

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pariwisata merupakan sektor strategis yang tidak hanya berperan dalam peningkatan ekonomi nasional, tetapi juga menjadi sarana pelestarian budaya dan lingkungan apabila dikelola secara berkelanjutan (Wibowo et al., 2017). Berdasarkan data Badan Pusat Statistik (BPS, 2025) dan Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian (Kemenko Perekonomian, 2025) sektor pariwisata menyumbang sekitar 4% terhadap Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia pada tahun 2024. Sepanjang tahun 2024, perjalanan wisatawan nusantara mencapai 1,02 miliar perjalanan tertinggi dalam 5 tahun terakhir sementara kunjungan wisatawan mancanegara mencapai 13,74 juta kunjungan, menunjukkan pemulihan signifikan pasca-pandemi. Di tingkat global, *United Nations World Tourism Organization* (UNWTO) (2023) mencatat bahwa mobilitas wisatawan meningkat sebesar 87% dibandingkan tahun sebelumnya, menunjukkan adanya lonjakan permintaan terhadap destinasi wisata alam dan budaya pasca-pandemi. Kabupaten Toraja Utara merupakan salah satu destinasi unggulan yang kaya akan warisan budaya dan keindahan alam, namun kini menghadapi tantangan serius berupa tekanan terhadap daya dukung lingkungan dan sosial. Jika tidak dikelola dengan pendekatan ilmiah dan berkelanjutan, potensi pariwisata dapat berubah menjadi ancaman bagi kelestarian budaya dan ekologi lokal (Rahayu & Pratama, 2024).

Penelitian ini mengkaji daya dukung pariwisata yang dipengaruhi oleh faktor geospasial seperti lokasi objek wisata, aksesibilitas, dan kondisi vegetasi. Konsep *Tourism Carrying Capacity* (TCC) menjadi dasar dalam mengukur batas toleransi suatu wilayah terhadap aktivitas wisata. Dalam konteks ini, teknologi Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*) dan Sistem Informasi Geografis (SIG) memberikan kemampuan dalam menganalisis dinamika spasial dan temporal secara terukur. Integrasi data spasial dan citra satelit multi-temporal memungkinkan pemetaan intensitas kunjungan secara longitudinal serta identifikasi titik-titik wisata yang mengalami tekanan berlebih (Matos et al., (2023). Studi Yabarmase et al., (2023) di objek Tongkonan Lempe di Toraja Utara, misalnya, menunjukkan efektivitas pengukuran fisik dan spasial menggunakan ArcGIS dalam menentukan kapasitas tampung kawasan.

Kabupaten Toraja Utara mengalami peningkatan kunjungan wisatawan selama periode 2020–2023. Situs budaya seperti Kete Kesu, Rantepao, dan Negeri di Atas Awan Lolai menjadi daya tarik utama yang kini mulai menghadapi tekanan infrastruktur dan beban ekologis. Sebagian besar kawasan wisata belum dilengkapi kajian daya dukung lingkungan yang komprehensif. Ketidaksiapan dalam pengelolaan kapasitas wisata dapat memicu kerusakan ekosistem, konflik sosial, dan hilangnya nilai autentik budaya setempat. Oleh sebab itu, pendekatan kuantitatif dengan integrasi teknologi spasial sangat penting dalam perumusan kebijakan pengelolaan pariwisata di wilayah ini.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah menggunakan teknologi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan penginderaan jauh untuk mendukung perencanaan wisata. Memetakan potensi wisata Pulau Kelagian Kecil menggunakan kombinasi citra satelit dan Sistem Informasi Geografis (SIG) menghasilkan peta daya tarik dan kondisi lingkungan (*"Application of Gis in Tourism Marketing,"* 2022). Prastuti et al. (2024) menyusun inventarisasi fasilitas wisata berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) di Desa Belimbing, Bali, dengan fokus pada aspek lokalitas. Sirait et al. (2025) menunjukkan pentingnya integrasi spasial dalam perencanaan pariwisata berkelanjutan. Sementara itu, penelitian Dara et al. (2021) menyarankan pemanfaatan zonasi ekowisata dalam rencana tata ruang Toraja Utara, dan Jasman et al. (2023) menyusun peta geosite sebagai dasar edukasi spasial, namun belum menilai tekanan wisatawan secara spasial dan temporal.

Meskipun telah banyak studi yang menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) dan penginderaan jauh untuk pemetaan potensi wisata, masih terdapat kekosongan dalam pemanfaatan teknologi tersebut untuk menganalisis daya dukung secara kuantitatif, khususnya berbasis data multi-temporal. Sebagian besar studi sebelumnya hanya fokus pada potensi atau fasilitas wisata, tanpa menghubungkan intensitas kunjungan dengan faktor spasial seperti kepadatan vegetasi atau kemudahan akses. Penelitian ini hadir untuk mengisi celah tersebut dengan menggabungkan analisis spasial dan temporal berbasis citra satelit dalam satu model yang mampu mengungkap tekanan aktual terhadap kawasan wisata. Kontribusi ilmiah yang dihasilkan berupa pengembangan model kuantitatif daya dukung wisata yang dapat diaplikasikan dalam perencanaan berbasis bukti di daerah tujuan wisata lainnya.

Berdasarkan pemaparan tersebut, penelitian yang berjudul "PEMETAAN TINGKAT RISIKO TEKANAN AKTIVITAS PARIWISATA SITUS ALAM DAN BUDAYA MELALUI INTEGRASI PENGINDERAAN JAUH MULTI-TEMPORAL DAN ANALISIS SISTEM INFORMASI GEOSPASIAL, STUDI KASUS: KABUPATEN TORAJA UTARA" ini bertujuan untuk menganalisis pola sebaran spasial dan temporal kunjungan wisatawan serta mengidentifikasi objek wisata yang menunjukkan gejala tekanan berlebih terhadap kapasitas tampungnya. Selain itu, penelitian ini mengkaji hubungan antara intensitas kunjungan wisata dengan faktor geospasial seperti lokasi, aksesibilitas, dan kondisi vegetasi. Penelitian ini juga menganalisis risiko spasial tekanan wisata terhadap vegetasi objek wisata berdasarkan integrasi variabel kunjungan wisata, aksesibilitas, perubahan penggunaan/tutupan lahan (LULC), serta indeks vegetasi (NDVI), sehingga dapat diidentifikasi kawasan dengan tingkat risiko perubahan vegetasi yang berbeda-beda. Secara teoritis, riset ini memperkaya keilmuan dalam bidang geografi pariwisata berbasis teknologi spasial. Secara praktis, hasil penelitian ini diharapkan menjadi dasar bagi pemerintah daerah dan pengelola wisata dalam merumuskan strategi pengelolaan destinasi yang berorientasi pada keberlanjutan dan keseimbangan lingkungan.

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Analisis risiko perubahan vegetasi di kawasan kabupaten Toraja Utara dengan mempertimbangkan kunjungan wisata, perubahan tutupan lahan, dan aksesibilitas.
2. Mengevaluasi keterkaitan antara indeks risiko dan perubahan vegetasi dengan berdasarkan analisis NDVI multi-temporal.

