

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Karbon dioksida (CO_2) merupakan komponen terbesar gas rumah kaca (GRK) yang menyumbang lebih dari 60% dari total efek pemanasan global, diikuti oleh metana (CH_4) dan dinitrogen oksida (N_2O). Secara ekonomi, karbon memiliki keterkaitan yang erat dengan produktivitas ekosistem darat karena kemampuan vegetasi dalam menyerap dan menyimpan CO_2 atmosfer melalui fotosintesis secara langsung menentukan besaran stok karbon suatu kawasan, yang selanjutnya dapat dikonversi menjadi nilai karbon sebagai dasar kredit karbon dan diperdagangkan sebagai komoditas di pasar karbon (Mudhofar & Hariastuti, 2024). Hubungan ini menunjukkan bahwa kawasan dengan kerapatan vegetasi yang tinggi tidak hanya memberikan manfaat ekologis, tetapi juga menghasilkan potensi pendapatan yang nyata bagi pengelola lahan melalui mekanisme perdagangan karbon (Hartoyo *et al.*, 2022). Dengan demikian, karbon bukan sekadar persoalan lingkungan, melainkan aset ekonomi yang nilai dan potensinya ditentukan oleh seberapa baik suatu ekosistem dikelola. Akumulasi GRK di lapisan troposfer telah menciptakan efek rumah kaca yang memperkuat penyerapan radiasi panas matahari oleh permukaan bumi, sehingga menyebabkan peningkatan suhu rata-rata global yang berdampak sangat luas terhadap ekosistem dan kehidupan manusia (Kawuri *et al.*, 2019).

Laporan *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Sixth Assessment Report (AR6)* menegaskan bahwa suhu rata-rata permukaan bumi telah meningkat $1,1^\circ\text{C}$ di atas tingkat pra-industri akibat aktivitas manusia, dan tanpa aksi pengurangan emisi yang drastis, kenaikan ini diproyeksikan melampaui

ambang 1,5°C bahkan 2,0°C pada pertengahan abad ini (IPCC, 2021). Konsekuensinya meliputi pencairan es kutub, kenaikan permukaan laut, peningkatan frekuensi bencana cuaca ekstrem, pergeseran musim tanam yang mengancam ketahanan pangan, serta kepunahan spesies akibat perubahan habitat. Dampak-dampak ini tidak hanya mengancam ekosistem alami, tetapi juga menimbulkan kerugian ekonomi yang sangat besar, terutama bagi negara-negara berkembang yang kapasitas adaptasinya lebih terbatas (Pratama, 2019).

Ekosistem hutan dan vegetasi darat merupakan komponen utama dalam sistem penyerapan karbon alami bumi. Vegetasi hutan dan tanah di seluruh dunia secara kolektif menyimpan sekitar 1.146 gigaton karbon, setara dengan 45% dari total karbon terrestrial yang ada di permukaan bumi, angka yang bahkan melampaui jumlah karbon di atmosfer itu sendiri. Pan *et. al.* (Y. Pan *et al.*, 2011) memperkuat temuan ini dengan memperkirakan bahwa hutan di dunia secara neto menyerap sekitar 2,4 miliar ton karbon per tahun dari atmosfer, menjadikan sektor kehutanan sebagai salah satu jasa ekosistem iklim yang paling bernilai di bumi.

Penyerapan karbon (*carbon sequestration*) merupakan proses alami dan buatan di mana karbon dioksida dari atmosfer diserap dan disimpan dalam bentuk yang lebih stabil, baik dalam biomassa tumbuhan, tanah organik, lautan, maupun formasi geologi (Firdaus & Wijayanti, 2019). Secara ekosistem darat, proses ini berlangsung melalui fotosintesis di mana CO₂ dikonversi menjadi senyawa karbohidrat yang tersimpan dalam biomassa pohon dan bahan organik tanah. Penyerapan karbon yang optimal memerlukan pengelolaan ekosistem yang tepat, meliputi pemeliharaan kerapatan vegetasi, pencegahan penebangan liar, dan pemulihan lahan terdegradasi. Estimasi cadangan karbon (*carbon stock*) dilakukan melalui pengukuran biomassa menggunakan persamaan alometrik berdasarkan

diameter batang setinggi dada (*Diameter at Breast Height/DBH*) dan dikonversi menggunakan faktor standar untuk mendapatkan kandungan karbon (Ardiansyah, 2024).

Secara konseptual, terdapat hubungan yang sistematis antara luas tutupan vegetasi, biomassa tanaman, stok karbon, dan nilai ekonomi karbon dalam mekanisme perdagangan karbon. Luas tutupan vegetasi menentukan besarnya akumulasi biomassa karena vegetasi menyerap CO₂ melalui fotosintesis dan menyimpannya dalam jaringan organik tumbuhan, di mana semakin rapat dan luas tutupan vegetasi suatu kawasan, semakin besar pula biomassa yang terbentuk (Spawn *et al.*, 2020). Biomassa tersebut menjadi dasar perhitungan cadangan karbon menggunakan faktor konversi standar nasional yang selanjutnya dapat dikonversi menjadi nilai karbon dalam satuan ton CO₂ ekuivalen sebagai dasar kredit karbon. untuk diperdagangkan dalam skema pasar karbon (Purnawan *et al.*, 2024). Rangkaian hubungan ini menunjukkan bahwa pengelolaan vegetasi tidak hanya berdampak ekologis, tetapi juga berimplikasi langsung terhadap potensi nilai ekonomi kawasan.

