang dilakukan berdasarkan teori seperti data-data yang berasal dari buku, referensi, jurnal ilmiah dan yang lainnya.

Tabel 1. Data saluran transmisi koto Panjang- payakumbuh

| KETERANGAN | NILAI |
|----------------------|-------------------------------------|
| Jenis saluran | SUTT 150 Kv |
| panjang saluran | 169,9 Kms = 84,844 Km |
| jumlah tower | 248 buah |
| jenis tower | AA, BB, CC, DD |
| lebar kaki menara | 5 m |
| IKL | 174 hari/ tahun |
| Tipe konduktor | ACSR/GSW 1 x 330/40 mm ² |
| diameter kawat phasa | 25,5 mm |
| diameter kawat tanah | 9.6 mm |

Berdasarkan data investigasi lapangan yang telah dilakukan, dari 248 tower yang terdapat di saluran transmisi Koto Panjang-Payakumbuh, terdapat 68 tower yang terkena gangguan dari tahun 2012-2021, dari 68 tower yang mengalami gangguan tersebut didapat 130 kali gangguan selama beberapa tahun terakhir dan diambil sampel dari tower yang mengalami gangguan paling banyak. Adapun data dari 68 tower yang memiliki gangguan paling banyak tersebut dapat dilihat pada tabel berikut:

Tabel 2. Data Tower yang terkena gangguan paling banyak

| No Tower | Jumlah Gangguan | Resistansi (Ω) | Posisi Area | Jenis Tanah | ρ(Ω/m) |
|----------|-----------------|----------------|-------------|-------------|--------|
| 17 | 9 | 4.38 | Bukit | Batu | 9.29 |

Tabel 2 diatas menjelaskan tower no.17 merupakan tower dengan jumlah gangguan paling banyak diantara tower lainnya, dengan besarnya nilai tahanan / resistansinya adalah 4.38 ohm dan berada di daerah perbukitan. Begitupun untuk nilai ESDD dan NSDD dari isolator tersebut, yang mana nilai tersebut didapatkan dari hasil pengujian yang telah dilakukan di laboratorium Teknik tegangan tinggi UGM. Adapun nilai dari ESDD dan NSDD dari isolator bersih yang mengalami flashover (cacat) adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Data nilai ESDD dan NSDD

| Jenis Isolator | ESDD (mg/cm ²) | NSDD (mg/cm ²) |
|-----------------------------------|----------------------------|----------------------------|
| Isolator bersih cacat (flashover) | 0.03575195 | 0.012043471 |

Data yang didapatkan ini, akan dimasukkan ke dalam perhitungan arus bocor menggunakan metode Hileman. Metode Hileman membahas tentang back flashover yang terjadi karena sambaran petir menyambar kawat tanah pada menara, apabila tahanan kaki pentanahan menara lebih besar maka akan terjadi yang namanya back flashover atau lompatan api balik dari kawat tanah ke kawat fasa. dengan menggunakan metode hileman maka kita bisa mencari nilai arus bocor hasil perhitungan dengan persamaan:

$$I_C = \frac{CF_{ONS} - V_{PF}}{R_e(1-C)} \quad (1)$$

$$R_e = \frac{(R_i + R_t)Z_g}{Z_g + 2(R_i + R_t)} \quad (2)$$

Dimana:

$$R_t = \frac{\rho(L \times ESDD)}{S_a \times V} + \frac{\rho(L \times NSDD)}{M_2 - M_1} \quad (3)$$

Dalam metode hileman, digunakan iterasi untuk mendapatkan nilai nya, sehingga untuk melakukan iterasi digunakan software matlab sebagai tools pembantu untuk memudahkan perhitungan. Kemudian jika hasil I_c sudah ada, maka kita dapat melanjutkan perhitungan daya tahan dielektrik dari isolator tersebut. Adapun persamaan yang digunakan dalam menghitung nilai daya tahan dielektrik tersebut merupakan model linier yang digunakan untuk memprediksi kinerja isolator dengan hasil eksperimen menunjukkan bahwa peningkatan arus bocor berbanding lurus dengan penurunan kemampuan isolasi, terutama dalam kondisi polusi yang lebih tinggi (Joneidi et al., 2013)

