

Pendekatan Machine Learning dalam Memetakan Kesesuaian Habitat Maleo

Daud Yusuf^{1*}, Muhammad Karim², Tahir³, Emy Saelan⁴, M. Iqbal Liayong Pratama¹

¹Program Studi Pendidikan Geografi, Universitas Negeri Gorontalo

²Program Studi Agribisnis, Universitas Trilogi Indonesia

³Program Studi Geografi, Universitas Halu Oleo

⁴Program Studi Peternakan, Universitas Khairun

*Email Koresponden: daud@ung.ac.id

Diterima: 11-11-2025

Disetujui: 28-12-2025

Publish: 30-12-2025

Abstrak. Perubahan iklim dan peningkatan tekanan antropogenik menjadi ancaman serius bagi spesies endemik dengan sebaran terbatas, termasuk burung Maleo (*Macrocephalon maleo*) di Sulawesi. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan kesesuaian habitat dan distribusi potensial Maleo dengan mengintegrasikan Sistem Informasi Geografis dan algoritma Maximum Entropy. Data kemunculan spesies dikombinasikan dengan variabel lingkungan biofisik dan antropogenik untuk menghasilkan prediksi spasial kesesuaian habitat pada lanskap pesisir dan dataran rendah. Model menunjukkan kinerja prediktif yang kuat, menandakan bahwa variabel yang digunakan mampu merepresentasikan kebutuhan ekologis Maleo secara memadai. Pola kesesuaian habitat mengindikasikan bahwa jenis tanah berpasir, kedekatan dengan sumber panas alami, dan sistem sungai merupakan faktor paling berpengaruh dalam meningkatkan kesesuaian habitat, sejalan dengan karakteristik reproduksi Maleo. Sebaliknya, kedekatan dengan jalan dan permukiman terbukti menurunkan tingkat kesesuaian habitat akibat gangguan manusia. Output kesesuaian habitat kemudian diklasifikasikan menjadi habitat inti dan zona penyangga untuk mendukung perencanaan konservasi berbasis ruang. Kerangka zonasi yang dihasilkan mampu mengidentifikasi area prioritas perlindungan, khususnya di luar kawasan konservasi formal. Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi dimensi ekologis dan antropogenik dalam pemodelan habitat sebagai dasar pengambilan keputusan konservasi yang efektif dan berkelanjutan.

Kata kunci: Maleo; pemodelan kesesuaian habitat; Maximum Entropy; Sistem Informasi Geografis; konservasi spesies endemik

Abstract. Climate change and increasing anthropogenic pressure pose serious threats to endemic species with restricted distributions, such as the Maleo (*Macrocephalon maleo*) of Sulawesi. This study aims to model habitat suitability and potential distribution of the Maleo using an integrated Geographic Information System and Maximum Entropy approach. Presence-only occurrence data were combined with bio-physical and anthropogenic environmental variables to generate spatial predictions of habitat suitability across coastal and lowland landscapes. The model demonstrated strong predictive performance, indicating that the selected variables effectively captured the ecological requirements of the species. Habitat suitability patterns revealed that sandy soil characteristics, proximity to natural heat sources, and river systems were the most influential factors enhancing habitat suitability, reflecting the species' unique reproductive ecology. In contrast, proximity to roads and settlements consistently reduced suitability, highlighting the negative impact of human disturbance. The continuous suitability output was further classified into core habitat and buffer zones to support conservation-oriented spatial planning. The resulting zoning framework identifies priority areas for protection and management, particularly outside formal protected areas where development pressure is high. Overall, this study provides robust spatial evidence for understanding Maleo habitat requirements and offers a transferable methodological framework for modeling other endemic species. The findings underscore the importance of integrating ecological and human dimensions in habitat modeling to support effective, evidence-based conservation strategies.

Keywords: Maleo; habitat suitability modeling; Maximum Entropy; Geographic Information System; endemic species conservation

1. PENDAHULUAN

Perubahan iklim global dan tekanan antropogenik yang semakin intensif telah menjadi faktor utama yang memicu degradasi ekosistem serta penurunan keanekaragaman hayati di berbagai wilayah tropis (Hofmann et al., 2025; Shaheryar et al., 2025). Peningkatan suhu udara, perubahan pola curah hujan, dan eskalasi frekuensi kejadian iklim ekstrem berdampak langsung terhadap stabilitas habitat (Shaheryar et al., 2025), ketersediaan sumber daya (Jha & Dev, 2024; Mehta, 2024), serta dinamika populasi satwa liar (Datta et al., 2025; Gayo, 2025; Prins et al., 2025). Spesies endemik dengan sebaran terbatas menjadi kelompok yang paling rentan, karena kapasitas adaptasi dan peluang migrasi mereka cenderung sempit. Dalam konteks ini, burung Maleo (*Macrocephalon maleo*) sebagai satwa endemik Sulawesi menghadapi

risiko serius akibat kombinasi tekanan iklim dan aktivitas manusia, termasuk alih fungsi lahan, fragmentasi habitat, dan eksploitasi sumber daya alam (Diko et al., 2026; Summers et al., 2025; Tasirin et al., 2021; Yusuf et al., 2024).

