



Efek Kelembapan Udara Terhadap Tegangan *Flashover* Isolator Porselen Terkontaminasi *NaCl*

Muhamad Carwin^{1*}, Aripin², Rian Nurdiansyah³

¹⁻³ Universitas Siliwangi, Indonesia

Alamat: Jl. Mugarsari, Kec. Tamansari, Kab. Tasikmalaya, Jawa Barat 46196

Email: 207002024@student.unsil.ac.id¹, aripin@unsil.ac.id²,
riannurdiansyah42@unsil.ac.id³

Korespondensi penulis: 207002024@student.unsil.ac.id¹

Abstract: Insulators are electrical components with dielectric properties that serve as separators between conductors and overhead line towers. The performance of an insulator is significantly influenced by environmental conditions, particularly air humidity. High humidity can increase the conductivity of the contaminant layer on the insulator surface, thereby elevating the risk of flashover. This study aims to analyze the effect of air humidity on the flashover voltage of porcelain insulators contaminated with NaCl salt. A quantitative experimental method was employed with relative humidity variations of 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, and 95%, while the NaCl contamination level was kept constant. Flashover voltage testing was conducted using the Slow Rate of Rise Test, with nine trials performed for each humidity level. The results indicated that increasing air humidity decreased the flashover voltage from 93.66 kV to 57.57 kV. Furthermore, the measured Equivalent Salt Deposit Density (ESDD) value increased from 0.2567 mg/cm² to 0.5857 mg/cm². This rise in ESDD values suggests that higher humidity enhances the degree of ionization and the dissolution effectiveness of salt pollutants on the insulator surface, which ultimately increases surface conductivity. These findings demonstrate that air humidity plays a critical role in degrading surface insulation performance and must be carefully considered in evaluating insulator reliability in humid environments.

Keywords: ESDD, Flashover, Humidity, Insulator, NaCl.

Abstrak: Isolator merupakan komponen listrik yang mempunyai sifat dielektrik, berfungsi sebagai pemisah antara konduktor dengan menara saluran udara. Kinerja pada isolator sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan salah satunya kelembapan udara. Karena kelembapan dapat meningkatkan konduktivitas lapisan kontaminan pada permukaan isolator dan memperbesar risiko terjadinya *flashover*. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh kelembapan udara terhadap tegangan *flashover* isolator porselen yang terkontaminasi garam NaCl. Metode yang digunakan adalah eksperimen kuantitatif dengan variasi kelembapan relatif 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, dan 95%, sedangkan tingkat kontaminasi NaCl dijaga tetap. Pengujian tegangan *flashover* dilakukan menggunakan *Slow Rate of Rise Test*, dan setiap tingkat kelembapan diuji sebanyak sembilan kali. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan udara menurunkan tegangan *flashover* dari 93,66 kV menjadi 57,57 kV dan nilai *Equivalent Salt Deposit* (ESDD) terukur mengalami kenaikan dari 0,2567 mg/cm² menjadi 0,5857 mg/cm². Kenaikan nilai ESDD ini menunjukkan bahwa kelembapan yang lebih tinggi meningkatkan derajat ionisasi dan efektivitas pelarutan polutan garam di permukaan isolator, yang pada akhirnya meningkatkan konduktivitas permukaan. Temuan ini menunjukkan bahwa kelembapan udara berperan penting dalam menurunkan performa isolasi permukaan, sehingga perlu dipertimbangkan dalam evaluasi keandalan isolator pada lingkungan lembap.

Kata Kunci: ESDD, *Flashover*, Isolator, Kelembapan, NaCl

1. LATAR BELAKANG

Isolator merupakan komponen penting dalam sistem tenaga listrik karena berfungsi memisahkan bagian bertegangan dari struktur penyangga sekaligus menjaga keandalan penyaluran energi listrik (Maraaba et al., 2022). Pada sistem tegangan tinggi, kinerja isolator sangat dipengaruhi oleh kondisi permukaan, jenis material, dan lingkungan operasi (Salem et

al,2022). Dalam kondisi ideal, isolator harus mampu mempertahankan kekuatan dielektrik permukaan sehingga pelepasan listrik tidak berkembang menjadi *flashover* (ASTM International, 2020). Namun, pada kondisi luar ruang, permukaan isolator sering terpapar polutan dan kelembapan yang dapat mengubah sifat elektrik permukaan isolator (Maraaba et al., 2022).