Carbon trading atau perdagangan karbon adalah mekanisme pasar di mana unit-unit karbon yang telah terverifikasi secara ilmiah diperjualbelikan antara entitas yang memiliki kelebihan penyerapan karbon dengan pihak-pihak yang perlu mengkompensasi emisinya. Satu unit karbon setara dengan pengurangan atau penyerapan satu ton CO₂ ekuivalen (tCO₂e) dari atmosfer. Dengan demikian, karbon tidak lagi hanya isu lingkungan, tetapi telah menjadi komoditas ekonomi, peluang ekonomi nyata yang menanti untuk dioptimalkan oleh komunitas lokal dan pengelola lahan yang memiliki kapasitas vegetasi yang signifikan dengan melalui mekanisme perdagangan karbon (*carbon trading*) (Kementerian Keuangan, 2024).

Fondasi kelembagaan perdagangan karbon internasional dibangun melalui Protokol Kyoto tahun 1997 yang mengikat negara-negara industri maju (*Annex I*) untuk menurunkan emisi GRK rata-rata 5% di bawah level 1990 pada periode 2008–2012 (Nations United, 1998). Ini yang memperkenalkan tiga mekanisme pasar yaitu *Emission Trading Scheme* (ETS) untuk perdagangan kuota emisi antar negara maju, *Joint Implementation* (JI) untuk proyek pengurangan emisi antar negara *Annex I*, dan *Clean Development Mechanism* (CDM) yang membuka akses bagi negara berkembang termasuk Indonesia untuk berpartisipasi menghasilkan *Certified Emission Reductions* (CERs) melalui proyek kehutanan dan energi terbarukan. CDM menjadi katalis awal berkembangnya pasar karbon di negara tropis, termasuk Indonesia, dan meletakkan fondasi teknis bagi sistem pengukuran, pelaporan, dan verifikasi (*Measurement, Reporting, and Verification*/MRV) emisi yang kini menjadi standar global.

Perjanjian Paris yang disepakati pada Konferensi Para Pihak (COP) ke-21 di Paris pada bulan Desember 2015 menandai babak baru yang lebih inklusif dan ambisius dalam tata kelola iklim. Berbeda dengan Protokol Kyoto yang bersifat *top-down* dan hanya mengikat negara maju, *Paris Agreement* mengintegrasikan 196 pihak dalam kerangka *bottom-up* berbasis *Nationally Determined Contributions* (NDC) dengan target membatasi kenaikan suhu global di bawah 2°C dan berupaya menekannya di bawah 1,5°C (Nations United, 2015). Pasal 6 *Paris Agreement* secara khusus mengatur mekanisme pasar karbon internasional generasi baru yang mencakup pendekatan kooperatif antarnegara dan mekanisme pembangunan berkelanjutan sebagai pengganti CDM, sehingga memberikan fondasi yang lebih komprehensif bagi perdagangan karbon global.

Merespons komitmen ini, Indonesia menerbitkan Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 tentang Nilai Ekonomi Karbon (NEK) sebagai landasan hukum yang mengakui karbon sebagai nilai ekonomi terukur melalui empat instrumen utama, yaitu perdagangan emisi, *offset* emisi, pungutan karbon, dan pembayaran berbasis kinerja (Al Ikhsan, 2021). Pada September 2023, Bursa Karbon Indonesia (IDX Carbon) resmi dibuka, memungkinkan karbon dari proyek berbasis lahan dan energi terbarukan diperdagangkan secara sah di pasar domestic. Bursa ini mengindikasikan bahwa karbon telah resmi menjadi komoditas perdagangan yang legitim di Indonesia, membuka peluang monetisasi bagi pengelola lahan di seluruh penjuru negeri, termasuk kawasan agrowisata (IDXCarbon, 2023)

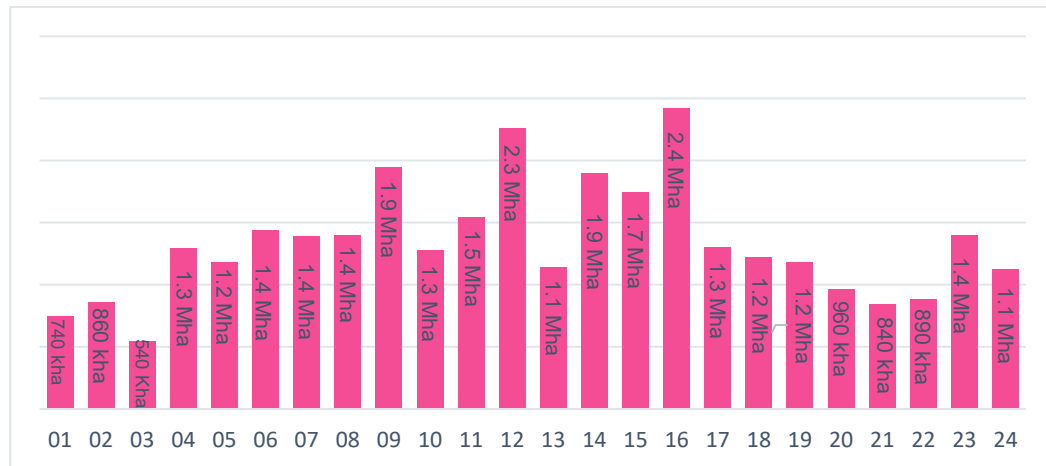
Transformasi karbon dari sekadar elemen kimia dalam siklus biogeokimia menjadi aset lingkungan berpasar merupakan inovasi kebijakan yang mengubah cara manusia menghargai jasa ekosistem. Nilai ekonomi karbon secara esensial merupakan internalisasi eksternalitas lingkungan ke dalam sistem harga pasar, di mana entitas yang menyediakan jasa penyerapan karbon memperoleh kompensasi finansial yang setimpal atas kontribusinya menjaga stabilitas iklim. Transformasi ini ditopang oleh temuan ilmiah di KPH Bogor menunjukkan bahwa nilai ekonomi serapan karbon *Agroforestri* berkisar antara IDR 1,5 juta hingga IDR 49,3 juta per hektar (Siagian *et al.*, 2024).