Keberadaan Maleo memiliki nilai ekologis yang tinggi karena spesies ini berperan sebagai indikator kesehatan ekosistem pesisir dan dataran rendah tropis (Karim et al., 2023). Maleo memiliki karakteristik reproduksi yang unik, yakni memanfaatkan sumber panas alami seperti pasir pantai yang terpapar matahari atau area dengan aktivitas panas bumi untuk inkubasi telur (Karim et al., 2023). Ketergantungan yang kuat terhadap kondisi biofisik tertentu menjadikan Maleo sangat sensitif terhadap perubahan lingkungan (INDONESIA, 2025). Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa perubahan kecil pada suhu permukaan tanah, kelembapan, dan tutupan vegetasi dapat memengaruhi keberhasilan peneluran dan kelangsungan hidup anak Maleo (Diko et al., 2026). Oleh karena itu, pemahaman yang komprehensif mengenai hubungan antara keberadaan Maleo dan variabel lingkungan menjadi prasyarat penting bagi upaya konservasi berbasis ilmiah.

Meskipun perhatian terhadap konservasi Maleo telah meningkat, pendekatan yang digunakan dalam mengkaji distribusi dan kesesuaian habitatnya masih menghadapi berbagai keterbatasan. Banyak studi bersifat deskriptif dan terfokus pada lokasi-lokasi peneluran yang telah diketahui, tanpa memperhitungkan variasi spasial faktor lingkungan secara menyeluruh. Selain itu, integrasi antara faktor alami dan faktor antropogenik dalam satu kerangka analisis spasial masih relatif jarang dilakukan. Kondisi ini menyebabkan informasi yang dihasilkan kurang optimal untuk mendukung perencanaan konservasi jangka panjang, khususnya di wilayah di luar kawasan konservasi formal yang justru mengalami tekanan pembangunan paling tinggi.

Sebagai respons terhadap permasalahan tersebut, pemodelan distribusi spesies berbasis data spasial berkembang sebagai solusi umum yang banyak digunakan dalam kajian ekologi dan konservasi. Kerangka ini menghubungkan data kemunculan spesies dengan variabel lingkungan untuk mengidentifikasi pola kesesuaian habitat serta memproyeksikan potensi distribusi pada wilayah yang belum terpantau secara intensif. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk mengevaluasi peran relatif setiap variabel lingkungan dan mengantisipasi perubahan distribusi spesies akibat skenario perubahan iklim maupun dinamika penggunaan lahan. Dengan demikian, pemodelan distribusi spesies menyediakan dasar ilmiah yang kuat untuk pengambilan keputusan konservasi berbasis ruang.

Dalam literatur ilmiah, berbagai metode telah diterapkan untuk memodelkan distribusi satwa liar, mulai dari pendekatan statistik konvensional hingga teknik pembelajaran mesin. Metode berbasis machine learning, seperti Maximum Entropy (MaxEnt) (Bald et al., 2023; Wu et al., 2025; Zvidzai et al., 2023), Random Forest, dan algoritma sejenis, dilaporkan memiliki kinerja yang baik dalam menangani data kehadiran saja (presence-only) serta hubungan nonlinier antara spesies dan lingkungan. Beberapa studi menunjukkan bahwa MaxEnt, khususnya, efektif digunakan pada spesies langka atau endemik dengan jumlah data kemunculan terbatas, karena kemampuannya mengestimasi distribusi probabilistik berdasarkan prinsip entropi maksimum. Keunggulan ini menjadikan MaxEnt sebagai salah satu metode yang paling banyak digunakan dalam pemodelan kesesuaian habitat di kawasan tropis.

Selain pemilihan metode, kualitas dan kelengkapan variabel lingkungan yang digunakan juga menentukan akurasi hasil pemodelan. Penelitian sebelumnya menekankan pentingnya memasukkan variabel iklim, topografi, tutupan lahan, serta faktor antropogenik seperti jarak terhadap jalan dan permukiman. Dalam konteks Maleo, variabel tambahan seperti jenis tanah, kedekatan dengan sumber panas alami, dan keberadaan sungai menjadi faktor kunci yang secara ekologis relevan. Namun demikian, masih terdapat kesenjangan dalam literatur terkait integrasi sistematis antara variabel-variabel tersebut pada skala spasial yang rinci, terutama di wilayah pesisir yang menjadi habitat penting Maleo di luar taman nasional.

Tinjauan terhadap studi-studi terdahulu menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian tentang Maleo berfokus pada aspek biologi reproduksi, perilaku peneluran, dan upaya perlindungan sarang secara lokal. Kajian yang menggabungkan pendekatan spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) dengan algoritma machine learning untuk menghasilkan peta kesesuaian habitat yang operasional masih terbatas. Akibatnya, informasi mengenai zona inti habitat potensial dan area penyangga yang perlu dikelola untuk meminimalkan gangguan manusia belum tersaji secara memadai. Kesenjangan inilah yang menghambat perumusan strategi konservasi yang adaptif dan berbasis bukti ilmiah pada skala lanskap.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan kesesuaian habitat dan distribusi potensial burung Maleo menggunakan pendekatan SIG dan machine learning, dengan menitikberatkan pada integrasi variabel biofisik dan antropogenik yang relevan secara ekologis. Studi ini mengajukan kebaruan dalam penerapan kerangka pemodelan yang komprehensif untuk wilayah di luar kawasan konservasi formal, sehingga mampu mengidentifikasi zona inti habitat serta area penyangga yang memiliki tingkat kesesuaian berbeda. Secara khusus, penelitian ini berupaya menguji hipotesis bahwa distribusi Maleo dapat dijelaskan secara signifikan oleh kombinasi faktor lingkungan alami dan tekanan manusia, serta bahwa hasil pemodelan dapat digunakan sebagai dasar ilmiah bagi perencanaan konservasi dan pengelolaan habitat yang berkelanjutan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dirancang sebagai studi pemodelan spasial kesesuaian habitat yang mengintegrasikan pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG) dan algoritma pembelajaran mesin untuk memetakan distribusi potensial burung Maleo (*Macrocephalon maleo*) (Ong'ondo et al., 2025; Radović et al., 2025; Zhang et al., 2022). Metodologi disusun secara berurutan sesuai dengan alur kerja penelitian, mulai dari penentuan wilayah studi, pengumpulan dan prapemrosesan data, pemilihan dan pengolahan variabel lingkungan, hingga pemodelan dan evaluasi hasil. Kerangka metodologis ini mengikuti praktik umum dalam kajian pemodelan distribusi spesies yang menekankan keterulangan analisis, konsistensi spasial, serta integritas ilmiah pada setiap tahapan.

