

Strategi Tata Guna Lahan Berbasis Stok Karbon untuk Pembangunan Berkelanjutan di Kota Balikpapan: Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan dengan *Land Change Modeler* dan Analisis Skenario

Carbon Stock-Based Land Use Planning Strategy for Sustainable Development in Balikpapan City: Land Use Change Prediction Using Land Change Modeler and Scenario Analysis

Fadel Ghulam Fajri

Pengelola Pertanahan, Kantor Pertanahan Kota Balikpapan, Kalimantan Timur, Indonesia

*corresponding author: fadel.gfajri@atrbtn.go.id

Submitted: January 6, 2025 | Accepted: September 25, 2025 | Published: September 26, 2025

Abstract: *The growth of Balikpapan City as a pillar of the development of the Indonesian Capital City (IKN) has placed significant pressure on land use and carbon stocks. This study aims to develop a carbon stock-based land use strategy to support sustainable development. The methods used include spatial modeling with the Land Change Modeler (LCM) to predict land use changes in 2024 and 2030 and carbon stock calculations using InVEST. The analysis was conducted on two scenarios: a baseline scenario and a Protected Forest Areas (PFA) scenario. The results indicate that the conversion of shrubs and agriculture to built-up areas predominantly occurs in North and South Balikpapan, while East Balikpapan still contains forests and mangroves, which are important carbon sinks. In the baseline scenario, carbon stocks experienced a significant decline due to uncontrolled urbanization. In contrast, the PFA scenario was able to maintain and even increase carbon stocks, particularly through the protection of forests and mangroves in the eastern part of the city. Therefore, Balikpapan's development will only be sustainable if conservation-based spatial planning policies are consistently implemented through the protection of protected areas, strict monitoring, and incentive support towards a low-carbon city.*

Keywords: *Carbon Stock, Land Use Planning, Land Change Modeler, Sustainable Development.*

Abstrak: Pertumbuhan Kota Balikpapan sebagai penopang pembangunan Ibu Kota Nusantara (IKN) menimbulkan tekanan besar terhadap penggunaan lahan dan cadangan karbon. Penelitian ini bertujuan mengembangkan strategi tata guna lahan berbasis stok karbon untuk mendukung pembangunan berkelanjutan. Metode yang digunakan mencakup pemodelan spasial dengan Land Change Modeler (LCM) untuk memprediksi perubahan penggunaan lahan tahun 2024 dan 2030, serta perhitungan stok karbon menggunakan InVEST. Analisis dilakukan pada dua skenario: skenario dasar dan Protecting Forest Areas (PFA). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konversi semak dan pertanian menjadi lahan terbangun dominan terjadi di Balikpapan Utara dan Selatan, sedangkan Balikpapan Timur masih menyimpan hutan dan mangrove yang penting sebagai penyerap karbon. Pada skenario dasar, stok karbon mengalami penurunan signifikan akibat urbanisasi yang tidak terkendali. Sebaliknya, skenario PFA mampu mempertahankan hingga meningkatkan stok karbon, terutama melalui perlindungan hutan dan mangrove di kawasan timur kota. Dengan demikian, pembangunan Balikpapan hanya akan berkelanjutan apabila kebijakan tata ruang berbasis konservasi dijalankan secara konsisten melalui perlindungan kawasan lindung, pengawasan ketat, dan dukungan insentif menuju kota rendah karbon.

Kata Kunci: Stok Karbon, Tata Guna Lahan, *Land Change Modeler*, Pembangunan Berkelanjutan



Jurnal Pertanahan is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Pendahuluan

Urbanisasi yang cepat menjadi fenomena global dengan konsekuensi serius terhadap lingkungan, seperti peningkatan emisi karbon, konversi lahan hijau, dan degradasi ekosistem (Seto et al., 2012). Di Indonesia, laju urbanisasi mendorong alih fungsi lahan produktif dan ruang terbuka hijau untuk kebutuhan permukiman, industri, dan infrastruktur, sehingga menimbulkan tekanan pada ekosistem serta mempercepat perubahan iklim (Firman et al., 2019). Padahal, stok karbon dari hutan kota, mangrove, dan ruang terbuka hijau berperan penting dalam menyerap emisi gas rumah kaca dan menjaga keseimbangan iklim lokal (Lambin & Meyfroidt, 2011).

Masalah utama yang muncul adalah lemahnya integrasi antara kebijakan tata ruang dengan pendekatan konservasi karbon. Pertumbuhan kota yang tidak terkendali berpotensi mempercepat hilangnya cadangan karbon (Lakshita & Rahayu, 2021). Beberapa studi di Kalimantan Timur telah menggunakan *Land Change Modeler* (LCM) untuk menganalisis dinamika penggunaan lahan (Ghotama et al., 2021; Sharma et al., 2018), namun fokusnya masih terbatas pada aspek perubahan lahan tanpa mengaitkan langsung dengan stok karbon. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian dalam menilai keterkaitan tata guna lahan, stok karbon, dan skenario kebijakan konservasi khususnya di Balikpapan. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan untuk: (1) memprediksi perubahan penggunaan lahan Kota Balikpapan pada 2024 dan 2030 dengan LCM, (2) menganalisis dampaknya terhadap stok karbon di bawah skenario dasar dan skenario *Protecting Forest Areas* (PFA), serta (3) merumuskan strategi tata guna lahan berbasis stok karbon yang mendukung pembangunan berkelanjutan.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa strategi tata ruang berbasis karbon berpotensi signifikan dalam menekan emisi perkotaan sekaligus mendukung pembangunan berkelanjutan. Pendekatan ini menekankan pengalokasian zona konservasi, peningkatan ruang hijau melalui reforestasi atau urban farming, serta pembatasan pembangunan di wilayah dengan cadangan karbon tinggi (Jaya, 2020; Shalihah et al., 2024). Model prediksi seperti *Land Change Modeler* (LCM) dan *INVEST Carbon Storage and Sequestration* juga telah digunakan untuk memproyeksikan dampak perubahan penggunaan lahan terhadap stok karbon, sehingga membantu perumusan kebijakan berbasis bukti.

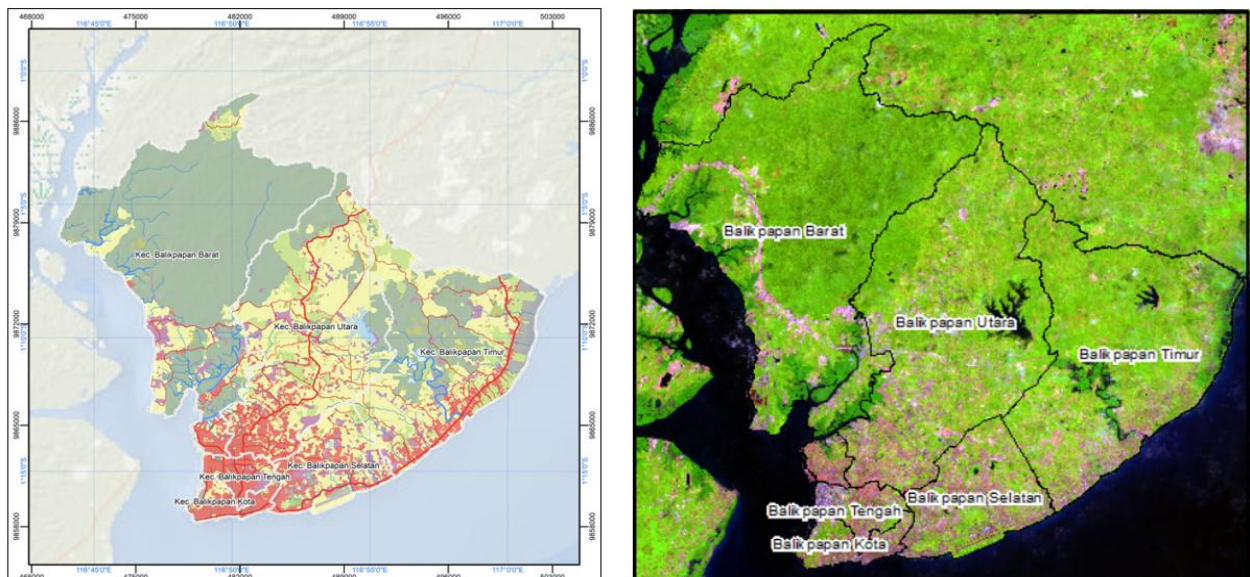
Namun, sebagian besar studi tersebut masih bersifat generik dan berskala regional. Misalnya, Ghotama et al. (2021) serta Sharma et al. (2018) menggunakan LCM untuk memprediksi perubahan penggunaan lahan di Kalimantan Timur, tetapi tidak secara spesifik mengaitkan hasilnya dengan dinamika stok karbon. Herlawati et al. (2021) juga menekankan pemanfaatan data satelit multiwaktu dalam memodelkan perubahan lahan, tetapi fokusnya masih terbatas pada aspek spasial. Padahal, Kota Balikpapan memiliki karakteristik unik sebagai pusat ekonomi sekaligus kota penopang pembangunan Ibu Kota Nusantara (IKN), yang berpotensi menghadapi tekanan lahan lebih besar dibanding wilayah lain. Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian dalam mengintegrasikan prediksi perubahan

lahan, perhitungan stok karbon, dan implikasinya terhadap kebijakan tata ruang lokal di Balikpapan.

