

**INTEGRASI PENGINDERAAN JAUH DAN CELLULAR AUTOMATA
UNTUK PREDIKSI PERUBAHAN TUTUPAN LAHAN DAN STOK
KARBON DI KABUPATEN LAMPUNG TENGAH**

(Tesis)

Oleh

**ERY AMALIA ANANDA
NPM 2320011005**



**PROGRAM PENDIDIKAN STRATA 2
PROGRAM STUDI MAGISTER ILMU LINGKUNGAN
PASCASARJANA UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

INTEGRASI PENGINDERAAN JAUH DAN CELLULAR AUTOMATA UNTUK PREDIKSI PERUBAHAN TUTUPAN LAHAN DAN STOK KARBON DI KABUPATEN LAMPUNG TENGAH

Oleh

Ery Amalia Ananda

Perubahan tutupan lahan memengaruhi dinamika stok karbon terestrial dan berimplikasi pada mitigasi iklim. Kabupaten Lampung Tengah menghadapi tekanan pembangunan tinggi yang mendorong alih fungsi lahan. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan tutupan lahan 2013–2023, memprediksi kondisi 2043 dengan model Cellular Automata–Logistic Regression (CA-LR), mengestimasi perubahan stok karbon, serta merumuskan strategi pengendalian berbasis mitigasi karbon. Metode menggunakan penginderaan jauh dan SIG dengan citra satelit multiwaktu (2013, 2018, 2023). Estimasi stok karbon mengacu pada pedoman IPCC dan literatur terkait.

Hasil menunjukkan penurunan pertanian lahan kering dan lahan kosong, sementara pertanian lahan basah, hutan, dan lahan terbangun meningkat. Proyeksi 2043 memperlihatkan lahan terbangun dominan (naik 29,06%), sedangkan hutan hanya bertambah 1,34%. Stok karbon naik dari 52,07 juta ton C (2013) menjadi 54,62 juta ton C (2023), namun diperkirakan turun menjadi 52,98 juta ton C pada 2043 akibat ekspansi lahan terbangun dan berkurangnya lahan pertanian. Penelitian menyimpulkan perlunya pengendalian lahan terbangun, perlindungan hutan, dan integrasi stok karbon dalam perencanaan tata ruang wilayah. Temuan ini menegaskan pentingnya kebijakan tata ruang yang berorientasi pada keberlanjutan dan mitigasi perubahan iklim, sekaligus memberikan dasar ilmiah bagi perumusan strategi pembangunan daerah yang lebih adaptif dan berwawasan lingkungan.

Kata Kunci: perubahan tutupan lahan, stok karbon, Cellular Automata, penginderaan jauh, Kabupaten Lampung Tengah

ABSTRACT

INTEGRATING REMOTE SENSING AND CELLULAR AUTOMATA TO PREDICT LAND COVER CHANGE AND CARBON STOCK IN CENTRAL LAMPUNG REGENCY

By

Ery Amalia Ananda

Land use change significantly affects terrestrial carbon stock dynamics and has major implications for climate change mitigation. Central Lampung Regency faces increasing development pressure, leading to substantial land conversion. This study aims to analyze land use changes during 2013–2023, predict land use in 2043 using the Cellular Automata–Logistic Regression (CA-LR) model, estimate carbon stock changes, and propose land use control strategies based on carbon mitigation. Remote sensing and Geographic Information System (GIS) approaches were applied using multi-temporal satellite imagery (2013, 2018, 2023). Carbon stock estimation was calculated based on land use area and carbon stock factors derived from IPCC guidelines and relevant literature.

Results show that dryland agriculture and vacant land decreased, while wetland agriculture, forest, and built-up areas increased. The 2043 projection indicates built-up land will dominate (up 29.06%), while forest area rises only 1.34%. Carbon stock increased from 52.07 million tons C in 2013 to 54.62 million tons C in 2023, but is expected to decline to 52.98 million tons C by 2043 due to built-up expansion and reduced agricultural land. The study concludes that effective land use control, forest protection, and integration of carbon considerations into spatial planning are essential. These findings highlight the urgency of sustainable spatial policies and provide a scientific basis for regional development strategies that are adaptive and environmentally sound.

Keywords: land use change, carbon stock, Cellular Automata, remote sensing, Central Lampung Regency

Judul Tesis

: Integrasi Penginderaan Jauh dan Cellular Automata
untuk Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan dan
Stok Karbon di Kabupaten Lampung Tengah

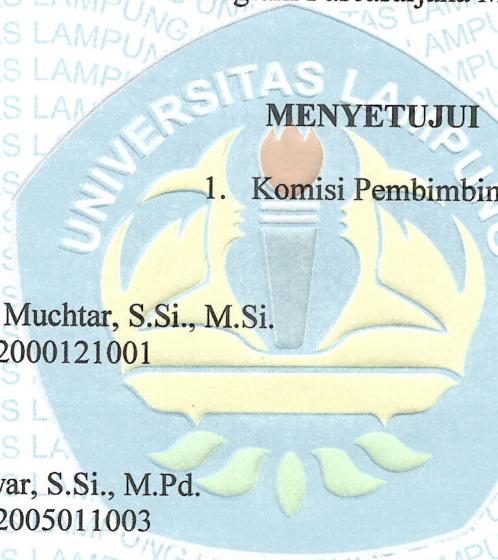
Nama Mahasiswa : Ery Amalia Ananda

Nomor Pokok Mahasiswa : 2320011005

Program Studi : Magister Ilmu Lingkungan

Fakultas

: Program Pascasarjana Multidisiplin



1. Komisi Pembimbing

Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si.

NIP 197206262000121001

Dr. Dedy Miswar, S.Si., M.Pd.

NIP 197411082005011003

2. Ketua Program Studi Magister Ilmu Lingkungan

Universitas Lampung

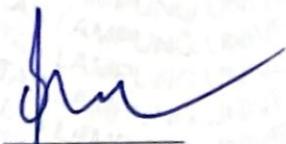
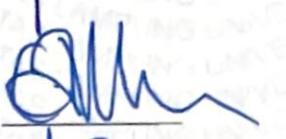
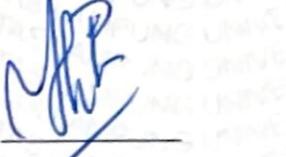
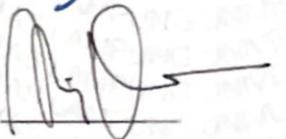
Hari Kaskoyo, S.Hut., M.P., Ph.D.

NIP. 196906011998021002

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si.

Sekretaris : Dr. Dedy Miswar, S.Si., M.Pd.

Penguji
Bukan Pembimbing : Hari Kaskoyo, S.Hut., M.P., Ph.D.

Anggota : Dr. Arief Darmawan, S.Hut., M.Sc.



2. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung

Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si.
NIP.196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 08 Januari 2026

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan dengan sebenarnya bahwa:

1. Tesis dengan judul: "**INTEGRASI PENGINDERAAN JAUH DAN CELLULAR AUTOMATA UNTUK PREDIKSI PERUBAHAN TUTUPAN LAHAN DAN STOK KARBON DI KABUPATEN LAMPUNG TENGAH**" adalah karya saya sendiri dan saya tidak melakukan penjiplakan atau pengutipan atas karya penulis lain dengan cara yang tidak sesuai etika ilmiah yang berlaku dalam masyarakat akademik atau yang disebut *plagiarisme*,
2. Hak intelektual atas karya saya ini diserahkan sepenuhnya kepada Universitas Lampung.

Atas pernyataan ini, apabila dikemudian hari ternyata ditemukan adanya ketidakbenaran, saya bersedia menanggung akibat dan sanksi yang diberikan kepada saya, saya bersedia dan sanggup dituntut sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung,

Yang membuat pernyataan,



Cry Amalia Ananda

2320011005

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama lengkap Ery Amalia Ananda, lahir di Kota Bandar Lampung pada tanggal 15 Agustus 1998. Penulis merupakan anak tunggal dari pasangan Bapak Endarto Andal dan Ibu Suresna Sari, S.E. Penulis merasa sangat beruntung dan bersyukur karena memiliki orang tua yang hebat serta keluarga yang harmonis. Berkat doa, dukungan dan semangat dari orang tua dan keluarga besar maka penulis bisa melanjutkan pendidikan lebih tinggi. Hal inilah yang mendasari penulis untuk selalu berbakti kepada kedua orang tua dan mengutamakan keluarga. Penulis mengawali pendidikan di Taman Kanak-Kanak Al-Kautsar Bandar Lampung pada tahun 2003. Setelah itu penulis melanjutkan pendidikan di Sekolah Dasar Al-Kautsar Bandar Lampung. Kemudian, penulis melanjutkan Pendidikan Sekolah Menengah Pertama Al-Kautsar Bandar Lampung. Selanjutnya penulis melanjutkan Pendidikan di Sekolah Menengah Atas Al-Kautsar Bandar Lampung. Selanjutnya pada tahun 2016 penulis diterima sebagai mahasiswa Fakultas Kegirian dan Ilmu Pendidikan Universitas Lampung. Setelah lulus sarjana, penulis memulai karir sebagai guru. Lalu pada tahun 2023 penulis melanjutkan studi Magister Ilmu Lingkungan di Universitas Lampung.

PERSEMBAHAN

Puji syukur tak terhingga kepada allah SWT, atas segala nikmat, karunia, dan rahmat-Nya sehingga tesis ini dapat diselesaikan dengan tepat waktu. Kupersembahkan hasil perjuangan ini kepada :

Kedua orang yang paling berharga dalam hidup, Ayah dan Ibu yang telah memperjuangkan dan mempersesembahkan perjuangannya untuk langkah sukses anaknya. Terima kasih telah menjadi sumber kekuatanku untuk terus bertahan dan melangkah kedepan. Terimakasih juga untuk diri saya, sudah berani bermimpi menghadapi kenyataan dan melangkah sejauh ini.

Kepada Para Pembimbing dan Pendidik yang telah memberikan ilmu, arahan dan motivasi hingga karya ini dapat terselesaikan dengan baik.

Serta kepada diri sendiri yang telah dengan kuat bertahan hingga perjalanan ini tetap diselesaikan.

SANWACANA

Assalamu'alaikum wr. wb.

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini. Tesis ini berjudul "**Integrasi Penginderaan Jauh dan Cellular Automata untuk Prediksi Perubahan Tutupan Lahan dan Stok Karbon di Kabupaten Lampung Tengah**". Penelitian ini bertujuan untuk memprediksi pola perubahan tutupan lahan dan stok karbon.

Penulis menyadari bahwa tesis ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun dari berbagai pihak untuk perbaikan di masa mendatang. Penulis juga mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A., I.P.M selaku Rektor Universitas Lampung.
2. Prof. Dr. Ir. Murhadi, M.Si., sebagai Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung.
3. Hari Kaskoyo, S. Hut., M.P., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Pascasarjana Ilmu Lingkungan sekaligus Dosen Penguji yang telah memberikan masukan, koreksi, serta saran dan segala bentuk bantuan dalam kesulitan yang dihadapi sehingga penyusunan tesis ini menjadi lebih baik.
4. Dr. Alimuddin Muchtar, S.Si., M.Si. dan Dr. Dedy Miswar, S.Si., M.Pd. selaku Dosen Pembimbing dengan penuh perhatian telah memberikan ilmu, bimbingan, saran, pengarahan, motivasi, serta semangat sehingga penulis dapat menyelesaikan tesis ini.
5. Dr. Arief Darmawan, S.Hut., M.Sc. selaku Dosen Penguji yang telah memberikan masukan, koreksi, serta saran sehingga penyusunan tesis ini

- menjadi lebih baik.
6. Seluruh dosen Program Studi Magister Ilmu Lingkungan Pascasarjana Universitas Lampung yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan pengalaman selama penulis menjadi mahasiswa, serta staff/karyawan yang memberikan bantuan dan kerjasamanya selama ini.
 7. Kedua orang tuaku tercinta, Ibu (Suresna Sari, S.E.) dan Ayah (Endarto Andal) yang selalu memberikan motivasi, dukungan, doa restu, kasih sayang, perhatian yang tak pernah putus kepada penulis dalam setiap langkah perjalanan hidup dan penyusunan tesis ini.
 8. Adikku tersayang M. Dzakwan Hidayat yang selalu menemani dan menyemangati serta doa keluarga besar atas semua limpahan kasih sayang, doa, nasihat, semangat, kebahagiaan, dan perhatian yang tak pernah putus kepada penulis selama ini.
 9. Teman-teman seperjuangan Angkatan 2023 di Magister Ilmu Lingkungan Pascasarjana Universitas Lampung atas semangat berjuang dan bantuan yang diberikan kepada penulis selama ini.
 10. Semua pihak yang telah memberikan dukungan dan membantu penulis hingga terselesaikan tesis ini.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

Bandar Lampung, 7 Januari 2026

Penulis,

Ery Amalia Ananda

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Identifikasi Masalah	6
1.3. Rumusan Masalah.....	6
1.4. Tujuan Penelitian.....	7
1.5. Kegunaan Penelitian	7
1.6. Ruang Lingkup Penelitian	8
II. TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1. Kondisi Wilayah Kabupaten Lampung Tengah	9
2.1.1. Kondisi Geologi, Topografi, dan Morfologi Kabupaten Lampung Tengah	9
2.1.2. Kondisi Demografi Kabupaten Lampung Tengah	11
2.2. Pengertian Geografi	13
2.2.1. Konsep Geografi	13
2.2.2. Pendekatan Geografi	15
2.3. Klasifikasi Tutupan Lahan.....	16
2.3.1. Pengertian Tutupan Lahan	16
2.3.2. Klasifikasi Tutupan Lahan	17
2.4. Nilai Ekonomi Lahan (<i>Land Rent</i>)	19
2.4.1. Teori Nilai Ekonomi Lahan (<i>Land Rent</i>)	19
2.4.2. Hubungan Prediksi Perubahan Lahan dengan Nilai Ekonomi Lahan (<i>Land Rent</i>).....	20
2.5. Sistem Informasi Geografis dan Penginderaan Jauh	21
2.5.1. Pengertian Sistem Informasi Geografis	21
2.5.2. Penginderaan Jauh.....	22
2.6. Model.....	22
2.6.1. Faktor Pendorong	25
2.6.2. <i>Cellular Automata</i> (CA).....	26
2.6.3. <i>Logistic Regression</i>	27
2.6.4. Uji Validitas	29
2.7. Stok Karbon	29
2.7.1. Perubahan Tutupan Lahan dan Pengaruhnya terhadap Stok Karbon	33
2.8. Penelitian Relevan	36
2.9. Kerangka Penelitian.....	38

III. METODE PENELITIAN	40
3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian.....	40
3.2. Variabel Penelitian	40
3.3. Definisi Operasional Variabel	41
3.4. Alat dan Bahan Penelitian	43
3.4.1. Alat Penelitian	43
3.4.2. Bahan Penelitian	43
3.5. Jenis dan Sumber Data	43
3.6. Metode dan Analisis Data.....	44
3.7. Tahapan Penelitian	44
3.8. Teknik Analisis Data	51
3.9. Estimasi dan Prediksi Stok Karbon	52
IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	56
4.1. Deskripsi Daerah Penelitian	56
4.1.1. Keadaan Geografis	56
4.1.2. Kondisi Sosial dan Budaya Kabupaten Lampung Tengah.....	59
4.2. Hasil Penelitian.....	65
4.2.1. Tutupan Lahan di Kabupaten Lampung Tengah (2013, 2018, 2023) dan Estimasi Stok Karbon (2013,2018,2023)	65
4.2.1.1. Tutupan Lahan dan Stok Karbon tahun 2013	67
4.2.1.2. Tutupan Lahan dan Stok Karbon tahun 2018	74
4.2.1.3. Tutupan Lahan dan Stok Karbon tahun 2023	81
4.2.2. Analisis Perubahan Tutupan Lahan 2013, 2018, dan 2023.....	88
4.2.3. Hasil Pemodelan dan Prediksi Lahan di Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2043	93
4.2.3.1. Hasil Prediksi Perubahan Tutupan Lahan dan Estimasi Stok Karbon tahun 2043.....	98
4.3. Pembahasan	105
4.3.1. Perubahan Tutupan Lahan di Kabupaten Lampung Tengah.....	105
4.3.2. Prediksi Perubahan Tutupan Lahan di Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2013 - 2043	108
4.3.3. Estimasi Perubahan Stok Karbon di Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2013 - 2043	113
4.3.4. Implikasi Perubahan Tutupan Lahan terhadap Stok Karbon dan Lingkungan di Kabupaten Lampung Tengah	116
4.3.4.1. Dekomposisi Dampak Perubahan Lahan	117
4.3.5. Strategi Pengendalian Berbasis Mitigasi Karbon dan Kependudukan	117
4.3.5.1. Proyeksi 2043 dan Risiko Penurunan Stok Karbon.....	119
4.3.5.2. Implikasi Kebijakan dan Kontribusi Teoritis	120
4.3.6. Keterbatasan Penelitian	121
V. KESIMPULAN DAN SARAN	122
5.1. Kesimpulan	122
5.2. Saran	123
DAFTAR PUSTAKA	124

