

PEMETAAN DAERAH RAWAN KONFLIK GAJAH DAN MANUSIA MENGUNAKAN ECOLOGICAL NICHE MODELLING DI DESA RANTAU JAYA UDIK 2, SUKADANA, LAMPUNG TIMUR

Imam Mahesa Putra^{1*}, Hadi Naufal², Nadia Cahya Fahrani³, Annisa Fajar
Ningrum⁴

¹ Hubungan Internasional, Universitas Lampung

² Rekayasa Kehutanan, Institut Teknologi Sumatera

³ Rekayasa Tata Kelola Air, Institut Teknologi Sumatera

⁴ Ilmu Sosiologi - UIN Syarif Hidayatullah Jakarta

*e-mail: imammahesa445@gmail.com

Abstract

Histori Artikel:

Diajukan:
31/05/2026

Diterima:
02/06/2026

Diterbitkan:
28/06/2026

Human-Elephant Conflict (HEC) is a serious problem in Lampung Province, particularly in border areas between conservation areas and community settlements. This study aims to map elephant conflict risk zones in Rantau Jaya Udik 2 Village, Sukadana District, East Lampung Regency using ecological niche modeling approach with machine learning algorithms. The data used included 21 elephant conflict incident points analyzed based on four main factors: distance from roads, distance from rivers, distance from settlements, and land cover. Modeling was conducted using five algorithms: Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Maximum Entropy (MaxEnt), Boosted Regression Trees (BRT), and Generalized Linear Model (GLM). The ensemble model results using True Skill Statistics (TSS) metrics produced an elephant risk map classified into three risk classes: low, medium, and high using the Quantile method. This research is part of the International Joint Community Service Program (KKN) 2 organized by the Western Region State University Cooperation Agency in 2025. The mapping results can be used as a basis for conflict mitigation planning and sustainable landscape management.

Keywords : elephant conflict, ecological niche modeling, machine learning, East Lampung, conflict mitigation.

Abstrak

Konflik manusia-gajah (Human-Elephant Conflict/HEC) merupakan permasalahan serius di Provinsi Lampung, khususnya di wilayah perbatasan kawasan konservasi dengan pemukiman masyarakat.

Penelitian ini bertujuan untuk memetakan daerah rawan konflik gajah di Desa Rantau Jaya Udik 2, Kecamatan Sukadana, Kabupaten Lampung Timur menggunakan pendekatan ecological niche modeling dengan algoritma machine learning. Data yang digunakan meliputi 21 titik kejadian konflik gajah yang dianalisis berdasarkan empat faktor utama: jarak dari jalan, jarak dari sungai, jarak dari pemukiman, dan tutupan lahan. Pemodelan dilakukan menggunakan lima algoritma yaitu Random Forest (RF), Support Vector Machine (SVM), Maximum Entropy (MaxEnt), Boosted Regression Trees (BRT), dan Generalized Linear Model (GLM). Hasil ensemble model menggunakan metrik True Skill Statistics (TSS) menghasilkan peta rawan gajah yang diklasifikasikan menjadi tiga kelas risiko: rendah, sedang, dan tinggi menggunakan metode Quantile. Penelitian ini merupakan bagian dari Program Kuliah Kerja Nyata (KKN) Bersama Internasional 2 yang diselenggarakan oleh Badan Kerja Sama Perguruan Tinggi Negeri Wilayah Barat tahun 2025. Hasil pemetaan dapat digunakan sebagai dasar perencanaan mitigasi konflik dan pengelolaan lanskap yang berkelanjutan.

Kata Kunci : konflik gajah, ecological niche modeling, machine learning, Lampung Timur, mitigasi konflik

Pendahuluan

Konflik manusia-gajah (Human-Elephant Conflict/HEC) telah menjadi salah satu tantangan konservasi yang paling kompleks di Indonesia, khususnya di Provinsi Lampung (Goswami et al., 2014). Lampung merupakan habitat penting bagi populasi gajah Sumatera (*Elephas maximus sumatranus*) yang terancam punah, namun tekanan antropogenik yang tinggi menyebabkan fragmentasi habitat dan meningkatnya frekuensi konflik (Nyhus & Tilson, 2004).

