

Pendekatan Matematis untuk Memprediksi Tegangan Kritis Isolator Polimer Resin Epoksi

Amelya Indah Pratiwi
Kampus Universitas Muslim Indonesia
Jl. Urip Sumahardjo Km. 5, Makassar 90231
e-mail: amelyaindah.pratiwi@umi.ac.id

Abstrak— Isolator pasangan luar seringkali mengalami kegagalan kerja dibandingkan isolator dalam ruangan. Faktor kondisi lingkungan yakni kontaminasi dan kelembaban menjadi pemicu terjadinya flashover. Flashover merupakan kondisi pelepasan muatan berupa percikan api disepanjang jalur rambat permukaan isolator yang dapat menyebabkan hubung singkat satu fasa ke tanah. Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi tegangan kritis isolator polimer resin epoksi dengan metode analitik yakni menggunakan persamaan matematis. Persamaan matematis disusun dengan memperhatikan faktor geometris isolator dan konduktivitas permukaan isolator. Hasil perkiraan analitik kemudian divalidasi dengan hasil pengujian tegangan flashover isolator di Laboratorium. Hasilnya menunjukkan bahwa tegangan kritis perkiraan analitik dan tegangan flashover pengujian memiliki nilai yang tidak jauh berbeda. Ini menunjukkan bahwa pendekatan tegangan kritis metode analitik dapat digunakan untuk memprediksi tegangan flashover isolator. Ini memungkinkan perancangan isolator dengan kualifikasi terbaik dan meminimalisir penggunaan sampel isolator untuk uji coba kualitas isolator terbaik.

Kata kunci: *Tegangan Kritis, Flashover, Konduktivitas Permukaan, Kontaminasi, Persamaan Matematis*.

Abstract— Outdoor insulators often experience work failure compared to indoor insulators. Environmental factors, namely contamination and humidity, trigger flashover. Flashover is a condition of charge release in the form of sparks along the insulator surface propagation path that can cause a single-phase short circuit to the ground. This study aims to predict the critical voltage of epoxy resin polymer insulators using an analytical method using a mathematical equation. The mathematical equation is compiled by considering the geometric factors of the insulator and the conductivity of the insulator surface. The results of the analytical estimate are then validated with the results of the insulator flashover voltage test in the Laboratory. The results show that the analytical estimate critical voltage and the test flashover voltage have values that are not much different. This shows that the analytical method critical voltage approach can be used to predict the insulator flashover voltage. This allows the design of the best qualified insulator and minimizes the use of insulator samples for the best insulator quality test.

Keywords: *Critical Voltage, Flashover, Surface Conductivity, Contamination, Mathematical Equations*.

I. PENDAHULUAN

Salah satu peralatan penting dalam sistem kelistrikan yakni isolator. Isolator berfungsi memisahkan bagian yang bertegangan dengan bagian yang tidak bertegangan. Isolator yang banyak digunakan saat ini adalah isolator polimer. Secara fisik, isolator polimer lebih ringan dibandingkan isolator keramik, kaca atau porselin. Isolator polimer resin epoksi juga memiliki sifat kimia yang baik. Ketahanannya yang tinggi pada kondisi lingkungan korosif. Selain itu, sifat hidrofobisitasnya juga tinggi[1][2]. Dari segi pembuatan lebih mudah dan hargapun lebih murah dibandingkan jenis kaca maupun keramik. Kelebihan-kelebihan inilah yang membuat penggunaan isolator polimer resin epoksi semakin meningkat dan menarik untuk dikembangkan[3][4].

Kinerja isolator dapat diliitinjau dari karakteristik tegangan flashover. Tegangan flashover adalah tegangan pada saat terjadi lewat denyar atau lompatan bunga api pada sepanjang jalur rambat isolator akibat mengalirnya arus bocor pada jalur konduktif. Jalur konduktif ini terbentuk akibat adanya

bagian korosif pada permukaan isolator. Bagian korosif akan semakin melebar dengan tingginya konsentrasi medan listrik, kelembaban lingkungan, dan kontaminasi berupa garam, debu dan partikel lain yang menempel pada permukaan isolator. Jalur konduktif ini rentan terbentuk pada bagian-bagian permukaan isolator yang tersembunyi. Kontaminasi polutan pada bagian tersembunyi susah dibersihkan secara alami oleh air hujan.