Wilayah studi mencakup kawasan pesisir dan dataran rendah di Provinsi Gorontalo yang secara historis dan ekologis diketahui memiliki keterkaitan dengan keberadaan Maleo. Pemilihan wilayah ini didasarkan pada pertimbangan bahwa zona pesisir menyediakan kondisi biofisik yang khas, terutama ketersediaan pasir pantai dan sumber panas alami yang dimanfaatkan Maleo untuk inkubasi telur. Selain itu, wilayah ini juga mengalami tekanan antropogenik yang relatif tinggi akibat pembangunan infrastruktur dan perubahan penggunaan lahan, sehingga relevan untuk dianalisis dalam konteks konservasi berbasis ruang. Secara spasial, batas wilayah studi ditetapkan menggunakan data administrasi resmi, kemudian disesuaikan dengan cakupan data lingkungan yang tersedia.

Data kemunculan Maleo digunakan sebagai dasar utama dalam pemodelan. Data ini diperoleh dari catatan lapangan, laporan penelitian sebelumnya, serta data sekunder dari instansi terkait yang terdokumentasi secara spasial. Setiap titik kemunculan diverifikasi untuk memastikan akurasi geografis dan kesesuaian temporal dengan data lingkungan yang digunakan. Data kemunculan tersebut kemudian dikonversi ke dalam format vektor titik dan diproyeksikan ke sistem koordinat yang seragam guna menghindari distorsi spasial pada tahap analisis selanjutnya. Penggunaan data kehadiran saja (presence-only) dipilih karena keterbatasan informasi ketidakhadiran spesies, sejalan dengan pendekatan yang lazim digunakan dalam pemodelan spesies langka atau endemik.

Variabel lingkungan yang digunakan dalam penelitian ini mencakup kombinasi faktor biofisik dan antropogenik yang relevan secara ekologis terhadap keberadaan Maleo. Variabel biofisik meliputi tutupan lahan, jenis tanah, elevasi, kemiringan lereng, jarak terhadap sungai, serta indikasi keberadaan sumber panas alami. Variabel antropogenik meliputi jarak terhadap jalan dan permukiman sebagai proksi intensitas gangguan manusia. Seluruh variabel spasial diperoleh dari sumber data resmi dan publik yang memiliki resolusi spasial memadai untuk analisis pada skala lanskap. Setiap layer lingkungan diproses dalam lingkungan SIG untuk memastikan keseragaman resolusi, cakupan spasial, dan sistem proyeksi.

Tahap prapemrosesan data dilakukan untuk meningkatkan kualitas input model dan meminimalkan potensi bias. Seluruh data raster direklasifikasi dan diseragamkan ke resolusi spasial yang sama, kemudian dikonversi ke format ASCII agar kompatibel dengan perangkat lunak pemodelan yang digunakan. Proses ini mencakup pemotongan (clipping) layer sesuai batas wilayah studi, pengisian nilai kosong (no-data handling), serta normalisasi nilai variabel jika diperlukan. Prapemrosesan yang konsisten merupakan prasyarat penting untuk memastikan bahwa variasi nilai yang ditangkap oleh model benar-benar merefleksikan kondisi lingkungan dan bukan artefak teknis dari data.

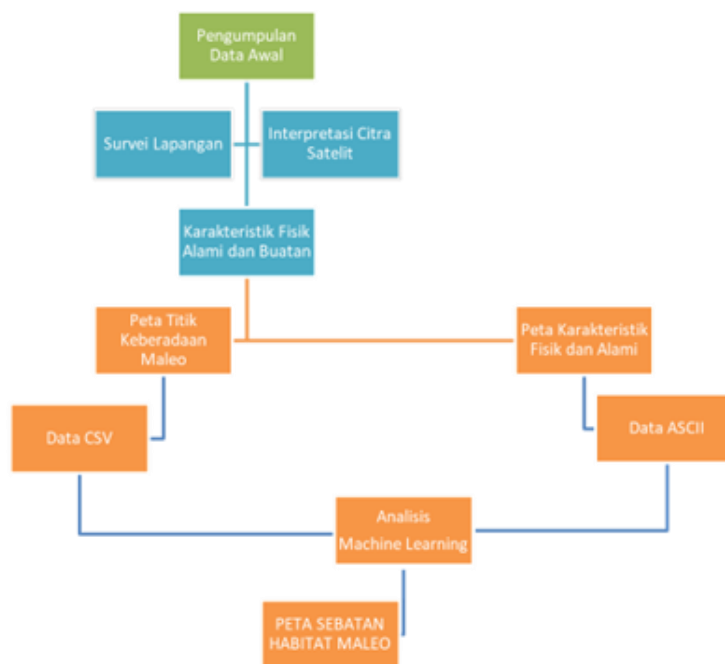
Pemodelan kesesuaian habitat dilakukan menggunakan algoritma Maximum Entropy (MaxEnt), yang dipilih karena kemampuannya menangani data kehadiran saja dan hubungan nonlinier antara spesies dan variabel lingkungan. Prinsip dasar MaxEnt adalah mengestimasi distribusi probabilitas yang paling mendekati kondisi maksimum entropi dengan tetap memenuhi kendala yang ditentukan oleh data