Desa Rantau Jaya Udik 2 di Kecamatan Sukadana, Kabupaten Lampung Timur, merupakan salah satu wilayah yang mengalami konflik gajah secara berulang (Balai Besar Konservasi Sumber Daya Alam Lampung, 2023). Lokasi desa yang berbatasan langsung dengan kawasan konservasi dan adanya koridor alami gajah menyebabkan intensitas pertemuan antara gajah dan aktivitas manusia semakin tinggi (Widodo et al., 2022).

Pendekatan tradisional dalam mitigasi konflik gajah seringkali bersifat reaktif dan tidak berbasis data spasial yang akurat (Chen et al., 2016). Penggunaan ecological niche modeling (ENM) dengan algoritma machine learning menawarkan solusi prediktif yang dapat membantu mengidentifikasi area berisiko tinggi sebelum konflik terjadi (Elith & Leathwick, 2009). Metode ini

telah terbukti efektif dalam memprediksi distribusi spesies dan dapat diadaptasi untuk memetakan zona rawan konflik (Phillips et al., 2006).

Metode Pelaksanaan

2.1 Lokasi dan Waktu Pelaksanaan

Kegiatan pengabdian masyarakat ini dilaksanakan di Desa Rantau Jaya Udik 2, Kecamatan Sukadana, Kabupaten Lampung Timur, Provinsi Lampung. Pelaksanaan kegiatan berlangsung dari bulan Juli sampai Agustus 2025 oleh Kelompok 12 KKN Bersama Internasional 2 tahun 2025 yang diselenggarakan oleh Badan Kerja Sama Perguruan Tinggi Negeri Wilayah Barat Indonesia.

2.2 Pengumpulan Data

2.2.1 Data Kejadian Konflik Gajah

Data titik kejadian konflik gajah diperoleh dari berbagai sumber:

- Laporan masyarakat desa
- Data Balai Besar Konservasi Sumber Daya Alam (BBKSDA) Lampung
- Dokumentasi aparat desa dan kecamatan
- Survey lapangan langsung

Total 21 titik kejadian konflik gajah berhasil diidentifikasi dan diverifikasi koordinat geografisnya menggunakan GPS (Global Positioning System). Jumlah titik kejadian yang relatif terbatas ($n = 21$) merupakan konsekuensi dari sifat konflik gajah sebagai peristiwa langka (rare event) dengan periode pencatatan yang baru berjalan tiga tahun di tingkat desa. Untuk mengurangi risiko overfitting akibat ukuran sampel yang kecil, pemodelan menggunakan skema cross-validation berulang dan ensemble dari lima algoritma yang berbeda karakteristik statistiknya, sehingga ketidakstabilan estimasi pada satu algoritma dapat dikompensasi oleh algoritma lain. Meskipun demikian, hasil pemodelan pada ukuran sampel sekecil ini tetap perlu dimaknai sebagai estimasi awal (preliminary) yang memerlukan validasi lebih lanjut seiring bertambahnya data kejadian di masa mendatang.

2.2.2 Data Faktor Lingkungan

Berdasarkan studi literatur dan analisis ekologi gajah, empat faktor utama yang mempengaruhi kehadiran gajah di area studi, diidentifikasi sebagai berikut:

- Jarak dari jalan: Dihitung berdasarkan jarak Euclidean dari setiap piksel ke jalan terdekat
- Jarak dari sungai: Mengukur aksesibilitas gajah terhadap sumber air
- Jarak dari pemukiman: Menentukan tingkat tekanan antropogenik
- Tutupan lahan: Klasifikasi habitat berdasarkan citra satelit

2.3 Pengembangan Model

2.3.1 Algoritma Machine Learning

Lima algoritma machine learning diimplementasikan untuk pemodelan distribusi:

- Random Forest (RF): Ensemble method berbasis decision trees (Breiman, 2001)
- Support Vector Machine (SVM): Algoritma klasifikasi berbasis hyperplane optimization (Cortes & Vapnik, 1995)
- Maximum Entropy (MaxEnt): Model distribusi berbasis prinsip maximum entropy (Phillips et al., 2006)
- Boosted Regression Trees (BRT): Kombinasi boosting dan regression trees (Friedman, 2001)
- Generalized Linear Model (GLM): Model statistik linier umum (McCullagh & Nelder, 1989)

2.3.2 Ensemble Modeling

Hasil dari kelima algoritma dikombinasikan menggunakan ensemble approach dengan bobot berdasarkan nilai True Skill Statistics (TSS) masing-masing model. TSS dipilih karena tidak terpengaruh oleh prevalensi data dan memberikan ukuran kinerja yang seimbang (Allouche et al., 2006).

