

# BAB I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar belakang penelitian

Isolator merupakan salah satu elemen esensial dalam sistem transmisi dan distribusi energi listrik. Peran isolator ini tidak hanya dalam hal pemisahan antara bagian bertegangan dan bagian netral atau tanah, tetapi juga dalam hal menjamin keandalan operasional sistem tenaga dengan cara mencegah aliran arus yang tidak diinginkan [1][2][3][4]. Dalam aplikasi lapangan, isolator yang terpasang pada saluran transmisi udara sangat rentan terhadap pengaruh eksternal, khususnya kontaminasi lingkungan [5][6][7][8][9][10]. Partikel-partikel seperti debu, garam, dan residu lainnya cenderung menempel pada permukaan isolator, terlebih di wilayah dengan kelembaban tinggi seperti area pesisir dan di dataran tinggi berbatu (cadas) [11][12][13][14][15][16][17][18].

Akumulasi kontaminan ini berpotensi menurunkan sifat dielektrik permukaan isolator, yang pada gilirannya dapat meningkatkan arus bocor (*leakage current*) dan memperbesar risiko terjadinya *flashover* [19][20][21][22][23][24][25][26]. *Flashover* merupakan fenomena loncatan listrik pada permukaan isolator ketika tegangan melebihi kemampuan dielektrik material [27][28][29][30]. Faktor lingkungan lain, seperti temperatur ekstrim dan paparan cuaca berkelanjutan, turut mempercepat degradasi permukaan isolator [20][31][32][33][34][35][36]. Dalam studi-studi sebelumnya, parameter seperti *Equivalent Salt Deposit Density (ESDD)* dan *Non-Soluble Deposit Density (NSDD)* telah diidentifikasi sebagai indikator utama dalam menilai tingkat kontaminasi pada isolator [32][37][38][39][40]. Hasil pengujian laboratorium menunjukkan bahwa peningkatan nilai ESDD dan NSDD berkorelasi langsung dengan peningkatan arus bocor serta potensi terjadinya *flashover* [15][35][41][42][43][44][45][46][47].

Penelitian terkait arus bocor juga menunjukkan bahwa analisis harmonik dapat digunakan sebagai indikator penting dalam menilai kondisi isolator. Ahmad et al. menegaskan bahwa harmonik orde ke-3, ke-5, dan ke-7 meningkat seiring dengan penuaan isolator kaca [48]. mengklasifikasikan proses *flashover* ke dalam tiga tahap

berdasarkan spektrum arus bocor [43], sedangkan Douar et al membuktikan bahwa analisis domain frekuensi merefleksikan dinamika arus bocor pada kondisi polusi tidak seragam [49]. Zhao et al. mengembangkan model prediksi tegangan flashover berbasis karakteristik arus bocor [50]. sementara Fang et al. menunjukkan bahwa harmonik ganjil dan THD berhubungan erat dengan tingkat polusi pada isolator porselen [25]. Lebih lanjut, Salem et al. mengusulkan indikator berbasis waktu dan frekuensi (slope, crest factor, odd harmonics, rasio 5/3 harmonik) untuk evaluasi kondisi isolator polimer [51]. an Benisheikh et al. menambahkan bahwa odd harmonic crest factor dapat dipakai untuk klasifikasi tingkat penuaan isolator pada kelembaban relatif yang berbeda [52].

Meskipun telah banyak dilakukan penelitian, sebagian besar pendekatan masih terbatas pada simulasi dengan kontaminan buatan, sehingga hasilnya kurang merepresentasikan kondisi nyata di lapangan. Dari sudut filsafat penelitian, pendekatan tersebut cenderung menghasilkan temuan yang valid secara internal, tetapi memiliki keterbatasan dari sisi validitas eksternal karena lingkungan laboratorium tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi nyata isolator di lapangan. Penelitian ini berangkat dari paradigma berbeda, yakni *real-world approach*, dengan menggunakan isolator yang telah terkontaminasi secara alami selama 3–5 tahun pada jalur transmisi 150 kV Payakumbuh–Koto Panjang. Dengan cara ini, data yang diperoleh lebih autentik, kontekstual, dan relevan untuk menjawab persoalan keandalan sistem transmisi di wilayah tropis lembab.