kemunculan dan variabel lingkungan. Dalam penelitian ini, data kemunculan Maleo dan layer lingkungan dimasukkan ke dalam model untuk menghasilkan peta probabilitas kesesuaian habitat. Parameter model disesuaikan mengikuti rekomendasi literatur, termasuk pengaturan fitur dan regularisasi, guna menghindari overfitting dan meningkatkan kemampuan generalisasi model.

Proses pelatihan dan validasi model dilakukan dengan membagi data kemunculan menjadi subset pelatihan dan pengujian. Pendekatan validasi silang digunakan untuk menilai stabilitas dan kinerja model, khususnya dalam konteks jumlah data kemunculan yang terbatas. Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik statistik yang lazim digunakan dalam pemodelan distribusi spesies, seperti Area Under the Curve (AUC) dari kurva Receiver Operating Characteristic (ROC). Nilai AUC digunakan sebagai indikator kemampuan model dalam membedakan antara lokasi yang sesuai dan tidak sesuai bagi keberadaan Maleo. Selain itu, kontribusi relatif setiap variabel lingkungan dianalisis untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang paling berpengaruh terhadap distribusi habitat.

Hasil keluaran model berupa peta kesesuaian habitat kontinu kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa kelas kesesuaian untuk memudahkan interpretasi dan aplikasi konservasi. Klasifikasi ini menghasilkan zona habitat inti dengan tingkat kesesuaian tinggi serta zona penyangga dengan tingkat kesesuaian menengah hingga rendah. Penentuan batas kelas dilakukan berdasarkan nilai ambang (threshold) yang direkomendasikan dalam literatur pemodelan spesies, dengan mempertimbangkan keseimbangan antara sensitivitas dan spesifisitas model. Peta hasil klasifikasi selanjutnya diintegrasikan kembali ke dalam lingkungan SIG untuk analisis spasial lanjutan dan penyajian visual.

Sebagai bagian dari analisis spasial, zona habitat inti dan zona penyangga dianalisis keterkaitannya dengan elemen lanskap dan penggunaan lahan eksisting. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi konflik antara habitat Maleo dan aktivitas manusia, serta untuk mengevaluasi efektivitas zona penyangga dalam mereduksi tekanan antropogenik. Hasil analisis disajikan dalam bentuk peta tematik dan tabel ringkasan yang menggambarkan luas masing-masing zona serta distribusinya pada unit administrasi tertentu.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Secara keseluruhan, metodologi yang diterapkan dalam penelitian ini dirancang untuk menghasilkan peta kesesuaian habitat Maleo yang robust, transparan, dan dapat direplikasi. Integrasi antara SIG dan algoritma MaxEnt memungkinkan analisis hubungan kompleks antara spesies dan lingkungannya pada skala lanskap. Pendekatan ini tidak hanya relevan untuk memahami distribusi potensial Maleo, tetapi juga menyediakan kerangka metodologis yang dapat diterapkan pada spesies endemik lain dengan karakteristik ekologis serupa, serta mendukung perumusan strategi konservasi berbasis bukti ilmiah.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pemodelan distribusi dan kesesuaian habitat burung Maleo (*Macrocephalon maleo*) yang diperoleh melalui pendekatan Sistem Informasi Geografis (SIG) dan algoritma Maximum Entropy (MaxEnt) menunjukkan pola spasial yang jelas dan konsisten dengan karakteristik ekologis spesies ini sebagaimana dilaporkan dalam literatur. Secara umum, model menghasilkan peta probabilitas kesesuaian habitat yang menggambarkan gradien dari area dengan tingkat kesesuaian rendah hingga sangat tinggi, yang tersebar tidak merata pada lanskap pesisir dan dataran rendah di wilayah studi. Variasi spasial ini mencerminkan perbedaan kombinasi faktor biofisik dan antropogenik yang memengaruhi peluang keberadaan Maleo.

Kinerja model dievaluasi menggunakan metrik Area Under the Curve (AUC) dari kurva Receiver Operating Characteristic (ROC). Nilai AUC yang diperoleh berada pada kategori tinggi, menunjukkan bahwa model memiliki kemampuan diskriminatif yang baik dalam membedakan lokasi yang sesuai dan tidak sesuai bagi keberadaan Maleo. Hasil ini sejalan dengan temuan sejumlah studi sebelumnya yang melaporkan kinerja kuat algoritma MaxEnt dalam memodelkan distribusi spesies endemik dengan data kehadiran terbatas. Nilai AUC yang tinggi mengindikasikan bahwa kombinasi variabel lingkungan yang digunakan mampu menangkap kondisi ekologis utama yang menentukan keberadaan Maleo di wilayah penelitian.