Salah satu jenis polutan yang relevan adalah NaCl karena garam bersifat mudah larut dan aktif ketika berinteraksi dengan uap air di lingkungan (IEC60507, 2013). Ketika kelembapan udara meningkat, lapisan kontaminan NaCl pada permukaan isolator menjadi lebih mudah menyerap air dan membentuk jalur konduktif tipis (Mohammadnabi & Rahmani, 2021). Kondisi ini meningkatkan arus bocor, mempercepat pembentukan *dry band*, dan pada akhirnya menurunkan tegangan *flashover* permukaan. Oleh sebab itu, kelembapan udara tidak hanya berperan sebagai kondisi lingkungan, tetapi juga sebagai faktor yang mengaktifkan lapisan polutan pada isolator tercemar (Chen et al., 2022)

Beberapa penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa kondisi atmosfer dan kontaminasi berpengaruh terhadap performa isolator (Salem et al., 2022). Amalia et al. menunjukkan bahwa kelembapan dan temperatur memengaruhi karakteristik *flashover* pada isolator keramik saluran transmisi tegangan tinggi (Amalia et al., 2024). Chen et al. juga melaporkan bahwa kelembapan relatif dan polusi memengaruhi karakteristik string isolator tercemar pada sistem AC/DC (Chen et al., 2022). Mohammadnabi dan Rahmani menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan berpengaruh terhadap tegangan *flashover* pada isolator tercemar (Mohammadnabi & Rahmani, 2021). Salem et al. menegaskan bahwa distribusi polusi, tingkat kontaminasi, dan kondisi lingkungan memiliki keterkaitan erat dengan fenomena *flashover* pada isolator luar ruang (Salem et al., 2023). Temuan lain juga menunjukkan bahwa profil isolator dan kondisi lingkungan bersih maupun tercemar memengaruhi kemampuan menahan tegangan *flashover* (Ali et al., 2024)

Meskipun demikian, penelitian terdahulu umumnya masih menggabungkan kelembapan dengan variabel lain, seperti temperatur, distribusi polusi, jenis sistem tegangan, atau profil isolator (Salem et al., 2022). Artinya, pengaruh kelembapan udara secara spesifik pada isolator porselen dengan kontaminasi NaCl yang dijaga tetap masih memerlukan penjelasan empiris yang lebih terfokus (Salem et al., 2023). Selain itu, hubungan antara penurunan tegangan *flashover* dan perubahan nilai *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD) pada kondisi tersebut juga masih penting untuk dikaji secara lebih sistematis (Maraaba et al., 2022).

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pengaruh kelembapan udara terhadap tegangan *flashover* isolator porselen yang terkontaminasi NaCl,

serta untuk mengevaluasi perubahan nilai ESDD pada setiap tingkat kelembapan. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi empiris dalam memahami perilaku isolator tercemar pada kondisi lembap dan menjadi dasar evaluasi keandalan isolator luar ruang pada lingkungan dengan potensi kontaminasi garam.

2. KAJIAN TEORITIS

Isolator pada sistem tenaga listrik berfungsi memisahkan bagian bertegangan dari bagian yang terhubung ke tanah atau struktur penyangga, sehingga keandalan isolator sangat menentukan keamanan dan kontinuitas penyaluran energi listrik (Maraaba et al., 2022). Pada kondisi luar ruang, kegagalan isolasi tidak hanya dipengaruhi oleh sifat bahan isolator, tetapi juga oleh kondisi lingkungan dan jenis kontaminan yang menempel pada permukaan (Salem et al., 2022). Ketika permukaan isolator terpapar polutan terlarut, terutama garam, lalu mengalami kenaikan kelembapan, lapisan kontaminan akan menjadi lebih konduktif (IEC60507, 2013). Kondisi ini memicu peningkatan arus bocor, ketidakseragaman distribusi medan listrik, pembentukan *dry band*, dan pada tahap lanjut dapat berkembang menjadi *flashover* permukaan. Dengan demikian, secara teoretis, kelembapan merupakan faktor yang berperan langsung dalam mengaktifkan lapisan kontaminan dan menurunkan ketahanan isolasi permukaan isolator (Mohammadnabi & Rahmani, 2021).

Dalam konteks kontaminasi NaCl, pengaruh kelembapan menjadi semakin penting karena pembasahan lapisan polutan dapat meningkatkan konduktivitas permukaan isolator tercemar (Mohammadnabi & Rahmani, 2021). Lapisan konduktif ini menyebabkan resistansi permukaan menurun dan arus bocor meningkat, terutama pada kondisi kelembapan yang lebih tinggi (Amalia et al., 2024). Pada isolator tercemar, kenaikan arus bocor dan perubahan kondisi permukaan kemudian berkaitan dengan pembentukan *dry band* yang berperan dalam penurunan tegangan *flashover* (Salem et al., 2024). Penelitian terbaru pada lingkungan *salt fog* juga menunjukkan bahwa perkembangan pelepasan permukaan menuju *flashover* berlangsung seiring intensifikasi gejala pelepasan pada permukaan isolator (Wu et al., 2025). Oleh sebab itu, hubungan antara kelembapan udara dan tegangan *flashover* pada isolator terkontaminasi NaCl dapat dijelaskan melalui peningkatan konduktivitas lapisan permukaan, kenaikan arus bocor, dan perkembangan pelepasan listrik pada kondisi pembasahan yang semakin tinggi (Ghaly, Ibrahim, Ghoneim, & Abu-siada, 2024).