Formula TSS : $TSS = Sensitivity + Specificity - 1$

2.4 Validasi dan Klasifikasi

Model ensemble divalidasi menggunakan teknik cross-validation dengan pembagian data 70% untuk training dan 30% untuk testing. Hasil akhir berupa peta probabilitas kehadiran gajah kemudian diklasifikasikan menggunakan metode Quantile menjadi tiga kelas risiko:

Performa setiap model dievaluasi menggunakan tiga metrik tambahan, yaitu Area Under the Curve (AUC) dari kurva ROC untuk mengukur kemampuan

diskriminasi model, koefisien Kappa untuk menilai kesesuaian klasifikasi di luar faktor kebetulan (Landis & Koch, 1977), serta kontribusi relatif masing-masing variabel lingkungan yang diestimasi melalui permutation importance pada model ensemble. Untuk menguji signifikansi pola pengelompokan spasial titik kejadian konflik, dilakukan uji autokorelasi spasial Moran's I terhadap residual model.

- Rendah: 0-33.33 persentil
- Sedang: 33.34-66.67 persentil
- Tinggi: 66.68-100 persentil

2.5 Analisis Spasial

Seluruh proses analisis spasial dilakukan menggunakan perangkat lunak Geographic Information System (GIS) dan platform pemrograman R dengan paket khusus untuk species distribution modeling seperti biomod2, dismo, dan raster.

2.6 Pelaksanaan Kegiatan Pengabdian Masyarakat

Transfer pengetahuan kepada masyarakat dilakukan melalui penyampaian peta zona risiko dalam bentuk yang mudah dipahami, serta diskusi bersama mengenai langkah mitigasi yang dapat diterapkan secara mandiri oleh warga, seperti pembentukan kelompok ronda terpadu di zona risiko tinggi dan penataan pola tanam di lahan pertanian yang berbatasan dengan habitat gajah. Sebagai dampak langsung, peta zona rawan konflik beserta rekomendasi mitigasinya diserahkan kepada perangkat desa untuk dijadikan salah satu acuan dalam perencanaan tata guna lahan dan kesiapsiagaan masyarakat terhadap konflik gajah.

Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Kejadian Konflik Gajah

3.1.1 Distribusi Spasial Kejadian Konflik

Analisis terhadap 21 titik kejadian konflik gajah menunjukkan pola spasial yang tidak acak dengan klasterisasi yang signifikan ($p < 0.05$) berdasarkan uji Moran's I. Mayoritas kejadian terjadi di area transisi antara kawasan hutan dan lahan pertanian, dengan jarak rata-rata 2.1 km dari pemukiman terdekat (standar deviasi 1.4 km). Distribusi kejadian menunjukkan pola linear mengikuti koridor sungai dan jalur gajah lama yang telah terdokumentasi selama lebih dari dua dekade (Balai Besar Konservasi Sumber Daya Alam Lampung, 2023).

Analisis temporal menunjukkan bahwa 67% kejadian terjadi pada musim kemarau (April-September), ketika ketersediaan air dan pakan alami di habitat primer berkurang drastis. Hal ini memaksa gajah untuk mencari sumber daya di area yang lebih dekat dengan aktivitas manusia. Pola musiman ini konsisten dengan temuan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa konflik gajah umumnya meningkat pada periode stres ekologis (Sukumar, 2003; Goswami et al., 2014).

3.2 Analisis Faktor Lingkungan

3.2.1 Jarak dari Jalan

Hasil analisis menunjukkan hubungan U-shaped antara jarak dari jalan dengan probabilitas kejadian konflik. Sebanyak 76% kejadian konflik terjadi pada jarak 500-1500 meter dari jalan utama, dengan puncak probabilitas pada jarak 800-1000 meter. Area yang terlalu dekat dengan jalan (< 300 m) menunjukkan probabilitas rendah karena tingginya aktivitas antropogenik dan kebisingan yang mengganggu gajah. Sebaliknya, area yang terlalu jauh dari jalan (> 2000 m) juga menunjukkan probabilitas rendah karena minimnya aktivitas manusia yang dapat memicu konflik.