Indonesia merupakan salah satu negara dengan keanekaragaman hayati dan sumber daya hutan tropis terbesar di dunia. Total kawasan hutan Indonesia mencapai sekitar 95,5 juta hektar, mencakup beragam tipe ekosistem mulai dari hutan hujan dataran rendah di Kalimantan dan Sumatera, hutan mangrove pesisir, hingga hutan pegunungan di Papua (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2024). Hutan-hutan Indonesia menjadi rumah bagi sekitar 10%

spesies tumbuhan, 12% mamalia, dan 17% burung yang ada di dunia, menempatkan Indonesia sebagai salah satu dari 17 negara *megadiversitas* dunia sekaligus memiliki peran penting sebagai penyerapan karbon global. KLHK memproyeksikan potensi pendapatan nasional dari perdagangan karbon mencapai Rp 350 triliun apabila seluruh kawasan hutan dan lahan gambut dioptimalkan melalui mekanisme pasar yang tepat (Krisdianto, 2025; Rainforest Action Network, n.d.; Umah, 2020).

Namun demikian, luas hutan Indonesia secara umum menunjukkan penurunan dalam jangka panjang akibat deforestasi. Dalam kurun waktu 2002–2020, Indonesia kehilangan hutan primer dalam skala signifikan, menjadikannya salah satu negara dengan tingkat deforestasi tertinggi di dunia (Global Forest Watch, 2026; Hansen *et al.*, 2013). Meskipun laju deforestasi sempat menurun dari sekitar 930.000 hektar per tahun pada 2016 menjadi sekitar 230.000 hektar pada 2022, data terbaru menunjukkan adanya peningkatan kembali, dengan kehilangan hutan mencapai 261.575 hektar pada tahun 2024. Kondisi ini mengindikasikan bahwa tekanan terhadap kawasan hutan masih berlangsung dan berpotensi menurunkan kapasitas penyerapan karbon secara berkelanjutan (Nusantara, 2024). Faktor pendorong utama deforestasi meliputi konversi untuk perkebunan kelapa sawit dan karet, penebangan kayu legal maupun ilegal, ekspansi pertambangan, serta kebakaran hutan yang dipicu oleh praktik pembukaan lahan. Istomo dan Farida (2017) menegaskan bahwa perubahan penggunaan lahan dan deforestasi berkontribusi sekitar 20% terhadap total emisi GRK global. Kondisi ini menjadikan deforestasi sebagai permasalahan krusial dalam pengelolaan karbon di Indonesia.

Gambar 1. 1 Kehilangan Tutupan Pohon di Indonesia Tahun 2001–2024
(dalam satuan kha/Mha)



Sumber: Global Forest Watch (2026)

Berdasarkan data dari Global Forest Watch, dari tahun 2001 hingga 2024 Indonesia kehilangan total 32 juta hektar tutupan pohon, yang setara dengan 20% dari luas hutan tahun 2000. Dari jumlah tersebut, 3,0 Mha hilang akibat kebakaran, sedangkan sisanya sebesar 29 Mha disebabkan oleh faktor lain, termasuk konversi lahan dan deforestasi industri. Tahun 2016 tercatat sebagai periode kehilangan tutupan pohon akibat kebakaran paling tinggi, yakni sekitar 730 ribu hektar atau 30% dari total kehilangan pada tahun itu. Lima provinsi teratas yang menyumbang 59% dari total kehilangan adalah Riau, Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, Sumatera Selatan, dan Kalimantan Timur, dengan Riau mengalami kerugian terbesar sekitar 4,3 Mha, jauh di atas rata-rata provinsi lain sebesar 940 ribu hektar. Selain itu, 76% kehilangan tutupan pohon terjadi di wilayah di mana faktor pendorong deforestasi dominan, dan dari 2002 hingga 2024 Indonesia kehilangan 11 Mha hutan primer basah, yang menyumbang 34% dari total kehilangan. Penurunan ini membuat luas hutan primer basah berkurang sekitar 11% selama periode tersebut, serta menghasilkan emisi CO₂e sebesar 23 Gt, belum termasuk potensi peningkatan tutupan pohon di periode yang sama.