Selain tegangan *flashover*, parameter lain yang penting dalam kajian kontaminasi isolator adalah *Equivalent Salt Deposit Density* atau ESDD karena parameter ini digunakan untuk mengukur tingkat kontaminasi terlarut pada permukaan isolator secara kuantitatif (Song

et al., 2025). ESDD juga tetap dipakai sebagai salah satu metrik utama dalam evaluasi kondisi polusi isolator, baik untuk pemantauan lapangan maupun pengembangan model prediksi performa isolasi (Hamanah et al., 2025). Secara konseptual, semakin tinggi nilai ESDD, semakin besar tingkat keaktifan elektrik kontaminan terlarut yang menempel pada permukaan isolator sehingga kondisi permukaan cenderung menjadi lebih kritis (Salem et al., 2024). Karena itu, perubahan ESDD dapat digunakan untuk membantu menjelaskan mengapa suatu kondisi permukaan menunjukkan ketahanan isolasi yang lebih rendah dan kecenderungan *flashover* yang lebih besar (Ali et al., 2024). Di sisi lain, karakteristik arus bocor juga sering dipakai sebagai indikator tambahan untuk membaca respons permukaan terhadap polusi dan kelembapan karena parameter tersebut berkaitan langsung dengan pembentukan jalur konduktif dan perkembangan pelepasan permukaan (Salem et al., 2022). Bahkan, penelitian terbaru menunjukkan bahwa pola arus bocor dapat dimanfaatkan untuk mengklasifikasikan tingkat kontaminasi isolator secara eksperimental pada berbagai kondisi lingkungan terkontrol (Khan et al, 2025).

Berdasarkan kerangka teori tersebut, penelitian ini bertolak dari asumsi bahwa kenaikan kelembapan udara akan meningkatkan keaktifan lapisan kontaminan NaCl, memperbesar nilai ESDD, dan pada saat yang sama menurunkan tegangan *flashover* isolator porselen. Asumsi ini tidak dinyatakan sebagai hipotesis formal, tetapi menjadi dasar logis dalam penyusunan desain eksperimen dan pembacaan hasil penelitian. Dengan demikian, kajian teoritis ini memberikan landasan bahwa hubungan antara kelembapan, kontaminasi NaCl, ESDD, dan tegangan *flashover* merupakan hubungan konseptual yang saling terikat dan relevan untuk diuji secara empiris dalam penelitian ini.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif untuk menganalisis pengaruh kelembapan udara terhadap tegangan *flashover* isolator porselen yang terkontaminasi NaCl. Desain penelitian disusun dengan menempatkan kelembapan udara sebagai variabel bebas, sedangkan tegangan *flashover* dan *Equivalent Salt Deposit Density* (ESDD) sebagai variabel terikat. Tingkat kontaminasi NaCl dijaga tetap agar pengaruh perubahan kelembapan dapat diamati secara lebih spesifik.

Objek penelitian ini adalah isolator berbahan porselen jenis pasak yang diberi kontaminasi buatan berupa larutan NaCl. Pengujian dilakukan pada tujuh tingkat kelembapan relatif, yaitu 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, dan 95%. Pada setiap tingkat kelembapan,

pengujian tegangan flashover dilakukan sebanyak sembilan kali pengulangan untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif.

3.1 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui tahapan eksperimen laboratorium. Isolator terlebih dahulu dibersihkan, kemudian disemprot menggunakan larutan NaCl dengan komposisi 50 g NaCl dalam 250 ml air aquades. Setelah lapisan kontaminan mengering, isolator diuji pada tingkat kelembapan yang telah ditentukan. Pengujian tegangan flashover dilakukan menggunakan metode Slow Rate of Rise Test, yaitu dengan menaikkan tegangan AC secara bertahap sampai terjadi flashover. Setelah pengujian selesai, permukaan isolator dicuci menggunakan air aquades, lalu konduktivitas larutan hasil pencucian diukur untuk memperoleh nilai ESDD. Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini terdiri atas data tegangan flashover pada setiap pengulangan dan data ESDD pada setiap variasi kelembapan.