Karaktersitik tegangan flashover isolator berkaitan dengan konduktivitas permukaan. Penelitian ini menganalisis pengaruh konduktifitas permukaan terhadap tegangan flashover isolator. Metode yang digunakan yakni metode analitik yakni persamaan matematis tegangan kritis isolator dan metode eksperimental di laboratorium tegangan tinggi. Tegangan kritis dengan metode analitik kemudian akan divalidasi dengan hasil pengujian laboratorium untuk menguji apakah metode analitik sudah mendekati hasil pengujian.

Prediksi tegangan flashover dengan persamaan matematis memungkinkan kita mendapat gambaran kinerja isolator yang akan dibuat tanpa pengujian laboratorium. Hal ini memungkinkan untuk meminimalisir jumlah material uji yang digunakan. Persamaan matematis melibatkan bentuk geometris isolator, pengaruh suhu, kelembaban, dan resistivitas.

II. STUDI PUSTAKA

Kegagalan kerja isolator dapat disebabkan oleh persitiwa tembus listrik pada udara disekitar permukaan isolator dan tembus listrik yang menyebabkan isolator pecah. Flashover merupakan fenomena loncatan api sepanjang jalur rambat isolator. Fenomena flashover tergantung pada resistansi permukaan isolator dan bentuk isolator[5]. Terdapat banyak faktor yang menjadi pemicu flashover diantaranya yakni polutan[6][7][8]. Polutan yang menempel pada jalur rambat bisa menjadi korosif sehingga konsentrasi medan listrik semakin besar pada bagian tersebut. Bagian korosif ini memiliki resistansi yang rendah dibandingkan bagian permukaan yang tidak korosif. Bagian korosif inilah yang kemudian menjadi jalur mengalirnya arus bocor. Selain itu, faktor kelembaban menjadi pemicu percepatan terbentuknya lapisan elektrolit pada permukaan yang terpolusi. Berbagai penelitian terhadap pengaruh kontaminasi polutan pada isolator, menyebutkan bahwa kontaminasi polutan garam memiliki pengaruh besar terjadinya arus bocor dan flashover[9][10].

Flashover dapat menyebabkan hubung singkat satu fasa ke tanah. Gangguan ini tidak hanya dapat merusak fisik isolator tetapi gangguan pada sistem kelistrikan seperti pemadaman. Pemeliharaan isolator penting dilakukan seperti pembersihan secara rutin[10], penggantian isolator yang sudah tidak layak digunakan. Pembersihan alami oleh air hujan, hanya mampu membersihkan bagian-bagian yang terlihat sedangkan bagian tersembunyi seperti bagian bawah isolator rentan korosif karena timbunan polutan dan lebih lembab[10]. Terbentuknya pita kering menyebabkan gangguan medan listrik sepanjang permukaan isolator yang medan listriknya lebih tinggi daripada tegangan tembus udara[11]. Hal tersebut memicu percikan api hingga pelepasan muatan pada jalur pita kering.

Mekanisme flashover diawali dari kontaminasi yang menempel pada permukaan isolator[12] dan pembentukan daerah pita kering. Kontaminasi yang menempel seperti garam, debu, kotoran burung pada kondisi lembab akibat embun, hujan, salju menyebabkan penurunan resistansi pada permukaan isolator dimana polutan menempel. Arus bocor yang mengalir melalui permukaan terpolusi menyebabkan kenaikan temperatur permukaan dan kondisi tersebut mempercepat pembentukan lapisan pita kering. Proses yang berulang akan menyebabkan lapisan pita kering terbentuk sepanjang jalur rambat isolator. Pelepasan muatan akan terjadi pada daerah pita kering. Perpanjangan pelepasan busur api sepanjang permukaan inilah yang menyebabkan flashover[13].

Penelitian [10] memodelkan arus bocor isolator berbahan kaca dengan pendekatan deret fourier. Arus bocor dengan pemodelan dan pengukuran hasilnya hampir sama. Persamaan matematis didapatkan dari data arus bocor yang disimpan dalam file bertipe teks pada program Mathlab.