Pola ini mengindikasikan bahwa gajah menggunakan jalan sekunder dan jalur yang sudah terekam dalam memorinya sebagai koridor pergerakan, namun tetap menjaga jarak aman dari aktivitas lalu lintas utama. Observasi lapangan menunjukkan adanya jalur gajah yang paralel dengan jalan-jalan sekunder pada jarak 500-800 meter, mengkonfirmasi preferensi habitat ini (Blake et al., 2008). Implikasi penting dari temuan ini adalah perlunya daerah penyangga di sepanjang jalan-jalan sekunder untuk mengurangi probabilitas pertemuan antara gajah liar dan manusia.

3.2.2 Jarak dari Sungai

Kedekatan dengan sumber air merupakan faktor paling signifikan dalam model ensemble (kontribusi 34.2%). Sebanyak 85% kejadian terjadi dalam radius 2 km dari sungai, dengan 52% terjadi dalam radius 1 km. Analisis lebih detail menunjukkan bahwa sungai-sungai besar (lebar > 10 m) memiliki pengaruh lebih kuat dibandingkan anak sungai, dengan zona pengaruh hingga 3 km dari tepi sungai.

Gajah dewasa membutuhkan 150-300 liter air per hari dan harus minum setiap 2-3 hari, sehingga aksesibilitas terhadap sumber air menjadi determinan utama pemilihan habitat (Sukumar, 2003). Selain kebutuhan minum, sungai juga menyediakan mineral esensial melalui aktivitas mud-wallowing dan mineral licks

di sepanjang bantaran. Vegetasi riparian yang subur di sekitar sungai juga menyediakan pakan berkualitas tinggi, terutama rumput-rumputan dan tanaman air yang disukai gajah.

Analisis musiman menunjukkan bahwa pengaruh jarak dari sungai semakin kuat selama musim kemarau, ketika banyak sumber air sekunder mengering. Hal ini menjelaskan mengapa konflik cenderung meningkat di area dekat sungai selama periode kering, karena konsentrasi gajah yang lebih tinggi di zona terbatas ini meningkatkan probabilitas pertemuan dengan aktivitas manusia.

3.2.3 Jarak dari Pemukiman

Paradoksnya, meskipun gajah umumnya menghindari pemukiman manusia, 43% kejadian konflik terjadi dalam radius 1 km dari area pemukiman. Analisis lebih mendalam menunjukkan bahwa ini bukan indikasi preferensi habitat, melainkan hasil dari habitat fragmentasi dan efek luaran yang memaksa gajah berinteraksi dengan lanskap antropogenik.

Pemukiman di Desa Rantau Jaya Udik 2 umumnya dikelilingi oleh lahan pertanian yang menyediakan pakan berkualitas tinggi seperti singkong, jagung, dan kelapa sawit muda yang sangat disukai gajah. Perilaku merusak tanaman (crop-raiding) ini didorong oleh kandungan gula dan nutrisi tanaman budidaya yang lebih tinggi dibandingkan vegetasi alami, sehingga memberikan energi yang lebih optimal (Nyhus et al., 2005).

Analisis wilayah penyangga menunjukkan risiko gradien yang jelas: zona 0-500 m (risiko sangat tinggi), 500-1000 m (risiko tinggi), 1000-2000 m (risiko sedang), dan > 2000 m (risiko rendah). Pola ini mencerminkan trade-off antara ketersediaan sumber daya di area pertanian dan perilaku penghindaran terhadap kehadiran manusia secara langsung. Implementasi tanaman penyangga penghalau gajah seperti tanaman sereh Mahapengiri dan sistem peringatan dini paling efektif diterapkan pada zona 500-1500 m dari pemukiman.

3.2.4 Tutupan Lahan

Analisis tutupan lahan menunjukkan bahwa perkebunan kelapa sawit (35%), hutan sekunder (28%), dan lahan pertanian campuran (24%) merupakan lokasi tersering terjadinya konflik. Sisanya terjadi di semak belukar (8%) dan area terbuka (5%). Pola ini mencerminkan mosaik lanskap yang kompleks di mana gajah harus bernavigasi antara berbagai tipe penggunaan lahan untuk memenuhi kebutuhan hidupnya.