3.2 Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan membandingkan nilai rata-rata tegangan flashover dan nilai ESDD pada setiap tingkat kelembapan. Hasil pengujian kemudian disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memperlihatkan pola perubahan masing-masing variabel. Analisis dilakukan dengan menekankan kecenderungan hubungan antara kenaikan kelembapan, perubahan nilai ESDD, dan penurunan tegangan flashover.

3.3 Model Penelitian

Model penelitian ini menempatkan kelembapan udara sebagai faktor yang memengaruhi kondisi permukaan isolator terkontaminasi NaCl. Peningkatan kelembapan dipandang meningkatkan keaktifan lapisan kontaminan, yang selanjutnya tercermin pada kenaikan nilai ESDD dan penurunan tegangan flashover. Dengan demikian, hubungan antarvariabel dalam penelitian ini dibangun pada alur bahwa perubahan kelembapan memengaruhi kondisi kontaminasi permukaan, lalu berdampak pada performa listrik isolator porselen.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data penelitian dikumpulkan melalui pengujian laboratorium pada isolator porselen yang telah dikontaminasi larutan NaCl dengan konsentrasi tetap. Pengujian dilakukan pada tujuh tingkat kelembapan relatif, yaitu 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90%, dan 95%. Pada setiap tingkat kelembapan, tegangan flashover diuji sebanyak sembilan kali pengulangan untuk memperoleh nilai rata-rata yang lebih representatif. Setelah pengujian selesai, permukaan isolator dicuci dan larutan hasil pencucian diukur konduktivitasnya untuk memperoleh nilai ESDD.

4.1 Hasil Pengujian Tegangan Flashover

Hasil pengujian menunjukkan bahwa kenaikan kelembapan udara diikuti oleh penurunan nilai rata-rata tegangan flashover. Ringkasan hasil pengujian disajikan pada **Tabel 4.1**.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Tegangan Flahsover

RH (%)	Tegangan Flashover (kV)									Rata-rata (kV)
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	
65 %	92,7	93,6	93	92,1	93,7	93,5	93,7	94,9	95,8	93,66
70 %	89,9	91,7	90,4	91,6	91,3	91,4	91,3	91,8	91,5	91,21
75 %	87,1	86,2	87,3	87	87,4	88,7	86,7	86,7	88,3	87,27
80 %	83,7	83,1	84,1	83,4	83,9	84,7	84,4	82,8	84,2	83,81
85 %	78,8	79,3	77,1	78,1	78,8	77,7	79,3	79,6	78,8	78,61
90 %	66,8	67,1	67,2	68,1	66,5	66,2	67,3	67,5	67,3	67,11
95 %	59,8	57	56,6	58,4	58,7	58,2	56,9	56,1	56,4	57,57

Berdasarkan Tabel 4.1, nilai rata-rata tegangan *flashover* menurun dari 93,66 kV pada kelembapan 65% menjadi 57,57 kV pada kelembapan 95%. Penurunan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kelembapan udara, semakin rendah kemampuan isolator menahan tegangan sebelum terjadi flashover. Secara keseluruhan, penurunan tegangan *flashover* mencapai sekitar 36,0% dari kondisi kelembapan terendah ke kondisi kelembapan tertinggi. Pola ini menunjukkan kecenderungan yang konsisten bahwa kelembapan berperan penting dalam menurunkan kekuatan isolasi permukaan.

4.2 Hasil Pengukuran Nilai ESDD

Berikut merupakan hasil besarnya nilai ESDD pada setiap tingkat kelembapan yang telah dilakukan setelah pengujian tegangan *flashover* yang disajikan dalam bentuk Tabel 4.2.