1.3 Manfaat Penelitian

1. Penelitian ini memberikan kontribusi dalam pengembangan kajian pariwisata berkelanjutan berbasis penginderaan jauh dan analisis spasial, khususnya dalam pemanfaatan NDVI dan metode MCDA–WLC untuk menilai risiko perubahan vegetasi akibat aktivitas wisata di kawasan wisata alam dan budaya.
2. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar bagi pemerintah daerah dan pengelola objek wisata dalam mengidentifikasi kawasan wisata yang memiliki tingkat risiko tekanan tinggi terhadap vegetasi, sehingga dapat menjadi acuan dalam pengendalian pembangunan, pengaturan kunjungan wisata, serta upaya pelestarian lingkungan.
3. Peta indeks risiko yang dihasilkan dapat mendukung perencanaan pariwisata berbasis konservasi di Kabupaten Toraja Utara, sekaligus menjadi referensi dalam penyusunan kebijakan pengelolaan wisata alam dan budaya yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan.

1.4 Landasan Teori

1.4.1 Penginderaan Jauh (Remote Sensing)

Penginderaan jauh merupakan teknik untuk memperoleh informasi tentang objek atau fenomena di permukaan bumi tanpa kontak langsung, melalui sensor yang merekam pantulan atau pancaran energi elektromagnetik (Campbell & Wynne, 2021). Teknologi ini memungkinkan pemantauan kondisi lingkungan secara luas, efisien, dan berulang, sehingga sangat relevan dalam kajian lingkungan dan pariwisata berkelanjutan. Dalam konteks penelitian pariwisata, penginderaan jauh menjadi penting karena mampu menyediakan data lingkungan yang objektif, konsisten, dan bersifat multitemporal untuk mengevaluasi dampak aktivitas wisata terhadap kondisi ekologis kawasan.

Citra satelit multitemporal seperti Sentinel-2 dan Landsat banyak digunakan dalam analisis perubahan lingkungan karena menyediakan data periodik yang memungkinkan pengamatan dinamika vegetasi dan perubahan tutupan lahan dari waktu ke waktu. Sentinel-2 memiliki resolusi spasial 10–20 meter dengan karakteristik spektral yang baik untuk analisis vegetasi, sedangkan Landsat menyediakan arsip data jangka panjang yang sangat berguna untuk analisis tren perubahan lingkungan (Li et al., 2021). Pemanfaatan citra satelit multitemporal memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi pola perubahan ekologis akibat aktivitas manusia, termasuk tekanan wisata, pembangunan infrastruktur, dan perubahan penggunaan lahan. Oleh karena itu, penginderaan jauh menjadi fondasi

penting dalam pemetaan daya dukung wisata berbasis spasial (Ridwana & Himayah, 2020).

1.4.1.1 Citra Sentinel

Sentinel merupakan keluarga satelit penginderaan jauh yang dikembangkan oleh Badan Antariksa Eropa (European Space Agency/ESA) dalam kerangka program Copernicus. Program Copernicus adalah program pemantauan bumi milik Uni Eropa yang dirancang untuk menyediakan data lingkungan secara berkelanjutan, akurat, dan dapat diakses secara terbuka (open access) bagi seluruh pengguna di dunia (ESA, 2022). Satelit-satelit Sentinel dirancang untuk memenuhi kebutuhan layanan pemantauan bumi pada berbagai aspek, mulai dari daratan, lautan, atmosfer, hingga perubahan iklim.

Dalam konteks pemantauan tutupan lahan dan vegetasi, Sentinel-2 merupakan satelit yang paling banyak digunakan. Sentinel-2 membawa sensor Multispectral Instrument (MSI) yang mampu merekam citra pada 13 band spektral, mulai dari panjang gelombang tampak (visible), near-infrared (NIR), hingga shortwave infrared (SWIR), dengan resolusi spasial yang bervariasi antara 10 m, 20 m, dan 60 m tergantung pada bandnya (Drusch et al., 2012). Satelit ini beroperasi dalam konfigurasi dua unit (Sentinel-2A dan Sentinel-2B) yang memungkinkan waktu revisit setiap 5 hari pada garis khatulistiwa, sehingga sangat ideal untuk pemantauan perubahan lahan secara temporal.

Keunggulan utama citra Sentinel-2 dalam analisis spasial adalah kombinasi resolusi spasial yang cukup tinggi (10 m untuk band RGB dan NIR) dengan ketersediaan data yang konsisten dan gratis melalui platform seperti Copernicus Open Access Hub dan Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Resolusi ini memungkinkan identifikasi objek permukaan bumi secara lebih detail, sehingga banyak digunakan dalam pemetaan penggunaan lahan, deteksi perubahan tutupan vegetasi, pemantauan badan air, dan analisis dampak bencana.

Selain itu, kemampuan spektral Sentinel-2 memungkinkan pembedaan objek berdasarkan nilai reflektansinya. Setiap objek di permukaan bumi memiliki karakteristik pantulan yang berbeda terhadap panjang gelombang tertentu. Sebagai contoh, vegetasi sehat memiliki reflektansi tinggi pada spektrum near-infrared (NIR) dan rendah pada spektrum merah (red). Perbedaan ini dimanfaatkan dalam perhitungan indeks vegetasi seperti Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) untuk menilai kondisi kesehatan dan kepadatan vegetasi (Rouse et al., 1974).

Sentinel-2 juga dilengkapi dengan band red-edge (band 5, 6, 7, dan 8A) yang sensitif terhadap kandungan klorofil dan kondisi fisiologis tanaman. Keberadaan band ini memberikan keunggulan dalam analisis vegetasi dibandingkan sensor sebelumnya, sehingga banyak digunakan dalam pemantauan hutan, pertanian presisi, dan deteksi stres tanaman (Delegido et al., 2011). Dalam penggunaannya, citra Sentinel-2 tersedia dalam beberapa level pemrosesan, yaitu Level-1C (Top of Atmosphere/TOA) dan Level-2A (Bottom of Atmosphere/BOA). Data Level-2A lebih

sering digunakan karena telah melalui koreksi atmosfer, sehingga nilai reflektansi yang dihasilkan lebih mendekati kondisi sebenarnya di permukaan bumi dan lebih akurat untuk analisis (Louis et al., 2016).

Selain itu, resolusi temporal yang tinggi memungkinkan analisis deret waktu (time series) untuk memantau perubahan tutupan lahan secara berkala, seperti deforestasi, pertumbuhan vegetasi, maupun dampak bencana. Analisis ini memberikan gambaran dinamika perubahan yang lebih akurat dibandingkan pengamatan satu waktu (Zhu, 2017). Dalam pengolahan data, citra Sentinel-2 dapat dianalisis menggunakan metode klasifikasi, baik secara visual maupun digital. Metode klasifikasi digital seperti Random Forest dan Support Vector Machine banyak digunakan karena mampu mengelompokkan piksel berdasarkan karakteristik spektralnya secara lebih akurat (Belgiu & Drăguț, 2016). Dengan dukungan teknologi komputasi seperti Google Earth Engine, pengolahan data Sentinel-2 dapat dilakukan secara efisien dalam skala besar. Dengan berbagai keunggulan tersebut, citra Sentinel-2 menjadi salah satu sumber data utama dalam studi penginderaan jauh modern. Kombinasi resolusi spasial, spektral, dan temporal yang baik, serta akses data yang terbuka, menjadikan Sentinel-2 sangat relevan sebagai dasar dalam berbagai penelitian geospasial, khususnya dalam analisis tutupan lahan dan vegetasi.