Untuk mengisi kekosongan tersebut, penelitian ini berfokus pada pengembangan strategi tata guna lahan berbasis stok karbon di Kota Balikpapan. Dengan menggabungkan simulasi perubahan lahan melalui LCM, perhitungan stok karbon menggunakan InVEST, serta penerapan skenario kebijakan *Protecting Forest Areas* (PFA), studi ini menawarkan pendekatan berbasis data yang terintegrasi dengan kebijakan tata ruang lokal. Kontribusi unik penelitian ini adalah menghadirkan analisis prediktif stok karbon spesifik untuk konteks perkotaan strategis penopang IKN, serta memberikan rekomendasi kebijakan berbasis bukti yang dapat menjadi acuan praktis bagi Balikpapan dan model bagi kota-kota lain di Indonesia dalam mengelola urbanisasi sambil mempertahankan cadangan karbon untuk mitigasi perubahan iklim.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan dukungan data spasial untuk menganalisis dan memprediksi stok karbon di Kota Balikpapan pada tahun 2018, 2024, dan 2030. Metode yang digunakan mencakup beberapa tahapan, yaitu pengumpulan data, pengolahan dan analisis data spasial, prediksi stok karbon, serta pemodelan simulasi. Setiap tahapan ini dilakukan untuk mendapatkan hasil yang akurat dan relevan dalam mengembangkan strategi tata guna lahan berbasis karbon.



Gambar 1 Area Penelitian
Sumber: Badan Informasi Geospasial, 2020

1. Pengumpulan Data dan Pengolahan Data Spasial

Penelitian ini menggunakan data spasial Kota Balikpapan skala 1:50.000 dari Badan Informasi Geospasial, meliputi peta penggunaan lahan, jaringan jalan, sungai, area terbangun, dan kemiringan lereng. Data raster berupa citra Sentinel-2 tahun 2018, 2021, dan 2024, serta data pertanahan (SHAT pertanian), batas kawasan hutan dari KLHK, dan peta mangrove

nasional sebagai batasan analisis. Seluruh data diolah dengan ArcGIS 10.8, QGIS 3.28.7, dan TerrSet 2020 (LCM), dengan komparasi melalui ekstensi MOLUSCE. Estimasi stok karbon dan nilai ekonominya dihitung menggunakan InVEST 3.14.1 Workbench.

2. Prediksi Penutup Lahan Tahun 2030

Prediksi penutup lahan tahun 2030 dilakukan dengan TerrSet–Land Change Modeler (LCM) menggunakan data tahun 2018, 2021, dan 2024. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi 2024 dengan data aktual. Faktor pendorong disusun di ArcGIS, sedangkan pemodelan dan proyeksi lahan dilakukan di TerrSet 2020. Analisis menerapkan skenario Protecting Forest Areas (PFA), yang membatasi konversi hutan guna menjaga stok karbon dan mencegah alih fungsi menjadi permukiman, industri, atau lahan non-konservasi lainnya.

3. Markov Chain Analysis

Analisis Markov Chain pada TerrSet 2020 digunakan untuk memprediksi probabilitas transisi antar kelas penggunaan lahan berdasarkan data 2018 dan 2021. Hasilnya berupa matriks transisi yang menggambarkan kemungkinan perubahan tiap kelas lahan hingga 2024 dan 2030. Model ini memanfaatkan faktor pendorong spasial seperti jarak ke jalan, sungai, area terbangun, elevasi, dan kemiringan untuk menghasilkan peta prediksi yang lebih akurat. Dengan demikian, Markov Chain berfungsi sebagai dasar evaluasi dampak perubahan lahan terhadap stok karbon dan keberlanjutan ekosistem di Balikpapan.

$$P^{(t+1)} = P^{(t)} \cdot T \dots\dots\dots(1)$$

$P^{(t)}$: Matriks distribusi kelas lahan pada waktu t (periode waktu awal).

T : Matriks transisi, matriks probabilitas transisi antar kelas lahan yang berubah

$P^{(t+1)}$: Matriks distribusi kelas lahan pada waktu $t+1$ (periode waktu berikutnya).

Matriks transisi (T) menggambarkan kemungkinan transisi antar kelas lahan. Bentuknya adalah:

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22} & t_{2n} \\ t_{n1} & t_{n2} & t_{nn} \end{bmatrix} \dots\dots\dots(2)$$

t_{ij} : Probabilitas transisi dari kelas lahan i ke kelas j

n : Jumlah kelas lahan.

Selain matriks transisi, TerrSet 2020 juga menggunakan faktor pendorong (spatial drivers) seperti jarak ke jalan dan elevasi untuk menghasilkan peta probabilitas transisi. Probabilitas ini dinyatakan sebagai:

$$P_{Spasial}^{(t+1)} = P^{(t)} \cdot T \cdot F \dots\dots\dots(3)$$

F : Faktor pendorong spasial yang memengaruhi lokasi perubahan lahan

$P_{Spasial}^{(t+1)}$: Peta distribusi probabilitas spasial untuk setiap kelas lahan pada waktu $t+1$

4. Perhitungan Carbon Storage

Perhitungan stok karbon dilakukan menggunakan InVEST Carbon Storage and Sequestration dengan input peta penggunaan lahan, nilai karbon spesifik tiap kelas, dan hasil prediksi LCM. Model ini menghitung total stok karbon berdasarkan luas dan karakteristik

vegetasi, sehingga memungkinkan analisis perbandingan antara skenario dasar dan skenario Protecting Forest Areas (PFA). Hasil perhitungan digunakan untuk menilai dampak perubahan tata guna lahan terhadap kapasitas penyimpanan karbon Kota Balikpapan.

$$C_{Total} = \sum_{i=1}^n (A_i \cdot C_i) \dots\dots\dots(4)$$

C_{Total} : Total stok karbon (Mg.C)

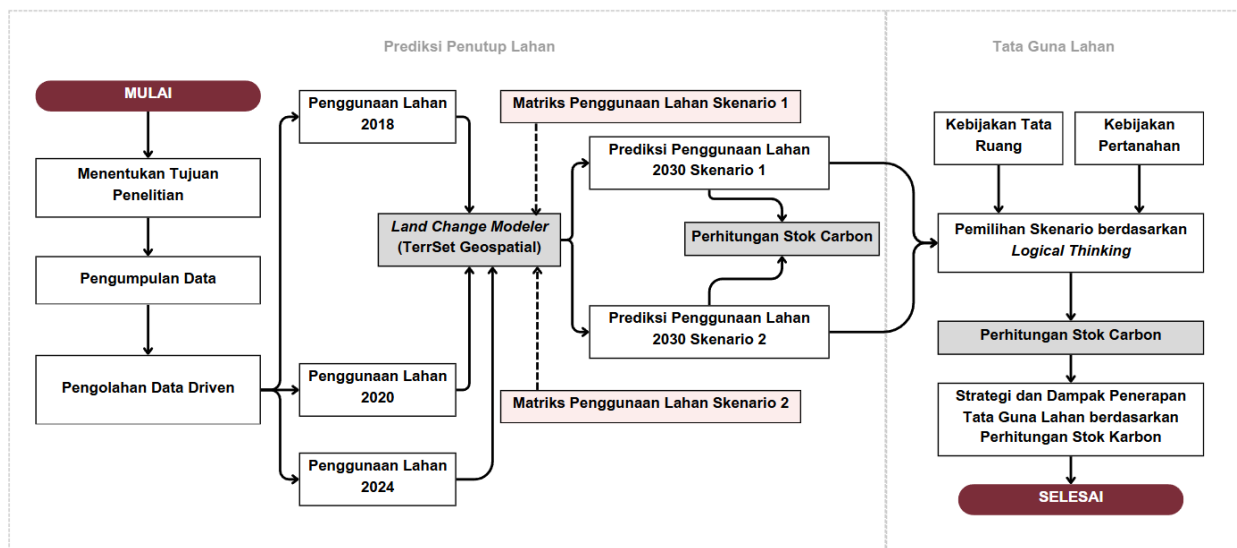
A_i : Luas area penggunaan lahan i (ha)

C_i : Nilai karbon spesifik per tipe penggunaan lahan i (Mg.C/ha)

n : Jumlah tipe penggunaan lahan

5. Pembangunan Berkelanjutan dalam Tata Guna Lahan

Pengelolaan emisi karbon melalui tata guna lahan berperan penting dalam mendukung pembangunan berkelanjutan. Perubahan fungsi lahan, terutama dari hutan menjadi pertanian atau permukiman, berpotensi menurunkan stok karbon dan meningkatkan emisi. Oleh karena itu, strategi seperti zonasi konservasi, pembatasan konversi kawasan berhutan, serta penerapan teknologi rendah emisi diperlukan untuk menjaga cadangan karbon. Integrasi kebijakan tata ruang dengan instrumen pertanahan—seperti Reforma Agraria, Neraca Penatagunaan Tanah, dan RDTR—dapat memastikan pemanfaatan lahan sesuai peruntukan sekaligus mengurangi risiko degradasi lingkungan.