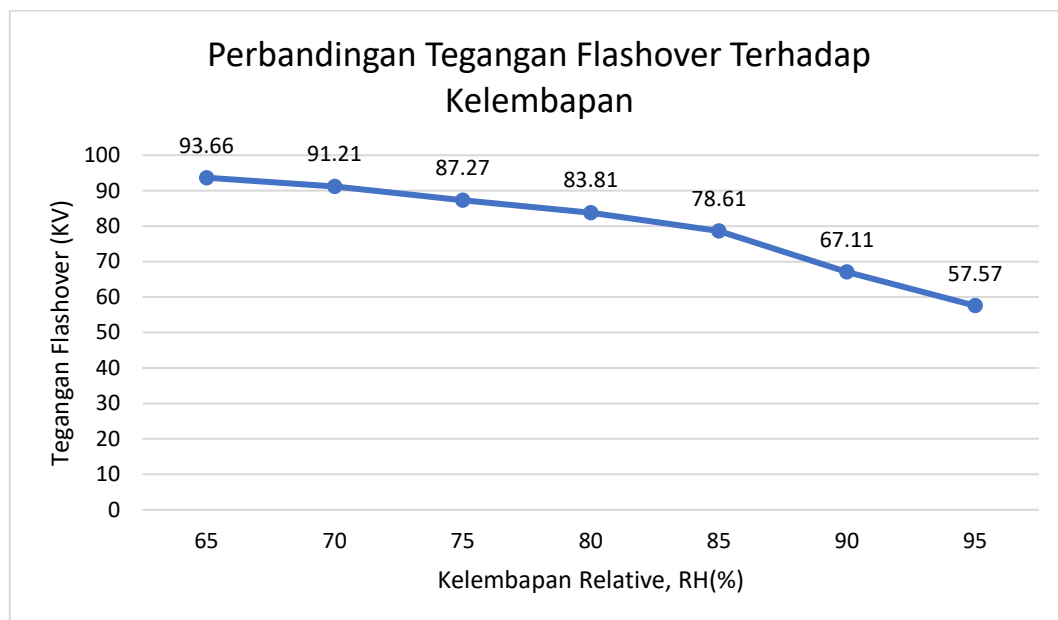
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Nilai ESDD

Kelembapan Udara (%)	ESDD (mg/cm ²)
65	0,2567
70	0,2942
75	0,3365
80	0,3857
85	0,4351
90	0,5298
95	0,5857

Berdasarkan Tabel 4.2, nilai ESDD meningkat secara bertahap seiring kenaikan kelembapan udara. Nilai ESDD terendah diperoleh pada kelembapan 65%, yaitu 0,2567 mg/cm², sedangkan nilai tertinggi diperoleh pada kelembapan 95%, yaitu 0,5857 mg/cm². Kenaikan dari kondisi terendah ke tertinggi mencapai sekitar 128,2%. Hasil ini menunjukkan bahwa kelembapan tidak hanya memengaruhi tegangan *flashover*, tetapi juga meningkatkan keaktifan lapisan kontaminan NaCl pada permukaan isolator.

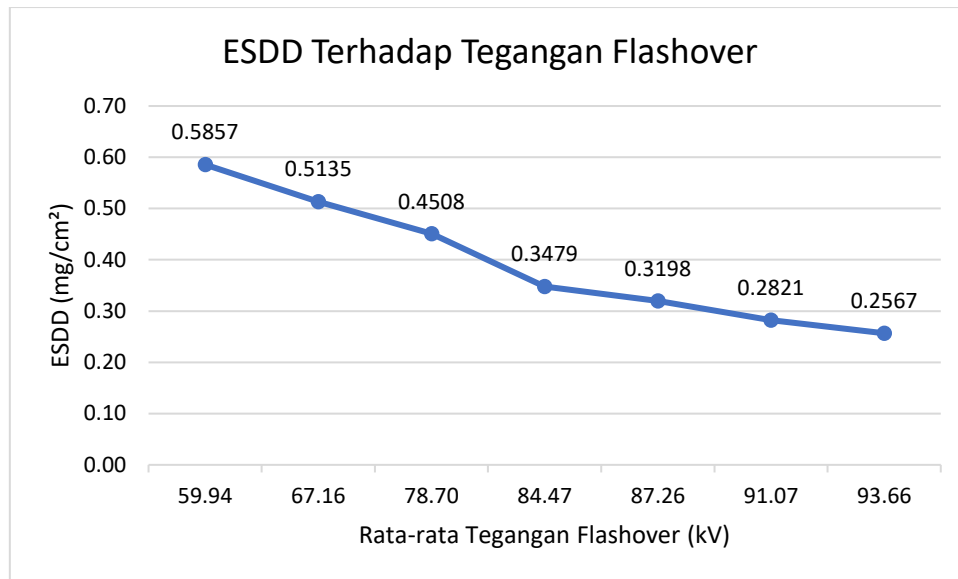
4.3 Grafik Hasil Analisis

Setelah dilakukan pengambilan dan pengolahan data kemudian dibuat 4 grafik untuk mempermudah menganalisis pola perubahan tegangan *flashover* dan ESDD pada setiap tingkat kelembapan relatif yang telah diterapkan.