Penelitian [14] memprediksi tegangan lewat denyar isolator berdasarkan data arus bocor. SPSS digunakan untuk menentukan persamaan arus bocor sebagai fungsi dari tegangan uji. Matlab digunakan untuk menganalisis nilai maksimum arus bocor yang terjadi pada suatu tegangan uji. Tegangan uji pada saat arus maksimum inilah yang dimaksudkan sebagai tegangan lewat denyar. Didapatkan hasil esitimasi tegangan lewat denyar tidak jauh berbeda dengan data tegangan lewat denyar dari name plate isolator. Penelitian [15] menyebutkan terdapat pengaruh lapisan pita kering yang terbentuk pada permukaan isolator terhadap fenomena flashover. Penelitian menggunakan model dinamik untuk memprediksi tegangan flashover dan membandingkan hasilnya dengan tegangan flashover pengujian laboratorium. Disebutkan bahwa terdapat korelasi yang baik antara hasil pengujian laboratorium dan hasil prediksi tegangan dengan model dinamik.

III. METODE

A. Teknik Perhitungan

Perhitungan karakteristik tegangan flashover secara analitik dilakukan dengan memodelkan isolator resin epoksi. Pada model ini, tegangan total yang dipakai dibagi tiga bagian dengan anggapan bahwa pengotoran permukaan berbeda untuk daerah permukaan yang dekat dengan logam, permukaan sebelah atas dan permukaan sebelah bawah. Pengolahan data untuk menganalisis tegangan kritis isolator uji menggunakan program excel.

Data-data fisik isolator yang diperlukan untuk perhitungan karakteristik tegangan kritis isolator adalah :

- 1) Total Jarak rambat arus bocor (Creepage distance) = L
- 2) Jarak rambat arus bocor bagian bawah (Protect Creepage Distance) = l_1
- 3) Jari-jari maksimum terluar isolator (r_m)
- 4) Jari – jari logam penyangga (r_t)

B. Teknik Pengujian

Pengujian dilakukan untuk mendapatkan hasil yang sebanding dengan kinerja isolator di laboratorium. Tahapan-tahapan pengujian tegangan flashover di laboratorium dapat dirincikan sebagai berikut :

- 1) Pembuatan polutan untuk isolator uji berupa larutan air dan garam.
- 2) Pengukuran konduktifitas larutan polutan.
- 3) Perendaman Isolator uji pada larutan pengotor selama satu jam.
- 4) Pengujian tegangan flashover pada isolator yang telah direndam. Setelah isolator uji digantungkan pada pengait di dalam lemari uji atau chamber, tegangan dinaikkan secara bertahap menjadi 15 kV/jam sampai terjadi flashover.
- 5) isolator uji dibilas sampai bersih dengan air kemudian mengulangi prosedur satu sampai empat untuk konsentrasi garam yang berbeda.

Alat-alat yang digunakan yaitu :

1. Chamber atau lemari uji
2. Multi meter digital (PC Link)
3. Laptop
4. Panel pembagi tegangan
5. Kontrol desk

6. Trafo pengujian
7. Termometer dan kelembaban analog
8. Konduktifitas meter
9. Timbangan
10. Ember

Bahan yang digunakan antara lain :

1. Bahan yang diuji yaitu isolator polimer resin epoksi



Gambar 1. Kontruksi sampel isolator uji

2. Bahan pengotoran (polutan) buatan yaitu garam NaCl.



Gambar 2. Garam NaCl

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Karakteristik Tegangan Flashover Hasil Perkiraan Analitik.

Tabel 1 di bawah menunjukkan data isolator yang diperlukan untuk melakukan perhitungan perkiraan karakteristik tegangan flashover analitik:

Tabel 1. Data sampel Isolator Polimer Resin epoksi

| | |
|--|---------|
| Jari-jari maksimum terluar isolator (r_m) | 4,1 cm |
| Jari-jari logam penyanga (r_t) | 2,25 cm |
| Jarak rambat arus bocor bagian bawah (l_1) | 24,2 cm |
| Total jarak rambat isolator (l) | 41 cm |

Dalam perhitungan, parameter busur api yang digunakan sesuai dengan logam yang digunakan, yaitu $A = 63$ dan $n = 0,76$ yang merepresentasikan karakteristik konduktivitas termal dan respons busur pada logam pengait isolator. Nilai-nilai ini diadopsi dari referensi standar pengujian tegangan tinggi untuk logam pengantar pada isolator jenis polimer.