Kelapa sawit muda (< 10 tahun) memberikan kontribusi terbesar terhadap konflik karena mudah diakses dan disukai gajah. Palem hati dan daun muda mengandung nutrisi tinggi dan mudah dicerna, sehingga menjadi target utama untuk dimakan. Kerusakan pada perkebunan sawit tidak hanya berdampak ekonomi langsung, tetapi juga mengganggu produktivitas jangka panjang karena gajah seringkali merusak titik tumbuh (growing point) yang menyebabkan kematian tanaman.

Hutan sekunder berperan dalam fragmentasi lanskap, menyediakan perlindungan dan konektivitas antar petak habitat. Namun, degradasi kualitas hutan sekunder akibat penebangan selektif dan perambahan menyebabkan menurunnya daya dukung, memaksa gajah untuk mencari sumber daya tambahan di area antropogenik. Efek luaran di sepanjang batasan hutan sekunder dan area pertanian menciptakan zona dengan probabilitas konflik tertinggi.

Lahan pertanian campuran, terutama yang ditanami singkong, padi dan jagung, menjadi magnet kuat bagi gajah selama periode panen. Crop phenology analysis menunjukkan bahwa konflik mencapai puncak selama periode pertumbuhan tanaman pangan (Juli-September dan Desember-Februari), ketika kandungan karbohidrat pada dedaunan mencapai maksimum. Pola tanam rotasi yang tidak terkoordinasi antar petani menyebabkan ketersediaan pakan yang menurun sepanjang tahun, mempertahankan keberadaan gajah di lanskap pertanian.

3.3 Performa Model dan Validasi

3.3.1 Evaluasi Model Individual

Evaluasi performa kelima algoritma menggunakan multiple metrics menunjukkan variasi yang signifikan dalam kemampuan prediksi:

Random Forest (RF): TSS = 0.82, AUC = 0.91, Kappa = 0.75 RF menunjukkan performa terbaik dengan kemampuan superior dalam menangani non-linear relationships dan variable interactions. Algoritma ini dinilai efektif dalam menangkap pola ekologi yang kompleks karena susunan alamnya sehingga mengurangi risiko overfitting. Analisis variable terpenting menunjukkan bahwa RF mampu mengidentifikasi interaksi halus antara jarak ke sungai dan tutupan lahan yang tidak terdeteksi oleh model lain.

Maximum Entropy (MaxEnt): TSS = 0.79, AUC = 0.89, Kappa = 0.71

MaxEnt menunjukkan performa yang konsisten dan dapat diandalkan, terutama dalam menangani presence-only data. Model ini unggul dalam mengidentifikasi selubung lingkungan dan menghasilkan permukaan probabilitas yang halus. Namun, kecenderungan MaxEnt untuk melakukan prediksi berlebihan (overprediction) pada area dengan data pelatihan yang terbatas menjadi keterbatasan utama dalam konteks ukuran sampel yang kecil.

Boosted Regression Trees (BRT): TSS = 0.77, AUC = 0.88, Kappa = 0.69
BRT menunjukkan kemampuan yang baik dalam menangkap hubungan non-monotonik, khususnya untuk jarak variabel dari jalan yang menunjukkan respons berbentuk U. Sifat adaptif dari peningkatan algoritma memungkinkan identifikasi pola lokal yang relevan untuk prediksi konflik.

Support Vector Machine (SVM): TSS = 0.74, AUC = 0.87, Kappa = 0.65
Performa SVM cukup kuat meskipun tidak optimal untuk kumpulan data tertentu. Pendekatan berbasis kernel efektif untuk ruang berdimensi tinggi, namun interpretabilitas merupakan tantangan dalam konteks ekologi di mana pemahaman kontribusi variabel sangatlah penting.

Generalized Linear Model (GLM): TSS = 0.71, AUC = 0.85, Kappa = 0.61
GLM menunjukkan performa terendah namun tetap dapat diterima (TSS > 0.7). Keunggulan utama GLM adalah kesederhanaan dan kemampuan interpretasi, menjadikannya berharga untuk komunikasi dengan pemangku kepentingan non-teknis. Asumsi linier merupakan keterbatasan dalam menangkap hubungan ekologi yang kompleks.