DAFTAR TABEL

No	Tabel	Halaman
	Tabel 1. Jumlah daerah dan luas menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Lampung tahun 2023	10
	Tabel 2. Luas daerah (dalam km ²) menurut Kecamatan di Kabupaten Lampung Tengah tahun 2023	10
	Tabel 3. Jumlah dan Kepadatan Penduduk menurut Kecamatan di Kabupaten Lampung Tengah tahun 2023	12
	Tabel 4. Sistem Klasifikasi Tutupan Lahan Badan Standarisasi Nasional 2020 ..	18
	Tabel 5. Klasifikasi Tutupan Lahan di Kabupaten Lampung Tengah tahun 2023.....	18
	Tabel 6. Kelebihan dan Kekurangan <i>Model Logistic Regression</i>	28
	Tabel 7. Penelitian Relevan	36
	Tabel 8. Variabel Pendorong Perubahan Tutupan Lahan	42
	Tabel 9. Jenis dan Sumber Data.....	43
	Tabel 10. Dokumen dan Sumber Data.....	45
	Tabel 11. Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah tahun 2013	68
	Tabel 12. Stok Karbon per Kelas Lahan (ton C) tahun 2013	71
	Tabel 13. Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah tahun 2018	74
	Tabel 14. Stok Karbon per Kelas Lahan (ton C) tahun 2018	78
	Tabel 15. Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah tahun 2023	81
	Tabel 16. Stok Karbon per Kelas Lahan (ton C) tahun 2023	84
	Tabel 17. Perubahan Tuutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah (Ha) tahun 2013 dan 2018	88
	Tabel 18. Perubahan Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah (Ha) tahun 2018 dan 2023	89
	Tabel 19. Matrik Arah Perubahan Luas Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2013, 2018 dan 2023	91
	Tabel 20. Model Luas Perubahan Luas Lahan Tahun 2013 dan 2023	95
	Tabel 21. Luas Tutupan Lahan Prediksi dan Eksisting (Ha)	97
	Tabel 22. Prediksi Perubahan Luas Tutupan Lahan Tahun 2043	98
	Tabel 23. Stok Karbon per Kelas Lahan (ton C) tahun 2043	102
	Tabel 24. Perubahan Stok Karbon Antarperiode Tahun 2013-2043	113

DAFTAR GAMBAR

No	Gambar	Halaman
	Gambar 1. Kerangka Penelitian	39
	Gambar 2. Tahap Pengolahan Data	47
	Gambar 3. Tahap Pengolahan Faktor Pendorong	48
	Gambar 4. Diagram Alir Penelitian	55
	Gambar 5. Peta Administrasi Kabupaten Lampung Tengah	58
	Gambar 6. Peta Persebaran Pemukiman Kabupaten Lampung Tengah	61
	Gambar 7. Peta Jalan Kabupaten Lampung Tengah	62
	Gambar 8. Peta Jenis Tanah Kabupaten Lampung Tengah	63
	Gambar 9. Peta Kemiringan Lereng Kabupaten Lampung Tengah	64
	Gambar 10. Peta Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2013	70
	Gambar 11. Peta Stok Karbon Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2013	73
	Gambar 12. Peta Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2018	76
	Gambar 13. Peta Stok Karbon Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2018	80
	Gambar 14. Peta Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2023	83
	Gambar 15. Peta Stok Karbon Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2023	87
	Gambar 16. Faktor Pendorong Perubahan Tutupan Lahan	94
	Gambar 17. Hasil Uji Korelasi	95
	Gambar 18. Hasil Tahap <i>Transition Modelling</i>	96
	Gambar 19. Nilai Kappa dan Validations	98
	Gambar 20. Peta Prediksi Tutupan Lahan Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2043	101
	Gambar 21. Peta Stok Karbon Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2043	104
	Gambar 22. Grafik Perubahan Tutupan Lahan di Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2013 – 2043	109
	Gambar 23. Grafik Total Stok Karbon (ton C) di Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2013 – 2043	114

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perubahan tutupan Lahan (land use change) merupakan pendorong utama dinamika stok karbon terestrial dan memiliki implikasi signifikan terhadap upaya mitigasi perubahan iklim global (IPCC, 2006). Konversi lahan bervegetasi tinggi, seperti hutan dan lahan pertanian, menjadi kawasan terbangun (built-up area) tidak hanya mengubah struktur lanskap, tetapi juga secara drastis mengurangi kapasitas penyimpanan karbon, yang pada gilirannya berkontribusi pada peningkatan emisi gas rumah kaca. Selain berperan sebagai komponen biofisik lanskap, tutupan lahan yang didominasi oleh vegetasi memiliki fungsi ekologis strategis sebagai penyimpan karbon alami. Vegetasi, baik berupa hutan, perkebunan, maupun lahan pertanian bervegetasi, berfungsi sebagai *carbon sink* melalui proses fotosintesis yang menyerap karbon dioksida dari atmosfer dan menyimpannya dalam bentuk biomassa atas permukaan, biomassa bawah permukaan, serta bahan organik tanah (Cambron et al., 2025).

Besarnya stok karbon yang tersimpan sangat bergantung pada jenis tutupan lahan, struktur vegetasi, dan tingkat kerapatan tanaman (Pan et al., 2024). Penelitian terbaru menunjukkan bahwa ekosistem pertanian juga berperan penting dalam siklus karbon, meskipun kapasitas penyimpanannya sangat dipengaruhi oleh praktik pengelolaan lahan (Pang et al., 2023). Selain itu, perubahan tutupan lahan seperti aforestasi atau deforestasi terbukti memengaruhi dinamika penyimpanan karbon secara signifikan (Haseeb et al., 2024). Bahkan, kehilangan tutupan vegetasi dapat menyebabkan penurunan stok karbon tanah, yang menegaskan pentingnya menjaga kualitas tutupan vegetasi untuk mempertahankan kapasitas penyimpanan karbon (Springer et al., 2025). Oleh karena itu, wilayah dengan tutupan vegetasi yang baik umumnya memiliki kapasitas penyimpanan karbon yang lebih tinggi

dibandingkan lahan terbuka atau kawasan terbangun.

Perubahan tutupan lahan dari vegetasi alami atau semi-alami menjadi lahan terbangun tidak hanya menyebabkan penurunan luas area hijau, tetapi juga mengakibatkan pelepasan karbon yang sebelumnya tersimpan ke atmosfer. Proses alih fungsi lahan tersebut sering kali bersifat irreversible dalam jangka panjang, sehingga kehilangan stok karbon yang terjadi tidak mudah dipulihkan. Dalam konteks ini, stok karbon dapat dipandang sebagai indikator penting untuk menilai kualitas ekologis tutupan lahan, sekaligus sebagai ukuran dampak lingkungan dari dinamika pembangunan wilayah. Dengan demikian, analisis stok karbon menjadi elemen kunci dalam kajian perubahan tutupan lahan, karena mampu menjembatani aspek spasial perubahan lanskap dengan implikasi ekologis dan iklim global. Integrasi informasi stok karbon ke dalam analisis perubahan tutupan lahan memungkinkan penilaian yang lebih komprehensif terhadap konsekuensi alih fungsi lahan, tidak hanya dari sudut pandang tata ruang dan ekonomi, tetapi juga dari perspektif keberlanjutan lingkungan dan mitigasi perubahan iklim.

Di tingkat nasional dan regional, tekanan terhadap sumber daya lahan semakin intensif seiring dengan pertumbuhan penduduk, pembangunan ekonomi, dan urbanisasi. Kabupaten Lampung Tengah, sebagai kabupaten terluas dan dengan jumlah penduduk terbesar di Provinsi Lampung, mengalami tekanan pembangunan yang cukup tinggi. Laju pertumbuhan penduduk di Kabupaten Lampung Tengah sebesar 1,10% (BPS, 2024) dan kepadatan mencapai 330,81 jiwa/km² mendorong peningkatan kebutuhan akan permukiman, infrastruktur, dan fasilitas pendukung. Fenomena ini berpotensi memicu alih fungsi lahan pertanian dan area berhutan secara signifikan, sebagaimana diungkapkan oleh Miswar et al. (2020) bahwa permintaan lahan untuk perumahan dan perekonomian meningkat seiring pertumbuhan penduduk.

Mekanisme alih fungsi lahan tersebut seringkali didorong oleh nilai ekonomi lahan (land rent), di mana tutupan lahan dengan nilai ekonomi lebih tinggi (seperti permukiman dan industri) akan menggantikan penggunaan dengan nilai lebih rendah (seperti pertanian) dalam persaingan pasar (Setiyanto & Irawan, 2015). Akibatnya, terjadi transformasi tutupan lahan yang tidak hanya berdampak pada

tata ruang, tetapi juga pada hilangnya jasa ekosistem, termasuk layanan penyimpanan karbon.

Sistem Informasi Geografis (SIG) berperan penting dalam kajian perubahan tutupan lahan dan stok karbon sebagai kerangka integratif untuk mengelola dan menganalisis data spasial secara sistematis. SIG memungkinkan penggabungan data hasil penginderaan jauh, faktor pendorong perubahan lahan, dan informasi stok karbon dalam satu sistem analisis berbasis lokasi. Melalui analisis spasial dan temporal, SIG tidak hanya berfungsi sebagai alat pemetaan, tetapi juga sebagai sarana untuk mengidentifikasi pola perubahan tutupan lahan, distribusi stok karbon, serta area prioritas yang memerlukan pengendalian dalam perencanaan wilayah berkelanjutan. Pemahaman tentang pola, laju, dan proyeksi perubahan tutupan lahan menjadi krusial untuk perencanaan wilayah yang berkelanjutan. Dalam konteks ini, teknologi penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) menawarkan solusi efektif untuk pemantauan dan pemodelan perubahan lahan secara spasial dan temporal (Jaya, 2010).

Salah satu model spasial yang banyak digunakan adalah *Cellular Automata* (CA), yang mampu mensimulasikan dinamika perubahan lahan berdasarkan aturan ketetanggaan dan transisi (Li & Gong, 2023). Ketika dipadukan dengan *Logistic Regression* (LR) untuk menganalisis pengaruh faktor-faktor pendorong (seperti jarak ke jalan, kemiringan lereng, dan kepadatan permukiman), model CA–LR menjadi alat prediksi yang robust untuk skenario tutupan lahan di masa depan (Liu et al., 2024). Dalam pemodelan perubahan tutupan lahan berbasis CA–LR, faktor pendorong seperti jarak ke jalan, kemiringan lereng, kepadatan permukiman, dan jenis tanah sangat penting karena mencerminkan aspek aksesibilitas, biofisik, serta tekanan sosial-ekonomi terhadap lahan (Zhou et al., 2023). Lahan yang dekat dengan jaringan jalan lebih rentan dikonversi karena aksesibilitas tinggi, sedangkan lereng landai lebih sesuai untuk pembangunan dibandingkan lereng curam yang berisiko erosi (Chen et al., 2025). Kepadatan permukiman menunjukkan tekanan demografis yang mendorong ekspansi kawasan terbangun, sementara jenis tanah menentukan kesesuaian lahan untuk pertanian atau pembangunan fisik (Rahman et al., 2024). Kombinasi faktor-faktor ini membuat prediksi perubahan tutupan lahan

lebih realistik dan akurat.

Dibandingkan dengan model lain seperti *Markov Chain* atau pendekatan berbasis *Machine Learning*, *Cellular Automata* (CA) memiliki keunggulan utama dalam menangkap dinamika spasial secara eksplisit melalui aturan ketetanggaan. Model Markov memang mampu memprediksi probabilitas transisi antar kelas tutupan lahan, tetapi tidak mempertimbangkan aspek spasial sehingga kurang akurat dalam merepresentasikan pola spasial perubahan (Li & Gong, 2023). Sementara itu, model berbasis *Machine Learning* seperti Random Forest atau Support Vector Machine unggul dalam klasifikasi, namun sering kali membutuhkan data yang sangat besar dan tidak selalu mampu merepresentasikan interaksi spasial antar sel (Liu et al., 2024). CA lebih unggul karena dapat mengintegrasikan faktor biofisik dan sosial-ekonomi secara langsung ke dalam aturan transisi, sehingga menghasilkan prediksi yang lebih realistik dan sesuai dengan pola spasial aktual (Zhou et al., 2023). Selain itu, fleksibilitas CA untuk dikombinasikan dengan model lain seperti Logistic Regression atau Markov membuatnya menjadi pendekatan yang adaptif dan robust dalam pemodelan perubahan tutupan lahan (Chen et al., 2025; Rahman et al., 2024).

Penelitian Abraham et al. (2022) menunjukkan bahwa aksesibilitas terhadap jalan, pusat kota, dan kepadatan penduduk merupakan faktor dominan dalam konversi lahan pertanian menjadi non-pertanian di Kabupaten Bandung. Selain itu, kajian sistematis oleh Allan et al. (2022) menegaskan bahwa faktor biofisik (topografi, jenis tanah) dan faktor sosial-ekonomi (urbanisasi, kepadatan permukiman) adalah pendorong utama perubahan tutupan lahan secara global. Penelitian Wijaya (2011) juga menemukan bahwa akses ke jalan, kesuburan tanah, dan topografi berperan besar dalam menentukan arah perubahan penggunaan lahan di Deli Serdang. Dengan demikian, penggunaan faktor pendorong tersebut dalam model CA–LR tidak hanya relevan secara teoritis, tetapi juga didukung oleh bukti empiris dari berbagai studi.

Namun, kajian yang mengintegrasikan prediksi perubahan tutupan lahan dengan estimasi dampaknya terhadap stok karbon di Kabupaten Lampung Tengah masih terbatas. Analisis yang holistik membutuhkan pendekatan yang tidak hanya memetakan dan memprediksi transformasi lahan, tetapi juga mengkuantifikasi

konsekuensinya terhadap cadangan karbon berdasarkan faktor stok karbon standar (mis., dari pedoman IPCC). Integrasi antara pemodelan perubahan lahan (CA-LR) dan pemodelan karbon ini penting untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai implikasi ekologis dari tren pembangunan serta menyusun strategi pengendalian yang berbasis mitigasi perubahan iklim.

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis pola perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah periode 2013–2023, memprediksi perubahan tutupan lahan tahun 2043 menggunakan model *Cellular Automata–Logistic Regression* (CA–LR), mengestimasi perubahan stok karbon akibat perubahan tutupan lahan, memprediksi hilangnya stok karbon pada tahun 2043, serta merumuskan strategi pengendalian perubahan tutupan lahan berbasis mitigasi karbon. Dalam konteks ini, penggunaan perangkat lunak MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) pada *QGIS* memberikan dukungan teknis yang signifikan karena menyediakan antarmuka yang terintegrasi untuk mengimplementasikan CA–LR, sekaligus memudahkan analisis faktor pendorong spasial seperti jarak ke jalan, kemiringan lereng, kepadatan permukiman, dan jenis tanah. MOLUSCE terbukti meningkatkan efisiensi dan akurasi prediksi perubahan tutupan lahan dengan menggabungkan data spasial dan algoritma statistik dalam satu platform (Hou et al., 2023; Rahman et al., 2024).