Analisis kontribusi variabel lingkungan mengungkapkan bahwa faktor-faktor biofisik tertentu memberikan pengaruh dominan terhadap hasil pemodelan. Variabel yang berkaitan dengan karakteristik substrat dan energi panas, seperti jenis tanah berpasir dan kedekatan dengan sumber panas alami, menunjukkan kontribusi yang signifikan terhadap peningkatan probabilitas kesesuaian habitat. Temuan ini konsisten dengan pengetahuan ekologis tentang strategi reproduksi Maleo yang bergantung pada suhu lingkungan untuk inkubasi telur. Selain itu, jarak terhadap sungai juga muncul sebagai variabel penting, yang mencerminkan keterkaitan Maleo dengan ekosistem riparian sebagai sumber air dan koridor pergerakan.

Sebaliknya, variabel antropogenik menunjukkan pola pengaruh yang berlawanan terhadap kesesuaian habitat. Jarak yang lebih dekat terhadap jalan dan permukiman cenderung berkorelasi dengan penurunan nilai kesesuaian, mengindikasikan sensitivitas Maleo terhadap gangguan manusia. Area yang relatif jauh dari infrastruktur menunjukkan probabilitas kesesuaian yang lebih tinggi, menguatkan temuan sebelumnya bahwa fragmentasi habitat dan aktivitas manusia merupakan faktor pembatas utama bagi keberlanjutan populasi Maleo. Dengan demikian, hasil ini menegaskan pentingnya mempertimbangkan tekanan antropogenik secara eksplisit dalam pemodelan distribusi spesies.

Peta kesesuaian habitat kontinu yang dihasilkan kemudian diklasifikasikan ke dalam beberapa kelas kesesuaian berdasarkan nilai ambang yang direkomendasikan dalam literatur. Klasifikasi ini menghasilkan tiga kategori utama, yaitu habitat dengan kesesuaian tinggi, sedang, dan rendah. Habitat dengan kesesuaian tinggi teridentifikasi sebagai zona inti yang memiliki kombinasi optimal antara kondisi biofisik yang mendukung dan tingkat gangguan manusia yang rendah. Zona ini tersebar terutama pada wilayah pesisir tertentu dan dataran rendah yang masih relatif alami.

Zona dengan kesesuaian sedang membentuk area transisi yang mengelilingi habitat inti. Wilayah ini masih memiliki potensi ekologis untuk mendukung keberadaan Maleo, namun mulai terpengaruh oleh aktivitas manusia atau memiliki keterbatasan pada satu atau lebih variabel lingkungan kunci. Zona kesesuaian rendah, di sisi lain, didominasi oleh area dengan intensitas penggunaan lahan tinggi, infrastruktur padat, atau kondisi biofisik yang tidak sesuai untuk kebutuhan reproduksi dan kelangsungan hidup Maleo. Pembagian kelas ini memberikan kerangka spasial yang jelas untuk interpretasi hasil pemodelan dalam konteks pengelolaan habitat.

Berdasarkan hasil klasifikasi tersebut, dilakukan deliniasi zona habitat inti dan zona penyangga. Zona habitat inti merepresentasikan area dengan nilai kesesuaian tertinggi yang diprioritaskan untuk perlindungan. Zona penyangga dibagi menjadi beberapa tingkatan berdasarkan gradien kesesuaian dan jaraknya terhadap habitat inti. Zona penyangga tingkat pertama berfungsi sebagai area proteksi langsung yang bertujuan untuk meminimalkan dampak aktivitas manusia terhadap habitat inti, sedangkan zona penyangga tingkat berikutnya berperan sebagai ruang transisi yang memungkinkan aktivitas manusia dengan intensitas terbatas. Pola zonasi ini sejalan dengan prinsip konservasi berbasis lanskap yang menekankan pentingnya pengelolaan area di sekitar habitat kunci.

Distribusi spasial zona habitat inti dan penyangga dianalisis lebih lanjut pada tingkat administratif. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar habitat inti terkonsentrasi pada wilayah pesisir tertentu yang masih memiliki tutupan lahan alami dan akses terhadap sumber panas alami. Beberapa wilayah administratif menunjukkan proporsi habitat inti yang relatif tinggi dibandingkan wilayah lainnya, yang mengindikasikan adanya prioritas spasial untuk intervensi konservasi. Sebaliknya, wilayah dengan dominasi zona kesesuaian rendah umumnya berasosiasi dengan tingkat pembangunan dan fragmentasi lahan yang lebih tinggi.