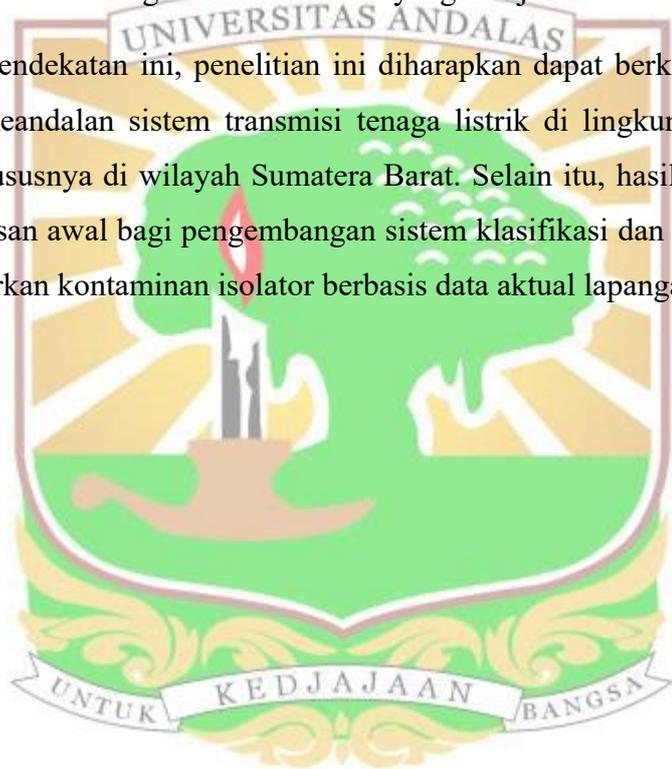
Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian ini mengembangkan pendekatan berbasis data lapangan dengan memanfaatkan isolator keramik 150 kV yang telah terpapar kontaminasi alami selama 3–5 tahun pada jalur transmisi SUTT Payakumbuh–Koto Panjang, Sumatera Barat. Pemilihan isolator alami dari jalur ini memiliki kepentingan ilmiah dan praktis, karena kondisi tropis lembab dengan kontaminasi debu, lumut, dan bekas flashover memberikan gambaran nyata yang sulit direplikasi di laboratorium. Hal ini memastikan bahwa model yang dibangun benar-benar merepresentasikan permasalahan operasional jaringan transmisi di lapangan. Pengujian mencakup pengukuran ESDD, NSDD, karakterisasi kimia

kontaminan menggunakan teknik *Fourier Transform Infrared* (FTIR). Spektroskopi FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi utama dalam partikel kontaminan, seperti silikat, hidroksil ( $-OH$ ), dan karbonil ( $C=O$ ), yang berpengaruh terhadap daya serap kelembaban dan konduktivitas permukaan isolator[53][54]. Informasi ini melengkapi pemahaman mengenai mekanisme pembentukan jalur konduktif dan potensi degradasi permukaan akibat sifat kimiawi kontaminan serta analisis sinyal arus bocor melalui *Fast Fourier Transform* (FFT) dan evaluasi *Total Harmonic Distortion* (THD) [35][45][55]. Penggunaan transformasi Fourier bertujuan memetakan konten frekuensi dalam sinyal arus bocor secara lebih akurat, sedangkan nilai THD digunakan untuk mengidentifikasi tingkat distorsi akibat kontaminasi. Pendekatan ini merepresentasikan kontribusi orisinal dalam pemodelan kontaminasi isolator berbasis spektrum sinyal. Untuk mengintegrasikan keseluruhan parameter fisik, lingkungan, dan sinyal tersebut, pendekatan regresi linier digunakan sebagai metode pemodelan statistik utama. Regresi linier memungkinkan model hubungan fungsional antara variabel bebas berupa ESDD, NSDD, FTIR, temperatur, kelembaban, frekuensi dominan, dan THD dengan variabel respon berupa arus bocor. Model disusun berdasarkan data empiris hasil pengujian laboratorium.