Pemilihan tahun 2043 sebagai horizon prediksi dinilai penting karena memberikan rentang waktu 20 tahun dari kondisi terakhir (2023), sesuai dengan standar perencanaan tata ruang wilayah di Indonesia yang umumnya menggunakan periode dua dekade. Rentang ini cukup panjang untuk menangkap dinamika demografi, urbanisasi, dan tekanan pembangunan yang signifikan, sekaligus relevan dengan target mitigasi perubahan iklim nasional maupun global. Selain itu, model spasial seperti Cellular Automata–Logistic Regression (CA–LR) bekerja optimal untuk proyeksi jangka menengah-panjang, sehingga hasil prediksi lebih realistik dan dapat digunakan sebagai dasar kebijakan pembangunan berkelanjutan. Hal ini sejalan dengan temuan Verburg et al. (2002) yang menekankan periode 20 tahun ideal untuk memprediksi perubahan penggunaan lahan, serta Lambin & Meyfroidt (2011) yang menegaskan pentingnya proyeksi jangka panjang dalam memahami

implikasi ekologis urbanisasi dan deforestasi. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah bagi perencanaan tata ruang yang rendah karbon dan mendukung pembangunan berkelanjutan di Kabupaten Lampung Tengah.

1.2. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan, maka dapat diidentifikasi masalah sebagai berikut :

1. Kajian komprehensif mengenai pola dan luasan perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah periode 2013 – 2023 yang mengintegrasikan pendekatan spasial-temporal berbasis model Cellular Automata (CA) masih sangat terbatas.
2. Prediksi perubahan tutupan lahan jangka panjang (hingga tahun 2043) di Kabupaten Lampung Tengah yang dapat dijadikan dasar untuk perencanaan tata ruang berbasis mitigasi perubahan iklim belum tersedia.
3. Dampak perubahan tutupan lahan terhadap stok karbon periode 2013 – 2023 belum dikaji secara komprehensif, sehingga implikasi ekologis dari alih fungsi lahan belum terintegrasi dalam kebijakan pengelolaan lahan.
4. Estimasi hilangnya stok karbon di masa depan (tahun 2043) berdasarkan skenario perubahan tutupan lahan belum tersedia.
5. Strategi pengendalian perubahan tutupan lahan yang berbasis mitigasi karbon dan memperhitungkan nilai ekonomi lahan (land rent) belum tersedia untuk mendukung pembangunan berkelanjutan di Kabupaten Lampung Tengah.

1.3. Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Bagaimana pola dan luasan perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah pada periode 2013–2023?
2. Bagaimana prediksi perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah pada tahun 2043 menggunakan model Cellular Automata–Logistic Regression (CA-LR)?
3. Bagaimana estimasi perubahan stok karbon akibat perubahan tutupan lahan

- periode 2013–2023?
4. Bagaimana prediksi hilangnya stok karbon pada tahun 2043 berdasarkan skenario perubahan tutupan lahan?
 5. Bagaimana strategi pengendalian perubahan tutupan lahan yang efektif untuk memitigasi hilangnya stok karbon di Kabupaten Lampung Tengah?

1.4. Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah tersebut, maka tujuan dilakukannya penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Menganalisis pola dan luasan perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah periode 2013–2023.
2. Memprediksi perubahan tutupan lahan tahun 2043 menggunakan model integrasi Cellular Automata–Logistic Regression (CA-LR).
3. Mengestimasi perubahan stok karbon akibat perubahan tutupan lahan periode 2013–2023.
4. Memprediksi hilangnya stok karbon tahun 2043 berdasarkan skenario perubahan lahan.
5. Merumuskan strategi pengendalian perubahan tutupan lahan berbasis mitigasi karbon di Kabupaten Lampung Tengah.

1.5. Kegunaan Penelitian

Dengan dilakukannya penelitian ini, diharapkan dapat memberikan manfaat kepada banyak pihak khususnya bagi peneliti sendiri dan umunya bagi pihak yang berkepentingan. Adapun manfaat yang diharapkan dari dilakukannya penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Manfaat Teoritis

Memberikan kontribusi pada pengembangan ilmu lingkungan, geografi, dan perencanaan wilayah melalui integrasi model Cellular Automata, Logistic Regression, dan pemodelan karbon. Menguatkan kerangka pemahaman mengenai hubungan antara perubahan Tutupan Lahan, land rent, dan dinamika stok karbon pada skala kabupaten.

2. Manfaat Praktis

Bagi Pemerintah Daerah khususnya Kabupaten Lampung Tengah sebagai bahan masukan dalam penyusunan dan evaluasi Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) serta kebijakan pengendalian alih fungsi lahan yang berbasis mitigasi karbon. Bagi Perencana dan Praktisi Lingkungan menyediakan data prediktif dan strategi yang dapat digunakan dalam perencanaan pembangunan berkelanjutan dan pengelolaan sumber daya lahan. Bagi Peneliti Lanjutan dapat dijadikan referensi dan dasar untuk penelitian yang lebih kompleks.

1.6. Ruang Lingkup Penelitian

Adapun ruang lingkup dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Ruang Lingkup Objek: Perubahan tutupan lahan dan prediksi perubahan Tutupan Lahan, serta estimasi dan prediksi stok karbon yang dihasilkan.
2. Ruang Lingkup Wilayah: Seluruh wilayah administrasi Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung.
3. Ruang Lingkup Waktu: Periode historis tahun 2013, 2018, dan 2023 untuk analisis perubahan, serta proyeksi hingga tahun 2043 untuk prediksi.
4. Ruang Lingkup Ilmu: Penelitian ini mengintegrasikan pendekatan ilmu Penginderaan Jauh, Sistem Informasi Geografis (SIG), pemodelan spasial (Cellular Automata dan Logistic Regression), serta prinsip-prinsip estimasi stok karbon berdasarkan pedoman IPCC.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kondisi Wilayah Kabupaten Lampung Tengah

2.1.1. Kondisi Geologi, Topografi, dan Morfologi Kabupaten Lampung Tengah

Berdasarkan data dari BPS (2024), dapat diketahui bahwa secara astronomis, Kabupaten Lampung Tengah dengan ibukota Kecamatan Gunung Sugih terletak antara $104^{\circ}35' BT$ sampai $105^{\circ}50' BT$ dan $4^{\circ}30' LS$ sampai $4^{\circ}15' LS$. Kabupaten Lampung Tengah secara administratif berbatasan dengan beberapa kabupaten berikut ini.

- a. Sebelah Utara, berbatasan dengan Kabupaten Tulang Bawang, Tulang Bawang Barat, dan Kabupaten Lampung Utara
- b. Sebelah Selatan, berbatasan dengan Kabupaten Pesawaran, Kabupaten Lampung Timur, Metro, dan Kabupaten Lampung Selatan
- c. Sebelah Timur, berbatasan dengan Kabupaten Lampung Timur
- d. Sebelah Barat, berbatasan dengan Kabupaten Tanggamus dan Kabupaten Lampung Barat

Kabupaten Lampung Tengah merupakan kabupaten terluas di Provinsi Lampung dengan luas wilayah seluas $4.559,59 \text{ km}^2$ atau setara dengan 455.959 Ha dengan persentase sebesar 14,84,% dari keseluruhan luas wilayah Provinsi Lampung. Wilayah Kabupaten Lampung Tengah merupakan daerah agraris yang Sebagian besar penduduknya bermata pencaharian di sektor pertanian.

Secara morfologi wilayah Kabupaten Lampung Tengah merupakan dataran rendah dengan ketinggian rata- rata $+46 \text{ mdpl}$ (meter diatas permukaan laut). Kabupaten Lampung Tengah adalah kabupaten yang memiliki luas terbesar di Provinsi Lampung dan secara administratif terdiri dari 28 wilayah kecamatan. Berikut

merupakan rincian kabupaten/kota yang terdapat di Provinsi Lampung beserta rincian luas wilayah menurut kecamatan di Kabupaten Lampung Tengah.

Tabel 1. Jumlah daerah dan luas menurut Kabupaten/Kota di Provinsi Lampung tahun 2023

Kabupaten/Kota	Ibukota Kabupaten/Kota	Luas Total Area (km²)
Lampung Barat	Liwa	2.116,01
Tanggamus	Kota Agung	2.901,98
Lampung Selatan	Kalianda	2.218,84
Lampung Timur	Sukadana	3.437,26
Lampung Tengah	Gunung Sugih	4.559,59
Lampung Utara	Kotabumi	2.656,39
Way Kanan	Blambangan Umpu	3.531,10
Tulang Bawang	Menggala	3.107,47
Pesawaran	Gedong Tataan	1.279,60
Pringsewu	Pringsewu	614,97
Mesuji	Mesuji	2.200,51
Tulang Bawang Barat	Panaragan	1.281,45
Pesisir Barat	Krui	2.993,80
Bandarlampung	Bandarlampung	183,72
Metro	Metro	73,21
Provinsi Lampung		33.575,41

Sumber: BPS Provinsi Lampung dalam angka 2024.

Tabel 2. Luas daerah (dalam km²) menurut Kecamatan di Kabupaten Lampung Tengah tahun 2023

Kecamatan	Luas Total Area (km²)
Padang Ratu	164,3
Selagai Lingga	272,62
Pubian	287,94
Anak Tuha	262,81
Anak Ratu Aji	70,28
Kali Rejo	210,35
Sendang Agung	99,46
Bangun Rejo	234,97
Gunung Sugih	164,14
Bekri	94,21
Bumi Ratu Nuban	63,75
Trimurjo	64,88
Punggur	60,74
Kota Gajah	46,93
Seputih Raman	130,10
Terbanggi Besar	217,32

Kecamatan	Luas Total Area (km ²)
Seputih Agung	107,05
Way Pengubuan	214,65
Terusan Nunyai	300,08
Seputih Mataram	116,05
Bandar Mataram	1018,62
Seputih Banyak	136,72
Way Seputih	62,39
Rumbia	118,47
Bumi Nabung	97,82
Putra Rumbia	93,45
Seputih Surabaya	141,64
Bandar Surabaya	138,17
Lampung Tengah	4.559,59

Sumber: BPS Kabupaten Lampung Tengah dalam angka 2024.

Berdasarkan data yang ada, dapat diketahui bahwa kecamatan di Kabupaten Lampung Tengah yang memiliki luas wilayah terluas adalah Kecamatan Bandar Mataram yaitu seluas 1.018,62 km². Sedangkan kecamatan yang memiliki luas wilayah paling sempit adalah Kecamatan Kota Gajah dengan luas sebesar 46,93 km².

2.1.2. Kondisi Demografi Kabupaten Lampung Tengah

Kependudukan atau demografi merupakan ilmu yang mempelajari dinamika kependudukan manusia. Demografi meliputi ukuran, struktur, dan distribusi penduduk, serta bagaimana jumlah penduduk berubah setiap waktu akibat kelahiran, kematian, migrasi, serta penuaan (Amane et. al., 2023). Kondisi demografi suatu wilayah tentu menjadi aspek yang penting untuk diamati, karena semakin banyaknya jumlah penduduk akan sangat mungkin untuk dapat berdampak negatif pada berbagai aspek kehidupan masyarakat. Tingginya angka pengangguran, maraknya tindak kejahatan, dan kualitas hidup yang menurun menjadi beberapa masalah sosial yang perlu mendapat perhatian serius di bidang kependudukan. Oleh sebab itu, pemerintah harus segera merumuskan kebijakan yang tepat untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat.

Sumber utama data kependudukan adalah sensus penduduk yang dilaksanakan setiap sepuluh tahun sekali. Sensus penduduk telah dilaksanakan sebanyak enam kali sejak Indonesia merdeka, yaitu tahun 1961, 1971, 1980, 1990, 2000, 2010, dan

2022 (BPS, 2024). Penduduk adalah semua orang yang berdomisili di Kawasan teritorial suatu wilayah selama 6 bulan atau lebih dan atau mereka yang berdomisili kurang dari 6 bulan tetapi bertujuan untuk menetap. Kepadatan penduduk adalah rasio banyaknya penduduk per kilometer persegi. Berikut adalah rincian jumlah penduduk dan kepadatan penduduk di Kabupaten Lampung Barat menurut kecamatan.

Tabel 3. Jumlah dan Kepadatan Penduduk menurut Kecamatan di Kabupaten Lampung Tengah tahun 2023

Kecamatan	Penduduk (ribu)	Kepadatan Penduduk per km²
Padang Ratu	65.868	401,32
Selagai Lingga	41.563	152,46
Pubian	56.657	301,74
Anak Tuha	50.864	312,41
Anak Ratu Aji	20.813	296,14
Kali Rejo	78.973	715,66
Sendang Agung	47.834	480,94
Bangun Rejo	72.955	695,01
Gunung Sugih	80.782	492,15
Bekri	32.426	344,19
Bumi Ratu Nuban	36.724	576,06
Trimurjo	59.808	921,82
Punggur	42.660	702,34
Kota Gajah	37.602	801,24
Seputih Raman	54.906	422,03
Terbanggi Besar	132.417	609,32
Seputih Agung	59.422	555,09
Way Pengubuan	50.335	234,50
Terusan Nunyai	61.876	206,20
Seputih Mataram	57.503	495,50
Bandar Mataram	85.833	84,26
Seputih Banyak	55.673	407,20
Way Seputih	21.333	341,93
Rumbia	42.516	358,88
Bumi Nabung	39.295	401,71
Putra Rumbia	23.628	252,84
Seputih Surabaya	54.882	387,48
Bandar Surabaya	42.183	312,54
Lampung Tengah	1.508.331	330,81

Sumber: BPS Kabupaten Lampung Tengah dalam angka 2024.

Berdasarkan Tabel 3 dapat diketahui bahwa wilayah yang memiliki jumlah penduduk paling banyak di Kabupaten Lampung Tengah adalah Kecamatan Terbanggi Besar dengan jumlah penduduk yaitu sebanyak 132.417 jiwa, sedangkan wilayah yang memiliki jumlah penduduk paling sedikit yaitu Kecamatan Anak Ratu Aji dengan jumlah penduduk sebanyak 20.813 jiwa. Selain itu, dapat diketahui juga wilayah yang memiliki Tingkat kepadatan penduduk paling tinggi adalah Kecamatan Trimurjo yaitu dengan kepadatan penduduk sebanyak 921,81 penduduk per km², dan wilayah yang memiliki tingkat kepadatan penduduk paling kecil adalah Kecamatan Selagai Lingga dengan jumlah penduduk sebanyak 152,46 per km².

2.2. Pengertian Geografi

Kata geografi berasal dari bahasa Yunani yaitu *geo* yang artinya bumi dan *graphein* yang artinya menulis atau menjelaskan. Pada asalnya geografi berarti uraian atau gambaran mengenai bumi (Susanti dan Endayani, 2018). Geografi merupakan ilmu yang mempelajari tentang segala hal yang berkaitan dengan bumi. Karakteristik geografi sebagai ilmu nampak dari sasaran kajian yang khas yang disebut objek material dan objek formal. Objek material berkaitan dengan substansi yang dikaji yaitu fenomena geosfer, sedangkan objek formal berkaitan dengan pendekatan yang digunakan dalam menganalisis objek material tersebut. Pengkajian objek material terbagi atas geografi alam dan geografi manusia.

2.2.1. Konsep Geografi

Menurut Supardan (2007), terdapat beberapa konsep penting dalam geografi, yaitu sebagai berikut.