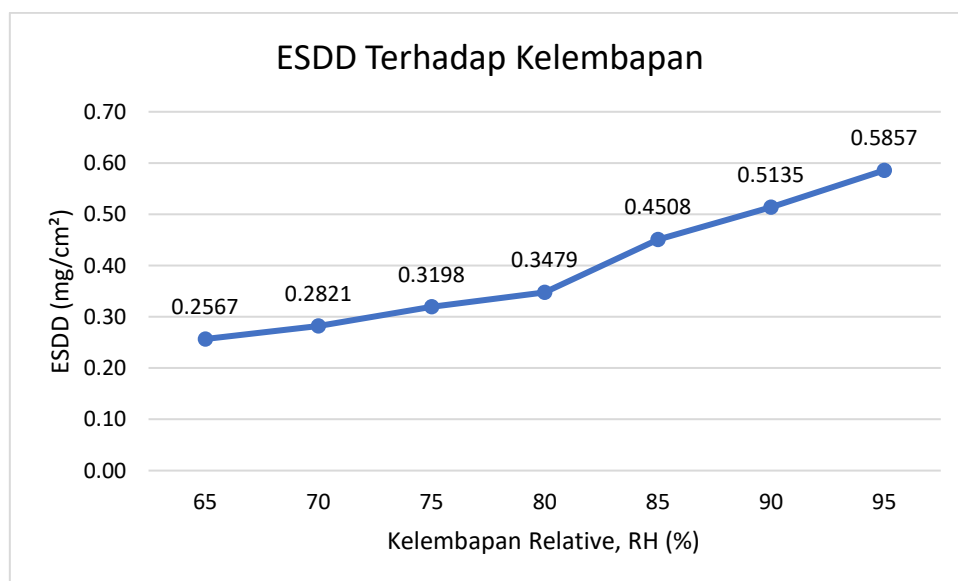
Gambar 4.1 Perbandingan Rata-rata Tegangan Flashover Terhadap Kelembapan

Pada Gambar 4.2, menunjukkan bahwa kenaikan kelembapan menyebabkan kemampuan isolasi permukaan isolator semakin menurun. Penurunan tegangan *flashover* terlihat bertahap pada kelembapan 65% sampai 85%, kemudian menurun lebih tajam pada kelembapan 90% dan 95%. Pola ini menunjukkan bahwa pada kelembapan tinggi, lapisan kontaminan pada permukaan isolator menjadi semakin aktif dan lebih mudah membentuk jalur konduktif.



Gambar 4.2 Hubungan ESDD Terhadap Tegangan *Flashover*

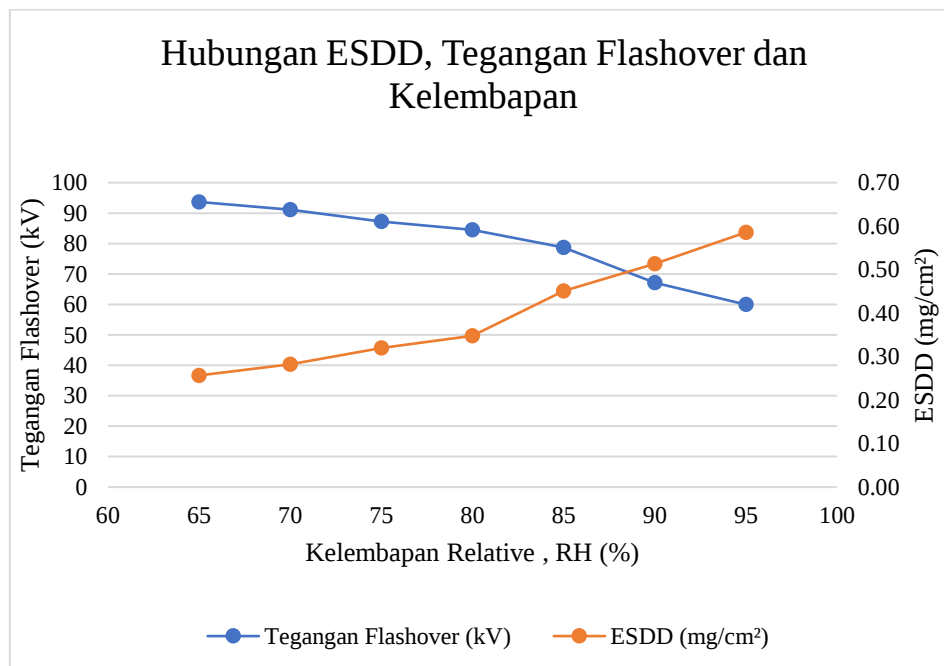
Berdasarkan Gambar 4.2, menunjukkan pola yang berlawanan arah. Pada saat nilai ESDD masih rendah, yaitu 0,2567 mg/cm², tegangan *flashover* rata-rata masih berada pada nilai tinggi, yaitu 93,66 kV. Namun, seiring meningkatnya nilai ESDD menjadi 0,2821 mg/cm², 0,3198 mg/cm², 0,3479 mg/cm², 0,4508 mg/cm², 0,5135 mg/cm², hingga 0,5857 mg/cm², nilai tegangan *flashover* rata-rata menurun berturut-turut menjadi 91,07 kV, 87,26 kV, 84,47 kV, 78,70 kV, 67,16 kV, dan 59,94 kV. Pola ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai ESDD, maka semakin rendah tegangan *flashover* yang dapat ditahan oleh isolator.