Pemilihan metode regresi linier didasarkan atas sejumlah pertimbangan akademik dan teknis. Pertama, regresi linier memiliki struktur model yang sederhana dan transparan, sehingga memudahkan interpretasi kontribusi setiap variabel bebas terhadap output [56][57]. Ini penting dalam konteks penelitian berbasis data lapangan dengan banyak parameter interdependen. Kedua, regresi linier tetap efektif meskipun digunakan pada dataset yang tidak terlalu besar, berbeda dengan metode kecerdasan buatan seperti *Artificial Neural Network* (ANN) yang menuntut ukuran data dan pelatihan model lebih kompleks [58][59][60]. Ketiga, regresi linier memungkinkan uji signifikansi terhadap masing-masing variabel, sehingga dapat digunakan untuk menilai pengaruh kuantitatif, di mana variabel NSDD terbukti paling dominan terhadap peningkatan arus bocor [61][62]. Dibandingkan ANN, regresi linier unggul dari sisi efisiensi komputasi, keterbacaan

model, dan kemudahan implementasi. ANN cenderung bekerja secara *black-box*, yang menyulitkan interpretasi fisis antara variabel. Sebaliknya, regresi linier menghasilkan model eksplisit yang dapat diformulasikan secara matematis, serta mudah dikalibrasi dan diuji validitasnya [57][63]. Studi sebelumnya juga menegaskan bahwa regresi linier tetap menjadi metode statistik yang relevan dan stabil dalam berbagai konteks data [56]. Pertimbangan-pertimbangan ini menjadikan regresi linier lebih sesuai untuk penelitian berbasis data lapangan dengan banyak parameter interdependen, sekaligus tetap menjaga keterhubungan antara model statistik dengan fenomena fisis yang dikaji.

Dengan pendekatan ini, penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi dalam peningkatan keandalan sistem transmisi tenaga listrik di lingkungan ekstrim di Indonesia, khususnya di wilayah Sumatera Barat. Selain itu, hasilnya diharapkan menjadi landasan awal bagi pengembangan sistem klasifikasi dan pemodelan arus bocor berdasarkan kontaminan isolator berbasis data aktual lapangan.



## 1.2 Rumusan masalah

Latar belakang yang telah dipaparkan telah mendorong peneliti untuk merumuskan beberapa masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh berbagai jenis kontaminan alami (debu, lumut, dan bekas *flashover*) terhadap karakteristik arus bocor pada isolator keramik 150 kV?
2. Seberapa besar kontribusi parameter THD dalam menentukan tingkat distorsi sinyal listrik yang disebabkan oleh kontaminan pada isolator?
3. Bagaimana hubungan antara parameter fisik (ESDD, NSDD, dan FTIR) dengan karakteristik sinyal harmonik (frekuensi dominan dan magnitudo harmonik) pada isolator yang terkontaminasi?
4. Bagaimana model regresi linier mampu merepresentasikan kontribusi parameter fisik (ESDD, NSDD, dan FTIR) dan Parameter lingkungan (Suhu dan Kelembaban) terhadap peningkatan arus bocor pada isolator keramik?

## 1.3 Tujuan penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model pemodelan kontaminan pada isolator keramik 150 kV menggunakan FFT dan THD dalam rangka evaluasi risiko *flashover*. Secara khusus, penelitian ini memiliki beberapa tujuan utama sebagai berikut:

1. Menganalisis pengaruh jenis kontaminan alami (debu, lumut, dan bekas *flashover*) terhadap arus bocor pada isolator keramik 150 kV, guna memahami perubahan performa isolator dalam kondisi operasi nyata.
2. Menghitung dan menganalisis THD sebagai parameter untuk mengevaluasi tingkat distorsi sinyal listrik yang dihasilkan oleh kontaminan pada isolator, serta menentukan signifikansinya dalam prediksi risiko *flashover*.
3. Menghubungkan parameter fisik kontaminan (ESDD, NSDD, dan FTIR) dengan karakteristik sinyal harmonik melalui analisis regresi linier untuk memahami pengaruh kontaminan terhadap pola spektral arus bocor.

#### 1.4 Manfaat penelitian

1. Memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan di bidang teknik tenaga listrik, khususnya mengenai karakteristik arus bocor akibat kontaminasi alami pada isolator.
2. Menambah referensi akademik tentang integrasi parameter fisik, lingkungan, dan sinyal dalam pemodelan prediktif berbasis regresi linier untuk aplikasi kelistrikan.
3. Memberikan pendekatan baru dalam mengidentifikasi jenis kontaminan alami (debu, lumut, dan bekas *flashover*) pada isolator menggunakan metode regresi linier, yang dapat diadaptasi dalam penelitian selanjutnya.
4. Membantu pengelola sistem tenaga listrik dalam mengambil langkah preventif dalam pemeliharaan isolator keramik, khususnya di area dengan potensi kontaminasi tinggi.
5. Menjadi dasar dalam menyusun strategi pemeliharaan berbasis kondisi, sehingga meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi biaya pemeliharaan jaringan transmisi.