- a. Tempat, merujuk pada suatu wilayah dimana orang hidup berada.
- b. Sensus Penduduk, sensus merupakan salah satu kegiatan statistik untuk mengumpulkan informasi mengenai perumahan, sektor manufaktur, pertanian, industri, pertambangan dan dunia bisnis.
- c. Iklim, merupakan keadaan rata-rata dari cuaca di suatu daerah dalam periode tertentu, keadaan variasinya dari tahun ke tahun dan keadaan ekstrimnya.
- d. Laut, adalah keseluruhan massa air yang saling berhubungan dan mengelilingi

- semua sisi daratan bumi.
- e. Lingkungan, yaitu segala sesuatu yang berada diluar organisme itu sendiri. Lingkungan dibedakan menjadi dua yaitu biotik dan abiotik.
 - f. Benua, suatu daratan luas sehingga bagian tengah daratan tersebut tidak mendapat pengaruh angin laut sama sekali.
 - g. Urbanisasi, para demograf mendefinisikan urbanisasi sebagai retribusi penduduk ataupun perpindahan dari pedesaan ke perkotaan.
 - h. Peta, yaitu pola permukaan bumi yang dilukiskan pada bidang datar. Peta dapat mendeskripsikan bentuk fisik bumi baik dalam keadaan sosial, ekonomi, sejarah, dan sebagainya.
 - i. Kota, kota adalah tempat di wilayah tertentu yang dihuni oleh cukup banyak orang dengan tingkat kepadatan penduduk yang tinggi.
 - j. Mortalitas, rangkuman tingkat kematian kotor rata-rata yakni jumlah kematian per tahun persentase penduduk.
 - k. Khatulistiwa, yaitu sebuah konsep yang merujuk pada garis khayal yang melingkari bola bumi dan membelah menjadi dua bagian sama besar masing-masing 180 derajat.
 - l. Demografi, yaitu analisis terhadap berbagai variabel kehidupan yang didalamnya mencakup perhitungan dan hasil substantif dalam riset mengenai angka kematian, angka kelahiran, dan migrasi serta jumlah berikut komposisi penduduk.
 - m. Tanah, merupakan wilayah permukaan bumi dengan ciri khas mencakup segala sifat yang sepatutnya stabil atau diperkirakan selalu berulang kembali dari lingkungan hidup yang lurus, di atas atau di bawah wilayah tersebut.
 - n. Transmigrasi, adalah upaya mencapai keseimbangan penyebaran penduduk, untuk meningkatkan kesempatan kerja melalui perpindahan penduduk dari daerah padat menuju daerah jarang.
 - o. Wilayah, merupakan area di permukaan bumi yang relatif homogen dan berbeda dengan sekelilingnya.

Konsep geografi yang digunakan dalam penelitian ini lebih spesifik menggunakan konsep peta untuk mendeskripsikan tutupan lahan pada suatu wilayah tertentu.

2.2.2. Pendekatan Geografi

Lumbatoruan (2001) menyebutkan bahwa sesuai dengan konsep geografi mengenai objek studi geografi yaitu objek material dan objek formal, terdapat penentu ciri khas geografi yaitu dengan adanya tiga pendekatan. Pendekatan yang dimaksud adalah pendekatan keruangan, pendekatan ekologi, dan pendekatan kompleks wilayah. Hal ini dianggap memiliki hasil yang lebih baik dan cukup memuaskan hingga masih relevan hingga saat ini.

a. Pendekatan Keruangan (*Spatial Approach*)

Pendekatan keruangan adalah cara penyelidikan atau pengamatan yang menitik beratkan pada fenomena geosfer dalam suatu ruang. Jadi kerangka analisisnya menekankan eksistensi ruang sebagai penekanannya. Eksistensi ruang dalam artian geografi dapat dipandang dari segi struktur keruangan (*spatial structure*), pola keruangan (*spatial pattern*), dan proses keruangan (*spatial processes*) (Hagget, 1979; Bintarto, 1979; Yunus, 1996; dan Lumbatooruan, 2001).

b. Pendekatan Ekologi (*Ecology Approach*)

Pendekatan ekologi adalah cara penyelidikan terhadap fenomena geosfer yang berada di suatu tempat atau wilayah tertentu, dalam hal ini fenomena sosial mencari hubungannya dengan alam di tempat (wilayah) yang sama (Suhardjo, 1996; Lumbatoruan, 2001). Oleh karena itu, penekanan dalam pendekatam ini terletak pada keterkaitan antara fenomena geosfer tertentu dengan variabel yang ada dalam sebuah wilayah.

c. Pendekatan Kompleks Wilayah (*Regional Complex Approach*)

Pendekatan kompleks wilayah adalah kombinasi antara pendekatan keruangan dan pendekatan ekologi. Karena sorotan wilayahnya sebagai obyek bersifat multi variate, maka kajiannya bersifat horizontal dalam artian keruangan dan juga vertikal dalam artian ekologi (Yunus, 1996; Lumbatoruan 2001).

Berdasarkan teori mengenai pendekatan geografi yang ada, maka penelitian ini menggunakan pendekatan ekologi yang mengaitkan antara fenomena geosfer dengan fenomena sosial di suatu wilayah tertentu.

Menurut Effendi dan Akmal (2020), geografi juga berperan dalam pemecahan masalah terkait pengelolaan sumber daya alam, mitigasi bencana alam, perencanaan perkotaan dan regional, konservasi lingkungan, dan pemahaman tentang perubahan iklim, serta berbagai aspek lain dari kehidupan manusia di planet ini. Geografi pada dasarnya digunakan untuk mempelajari bumi dan memecahkan masalah. Ruang lingkup geografi teknik meliputi 3 hal yaitu sebagai berikut.

1. Kartografi, yaitu membahas tentang praktik pembuatan peta atau *globe*.
2. Penginderaan jauh, yaitu mempelajari tentang pengukuran atau akuisisi data dari suatu objek atau suatu fenomena yang dilakukan secara jauh tanpa melakukan kontak langsung dengan objek maupun fenomena yang diteliti.
3. Sistem Informasi Geografi (SIG), yaitu cabang ilmu geografi yang membahas tentang sistem basis komputer dan basis geografis yang dapat digabungkan.

2.3. Klasifikasi Tutupan lahan

2.3.1. Pengertian Tutupan lahan

Menurut Undang-undang Nomor 4 Tahun 2011, penutup lahan diartikan sebagai garis yang menggambarkan batas penambang di atas permukaan bumi. Laily (2021) menyatakan bahwa tutupan lahan adalah perwujudan fisik (visual) dari vegetasi, benda alam, dan unsur-unsur budaya yang terdapat di permukaan bumi, dengan memperhatikan interaksi manusia terhadap objek tersebut. Menurut Balle & Samuel (1999), sebagian besar permukaan bumi terdiri dari kenampakan alam (land cover) seperti vegetasi dan salju, sementara sebagian lainnya merupakan hasil dari aktivitas manusia (tutupan lahan).

Tutupan lahan adalah aktivitas manusia yang langsung terkait dengan lokasi dan kondisi lahan (Purwantoro & Hadi, 1996). Proses tutupan lahan merupakan bagian dari upaya berkelanjutan dalam pemanfaatan yang efisien dan konsisten (Suwargana, 2013). Sehingga dapat diketahui bahwa tutupan lahan adalah merupakan hasil dari interaksi antara manusia dengan lingkungan alamnya. Tutupan lahan juga dapat diartikan sebagai hasil pemanfaatan lingkungan alam untuk mendukung kegiatan manusia di muka bumi. Menurut Wael dan Siahaya (2022), jenis tutupan lahan sangat berkaitan dengan bagaimana manusia

memanfaatkannya. Sebagai contoh, hutan mungkin merupakan tutupan lahan alami, tetapi jika manusia menggunakan lahan tersebut untuk pertanian atau pemukiman, maka tutupan lahan akan berubah menjadi pertanian atau perkotaan.

Kebutuhan lahan berbanding lurus dengan meningkatnya perkembangan wilayah, pertumbuhan ekonomi dan penduduk yang merupakan bentuk aktivitas penduduk dalam pembangunan (Roy et al., 2017; Hapsary et al., 2021). Kelengkapan sarana dan prasarana menjadi beberapa faktor yang berpengaruh dalam perubahan lahan (Suberlian, 2003; Dabukke dan Susetyo, 2021). Pembangunan infrastruktur terutama jaringan transportasi merupakan salah satu faktor terjadinya perubahan lahan. Perubahan lahan juga dipengaruhi oleh kebijakan dan rencana tutupan lahan di masa mendatang. Perubahan lahan dapat diprediksi secara kuantitatif dengan memasukkan faktor-faktor fisik, sosial, ekonomi dan kebijakan (Munibah, et al., 2010; Dabukke dan Susetyo, 2021).. Perubahan lahan ini juga perlu dikendalikan oleh pemegang kebijakan, karena jika tidak dikontrol dan dibiarkan terus menerus dapat memperburuk struktur penguadaan sumber daya lahan dan mungkin dapat menjadi tidak terkendali lagi.

2.3.2. Klasifikasi Tutupan lahan

Klasifikasi pada dasarnya merupakan suatu rangkaian proses pengelompokan data yang dilakukan secara induktif, yaitu menyusun generalisasi berdasarkan karakteristik, pola, atau ciri tertentu yang muncul dari suatu objek maupun fenomena. Proses ini bertujuan menghasilkan pengelompokan yang sistematis sehingga data yang kompleks dapat diinterpretasikan menjadi informasi yang lebih terstruktur dan bermakna (Abbler, 1972; Sitawati, 2002; Nurfatimah, 2020). Dalam konteks pemetaan tutupan lahan di Indonesia, Standar Nasional Indonesia (SNI) menerapkan terminologi penutup lahan sebagai dasar untuk mengelompokkan berbagai bentuk tutupan lahan. SNI juga menetapkan pembagian kelas tutupan lahan berdasarkan tingkat ketelitian peta, yang disusun dalam beberapa skala, yaitu skala kecil 1:1.000.000, skala menengah 1:250.000, serta skala besar 1:50.000 atau 1:25.000, sehingga klasifikasi penutup lahan dapat dilakukan secara konsisten sesuai kebutuhan analisis spasial dan tingkat detail yang diinginkan.

Tabel 4. Sistem Klasifikasi Tutupan lahan Badan Standarisasi Nasional 2020

No.	Kelas Tutupan lahan
1	Daerah Vegetasi <ul style="list-style-type: none"> 1.1 Daerah Pertanian <ul style="list-style-type: none"> 1.1.1 Sawah 1.1.2 Sawah Pasang Surut 1.1.3 Ladang 1.1.4 Perkebunan 1.1.5 Perkebunan Campuran 1.1.6 Tanaman Campuran 1.2 Daerah Bukan Pertanian <ul style="list-style-type: none"> 1.2.1 Hutan Lahan Kering 1.2.2 Hutan Lahan Basah 1.2.3 Semak dan Belukar 1.2.4 Padang rumput alang-alang dan sabana
2	Daerah Tak Bervegetasi <ul style="list-style-type: none"> 2.1 Lahan Terbuka <ul style="list-style-type: none"> 2.1.1 Lahar dan Lava 2.1.2 Hamparan pasir Pantai 2.1.3 Beting Pantai 2.1.4 Gumuk pasir 2.2 Permukiman dan Lahan bukan pertanian <ul style="list-style-type: none"> 2.2.1 Lahan Terbangun <ul style="list-style-type: none"> 2.2.1.1 Permukiman 2.2.1.2 Jaringan Jalan 2.2.1.3 Jaringan Jalan Kereta Api 2.2.2 Lahan Tidak Terbangun <ul style="list-style-type: none"> 2.2.2.1 Pertambangan 2.2.2.2 Tempat penimbunan sampah 2.3 Perairan <ul style="list-style-type: none"> 2.3.1 Danau atau waduh 2.3.2 Tambak 2.3.3 Rawa 2.3.4 Sungai

Sumber: Badan Standardisasi Nasional- 7645 (2020)

Klasifikasi tutupan lahan yang digunakan dalam penelitian ini dirancang dengan menyesuaikan kondisi nyata tutupan lahan yang terdapat di Kabupaten Lampung Tengah secara keseluruhan. Penyesuaian ini dilakukan agar kategori tutupan lahan yang dianalisis benar-benar mencerminkan karakteristik wilayah penelitian dan dapat menggambarkan variasi penggunaan lahan yang ada. Dengan demikian, klasifikasi yang diterapkan tidak hanya bersifat umum, tetapi juga relevan dengan konteks lokal Kabupaten Lampung Tengah. Adapun jenis-jenis tutupan lahan yang

menjadi dasar analisis telah dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama, sebagaimana ditunjukkan secara rinci dalam Tabel 5, sehingga memudahkan proses identifikasi, interpretasi, dan analisis perubahan tutupan lahan pada periode penelitian.

Tabel 5. Klasifikasi tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah

No	Tutupan lahan	Rincian
1	Pertanian lahan basah	1.1 Sawah
2	Pertanian lahan kering	2.1 Ladang 2.2 Tegalan 2.3 Perkebunan
3	Lahan terbangun	3.1 Permukiman 3.2 Perdagangan dan jasa 3.3 Perkantoran 3.4 Industri 3.5 Sarana pendidikan 3.6 Sarana transportasi
4	Hutan	
5	Lahan kosong	
6	Perairan	

Sumber: Badan Standarisasi Nasional dengan Modifikasi

2.4. Nilai Ekonomi Lahan (*Land Rent*)

2.4.1. Teori Nilai Ekonomi Lahan (*Land Rent*)

Menurut David Ricardo (1821) seperti dikutip dari Setiyanto & Irawan, (2015), *land rent* dapat didefinisikan sebagai surplus ekonomi atas lahan tersebut. Artinya, keuntungan yang didapat atas dasar produksi dari lahan tersebut setelah dikurangi biaya. Perbedaan surplus ekonomi yang didapat pada suatu lahan dikarenakan perbedaan tingkat kesuburan. Dalam teori ini dijelaskan bahwa pertama, kota hanya mempunyai satu pusat. Kedua, kota terletak pada daerah yang datar/daratan (*flat feature less plant*). Ketiga, biaya transportasi sesuai dengan jarak yang ditempuh menuju pusat kota. Keempat, lahan akan dijual kepada penawar tertinggi. Teori tersebut menunjukkan kecenderungan kesempatan yang sama dimiliki oleh semua pihak untuk memperoleh lahan. Selain itu juga tidak ada campur tangan pemerintah dalam bentuk aturan pembatasan seperti *land use zoning*. Oleh karena itu menurut teori ini pasar persaingan sempurna dapat berjalan dengan baik.

Mubyarto (1985) menjelaskan bahwa sewa ekonomi lahan (*land rent*) merupakan bagian dari nilai produksi secara keseluruhan sebagai hasil usaha yang dilakukan pada lahan tersebut. Jasa produksi lahan tersebut merupakan jasa yang diperoleh dari pengelolaan lahan bukan jasa karena pemilikan lahan. Surplus ekonomi dari sumberdaya lahan dapat dilihat dari surplus ekonomi karena kesuburan tanahnya dan surplus ekonomi karena lokasi ekonomi. Adapun faktor-faktor yang mempengaruhi *land rent* yaitu adanya perbedaan dalam kesuburan tanah, jarak dari pasar, biaya produksi, dan keterbatasan lahan.

Menurut Barlowe (1986), *land rent* dapat dibedakan menjadi dua definisi yaitu sewa lahan (*contract rent*) sebagai pembayaran dari penyewa kepada pemilik yang melakukan kontrak sewa dalam jangka waktu tertentu dan Keuntungan usaha (*economic rent* atau *land rent*) merupakan surplus pendapatan di atas biaya produksi atau harga input lahan yang dapat dimanfaatkan dalam proses produksi.

Menurut Anwar (1990) dalam Setiyanto & Irawan, (2015) mengungkapkan bahwa lahan mempunyai empat jenis *rent*, yaitu 1) *ricardian rent* yang menyangkut kualitas dan kelangkaan lahan; 2) *locational rent* yang menyangkut aksesibilitas lahan; 3) *ecological rent* yang menyangkut fungsi ekologi lahan; 4) *sociological rent* yang menyangkut fungsi sosial lahan. Mekanisme pasar sendiri mencakup *ricardian rent* dan *locational rent*, sedangkan *ecological rent* dan *sociological rent* pada umumnya tidak dalam perhitungan pasar. Selain proses alih fungsi lahan yang terjadi dari *economical rent* yang lebih rendah ke lebih tinggi, Rustiadi (2001), menyatakan bahwa alih fungsi lahan terjadi pada *environment rent* yang lebih tinggi ke yang lebih rendah.

2.4.2. Hubungan Prediksi Perubahan Lahan dengan Nilai Ekonomi Lahan (*Land Rent*)

Rustiadi, dkk (2011) menjelaskan bahwa *land rent* secara sederhana didefinisikan sebagai surplus ekonomi, yaitu pendapatan bersih atau *benefit* yang diterima suatu bidang lahan tiap meter persegi tiap tahun akibat dilakukannya suatu kegiatan pada bidang lahan tersebut. *Land rent* merupakan salah satu faktor produksi tanah yang berproduksi tinggi menghasilkan sewa lahan lebih tinggi dibandingkan tanah yang berproduksi lebih rendah.