Berkurangnya kawasan hutan tidak hanya berdampak pada aspek ekologis, karena mengurangi kapasitas penyerapan karbon dan memperbesar kontribusi emisi gas rumah kaca tetapi juga menghambat pemanfaatan peluang ekonomi dari perdagangan karbon. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan yang tidak hanya berfokus pada perlindungan hutan, tetapi juga pada optimalisasi potensi karbon dari berbagai tipe tutupan vegetasi, termasuk kawasan non-hutan yang selama ini belum dimanfaatkan secara maksimal.

Indonesia berkomitmen dalam NDC-nya untuk mengurangi emisi GRK sebesar 29% dengan upaya sendiri dan 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 dibandingkan skenario business as usual, dengan sektor kehutanan dan lahan sebagai kontributor terbesar dalam target tersebut (Kementerian Sekretariat Negara Republik Indonesia, 2016). Meskipun potensinya luar biasa besar, pemanfaatan ekonomi masih sangat jauh dari optimal. Sebagian besar inisiatif perdagangan karbon yang berjalan saat ini berfokus pada proyek berskala besar di kawasan hutan konservasi atau lahan gambut, sementara potensi karbon dari lahan-lahan agrowisata, perkebunan rakyat, dan pertanian berbasis pohon berskala kecil dan menengah hampir seluruhnya belum terjamah. Purnawan *et. al.* (2024) membuktikan bahwa bahkan pada kawasan perhutanan sosial berskala kecil pun, potensi karbon dapat mencapai nilai ekonomi yang sangat signifikan jika didukung metodologi MRV yang tepat dan kelembagaan yang kuat.

Indonesia telah berkomitmen untuk mencapai *Net Zero Emission* pada tahun 2060 melalui kebijakan Nilai Ekonomi Karbon (NEK) yang diatur dalam Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021. Komitmen ini menegaskan bahwa potensi penyerapan karbon tidak hanya berasal dari sektor kehutanan skala besar, tetapi juga secara signifikan dapat dikembangkan melalui sistem pertanian berbasis

pohon dan agroforestri. Penelitian di lima kabupaten Jawa Barat membuktikan bahwa dari enam sistem *agroforestri* yang dikelola petani kecil pada lahan terdegradasi, sistem *mixed-tree lots* memiliki stok karbon tertinggi sebesar 108,9 Mg per hektar, dan variasi stok karbon antar sistem sangat dipengaruhi oleh kerapatan dan keragaman spesies tanaman yang dibudidayakan (Siarudin *et al.*, 2021). Dengan demikian, kawasan agrowisata berbasis tanaman pohon produktif seperti kebun belimbing memiliki relevansi strategis yang besar dalam mendukung target iklim nasional sekaligus memperkuat pengembangan agrowisata berbasis lingkungan yang berdaya saing di tingkat lokal.

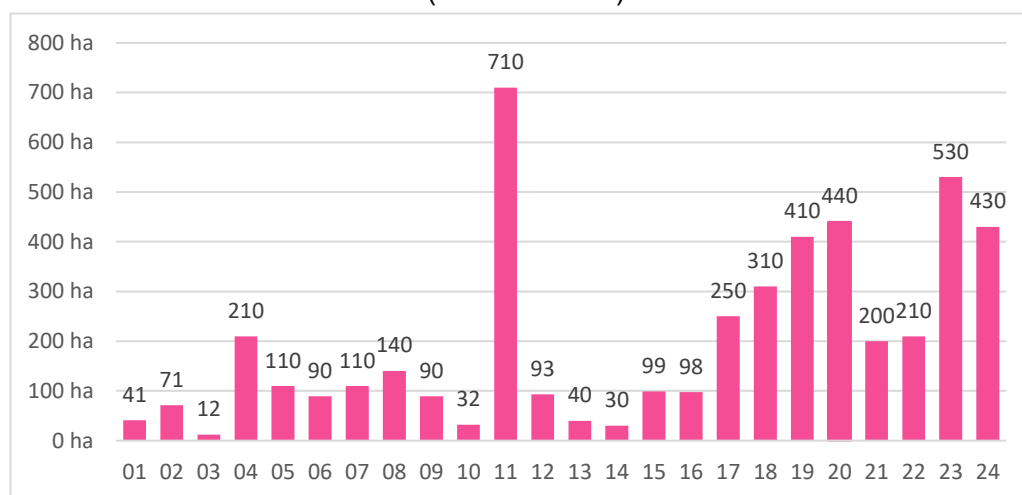
Kabupaten Bojonegoro merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Jawa Timur yang terletak di bagian barat laut, berbatasan langsung dengan Provinsi Jawa Tengah di sebelah barat. Secara geografis berada pada koordinat 111°25'–112°09' Bujur Timur dan 6°59'–7°37' Lintang Selatan, dengan luas wilayah total sekitar 230.706 hektar yang terbagi menjadi 28. Topografi bervariasi dari dataran rendah di sepanjang aliran Sungai Bengawan Solo hingga perbukitan di selatan dan utara. Secara keseluruhan, sekitar 40 persen atau sekitar 94.397 hektar dari total luas Kabupaten Bojonegoro merupakan kawasan hutan, didominasi oleh hutan produksi jati (*Tectona grandis*) yang dikelola oleh Perum Perhutani KPH Bojonegoro, KPH Ngawi, dan KPH Padangan (Busi S, 2025). Kondisi ini menjadikan Bojonegoro sebagai kabupaten dengan potensi karbon yang sangat signifikan di Jawa Timur.