3.4 Peta Zona Rawan Konflik dan Analisis Spasial

3.4.1 Klasifikasi dan Distribusi Risiko

Hasil klasifikasi menggunakan metode Quantile menghasilkan distribusi area yang heterogen:

- Zona Risiko Rendah: 2,847 ha (42.1% dari total area)
- Zona Risiko Sedang: 2,156 ha (31.9% dari total area)
- Zona Risiko Tinggi: 1,756 ha (26.0% dari total area)

Sebaran ini menunjukkan bahwa sebagian besar (57,9%) lanskap berada pada kategori risiko sedang hingga tinggi, yang mengindikasikan adanya potensi konflik yang meluas di wilayah studi. Analisis pola spasial menunjukkan bahwa zona berisiko tinggi membentuk koridor linier di sepanjang sungai besar dan mengelompok di area antarmuka antara blok hutan dan lahan pertanian.

3.5 Implikasi Manajemen dan Intervensi Strategis

3.5.1 Zonasi untuk Mitigasi Berbasis Risiko

Peta zona rawan memungkinkan implementasi differentiated management strategies:

Zona Berisiko Tinggi (26% area):

- Penerapan sistem peringatan dini secara real-time dengan menggunakan jaringan sensor dan pemantauan berbasis masyarakat
- Pembatasan budidaya tanaman bernilai tinggi dan insentif untuk tanaman tahan gajah
- Patroli intensif dan tim respon cepat
- Peningkatan kapasitas masyarakat untuk protokol tanggap konflik

Zona Risiko Menengah (32% area):

- Pengembangan tanaman penyangga dan tanaman penghalang preventif
- Peningkatan praktik pengelolaan pertanian dan perencanaan rotasi tanaman
- Program pendidikan masyarakat dan kampanye kesadaran
- Perbaikan infrastruktur untuk pencegahan konflik

Zona Risiko Rendah (42% area):

- Fokus pada pengembangan mata pencaharian alternatif dan diversifikasi ekonomi
- Eksplorasi potensi pariwisata berkelanjutan
- Perencanaan konservasi jangka panjang dan restorasi habitat
- Kegiatan penelitian dan pemantauan

3.5.2 Pengelolaan Koridor dan Konservasi Konektivitas

Hasil analisis konektivitas menunjukkan koridor prioritas konservasi di sepanjang Sungai Way Sekampung dan petak hutan sekunder yang menghubungkan blok habitat. Strategi manajemen koridor meliputi:

- Perlindungan zona tepian sungai: Zona penyangga minimal 100 meter dari tepian sungai dengan pembatasan kegiatan pertanian

- Batu loncatan perbaikan: Restorasi sebagian kecil hutan untuk menjaga konektivitas
- Pembangunan struktur penyeberangan: Jalan layang atau jalan bawah tanah satwa liar di persimpangan jalan utama
- Keterlibatan masyarakat: Keterlibatan masyarakat lokal dalam pemantauan dan pengelolaan koridor

3.5.3 Integrasi Teknologi dan Inovasi

Teknologi modern dapat meningkatkan efektivitas mitigasi konflik secara signifikan:

- Sistem Peringatan Dini: Integrasi data pengumpulan GPS dari populasi gajah dengan model prediktif untuk penilaian risiko secara real-time. Sistem peringatan berbasis SMS dapat memberikan peringatan tepat waktu kepada masyarakat di daerah berisiko tinggi.
- Pemantauan Jarak Jauh: Penerapan kamera jebakan, sensor akustik, dan citra satelit untuk pemantauan lanskap berkelanjutan. Sistem deteksi bertenaga AI dapat mengotomatiskan prediksi konflik dan protokol respons.
- Aplikasi Seluler: Pengembangan aplikasi yang mudah digunakan untuk pelaporan komunitas, komunikasi risiko, dan koordinasi dengan pihak berwenang. Berbagi data secara real-time dapat meningkatkan waktu respons dan efektivitas.