Gambar 2 Diagram Alir Penelitian
Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Hasil dan Pembahasan

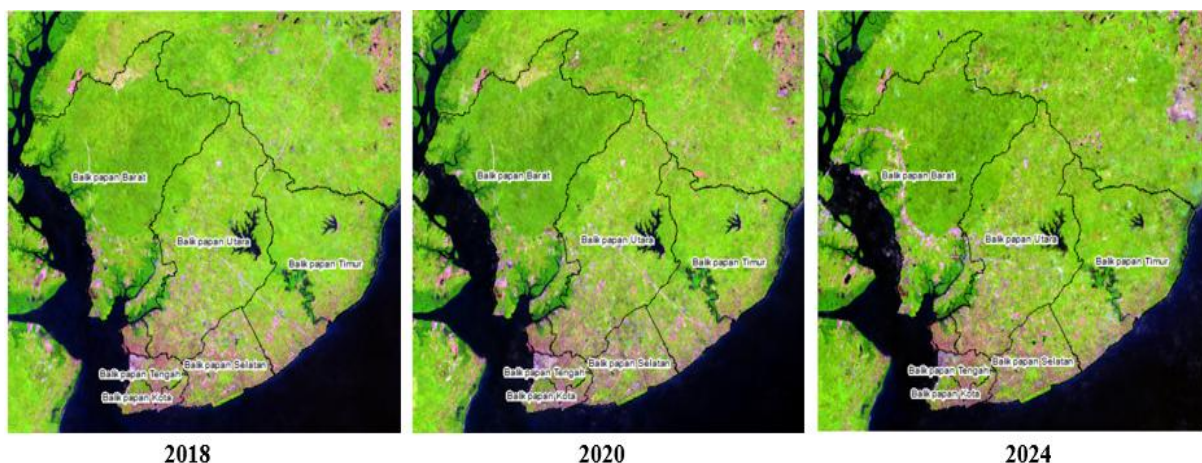
Land Change Modeler (LCM)

Hasil pemodelan LCM menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan di Kota Balikpapan antara 2018–2030 paling banyak terjadi pada konversi semak dan pertanian menjadi lahan terbangun. Secara spasial, kecamatan dengan tingkat perubahan tertinggi adalah Balikpapan Utara dan Balikpapan Selatan, yang merupakan kawasan dengan pertumbuhan permukiman paling cepat akibat ketersediaan lahan relatif luas dan aksesibilitas yang tinggi. Di Balikpapan Utara, konversi lahan didorong oleh kedekatannya

dengan jalan arteri dan rencana pengembangan koridor menuju wilayah IKN. Sementara itu, Balikpapan Selatan mengalami tekanan alih fungsi karena berkembang sebagai pusat perumahan baru dan kegiatan komersial.

Sebaliknya, kawasan Balikpapan Barat dan Balikpapan Tengah relatif stabil karena keterbatasan lahan serta dominasi kawasan industri dan pelabuhan yang sudah mapan. Adapun Balikpapan Timur, meskipun masih didominasi hutan dan mangrove, mulai menunjukkan potensi konversi di area sekitar akses jalan utama menuju IKN. Hal ini menandakan pentingnya kebijakan tata ruang yang lebih ketat di wilayah timur, agar fungsi ekologis sebagai penyerap karbon tetap terjaga.

Secara keseluruhan, pola perubahan spasial ini menegaskan bahwa tekanan urbanisasi di Balikpapan terkonsentrasi di wilayah yang memiliki aksesibilitas tinggi dan berdekatan dengan koridor pembangunan IKN. Dengan demikian, strategi tata ruang berbasis stok karbon perlu diarahkan pada perlindungan hutan dan mangrove di Balikpapan Timur, serta pengendalian alih fungsi lahan semak dan pertanian di Balikpapan Utara dan Selatan yang berisiko kehilangan cadangan karbon terbesar.

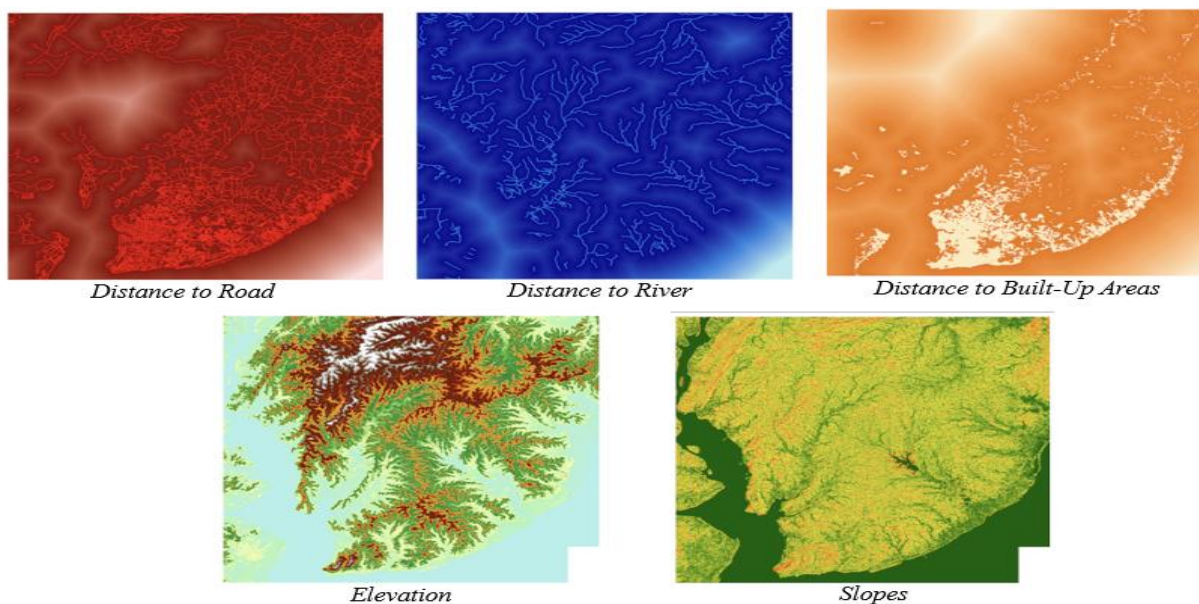


Gambar 3. Citra Sentinel Tahun 2018, 2020 dan 2024
Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Faktor Pendorong/ *Driving Factors*

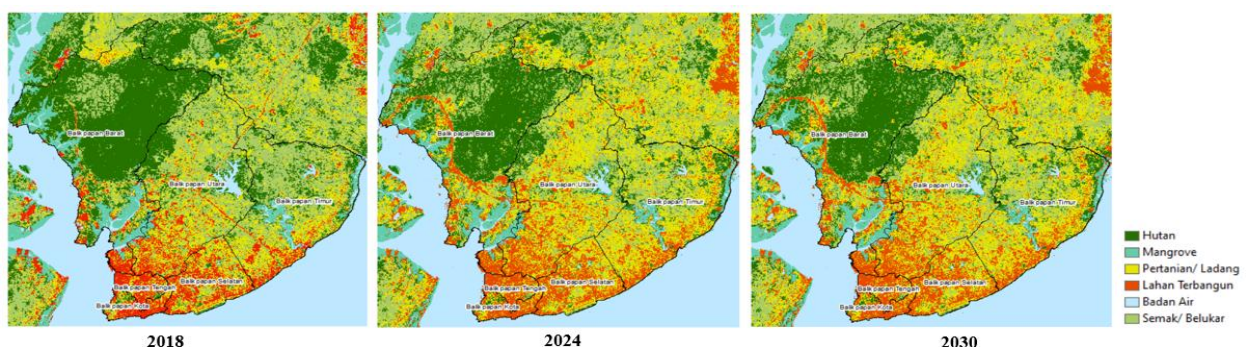
Perubahan penggunaan lahan di Kota Balikpapan dipengaruhi oleh beberapa faktor pendorong utama, yakni jarak ke jalan, sungai, bangunan terbangun, serta kondisi topografi berupa elevasi dan kemiringan lereng. Kawasan dengan akses tinggi, terutama di Balikpapan Utara dan Balikpapan Selatan, menunjukkan tingkat konversi semak dan pertanian menjadi permukiman paling cepat karena kedekatannya dengan jalan arteri dan rencana koridor menuju IKN. Sementara itu, di Balikpapan Barat dan Timur, kedekatan dengan sungai besar serta rawa mangrove menentukan fungsi lahan sebagai area konservasi dan pertanian, meskipun tekanan pembangunan di tepi sungai mulai mengancam ekosistem mangrove. Faktor kedekatan dengan kawasan terbangun juga berperan penting, di mana ekspansi dari pusat kota di Balikpapan Tengah mendorong terjadinya *urban sprawl* ke wilayah sekitar, terutama di Balikpapan Utara. Dari sisi topografi, lahan dengan elevasi rendah hingga menengah di Balikpapan Selatan lebih banyak dikonversi untuk permukiman karena sesuai

untuk konstruksi, sedangkan wilayah dengan elevasi lebih tinggi di Balikpapan Timur relatif terlindungi meskipun tetap berpotensi terfragmentasi bila akses jalan baru dibuka. Adapun area dengan kemiringan curam di bagian timur dan utara cenderung bertahan sebagai hutan atau semak karena risiko erosi dan biaya pembangunan yang tinggi. Secara keseluruhan, kombinasi faktor pendorong ini menunjukkan bahwa aksesibilitas dan kedekatan dengan pusat pembangunan merupakan determinan utama konversi lahan di Balikpapan, sementara topografi berfungsi sebagai faktor pembatas. Kondisi ini menegaskan pentingnya kebijakan tata ruang yang lebih ketat, khususnya dalam pengendalian pembangunan di sekitar jalan baru dan kawasan sungai, serta perlindungan permanen pada area berhutan dengan lereng curam yang berperan penting dalam menjaga stok karbon kota.