Tutupan vegetasi Kabupaten Bojonegoro dapat diklasifikasikan menjadi tiga komponen utama, yang masing-masing memiliki implikasi karbon dan ekonomi yang berbeda secara signifikan. Pertama, kawasan hutan produksi jati yang dikelola oleh Perum Perhutani di wilayah perbukitan selatan, meliputi Tambakrejo,

Ngambon, Bubulan, dan Sekar. Secara ekologis, kawasan ini merupakan simpanan karbon terbesar di wilayah tersebut sekaligus berfungsi sebagai penyangga daerah tangkapan hujan yang menopang produktivitas pertanian di bawahnya. Namun, Kepala Administratur Perhutani KPH Bojonegoro menyatakan bahwa kawasan ini saat ini mengalami tekanan serius, di mana hutan-hutan di selatan secara masif beralih fungsi menjadi lahan jagung dan tebu tanpa diimbangi dengan penanaman pohon pengganti. Alih fungsi ini bukan hanya merugikan secara ekologis, tetapi juga berdampak pada potensi karbon, setiap hektar hutan jati yang hilang berarti hilangnya potensi nilai karbon yang secara konservatif dapat bernilai jutaan rupiah per tahun apabila dimonetisasi melalui pasar karbon yang kini telah tersedia melalui IDX Carbon (Perhutani, 2024)

Kedua, lahan pertanian dan perkebunan rakyat di dataran rendah, mencakup sawah irigasi, sawah tadah hujan, serta tegalan dengan komoditas pangan, palawija, tembakau, dan hortikultura. Kapasitas serapan karbon pada jenis vegetasi ini jauh lebih rendah dibandingkan dengan vegetasi pohon tahunan. Komponen ketiga, yang paling kritis dari perspektif neraca karbon, adalah kawasan alih fungsi lahan akibat ekspansi permukiman, pembangunan infrastruktur jalan, serta aktivitas industri minyak dan gas bumi, yang mencerminkan karakteristik Bojonegoro sebagai salah satu sentra produksi migas terbesar di Pulau Jawa, secara keseluruhan menimbulkan situasi yang bertentangan, yaitu kapasitas penyerapan karbon Kabupaten Bojonegoro terus menurun akibat berkurangnya kawasan hutan, sementara di sisi lain terdapat kawasan vegetasi produktif, seperti kebun buah rakyat dan agrowisata, yang potensi karbonnya belum terukur dan belum dimanfaatkan secara ekonomis. Hal ini menjadi fokus utama sekaligus landasan bagi penelitian ini.

Gambar 1. 2 Kehilangan Tutupan Pohon Kabupaten Bojonegoro Tahun 2001-2024 (Dalam Hektar)



Sumber: Global Forest Watch (2026)

Berdasarkan data tersebut selama periode 2001–2024 Bojonegoro kehilangan sekitar 5,1 kilohektar (kha) atau 5.100 hektar tutupan pohon. Jumlah ini setara dengan penurunan 13% dibandingkan kondisi tahun 2000 yang merepresentasikan sekitar 5,0% dari total kehilangan tutupan pohon di Jawa Timur. Kehilangan tersebut menghasilkan emisi sebesar 2,7 megaton (Mt) CO₂e atau sekitar 2,7 juta ton CO₂ ekuivalen. Namun, angka ini belum memperhitungkan adanya peningkatan atau pemulihan tutupan pohon pada periode yang sama. Di tahun 2011 total kehilangan tertinggi secara garis besar disebabkan oleh alih fungsi lahan hutan menjadi lahan pertanian. Dari total kehilangan tersebut, Bojonegoro kehilangan 45 hektar tutupan pohon akibat kebakaran dan sekitar 5,0 kilohektar (kha) akibat pendorong lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa kebakaran bukan merupakan faktor utama deforestasi di Bojonegoro, karena kontribusinya relatif kecil dibandingkan penyebab lain.

Sebagian besar kehilangan tutupan pohon akibat kebakaran yang tercatat pada tahun 2016 sebenarnya berasal dari kebakaran yang terjadi pada tahun

2015. Area yang terbakar baru terdeteksi yang disebabkan oleh keterlambatan deteksi akibat terbatasnya citra satelit yang jelas pada akhir tahun 2015. Fenomena serupa, meskipun dalam skala yang lebih kecil, juga terjadi pada periode 2019–2020. Selanjutnya, pada tahun 2024 tercatat sebagai tahun dengan kehilangan tutupan pohon akibat kebakaran tertinggi selama periode pengamatan, yaitu sebesar 7,0 hektar. Namun demikian, jumlah tersebut hanya menyumbang sekitar 2,0% dari total kehilangan tutupan pohon pada tahun 2024, sehingga kontribusi kebakaran terhadap total deforestasi pada tahun tersebut tetap tergolong rendah. Pada tahun 2020, Bojonegoro memiliki sekitar 52 kha hutan alam atau lebih dari 16% dari total luas daratannya. Pada tahun 2024, kehilangan hutan alam tercatat sebesar 49 hektar yang setara dengan 35 kiloton (kt) emisi CO₂. Sementara itu, pada periode 2021–2024, seluruh kehilangan tutupan pohon terjadi di kawasan hutan alam dengan total kehilangan <1ha dan estimasi emisi sekitar 190 ton CO₂e.

