

BAB V PENUTUP

5.1 Simpulan

Penelitian ini berhasil mengkaji dan menganalisis pengaruh kontaminasi alami terhadap perilaku arus bocor pada isolator keramik 150 kV di lingkungan tropis lembab dengan tingkat kelembaban tinggi. Tiga jenis kontaminasi utama yang diteliti meliputi debu, lumut, dan bekas flashover, dengan data yang diambil langsung dari lapangan (*real field test*) pada wilayah ekstrim tropis, sehingga merepresentasikan kondisi aktual yang belum banyak dikaji pada penelitian sebelumnya.

1. Hasil pengujian menunjukkan bahwa setiap jenis kontaminasi memberikan respons arus bocor yang berbeda. Kontaminasi debu menghasilkan arus bocor tertinggi, terutama disebabkan oleh dominasi nilai NSDD (+87,920) sebagai pembentuk jalur konduktif pada permukaan isolator. Pada lumut, peningkatan arus bocor terjadi secara gradual karena sifat higroskopis lumut, dengan NSDD tetap menjadi variabel dominan (+3,599), sedangkan ESDD dikeluarkan dari model karena multikolinearitas. Sementara itu, pada bekas flashover, meskipun nilai ESDD dan NSDD lebih rendah dibanding debu, arus bocor tetap tinggi akibat residu karbonisasi yang membentuk jalur bocor semi-permanen, dengan NSDD (+10,941) sebagai faktor dominan dan ESDD berpengaruh negatif (-1,720).
2. Evaluasi distorsi sinyal arus bocor melalui parameter Total Harmonic Distortion (THD) menunjukkan peningkatan signifikan seiring bertambahnya jumlah kontaminasi dan tegangan uji. THD tertinggi tercatat pada bekas flashover (42,07%), diikuti oleh lumut (36,00%) dan debu (25,30%). Temuan ini menegaskan bahwa THD efektif digunakan sebagai parameter diagnostik non-invasif untuk mendeteksi awal degradasi isolasi dan potensi flashover, meskipun perannya lebih relevan untuk klasifikasi kontaminan dibandingkan sebagai prediktor langsung arus bocor.

3. Hubungan antara parameter fisik kontaminasi (ESDD dan NSDD) dengan spektrum harmonik arus bocor berhasil dimodelkan secara komprehensif. NSDD secara konsisten menjadi faktor paling dominan terhadap peningkatan arus bocor di semua jenis kontaminasi. ESDD menunjukkan perilaku yang berbeda: negatif pada debu (-22,808), positif pada lumut (+8,109), dan dikeluarkan dari model flashover karena kolinearitas. Parameter spektral seperti frekuensi dominan dan magnitudo harmonik tidak signifikan untuk prediksi kuantitatif arus bocor, namun tetap berguna sebagai fitur klasifikasi untuk membedakan jenis kontaminasi berbasis pola spektral.
4. Model regresi linier multivariat yang dikembangkan dalam penelitian ini mampu memetakan hubungan fungsional antara kontaminasi permukaan, parameter lingkungan, dan respon spektral terhadap arus bocor secara simultan. Pada kontaminasi debu, NSDD muncul sebagai prediktor utama (+87,920), sedangkan ESDD berpengaruh negatif (-22,808). Pada lumut, NSDD tetap dominan (+3,599) dengan suhu berpengaruh negatif (-0,397), dan ESDD dikeluarkan dari model karena multikolinearitas. Pada bekas flashover, NSDD berperan utama (+10,941), dengan ESDD berpengaruh negatif (-1,720), sementara suhu dan kelembaban dikeluarkan dari model karena redundansi data.

Model regresi multivariat yang dikembangkan dalam penelitian ini berpotensi untuk digeneralisasikan ke jenis isolator lain seperti polimer dan kaca. Hal ini karena prinsip dasar hubungan antara parameter kontaminasi (ESDD dan NSDD) dengan karakteristik arus bocor (FFT dan THD) bersifat umum. Namun, sifat permukaan tiap material berbeda, misalnya isolator polimer yang hidrofobik dan isolator kaca yang relatif lebih resisten terhadap degradasi. Oleh karena itu, diperlukan proses kalibrasi ulang parameter model agar sesuai dengan karakteristik material yang diuji. Dengan penyesuaian tersebut, model ini dapat berfungsi sebagai pendekatan *diagnostik universal* bagi berbagai jenis isolator, sebagaimana telah ditunjukkan pada studi terdahulu [50–61].