Gambar 4. *Driven Factors* Penelitian
Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Analisis Skenario Penutup Lahan Tahun 2030



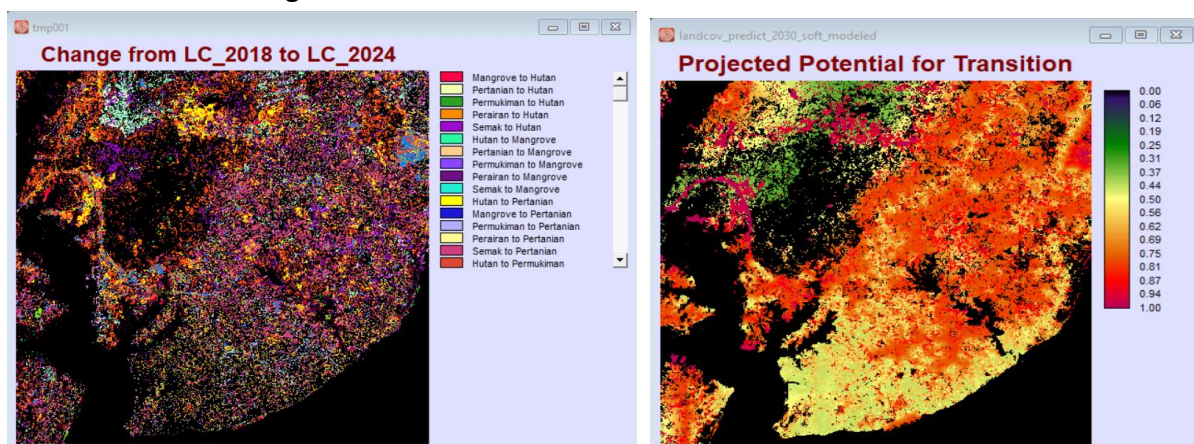
Gambar 5. Hasil Permodelan Penutup Lahan Tahun 2030
Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Prediksi penutup lahan tahun 2030 dilakukan dengan menggunakan analisis berbasis data historis dan simulasi perubahan lahan melalui Land Change Modeler (LCM) yang terdapat dalam perangkat lunak TerrSet. Model ini menggunakan data penggunaan lahan tahun 2018 dan 2024 sebagai basis, serta mempertimbangkan faktor-faktor pendorong

seperti jarak ke jalan, jarak ke sungai, jarak ke area terbangun, elevasi, dan kemiringan (Leta et al., 2021). LCM dirancang untuk mengidentifikasi pola perubahan lahan di masa lalu dan memproyeksikan transisi penggunaan lahan di masa depan berdasarkan probabilitas transisi yang dihitung dari data historis. Pendekatan berbasis data ini memungkinkan hasil simulasi yang lebih akurat dengan mempertimbangkan hubungan kausal antara faktor pendorong dan perubahan penutup lahan.

Studi di Indonesia menunjukkan relevansi penggunaan model seperti LCM dalam proyeksi perubahan lahan. Firman, (2014) menekankan pentingnya analisis spasial dalam perencanaan tata ruang di Indonesia, khususnya di wilayah perkotaan yang menghadapi tekanan pembangunan tinggi. Selain itu, Sharma et al. (2018) menggunakan LCM untuk memetakan perubahan penutup lahan di Kalimantan dan menunjukkan bahwa faktor seperti kedekatan dengan jalan dan area terbangun secara signifikan mempengaruhi dinamika perubahan lahan. Dengan mempertimbangkan konteks lokal ini, simulasi LCM untuk prediksi penutup lahan tahun 2030 tidak hanya mendukung perencanaan tata ruang yang lebih baik, tetapi juga berkontribusi pada mitigasi dampak lingkungan, termasuk pengelolaan stok karbon yang lebih berkelanjutan.

Pada skenario dasar, konversi besar-besaran dari semak dan pertanian ke permukiman di Balikpapan Utara dan Selatan meningkatkan fragmentasi hutan kota serta mengancam kawasan mangrove di Balikpapan Timur. Kondisi ini berpotensi mempercepat hilangnya stok karbon dan menurunkan kapasitas ekosistem dalam menyerap emisi, sejalan dengan hasil penelitian Seto et al. (2012) mengenai dampak urbanisasi global terhadap degradasi ekosistem. Sebaliknya, skenario 2 menampilkan pola perubahan yang lebih realistis, meskipun stok karbon tetap menurun. Perbedaan ini menunjukkan bahwa nilai ekologis tidak hanya ditentukan oleh jumlah stok karbon, tetapi juga oleh distribusi spasial lahan yang tersisa, sebagaimana juga dicatat oleh Lambin & Meyfroidt (2011) terkait pentingnya kualitas ekosistem dalam mitigasi iklim.



Gambar 6. (Kiri) Perubahan Penggunaan Lahan 2018 ke 2024; (kanan) Potensi Perubahan Penggunaan Lahan

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Gambar 6 menunjukkan perubahan penutup lahan dari tahun 2018 ke 2024 berdasarkan simulasi *Land Change Modeler (LCM)*. Perubahan yang terjadi melibatkan beberapa kategori penutup lahan, termasuk konversi dari mangrove, semak, dan pertanian ke hutan, serta konversi signifikan dari hutan dan semak ke permukiman dan pertanian. Pola perubahan ini mencerminkan dinamika tekanan pembangunan di wilayah studi yang dipengaruhi oleh kebutuhan lahan untuk aktivitas ekonomi dan pemukiman. Penelitian Chaiklang et al. (2024) dan Surya et al. (2021) menunjukkan bahwa urbanisasi di wilayah tropis sering kali menyebabkan konversi ekstensif dari ekosistem alami, seperti mangrove dan hutan, ke lahan non-konservasi seperti pertanian atau permukiman. Hal ini berpotensi mengurangi kapasitas penyimpanan karbon kawasan tersebut dan meningkatkan emisi karbon.

a. Skenario 1 Perhitungan *Carbon Storage* dan *Carbon Sequestration*

Skenario 1 disusun dengan pembatasan bahwa beberapa kelas penutup lahan dapat berubah menjadi lainnya dengan jumlah perubahan sebanyak 12 dan 3 penutup lahan tidak diperkenankan dilakukan perubahan (hutan, mangrove/bakau dan badan air). 12 perubahan yang dimaksud antara lain adalah kelas penutup lahan pertanian dimungkinkan untuk berubah menjadi hutan, mangrove/bakau, lahan terbangun dan semak. Lahan terbangun dan terbuka dimungkinkan untuk berubah pada kelas penutup lahan hutan, mangrove/bakau, pertanian dan semak, dan kelas penutup lahan semak dimungkinkan berubah menjadi hutan, mangrove/bakau, pertanian dan lahan terbangun sebagaimana tabel skenario dibawah ini.

Tabel 1. Matriks Perubahan Penggunaan Lahan Skenario 1

	Hutan	Mangrove/ Bakau	Pertanian	Lahan Terbangun dan Terbuka	Badan Air	Semak	
Hutan							
Mangrove/Bakau							
Pertanian	1	2		3		4	
Lahan Terbangun dan Terbuka	5	6	7			8	
Badan Air							
Semak	9	10	11	12			

Tetap
 Tidak Berubah
 Berubah

Sumber: Penulis, diolah 2025

Berdasarkan tabel skenario 1 yang telah diterapkan, didapatkan luasan perubahan sebagaimana tabel dibawah ini. Dimana perubahan terbesar terjadi pada penutup lahan semak yang memiliki tren semakin berkurang setiap 6 tahun, dengan prediksi tersisa seluas 1.359.077 m² atau 13,29% pada tahun 2030.

Tabel 2. Perubahan Luas Penutup Lahan berdasarkan Skenario 1

No	Landcover	2018		2020		2030	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Hutan	2,462,961	24.05	1,767,769	17.26	2,112,487	20.63
2	Mangrove	599,781	5.86	547,792	5.35	562,860	5.50

3	Pertanian	1,514,159	14.79	2,434,864	23.78	2,569,311	25.09
4	Lahan Terbangun dan Terbuka	815,983	7.97	1,202,955	11.75	1523992	14.88
5	Badan Air	2,179,091	21.28	2,117,697	20.68	2,111,775	20.62
6	Semak	2,667,527	26.05	2,168,425	21.18	1,359,077	13.27
Total		10,239,502	100	10,239,502	100	10,239,502	100

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

b. Skenario 2 Perhitungan *Carbon Storage* dan *Carbon Sequestration*

Skenario 2 disusun dengan pembatasan yang lebih sempit dari skenario 1, hal ini dilakukan guna mengobservasi tren perubahan pada saat terjadinya pembatasan yang lebih ekstrem. Pada skenario ini, hanya 6 (enam) kemungkinan perubahan penutup lahan yang diperbolehkan yaitu kelas pertanian dimungkinkan berubah menjadi lahan terbangun dan terbuka serta semak, kelas lahan terbangun dan terbuka dimungkinkan berubah menjadi pertanian dan semak, kelas semak dimungkinkan berubah menjadi pertanian serta lahan terbangun dan terbuka sebagaimana tabel dibawah ini.