#### 1.5 Batasan masalah

Penelitian ini memiliki beberapa batasan yang dirancang untuk memastikan bahwa fokus analisis tetap terarah dan dapat menghasilkan hasil yang akurat serta aplikatif dalam pemodelan kontaminan pada isolator keramik 150 kV. Batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Penelitian menggunakan isolator keramik tipe piring yang terpasang pada jalur SUTT Payakumbuh–Koto Panjang.
2. Jenis kontaminan yang dianalisis adalah kontaminan alami, yaitu debu, lumut, dan bekas *flashover*.
3. Parameter fisik mencakup ESDD, NSDD, frekuensi dominan, THD, dan parameter lingkungan berupa suhu dan kelembaban, parameter lingkungan lainnya seperti curah hujan dan tekanan udara tidak dianalisis.

4. Metode pemodelan dibatasi pada regresi linier multivariat berupa pendekatan statistik non-linier dan metode *machine learning* tidak digunakan sebagai pembanding.
5. Pengujian arus bocor pada isolator yang terkontaminasi alami dilakukan di laboratorium, bukan secara langsung pada jaringan transmisi aktif.
6. Faktor-faktor eksternal seperti medan listrik sekitar, efek penuaan (*aging*), dan cuaca ekstrem tidak dianalisis secara komprehensif.
7. Model yang dikembangkan berfungsi sebagai prediktor risiko flashover berbasis karakteristik kontaminasi, namun belum mencakup sistem monitoring real-time berbasis IoT atau kecerdasan buatan.
8. Validasi model regresi arus bocor dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan model dengan hasil pengujian arus bocor di laboratorium untuk setiap jenis kontaminan.

### 1.6 Keterbaruan

Penelitian ini menghadirkan aspek keterbaruan dalam konteks pemodelan kontaminasi isolator keramik 150 kV untuk evaluasi risiko *flashover*, melalui pendekatan gabungan antara analisis spektral menggunakan FFT dan THD, karakterisasi kimia menggunakan Fourier Transform Infrared (FTIR), serta pemodelan statistik berbasis regresi linier multivariat.

Aspek keterbaruan pertama terletak pada penggunaan isolator yang telah terkontaminasi secara alami selama 3–5 tahun, yang diperoleh langsung dari jalur transmisi udara SUTT 150 kV Payakumbuh–Koto Panjang, Sumatera Barat. Pendekatan ini berbeda dengan mayoritas studi sebelumnya yang cenderung menggunakan kontaminasi buatan dalam kondisi laboratorium terkendali. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan representasi yang lebih otentik terhadap kondisi lingkungan tropis dan ekstrim di Indonesia, serta meningkatkan validitas eksternal dari temuan yang diperoleh. Keterbaruan kedua terdapat pada integrasi metode FFT, THD, ESDD, dan NSDD, FTIR, dengan pendekatan regresi linier sebagai alat analisis statistik. Kombinasi ini memungkinkan eksplorasi hubungan

antara parameter fisik, lingkungan, dan spektral terhadap arus bocor secara lebih menyeluruh. Spektroskopi FTIR digunakan untuk mengidentifikasi gugus fungsi kimia dalam kontaminan, seperti silikat, hidroksil, dan karbonil, yang mempengaruhi daya serap kelembaban serta konduktivitas permukaan isolator. Dengan menambahkan aspek kimia ke dalam model statistik, pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap mekanisme degradasi permukaan isolator.