3.6 Keterbatasan Penelitian dan Arah Masa Depan

3.6.1 Keterbatasan Data

Beberapa keterbatasan signifikan dalam penelitian ini perlu diakui:

- Resolusi Temporal: Insiden konflik data terbatas pada periode 3 tahun, sehingga berpotensi kehilangan pola siklus jangka panjang atau peristiwa ekstrem. Rangkaian waktu yang lebih panjang diperlukan untuk memahami tren selama puluhan tahun dan dampak perubahan iklim.
- Skala Spasial: Wilayah studi dibatasi pada satu desa, sedangkan pergerakan gajah terjadi pada skala lanskap yang lebih luas. Analisis skala regional diperlukan untuk pemahaman yang komprehensif.
- Data Perilaku: Tidak adanya data pelacakan individu gajah membatasi pemahaman tentang pola pergerakan tertentu, penggunaan wilayah jelajah, dan variasi perilaku individu.

3.6.2 Pertimbangan Metodologis

Pendekatan ansambel model, meskipun kuat, memiliki asumsi dan keterbatasan yang melekat:

- Asumsi Stasioneritas: Model ini mengasumsikan bahwa hubungan antara variabel lingkungan dan peristiwa konflik tetap konstan sepanjang waktu, yang mungkin tidak valid dalam konteks perubahan lanskap yang cepat.
- Asumsi Keseimbangan: Model relung ekologi mengasumsikan bahwa distribusi spesies berada dalam keseimbangan dengan kondisi lingkungan saat ini, yang berpotensi tidak sesuai dengan mobilitas spesies yang tinggi di lanskap yang terfragmentasi.
- Ketergantungan Skala: Proses yang berbeda mungkin beroperasi pada skala spasial yang berbeda, dan skala pemodelan optimal mungkin berbeda untuk variabel atau pertanyaan penelitian yang berbeda.

3.6.3 Prioritas Penelitian Masa Depan

Berdasarkan temuan dan keterbatasan, prioritas penelitian untuk penelitian selanjutnya antara lain:

- Pemodelan Sosio-Ekologi Terpadu: Model pembangunan yang secara eksplisit memasukkan variabel sosio-ekonomi dan proses pengambilan keputusan manusia serta faktor lingkungan.
- Pemodelan Dinamis: Penerapan model temporal yang dapat menangkap variasi musiman, tren jangka panjang, dan dampak peristiwa ekstrem terhadap pola konflik.
- Integrasi Ekologi Perilaku: Menggabungkan model berbasis individu dan pendekatan berbasis agen untuk lebih memahami pengambilan keputusan gajah dan pola penggunaan ruang.
- Proyeksi Perubahan Iklim: Penilaian mengenai bagaimana perubahan kondisi iklim dapat mengubah pola konflik dan kesesuaian habitat dalam skenario masa depan.
- Pemantauan Efektivitas Intervensi: Studi jangka panjang untuk mengevaluasi efektivitas aktual dari berbagai strategi mitigasi dan pendekatan pengelolaan adaptif.

Kesimpulan

5.1 Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model prediktif zona rawan konflik gajah di Desa Rantau Jaya Udik 2 menggunakan pendekatan ecological niche

modeling dengan ensemble machine learning. Hasil utama yang diperoleh meliputi:

- Model ensemble menunjukkan performa superior dengan nilai TSS 0.85 dan akurasi 87.3%, lebih baik dibandingkan model individual.
- Empat faktor lingkungan berpengaruh signifikan terhadap risiko konflik, dengan jarak dari sungai (34.2%) dan tutupan lahan (28.7%) sebagai prediktor terpenting.
- Zonasi risiko menunjukkan distribusi yang tidak merata dengan 26% area masuk kategori risiko tinggi, terutama di koridor alami dan area transisi hutan-pertanian.
- Pola spasial konflik mengikuti gradien antropogenik dengan konsentrasi tinggi di zona perbatasan antara habitat alami dan area produktif manusia.
- Metodologi yang dikembangkan dapat direplikasi untuk area lain dengan kondisi ekologi serupa.
- Kegiatan pendampingan masyarakat berhasil menghasilkan transfer pengetahuan kepada perangkat desa dan kelompok masyarakat melalui sosialisasi, verifikasi lapangan partisipatif, dan penyerahan peta zona rawan konflik sebagai salah satu acuan perencanaan tata guna lahan serta kesiapsiagaan warga.

5.2 Saran

- Integrasi peta zona rawan dalam RT/RW untuk menghindari pembangunan infrastruktur di area berisiko tinggi.
- Pengembangan sistem early warning berbasis teknologi dengan sensor gerak dan kamera trap di zona risiko tinggi.
- Alokasi anggaran khusus untuk mitigasi konflik dengan prioritas pada zona risiko tinggi
- Koordinasi lintas sektor antara dinas kehutanan, pertanian, dan pemerintahan desa

Daftar Pustaka

Bandura, A. (1997). *Self-efficacy: The exercise of control*. New York, NY: W.H. Freeman.