Tabel 3. Matriks Perubahan Penggunaan Lahan Skenario 2

	Hutan	Mangrove/ Bakau	Pertanian	Lahan Terbangun dan terbuka	Badan Air	Semak	
Hutan							
Mangrove/Bakau							
Pertanian				1		2	
Lahan Terbangun dan Terbuka			3			4	
Badan Air							
Semak			5	6			

Tetap
 Tidak Berubah
 Berubah

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

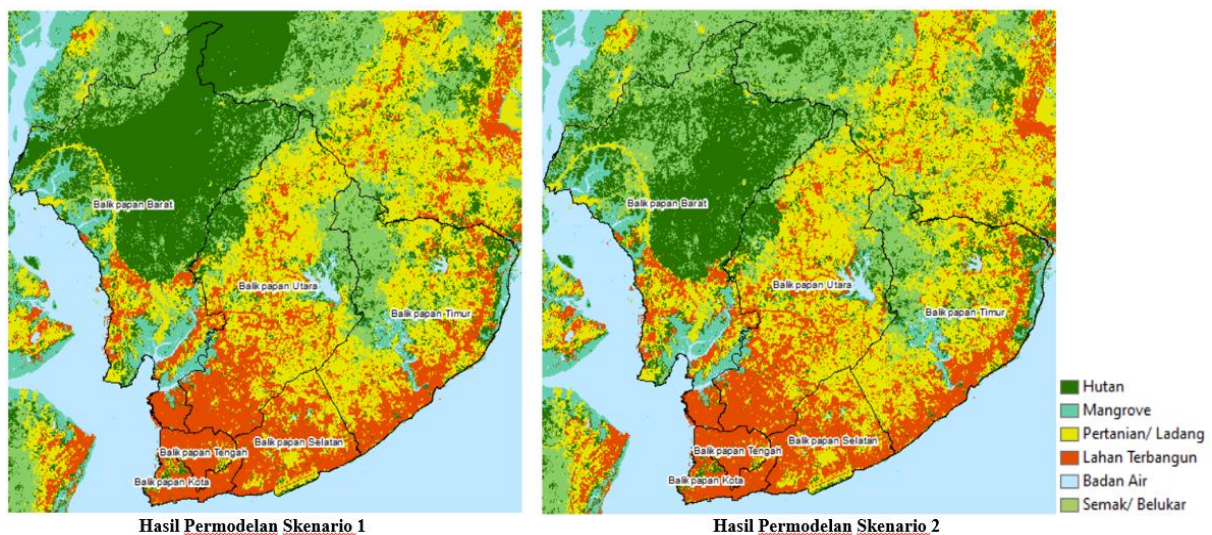
Berdasarkan hasil uji coba pada Tabel 3, didapatkan hasil luasan perubahan sebagaimana Tabel Perubahan Luas Penutup Lahan berdasarkan Skenario 2. Nampak bahwa perubahan penutup lahan lebih logis dibandingkan dengan Skenario 1, di mana kelas hutan cenderung memiliki luasan yang stabil karena tidak diperbolehkan adanya perubahan. Sebaliknya, penutup lahan yang dimungkinkan untuk berubah justru menunjukkan peningkatan luasan, seperti pada kelas lahan terbangun dan terbuka, semak, dan pertanian. Konversi terbesar terjadi pada kelas penutup lahan semak yang berubah menjadi kelas lahan terbangun dan terbuka. Penelitian Samat et al. (2020) menunjukkan bahwa konversi lahan semak menjadi area terbangun sering kali disebabkan oleh tekanan pembangunan yang tinggi di daerah peri-urban. Selain itu, penelitian Prasetyo et al. (2019) di Kalimantan Timur menemukan bahwa perlindungan kawasan hutan melalui kebijakan tata ruang yang berbasis data spasial mampu mempertahankan stok karbon dan mengurangi tekanan pada lahan konservasi. Ditinjau dari perbedaan antara Skenario 1 dan 2 berdasarkan gambar, Skenario 2 lebih mencerminkan kondisi lapangan yang sebenarnya, sebagaimana disarankan oleh Chakraborty (2020), yang menyatakan bahwa skenario berbasis konservasi lebih relevan

dalam mempertahankan ekosistem regional dibandingkan skenario yang lebih permisif terhadap perubahan penggunaan lahan.

Tabel 4. Perubahan Luas Penutup Lahan berdasarkan Skenario 2

No	Landcover	2018		2020		2030	
		Ha	%	Ha	%	Ha	%
1	Hutan	2.462.961	24,05	1.767.769	17,26	1,765,725	17,24
2	Mangrove/Bakau	599.781	5,86	547.792	5,35	545,878	5,33
3	Pertanian	1.514.159	14,79	2.434.864	23,78	2,678,058	26,15
4	Lahan Terbangun dan Terbuka	815.983	7,97	1.202.955	11,75	1,548,151	15,12
5	Badan Air	2.179.091	21,28	2.117.697	20,68	2,111,775	20,62
6	Semak	2.667.527	26,05	2.168.425	21,18	1,589,915	15,53
Total		10.239.502	100	10.239.502	100	10.239.502	100

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025



Gambar 7. Perbandingan Hasil Pemodelan Skenario 1 dan 2

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Hasil simulasi LCM menunjukkan dua skenario utama: skenario dasar dan skenario *Protecting Forest Areas* (PFA). Pada skenario dasar, ekspansi permukiman dan kawasan terbangun paling tinggi terjadi di Balikpapan Utara dan Selatan, dengan konversi lahan semak dan pertanian secara signifikan. Secara ekologis, hal ini menurunkan stok karbon, mempercepat fragmentasi hutan kota, serta meningkatkan kerentanan terhadap banjir dan penurunan kualitas udara (Lakshita & Rahayu, 2021; Seto et al., 2012). Hilangnya tutupan vegetasi juga berdampak pada degradasi habitat mangrove di Balikpapan Timur, yang berfungsi penting sebagai penahan abrasi pesisir (Suhartini et al., 2020). Dari sisi sosial-ekonomi, skenario ini memang mendorong pertumbuhan perumahan dan komersial yang dapat meningkatkan PDRB lokal, namun berisiko menimbulkan ketimpangan spasial karena akses ruang terbuka hijau semakin berkurang (Firman, 2014).

Sebaliknya, pada skenario PFA, kawasan hutan dan mangrove dipertahankan sebagai zona lindung. Secara ekologis, hal ini menjaga kapasitas penyerapan karbon, melindungi biodiversitas, dan menurunkan risiko bencana hidrometeorologi (Lambin & Meyfroidt, 2011; Sievers, 2023). Di Balikpapan Timur, perlindungan kawasan mangrove tidak hanya mempertahankan stok karbon, tetapi juga memperkuat ketahanan pesisir terhadap abrasi dan intrusi air laut. Dari sisi sosial-ekonomi, skenario ini membuka peluang bagi pengembangan ekowisata, jasa lingkungan, dan program konservasi berbasis masyarakat (Pratiwi et al., 2022). Namun, keterbatasan lahan untuk pembangunan baru dapat menimbulkan tantangan, sehingga diperlukan insentif investasi hijau dan strategi pemanfaatan intensif pada lahan terbangun (Bappenas, 2023).

Perbandingan kedua skenario menegaskan bahwa skenario dasar mencerminkan tren pembangunan jangka pendek, sementara skenario PFA memberikan manfaat ekologis dan sosial-ekonomi yang lebih berkelanjutan bagi Balikpapan. Hal ini menunjukkan bahwa perlindungan kawasan lindung harus menjadi prioritas dalam tata ruang kota untuk menjaga keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi dan kelestarian lingkungan.

Perhitungan Stok Karbon

Tabel 3. Hasil Perhitungan Stok Karbon

No	Kondisi	Tahun (Mg.C)			Selisih (Mg.C)
		2018	2024	2030	
1	Kondisi Eksisting 2018 - 2024	6503422.44	5.434.254,68	-	-1.069.167.76
2	Skenario 1 (2024 - 2030)	-	5.434.254,68	5.808.036,81	373.782.13
3	Skenario 2 (2024 - 2030)	-	5.434.254,68	5.326.126,36	-108.128.32

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Hasil perhitungan stok karbon menggunakan InVEST memperlihatkan perbedaan mendasar antara dua skenario. Pada Skenario 2, stok karbon tahun 2024 tercatat sebesar 5,43 juta Mg.C dan menurun menjadi 5,32 juta Mg.C pada 2030. Penurunan ini relatif kecil dan terjadi karena perubahan lahan tetap berlangsung, namun pembatasan konversi kawasan hutan membuat sebagian besar ekosistem berhutan mampu dipertahankan. Secara ekologis, hasil ini sejalan dengan temuan Houghton (2012) yang menegaskan bahwa deforestasi dan degradasi hutan merupakan kontributor utama emisi karbon global, sehingga strategi pembatasan konversi merupakan pendekatan yang efektif untuk menekan emisi.

Sebaliknya, Skenario 1 justru menunjukkan peningkatan stok karbon hingga 5,81 juta Mg.C pada 2030. Namun, peningkatan ini lebih bersifat artefak model, karena mengasumsikan transisi lahan yang tidak realistis, termasuk konversi hutan ke penggunaan lain. Kondisi ini tidak sejalan dengan fakta lapangan urbanisasi Balikpapan yang cenderung mempersempit kawasan berhutan. Argumen ini diperkuat oleh Pearson et al (2014) yang menyatakan bahwa perlindungan hutan tropis lebih efektif mempertahankan cadangan karbon daripada skenario konversi dan reboisasi yang spekulatif. Dengan kata lain, meski

angka skenario 1 tampak lebih tinggi, secara ekologis hasil tersebut tidak valid untuk jangka panjang.