Analisis keterkaitan antara zonasi habitat dan penggunaan lahan eksisting menunjukkan adanya potensi konflik ruang di beberapa lokasi. Pada sejumlah area, zona penyangga tumpang tindih dengan lahan pertanian, perkebunan, atau infrastruktur, yang berpotensi meningkatkan tekanan terhadap habitat inti apabila tidak dikelola secara hati-hati. Temuan ini menegaskan perlunya pendekatan pengelolaan adaptif yang mempertimbangkan kepentingan konservasi dan pembangunan secara seimbang. Peta tematik yang dihasilkan memberikan visualisasi yang informatif untuk mengidentifikasi area-area kritis tersebut.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan pemodelan berbasis SIG dan MaxEnt mampu mengidentifikasi pola distribusi dan kesesuaian habitat Maleo secara efektif. Hasil pemodelan tidak hanya konsisten dengan pengetahuan ekologis yang telah ada, tetapi juga memberikan informasi spasial baru yang relevan untuk perencanaan konservasi. Temuan ini menjadi dasar penting untuk pembahasan lebih lanjut mengenai implikasi ekologis dan manajerial dari zonasi habitat yang dihasilkan, serta untuk pengembangan strategi konservasi Maleo yang lebih terarah dan berbasis bukti ilmiah.

Hasil pemodelan kesesuaian habitat dan distribusi potensial burung Maleo (*Macrocephalon maleo*) yang diperoleh dalam penelitian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai keterkaitan antara karakteristik lingkungan dan keberadaan spesies endemik tersebut pada skala lanskap. Secara umum, pola spasial yang dihasilkan oleh model menunjukkan kesesuaian yang kuat dengan karakter ekologi Maleo sebagaimana dilaporkan dalam berbagai kajian terdahulu, sekaligus memperluas wawasan tentang dinamika habitatnya di wilayah pesisir dan dataran rendah yang berada di luar kawasan konservasi formal. Temuan ini menegaskan bahwa pendekatan pemodelan berbasis SIG dan machine learning mampu menangkap kompleksitas hubungan antara spesies dan lingkungannya secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan deskriptif konvensional.

Kinerja model yang ditunjukkan oleh nilai AUC yang tinggi mengindikasikan bahwa algoritma Maximum Entropy (MaxEnt) efektif dalam memprediksi distribusi Maleo meskipun hanya menggunakan data kehadiran. Hasil ini konsisten dengan literatur yang menyatakan bahwa MaxEnt memiliki keunggulan dalam menangani spesies dengan jumlah data terbatas dan distribusi yang tidak merata. Dalam konteks Maleo, yang populasinya semakin terfragmentasi dan sulit dipantau, kemampuan model untuk menghasilkan prediksi yang stabil menjadi sangat penting. Nilai kinerja yang tinggi juga mencerminkan bahwa variabel lingkungan yang dipilih telah merepresentasikan faktor ekologis utama yang mengontrol keberadaan Maleo di wilayah studi.

Dominasi variabel biofisik tertentu, khususnya jenis tanah berpasir dan kedekatan dengan sumber panas alami, menguatkan pemahaman ekologis mengenai strategi reproduksi Maleo. Ketergantungan spesies ini terhadap panas lingkungan untuk inkubasi telur menjadikan faktor termal sebagai penentu utama kesesuaian habitat. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menekankan bahwa keberhasilan penetiran Maleo sangat dipengaruhi oleh stabilitas suhu substrat dan kelembapan tanah. Dengan demikian, hasil penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi temuan-temuan terdahulu, tetapi juga memvalidasi relevansi variabel lingkungan tersebut dalam kerangka pemodelan spasial yang lebih luas.

Selain faktor termal, jarak terhadap sungai muncul sebagai variabel penting dalam menentukan kesesuaian habitat. Keberadaan sungai dan ekosistem riparian kemungkinan berperan sebagai sumber air, area dengan iklim mikro yang lebih stabil, serta koridor pergerakan bagi Maleo. Interpretasi ini sejalan dengan konsep ekologi lanskap yang menempatkan elemen linier seperti sungai sebagai penghubung antarpatch habitat. Temuan ini memperluas cakupan pemahaman tentang kebutuhan ruang Maleo, yang tidak hanya terbatas pada lokasi penetiran, tetapi juga mencakup area pendukung untuk aktivitas harian dan pergerakan.

Sebaliknya, pengaruh negatif variabel antropogenik, khususnya kedekatan dengan jalan dan permukiman, menegaskan sensitivitas Maleo terhadap gangguan manusia. Hasil ini konsisten dengan

laporan penurunan populasi Maleo di wilayah yang mengalami intensifikasi pembangunan dan fragmentasi habitat. Infrastruktur jalan dapat meningkatkan akses manusia ke area peneluran, yang pada gilirannya memperbesar risiko perburuan telur dan gangguan langsung terhadap induk. Oleh karena itu, temuan ini memperkuat argumen bahwa pengelolaan tekanan antropogenik merupakan komponen kunci dalam strategi konservasi Maleo.

Klasifikasi peta kesesuaian habitat ke dalam zona inti dan zona penyangga memberikan kontribusi praktis yang signifikan bagi perencanaan konservasi berbasis ruang. Zona habitat inti yang teridentifikasi dalam penelitian ini merepresentasikan area dengan kondisi lingkungan optimal dan tingkat gangguan minimal, sehingga layak diprioritaskan untuk perlindungan ketat. Sementara itu, keberadaan zona penyangga dengan tingkat kesesuaian menengah hingga rendah mencerminkan kebutuhan akan pengelolaan gradien ruang di sekitar habitat inti. Pendekatan zonasi semacam ini sejalan dengan prinsip konservasi modern yang menekankan pentingnya lanskap sebagai satu kesatuan fungsional, bukan sekadar perlindungan patch habitat yang terisolasi.