Dengan mempertimbangkan kondisi ideal, diasumsikan bahwa distribusi pengotoran bersifat seragam di seluruh permukaan isolator dan pengaruh termal akibat kenaikan suhu diabaikan. Asumsi ini bertujuan untuk menyederhanakan model perhitungan awal dan memisahkan pengaruh utama dari konduktivitas permukaan terhadap karakteristik tegangan flashover. Jika asumsi pengotoran seragam dan efek perubahan panas diabaikan, maka ditentukan:

$$\rho_{st} = \rho_{sp}, \text{ sehingga } \lambda = \frac{\rho_{st}}{\rho_{sp}} = 1$$

Faktor Konduktivitas Permukaan (C_f) = 1

Dari data isolator pada tabel 1 diatas dapat ditentukan konstanta isolator seperti yang dapat dilihat pada tabel 2 di bawah.

Tabel 2. Konstanta isolator resin epoksi

| | |
|------------------------------------|---------|
| $M = \frac{l_1}{L}$ | 0,590 |
| $B = \frac{r_m}{L}$ | 0,1 |
| $a = \frac{(r_t - r_m)}{L(1 - M)}$ | - 0,110 |

Dengan menggunakan rumus yang telah diperoleh pada persamaan 4 dengan anggapan pengotoran seragam dan pengaruh perubahan konduktivitas diabaikan, maka dengan menentukan dahulu harga F dan q dari persamaan 1 dan 2 harga V_c dapat ditentukan.

Menentukan nilai q dengan menggunakan persamaan 2, sehingga diperoleh nilai q sebagai berikut :

$$q = \frac{\lambda \cdot B}{a \cdot M \cdot C_f} = \frac{1 \times 0,1}{(-0,110 \times 0,590 \times 1)} \\ = -1,5408 \quad (1)$$

Setelah menentukan nilai q maka akan diperoleh nilai F berdasarkan persamaan .

$$F = \frac{B^q}{(B + a(M - 1))^2} \\ = \frac{(0,1)^{-1,5408}}{0,1 - 0,110(0,590 - 1)^{-1,5408}} \\ = 1,7745 \quad (2)$$

Dengan didapatkannya nilai F dan q maka, besar tegangan kritis adalah :

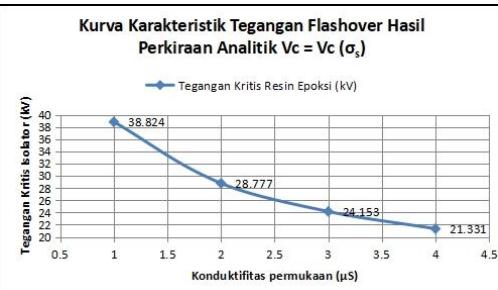
$$V_c = ML(n + 1)(AF)^{\frac{1}{n+1}} \left(\frac{C_f}{2\pi r_m e} \right)^{\frac{n}{(n+1)}} \rho_{sp}^{\frac{n}{(n+1)}} \\ = 0,590 \times 41(0,76 + 1)(63,2 \times 1,7745)^{\frac{1}{0,76+1}} \left(\frac{1}{2\pi \times 4,1 \times 2,718} \right)^{\frac{0,76}{(0,76+1)}} \rho_{sp}^{\frac{0,76}{0,76+1}} \\ = 622,019 \times 0,1597 \times \rho_{sp}^{0,432} \\ = 99,335 \rho_{sp}^{0,432} \quad (3)$$

Setelah menentukan tegangan kritis yang bergantung pada variasi konduktivitas permukaan isolator resin epoksi, data perhitungannya dirangkum dalam Tabel 3 berikut.

Hasil analisis dihimpun dalam bentuk kurva estimasi analitik untuk menggambarkan kinerja isolator yang terpengaruh oleh pengotoran yakni kurva $V_c = V_c(\sigma_s)$, sebagaimana disajikan di bawah ini.