Validasi dengan penelitian terdahulu di Indonesia memperkuat relevansi skenario 2. Syahbana et al., (2020) di Kalimantan Timur menemukan bahwa kedekatan dengan jalan dan kawasan terbangun merupakan faktor dominan perubahan lahan, pola yang juga muncul pada simulasi Balikpapan. Namun, penelitian Syahbana tidak memasukkan dimensi stok karbon, sedangkan studi ini menggabungkan proyeksi lahan dengan perhitungan karbon sehingga lebih komprehensif. Selanjutnya, Ketaren (2023) menunjukkan bahwa pembatasan konversi pada kawasan bernilai konservasi tinggi, termasuk mangrove dan hutan lindung, secara signifikan menekan emisi karbon. Hasil penelitian ini konsisten dengan temuan tersebut, di mana skenario 2 mempertahankan stok karbon terutama melalui perlindungan hutan dan mangrove di Balikpapan Timur.

Selain itu, optimasi melalui Protecting Forest Areas (PFA) memperlihatkan stok karbon dapat dipertahankan bahkan ditingkatkan. Hal ini menguatkan kajian global oleh Griscom et al., (2017) yang menekankan konservasi hutan tropis sebagai strategi mitigasi iklim paling efektif. Integrasi PFA dengan skenario 2 membuktikan bahwa hasil penelitian ini tidak hanya relevan secara lokal, tetapi juga selaras dengan strategi mitigasi global. Dari sisi kebijakan, hasil ini juga konsisten dengan arah Rencana Umum Nasional Kehutanan (KLHK, 2020) yang mendukung perlindungan hutan untuk mencapai komitmen Indonesia terhadap Paris Agreement.

Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi unik: (1) mengisi celah studi terdahulu yang hanya menekankan proyeksi perubahan lahan tanpa menghitung stok karbon, (2) membuktikan secara kritis bahwa skenario dengan angka stok karbon lebih tinggi tidak selalu relevan jika tidak mempertimbangkan keberlanjutan ekologis, dan (3) menegaskan pentingnya kombinasi skenario realistis (Skenario 2) dengan instrumen kebijakan konservasi (PFA) sebagai pendekatan yang valid secara ilmiah, aplikatif secara kebijakan, dan konsisten dengan literatur global maupun nasional.

Skenario Tata Guna Lahan Berbasis Prediksi Stok Karbon

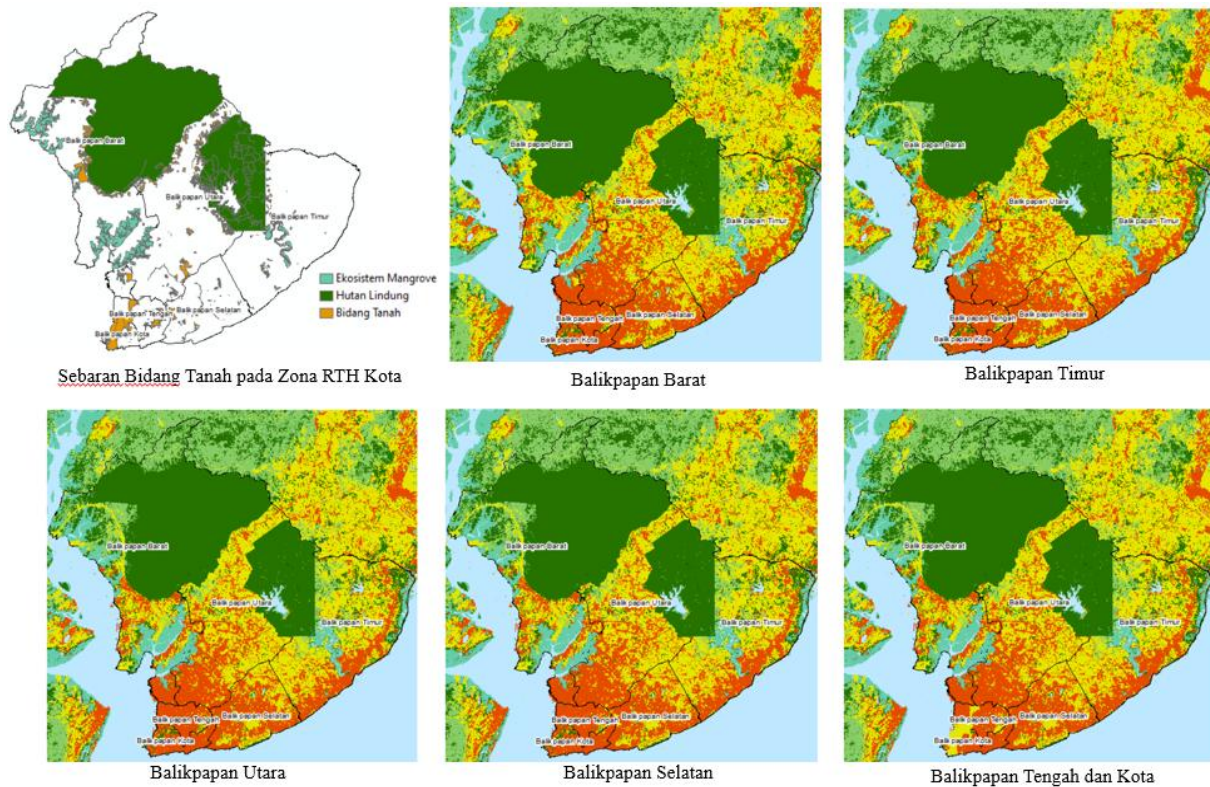
Berdasarkan hasil pengolahan data, skenario tata guna lahan pada Area Penggunaan Lain (APL) disusun menggunakan pendekatan Protecting Forest Areas (PFA), yang membatasi perubahan penggunaan lahan pada area berhutan untuk mempertahankan kapasitas penyimpanan karbon (Greenpeace, 2015; Griscom et al., 2017). Pendekatan ini relevan karena memastikan kawasan hutan tetap dilindungi untuk mendukung keberlanjutan ekosistem di wilayah APL. Simulasi perubahan fungsi penggunaan tanah menjadi non-pertanian dilakukan pada beberapa kecamatan di Balikpapan, seperti Kecamatan Balikpapan Barat, Utara, Timur, Selatan, serta Tengah dan Kota. Penelitian (Houghton, 2012) menunjukkan bahwa deforestasi dan perubahan penggunaan lahan merupakan penyumbang utama emisi karbon global, sehingga strategi perlindungan seperti PFA menjadi langkah signifikan untuk mitigasi perubahan iklim. Selain itu, penelitian Herlawati et al. (2021) yang menggunakan Land Change Modeler (LCM) juga mendukung pentingnya pendekatan berbasis

konservasi dalam menjaga keseimbangan ekologis di wilayah dengan tekanan pembangunan tinggi seperti Kalimantan Timur.

Pendekatan tata guna lahan berbasis stok karbon ini juga didukung oleh penelitian Dewi et al. (2013), yang menunjukkan bahwa perencanaan berbasis tata ruang dapat membantu mengurangi emisi gas rumah kaca serta mendukung target nasional untuk pembangunan rendah emisi. Lebih jauh lagi, integrasi perlindungan kawasan strategis dengan simulasi berbasis data historis, seperti yang ditunjukkan dalam studi Verburg et al. (2004), menegaskan pentingnya kebijakan tata ruang berbasis data spasial untuk mencapai keberlanjutan lingkungan. Dengan demikian, skenario ini tidak hanya membantu menyeimbangkan kebutuhan pembangunan dan perlindungan lingkungan, tetapi juga berkontribusi dalam mendukung kebijakan nasional untuk pengurangan emisi karbon secara signifikan.

Perubahan regulasi dari Permen ATR Nomor 2 Tahun 2011 ke Permen ATR/BPN Nomor 13 Tahun 2021 mencerminkan upaya pemerintah dalam menyederhanakan tata kelola pertanahan dan perencanaan ruang, sebagaimana diatur untuk meningkatkan efisiensi dalam pengelolaan tata guna lahan (Permen ATR Nomor 13 Tahun 2021). Regulasi ini mengintegrasikan izin perubahan penggunaan lahan dengan kesesuaian kegiatan pemanfaatan ruang, memastikan bahwa pembangunan sesuai dengan Rencana Tata Ruang (RTR) yang ada. Langkah ini sangat penting dalam pengelolaan tata guna lahan berbasis stok karbon, di mana setiap perubahan lahan dievaluasi dampaknya terhadap kapasitas penyimpanan karbon menggunakan model simulasi seperti InVEST dan Land Change Modeler (LCM) (Sharp et al., 2018; Eastman, 2016). Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa pendekatan berbasis tata ruang dapat membantu mengidentifikasi pola perubahan penggunaan lahan yang lebih realistis, khususnya dengan data historis (Herlawati et al., 2021). Dengan demikian, tata kelola yang terintegrasi ini mendukung pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan, memastikan bahwa pembangunan tidak hanya memenuhi kebutuhan saat ini tetapi juga mempertimbangkan dampaknya terhadap lingkungan di masa depan.

Sebagai pendukung utama implementasi skenario berbasis stok karbon, kajian dampak terhadap keberlanjutan ekosistem dan ekonomi lokal menjadi sangat penting. Studi seperti yang dilakukan oleh Le et al. (2014) menunjukkan bahwa perlindungan hutan dalam konteks tata guna lahan memberikan manfaat ganda, tidak hanya dalam pengurangan emisi karbon tetapi juga dalam mendukung penghidupan masyarakat sekitar melalui jasa ekosistem seperti perlindungan sumber daya air dan pengendalian erosi. Implementasi skenario ini juga mendukung kebijakan global seperti Paris Agreement, yang menekankan pengurangan emisi gas rumah kaca melalui pendekatan berbasis lahan. Dengan demikian, kombinasi kebijakan nasional dan pendekatan berbasis ilmiah ini memberikan kerangka kerja yang holistik untuk tata guna lahan yang berkelanjutan di Indonesia.