1.4.2 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) sebagai Indikator Ekologis

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) merupakan salah satu indeks vegetasi yang paling luas digunakan dalam penginderaan jauh untuk menggambarkan kondisi, kesehatan, dan kerapatan vegetasi. NDVI dihitung berdasarkan perbedaan reflektansi antara kanal inframerah dekat (*Near Infrared/NIR*) dan kanal merah (*Red*), yang dirumuskan sebagai berikut:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

Secara fisik, nilai NDVI mencerminkan respon spektral daun terhadap radiasi elektromagnetik. Vegetasi sehat menyerap energi tinggi pada spektrum merah untuk proses fotosintesis dan memantulkan energi tinggi pada spektrum inframerah dekat akibat struktur sel daun. Oleh karena itu, nilai NDVI yang tinggi menunjukkan vegetasi yang lebih rapat, aktif secara fisiologis, dan memiliki kandungan klorofil yang tinggi, sedangkan nilai NDVI yang rendah mengindikasikan vegetasi jarang, vegetasi stres, atau permukaan non-vegetasi seperti tanah terbuka, permukiman, dan badan air (Abdusamea, 2024).

Nilai NDVI berkisar antara -1 hingga +1. Nilai mendekati +1 menunjukkan tutupan vegetasi yang lebat dan sehat, nilai mendekati 0 menunjukkan vegetasi jarang atau campuran antara vegetasi dan non-vegetasi, sedangkan nilai negatif umumnya merepresentasikan badan air, awan, atau permukaan buatan. Dengan karakteristik tersebut, NDVI secara langsung menggambarkan kondisi vegetasi secara kuantitatif dan objektif pada skala spasial yang luas (Huang et al., 2021).

Dalam konteks ekologis, NDVI tidak hanya menggambarkan keberadaan vegetasi, tetapi juga merepresentasikan tingkat produktivitas biomassa, aktivitas fotosintesis, serta stabilitas ekosistem daratan. Perubahan nilai NDVI secara spasial dan temporal dapat digunakan untuk memantau degradasi vegetasi, deforestasi, fragmentasi habitat, serta dinamika pemulihan vegetasi akibat faktor alam maupun aktivitas manusia (Pettorelli et al., 2014).

Dalam konteks pariwisata, NDVI digunakan sebagai indikator ekologis untuk mendeteksi tekanan terhadap vegetasi akibat aktivitas wisata dan pembangunan fasilitas pendukung. Penurunan nilai NDVI secara temporal di sekitar objek wisata dapat mengindikasikan terjadinya degradasi vegetasi, konversi lahan, serta peningkatan intensitas aktivitas manusia (Kim et al., 2022; Rahman et al., 2023). Hal ini menunjukkan bahwa NDVI mampu menggambarkan dampak tidak langsung pariwisata terhadap kondisi ekologis kawasan.

Oleh karena itu, NDVI multitemporal menjadi variabel kunci dalam evaluasi daya dukung ekologis kawasan wisata. NDVI tidak hanya berfungsi sebagai indikator kondisi vegetasi, tetapi juga sebagai proksi kuantitatif untuk menilai keberlanjutan ekosistem dalam menghadapi tekanan wisata. Dengan demikian, NDVI memiliki peran strategis dalam analisis daya dukung pariwisata berbasis penginderaan jauh dan sistem informasi geografis.

1.4.3 Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA), Weighted Linear Combination (WLC), dan Pembobotan Variabel

Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) merupakan pendekatan pengambilan keputusan yang digunakan untuk mengintegrasikan berbagai kriteria dalam menghasilkan penilaian yang komprehensif terhadap suatu permasalahan. Dalam konteks Sistem Informasi Geografis (SIG), MCDA banyak digunakan untuk evaluasi spasial, penentuan zonasi, serta pemodelan risiko berdasarkan kombinasi parameter lingkungan dan sosial (Malczewski, 2020; Rahman et al., 2023). Pendekatan ini memungkinkan analisis yang lebih realistis karena mempertimbangkan bahwa suatu fenomena dipengaruhi oleh interaksi beberapa variabel secara bersamaan.

Salah satu metode MCDA yang paling umum digunakan adalah *Weighted Linear Combination* (WLC), yang merupakan bentuk sederhana dari *Weighted Sum Model* (WSM). Metode ini menggabungkan nilai setiap kriteria yang telah dinormalisasi dengan bobot tertentu sesuai tingkat kepentingannya, sehingga menghasilkan satu skor komposit yang merepresentasikan kondisi suatu lokasi (Malczewski, 2020). Secara matematis, WLC dirumuskan sebagai $S = \sum (w_i \times x_i)$, di mana w_i adalah bobot dan x_i adalah nilai kriteria ke- i yang telah dinormalisasi. Metode ini banyak diterapkan dalam penelitian lingkungan dan pariwisata karena bersifat fleksibel, transparan, serta mudah diintegrasikan dengan data spasial berbasis raster (Rahman et al., 2023; Tavares et al., 2022).

Dalam analisis MCDA, pembobotan variabel merupakan tahap kunci karena bobot mencerminkan tingkat kepentingan relatif setiap kriteria terhadap tujuan

analisis. Bobot merupakan nilai numerik yang menunjukkan kontribusi suatu variabel terhadap skor atau indeks akhir, sehingga variabel dengan bobot lebih besar memiliki pengaruh yang lebih dominan dalam hasil pemodelan (Malczewski, 2020). Tanpa proses pembobotan, semua variabel dianggap memiliki pengaruh yang sama, yang pada kenyataannya jarang sesuai dengan kondisi empiris di lapangan.

Penentuan bobot dalam MCDA dapat dilakukan melalui berbagai pendekatan, baik subjektif maupun objektif. Pendekatan subjektif umumnya didasarkan pada penilaian ahli atau sintesis literatur, sedangkan pendekatan objektif menggunakan teknik statistik tertentu seperti entropy atau CRITIC (Dodgson et al., 2019; Zardari et al., 2021). Dalam penelitian lingkungan dan spasial, sintesis literatur sering digunakan ketika tidak tersedia bobot numerik langsung, namun tersedia informasi relatif mengenai tingkat pengaruh masing-masing variabel. Selama proses penentuan bobot dilakukan secara transparan dan konsisten, variasi bobot antarpelitian dianggap sah secara metodologis (Malczewski, 2020).