Model regresi linier yang dikembangkan tidak hanya mampu memetakan pengaruh masing-masing parameter terhadap peningkatan arus bocor, tetapi juga berfungsi sebagai alat klasifikasi kontaminan menjadi tiga kategori utama, yaitu debu, lumut, dan bekas *flashover*, dengan tingkat akurasi klasifikasi yang signifikan. Selain memberikan model prediktif yang transparan dan mudah diinterpretasikan, penggunaan regresi linier dalam konteks ini juga memperkuat pemahaman mekanisme degradasi isolator akibat kontaminasi, serta korelasinya dengan potensi terjadinya *flashover*. Temuan ini berkontribusi dalam pengembangan metode diagnostik berbasis sinyal arus bocor yang lebih presisi, serta membangun fondasi ilmiah untuk integrasinya ke dalam sistem pemantauan kondisi isolator secara otomatis. Untuk memperjelas posisi penelitian ini, ringkasan kajian terdahulu dapat dilihat pada Tabel 2.1. rangkuman penelitian terdahulu

**Tabel 2. 1** Rangkuman Penelitian Terdahulu

Peneliti & Tahun	Jenis Isolator	Metode Kontaminasi	Parameter yang Dianalisis	Temuan Utama	Keterbatasan
Zhang et al. (2020)	Porselen	Buatan (garam)	ESDD, arus bocor RMS	ESDD berpengaruh signifikan pada arus bocor	Tidak menganalisis harmonik
Gao et al. (2018)	Kaca	Buatan (debu + garam)	FFT, harmonik orde-3 dan 5	Harmonik meningkat dengan kelembaban	Tidak menggunakan data lapangan
Lee et al. (2019)	Polimer	Buatan (spray saline)	FFT, THD	THD efektif sebagai indikator degradasi	Sampel baru, bukan isolator terpasang

Penelitian ini	Keramik 150 kV	<b>Alami (3–5 tahun, Payakumbuh–Koto Panjang)</b>	ESDD, NSDD, FFT, THD, FTIR, regresi multivariat	NSDD terbukti faktor dominan; model klasifikasi & prediksi lebih akurat
----------------	----------------	---	---	---

Dari tabel dan uraian di atas dapat dilihat bahwa penelitian terdahulu memberikan kontribusi penting, namun sebagian besar masih terbatas pada kontaminasi buatan atau analisis parameter tunggal. Penelitian ini melengkapi kesenjangan tersebut dengan menggunakan isolator terkontaminasi alami, mengintegrasikan analisis fisik, spektral, dan kimiawi, serta membangun model regresi multivariat untuk klasifikasi arus bocor. Dengan demikian, penelitian ini menghadirkan state of the art baru dalam bidang diagnostik isolator tegangan tinggi di lingkungan tropis lembab dengan IKL tinggi. Dasar teoritis penelitian ini diambil dari literatur yang relevan, yang menjelaskan teori dasar isolator, fenomena arus bocor, karakterisasi kimia kontaminan dengan FTIR, analisis spektral berbasis FFT dan THD, serta metode regresi linier dalam pemodelan prediktif. Tinjauan pustaka yang komprehensif tentang teori, konsep, dan penelitian terdahulu yang relevan sebagai landasan ilmiah dari penelitian ini akan disajikan dalam Bab II.

## 1.7 Sistematika Penulisan

### Bab I Pendahuluan

Berisi latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat, serta batasan penelitian. Bab ini menjelaskan urgensi pemodelan kontaminan isolator keramik 150 kV menggunakan FFT dan THD dalam evaluasi risiko *flashover*.

### Bab II Tinjauan Pustaka

Mengulas teori dan penelitian terdahulu terkait isolator tegangan tinggi, kontaminasi alami (debu, lumut, bekas *flashover*), arus bocor, Transformasi Fourier (FFT), *Total Harmonic Distortion* (THD), serta metode klasifikasi regresi linier.

### Bab III Metodologi Penelitian

Menjelaskan tahapan penelitian, mulai dari pengujian arus bocor, pengukuran ESDD dan NSDD, hingga analisis data menggunakan FFT, THD, dan regresi linier. Flowchart penelitian disertakan untuk mempermudah pemahaman langkah-langkah yang dilakukan.

#### Bab IV Hasil dan Pembahasan

Menyajikan hasil eksperimen, karakteristik data, analisis hubungan antara parameter, serta interpretasi model regresi linier yang dikembangkan. Evaluasi terhadap masing-masing jenis kontaminan disajikan secara terpisah

#### Bab V Kesimpulan dan Saran

Merangkum temuan utama penelitian, implikasi terhadap performa isolator, serta rekomendasi untuk penelitian lebih lanjut, seperti pengembangan sistem pemantauan isolator berbasis analisis spektral.

#### Daftar Pustaka dan Lampiran

Berisi referensi ilmiah yang digunakan serta data pendukung seperti hasil pengujian, skrip MATLAB, dan dokumentasi eksperimen