Isu penebangan liar dan degradasi hutan di Kabupaten Bojonegoro telah terdokumentasi dalam berbagai laporan resmi dan media yang dapat dipercaya. Dinas Lingkungan Hidup (DLH) Kabupaten Bojonegoro mencatat sebanyak 114 kasus penebangan pohon liar hanya hingga Maret 2025, sepanjang musim kemarau 2024 terjadi 47 peristiwa kebakaran hutan dan lahan, terdiri dari 8 kebakaran hutan dan 39 kebakaran lahan. Kepala DLH Bojonegoro Luluk Alifah menyatakan bahwa pengurangan tutupan hutan terjadi akibat penebangan liar, kebakaran hutan dan lahan, serta alih fungsi lahan secara masif untuk kepentingan pertanian dan perkebunan (Hutama, 2025). Dampak ekologis dari deforestasi ini sudah nyata terasa, pada tahun 2023 sebanyak 109 desa mengalami kekeringan, meningkat drastis dari 50 desa pada tahun sebelumnya, sebagai bukti

terganggunya keseimbangan ekologis akibat berkurangnya tutupan vegetasi (Pangestuti, 2025).

Setiap peristiwa penebangan dan kebakaran hutan yang terjadi di Bojonegoro menyebabkan pelepasan cadangan karbon yang telah terakumulasi selama puluhan tahun ke atmosfer dalam waktu yang sangat singkat. Kepala KPH Bojonegoro Slamet Juwanto menyampaikan bahwa dampak penebangan pohon di hutan Bojonegoro telah dirasakan nyata melalui banjir bandang di Kecamatan Bubulan, Sekar, dan Dander, serta banyaknya kawasan hutan yang beralih menjadi lahan jagung dan tebu tanpa adanya penanaman pohon pengganti (Perhutani, 2024). Kondisi ini secara langsung mengurangi stok karbon wilayah Bojonegoro dan memperparah neraca emisi karbon lokal. Dengan hilangnya 5.080 hektar tutupan pohon sejak 2001, potensi karbon yang seharusnya dapat dimonetisasi pun ikut hilang seiring bersamaan.

Di sisi lain, Kabupaten Bojonegoro juga memiliki sejumlah kawasan agrowisata dan kebun rakyat dengan tutupan vegetasi produktif yang berpotensi dikembangkan sebagai sumber nilai karbon. Berbeda dengan hutan yang kian menyusut akibat penebangan, kawasan agrowisata umumnya memiliki intensitas perawatan yang lebih tinggi dengan pohon-pohon yang dipelihara secara aktif. Tanaman buah-buahan tahunan seperti belimbing, mangga, dan jambu menyimpan karbon dalam biomassa batang, cabang, daun, dan akar yang dapat diukur dan dimonetisasi. Namun hingga saat ini, belum ada satupun kawasan agrowisata di Bojonegoro yang telah mengukur stok karbonnya secara ilmiah maupun mengoptimalkan nilai ekonomi karbon melalui mekanisme perdagangan karbon yang kini semakin terbuka.

Berdasarkan kajian ilmiah, terdapat rantai nilai yang logis di mana luas vegetasi menentukan biomassa, biomassa dihitung menjadi stok karbon, stok karbon dikonversi menjadi nilai karbon, dan nilai karbon menghasilkan nilai ekonomi untuk mendukung pengembangan agrowisata berkelanjutan. Kajian pada *Agroforestri* di Taman Nasional Gunung Halimun Salak dan Kalimantan Timur menunjukkan stok karbon dapat diestimasi melalui parameter vegetasi seperti *basal area* dan karakteristik spesies pohon, serta peningkatan keanekaragaman spesies terkait dengan peningkatan cadangan karbon (Hartoyo *et al.*, 2022). Rantai nilai ini perlu diintegrasikan dalam strategi pengembangan agrowisata Bojonegoro.

Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo merupakan salah satu destinasi unggulan Kabupaten Bojonegoro yang terletak di Desa Ngringinrejo, Kecamatan Kalitidu. Kawasan ini telah berkembang menjadi destinasi wisata edukatif yang menarik pengunjung untuk menikmati pengalaman berwisata sekaligus memetik buah belimbing (*Averrhoa carambola* L.) berkualitas tinggi. Agrowisata ini dikelola oleh BUMDes Tirto Abadi dengan luas lahan sekitar 20,4 hektar yang terdapat sekitar 9.000 pohon belimbing, dengan dukungan pemerintah daerah melalui program pemberdayaan masyarakat. Keunikan agrowisata ini terletak pada kombinasi nilai ekonomi produksi buah belimbing yang tinggi dengan suasana wisata alam yang menarik, sehingga menjadi salah satu model agrowisata yang potensial dikembangkan lebih lanjut (Anisa *et al.*, 2022)

Pohon belimbing (*Averrhoa carambola* L.) sebagai tanaman utama kebun ini merupakan jenis pohon buah tropis dengan pertumbuhan yang cukup cepat dan biomassa yang signifikan. Dalam kondisi optimal, pohon belimbing dapat mencapai tinggi 5–12 meter dengan diameter batang yang substansial, sehingga

menyimpan cadangan karbon yang cukup besar dalam biomassa batang, cabang, dan akar. Dengan jumlah pohon yang mencapai ratusan pohon dalam kawasan yang relatif luas, akumulasi cadangan karbon total seluruh tegakan di Kebun Ngringinrejo berpotensi sangat signifikan secara ekonomi, yang dapat diestimasi menggunakan persamaan alometrik berdasarkan pengukuran DBH kemudian dikonversi menjadi cadangan karbon menggunakan faktor konversi standar (Ardiansyah, 2024).