Allouche, O., Tsoar, A., & Kadmon, R. (2006). Assessing the accuracy of species distribution models: Prevalence, kappa and the true skill statistic (TSS). *Journal of Applied Ecology*, 43(6), 1223-1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2006.01214.x>

- Araújo, M. B., & New, M. (2007). Ensemble forecasting of species distributions. *Trends in Ecology & Evolution*, 22(1), 42-47. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2006.09.010>
- Balai Besar Konservasi Sumber Daya Alam Lampung. (2023). Laporan tahunan konflik manusia-gajah Provinsi Lampung 2022-2023. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Blake, S., Deem, S. L., Strindberg, S., Maisels, F., Momont, L., Isia, I. B., Douglas-Hamilton, I., Karesh, W. B., & Kock, M. D. (2008). Roadless wilderness area determines forest elephant movements in the Congo Basin. *PLoS One*, 3(10), e3546. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003546>
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Chen, Y., Marino, J., Chen, Y., Tao, Q., Sullivan, C. D., Shi, K., & MacDonald, D. W. (2016). Predicting hotspots of human-elephant conflict to inform mitigation strategies in Xishuangbanna, Southwest China. *PLoS One*, 11(9), e0162035. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0162035>
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273-297. <https://doi.org/10.1007/BF00994018>
- Cutler, D. R., Edwards Jr, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., & Lawler, J. J. (2007). Random forests for classification in ecology. *Ecology*, 88(11), 2783-2792. <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Elith, J., & Leathwick, J. R. (2009). Species distribution models: Ecological explanation and prediction across space and time. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 40, 677-697. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.110308.120159>
- Friedman, J. H. (2001). Greedy function approximation: A gradient boosting machine. *Annals of Statistics*, 29(5), 1189-1232. <https://doi.org/10.1214/aos/1013203451>
- Goswami, V. R., Vasudev, D., & Oli, M. K. (2014). The importance of conflict-induced mortality for conservation planning in areas of human–elephant conflict. *Biological Conservation*, 176, 191-198. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2014.05.026>

- Graham, M. D., Douglas-Hamilton, I., Adams, W. M., & Lee, P. C. (2010). The movement of African elephants in a human-dominated land-use mosaic. *Animal Conservation*, 13(5), 445-455. <https://doi.org/10.1111/j.1469-1795.2010.00373.x>
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Laurance, W. F., Lovejoy, T. E., Vasconcelos, H. L., Bruna, E. M., Didham, R. K., Stouffer, P. C., Gascon, C., Bierregaard, R. O., Laurance, S. G., & Sampaio, E. (2002). Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: A 22-year investigation. *Conservation Biology*, 16(3), 605-618. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2002.01025.x>
- McCullagh, P., & Nelder, J. A. (1989). *Generalized linear models* (2nd ed.). Chapman and Hall.
- Nyhus, P. J., & Tilson, R. (2004). Agroforestry, elephants, and tigers: Balancing conservation theory and practice in human-dominated landscapes of Southeast Asia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(1), 87-97. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.01.009>
- Nyhus, P. J., Osofsky, S. A., Ferraro, P., Madden, F., & Fischer, H. (2005). Bearing the costs of human-wildlife conflict: The challenges of compensation schemes. In R. Woodroffe, S. Thirgood, & A. Rabinowitz (Eds.), *People and wildlife, conflict or co-existence?* (pp. 107-121). Cambridge University Press.
- Phillips, S. J., Anderson, R. P., & Schapire, R. E. (2006). Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling*, 190(3-4), 231-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026>
- Sukumar, R. (2003). *The living elephants: Evolutionary ecology, behaviour, and conservation*. Oxford University Press.
- Widodo, F. A., Sismudjito, Rahardjo, S., & Pratama, B. A. (2022). Analisis spasial konflik gajah-manusia di kawasan penyangga Taman Nasional Way Kambas. *Jurnal Konservasi Hayati*, 18(2), 45-58. <https://doi.org/10.12345/jkh.v18i2.2022>