Pembobotan kriteria dalam MCDA mencerminkan prinsip bahwa tidak semua variabel memiliki tingkat pengaruh yang sama terhadap outcome akhir suatu model. Dengan memberikan bobot lebih besar pada variabel yang lebih dominan berdasarkan kajian literatur, model menjadi lebih rasional dan representatif terhadap fenomena yang dikaji (Rahman et al., 2023). Dalam penelitian ini, pembobotan variabel perubahan penggunaan/tutupan lahan (LULC), kunjungan wisata, dan aksesibilitas didasarkan pada sintesis literatur ilmiah, sehingga bobot yang digunakan memiliki dasar teoritis yang kuat.

Bobot yang diperoleh selanjutnya digunakan dalam model Weighted Linear Combination untuk membentuk indeks risiko tekanan wisata terhadap vegetasi. Integrasi pembobotan berbasis literatur dengan metode WLC memungkinkan penyusunan model spasial yang tidak hanya bersifat kuantitatif, tetapi juga memiliki justifikasi ilmiah yang jelas (Tavares et al., 2022). Dengan demikian, hasil pemodelan risiko dalam penelitian ini tidak bersifat subjektif semata, melainkan merupakan representasi dari kecenderungan ilmiah yang telah dikaji dalam penelitian terdahulu.

1.4.4 Pariwisata dan Daya Dukung Wisata (*Tourism Carrying Capacity*)

Pariwisata merupakan aktivitas perjalanan yang dilakukan seseorang atau kelompok ke luar lingkungan tempat tinggalnya untuk tujuan rekreasi, pendidikan, maupun kepentingan sosial dan budaya. Dalam konteks pembangunan wilayah, pariwisata dipandang sebagai sektor strategis karena mampu mendorong pertumbuhan ekonomi lokal, membuka lapangan kerja, serta berperan dalam pelestarian budaya dan lingkungan apabila dikelola secara berkelanjutan (Pitana & Diarta, 2020). Pariwisata alam memanfaatkan keunikan lanskap dan ekosistem sebagai daya tarik utama, sedangkan pariwisata budaya menitikberatkan pada warisan budaya, tradisi, dan situs adat sebagai objek wisata (Kiper, 2021).

Seiring meningkatnya intensitas kunjungan wisatawan, muncul risiko tekanan terhadap lingkungan dan sosial budaya kawasan wisata. Untuk mengendalikan

tekanan tersebut, digunakan konsep *Tourism Carrying Capacity* (TCC) yang didefinisikan sebagai batas maksimum jumlah wisatawan yang dapat diterima suatu kawasan tanpa menimbulkan degradasi lingkungan, gangguan sosial budaya, maupun penurunan kualitas pengalaman wisata (Coccossis & Mexa, 2020). Konsep ini menekankan pentingnya keseimbangan antara pemanfaatan dan pelestarian sumber daya wisata. Daya dukung wisata secara umum terdiri atas empat komponen utama, yaitu daya dukung ekologis, fisik, sosial, dan manajerial. Daya dukung ekologis berkaitan dengan kemampuan ekosistem dalam menahan tekanan aktivitas wisata, daya dukung fisik berkaitan dengan kapasitas ruang dan infrastruktur, daya dukung sosial mencerminkan toleransi masyarakat lokal terhadap aktivitas wisata, sedangkan daya dukung manajerial berkaitan dengan kemampuan pengelola dalam mengatur dan mengendalikan aliran wisatawan (Pereira, 2023).

Dalam pendekatan kuantitatif klasik, daya dukung wisata dapat dinyatakan secara matematis sebagai rasio antara luas area yang dapat dimanfaatkan dengan kebutuhan ruang rata-rata per wisatawan, dengan mempertimbangkan faktor tekanan wisata. Rumus ini memberikan gambaran awal mengenai kapasitas maksimum kawasan, meskipun dalam praktik modern diperlukan integrasi dengan indikator ekologis dan spasial agar hasilnya lebih realistis dan kontekstual (Galeano & Miranda, 2023). Dalam praktik penelitian kontemporer, pengukuran daya dukung wisata semakin banyak dikembangkan melalui pendekatan spasial berbasis penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG), sehingga batas daya dukung tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga dapat dipetakan secara kuantitatif dan visual (Ridwana & Himayah, 2020).

1.4.5 Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan sistem berbasis komputer yang digunakan untuk mengumpulkan, menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menyajikan data spasial (Longley et al., 2021). SIG memungkinkan integrasi berbagai jenis data spasial dan atribut dalam satu sistem analisis, sehingga sangat efektif untuk mendukung pengambilan keputusan berbasis wilayah.

Dalam penelitian pariwisata, SIG digunakan untuk memetakan persebaran objek wisata, menganalisis aksesibilitas, serta mengevaluasi daya dukung kawasan melalui teknik analisis spasial seperti overlay, buffer, reclassify, dan intersect (Prahasta, 2009). Integrasi data NDVI, LULC, dan jaringan jalan dalam SIG memungkinkan analisis hubungan spasial antara kondisi lingkungan dan intensitas aktivitas wisata secara komprehensif.

1.4.6 Tutupan Lahan dan Perubahan Penggunaan Lahan (LULC)

Tutupan lahan (land cover) menggambarkan kondisi fisik permukaan bumi seperti vegetasi, air, atau area terbangun, sedangkan penggunaan lahan (land use) menggambarkan fungsi atau aktivitas manusia pada lahan tersebut (Niemi et al., 2015). Perubahan LULC merupakan indikator penting dalam menilai dampak aktivitas manusia terhadap lingkungan.

Aktivitas pariwisata sering kali memicu perubahan LULC melalui pembangunan infrastruktur, fasilitas akomodasi, dan peningkatan aksesibilitas. Perubahan ini dapat berdampak pada penurunan kualitas vegetasi dan meningkatnya tekanan ekologis kawasan wisata (Nunna & Banerjee, 2022). Oleh karena itu, analisis LULC multitemporal menjadi komponen penting dalam evaluasi daya dukung wisata berbasis spasial.

1.4.7 Aksesibilitas Wisata

Aksesibilitas wisata merujuk pada tingkat kemudahan wisatawan dalam menjangkau suatu lokasi, yang dipengaruhi oleh jarak, waktu tempuh, serta kualitas dan konektivitas jaringan transportasi (Li *et al.*, 2022). Aksesibilitas tidak hanya menentukan kenyamanan perjalanan wisatawan, tetapi juga berperan sebagai faktor pemicu utama meningkatnya intensitas kunjungan pada suatu objek wisata. Kawasan wisata dengan aksesibilitas tinggi umumnya lebih cepat berkembang dan lebih sering dikunjungi, sehingga berpotensi mengalami tekanan ekologis yang lebih besar apabila pengelolaannya tidak disertai dengan perencanaan daya dukung yang memadai (Rahmafritia *et al.*, 2024).

Dalam konteks lingkungan, peningkatan aksesibilitas sering diikuti oleh pembangunan infrastruktur pendukung seperti jalan, area parkir, dan fasilitas wisata lainnya yang dapat memicu konversi tutupan lahan serta fragmentasi vegetasi di sekitar kawasan wisata. Oleh karena itu, aksesibilitas tidak hanya berfungsi sebagai indikator kemudahan mobilitas, tetapi juga sebagai indikator tidak langsung terhadap potensi tekanan manusia terhadap ekosistem (Liu *et al.*, 2020).