Alih fungsi lahan pertanian ke non pertanian terjadi akibat persaingan pemanfaatan lahan yang berakibat pada meningkatnya nilai lahan (*land rent*). Tutupan lahan untuk pertanian selalu dikalahkan oleh penggunaan untuk non pertanian karena nilainya lebih tinggi. Dengan demikian pengelolaan dan pemanfaatan lahan untuk kegiatan pertanian harus dikelola secara efektif dan efisien.

Setiyanto & Irawan (2015) menjelaskan bahwa mekanisme alokasi sumber daya lahan sering ditentukan oleh nilai *economic rent* atau *land rent* dibandingkan dengan nilai sewa atau *contract rent*. Lahan yang mempunyai nilai *economic rent* atau *land rent* lebih tinggi akan menggusur tutupan lahan dengan nilai *economic rent* atau *land rent* yang lebih rendah. Pada umumnya nilai *economic rent* atau *land rent* yang terjadi dalam mekanisme pasar adalah industri > perdagangan > permukiman > pertanian intensif > pertanian ekstensif.

Hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa nilai lahan menjadi faktor penting dalam keputusan konversi lahan. Penelitian Saputra & Budhi (2015) mengungkapkan bahwa faktor ekonomi merupakan alasan utama petani mengalihfungsikan lahan pertaniannya. Menurut penelitian Mahardika & Muta'ali (2018) menunjukkan bahwa faktor utama alih fungsi lahan adalah nilai atau harga jual lahan yang relatif tinggi. Tingginya harga lahan ini karena letaknya yang strategis dan berdasarkan kebijakan RTRW merupakan zona industri. Begitu juga yang disampaikan oleh Irwin dan Bockstael (2002) menyatakan bahwa tutupan lahan untuk perkotaan mempunyai sewa (*rent*) lebih tinggi dibandingkan dengan penggunaan untuk keperluan perdesaan untuk pertanian.

2.5. Sistem Informasi Geografis dan Penginderaan Jauh

2.5.1. Pengertian Sistem Informasi Geografis

Sistem informasi geografis atau dikenal dengan *Geographical Information System* merupakan suatu alat atau media untuk memasukkan, menyimpan, mengambil, memanipulasi, menganalisa, dan menampilkan data-data beratibut geografis yang berguna untuk mendukung proses pengambilan keputusan dalam perencanaan dan manajemen sumber daya alam, lingkungan, transportasi, masalah perkotaan dan administratif (Indarto, 2013).

Tujuan pokok dari pemanfaatan SIG yaitu untuk mempermudah mendapatkan informasi yang telah diolah dan tersimpan sebagai atribut lokasi atau objek. Selain itu, SIG juga memiliki manfaat dalam berbagai bidang.

2.5.2. Penginderaan Jauh

Menurut Miswar dan Halengkara (2018), penginderaan jauh ialah ilmu dan seni untuk memperoleh informasi tentang objek, daerah atau gejala dengan jalan menganalisis data yang diperoleh dengan menggunakan alat tanpa kontak langsung dengan objek, daerah atau gejala yang sedang dikaji. Alat yang dimaksud dalam batasan ini adalah alat pengindera atau sendir. Pada umumnya sensor dipasang pada wahana (media) yang berupa pesawat terbang, satelit, atau wahana lainnya. hasil gambaran yang terekam oleh alat pengindera yang diperlukan berupa kamera atau sensor lainnya disebut citra. Peninderaan jauh memerlukan tenaga untuk merekam objek, gejala, atau fenomena yang akan dikaji. Sumber utama tenaga elektromagnetik yang digunakan dalam penginderaan jauh adalah matahari. Berdasarkan cara pengumpulan datanya, sistem penginderaan jauh dapat dibedakan atas tenaga dan wahana yang digunakan dalam proses perekaman data. Sistem penginderaan jauh terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu sumber tenaga, atmosfer, interaksi tenaga dalam obyek, sensor dan wahana, perolehan data, serta pengguna data.

2.6. Model

Model dapat diartikan sebagai representasi dari realitas yang dibuat oleh pembuat model. Dengan kata lain, model adalah penghubung antara dunia nyata dan pikiran yang diciptakan untuk memecahkan suatu masalah. Pemodelan adalah proses menciptakan atau menyajikan model dan proses berpikir melalui urutan yang logis. Pemodelan juga dapat dijelaskan sebagai suatu proses di mana observasi dunia nyata diterima, dibentuk, diproses, dan ditampilkan (Marfaaii, 2011). Model dapat dibagi menjadi tiga bagian, yaitu sebagai berikut.

- 1) Model empiris dan statistik, misalnya model *Markov Chain* dan Regresi. Model empiris-statistik adalah model yang biasanya dapat digunakan untuk melihat kecenderungan perubahan berdasarkan data historis,

2) Model terintegrasi misalnya CLUE (*conversion of land cover and its Effects*). Model CLUE dikembangkan oleh Verburg et al. (2002) sebagai model terintegrasi yang menggabungkan faktor biofisik, sosial-ekonomi, dan kebijakan dalam simulasi perubahan penggunaan lahan.

3) Model dinamis misalnya model *Cellular Automata* (CA).

Model CA–LR (Cellular Automata–Logistic Regression) merupakan pendekatan yang menggabungkan kekuatan model dinamis dengan analisis statistik. *Cellular Automata* digunakan untuk mensimulasikan dinamika spasial berdasarkan aturan ketetanggaan, sedangkan *Logistic Regression* berfungsi untuk mengukur pengaruh faktor pendorong (misalnya jarak ke jalan, kemiringan lereng, kepadatan permukiman, dan jenis tanah) terhadap probabilitas perubahan lahan.

Hal ini sejalan dengan penelitian Verburg et al. (2002) yang menekankan pentingnya integrasi faktor biofisik dan sosial-ekonomi dalam simulasi perubahan lahan, serta Allan et al. (2022) yang menegaskan bahwa penggunaan model yang mempertimbangkan interaksi manusia dan lingkungan sangat penting untuk memahami dinamika perubahan tutupan lahan secara global. Oleh karena itu, pemilihan model CA–LR dalam penelitian ini relevan karena mampu menggabungkan analisis faktor pendorong dengan simulasi spasial, sehingga prediksi perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah lebih realistik dan dapat digunakan sebagai dasar perencanaan tata ruang berbasis mitigasi karbon.

Model CA–LR dipilih dalam penelitian ini karena mampu menggabungkan keunggulan pendekatan dinamis dan statistik secara bersamaan. *Cellular Automata* (CA) memiliki kemampuan untuk merepresentasikan pola spasial perubahan lahan melalui aturan ketetanggaan, sehingga dapat menangkap dinamika ruang yang sering diabaikan oleh model empiris-statistik seperti *Markov Chain* yang hanya berfokus pada probabilitas transisi antar kelas tutupan lahan tanpa mempertimbangkan distribusi spasial (Li & Gong, 2023). Sementara itu, *Logistic Regression* (LR) memberikan kerangka analisis yang kuat untuk mengukur pengaruh faktor pendorong biofisik maupun sosial-ekonomi terhadap probabilitas perubahan lahan (Liu et al., 2024). Kombinasi keduanya menjadikan CA–LR lebih unggul dibandingkan model terintegrasi seperti CLUE yang meskipun

komprehensif, sering kali membutuhkan data kebijakan dan sosial-ekonomi yang kompleks serta sulit diperoleh secara detail di tingkat lokal (Verburg et al., 2002). Dengan demikian, CA–LR menawarkan keseimbangan antara ketepatan spasial dan keterjangkauan data, menghasilkan prediksi yang lebih realistik, akurat, dan sesuai dengan kondisi empiris wilayah penelitian (Zhou et al., 2023). Keunggulan lain dari CA–LR adalah fleksibilitasnya untuk diimplementasikan dalam perangkat lunak spasial seperti QGIS melalui plugin MOLUSCE, yang memungkinkan integrasi data spasial dan analisis faktor pendorong dalam satu platform sehingga meningkatkan efisiensi dan akurasi simulasi perubahan tutupan lahan (Hou et al., 2023; Rahman et al., 2024).

Penggunaan MOLUSCE (Modules for Land Use Change Evaluation) dalam penelitian ini menjadi penting karena perangkat ini menyediakan kerangka kerja yang terintegrasi untuk menjalankan model *Cellular Automata–Logistic Regression* (CA–LR) secara lebih efisien dan akurat. MOLUSCE memungkinkan peneliti untuk menghubungkan data historis tutupan lahan dengan variabel pendorong seperti jarak ke jalan, kemiringan lereng, kepadatan permukiman, dan jenis tanah, sehingga proses kalibrasi model dapat dilakukan secara sistematis. Keunggulan utama MOLUSCE adalah kemampuannya menggabungkan analisis statistik Logistic Regression dengan simulasi spasial berbasis Cellular Automata dalam satu platform, tanpa harus membangun algoritma secara manual. Selain itu, MOLUSCE menyediakan fitur validasi model seperti *Kappa statistic* dan *ROC curve* yang membantu memastikan tingkat akurasi prediksi sebelum digunakan untuk proyeksi jangka panjang. Dengan adanya antarmuka visual yang sederhana, MOLUSCE juga memudahkan interpretasi hasil simulasi dalam bentuk peta prediksi, sehingga hubungan antara faktor pendorong dan pola perubahan tutupan lahan dapat dipahami dengan lebih jelas. Oleh karena itu, penggunaan MOLUSCE tidak hanya mempercepat proses pemodelan, tetapi juga meningkatkan kualitas hasil analisis, menjadikannya pilihan yang tepat untuk mendukung penelitian perubahan tutupan lahan dan estimasi stok karbon di Kabupaten Lampung Tengah (Hou et al., 2023; Rahman et al., 2024).

2.6.1. Faktor Pendorong

Landasan dasar dari pemodelan perubahan tutupan lahan adalah ada atau tidaknya kaitan antara perubahan tutupan lahan tersebut dengan beberapa faktor. Faktor-faktor tersebut dapat berupa kondisi atau sifat tertentu dari lahan yang lazim disebut dengan karakteristik lahan (Prihatin, 2015). Faktor yang mendasari perubahan tutupan lahan sendiri disebabkan oleh dua faktor utama, yaitu faktor alam dan faktor manusia. Faktor alam berasal dari karakteristik alam seperti kemiringan lereng dan jenis tanah, sedangkan faktor manusia disebabkan oleh aktivitas manusia (Khalil, 2015). Pemilihan faktor yang digunakan dalam proses pemodelan tutupan lahan pada dasarnya didasarkan pada kemungkinan pengaruh yang paling besar.

Menurut Ritohardoyo (2013) faktor yang mempengaruhi terjadinya perubahan tutupan lahan dapat diketahui sebagai berikut.

- 1) Faktor fisik yang berpengaruh besar yaitu iklim, dan ketinggian tempat.
- 2) Faktor ekonomi dan sosial budaya hubungannya dengan tutupan lahan yaitu kepadatan penduduk, pekerjaan, tingkat pengetahuan, aksesibilitas, jarak terhadap jalan dan keterampilan.
- 3) Faktor ekologi yang berpengaruh adalah sifat keterwakilan seperti keseragaman, keaslian suku.

Pemilihan faktor pendorong didasarkan pada keterkaitan langsung antara karakteristik biofisik maupun sosial-ekonomi dengan kecenderungan alih fungsi lahan. Dalam penelitian ini digunakan empat faktor pendorong utama, yaitu jarak ke jalan, kemiringan lereng, kepadatan permukiman, dan jenis tanah. Jarak ke jalan dipilih karena aksesibilitas merupakan salah satu determinan utama dalam konversi lahan. Lahan yang dekat dengan jaringan jalan lebih mudah dikembangkan untuk permukiman maupun aktivitas ekonomi (Ritohardoyo, 2013). Kemiringan lereng digunakan karena kondisi topografi memengaruhi kesesuaian lahan, lereng landai lebih diminati untuk pembangunan, sedangkan lereng curam cenderung dipertahankan sebagai kawasan lindung (Khalil, 2015). Kepadatan permukiman menjadi indikator tekanan demografi dan urbanisasi, di mana wilayah dengan kepadatan tinggi lebih rentan mengalami ekspansi kawasan terbangun (Abraham et

al., 2022). Jenis tanah dipilih karena kesuburan dan karakteristik tanah menentukan daya dukung ekologis dan potensi ekonomi lahan; tanah subur cenderung dipertahankan untuk pertanian, sedangkan tanah dengan produktivitas rendah lebih mudah dialihfungsikan (Verburg et al., 2002).

Keempat faktor ini dipilih karena mewakili kombinasi aspek aksesibilitas, biofisik, dan sosial-ekonomi yang terbukti secara empiris berpengaruh besar terhadap perubahan tutupan lahan. Dengan memasukkan faktor-faktor tersebut ke dalam model CA-LR, prediksi yang dihasilkan menjadi lebih realistik dan sesuai dengan kondisi aktual di Kabupaten Lampung Tengah.

2.6.2. *Cellular Automata (CA)*

Cellular Automata (CA) merupakan suatu metode komputasi berbasis grid yang bekerja dengan prinsip aturan sederhana namun mampu menghasilkan pola yang kompleks. Setiap sel dalam grid memiliki keadaan tertentu dan dapat berubah sesuai dengan aturan transisi yang ditentukan, biasanya berdasarkan kondisi sel tetangga dan faktor waktu. Dengan cara ini, CA dapat mensimulasikan dinamika sistem spasial yang terdistribusi, seperti perubahan tutupan lahan, pertumbuhan kota, atau penyebaran fenomena lingkungan. Keunggulan utama CA adalah kemampuannya untuk merepresentasikan proses spasial secara eksplisit, sehingga pola sederhana dapat berkembang menjadi pola kompleks yang menyerupai kondisi nyata di lapangan (Baja, 2012; Fitriana dkk., 2017; Singh, 2023). Namun, kelemahan CA adalah fokusnya yang lebih pada proses pertumbuhan piksel dan prediksi spasial, tanpa memberikan informasi mendalam mengenai hubungan antara variabel bebas dan variabel terikat sebagai penyebab perubahan (Wardani dkk., 2016; Hapsary dkk., 2021). Oleh karena itu, CA sering dikombinasikan dengan model lain untuk memperkuat analisis faktor pendorong perubahan lahan (Peruge & Sakka, 2012).

Cellular Automata adalah model sederhana dari proses terdistribusi spasial (*spatial distributed process*) dalam GIS. Data terdiri dari susunan sel-sel (*grid*) dan masing-masing diatur sedemikian rupa sehingga hanya diperbolehkan berada di salah satu dari beberapa keadaan. Sehingga dengan demikian pemodelan dengan metode ini

hanya dilakukan dalam GIS raster (Baja, 2012; Fitriana dkk, 2017). Kelebihan dari model ini adalah kemampuannya untuk mempelajari pola yang sederhana hingga menghasilkan pola yang kompleks dengan menggunakan prinsip yang sederhana (Singh, 2023). Kelemahan *Cellular Automata* (CA) adalah bahwa model ini lebih fokus pada proses pertumbuhan dan memprediksi pertumbuhan piksel, tetapi tidak memberikan informasi tentang alasan peningkatan tersebut yang berkaitan dengan hubungan antara variabel dependen (variabel terikat) dan variabel bebas (variabel bebas). Meskipun perubahan tutupan lahan dipengaruhi oleh berbagai faktor independen yang perlu dipertimbangkan, CA tidak selalu memberikan gambaran yang komprehensif terhadap semua faktor tersebut. Oleh karena itu, model ini sering digabungkan dengan model lain untuk meningkatkan akurasi prediksi (Peruge dan Sakka, 2012).

Penggunaan CA dalam penelitian perubahan tutupan lahan menjadi relevan karena model ini mampu menangkap dinamika spasial yang sulit direpresentasikan oleh model statistik murni. CA dapat menggambarkan bagaimana perubahan lahan terjadi secara bertahap dan menyebar dari satu lokasi ke lokasi lain sesuai dengan aturan ketetanggaan, sehingga pola ekspansi kawasan terbangun atau konversi lahan pertanian dapat dimodelkan secara realistik. Dibandingkan dengan model Markov Chain yang hanya menghitung probabilitas transisi antar kelas tutupan lahan, CA memberikan dimensi spasial yang lebih detail dengan mempertimbangkan distribusi ruang. Selain itu, CA relatif sederhana dalam implementasi, tidak membutuhkan data kebijakan yang kompleks seperti model CLUE, dan dapat diintegrasikan dengan Logistic Regression untuk memperhitungkan faktor pendorong biofisik maupun sosial-ekonomi. Dengan kombinasi tersebut, CA tidak hanya menampilkan pola pertumbuhan piksel, tetapi juga mampu menjelaskan faktor-faktor yang memengaruhi perubahan, sehingga menghasilkan prediksi tutupan lahan yang lebih akurat dan sesuai dengan kondisi empiris wilayah penelitian (Li & Gong, 2023; Zhou et al., 2023; Liu et al., 2024).