Tabel 3. Tegangan Kritis Analitik Isolator Polimer

| Konduktifitas Permukaan Isolator σ_{sp} (μs) | Tegangan Kritis Isolator (kV) |
|--|-------------------------------|
| 1 | 38,824 |
| 2 | 28,777 |
| 3 | 24,153 |
| 4 | 21,331 |



Gambar 1. Grafik pengaruh konduktifitas permukaan terhadap tegangan kritis perkiraan analitik

Kurva di atas menunjukkan bahwa semakin besar konduktifitas permukaan isolator akibat pengotoran maka nilai tegangan kritisnya akan semakin menurun.

B. Karakteristik Tegangan Flashover Pada Isolator Polimer Resin Epoksi Yang Terkontaminasi Polutan Garam NaCl.

Pengujian tegangan flashover isolator polimer Resin Epoksi yang dilakukan di laboratorium Tegangan Tinggi Universitas Hasanuddin dilakukan dengan menerapkan tegangan 21 kV. Sebelum diuji isolator direndam pada larutan polutan garam NaCl. Tegangan terus menerus dinaikkan secara bertahap sampai terjadi flashover pada permukaan isolator uji.

Data hasil pengujian tegangan flashover isolator resin epoksi ditunjukkan pada tabel 4 di bawah.

Tabel 4. Data pengamatan untuk kontaminasi garam NaCl isolator Resin Epoksi

| Polutan Garam | | Arus Bocor (mA) | Tegangan kritis (kV) |
|---------------|----------------------------------|--------------------|-------------------------|
| Berat (gram) | Konduktifitas larutan garam (mS) | | |
| 25 | 9,660 | 11,685 | 45,18 |
| 50 | 13,79 | 28,05 | 30,12 |
| 75 | 18,60 | 37,87 | 24,09 |
| 100 | 24,70 | 53,78 | 21,08 |

Pada pengujian tegangan flashover untuk isolator polimer resin epoksi dengan konsentrasi polutan garam yang berbeda-beda seperti terlihat pada tabel 4 di atas, diperoleh hasil bahwa dengan bertambahnya konsentrasi atau berat dari polutan garam NaCl maka arus bocor isolator uji semakin besar dan tegangan kritisnya makin rendah.

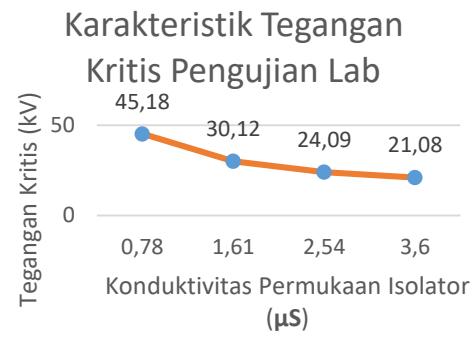
Dari hasil perhitungan untuk faktor bentuk atau profil faktor (PF) diperoleh untuk faktor bentuk isolator uji Resin Epoksi adalah 1,409 maka konduktifitas permukaan isolator uji Resin Epoksi bisa dihitung dengan persamaan $G = \sigma_{sp} \cdot \frac{1}{F}$. Hasilnya diperlihatkan pada tabel 5 di bawah.

Tabel 5. Hasil pengujian tegangan flashover Resin Epoksi

| Konduktifitas (σ_{sp}) | Tegangan Kritis (Vc) |
|---------------------------------|----------------------|
| 0,78 | 45,18 |
| 1,61 | 30,12 |
| 2,54 | 24,09 |
| 3,60 | 21,08 |

Pada tabel 5 di atas dapat kita lihat bahwa semakin besar konduktifitas permukaan isolator akibat pengotoran maka tegangan kritis isolator akan semakin menurun. Hal ini dikarenakan konduktifitas berbanding terbalik dengan resistifitas atau tahanan isolator sehingga resistifitas akan semakin kecil dengan pembesaran konduktifitas. Arus bocor akan semakin besar dengan membesarnya jalur konduktif pada permukaan isolator.

Dibawah ini diperlihatkan kurva karakteristik tegangan kritis isolator resin epoksi sebagai fungsi konduktifitas permukaan yang merupakan hasil pengujian yang disajikan pada tabel 5 di atas.



Gambar 2. Grafik Pengaruh konduktifitas permukaan isolator terhadap tegangan kritis (pengujian laboratorium)

C. Perbandingan Karakteristik Tegangan Flashover Hasil Perkiraan Analitik Dengan Hasil Pengujian Laboratorium Untuk Isolator Resin Epoksi.