Meskipun telah beroperasi sebagai destinasi wisata selama bertahun-tahun dan mengelola ratusan pohon belimbing produktif, Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo hingga kini belum pernah dilakukan pengukuran dan perhitungan cadangan karbon secara ilmiah dan sistematis. Tidak adanya data cadangan karbon yang akurat menyebabkan pengelola tidak mengetahui besarnya kontribusi vegetasi kebun mereka dalam penyerapan CO₂, dan lebih penting lagi, tidak mengetahui potensi nilai karbon yang dapat dimonetisasi melalui mekanisme perdagangan karbon. Kondisi ini sangat tidak optimal mengingat bahwa Perpres NEK 2021 dan dibukanya IDX Carbon pada 2023 telah membuka akses pasar karbon yang semakin luas bagi pengelola lahan berskala kecil di seluruh Indonesia (Republik Indonesia, 2021).

Tidak adanya data stok karbon juga berarti belum tersedianya basis ilmiah untuk merumuskan strategi pengembangan agrowisata yang komprehensif dan berbasis ekosistem. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa strategi pengembangan agrowisata yang berkelanjutan seharusnya mempertimbangkan dimensi ekologis, termasuk kapasitas karbon kawasan, sebagai komponen daya tarik dan nilai tambah yang dapat memperkuat posisi agrowisata dalam pasar ekowisata (Li, 2022; Purnawan *et al.*, 2024). Namun tanpa data awal yang valid,

strategi semacam itu tidak dapat dirumuskan. Ketiadaan pendekatan terpadu ini menjadi salah satu faktor utama mengapa Kebun Ngringinrejo belum berkembang secara optimal sebagai destinasi agrowisata berbasis lingkungan.

Berdasarkan kajian literatur yang dipaparkan, terdapat tiga kesenjangan penelitian yang melatari urgensi studi ini. Pertama, kesenjangan objek kajian, hampir seluruh penelitian stok karbon di Indonesia berpusat pada hutan alam, hutan produksi, dan lahan gambut, sementara potensi karbon pada kawasan agrowisata berbasis pohon buah produktif seperti *Averrhoa carambola* L. hampir tidak ditemukan dalam literatur yang tersedia. Kedua, kesenjangan metode spasial, penelitian karbon pada skala lahan kecil umumnya dilakukan tanpa integrasi visualisasi berbasis *Quantum Geographic Information System (QGIS)*. Ketiga, kesenjangan strategi, belum ada penelitian yang secara terpadu menghubungkan estimasi nilai karbon dengan strategi pengembangan agrowisata melalui *Fuzzy Analytic Hierarchy Process (Fuzzy AHP)*. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi ketiga dimensi tersebut secara simultan: estimasi stok karbon lapangan, visualisasi spasial berbasis *QGIS*, dan perumusan strategi berbasis *Fuzzy AHP*, yang untuk pertama kalinya diterapkan pada objek agrowisata kebun belimbing.

Penelitian ini mengintegrasikan dua pendekatan metodologis utama. Pertama, estimasi stok karbon berbasis penginderaan jauh dengan memanfaatkan citra satelit *Landsat-8* yang tersedia secara terbuka, dianalisis menggunakan *Quantum Geographic Information System (QGIS)*. Transformasi *Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)* diterapkan untuk memetakan sebaran dan kerapatan vegetasi secara spasial dan nantinya digunakan untuk mengestimasi stok karbon (Purnawan *et al.*, 2024). Kedua, perumusan strategi

pengembangan agrowisata menggunakan *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* (*Fuzzy AHP*). *Fuzzy AHP* merepresentasikan penilaian dalam bentuk bilangan *Fuzzy* triangular sehingga mampu mengakomodasi ketidakpastian dan subjektivitas yang inheren dalam pengambilan keputusan berbasis multikriteria. Melalui *Fuzzy AHP*, bobot prioritas setiap strategi pengembangan diperoleh secara lebih robust, dan rekomendasi yang dihasilkan berbasis data ekologis yang terukur sekaligus responsif terhadap konteks sosial-ekonomi lokal. Kombinasi *QGIS* dan *Fuzzy AHP* inilah yang menjadikan penelitian ini tidak sekadar menghasilkan angka karbon, melainkan sebuah kerangka pengambilan keputusan terpadu yang dapat mendukung pengelolaan Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo secara berkelanjutan dan berdaya saing.