2.6.3. *Logistic Regression*

Regresi logistik (*Logistic regression*) adalah bagian dari analisis regresi yang digunakan ketika variabel dependen (respon) merupakan variabel dikotomi.

Variabel dikotomi biasanya hanya terdiri atas dua nilai yang mewakili kemunculan atau tidak adanya suatu kejadian yang biasanya diberi angka 0 atau 1 (Saputra dan Widodo, 2014; Utami dkk, 2021).

Logistic Regression terdiri dari tiga komponen penting. Pertama, variabel respons yang mengalami transformasi binomial besar. Kedua, fungsi transformasi logit biner yang menggunakan variabel independen untuk memperkirakan nilai. Ketiga, koefisien binomial yang berubah tergantung pada variabel independen secara linier. *Logistic Regression* adalah sebuah teknik analisis data yang digunakan untuk menemukan hubungan antara dua faktor data. Kemudian, hubungan tersebut digunakan untuk memprediksi salah satu faktor berdasarkan faktor lainnya. Prediksi umumnya menghasilkan kumpulan hasil yang terbatas, seperti "ya" atau "tidak". *Logistic Regression* adalah teknik penting di bidang kecerdasan buatan dan pembelajaran mesin (AI/ML) (Khalil, 2015).

Model *Logistic Regression* yang tersedia sebagai salah satu fitur analisis dalam perangkat lunak QGIS menawarkan sejumlah kelebihan sekaligus memiliki beberapa keterbatasan dalam penerapannya. Setiap aspek dari model ini—baik kemampuan analitis maupun batasannya—perlu dipahami agar pengguna dapat menentukan kesesuaian metode dengan kebutuhan penelitian. Oleh karena itu, berikut merupakan uraian mengenai berbagai keunggulan serta kekurangan yang dimiliki *Logistic Regression* dalam konteks penggunaan di QGIS.

Tabel 6. Kelebihan dan Kekurangan *Model Logistic Regression*

Kelebihan (+)	Kekurangan (-)
Lebih mudah implementasi, ditafsirkan, dan sangat efisien untuk dilatih.	Jika sampel pengamatan tidak banyak, model ini sering mengalami index error.
Sangat cepat dalam mengklasifikasi.	Bentuk data yang disajikan hanya berupa data linear.
Akurasi yang baik, data sederhana, dan dapat bekerja sama dengan baik.	Membutuhkan data berupa rata-rata.
Dapat menafsirkan model sebagai indicator.	Sulit untuk mendapatkan analisis hubungan kompleks.

Sumber: Marfaai, 2011

2.6.4. Uji Validitas

Menurut Rukajat (2018), tingkat presisi menggambarkan seberapa akurat data yang sebenarnya terjadi pada suatu objek berdasarkan data yang dikumpulkan oleh seorang peneliti. Tujuan dari uji validasi model adalah untuk mengevaluasi keakuratan hasil pemodelan prediksi tutupan lahan sehingga dapat diambil keputusan apakah model tersebut layak digunakan untuk memprediksi tutupan lahan di masa yang akan datang (Dabukke & Susetyo,,2021). Model divalidasi dengan membandingkan peta tutupan lahan yang ada dengan peta hasil prediksi (Hapsary & Subiyanto, 2021). Uji validitas dilakukan dengan menyiapkan peta tutupan lahan pada tahun yang sudah tersedia dan peta hasil prediksi yang diperoleh melalui program sistem informasi geografi.

Penelitian ini menggunakan uji validitas yang dilakukan dengan menyiapkan peta tutupan lahan tahun 2023 yang diperoleh melalui proses klasifikasi citra dari USGS. Selanjutnya, peta prediksi tutupan lahan tahun 2023 diperoleh melalui proses prediksi menggunakan peta tutupan lahan tahun 2013 dan 2018. Kedua peta tersebut kemudian dimasukkan ke dalam program untuk dilakukan uji kesesuaian guna mengetahui nilai kesamaan antara tutupan lahan yang diperoleh secara manual melalui proses klasifikasi citra dengan peta hasil proses prediksi. Hasil uji validasi dievaluasi dengan menggunakan nilai kappa yang memiliki rentang antara 0 hingga 1. Nilai akurasi kappa antara 0,81 hingga 1 menunjukkan kesepakatan yang sangat baik, nilai antara 0,61 hingga 0,80 adalah baik, nilai antara 0,41 hingga 0,60 adalah sedang, nilai antara 0,21 hingga 0,40 adalah kurang dari sedang, dan nilai kurang dari 0,20 dianggap buruk.

2.7. Stok Karbon

Karbon adalah unsur kimia dengan simbol C dan nomor atom 6 yang termasuk dalam golongan non-logam. Unsur ini memiliki kemampuan unik untuk membentuk empat ikatan kovalen, sehingga dapat berasosiasi dengan berbagai unsur lain dan menghasilkan beragam molekul kompleks. Karbon menjadi fondasi utama bagi senyawa organik yang menyusun kehidupan, seperti protein, karbohidrat, lipid, dan asam nukleat, yang berperan penting dalam struktur dan fungsi organisme (Encyclopaedia Britannica, 2026). Dalam kehidupan sehari-hari,

karbon hadir dalam berbagai bentuk dan kegunaan: grafit digunakan sebagai bahan pensil dan elektroda, berlian dimanfaatkan sebagai perhiasan sekaligus material industri karena kekerasannya, sedangkan karbon aktif dipakai dalam penyaringan air dan udara karena sifat adsorptifnya (Biology Insights, 2025). Selain itu, karbon juga menjadi komponen utama bahan bakar fosil seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam yang digunakan untuk energi, meskipun penggunaannya berkontribusi terhadap emisi karbon dioksida dan perubahan iklim (Wang & Jin, 2025). Dengan demikian, karbon tidak hanya menopang kehidupan biologis, tetapi juga memiliki peran besar dalam teknologi, industri, dan isu lingkungan global.

Stok karbon adalah jumlah total karbon yang tersimpan dalam berbagai kompartemen ekosistem, meliputi biomassa atas permukaan (pohon dan vegetasi), biomassa bawah permukaan (akar), bahan organik tanah, serta kayu mati dan serasah. Setiap kompartemen memiliki peran berbeda dalam siklus karbon; misalnya, pohon berfungsi sebagai penyerap utama karbon dioksida melalui fotosintesis, sementara tanah berperan sebagai penyimpan jangka panjang yang dapat menahan karbon selama ratusan hingga ribuan tahun (British Society of Soil Science, 2023). Besarnya stok karbon sangat dipengaruhi oleh jenis tutupan lahan, struktur vegetasi, tingkat kerapatan tanaman, serta praktik pengelolaan lahan. Hutan tropis dengan vegetasi rapat memiliki stok karbon yang tinggi, sedangkan kawasan terbangun atau lahan terbuka cenderung memiliki stok karbon yang rendah (Pan et al., 2024). Selain itu, perubahan penggunaan lahan seperti deforestasi, konversi hutan menjadi pertanian, atau urbanisasi dapat menyebabkan pelepasan karbon ke atmosfer dan menurunkan kapasitas ekosistem dalam menyimpan karbon (Haseeb et al., 2024). Oleh karena itu, pengelolaan tutupan lahan yang berkelanjutan, termasuk konservasi hutan dan peningkatan kandungan karbon tanah, menjadi strategi penting dalam mitigasi perubahan iklim global (Wang & Jin, 2025).

Stok karbon memiliki peran yang sangat krusial dalam menjaga keseimbangan iklim global karena berfungsi sebagai indikator kapasitas ekosistem dalam menyerap dan menyimpan karbon dioksida dari atmosfer. Penelitian mengenai stok karbon penting dilakukan untuk memahami seberapa besar potensi suatu wilayah dalam mendukung mitigasi perubahan iklim, sekaligus mengidentifikasi risiko

pelepasan karbon akibat perubahan penggunaan lahan. Dengan mengetahui besarnya stok karbon, pemerintah dan pemangku kebijakan dapat merumuskan strategi pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan, seperti konservasi hutan, rehabilitasi lahan terdegradasi, dan peningkatan kandungan karbon tanah. Selain itu, penelitian stok karbon juga mendukung implementasi mekanisme internasional seperti *Reducing Emissions from Deforestation and Forest Degradation* (REDD+), yang memberikan insentif ekonomi bagi negara berkembang untuk menjaga hutan mereka (Pan et al., 2024). Di tingkat lokal, penelitian stok karbon membantu memprediksi dampak konversi lahan terhadap hilangnya cadangan karbon, sehingga dapat menjadi dasar perencanaan tata ruang dan kebijakan mitigasi karbon di masa depan (Haseeb et al., 2024; Wang & Jin, 2025). Dengan demikian, studi mengenai stok karbon tidak hanya relevan secara akademis, tetapi juga memiliki implikasi praktis dalam pengendalian perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan.

Penelitian stok karbon di Indonesia telah banyak dilakukan, terutama di hutan tropis Sumatera dan Kalimantan yang dikenal sebagai kawasan dengan cadangan karbon terbesar di Asia Tenggara. Misalnya, studi yang dilakukan oleh Murdiyarso et al. (2023) menunjukkan bahwa hutan rawa gambut di Kalimantan memiliki stok karbon yang sangat tinggi, mencapai lebih dari 3.000 ton per hektar, karena kandungan bahan organik tanah yang tebal. Sementara itu, penelitian di Sumatera oleh Krisnawati et al. (2024) menemukan bahwa hutan sekunder masih mampu menyimpan stok karbon signifikan, meskipun lebih rendah dibandingkan hutan primer, dengan rata-rata sekitar 150–250 ton per hektar. Temuan-temuan ini menegaskan bahwa perubahan tutupan lahan di Indonesia, termasuk di Lampung Tengah, dapat berdampak besar terhadap hilangnya stok karbon, sehingga penelitian lokal menjadi penting untuk memahami dinamika karbon dan merumuskan strategi mitigasi yang sesuai dengan kondisi wilayah.

Menurut IPCC (2006), stok karbon dibagi ke dalam beberapa “carbon pools”, yaitu:

1. Biomassa atas permukaan tanah (*Above Ground Biomass/AGB*)
2. Biomassa bawah tanah (*Below Ground Biomass/BGB*)
3. Karbon tanah (*Soil Organic Carbon/SOC*)

4. Serasah (*litter*)
5. Kayu mati (*dead wood*)

Pengukuran stok karbon dapat dilakukan melalui dua pendekatan, yaitu pendekatan langsung (pengukuran lapangan menggunakan persamaan allometrik) dan pendekatan tidak langsung menggunakan citra penginderaan jauh (NDVI, drone, LiDAR). Penentuan stok karbon biasanya mengacu pada faktor konversi standar, misalnya kandungan karbon biomassa sebesar ±46%.

Kombinasi teknologi NDVI, drone, dan LiDAR memberikan keunggulan komprehensif dalam penelitian stok karbon. NDVI mampu mendeteksi kerapatan vegetasi secara luas dan efisien, sehingga berguna untuk pemetaan awal biomassa pada skala regional. Namun, NDVI memiliki keterbatasan dalam menangkap struktur vertikal vegetasi. Di sinilah teknologi drone dan LiDAR memberikan nilai tambah: drone memungkinkan pengambilan citra resolusi tinggi pada skala lokal, sedangkan LiDAR mampu merekam dimensi tiga vegetasi, termasuk tinggi kanopi dan distribusi biomassa secara vertikal (Torresan et al., 2023; Li et al., 2025). Dengan menggabungkan ketiga teknologi ini, peneliti dapat memperoleh data yang lebih akurat dan detail, mulai dari kerapatan vegetasi hingga struktur kanopi, sehingga estimasi stok karbon menjadi lebih presisi. Pendekatan integratif ini juga memudahkan validasi data lapangan, mempercepat analisis, dan meningkatkan keandalan hasil prediksi stok karbon di berbagai ekosistem, termasuk hutan tropis Indonesia.

Metode yang umum digunakan untuk menghitung stok karbon vegetasi adalah persamaan allometrik, yaitu model matematis yang menghubungkan parameter dimensi pohon (DBH, tinggi, jenis kayu) dengan estimasi biomassa. Beberapa persamaan yang sering digunakan antara lain Komiyama et al. (2005) untuk ekosistem mangrove dan Chave et al. (2005; 2014) untuk hutan tropis secara umum. Selain data lapangan, berbagai penelitian juga memanfaatkan penginderaan jauh. NDVI, misalnya, sering digunakan untuk memprediksi biomassa karena mencerminkan kerapatan vegetasi (Zhang et al., 2023). Berdasarkan beberapa penelitian, korelasi NDVI terhadap biomassa dapat bervariasi tergantung kondisi spesies, umur tanaman, dan heterogenitas ekosistem (Gao et al., 2024). Teknologi

drone dan LiDAR mampu memberikan akurasi lebih tinggi karena dapat menangkap struktur vertikal vegetasi, terutama tinggi kanopi, sehingga estimasi stok karbon menjadi lebih presisi (Li et al., 2025; Torresan et al., 2023).

2.7.1. Perubahan Tutupan Lahan dan Pengaruhnya terhadap Stok Karbon

Perubahan tutupan lahan merupakan faktor penting yang mempengaruhi besar kecilnya stok karbon di suatu wilayah. Aktivitas seperti deforestasi dan alih fungsi hutan menjadi permukiman atau pertanian menyebabkan berkurangnya biomassa dan penurunan kemampuan ekosistem menyimpan karbon. Sebaliknya, upaya restorasi—misalnya reforestasi dan pemulihan mangrove—dapat meningkatkan kembali cadangan karbon melalui pertumbuhan vegetasi baru.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa hutan menyimpan karbon jauh lebih besar dibandingkan lahan pertanian, semak belukar, atau padang rumput, sedangkan lahan terbangun hampir tidak memiliki potensi penyimpanan karbon (Donato et al., 2011; Chave et al., 2014). Oleh karena itu, memahami perubahan LULC sangat penting untuk menilai dampaknya terhadap stok karbon dan keberlanjutan lingkungan.

Penghitungan stok karbon di Indonesia didasarkan pada kerangka kebijakan nasional dan pedoman ilmiah internasional yang dirancang untuk memastikan konsistensi, transparansi, serta akurasi dalam inventarisasi karbon. Salah satu regulasi utama yang mengatur hal tersebut adalah PermenLHK No. 21 Tahun 2022 mengenai penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon (NEK), yang memuat pedoman teknis perhitungan, pencatatan, verifikasi, serta pelaporan emisi dan serapan karbon pada berbagai sektor, termasuk kehutanan dan tutupan lahan.

Sebagai acuan, penelitian ini merujuk pada dokumen *Indonesia's Second Forest Reference Emission Level (FREL) Submission to the UNFCCC* yang disusun oleh Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). FREL merupakan standar resmi pemerintah Indonesia yang digunakan untuk pelaporan aksi mitigasi perubahan iklim, termasuk perhitungan emisi dan cadangan karbon berbasis lahan. Penggunaan FREL sebagai referensi bertujuan untuk memastikan bahwa estimasi yang dilakukan sesuai dengan standar nasional dan dapat diintegrasikan ke dalam

sistem pelaporan emisi gas rumah kaca.

Metodologi yang digunakan dalam FREL telah disusun berdasarkan pendekatan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), namun telah disesuaikan dengan kondisi biofisik dan sosial-ekonomi Indonesia. Oleh karena itu, penggunaan FREL dalam penelitian ini tidak hanya memberikan akurasi teknis, tetapi juga relevansi kebijakan dalam mendukung perencanaan tata ruang rendah karbon dan strategi mitigasi berbasis tutupan lahan. Hal ini sejalan dengan kajian oleh Sari et al. (2021) yang menyatakan bahwa integrasi data tutupan lahan dengan faktor emisi dari FREL mampu menghasilkan estimasi stok karbon yang lebih representatif untuk skala regional. Selain itu, Yulianti et al. (2020) menegaskan bahwa pendekatan berbasis FREL dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan dalam pengelolaan lahan dan pelaporan kontribusi daerah terhadap target penurunan emisi nasional.