Gambar 8 Permodelan Perhitungan Stok Karbon Optimasi Skenario 2 pada wilayah kecamatan di Kota Balikpapan

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Tabel 4. Hasil Perhitungan Optimasi Skenario 2

No	Kondisi	Tahun (Mg.C)		Selisih (Mg.C)
		2024	2030	
1	Skenario 2 (2024 - 2030)	5.434.254,68	5.326.126,36	-108.128,32
2	Optimasi Skenario 2	5.434.254,68	6.303.862,82	869.608,14

Sumber: Penulis, diolah Tahun 2025

Berdasarkan Tabel 4 Hasil Perhitungan Optimasi Skenario 2, terlihat bahwa skenario dasar tanpa optimasi menghasilkan penurunan stok karbon sebesar -108.128,32 Mg.C dari tahun 2024 ke 2030. Sebaliknya, optimasi pada Skenario 2 menunjukkan peningkatan stok karbon sebesar 869.608,14 Mg.C pada periode yang sama, mencapai total 6.303.862,82 Mg.C pada tahun 2030. Optimasi ini dicapai melalui kebijakan mempertahankan kawasan lindung dan kawasan lindung setempat sebagaimana diatur dalam Peraturan Walikota Kota Balikpapan Nomor 22 Tahun 2021 tentang Rencana Detail Tata Ruang dan Peraturan Zonasi (RDTR-PZ). Selain itu, pemanfaatan lahan sesuai sertifikat pertanian juga dipertahankan untuk memastikan keberlanjutan penggunaan lahan sesuai peruntukan (Peraturan Pemerintah Nomor 24 Tahun 1997 tentang Pendaftaran Tanah).

Perlindungan kawasan lindung terbukti berperan penting dalam mempertahankan stok karbon sekaligus mengurangi tekanan urbanisasi. Suhartini et al. (2020) menegaskan bahwa perlindungan hutan melalui kebijakan zonasi mampu menjaga kapasitas penyimpanan karbon

secara signifikan. Sejalan dengan itu, Firman et al. (2019) menyoroti bahwa integrasi kebijakan tata ruang dengan perlindungan kawasan konservasi dapat mengurangi tekanan pembangunan pada lahan bernilai ekologis tinggi. Dalam konteks Balikpapan, penerapan RDTR-PZ serta regulasi lokal seperti Perwali No. 22 Tahun 2021 memperlihatkan strategi adaptif untuk menjaga stok karbon, sekaligus mendukung mitigasi perubahan iklim dan keseimbangan ekologis di kawasan perkotaan.

Pendekatan ini semakin kuat dengan dukungan model proyeksi spasial. Verburg et al. (2004) menunjukkan bahwa model perubahan penggunaan lahan efektif mendukung tata ruang berbasis bukti, sementara Pontius & Malanson (2005) serta Eastman (2016) membuktikan bahwa Land Change Modeler (LCM) mampu mengintegrasikan variabel pendorong seperti jarak jalan, elevasi, dan kondisi lingkungan untuk menghasilkan proyeksi realistis. Hasil penelitian ini konsisten dengan Griscom et al. (2017) yang menekankan solusi berbasis perlindungan alam sebagai strategi utama mitigasi perubahan iklim. Dengan mengoptimalkan skenario konservasi (Skenario 2) melalui perlindungan hutan dan mangrove, Balikpapan tidak hanya menjaga stok karbon, tetapi juga memperoleh manfaat ekosistem tambahan seperti pengendalian erosi, stabilitas iklim lokal, dan pelestarian biodiversitas.

Integrasi pendekatan *Protecting Forest Areas (PFA)* dengan model seperti *Land Change Modeler (LCM)* selaras dengan upaya global dan lokal untuk mengatasi dampak perubahan penggunaan lahan terhadap kapasitas karbon dan pengelolaan ekosistem. Sebagai contoh, Bera et al. (2024) menyoroti manfaat penggunaan LCM dan *Ecosystem Services Modeler (ESM)* dalam menganalisis dinamika perubahan penggunaan lahan dan dampaknya terhadap stok karbon di Bengal Barat, India, dengan menekankan peran penting kawasan hutan dalam menyimpan karbon. Pendekatan ini relevan dengan fokus penelitian Anda yang melibatkan perlindungan kawasan APL berhutan di Balikpapan, yang juga tercermin dalam hasil penelitian di kawasan karst Bulusaraung, Sulawesi Selatan, di mana strategi konservasi hutan mampu mempertahankan kapasitas penyimpanan karbon yang tinggi (Ansari et al., 2024). Dari perspektif kebijakan, penelitian Salim et al. (2019) di Kabupaten Sintang, Kalimantan Barat, menunjukkan bahwa perencanaan skenario berbasis multi-pemangku kepentingan, termasuk skenario "hijau" yang mengutamakan konservasi, berhasil mencegah emisi karbon yang signifikan dan deforestasi dibandingkan dengan skenario *business-as-usual*. Pendekatan ini mendukung argumen bahwa integrasi strategi tata guna lahan berkelanjutan dapat mencapai keseimbangan antara pembangunan perkotaan dan konservasi karbon. Selain itu, penelitian El-Hamid & Hafiz (2022) menunjukkan bahwa LCM dan model *Cellular Automata Markov* efektif dalam memproyeksikan skenario penggunaan lahan masa depan dan potensi karbon, sejalan dengan metode prediksi dalam penelitian Anda di Balikpapan. Rekomendasi mereka tentang pengelolaan lahan berkelanjutan dan reforestasi relevan dengan strategi berbasis PFA yang Anda terapkan.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan strategi tata guna lahan berbasis stok karbon melalui pendekatan Protecting Forest Areas (PFA) di Kota Balikpapan dapat menjadi solusi efektif untuk menjaga keseimbangan antara pembangunan dan konservasi lingkungan. Dengan menggunakan model prediksi perubahan penggunaan lahan melalui Land Change Modeler (LCM), penelitian ini memproyeksikan dinamika stok karbon pada tahun 2024 dan 2030. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa optimasi skenario berbasis PFA mampu meningkatkan stok karbon hingga 6,30 juta Mg.C pada 2030, dibandingkan skenario lain yang justru mengalami penurunan signifikan. Peningkatan ini dicapai melalui pembatasan konversi lahan berhutan menjadi permukiman atau aktivitas non-konservasi lainnya, yang sejalan dengan kebijakan tata ruang berbasis data spasial. Penelitian ini menegaskan pentingnya integrasi antara perencanaan tata ruang berbasis konservasi dengan kebijakan nasional dalam mendukung target pembangunan rendah emisi. Kombinasi pendekatan berbasis model (LCM) dan kebijakan perlindungan kawasan strategis terbukti mampu memberikan manfaat ekologis, sosial, dan ekonomi, khususnya melalui perlindungan hutan dan mangrove sebagai penyerap karbon utama. Dengan demikian, hasil studi ini dapat menjadi panduan praktis bagi kota-kota lain di Indonesia yang menghadapi tantangan serupa dalam mengelola urbanisasi dan mitigasi perubahan iklim.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki sejumlah keterbatasan. Pertama, resolusi data spasial yang digunakan (citra satelit Sentinel-2 dan peta tematik 1:50.000) masih menyisakan potensi bias detail spasial, terutama pada area dengan heterogenitas tinggi. Kedua, asumsi model LCM lebih menekankan pada faktor biofisik (jarak ke jalan, sungai, elevasi, dan kemiringan) tanpa memasukkan faktor sosial-ekonomi seperti dinamika kependudukan, investasi properti, atau kepatuhan terhadap kebijakan tata ruang, yang pada praktiknya sangat memengaruhi perubahan penggunaan lahan. Ketiga, analisis ekonomi terkait valuasi karbon maupun biaya-*opportunity* lahan konservasi belum sepenuhnya dieksplorasi, padahal hal tersebut penting untuk mendukung kebijakan berbasis insentif.

Untuk penelitian lanjutan, disarankan: (1) menggunakan data spasial resolusi lebih tinggi atau integrasi data multi-sumber (misalnya LiDAR atau UAV) untuk meningkatkan akurasi pemetaan; (2) menggabungkan model spasial dengan analisis sosial-ekonomi agar proyeksi lebih mencerminkan kondisi nyata; (3) melakukan analisis valuasi ekonomi karbon dan mekanisme insentif, sehingga rekomendasi kebijakan lebih aplikatif; serta (4) memperluas kajian pada aspek partisipasi masyarakat dan peran sektor swasta, guna memastikan implementasi strategi tata guna lahan berbasis stok karbon lebih inklusif dan berkelanjutan.