1.2 Perumusan Masalah

Kurangnya studi estimasi cadangan karbon dan nilai ekonomi karbon pada tegakan pohon belimbing (*Averrhoa carambola* L.) menyebabkan potensi karbon di Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo belum teridentifikasi dan belum dimanfaatkan secara optimal. Belum tersedianya representasi spasial membuat kondisi wilayah ini belum tergambar secara menyeluruh, dan ketiadaan strategi pengembangan Agrowisata berbasis data yang dirumuskan secara ilmiah menyebabkan pengelola belum memiliki arah prioritas yang jelas dalam. Berdasarkan permasalahan tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana potensi nilai karbon pada Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo dengan representasi spasial berbasis *Quantum Geographic Information System*?

2. Bagaimana strategi pengembangan Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo berdasarkan analisis *Fuzzy Analytic Hierarchy Process*?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis potensi nilai karbon pada Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo melalui estimasi stok karbon dan representasi spasial berbasis *Quantum Geographic Information System*.
2. Merumuskan strategi pengembangan Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo berdasarkan analisis *Fuzzy Analytic Hierarchy Process* guna mendukung pengelolaan kawasan secara berkelanjutan.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis dalam mendukung pengembangan ilmu pengetahuan dan penerapannya di bidang agrowisata berbasis lingkungan. Oleh karena itu, manfaat penelitian ini dibagi menjadi manfaat teoritis dan manfaat praktis sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat teoritis dalam pengembangan ilmu pengetahuan yang diuraikan sebagai berikut:

- a. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memperkaya kajian ekonomi pembangunan, khususnya ekonomi lingkungan dan ekonomi sumber daya alam, melalui analisis potensi nilai karbon berbasis estimasi stok karbon dan representasi spasial menggunakan *QG/S* pada kawasan agrowisata. Penelitian ini juga berkontribusi dalam mengintegrasikan pendekatan ekonomi dengan analisis spasial dalam menilai jasa lingkungan karbon pada sektor

agrowisata berbasis tanaman buah yang masih relatif terbatas dalam literatur akademik.

- b. Penelitian ini diharapkan dapat mengembangkan referensi metodologis dalam penerapan analisis *Fuzzy* AHP untuk merumuskan strategi pengembangan kawasan agrowisata berbasis keberlanjutan. Integrasi pendekatan kuantitatif (estimasi karbon dan spasial) dengan pendekatan pengambilan keputusan multikriteria (*Fuzzy* AHP) memberikan kontribusi teoretis dalam pengembangan model perencanaan ekonomi berbasis lingkungan.

2. Manfaat Praktis

Penelitian ini diharapkan memberikan manfaat praktis bagi pihak-pihak terkait yang diuraikan sebagai berikut:

- a. Bagi Pengelola Agrowisata dan Masyarakat Sekitar

Penelitian ini memberikan informasi kuantitatif mengenai potensi nilai karbon untuk dasar dari kredit karbon yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber nilai ekonomi tambahan. Selain itu, hasil analisis *Fuzzy* AHP dapat menjadi dasar dalam menentukan strategi pengembangan kawasan agrowisata yang lebih efektif, berkelanjutan, dan berorientasi pada peningkatan kesejahteraan masyarakat sekitar.

- b. Bagi Pemerintah Kabupaten Bojonegoro

Hasil penelitian ini dapat menjadi bahan pertimbangan dalam penyusunan kebijakan pembangunan daerah berbasis ekonomi hijau, khususnya dalam mengintegrasikan potensi jasa lingkungan karbon dan pengembangan agrowisata ke dalam perencanaan pembangunan wilayah yang berkelanjutan.

c. Bagi Akademisi dan Peneliti

Penelitian ini dapat menjadi referensi dalam pengembangan studi ekonomi lingkungan yang mengintegrasikan estimasi stok karbon, analisis spasial berbasis *QGIS*, serta metode *Fuzzy AHP* dalam perumuan strategi pengembangan kawasan. Penelitian ini juga membuka peluang kajian lanjutan pada objek dan wilayah yang berbeda..

d. Bagi Universitas

Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya khazanah keilmuan di bidang ekonomi pembangunan yang mengintegrasikan dimensi lingkungan, spasial, dan strategi pengambilan keputusan. Penelitian ini juga dapat memperkuat peran universitas sebagai institusi yang menghasilkan riset aplikatif dalam mendukung pembangunan ekonomi daerah yang berkelanjutan.

1.5 Batasan Penelitian

Penelitian ini hanya berfokus pada kawasan Agrowisata Kebun Belimbing Ngringinrejo, Desa Ngringinrejo, Kecamatan Kalitidu, Kabupaten Bojonegoro, sehingga hasilnya tidak dapat digeneralisasikan pada kawasan agrowisata lain. Pemetaan dan analisis spasial kawasan dilakukan menggunakan perangkat lunak *QGIS*, sehingga hasil interpretasi data spasial bergantung pada ketersediaan dan akurasi data citra yang digunakan pada periode penelitian. Estimasi potensi nilai karbon mengacu pada harga pasar karbon yang berlaku pada periode penelitian, sehingga bersifat estimatif dan dapat berubah seiring fluktuasi harga karbon. Analisis strategi pengembangan dibatasi pada pendekatan *SWOT* dan *Fuzzy AHP* berdasarkan persepsi *Key Informan* terpilih, sehingga strategi yang dihasilkan mencerminkan kondisi pada saat penelitian berlangsung.