Menurut *Indonesia's Second Forest Reference Emission Level (FREL) Submission to the UNFCCC* (Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia, 2022), setiap kelas tutupan lahan memiliki nilai faktor stok karbon yang berbeda sesuai dengan karakteristik ekosistemnya. Hutan memiliki kapasitas penyimpanan karbon paling tinggi, yaitu sekitar 150 tC/ha, karena keberadaan pohon besar dan ekosistem vegetasi yang kompleks. Pertanian lahan basah, seperti sawah, menyimpan karbon sebesar 85 tC/ha melalui kombinasi vegetasi dan bahan organik tanah, sedangkan pertanian lahan kering hanya menyimpan sekitar 37 tC/ha karena vegetasi yang lebih sederhana. Lahan kosong memiliki stok karbon yang sangat rendah, sekitar 10 tC/ha, karena minim vegetasi, sementara lahan terbangun hanya menyimpan sekitar 5 tC/ha akibat dominasi permukiman dan infrastruktur. Adapun perairan tidak memiliki stok karbon terestrial (0 tC/ha) karena tidak terdapat biomassa daratan yang signifikan.

Perbedaan nilai ini menegaskan bahwa perubahan tutupan lahan dari vegetasi alami ke lahan terbangun atau lahan kosong akan berdampak langsung pada penurunan stok karbon wilayah. Sebaliknya, upaya restorasi seperti reforestasi dapat

meningkatkan kembali cadangan karbon melalui pertumbuhan vegetasi baru. Penelitian yang dilakukan oleh Penman et al. (2003) dan Houghton (2005) juga menegaskan pentingnya penggunaan metodologi standar dalam inventarisasi karbon agar data dapat digunakan sebagai dasar pengambilan kebijakan dan evaluasi program mitigasi perubahan iklim. Dengan mengikuti pedoman tersebut, penelitian stok karbon tidak hanya memenuhi kaidah ilmiah, tetapi juga selaras dengan kebutuhan pelaporan nasional dan internasional.

2.8. Penelitian Relevan

Penelitian sejenis yang dijadikan referensi dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

Tabel 7. Penelitian Relevan

No.	Nama	Judul	Hasil	Tahun
1.	Dedy Miswar, I Gede Sugiyanta, Yarmaidi, Reno Deri Yasta	Analisis Geospasial Perubahan Tutupan lahan Sawah Berbasis LP2B Kecamatan Pagelaran Utara	Lahan sawah di Kecamatan Pagelaran Utara dalam kurun waktu 4 tahun mengalami perubahan tutupan lahan ke permukiman seluas 16,08 ha, hal ini disebabkan karena adanya faktor-faktor pendukung dan penarik yang menyebabkan masyarakat mendirikan permukiman di atas lahan sawah.	2020
2.	Andre Saputra Dabukke, Cahyono Susetyo	Prediksi Perubahan Tutupan Lahan Pasca Pembangunan Gerbang TOL Soreang di Kecamatan Soreang, Kabupaten Bandung Menggunakan Regresi Logistik Biner	Empat jenis tutupan lahan non – terbangun eksisting memiliki potensi untuk mengalami perubahan tutupan lahan. Hutan memiliki potensi untuk mengalami perubahan tutupan lahan seluas 1,280 hektar, Perkebunan seluas 21,202 hektar, Pertanian seluas 153,725 hektar, dan Areal Terbuka seluas 132,902 hektar. Terdapat potensi tutupan lahan yang tidak sesuai dengan rencana pola ruang kawasan lindung, yakni pada Ruang Terbuka Hijau dengan potensi pelanggaran seluas 0,247 hektar, Sempadan Sungai dengan potensi pelanggaran seluas 54,702 hektar, pola ruang Perairan dengan potensi pelanggaran seluas 8,168 hektar.	2021

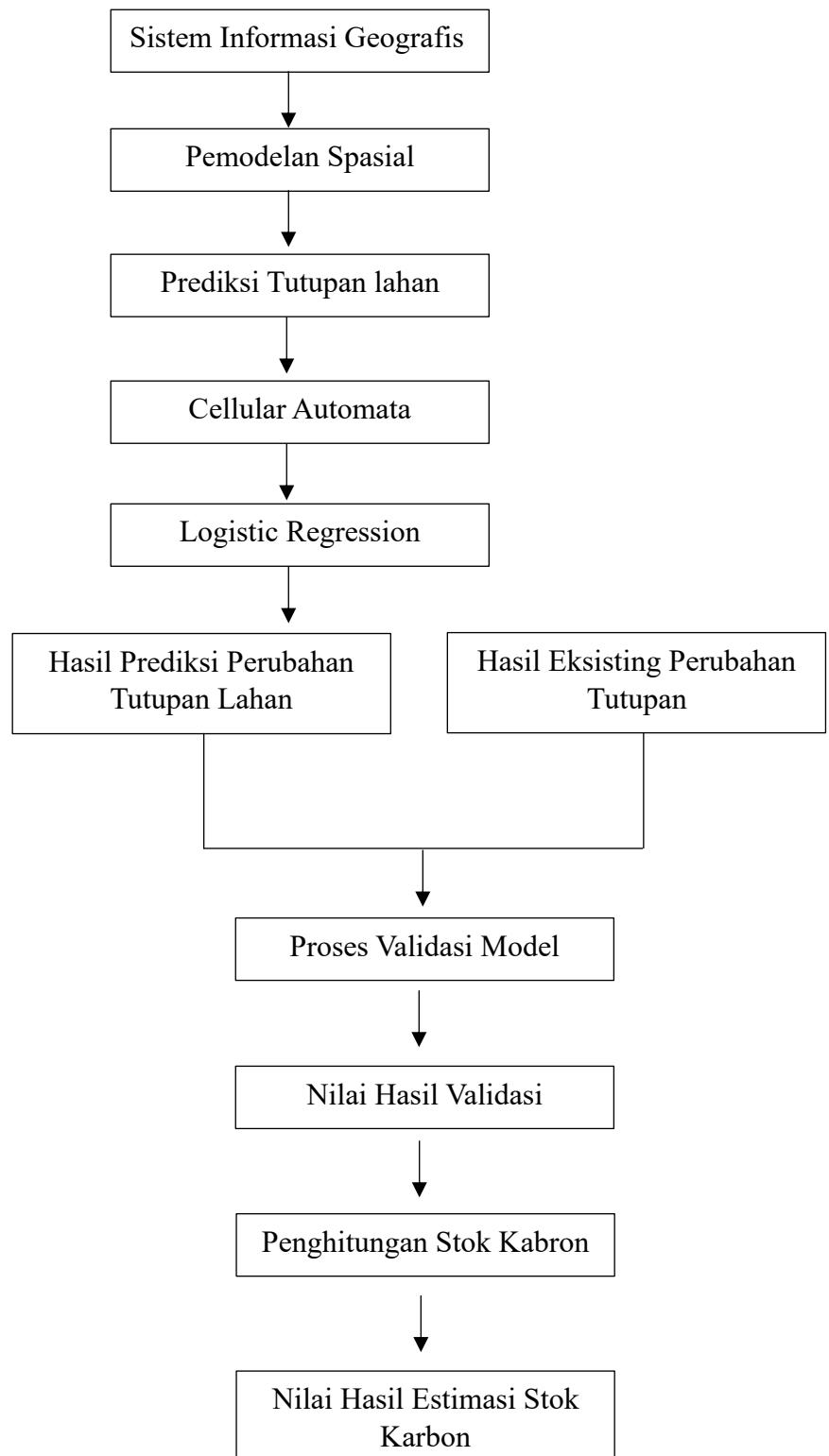
3.	Maharany Shandra Ayu Hapsary, Saeitri Subiyanto, Hana Sugastu Firdaus	Analisis Prediksi Perubahan Tutupan lahan dengan Pendekatan Artificial Neural Network dan Regresi Logistik di Kota Balikpapan	Berdasarkan analisis kesesuaian antara peta prediksi tutupan lahan Kota Balikpapan tahun 2029 metode ANN dan regresi logistik terhadap RTRW Kota Balikpapan tahun 2012- 2032 didapatkan tingkat kesesuaian sebesar 44,25% dan 43,49% dengan tingkat kepercayaan > 40% atau 0,41 maka hasil kesesuaian dinyatakan cukup baik.	2021
4.	Qonnita Putri Mulya, Istijabatul Aliyah, Galing Yudana	Perubahan Tutupan lahan dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi di Kawasan Jalan Ahmad Yani Kartasura berdasarkan Persepsi Masyarakat	Perubahan tutupan lahan di Kawasan Jalan Ahmad Yani Kartasura disebabkan oleh beberapa faktor. Berdasarkan tingkatannya, faktor yang paling mempengaruhi perubahan tutupan lahan pada kawasan penelitian berdasarkan persepsi masyarakat yaitu: 1) Faktor peluang ekonomi; 2) Faktor ketersediaan sarana & prasarana; 3) Faktor aksesibilitas; 4) Faktor harga lahan; 5) Faktor kondisi fisik lingkungan; 6) Faktor kebijakan pengembangan; dan 7) Faktor kondisi sosial ekonomi kawasan.	
5.	Karolina Wael, Willem A. Siahaya	Klasifikasi Tutupan Lahan Pulau Kei Kecil Tahun 2019 Berdasarkan Analisis Citra Multispektral	Berdasarkan hasil klasifikasi tutupan lahan dan hasil analisis multispektral 543 terdapat dua jenis tutupan lahan yang mendominasi daerah penelitian, yaitu tutupan lahan pemukiman dengan luas sebesar 16164,5 ha dan tutupan lahan semak dengan luas sebesar 16185,7 ha.	

2.9. Kerangka Penelitian

Kerangka penelitian ini menggabungkan pendekatan spasial dan pemodelan prediktif untuk menganalisis perubahan tutupan lahan serta menghitung stok karbon berdasarkan hasil prediksi tersebut. Proses dimulai dengan pengolahan data spasial menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG), yang mencakup data tutupan lahan historis, variabel pendorong (seperti jarak ke jalan, kemiringan lereng, dan jenis tanah), serta data pendukung seperti NDVI dan citra drone. Selanjutnya, dilakukan pemodelan spasial menggunakan pendekatan *Cellular Automata–Logistic Regression* (CA–LR) melalui plugin MOLUSCE di QGIS, yang menghasilkan peta prediksi perubahan tutupan lahan pada tahun target (misalnya 2043).

Hasil prediksi tutupan lahan kemudian dibandingkan dengan data eksisting untuk proses validasi, menggunakan metode statistik seperti *Kappa Index* dan *ROC Curve* untuk mengukur akurasi model. Setelah validasi, peta tutupan lahan hasil prediksi digunakan sebagai dasar penghitungan stok karbon. Setiap kelas tutupan lahan (misalnya hutan, semak, lahan terbuka, permukiman) dikalibrasi dengan nilai faktor emisi atau koefisien stok karbon berdasarkan data lapangan dan referensi literatur (Krisnawati et al., 2024; Murdiyarno et al., 2023). Dengan mengalikan luas masing-masing kelas tutupan lahan dengan nilai stok karbon per hektar, diperoleh estimasi total stok karbon wilayah Lampung Tengah pada tahun prediksi.

Integrasi antara pemodelan perubahan tutupan lahan dan penghitungan stok karbon ini memungkinkan analisis yang lebih komprehensif terhadap dampak konversi lahan terhadap cadangan karbon, serta memberikan dasar ilmiah bagi perencanaan tata ruang dan strategi mitigasi perubahan iklim di tingkat kabupaten. Gambaran mengenai kerangka penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Penelitian

III. METODE PENELITIAN

3.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian ini terdiri dari dua tahapan utama, yaitu survei lapangan untuk pengumpulan data primer dan dokumentasi sebagai sumber data sekunder yang mendukung analisis. Tahap pertama yaitu survei lapangan, dilakukan untuk memperoleh data primer berupa informasi tutupan lahan aktual, identifikasi jenis vegetasi, pengukuran biomassa, serta pengambilan sampel untuk estimasi stok karbon. Survei ini juga mencakup pencatatan koordinat lokasi, pengukuran tinggi kanopi, dan pengumpulan data pendukung seperti jenis tanah dan kondisi topografi. Tahap kedua yaitu dokumentasi, bertujuan untuk mengumpulkan data sekunder yang meliputi citra satelit, peta tutupan lahan historis, indeks vegetasi (NDVI), serta data hasil pemindaian drone dan LiDAR. Dokumentasi ini juga mencakup pengumpulan regulasi tata ruang, laporan lingkungan, dan referensi ilmiah yang relevan untuk mendukung analisis spasial dan pemodelan perubahan lahan.

Kedua tahapan ini saling melengkapi dalam membangun kerangka analisis yang komprehensif, di mana data lapangan digunakan untuk kalibrasi dan validasi, sementara data dokumentasi mendukung pemodelan spasial dan estimasi stok karbon secara akurat. Penelitian dilaksanakan di Kabupaten Lampung Tengah, Provinsi Lampung, Indonesia pada tahun 2025. Kabupaten Lampung Tengah secara astronomis terletak di antara 104°35' BT – 105°50' BT dan 4°30' LS – 4°15' LS (BPS, 2024).

3.2. Variabel Penelitian

Variabel adalah sebagai atribut seseorang, atau objek, yang mempunyai “variasi” antara satu orang dengan yang lain atau satu objek dengan objek

yang lain (Sugiyono, 2015). Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah perubahan tutupan lahan tahun 2013, 2018, 2023, dan prediksi tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah tahun 2043.

3.3. Definisi Operasional Variabel

Adapun definisi operasional variabel dalam penelitian ini sebagai berikut.

1. Perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah

Perubahan tutupan lahan adalah suatu perubahan yang dapat terjadi pada kenampakan fisik lahan menjadi tutupan lahan lain yang terjadi akibat aktivitas manusia yang bertujuan untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Indikator yang digunakan dalam melihat perubahan tutupan lahan pada penelitian ini adalah jenis dan luas tutupan lahan.

a. Jenis tutupan lahan

Klasifikasi tutupan lahan dalam penelitian ini disusun berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 7645:2020) serta disesuaikan dengan kondisi tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah. Klasifikasi dilakukan untuk mengelompokkan kenampakan fisik permukaan bumi menjadi kategori yang lebih terstruktur sehingga dapat dianalisis secara spasial.

Mengacu pada tabel 5 bab tinjauan Pustaka, tutupan lahan pada penelitian ini dibagi ke dalam enam kelas utama diantaranya yaitu pertanian lahan basah, pertanian lahan kering, lahan terbangun, lahan kosong, hutan, dan perairan. Klasifikasi ini dipilih karena sesuai dengan kondisi biofisik Kabupaten Lampung Tengah serta relevan dengan kebutuhan analisis perubahan tutupan lahan. Selain itu, pembagian kelas tersebut konsisten dengan literatur yang dinayatakan oleh Laily (2021), Wael & Siahaya (2022), dan Badan Standardisasi Nasional (2020) bahwa klasifikasi tutupan lahan harus mempertimbangkan aspek vegetasi, aktivitas manusia, dan kenampakan alami. Dengan demikian, hasil klasifikasi dapat digunakan secara konsisten dalam analisis spasial maupun estimasi stok karbon.

b. Luas perubahan tutupan lahan

Luas perubahan tutupan lahan adalah besaran perubahan luas tutupan lahan yang mengalami perubahan sebelum dan sesudah tahun 2013 sampai tahun 2023 dengan satuan luas hektar (ha).

2. Prediksi tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah

Prediksi tutupan lahan adalah sebuah upaya untuk mengetahui bagaimana gambaran tutupan lahan pada waktu yang akan datang menggunakan pola-pola yang ada pada waktu tertentu di tahun-tahun sebelumnya. Proses pemodelan ini membutuhkan variabel pendorong dalam prosesnya. Variabel pendorong yang digunakan pada penelitian ini untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada tabel 8.