Daftar Pustaka

- Ansari, F., Narendra, B. H., Putri, I. A. S. L. P., Tata, H. L., Susi Dharmawan, I. W., Rachmat, H. H., Suharti, S., Windyoningrum, A., Khotimah, H., Sayektiningsih, T., & Tabbas, S. (2024). Forest Cover Change and Its Carbon Dynamic of The Karst Area in Bulusaraung, South Sulawesi, Indonesia. *Forest Science and Technology*, 20(2), 179–193. <https://doi.org/10.1080/21580103.2024.2343344>
- Bappenas. (2023). *Laporan Kinerja Kementerian PPN/Bappenas Tahun 2023*. Kementerian PPN/Bappenas. https://perpustakaan.bappenas.go.id/e-library/file_upload/koleksi/dokumenbappenas/konten/Dokumen_2025/Konten/LKJ_KEMENTERIAN_TAHUN_2023_FINAL.pdf
- Bera, D., Chatterjee, N. Das, Dinda, S., Ghosh, S., Dhiman, V., Bashir, B., Calka, B., & Zhran, M. (2024). Assessment of Carbon Stock and Sequestration Dynamics in Response to Land Use and Land Cover Changes in a Tropical Landscape. *Land*, 13(1689), 1–22. <https://doi.org/10.3390/land13101689>
- Chaiklang, P., Karthe, D., Babel, M. S., Giessen, L., & Schusser, C. (2024). Reviewing changes in mangrove land use over the decades in Thailand: Current responses and challenges. *Trees, Forests and People*, 17(2), 100630. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100630>
- Chakraborty, A. (2020). How Scenario Planning Affects Regional and Local Planning. *Lincoln Institute of Land Policy Working Paper*. https://www.lincolninst.edu/app/uploads/legacy-files/pubfiles/chakraborty_wp20ac1.pdf
- Dewi, S., Johana, F., Ekadinata, A., & Agung, P. (2013). *Perencanaan Penggunaan Lahan untuk Strategi Pembangunan Rendah Emisi (Land-Use Planning for Low-Emission Development Strategies/LUWES)*. World Agroforestry Centre.
- Eastman, J. R. (2016). *TerrSet Manual: Geospatial Monitoring and Modeling System*. Clark University. <https://www.clarku.edu/centers/geospatial-analytics/terrset/>
- El-Hamid, H. T. A., & Hafiz, M. A. (2022). Modeling of Carbon Sequestration with Land Use And Land Cover in The Northeastern Part of The Nile Delta, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1267), 1–12. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-10462-2>
- Firman, T. (2014). The dynamics of Jabodetabek development: The challenge of urban governance. In H. Hill (Ed.), *Regional Dynamics in a Decentralized Indonesia* (pp. 368–385). ISEAS–Yusof Ishak Institute.
- Firman, T., Kombaitan, B., & Pradono, P. (2019). Perencanaan Tata Ruang dan Dinamika Perubahan Penggunaan Lahan di Wilayah Perkotaan Indonesia. *Jurnal Tata Ruang Indonesia*, 15(1), 45–56.
- Ghotama, D. Y., Damayanti, A., Indra, T. L., & Dimiyati, M. (2021). Monitoring agricultural land-use change in Palaran Subdistrict, Samarinda City, East Kalimantan Province in 2006, 2014, and 2020. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 716(1), 12019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/716/1/012019>

- Greenpeace. (2015). *Nol Deforestasi dalam Praktik: Pendekatan Stok Karbon Tinggi*. Greenpeace.
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural Climate Solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Herlawati, H., Nidaul Khasanah, F., Dina Atika, P., Sari, R., & Handayanto, R. T. (2021). Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan dan Pola Berdasarkan Citra Landsat Multi Waktu dengan Land Change Modeler (LCM). *Jurnal Komtika (Komputasi Dan Informatika)*, 5(1), 10–18. <https://doi.org/10.31603/komtika.v5i1.5139>
- Houghton, R. A. (2012). Carbon emissions and the drivers of deforestation and forest degradation in the tropics. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 4(6), 597–603. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2012.06.006>
- Jaya, L. M. G. (2020). A Review of Geospatial Information of Carbon Stocks for Forestry Management, Environmental Protection and Spatial Planning: A Case Study of Southeast Sulawesi, Indonesia. *Land Science*, 2(1), 34. <https://doi.org/10.30560/ls.v2n1p34>
- Ketaren, D. G. K. (2023). Peranan Kawasan Mangrove dalam Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca di Indonesia. *Jurnal Kelautan dan Perikanan Terapan*, 1(0), 73–79. <https://doi.org/10.15578/jkpt.v1i0.12050>
- KLHK. (2020). *Rencana Strategis Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Tahun 2020–2024*. https://www.menlhk.go.id/cadmin/uploads/1602810476_72c45c6753.pdf
- Lakshita, N. M., & Rahayu, S. (2021). *Urban Dynamics and Carbon Stock Estimation in Salatiga City, Indonesia BT - IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 887(1), 12015. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/887/1/012015>
- Lambin, E. F., & Meyfroidt, P. (2011). Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(9), 3465–3472. <https://doi.org/10.1073/pnas.1100480108>
- Le, H. D., Smith, C., Herbohn, J., & Harrison, S. (2014). More Than Just Trees: Assessing Reforestation Success in Tropical Developing Countries. *Journal of Rural Studies*, 28(1), 5–19. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2011.07.006>
- Leta, M. K., Demissie, T. A., & Tränckner, J. (2021). Modeling and Prediction of Land Use Land Cover Change Dynamics Based on Land Change Modeler (LCM) in Nashe Watershed, Upper Blue Nile Basin, Ethiopia. *Sustainability*, 13(7), 3740. <https://doi.org/10.3390/su13073740>
- Pearson, T. R. H., Brown, S., & Casarim, F. M. (2014). Carbon emissions from tropical forest degradation caused by logging. *Environmental Research Letters*, 9(3), 34017. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/3/034017>
- Peraturan Pemerintah Nomor 24. (1997). *Tentang Pendaftaran Tanah*. Pemerintah Pusat.

- Peraturan Walikota Kota Balikpapan Nomor 22. (2021). *Tentang Rencana Detail Tata Ruang dan Peraturan Zonasi Kota Balikpapan Tahun 2021-2041*. Pemerintah Daerah.
- Permen ATR Nomor 13. (2021). *Tentang Pelaksanaan Kesesuaian Kegiatan Pemanfaatan Ruang dan Sinkronisasi Program Pemanfaatan Ruang*. Pemerintah Pusat.
- Permen ATR Nomor 2. (2011). *Tentang Pedoman Pertimbangan Teknis Pertanahan dalam Penerbitan Izin Lokasi, Penetapan Lokasi dan Izin Perubahan Penggunaan Tanah*. Pemerintah Pusat.
- Prasetyo, L. B., Setiawan, Y., & Hultera. (2019). Model Spasial Potensi Deforestasi 2020 & 2024 dan Pendekatan Pencegahannya [IPB University]. In *Kabupaten Kutai Barat*. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/98011>
- Pratiwi, A. B., Darmawan, A., & Arsad, S. (2022). Analisis Kesesuaian dan Daya Dukung Pengembangan Ekowisata Mangrove di Rejoso, Pasuruan, Jawa Timur. *Jurnal Kebijakan Sosial Ekonomi Kelautan dan Perikanan*, 12(1), 39–48. <https://doi.org/10.15578/jksekp.v12i1.10441>
- Salim, A., Hidayat, S., Wulandari, R., Pratama, C. D., & Ichwani, S. N. (2019). A Green Scenario for Sustainable Landscape Planning: The Case Study in Sintang Regency, West Kalimantan Province. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 399(012080), 1–11. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/399/1/012080>
- Samat, N., Mahamud, M. A., Tan, M. L., Maghsoodi Tilaki, M. J., & Tew, Y. L. (2020). Modelling Land Cover Changes in Peri-Urban Areas: A Case Study of George Town Conurbation, Malaysia. *Land*, 9(10), 373. <https://doi.org/10.3390/land9100373>
- Seto, K. C., Güneralp, B., & Hutyra, L. R. (2012). Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(40), 16083–16088. <https://doi.org/10.1073/pnas.1211658109>
- Shalihah, A., Anggraini, E., & Sapanli, K. (2024). *Analisis Nilai Ekonomi Karbon dan Strategi Pengelolaan Ruang Terbuka Hijau (Studi Kasus: Hutan Kota Gelora Bung Karno Jakarta)* [IPB University]. <https://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/158373>
- Sharma, R., Nehren, U., Rahman, S. A., Meyer, M., Rimal, B., Seta, G. A., & Baral, H. (2018). Modeling Land Use and Land Cover Changes and Their Effects on Biodiversity in Central Kalimantan, Indonesia. *Land*, 7(2), 57. <https://doi.org/10.3390/land7020057>
- Sharp, R., Douglass, J., Wolny, S., Arkema, K. K., Bernhardt, J. R., Bierbower, W., & Tallis, H. (2018). *InVEST 3.6.0 User's Guide: The Natural Capital Project, The Nature Conservancy, and World Wildlife Fund*. Stanford University.
- Sievers, M. (2023). Co-occurrence of biodiversity, carbon storage, coastal protection, and fish and invertebrate production to inform global mangrove conservation planning. *Science of The Total Environment*, 886, 163992. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163992>
- Surya, B., Salim, A., Hernita, H., Suriani, S., Menne, F., & Rasyidi, E. S. (2021). Land Use Change, Urban Agglomeration, and Urban Sprawl: A Sustainable Development Perspective of

- Makassar City, Indonesia. *Land*, 10(6), 556. <https://doi.org/10.3390/land10060556>
- Syahbana, J. A., Prasetyo, L. B., & Surya, A. (2020). Analisis Perubahan Penutup Lahan Berbasis Land Change Modeler (LCM) di Kalimantan Timur. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan*, 10(2), 123–135.
- Verburg, P. H., Schot, P. P., Dijst, M. J., & Veldkamp, A. (2004). Land Use Change Modelling: Current Practice and Research Priorities. *GeoJournal*, 61(4), 309–324. <https://doi.org/10.1007/s10708-004-4946-y>