Gambar 4.3 Hubungan ESDD Terhadap Kelembapan Relatif

Selanjutnya, Gambar 4.11 memperlihatkan hubungan antara ESDD dan kelembapan relatif. Berdasarkan grafik tersebut, nilai ESDD cenderung meningkat seiring dengan kenaikan kelembapan. Pada kelembapan 65%, nilai ESDD tercatat sebesar 0,2567 mg/cm², kemudian meningkat menjadi 0,2821 mg/cm² pada 70%, 0,3198 mg/cm² pada 75%, 0,3479 mg/cm² pada 80%, 0,4508 mg/cm² pada 85%, 0,5135 mg/cm² pada 90%, dan mencapai 0,5857 mg/cm² pada 95%. Data ini menunjukkan bahwa peningkatan kelembapan diikuti oleh peningkatan ESDD terukur pada permukaan isolator.

Hubungan ketiga variabel tersebut kemudian ditampilkan secara bersamaan pada Gambar 4.4 Grafik gabungan tersebut memperlihatkan bahwa ketika kelembapan meningkat dari 65% RH menjadi 95% RH, nilai ESDD meningkat secara bertahap, sedangkan tegangan *flashover* justru menurun. Pada kondisi awal, yaitu 65% RH, nilai ESDD masih sebesar 0,2567 mg/cm² dengan tegangan *flashover* rata-rata 93,66 kV. Sementara itu, pada kondisi tertinggi, yaitu 95% RH, nilai ESDD meningkat menjadi 0,5857 mg/cm² dan tegangan *flashover* turun menjadi 59,94 kV. Pola ini memperlihatkan bahwa peningkatan kelembapan berkaitan dengan meningkatnya ESDD dan pada saat yang sama berkaitan dengan menurunnya tegangan *flashover*.



Gambar 4.4 Hubungan ESDD Terhadap Tegangan *Flashover* dan Kelembapan Relatif

Secara keseluruhan, dari analisis yang telah dilakukan bahwa terdapat keterkaitan antara kelembapan, ESDD, dan tegangan *flashover*. Kenaikan kelembapan diikuti oleh kenaikan nilai ESDD, sedangkan kenaikan ESDD diikuti oleh penurunan tegangan *flashover*. Temuan ini menegaskan bahwa pada isolator porselen yang terkontaminasi NaCl, kelembapan

udara merupakan faktor yang memperkuat pengaruh kontaminasi permukaan terhadap penurunan kemampuan isolasi. Dengan demikian, ESDD dapat digunakan sebagai parameter yang relevan untuk menjelaskan perubahan performa tegangan *flashover* pada berbagai kondisi kelembapan.

4.4 Implikasi Hasil Penelitian

Hasil penelitian ini memperkuat konsep bahwa kelembapan udara memiliki peran langsung dalam mengubah sifat elektrik lapisan kontaminan pada permukaan isolator. Hubungan antara kenaikan kelembapan, peningkatan ESDD, dan penurunan tegangan *flashover* menunjukkan bahwa performa isolasi permukaan tidak dapat dianalisis hanya dari jenis material atau jumlah kontaminan, tetapi juga harus mempertimbangkan kondisi lingkungan saat pengujian maupun saat operasi. Secara terapan, hasil ini penting untuk evaluasi keandalan isolator porselen pada lingkungan yang lembap, terutama di daerah dengan potensi kontaminasi garam. Artinya, pengawasan kondisi lingkungan dan pemeliharaan isolator perlu dilakukan lebih cermat pada wilayah yang memiliki kelembapan tinggi agar risiko gangguan *flashover* dapat ditekan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa kelembapan udara berpengaruh terhadap tegangan *flashover* isolator porselen yang terkontaminasi NaCl. Pada rentang kelembapan 65% sampai 95%, peningkatan kelembapan menyebabkan tegangan *flashover* menurun dari 93,66 kV menjadi 59,94 kV. Pada saat yang sama, nilai ESDD meningkat dari 0,2567 mg/cm² menjadi 0,5857 mg/cm². Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan kelembapan memperbesar keaktifan lapisan kontaminan NaCl pada permukaan isolator, sehingga permukaan menjadi lebih konduktif dan lebih mudah mengalami *flashover*.

Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena hanya menggunakan satu jenis material isolator, satu jenis polutan, dan satu kondisi tingkat kontaminasi, sehingga hasilnya belum dapat digeneralisasi untuk seluruh kondisi operasi lapangan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji variasi tingkat kontaminasi, jenis material isolator yang berbeda, serta menambahkan parameter lain seperti arus bocor, distribusi polusi, atau temperatur agar hubungan antarvariabel dapat dipahami secara lebih menyeluruh. Secara terapan, hasil penelitian ini dapat dijadikan dasar pertimbangan dalam evaluasi keandalan isolator pada lingkungan lembap, khususnya pada daerah yang memiliki potensi kontaminasi garam.

DAFTAR REFENSI

- Ali, A., Bhatti, A. R., Rasool, A., Rehman, F. U., Khan, M. A., Ali, A., & Sherefa, A. (2024). Performance analysis of high voltage disc insulators with different profiles in clean and polluted environments using flashover, withstand voltage tests and finite element analysis. *Scientific Reports*, 14(1), 1–26. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71392-5>
- Amalia, S., Azhar, H., Hidayatullah, B., Rajab, A., Novizon, N., Warmi, Y., & Kasmar, A. F. (2024). *The Effect of Humidity and Temperature on Flashover in High Voltage Transmission Line Ceramic Insulators*. 13(1), 670–680. <https://doi.org/10.18421/TEM131>
- ASTM International. (2020). Standard Test Method for Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials at Commercial Power Frequencies. In *ASTM International*. <https://doi.org/10.1520/D0149-20.2>
- Chen, L., Lin, F., Chen, M., Huang, X., He, R., & Zheng, Y. (2022). Influence for Ambient Relative Humidity and Pollution on Infrared Detection of Zero Resistance Insulators. *Frontiers in Energy Research*, 10(August), 1–11. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.942408>
- Ghaly, R. N. R., Ibrahim, A., Ghoneim, S. S. M., & Abu-siada, A. (2024). *Impact of atmospheric conditions on the flash-over voltage of the transmission line insulators using central composite design*. 1–16.
- Hamanah, W. M., Al-shammaa, A. A., Salem, A. A., Al-wajih, E., Al-soufi, K., & Farh, H. M. H. (2025). *Hybrid machine learning predictions of high voltage polymeric insulator pollution*. 1–29.
- IEC60507. (2013). International Standard International Standard. 61010-1 © Iec:2001, 13.
- Khan, U. A., Asif, M., Zafar, M. H., & Alhems, L. (2025). *Experimental validation of machine learning for contamination classification of polluted high voltage insulators using leakage current*.
- Maraaba, L., Al-Soufi, K., Ssennoga, T., Memon, A. M., Worku, M. Y., & Alhems, L. M. (2022). Contamination Level Monitoring Techniques for High-Voltage Insulators: A Review. *Energies*, 15(20), 1–32. <https://doi.org/10.3390/en15207656>
- Mohammadnabi, S., & Rahmani, K. (2021). Influence of humidity and contamination on the leakage current of 230-kV composite insulator. *Electric Power Systems Research*, 194(February), 107083. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107083>
- Salem, A. A., Abd-Rahman, R., Ishak, M. T. Bin, Lau, K. Y., Abdul-Malek, Z., Al-ameri, S., ... Ghoneim, S. S. M. (2023). Influence of contamination distribution in characterizing the flashover phenomenon on outdoor insulator. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(12), 102249. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102249>
- Salem, A. A., Al-gailani, S. A., Ahmed, A., Amer, G., Alsharef, M., Bajaj, M., ... Ngah, R. (2024). *Classification of RTV-coated porcelain insulator condition under different profiles and levels of pollution*. 1–19.
- Salem, A. A., Lau, K. K., Abdul-Malek, Z., Al-Gailani, S. A., & Tan, C. wei. (2022). Flashover voltage of porcelain insulator under various pollution distributions: Experiment and modeling. *Electric Power Systems Research*, 208(0378–7796), 107867. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107867>
- Song, Z., Wu, J., Guo, X., Huang, S., Gao, Y., Hu, Y., ... Wu, D. (2025). *Quantitative Analysis of Insulator Contamination Based on Lase-induced Breakdown Spectroscopy*.
- Wu, X., Hao, Y., Wu, Z., Bi, J., Wu, H., & Huang, L. (2025). *Early Warning of AC Salt Fog Flashover on Composite Insulators Using Fiber Bragg Grating Sensing and Visible Arc Images*. 6–9.