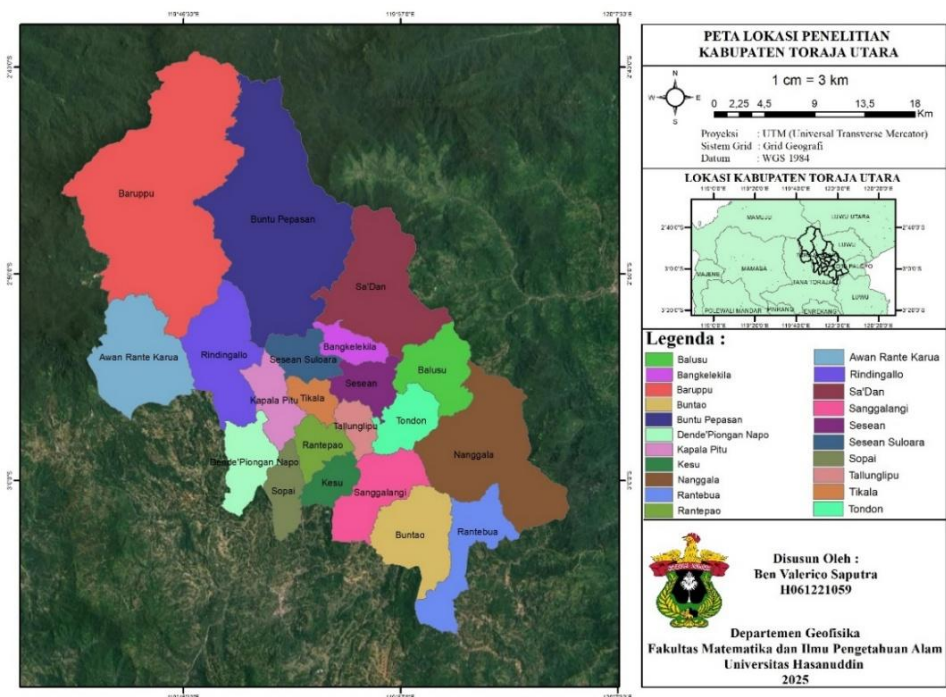
Dalam analisis spasial, aksesibilitas umumnya diukur menggunakan buffer jarak terhadap jaringan jalan atau melalui analisis jaringan (*network analysis*) yang mempertimbangkan rute terpendek, waktu tempuh, dan hambatan topografi. Pendekatan ini memungkinkan peneliti untuk memetakan variasi tingkat keterjangkauan secara lebih objektif dan kuantitatif. Integrasi aksesibilitas dengan indikator ekologis seperti NDVI dan LULC memungkinkan identifikasi kawasan wisata yang rentan terhadap kelebihan kapasitas daya dukung, sehingga dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan pengelolaan pariwisata berkelanjutan (Moya-Gomes *et al.*, 2024).

BAB II METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Kabupaten Toraja Utara merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Sulawesi Selatan yang secara geografis terletak pada koordinat sekitar 2°53'–3°20' Lintang Selatan dan 119°45'–120°15' Bujur Timur. Wilayah ini berbatasan sebelah Utara dengan Kabupaten Luwu Utara, sebelah Timur dengan Kota Palopo, sebelah Selatan dengan Kabupaten Tana Toraja, serta sebelah Barat dengan Kabupaten Mamasa dan Selat Makassar. Kabupaten Toraja Utara memiliki topografi yang didominasi oleh pegunungan, perbukitan, dan lembah subur yang membentuk lanskap alam yang indah dan khas. Kondisi geografis ini tidak hanya mendukung aktivitas pertanian masyarakat, tetapi juga menjadi daya tarik utama bagi sektor pariwisata berbasis alam.

Selain kekayaan alam, Toraja Utara juga dikenal sebagai pusat budaya yang unik dan mendunia. Rumah adat **Tongkonan**, ritual **Rambu Solo'**, serta seni ukir dan tenun tradisional menjadi identitas yang melekat kuat pada masyarakat Toraja. Perpaduan antara keindahan alam dan kekayaan budaya menjadikan Toraja Utara sebagai destinasi wisata yang memiliki nilai ekologis sekaligus nilai historis dan spiritual.



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Data

2.2.1 Alat

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu:

- a. Perangkat Keras
- b. Laptop
- c. Perangkat Lunak
- d. ArcGIS 10.8
- e. Google Earth Engine
- f. Microsoft Office (Word dan Excel)

2.2.2 Data

Bahan yang digunakan dalam penelitian kali ini berupa data sekunder yang berisi informasi parameter diantaranya:

1. Data Kunjungan Wisatawan

Data kunjungan wisatawan digunakan untuk merepresentasikan tingkat intensitas pemanfaatan objek wisata serta besarnya tekanan aktivitas wisata terhadap lingkungan yang diperoleh dari data Dinas Kebudayaan dan Parawisata Kabupaten Toraja Utara . Parameter ini menjadi indikator utama dalam analisis daya dukung wisata karena peningkatan jumlah wisatawan yang tidak seimbang dengan kapasitas lingkungan berpotensi menurunkan kualitas ekologi dan kenyamanan destinasi. Oleh karena itu, data kunjungan dimanfaatkan sebagai dasar dalam evaluasi daya dukung dan penentuan prioritas pengelolaan serta pengembangan objek wisata secara berkelanjutan (Zazilah et al., 2024).

2. Citra Sentinel-2

Citra Sentinel-2 digunakan untuk memperoleh informasi kondisi vegetasi dan tutupan lahan melalui analisis *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *klasifikasi Land Use/Land Cover* (LULC) yang diolah menggunakan Software *Google Earth Engine* (GEE). Penggunaan citra Sentinel-2 dalam pengolahan ini didasarkan pada beberapa pertimbangan. Sentinel-2 dipilih karena memiliki resolusi spasial sebesar 10 meter, yang lebih tinggi dibandingkan dengan Landsat-8. Selain itu, Sentinel-2 dilengkapi dengan band *red-edge* yang terbukti mampu meningkatkan akurasi dalam klasifikasi tutupan lahan (LULC) serta estimasi NDVI secara signifikan. Data Sentinel-2 juga tersedia secara gratis, memiliki waktu kunjungan ulang (*revisit time*) selama 5 hari, dan dapat langsung diproses melalui Google Earth Engine. Oleh karena itu, penggunaan Sentinel-2 dinilai lebih efisien untuk mendukung analisis perubahan tutupan lahan dan vegetasi dalam penelitian ini. NDVI berfungsi sebagai indikator kesehatan vegetasi dan kestabilan lingkungan di sekitar objek wisata, sedangkan LULC digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik serta perubahan penggunaan dan penutupan lahan yang berpotensi dipengaruhi oleh aktivitas pariwisata. Pemanfaatan citra multi-temporal memungkinkan pemantauan perubahan vegetasi dan dinamika tutupan lahan antarwaktu, sehingga mendukung identifikasi potensi degradasi lingkungan dan tekanan spasial terhadap daya dukung wisata (Sunarta & Saifulloh, 2022).