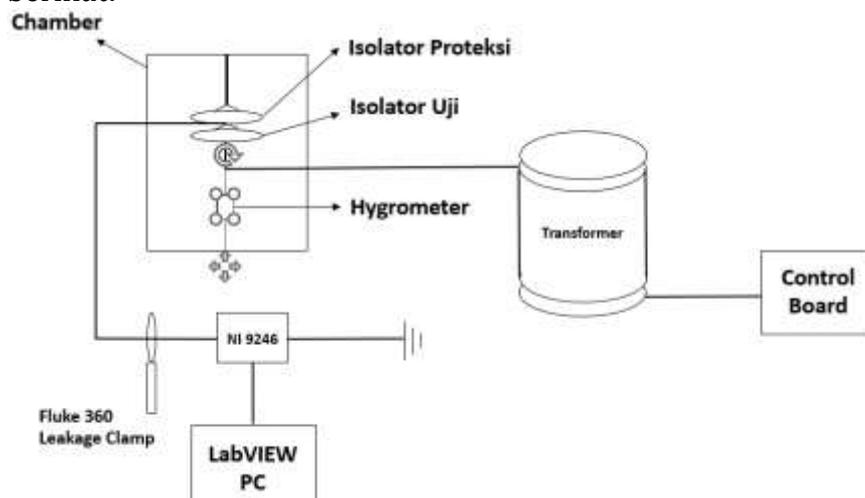
$$E_d = BIL - m \times I_c \quad (4)$$

Adapun untuk nilai arus bocor hasil eksperimen, dilakukan pengujian dilaboratorium Teknik tegangan tinggi UGM menggunakan alat ukur MWB Jerman 100 kV. Alat ini merupakan instrument pengukuran yang digunakan untuk memantau dan merekam arus bocor pada sistem tegangan tinggi. Berikut merupakan gambar pengukuran arus bocor menggunakan alat ukur MWB Jerman 100 kV.



Gambar 1. Pembangkit MWB Jerman 100 kV

Adapun rangkaian ekivalen pengujian di laboratorium Teknik tegangan tinggi UGM adalah sebagai berikut:



Gambar 2. Rangkaian Ekivalen Pengujian Arus Bocor

Dapat dilihat dari gambar 2 rangkaian ekivalen pengujian arus bocor, terdapat *chamber* yang merupakan ruang tempat pengujian, di dalam *chamber* terdapat 2 isolator yaitu isolator uji dan isolator proteksi dan juga *hygrometer*. Isolator uji yang berfungsi untuk menghubungkan objek uji ke transformer dan isolator proteksi fungsinya untuk mencegah kerusakan pada saat pengujian, Sebelum *chamber* terdapat transformer dan *control board*, dimana transformer digunakan untuk mengatur tegangan yang akan disalurkan ke komponen uji yang akan dikontrol melalui *control board*/papan kontrol. Di dalam *chamber* terdapat *ygrometer* alat yang digunakan untuk mengukur kelembapan, pengujian di dalam *chamber* ini dilakukan dalam lingkungan dengan kelembapan yang terkontrol. Output dari proses di dalam *chamber* diukur langsung oleh *Leakage Clamp*, alat yang digunakan untuk mengukur arus bocor. Hasil pengukuran arus bocor ini langsung divisualisasikan dalam bentuk grafik melalui perangkat lunak NI DIADEM/labview.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil eksperimen yang dilakukan di Laboratorium Teknik Tegangan Tinggi UGM menunjukkan nilai arus bocor (I_c) dari isolator yang telah mengalami flashover. Hasil Eksperimen Nilai arus bocor maksimum yang diukur selama eksperimen adalah 0.9444 mA, sementara nilai arus bocor minimum adalah 0.67 mA. Nilai-nilai ini divalidasi melalui beberapa pengujian menggunakan perangkat lunak NI DIADEM/labview. Nilai ESDD dan NSDD diukur untuk menentukan tingkat kontaminasi isolator yang telah mengalami flashover, meskipun isolator yang menjadi objek kita adalah isolator bersih, tetapi tidak menutup kemungkinan bahwa isolator tersebut terdapat kontaminan, oleh karena itu maka diperlukan pengujian nilai ESDD dan NSDD. Nilai yang diperoleh adalah ESDD = 0.03575195 mg/cm² dan NSDD = 0.012043471 mg/cm², yang termasuk dalam kategori kontaminasi ringan berdasarkan standar IEC 60815. Dalam melakukan perhitungan untuk mencari nilai arus bocor menggunakan metode hileman, serta untuk menghitung nilai daya tahan dielektrik nya digunakan persamaan sebelumnya: Berdasarkan persamaan (3), maka:

$$R_t = \frac{9.29(1.6 \times 0.03575195)}{0.243 \times 2.5 \times 10^{-4}} + \frac{9.29(1.6 \times 0.012043471)}{0.0001113 - 0.0000908}$$