Analisis distribusi zonasi pada tingkat administratif menunjukkan adanya variasi spasial yang relevan bagi penentuan prioritas pengelolaan. Wilayah dengan proporsi habitat inti yang relatif besar memiliki nilai strategis tinggi untuk intervensi konservasi, baik melalui perlindungan formal maupun skema pengelolaan berbasis masyarakat. Sebaliknya, wilayah yang didominasi oleh zona kesesuaian rendah mencerminkan area dengan tekanan antropogenik yang lebih kuat, sehingga memerlukan pendekatan mitigasi yang berbeda, seperti restorasi habitat atau pengaturan penggunaan lahan. Interpretasi ini menegaskan bahwa hasil pemodelan dapat berfungsi sebagai alat bantu pengambilan keputusan yang adaptif dan kontekstual.

Potensi konflik antara zonasi habitat Maleo dan penggunaan lahan eksisting yang teridentifikasi dalam penelitian ini menyoroti tantangan utama konservasi di wilayah di luar taman nasional. Tumpang tindih antara zona penyangga dan lahan pertanian atau infrastruktur menunjukkan bahwa konservasi Maleo tidak dapat dilepaskan dari dinamika sosial-ekonomi setempat. Oleh karena itu, strategi konservasi yang diusulkan perlu mempertimbangkan pendekatan kolaboratif yang melibatkan pemangku kepentingan lokal, dengan menyeimbangkan kepentingan perlindungan spesies dan kebutuhan pembangunan. Hasil penelitian ini menyediakan dasar spasial yang kuat untuk memfasilitasi dialog dan perencanaan lintas sektor.

Jika dibandingkan dengan studi-studi sebelumnya yang lebih berfokus pada lokasi peneluran secara lokal, penelitian ini menawarkan perspektif lanskap yang lebih luas dan integratif. Penggabungan variabel biofisik dan antropogenik dalam satu kerangka pemodelan memungkinkan identifikasi area potensial yang sebelumnya belum terdokumentasi sebagai habitat Maleo. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi pada pengisian kesenjangan pengetahuan terkait distribusi spasial Maleo, khususnya di wilayah pesisir yang rentan terhadap perubahan iklim dan tekanan pembangunan.

Meskipun demikian, beberapa keterbatasan perlu dicermati dalam interpretasi hasil. Ketergantungan pada data kehadiran saja dapat memengaruhi representativitas model, terutama jika terdapat bias dalam pengumpulan data lapangan. Selain itu, resolusi dan kualitas data lingkungan yang tersedia juga berpotensi membatasi ketelitian prediksi pada skala lokal. Namun, keterbatasan ini bersifat umum dalam pemodelan distribusi spesies dan tidak mengurangi nilai temuan utama, melainkan membuka peluang untuk pengembangan penelitian lanjutan dengan data yang lebih rinci dan cakupan temporal yang lebih panjang.

Secara keseluruhan, diskusi ini menegaskan bahwa hasil penelitian memiliki implikasi ekologis dan manajerial yang kuat. Integrasi SIG dan MaxEnt tidak hanya berhasil memetakan kesesuaian habitat Maleo, tetapi juga menyediakan kerangka analitis yang relevan untuk mendukung perencanaan konservasi adaptif di tengah tekanan perubahan iklim dan aktivitas manusia. Temuan-temuan ini menjadi landasan penting bagi pengembangan strategi konservasi berbasis bukti ilmiah yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk melindungi Maleo sebagai salah satu spesies endemik paling ikonik di Sulawesi.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa pemodelan kesesuaian habitat burung Maleo (*Macrocephalon maleo*) berbasis Sistem Informasi Geografis dan algoritma Maximum Entropy mampu mengidentifikasi pola distribusi potensial spesies secara akurat dan bermakna secara ekologis. Hasil pemodelan menegaskan bahwa keberadaan Maleo sangat dipengaruhi oleh kombinasi faktor biofisik,

terutama karakteristik tanah berpasir, kedekatan dengan sumber panas alami, serta keberadaan sungai, yang secara ekologis berkaitan dengan strategi reproduksi dan kebutuhan ruang spesies ini. Sebaliknya, tekanan antropogenik yang direpresentasikan oleh kedekatan terhadap jalan dan permukiman terbukti menurunkan tingkat kesesuaian habitat, menegaskan sensitivitas Maleo terhadap gangguan manusia.

Pemetaan habitat inti dan zona penyangga yang dihasilkan memberikan implikasi penting bagi perencanaan konservasi berbasis ruang, khususnya di wilayah di luar kawasan konservasi formal. Zonasi habitat yang diusulkan tidak hanya berfungsi untuk mengidentifikasi area prioritas perlindungan, tetapi juga menyediakan kerangka pengelolaan lanskap yang mempertimbangkan gradien kesesuaian habitat dan potensi konflik penggunaan lahan. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar ilmiah bagi pengambilan keputusan konservasi yang lebih adaptif dan kontekstual.

Secara konseptual, studi ini berkontribusi pada pengayaan body of knowledge mengenai pemodelan distribusi spesies endemik tropis dengan mengintegrasikan variabel biofisik dan antropogenik dalam satu kerangka analitis yang komprehensif. Penelitian ini juga memperluas pemahaman tentang ekologi spasial Maleo pada skala lanskap. Ke depan, penelitian lanjutan disarankan untuk mengintegrasikan skenario perubahan iklim, data temporal jangka panjang, serta validasi lapangan yang lebih intensif guna meningkatkan ketepatan prediksi dan relevansi kebijakan konservasi.