3. Data Jaringan Jalan (Aksesibilitas)

Data jaringan jalan diperoleh dari web OpenstreetMap yang dimana digunakan untuk menganalisis tingkat aksesibilitas menuju objek wisata, yang merupakan faktor penting dalam menentukan pola dan intensitas kunjungan wisatawan. Kemudahan akses cenderung meningkatkan frekuensi kunjungan dan tekanan pemanfaatan ruang wisata. Dalam penelitian ini, data jaringan jalan berbasis OpenStreetMap dimanfaatkan untuk menilai keterhubungan spasial antara objek wisata dan infrastruktur transportasi sebagai bagian dari analisis aksesibilitas berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) (Aripin, 2025).

4. Data Lokasi Objek Wisata

Data lokasi objek wisata digunakan untuk menentukan posisi spasial setiap destinasi wisata alam dan budaya yang menjadi unit analisis penelitian. Data ini berperan sebagai titik referensi utama dalam integrasi seluruh parameter penelitian, termasuk kondisi vegetasi, aksesibilitas, dan jumlah kunjungan wisatawan. Data koordinat geografis setiap objek wisata diperoleh melalui aplikasi *Google Maps* (Google LLC) dengan melakukan pencarian nama objek wisata secara individual, kemudian mengekstrak nilai *latitude* dan *longitude* sebagai representasi posisi spasial masing – masing objek wisata. Keakuratan data lokasi sangat penting untuk mendukung analisis overlay, zonasi, dan evaluasi daya dukung wisata secara spasial (Sitanela et al., 2025).

5. Peta Administrasi

Peta administrasi digunakan sebagai dasar delineasi wilayah penelitian dan sebagai acuan dalam pengelompokan serta interpretasi hasil analisis spasial. Data batas administrasi kecamatan diperoleh dari Ina-Geoportal (inageoportal.big.go.id), yaitu portal data geospasial resmi yang dikelola oleh Badan Informasi Geospasial (BIG) Republik Indonesia. Data batas kecamatan tersebut kemudian diproses dan diolah menggunakan perangkat lunak ArcGIS untuk menghasilkan peta administrasi Kabupaten Toraja Utara, yang sekaligus berfungsi sebagai peta sebaran lokasi objek wisata dalam wilayah kajian. Penggunaan batas administrasi memungkinkan penyajian hasil penelitian yang sistematis, mudah dipahami, dan relevan dengan konteks wilayah pemerintahan, sekaligus mendukung perumusan rekomendasi kebijakan pengelolaan pariwisata berbasis wilayah (Somantri et al., 2023).

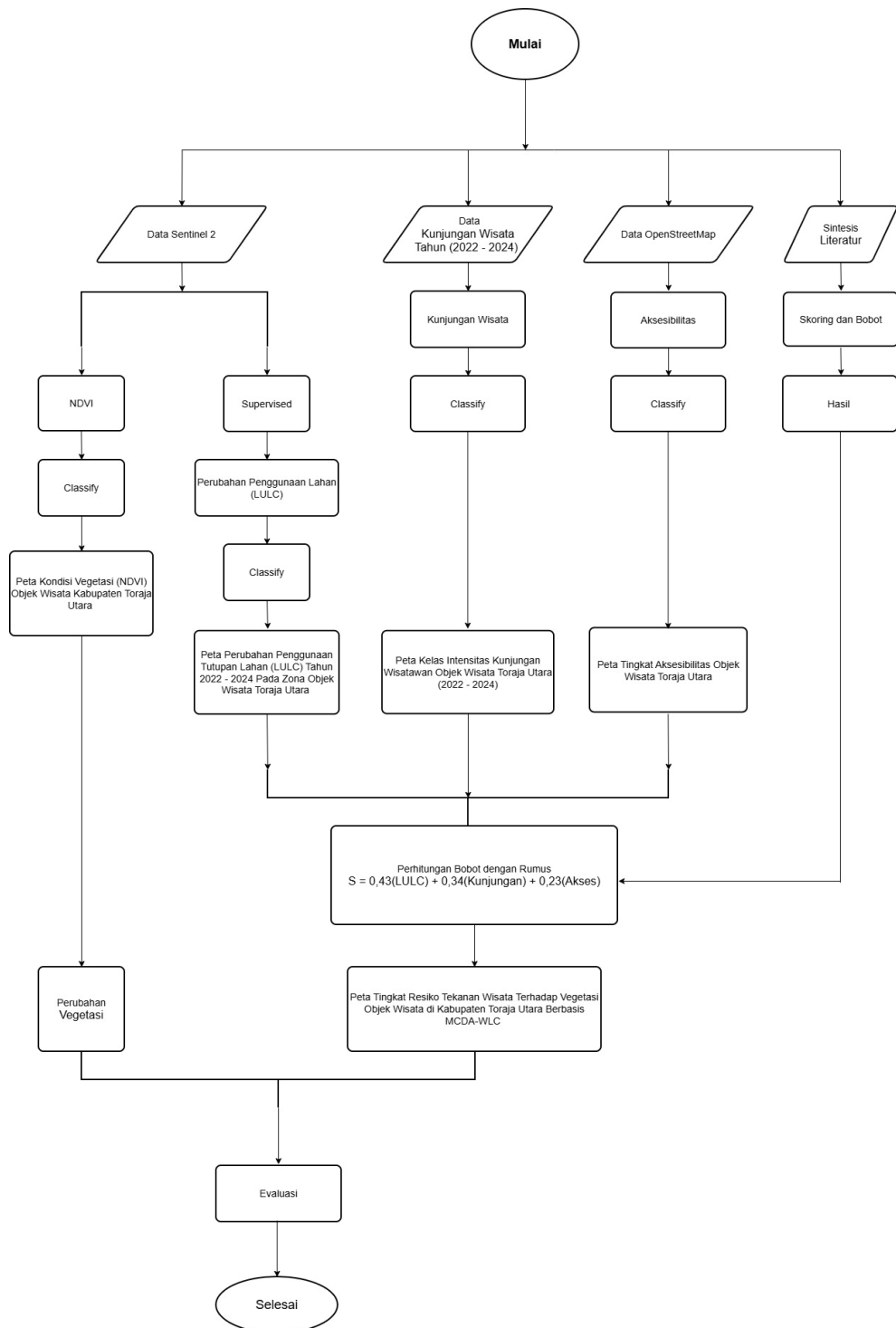
2.3 Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data sekunder yang diperoleh dari Dinas Kebudayaan dan Pariwisata Kabupaten Toraja Utara. Data yang digunakan dalam penelitian ini mencakup beberapa parameter utama dalam analisis daya dukung dan prioritas pengembangan objek wisata, yaitu jumlah kunjungan wisatawan, tingkat aksesibilitas, kondisi vegetasi yang direpresentasikan melalui indeks NDVI, serta karakteristik dan perubahan tutupan lahan (Land Use/Land Cover/LULC). Seluruh parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi kondisi lingkungan dan tekanan aktivitas wisata pada objek wisata alam dan budaya di Kabupaten Toraja Utara. Data spasial diperoleh dari citra satelit Sentinel-2 multi-

temporal periode 2022 - 2024 serta data jaringan jalan dan lokasi objek wisata, sedangkan data nonspasial berupa data kunjungan wisatawan diperoleh dari instansi terkait. Selain itu, pengumpulan data juga didukung oleh studi literatur melalui penelusuran jurnal ilmiah, buku referensi, dan publikasi terkait yang bertujuan untuk memperkuat dasar teori, menentukan parameter dan pembobotan analisis, serta mendukung interpretasi hasil penelitian agar dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah.