$$R_t = 87.6 \Omega + 87.024 \Omega$$

$$R_t = 174.624 \Omega$$

Substitusikan persamaan (3) ke dalam persamaan (2)

$$R_e = \frac{(11.25 + 174.52)354.21}{354.21 + 2(11.25 + 174.52)}$$

$$R_e = 90.67 \Omega$$

Kemudian hitung nilai I_c berdasarkan persamaan (1)

$$I_c = \frac{1931.81 - 85.73}{90.67(1 - 0.388)}$$

$$I_c = 33.27 A$$

Setelah didapatkan nilai perhitungan awal tersebut yaitu 33.27 A, dalam metode Hileman, Langkah selanjutnya melakukan iterasi untuk mendapatkan nilai akhir dari I_c , Setelah dilakukan iterasi menggunakan matlab, maka didapatkan nilai arus bocor perhitungan sebesar 0.000916 A. nilai ini mendekati nilai I_c eksperimen yaitu sebesar 0.0009444 A dengan galat antara eksperimen dengan perhitungan adalah sebesar 3.01%. Kemudian, dalam pengujian eksperimen digunakan 4 data nilai arus bocor, sehingga dalam metode perhitungan hileman, untuk mencari nilai data lainnya dilakukan interpolasi sehingga diperoleh nilai I_c sebagai berikut:

Tabel 4. Nilai I_c eksperimen dan I_c Hileman

| Ic Eksperimen(mA) | Ic Hileman(mA) |
|-------------------|----------------|
| 0.67 | 0.695 |
| 0.753 | 0.744 |
| 0.839 | 0.818 |
| 0.9444 | 0.916 |

Berdasarkan tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai arus bocor maksimum hileman yaitu 0.916 mA, nilai ini dapat dikatakan hampir mendekati nilai I_c eksperimen yaitu 0.9444 mA dengan selisih sekitar 0.284 mA yang menunjukkan perbedaan yang cukup kecil, begitu pun dengan nilai-nilai sebelumnya dari nilai I_c eksperimen yang konsisten dengan tren bahwa metode hileman memberikan hasil yang mendekati eksperimen. Setelah mendapatkan nilai I_c hileman, maka menggunakan data nilai arus bocor tersebut, dapat di cari nilai daya tahan dielektrik dari isolator menggunakan persamaan (4):

$$E_d = BIL - m \times I_c$$

Contoh perhitungan:

a. Untuk nilai I_c 0.9444 mA, maka E_d :

$$I_c \text{ dalam mA: } 0.9444 \text{ mA}$$

$$E_d = 110 \text{ kV} - 1.1 \text{ kV/mA} \times 0.9444 \text{ mA}$$

b. Untuk nilai I_c 0.916 mA, maka E_d :

$$I_c \text{ dalam mA: } 0.916 \text{ mA}$$

$$E_d = 110 \text{ kV} - 1.1 \text{ kV/mA} \times 0.916 \text{ mA}$$

$$E_d = 108.99 \text{ kV}$$

Berdasarkan persamaan (4) tersebut, maka didapatkan nilai perhitungan daya tahan dielektrik:

Tabel 5. Nilai perhitungan daya tahan dielektrik

| Ic Eksperimen(mA) | Ic Hileman(mA) | ED eksperimen(kV) | Ed Hileman(kV) |
|-------------------|----------------|-------------------|----------------|
| 0.67 | 0.695 | 109.26 | 109.49 |
| 0.753 | 0.744 | 109.17 | 109.24 |
| 0.839 | 0.818 | 109.07 | 109.09 |
| 0.9444 | 0.916 | 108.96 | 109 |

Berdasarkan tabel diatas, dapat dilihat bahwa Ketika nilai arus bocor meningkat, maka nilai daya tahan dielektrik menurun, yaitu Ketika nilai arus bocor maksimum 0.9444 mA, menghasilkan daya tahan dielektrik sebesar 108.96 kV, sedangkan Ketika nilai arus bocor minimum/kecil yaitu sebesar 0.67 (eksperimen) dan 0.463 (Hileman) maka nilai daya tahan dielektrik mengalami peningkatan yaitu sebesar 109.26 kV (eksperimen) dan 109.49 kV (Hileman), hal ini sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa semakin besar arus bocor maka daya tahan dielektrik dari sebuah isolator akan menurun. Untuk nilai daya tahan dielektrik dari data diatas berkisar antara 108.96 kV hingga 109.26 kV, variasi ini menunjukkan bahwa arus bocor memiliki pengaruh langsung terhadap kemampuan suatu isolator dalam menahan tegangan, akan tetapi dikarenakan isolator yang diuji merupakan isolator bersih dengan kontaminan yang paling minimal, pengaruh arus bocor terhadap daya tahan dielektriknya tidak terlalu signifikan sehingga masih bisa dikatakan bahwa isolator tersebut masih bisa dioperasikan atau digunakan.