5. REFERENSI

- Bald, L., Gottwald, J., & Zeuss, D. (2023). spatialMaxent: Adapting species distribution modeling to spatial data. *Ecology and Evolution*, 13(10), e10635.
- Datta, P., Behera, B., Rahut, D. B., & Sonobe, T. (2025). Human-Wildlife Dynamics in a Changing Climate. In *Living on the Edge: Climate Change and Human-Wildlife Interactions in the Buxa Tiger Reserve of India* (pp. 1–14). Springer.
- Diko, A. F. C., Yusuf, D., & Rusiyah, R. (2026). Identifikasi Habitat Alami Maleo Senkawor (Macrocephalon Maleo) Di Kawasan Konservasi Hungayono Taman Nasional Bogani Nani Wartabone. *Jurnal Riset Dan Pengabdian Interdisipliner*, 3(1), 8–15.
- Gayo, L. (2025). A review of climate change, human population growth and poverty as potential drivers of human wildlife conflicts in Africa. *Discover Animals*, 2(1), 49.
- Hofmann, G. S., Weber, E. J., Bastazini, V. A. G., Rossatto, D. R., Franco, A. C., Granada, C. E., Kaminski, L. A., Ubaid, F. K., Leandro-Silva, V., & Borges-Martins, M. (2025). Climate change in the Brazilian Cerrado: A looming threat to terrestrial biodiversity. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 16(5), e70022.
- INDONESIA, H. (2025). MENGENAL JENIS-JENIS FLORA. *Hutan Indonesia Potensi Permasalahan Dan Pengelolaan Berkelanjutan*, 25.
- Jha, M. K., & Dev, M. (2024). Impacts of climate change. In *Smart internet of things for environment and healthcare* (pp. 139–159). Springer.
- Karim, H. A., Najib, N. N., Ayu, S. M., & Fidel, F. (2023). Characteristics of Maleo bird spawning nests (Macrocephalon maleo) in Lake Towuti, South Sulawesi, Indonesia. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 24(2).
- Mehta, P. (2024). The impact of climate change on the environment, water resources, and agriculture: A comprehensive review. *Climate, Environment and Agricultural Development: A Sustainable Approach Towards Society*, 189–201.
- Ong'ondo, F. J., Ambinakudige, S., Malaki, P. A., Njoroge, P., & Ahmad, H. (2025). Using geographic information systems and remote sensing technique to classify land cover types and predict grassland bird abundance and distribution in Nairobi National Park, Kenya. *International Journal of Geoheritage and Parks*, 13(1), 92–101.
- Prins, C., Sreekumar, D., & Sejian, V. (2025). Climate change and wildlife biodiversity: Impact and mitigation strategies. *Arch. Life Sci. Res*, 1, 6–22.
- Radović, A., Kapelj, S., & Taylor, L. T. (2025). Utilizing Remote Sensing Data for Species Distribution Modeling of Birds in Croatia. *Diversity*, 17(6), 399.
- Shaheryar, M., Safiullah, D., Hayat, H. S., Shah, M. N., Akram, M. T., Iqbal, M. U., Hayat, A., & Naseem, M. A. (2025). Climate Change and Environmental Instability: The Rise of Invasive Species and

- Desertification. In *Navigating Climate Change: Impacts on Biodiversity and Ecosystem Resilience* (pp. 553–589). Springer.
- Summers, M., Geary, M., Tasirin, J. S., Djuni, N., Summers, L. J., Kresno, P. A., Laya, A., Sawuwu, S. M., Bawotong, A., & Abas, W. (2025). Massive declines and local recoveries: First range-wide assessment spotlights ending egg-taking as key to the survival of *Macrocephalon maleo* (Maleo). *Ornithological Applications*, *duaf022*.
- Tasirin, J. S., Iskandar, D. T., Laya, A., Kresno, P., Suling, N., Oga, V. T., Djano, R., Bawotong, A., Nur, A., & Isfanddri, M. (2021). Maleo *Macrocephalon maleo* population recovery at two Sulawesi nesting grounds after community engagement to prevent egg poaching. *Global Ecology and Conservation*, *28*, e01699.
- Wu, J., Zheng, M., & Wang, Z. (2025). Integrating MaxEnt and Random Forest Models to Assess Habitat Suitability of Black-Necked Cranes, A Case Study in Nyingchi City. *Ecology and Evolution*, *15*(9), e72058.
- Yusuf, D., Baderan, D. W. K., Hamidun, M. S., Rahim, S., & Dunggio, I. (2024). Analisis bibliometrik penelitian burung maleo. *Jurnal Bionatural*, *11*(1), 74–79.
- Zhang, X., Campomizzi, A. J., & Lebrun-Southcott, Z. M. (2022). Predicting population trends of birds worldwide with big data and machine learning. *Ibis*, *164*(3), 750–770.
- Zvidzai, M., Mawere, K. K., N'andu, R., Ndaimani, H., Zanamwe, C., & Zengeya, F. M. (2023). Application of Maximum Entropy (MaxEnt) to Understand the Spatial Dimension of Human–wildlife Conflict (HWC) Risk in Areas Adjacent to Gonarezhou National Park of Zimbabwe. *Ecology and Society*, *28*(3). <https://doi.org/10.5751/es-14420-280318>