2.4 Pengolahan Data

Adapun tahap Pengolahan data dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap dan sistematis dengan mengintegrasikan data penginderaan jauh multi-temporal dan analisis spasial Sistem Informasi Geografis (SIG). Setiap tahapan yang saya buat, dirancang untuk menghasilkan informasi yang saling terkait, mulai dari kondisi lingkungan fisik, intensitas pemanfaatan wisata, hingga penentuan prioritas pengelolaan destinasi wisata berdasarkan konsep daya dukung pariwisata. Pendekatan ini bertujuan memastikan bahwa hasil analisis tidak hanya bersifat deskriptif spasial, tetapi juga mampu mendukung pengambilan keputusan secara kuantitatif dan terukur. Gambar 2 merupakan tahap pengolahan data yang dibentuk dalam bagan alir dan setelah itu adapun penjelasan langkah - langkah dari bagan alir.



Gambar 2. Bagan Alir

2.4.1 Penyiapan Literatur dan Skoring Bobot

Tahap penyiapan literatur dilakukan untuk memastikan bahwa seluruh parameter, metode analisis, serta proses skoring dan pembobotan yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dasar ilmiah yang kuat dan dapat dipertanggungjawabkan. Proses ini diawali dengan pencarian literatur secara sistematis melalui basis data ilmiah seperti Google Scholar, Scopus, ScienceDirect. Kata kunci pencarian disusun dalam bahasa Indonesia dan bahasa Inggris, antara lain *tourism pressure on vegetation*, *tourism carrying capacity*, *NDVI and tourism impact*, *land use change and tourism*, *accessibility and tourism intensity*, serta padanan kata dalam bahasa Indonesia. Penggunaan kombinasi kata kunci dengan operator Boolean bertujuan untuk memperoleh literatur yang relevan, spesifik, dan sesuai dengan konteks penelitian.

Literatur yang diperoleh kemudian melalui proses screening atau penyaringan. Screening dilakukan dengan membaca judul, abstrak, dan metode penelitian pada setiap artikel. Artikel yang tidak memiliki keterkaitan langsung dengan pengaruh pariwisata terhadap lingkungan, vegetasi, atau analisis spasial dieliminasi. Selain itu, hanya artikel yang diterbitkan dalam jurnal ilmiah bereputasi dan berada dalam rentang sepuluh tahun terakhir yang digunakan. Proses ini bertujuan untuk menjaga relevansi dan kebaruan informasi yang digunakan dalam penelitian.

Artikel hasil screening selanjutnya dianalisis secara mendalam untuk mengidentifikasi parameter yang paling sering digunakan dan paling berpengaruh terhadap tekanan wisata terhadap vegetasi. Dari hasil sintesis literatur tersebut, ditetapkan empat parameter utama, yaitu kondisi vegetasi (NDVI), penggunaan lahan (LULC), intensitas kunjungan wisatawan, dan tingkat aksesibilitas. Keempat parameter ini dipilih karena secara konsisten dilaporkan dalam berbagai penelitian sebagai faktor dominan yang memengaruhi tekanan ekologis kawasan wisata.

Setelah parameter ditetapkan, dilakukan proses skoring. Setiap parameter diklasifikasikan ke dalam tiga kelas, yaitu rendah, sedang, dan tinggi. Klasifikasi ini bertujuan untuk menyeragamkan interpretasi antar-parameter yang memiliki satuan dan karakteristik berbeda. Selanjutnya, masing-masing kelas diberikan skor numerik, yaitu skor 1 untuk tingkat tekanan rendah, skor 2 untuk tingkat tekanan sedang, dan skor 3 untuk tingkat tekanan tinggi. Pemberian skor dilakukan secara konsisten agar seluruh parameter berada dalam skala yang sama sehingga dapat digabungkan dalam analisis spasial terpadu.

Tahap berikutnya adalah penentuan bobot parameter. Bobot diberikan untuk menunjukkan tingkat kepentingan relatif masing-masing parameter terhadap tekanan wisata terhadap vegetasi. Penentuan bobot dilakukan berdasarkan sintesis literatur, konsistensi pengaruh parameter dalam penelitian terdahulu, serta kesesuaian parameter dengan karakteristik wilayah Toraja Utara. Bobot setiap parameter kemudian dinormalisasi sehingga total bobot seluruh parameter bernilai satu. Proses normalisasi ini penting agar kontribusi setiap parameter bersifat proporsional dan tidak saling mendominasi.

Dengan demikian, skor merepresentasikan kondisi spasial lokal setiap parameter, sedangkan bobot merepresentasikan tingkat pengaruh parameter terhadap tekanan wisata. Kombinasi antara skor dan bobot menjadi dasar utama dalam perhitungan indeks risiko tekanan wisata terhadap vegetasi pada tahap analisis selanjutnya.

2.4.2 Langkah-Langkah Pembuatan Peta

Pembuatan peta dalam penelitian ini dilakukan melalui tahapan pengolahan data penginderaan jauh dan sistem informasi geografis secara bertahap dan terintegrasi. Empat peta parameter utama yang dihasilkan meliputi peta kondisi vegetasi (NDVI), peta penggunaan/tutupan lahan (LULC), peta intensitas kunjungan wisatawan, dan peta tingkat aksesibilitas objek wisata. Seluruh proses dilakukan dengan tujuan menghasilkan peta tematik yang tidak hanya bersifat visual, tetapi juga memiliki dasar perhitungan kuantitatif yang jelas.

Peta kondisi vegetasi dibuat menggunakan citra satelit Sentinel-2 multi-temporal periode 2020–2024. Citra yang digunakan dipilih berdasarkan tingkat tutupan awan yang rendah serta telah melalui koreksi atmosfer. Nilai NDVI dihitung menggunakan kombinasi band merah dan inframerah dekat dengan rumus NDVI. Hasil perhitungan berupa raster NDVI kemudian diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu NDVI rendah, sedang, dan tinggi. Kelas-kelas tersebut mencerminkan tingkat kerapatan dan kesehatan vegetasi. Selanjutnya, hasil klasifikasi NDVI direklasifikasi menjadi skor 1, 2, dan 3 sesuai tingkat kondisi vegetasi.

