

BAB VII

KESIMPULAN

Bab ini menyajikan kesimpulan dari penelitian yang membandingkan model statis atau machine learning tradisional dengan model dinamis atau online learning. Selain perbandingan model statis dan model dinamis, kesimpulan analisis penerapan IVA terhadap model online learning yaitu ARF dan HT juga disajikan pada bab ini. Kesimpulan difokuskan pada perbedaan performa kedua pendekatan dalam menangani data, mencakup tingkat akurasi, stabilitas terhadap perubahan pola data, serta efisiensi pemrosesan.

7.1. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa integrasi model Adaptive Random Forest (ARF) dengan strategi IV.A (Confidence-Aware Online SMOTE dan Drift-Aware Light Retraining) merupakan solusi yang efektif dalam mengatasi keterbatasan model statis konvensional saat menghadapi dinamika data seismik Gunung Merapi. Model statis seperti Random Forest (RF) terbukti mengalami kegagalan sistemik karena sifatnya yang kaku terhadap perubahan pola data (concept drift), sementara ARF IV.A mampu mentransformasi paradigma pembelajaran menjadi dinamis. Melalui pengujian ini, terlihat perbedaan performa yang nyata antara model yang menggunakan strategi IV.A dengan model tanpa IV.A (baseline). Pada arsitektur ARF, pengaplikasian IV.A berhasil meningkatkan rata-rata Cumulative F1-Score dari 0,86 (pada ARF+ADWIN) menjadi 0,89, yang sekaligus dibarengi dengan tingkat stabilitas terbaik dengan nilai standar deviasi terendah sebesar 0,0515. Keunggulan ini dipicu oleh mekanisme Confidence-Aware Online SMOTE yang mampu memperkuat pengenalan kelas minoritas tanpa mengorbankan stabilitas prediksi secara keseluruhan.

Efektivitas strategi IV.A mencapai puncaknya pada periode kritis erupsi eksplosif tahun 2010, di mana model ARF IV.A berhasil mendeteksi seluruh 57 kejadian eksplosif (100%) secara tepat dengan F1-Score mencapai 0,974. Capaian ini memvalidasi keunggulan strategi IV.A dibandingkan model tanpa IV.A dalam

memberikan respons deteksi yang sensitif pada momen bencana. Penting untuk dicatat bahwa meskipun terdapat nilai F1-score yang kosong pada periode 2006 dan 2010—karena karakteristik data yang bersifat eksklusif pada satu tipe erupsi saja (efusif pada 2006 dan eksplosif pada 2010)—ARF IV.A tetap secara konsisten menjadi model yang paling andal dalam mengidentifikasi tipe dominan di setiap periode tersebut. Sebaliknya, penelitian ini juga mengungkap temuan teoretis penting bahwa strategi IV.A tidak selalu memberikan dampak positif pada semua model. Pada model pembelajar tunggal seperti Hoeffding Tree (HT), penggunaan strategi IV.A justru memicu penurunan performa drastis hingga ke angka 0,49, jauh di bawah HT+ADWIN (tanpa IV.A) yang masih mampu bertahan di angka 0,76. Hal ini menegaskan bahwa strategi augmentasi data sintetis memerlukan dukungan arsitektur ensemble seperti ARF untuk menyaring gangguan (noise) dan menjaga validitas model.

Secara operasional, model ARF IV.A menawarkan efisiensi tinggi dengan waktu pemrosesan hanya 14,9 detik untuk data sepanjang 23 tahun, yang mana 77,3 kali lebih cepat dibandingkan metode pelatihan ulang (retraining) konvensional. Dengan perpaduan antara akurasi tinggi pada momen kritis, stabilitas jangka panjang yang kokoh, dan kecepatan pemrosesan yang sangat singkat, penelitian ini menyimpulkan bahwa ARF IV.A adalah pendekatan yang paling layak diimplementasikan sebagai inti dari sistem peringatan dini (Early Warning System) vulkanik. Model ini mampu memberikan keseimbangan antara kemampuan adaptasi yang cerdas dan efisiensi waktu, yang merupakan syarat utama dalam mendukung pengambilan keputusan mitigasi bencana yang presisi dan tepat waktu.

7.2. Saran

Sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, disarankan mempertimbangkan integrasi informasi spasial dan temporal tambahan, seperti lokasi sensor, jarak ke kawah, mengintegrasikan parameter deformasi, gas vulkanik, dan citra visual secara *realtime*, guna meningkatkan konteks prediktif. Selain itu, perlu dieksplorasi penerapan metode online feature selection untuk secara dinamis memilih variabel yang paling relevan seiring perubahan kondisi vulkanik, sehingga kompleksitas



model tetap terkendali. Peningkatan efisiensi komputasi juga menjadi prioritas, misalnya dengan mengoptimalkan proses oversampling dan pembaruan model agar tetap responsif dalam lingkungan sistem peringatan dini yang memiliki keterbatasan sumber daya.

Terakhir, untuk penerapan praktis, ARF IV.A berpotensi diintegrasikan ke dalam sistem peringatan dini berbasis streaming data, sebagai komponen klasifikasi yang adaptif dan dapat memberikan prediksi yang lebih akurat terhadap potensi erupsi yang sedang berlangsung maupun yang akan datang.