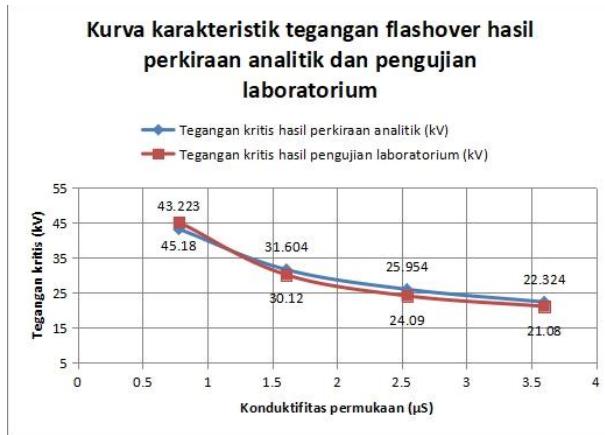
Di bawah ini disajikan tabel perbandingan karakteristik hasil perkiraan analitik dan pengujian laboratorium untuk isolator resin epoksi.

Tabel 6. Karakteristik tegangan flashover hasil perkiraan analitik dan hasil pengujian untuk isolator resin epoksi.

| Konduktifitas permukaan σ_s (μS) | Tegangan flashover | |
|--|-------------------------|-----------------------------|
| | Perkiraan Analitik (kV) | Pengujian Laboratorium (kV) |
| 0,78 | 43,223 | 45,18 |
| 1,61 | 31,604 | 30,12 |
| 2,54 | 25,954 | 24,09 |
| 3,60 | 22,324 | 21,08 |

Hasil perbandingan antara perhitungan analitik dan pengujian laboratorium menunjukkan pola konsisten, yaitu penurunan tegangan flashover seiring meningkatnya konduktivitas permukaan isolator akibat polusi. Perbedaan nilai antara keduanya dipengaruhi oleh faktor-faktor real di laboratorium seperti kelembaban, kondisi permukaan tidak homogen, dan variabilitas bentuk busur yang tidak dimodelkan dalam pendekatan teoritis. Namun, deviasi rata-rata yang relatif kecil menunjukkan bahwa model analitik dapat digunakan sebagai pendekatan awal yang cukup akurat dalam meramalkan performa isolator terhadap kondisi polusi permukaan.

Grafik hasil perbandingan pada tabel 6 di atas dapat dilihat pada gambar 3 di bawah.



Gambar 3. kurva karakteristik hasil perkiraan analitik dan hasil pengujian di laboratorium untuk isolator resin epoksi.

Tegangan kritis terendah hasil pengujian sebesar 21,08 kV sedangkan hasil perkiraan analitik, tegangan terendah 22,324 kV. Berdasarkan perhitungan analitik dan hasil pengujian, dapat disimpulkan bahwa isolator resin epoksi mengalami penurunan kemampuan isolasi seiring meningkatnya konduktivitas akibat kontaminasi permukaan.

V. KESIMPULAN

Tegangan kritis yang diperoleh dari persamaan matematis berhasil mendekati karakteristik riil di laboratorium, sehingga valid untuk digunakan sebagai metode prediksi awal dalam desain atau seleksi isolator pada sistem transmisi tegangan tinggi di lingkungan terkontaminasi. Penelitian kedepan bisa mempertimbangkan pengaruh panas, dan ketidak seragaman pengotoran. Termasuk pertimbangan penggunaan metode kecerdasan buatan untuk optimasi model persamaan matematis dari data arus bocor maupun tegangan flashover hasil pengujian laboratorium.