Peta penggunaan/tutupan lahan (LULC) dibuat dari citra Sentinel-2 melalui proses klasifikasi citra. Kelas penggunaan lahan yang diperoleh kemudian dikelompokkan berdasarkan tingkat kualitas ekologisnya, yaitu kategori rendah, sedang, dan tinggi. Setiap kategori selanjutnya direklasifikasi menjadi skor 1, 2, dan 3. Peta LULC ini menggambarkan kondisi serta perubahan penggunaan lahan di sekitar objek wisata yang berpengaruh terhadap tekanan ekologis.

Peta intensitas kunjungan wisatawan dibuat berdasarkan data jumlah kunjungan pada masing-masing objek wisata. Data tersebut dihubungkan dengan titik koordinat lokasi objek wisata, kemudian diolah menjadi data spasial berbentuk raster kepadatan. Raster kepadatan kunjungan selanjutnya diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu kunjungan rendah, sedang, dan tinggi. Kelas-kelas tersebut kemudian direklasifikasi menjadi skor 1, 2, dan 3 yang merepresentasikan tingkat tekanan aktivitas wisata.

Peta tingkat aksesibilitas dibuat menggunakan data jaringan jalan. Analisis jarak dilakukan untuk menghitung tingkat kedekatan objek wisata terhadap jaringan jalan utama. Hasil analisis jarak dikonversi menjadi raster aksesibilitas, kemudian diklasifikasikan menjadi tiga kelas, yaitu akses sulit dijangkau, cukup mudah dijangkau, dan mudah dijangkau. Kelas aksesibilitas tersebut direklasifikasi menjadi skor 1, 2, dan 3.

Setelah keempat peta parameter diperoleh, seluruh raster parameter telah

berada pada skala skor yang sama, yaitu 1 sampai 3. Proses ini disebut sebagai standardisasi atau penyamaan skala. Standardisasi bertujuan agar seluruh parameter dapat digabungkan dalam analisis spasial tanpa bias perbedaan satuan dan rentang nilai. Setiap peta parameter hasil reklasifikasi selanjutnya digunakan sebagai input dalam tahap integrasi spasial untuk menghasilkan indeks risiko tekanan wisata terhadap vegetasi.

Melalui tahapan tersebut, peta yang dihasilkan tidak hanya merupakan hasil visualisasi, tetapi merupakan representasi spasial dari proses pengolahan data yang sistematis, terukur, dan dapat ditelusuri kembali setiap tahapannya. Dengan demikian, hasil peta yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dasar metodologis yang kuat dan layak digunakan sebagai dasar analisis ilmiah.

2.4.3 Visualisasi Tingkat Risiko Tekanan Wisata terhadap Vegetasi di Objek Wisata Kabupaten Toraja Utara

Visualisasi tingkat risiko tekanan wisata terhadap vegetasi merupakan tahap penting dalam pengolahan data spasial yang bertujuan untuk menggambarkan secara kuantitatif dan spasial potensi tekanan aktivitas wisata terhadap kondisi vegetasi pada setiap objek wisata. Visualisasi ini tidak hanya berfungsi sebagai tampilan peta, tetapi juga sebagai media analisis untuk memahami pola distribusi risiko serta dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan pariwisata berkelanjutan.

Dalam penelitian ini, visualisasi risiko dibangun melalui integrasi beberapa parameter tekanan wisata, yaitu jumlah kunjungan wisata, aksesibilitas, dan perubahan penggunaan/tutupan lahan (LULC), dengan menggunakan pendekatan *Multi Criteria Decision Analysis* (MCDA) berbasis metode *Weighted Linear Combination* (WLC). Ketiga parameter tersebut dipilih karena secara teoritis dan empiris terbukti berpengaruh terhadap kondisi vegetasi, sementara indeks NDVI diposisikan sebagai indikator dampak atau respon vegetasi terhadap tekanan yang terjadi.

Tahap awal pengolahan data dilakukan dengan standarisasi seluruh parameter agar berada dalam skala yang sebanding. Data kunjungan wisata, aksesibilitas, dan LULC direklasifikasi ke dalam skala ordinal yang sama sehingga dapat digabungkan dalam satu model matematis. Proses ini bertujuan untuk menghilangkan perbedaan satuan antar-parameter serta memastikan bahwa setiap variabel memiliki kontribusi yang proporsional dalam perhitungan indeks risiko.

Selanjutnya, setiap parameter diberikan bobot berdasarkan hasil sintesis literatur ilmiah. Bobot mencerminkan tingkat kepentingan relatif masing-masing variabel terhadap perubahan kondisi vegetasi. Dalam penelitian ini, bobot tertinggi diberikan pada LULC, diikuti oleh kunjungan wisata dan aksesibilitas. Pemberian bobot berbasis sintesis literatur dilakukan untuk menghindari subjektivitas serta memastikan bahwa model yang dibangun memiliki dasar ilmiah yang kuat.

Perhitungan indeks risiko dilakukan menggunakan persamaan *Weighted Linear Combination*, yaitu dengan mengalikan setiap parameter dengan bobotnya

masing-masing, kemudian menjumlahkannya untuk memperoleh skor risiko total pada setiap lokasi. Skor tersebut merepresentasikan tingkat tekanan wisata terhadap vegetasi, di mana nilai yang lebih tinggi menunjukkan potensi tekanan yang lebih besar.

Hasil perhitungan indeks risiko kemudian divisualisasikan dalam bentuk peta spasial menggunakan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Untuk mempermudah interpretasi, skor risiko diklasifikasikan ke dalam tiga kelas, yaitu risiko rendah, risiko sedang, dan risiko tinggi. Klasifikasi ini bertujuan untuk mengelompokkan objek wisata berdasarkan tingkat kerentanannya terhadap degradasi vegetasi akibat aktivitas wisata.

Sebagai tahap evaluasi, hasil visualisasi risiko kemudian dibandingkan dengan perubahan NDVI multi-temporal. NDVI digunakan sebagai indikator kondisi vegetasi aktual untuk memastikan bahwa wilayah dengan tingkat risiko tinggi memang menunjukkan kecenderungan penurunan vegetasi yang lebih besar. Dengan demikian, visualisasi risiko tidak hanya bersifat teoritis, tetapi memiliki keterkaitan langsung dengan kondisi vegetasi di lapangan. Evaluasi tingkat kesesuaian dilakukan dengan menghitung persentase objek wisata yang klasifikasi tingkat risikonya sesuai dengan kondisi NDVI aktualnya. Berdasarkan standar yang ditetapkan oleh Congalton (1991), nilai akurasi yang lebih besar dari 70% dianggap dapat diterima (*acceptable*) untuk validasi klasifikasi data penginderaan jauh, sehingga threshold ini digunakan sebagai acuan untuk menilai keandalan model dalam penelitian ini.

Melalui pendekatan ini, visualisasi tingkat risiko tekanan wisata terhadap vegetasi menjadi alat analisis yang komprehensif, karena mengintegrasikan data spasial, metode kuantitatif, dan indikator lingkungan secara terpadu. Visualisasi tersebut diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah dalam mendukung perencanaan dan pengelolaan pariwisata yang berorientasi pada keberlanjutan lingkungan di Kabupaten Toraja Utara.