5. Kebaruan (novelty) dari penelitian ini adalah integrasi metode FFT dan regresi linier multivariat berbasis data lapangan (real field measurement) untuk memodelkan kontaminasi alami pada isolator keramik di lingkungan tropis

ekstrem. Selama ini, sebagian besar studi sejenis hanya menggunakan data laboratorium atau fokus pada salah satu pendekatan (FFT atau regresi saja). Temuan ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan sistem monitoring kondisi isolator berbasis sinyal arus bocor yang lebih adaptif dan real-time, sekaligus menyediakan metode peringatan dini (early warning system) terhadap risiko flashover yang lebih akurat, khususnya pada sistem transmisi di wilayah dengan kelembaban tinggi. Temuan bahwa NSDD merupakan faktor dominan dalam mempengaruhi arus bocor dapat memberikan kontribusi signifikan pada bidang diagnostik penebatan voltan tinggi. NSDD dapat dijadikan indikator utama untuk evaluasi kondisi isolator lapangan, sekaligus menjadi parameter kunci dalam pengembangan model prediktif risiko *flashover*. Dengan fokus pada NSDD, strategi pemeliharaan isolator dapat lebih tepat sasaran, sehingga meningkatkan keandalan sistem transmisi tenaga listrik.

5.2 Saran

Berdasarkan temuan dan simpulan dari penelitian ini, terdapat beberapa saran yang dapat diajukan untuk pengembangan penelitian selanjutnya maupun penerapan hasil penelitian dalam praktik teknis:

1. Penelitian ini menggunakan data uji laboratorium berbasis titik (*single measurement*) untuk masing-masing jenis kontaminan. Penelitian selanjutnya disarankan mengembangkan model prediksi arus bocor berbasis data longitudinal (berkelanjutan dalam waktu) guna menangkap dinamika degradasi performa isolator secara *real-time*, khususnya dalam lingkungan tropis yang sangat fluktuatif.
2. Mengingat parameter spektral (frekuensi dominan dan magnitudo harmonik) tidak signifikan dalam regresi linier namun memiliki pola khas untuk setiap jenis kontaminasi, disarankan untuk mengintegrasikan model regresi dengan algoritma klasifikasi berbasis pembelajaran mesin (misalnya, KNN, SVM, atau

Random Forest). Kombinasi ini dapat menghasilkan sistem diagnosis yang lebih adaptif dan akurat untuk identifikasi serta prediksi risiko *flashover*.

3. Data eksperimen dalam penelitian ini diperoleh dari pengujian laboratorium pada isolator keramik 150 kV. Validasi model diperlukan menggunakan data lapangan dari jaringan transmisi di berbagai wilayah, termasuk wilayah pesisir dan industri yang memiliki karakteristik kontaminasi yang kompleks dan bervariasi.
4. Berdasarkan dominasi pengaruh NSDD dan signifikansi ESDD, disarankan pengembangan sistem pemantauan kontaminasi permukaan isolator berbasis sensor optik atau sensor kapasitif yang mampu mendeteksi densitas partikel non-larut dan larut secara kontinu. Pendekatan ini dapat menjadi dasar bagi sistem peringatan dini *flashover* pada jaringan transmisi.
5. Model regresi multivariat memberikan gambaran awal yang baik, namun terdapat indikasi bahwa hubungan antara beberapa parameter (terutama temperatur, kelembaban, dan NSDD) bersifat *non-linier*. Oleh sebab itu, pendekatan model non-linear seperti regresi polinomial, regresi logistik, atau jaringan syaraf tiruan dapat digunakan untuk memperoleh prediksi yang lebih presisi dalam kondisi operasi nyata.