REFERENSI

- [1] Y. Harun and A. I. Pratiwi, “Karakteristik dielektrik isolator polimer resin epoksi berbahan pengisi abu tongkol jagung,” *Electr.*, 2020, doi: 10.23960/elc.v14n1.2141.
- [2] A. I. Pratiwi and M. Asri, “Analisis Tegangan Tembus Dan Hidrofobisitas Isolator Nano Komposit Resin Epoksi Dan SiO₂,” *Jambura J. Electr. Electron. Eng.*, vol. 3, no. 2, pp. 89–93, 2021, doi: 10.37905/jjeee.v3i2.10763.
- [3] P. Studi Teknik Mesin, J. Balai Desa Marindal No, and K. Deli Serdang, “Analisa Sifat Mekanis Komposit Epoksi/Partikel Silika dari Ekstraksi Sekam Padi Bagian II: Pemodelan The Study of Mechanical Properties of Epoxy/ Silica Particle Composite from Rice Husk Extraction Part II: Modelling Mulyadi,” *IRA J. Tek. Mesin dan Apl.*, vol. 1, no. 1, pp. 75–80, 2022.
- [4] M. Sajadifar, M. Ehsani, D. Zaarei, and H. A. Khonakdar, “Epoxy resin/POSS/chitosan-modified silica nanocomposite: Characterization of thermal and mechanical properties,” *Polym. Eng. & Sci.*, vol. 65, no. 1, pp. 135–148, 2025, doi: <https://doi.org/10.1002/pen.26997>.
- [5] M. G. A. Rahman, M. G. A. Rahman, M. Dhofir, M. Dhofir, H. Suyono, and H. Suyono, “Pengaruh Jumlah Sirip Permukaan Isolator Polietilen Terhadap Tingkat Arus Bocor Dan Tegangan Flashover Pada Kondisi Kering Dan Basah,” *Thesis UB*, 2020, doi: null.
- [6] S. R. N., M. Dhofir, M. Dhofir, H. Purnomo, and H. Purnomo, “Analisis Pengaruh Kelembaban Udara, Suhu, Dan Polutan Garam Terhadap Arus Bocor Isolator Pin Berbahan Porselen,” *Jurnal Mahasiswa Teknik UB*, 2016, doi: null.
- [7] N. H. Fauzan, S. Pramonohadi, M. A. A. Syam, and R. R. Ardiantara, “Studi Pengaruh Kelembapan dan Polutan pada Kinerja Isolator Arrester 20 kV,” *J. Nas. Tek. Elektro dan Teknol. Inf.*, 2023, doi: 10.22146/jnteti.v12i2.6324.
- [8] Y. Ambabunga and H. Masiku, “Analisis Kerusakan isolator Saluran Transmisi Tegangan Tinggi Akibat Pengaruh Polutan (Kondisi Kering Dan Basah),” *J. Dyn. Saint*, 2023, doi: 10.47178/dynamicsaint.v6i2.1369.
- [9] S. Mohammadnabi, S. Mohammadnabi, K. Rahmani, and K. Rahmani, “Influence of humidity and contamination on the leakage current of 230-kV composite insulator,” *Electr. Power Syst. Res.*, 2021, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107083.
- [10] I. Salam and M. Facta, “Pemodelan Arus Bocor Isolator Disk Berbahan Dasar Kaca Pada Kondisi Kering Dan Basah,” *Transient*, vol. 4, no. 2, pp. 330–336, 2015.
- [11] C. H. Amadea, C. H. Amadea, M. Dhofir, and M. Dhofir, “Pengaruh Letak Pita Konduksi Pada Permukaan Isolator Dengan Elektroda Tidak Seragam Terhadap Tingkat Arus Bocor,” *null*, 2018, doi: null.
- [12] A. Supardi, A. Supardi, A. Supardi, and A. Supardi, “Karakteristik Flashover pada Isolator Non Keramik,” *null*, 2018, doi: 10.23917/emitor.v2i2.6002.
- [13] D. D. Andaru, D. D. Andaru, M. Dhofir, M. Dhofir, R. N. Hasanah, and R. N. Hasanah, “Pengaruh Lokasi Pita Konduksi Pada Permukaan Isolator Kaca Terhadap Tingkat Arus Bocor,” *null*, 2017, doi: null.
- [14] V. R. Yandri *et al.*, “Perkiraan Tegangan Lewat Denyar Isolator Tegangan Menengah 20 kV Keramik dan Resin Epoksi berdasarkan Data Arus Bocor,” *Eur. J. Immunol.*, 2019, doi: 10.30630/eji.11.1.98.
- [15] A. Ali *et al.*, “Influence of single and multiple dry bands on critical flashover voltage of silicone rubber outdoor insulators: simulation and experimental study,” *Energies*, 2018, doi: 10.3390/en11061335.