Gambar 3. Grafik pengaruh arus bocor terhadap daya tahan dielektrik

Berdasarkan nilai yang telah didapatkan, maka dapat dihitung persentase perubahan dari arus bocor dan daya tahan dielektrik menggunakan persamaan persentase perubahan, sehingga setelah dilakukan perhitungan persentase tersebut, dari hasil eksperimen penurunan daya tahan dielektrik terbesar terjadi Ketika arus bocor meningkat sebesar 12.56 % (0.839 ke 0.9444) yang mengakibatkan penurunan daya tahan dielektrik sebesar 0.95% dari nilai standar BIL, sedangkan berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode Hileman, penurunan daya tahan dielektrik maksimal terjadi Ketika arus bocor meningkat sekitar 11.98 % (0.818 ke 0.916), yang mengakibatkan penurunan daya tahan dielektrik sebesar 0.92 % dari nilai standar BIL.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil eksperimen penurunan daya tahan dielektrik terbesar terjadi Ketika arus bocor meningkat sebesar 12.56 % (0.839 ke 0.9444) yang mengakibatkan penurunan daya tahan dielektrik sebesar 0.95% dari nilai standart BIL, sedangkan berdasarkan hasil perhitungan menggunakan metode Hileman, penurunan daya tahan dielektrik maksimal terjadi Ketika arus bocor meningkat sekitar 11.98 % (0.818 ke 0.916), yang mengakibatkan penurunan daya tahan dielektrik sebesar 0.92 % dari nilai standart BIL. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar arus bocor maka akan berpengaruh terhadap penurunan nilai daya tahan dielektrik isolator. Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, didapatkan bahwa peningkatan arus bocor secara konsisten menyebabkan penurunan daya tahan dielektrik, yang mana terdapat korelasi yang jelas antara peningkatan arus bocor dan penurunan daya tahan dielektrik. Peningkatan arus bocor yang signifikan dapat mendekatkan isolator ke batas kritis daya tahan dielektriknya, sehingga isolator menjadi lebih rentan terhadap flashover. Diperlukan implementasi teknologi pemantauan yang lebih canggih dan intensif, seperti sistem sensor berbasis IoT, untuk memantau secara real-time arus bocor pada isolator, terutama di daerah dengan kepadatan petir tinggi. Dengan demikian, deteksi dini terhadap peningkatan arus bocor bisa dilakukan sehingga langkah mitigasi dapat diterapkan lebih cepat untuk mengurangi risiko gangguan pada saluran transmisi.

DAFTAR PUSTAKA

- Bloom, N., & Reenen, J. Van. (2013). Pengujian Tegangan Tembus Pada Isolasi Rubber Dalam Rendaman Minyak. *NBER Working Papers*, 9(1), 89.
- Dimitropoulou, M., Pylarinos, D., Siderakis, K., Thalassinakis, E., & Danikas, M. (2015). Comparative Investigation of Pollution Accumulation and Natural Cleaning for Different HV Insulators. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 5(2), 764–774. <https://doi.org/10.48084/etasr.545>
- Rasyid, A., & Murdiya, F. (2017). Karakteristik Tegangan Tembus Ac Pada Material Isolasi Padat Campuran Resin Dengan Alumina (Al₂O₃). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 4(2), 1–6.
- Shaojie, Q., Zhigang, W., & Yongchao, S. (2020). Research on fault diagnosis model of transmission line under lightning stroke based on neural network. *Journal of Physics: Conference Series*, 1684(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1684/1/012151>
- Warmi, Y., & Azzahra, M. A. (2022). Investigasi Eksperimental Kekuatan Dielektrik Isolator pada Saluran Transmisi 150 kV Koto Panjang – Payakumbuh. *Prosiding Sains Nasional Dan Teknologi*, 12(1), 539. <https://doi.org/10.36499/psnst.v12i1.7205>
- Warmi, Y., & Ismail, F. (2018). Perbaikan Desain Proteksi Petir Saluran Transmisi 150 kV Payakumbuh – Koto Panjang. *Jurnal Teknik Elektro ITP*, 7(1), 1–6. <https://doi.org/10.21063/jte.2018.3133701>