Tabel 8. Variabel Pendorong Perubahan Tutupan lahan

No	Variabel Pendorong	Deskripsi
1	Jarak terhadap jalan	Jarak terhadap jalan yang ada baik berupa jalan arteri maupun jalan kolektor.
2	Jenis tanah	Jenis tanah penting untuk diketahui karena setiap tanah memiliki sifat dan karakteristik yang berbeda.
3	Kemiringan lereng	Ukuran kemiringan suatu lahan dengan persentase klasifikasi kemiringan lereng 0-8% (datar), 8-15% (landai), 15-25% (agak curam), 25-45% (curam), serta >45% (sangat curam).
4	Permukiman	Permukiman diukur berdasarkan penggunaan tutupan lahan.

Berdasarkan tabel 8, pemilihan faktor pendorong dalam penelitian ini didasarkan pada keterkaitan langsung antara aspek biofisik dan sosial-ekonomi dengan kecenderungan alih fungsi lahan, sehingga digunakan empat variabel utama yaitu jarak ke jalan, kemiringan lereng, kepadatan permukiman, dan jenis tanah. Jarak ke jalan dipilih karena aksesibilitas menjadi determinan utama konversi lahan (Ritohardoyo, 2013), kemiringan lereng karena topografi memengaruhi kesesuaian lahan (Khalil, 2015), kepadatan permukiman sebagai indikator tekanan demografi dan urbanisasi (Abraham et al., 2022), serta jenis tanah karena

kesuburan dan karakteristiknya menentukan daya dukung ekologis maupun potensi ekonomi (Verburg et al., 2002). Keempat faktor ini mewakili kombinasi aspek aksesibilitas, biofisik, dan sosial-ekonomi yang terbukti berpengaruh besar terhadap perubahan tutupan lahan, sehingga penerapannya dalam model CA–LR menghasilkan prediksi yang lebih realistik dan sesuai dengan kondisi aktual di Kabupaten Lampung Tengah.

3.4. Alat dan Bahan Penelitian

3.4.1 Alat Penelitian

Alat yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Komputer, dengan spesifikasi:
 - a. Sistem Operasi : *Microsoft Windows 10*
 - b. RAM : 4GB
2. *Software*
 - a. ArcGIS 10.4
 - b. QGIS Las Palmas 2.18.15 dengan tambahan *PLUGIN molusce*
 - c. *Microsoft Office 2010*
 - d. Kamera *handphone*

3.4.2 Bahan Penelitian

Data yang berupa:

1. Citra landsat 7 tahun 2013
2. Citra landsat 8 tahun 2018 dan 2023
3. Administrasi Kabupaten Lampung Tengah
4. Shapefile pemukiman, jaringan jalan, jenis tanah, dan kemiringan lereng.

3.5. Jenis dan Sumber Data

Jenis dan sumber data dalam penelitian ini dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 9. Jenis dan Sumber Data

No	Data	Sumber	Keterangan
1	Citra Landsat 7 tahun 2013	www.earthexplorer.usgs.gov	Interpretasi dan klasifikasi citra

2	Citra Landsat 8 tahun 2018 dan 2023	www.earthexplorer.usg.gov	Interpretasi dan klasifikasi citra
3	Administrasi Kabupaten Lampung Tengah	Peta RBI, Peta Kecamatan Provinsi Lampung, Peta Batas Desa Provinsi Lampung	Peta lokasi penelitian
4	Shapefile pemukiman, jaringan jalan, jenis tanah, dan kemiringan lereng	Dinas Pembangunan Umum Kabupaten Lampung Tengah	Variabel pendorong perubahan tutupan lahan

3.6. Metode dan Analisis Data

Pengertian metodologi penelitian menurut Hidayat dan Sedarmayanti (2002:25) adalah pembahasan mengenai konsep teoritik berbagai metode, kelebihan dan kekurangan, yang dalam karya ilmiah dilanjutkan dengan pemilihan metode yang digunakan.

Metode yang digunakan adalah penelitian kuantitatif. Teknik pengumpulan data yang dilakukan pada penelitian ini yaitu observasi dan dokumen (*document*). Penelitian ini menganalisis perubahan tutupan lahan yang terjadi di Kabupaten Lampung Tengah pada tahun 2013, 2018, dan 2023 kemudian memaparkan prediksi tutupan lahan tahun 2043 di Kabupaten Lampung Tengah.

3.7. Tahapan Penelitian

Penelitian ini melalui beberapa tahapan diantaranya :

1. Tahap Pencarian dan Pengumpulan Data

Teknik pengumpulan data merupakan teknik atau langkah-langkah yang digunakan untuk mengumpulkan data yang akan diteliti secara strategis dan sistematis untuk mendapatkan data yang valid sesuai dengan kenyataan di lapangan.

a. Observasi

Observasi dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui keadaan lapangan secara langsung dan memastikan kesesuaian data di lapangan dan data yang akan diolah. Observasi dilakukan dengan

melakukan kegiatan turun lapangan dan mengamati objek penelitian secara detail, objektif, dan faktual. Pada penelitian ini dilakukan observasi secara langsung guna mengetahui gambaran umum lokasi penelitian serta melakukan pengamatan dan pencatatan ada atau tidaknya perubahan tutupan lahan di Kabupaten Lampung Tengah.

b. Dokumen

Dokumen adalah sebuah teknik pengumpulan data dengan cara mempelajari dokumen untuk mendapatkan data atau informasi yang berhubungan dengan masalah yang diteliti (Marfaii, 2011).

Teknik pengumpulan data pada

penelitian ini adalah dokumen, yaitu peneliti mengambil sumber penelitian atau objek dari dokumen atau catatan dari peristiwa yang sudah berlalu baik dalam bentuk tulisan, gambar, atau karya monumental. Dokumentasi yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

Tabel 10. Dokumen dan Sumber Data

Dokumen	Sumber
Peta administrasi, peta jalan, peta permukiman	<i>Website Ina Geoportal</i>
Citra Landsat tahun 2013, 2018, dan 2023	<i>Website USGS</i>
Data lereng	DEMNAS

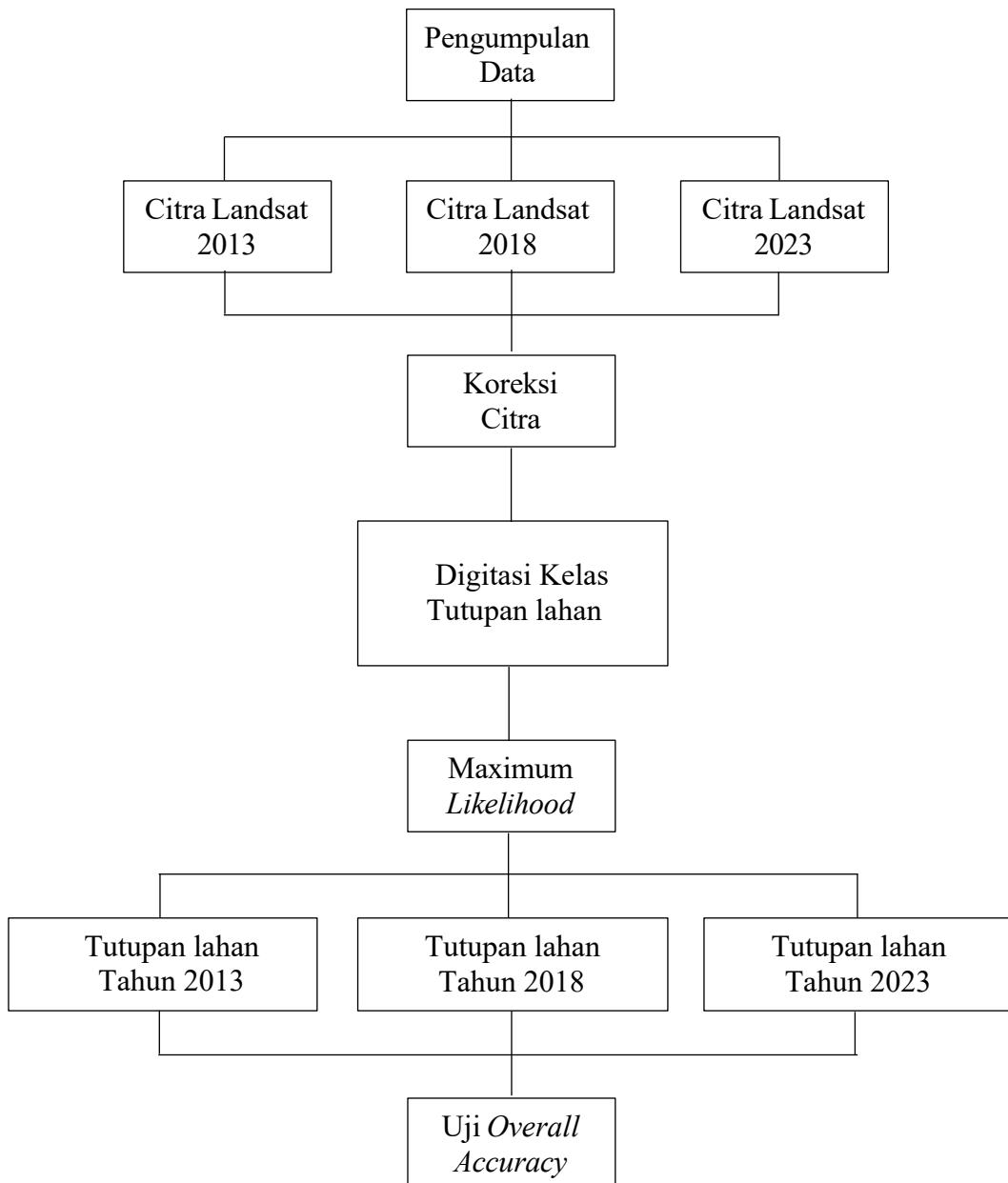
2. Tahap Pengolahan Data

Tahap pengolahan data yang dilakukan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

- Dilakukan koreksi citra, yaitu atmosfer dan geometrik sehingga kualitas citra yang digunakan memiliki kualitas yang baik dan saat dilakukan proses klasifikasi citra hasilnya juga akan baik. Proses ini dilakukan menggunakan *software QGIS 3.10* pada menu *Semi-Automatic Classification Plugin (SCP)*.
- Klasifikasi koreksi citra dilakukan setelah tahap koreksi, yang dilakukan menggunakan software ArcGIS 10.4. Setelah melalui

proses interpretasi citra, didapatkan hasil klasifikasi sebanyak 6 klasifikasi tutupan lahan yaitu hutan, lahan kosong, lahan terbangun, perairan, pertanian lahan basah, dan pertanian lahan kering. Proses ini dilakukan dengan menggunakan fitur *tool maximum likelihood Classification Supervised*, lalu setelahnya dilakukan *layout* menjadi peta tutupan lahan.

- c. Uji *overall accuracy*, yaitu menentukan keakuratan peta tutupan lahan yang sudah dibuat berdasarkan sumber dari data lapangan yang dilakukan menggunakan software ArcGIS 10.4 dengan fitur *accuracy assessment*. Tahap pengolahan data untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar.



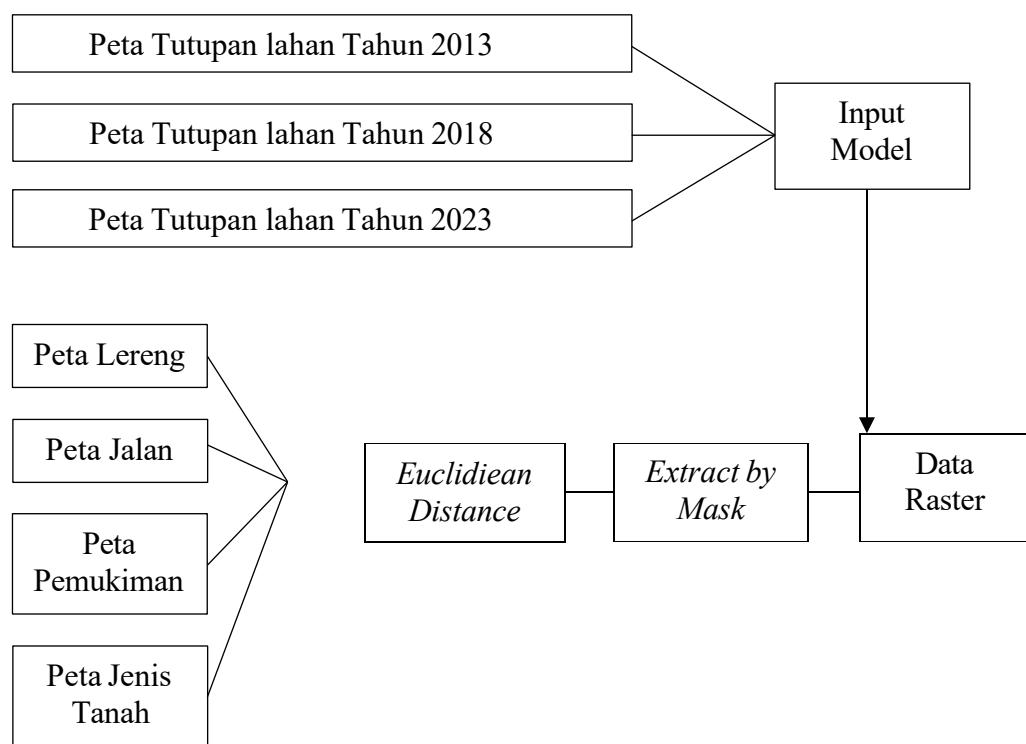
Gambar 2. Tahap Pengolahan Data

3. Tahap Pengolahan Faktor Pendorong

Proses pengolahan faktor pendorong oleh *molusce* dengan menggunakan QGIS dan euclidean distance dapat dilakukan dengan beberapa langkah dasar sebagai berikut.

- Persiapan data, yang dimulai dengan pengumpulan semua data yang diperlukan termasuk data mengenai faktor pendorong.

- b. Import data ke QGIS, dalam mengimpor data ke QGIS perlu diperhatikan agar data berada dalam format yang sesuai dan dengan koordinat yang benar.
- c. Menggunakan *euclidean distance*, guna memahami jarak spasial antara titik-titik data *molusce* dan faktor pendorong yang relevan. Setelah menghitung *euclidean distance*, selanjutnya dilakukan analisis spasial tambahan untuk memahami bagaimana faktor pendorong mempengaruhi proses prediksi.



Gambar 3. Tahap Pengolahan Faktor Pendorong

4. Tahap Pemodelan dan Prediksi

Tahap pemodelan dan prediksi pada penelitian ini yaitu menggunakan model CA dan LR yang dilakukan pada software QGIS 2.18.15 dengan bantuan plugin MOLUSCE. Cellular Automata (CA) berfungsi untuk mensimulasikan dinamika spasial perubahan tutupan lahan berdasarkan aturan transisi antar sel, sedangkan Logistic Regression (LR) digunakan untuk

menganalisis faktor-faktor pendorong perubahan lahan dan menentukan probabilitas terjadinya transisi.

Keterpaduan CA dan LR dalam MOLUSCE memungkinkan pemodelan yang lebih komprehensif, karena LR memberikan dasar statistik untuk mengukur pengaruh variabel pendorong, sementara CA mengintegrasikan hasil tersebut ke dalam simulasi spasial yang dinamis. Dengan demikian, MOLUSCE menjadi platform yang efektif untuk menghasilkan prediksi tutupan lahan yang akurat sekaligus dapat divalidasi dengan data eksisting. Data yang dimasukkan pada tahapan ini yaitu sebagai berikut.

- a. Peta penggunaan lahan tahun 2013.
- b. Peta tutupan lahan tahun 2018.
- c. Peta tutupan lahan tahun 2023.
- d. Faktor pendorong (peta jalan, peta permukiman, peta jenis tanah, dan peta kemiringan lereng) dalam bentuk raster.

Tahap pemodelan dan prediksi tutupan lahan yang disediakan oleh *mollusce* dan dilakukan pada penelitian ini yaitu sebagai berikut.

a. Tahap Inputs CA

Tahap ini dilakukan dengan memasukkan data yang digunakan untuk prediksi yaitu 2 buah peta tutupan lahan pada tahun berbeda yang digunakan sebagai acuan dalam perubahan tutupan lahan. Selanjutnya juga dimasukkan faktor pendorong, yang kemudian dilakukan proses *check geometry* untuk memastikan geometri antara tutupan lahan dan faktor pendorong sudah sesuai.

b. Tahap *Evaluating Correlation CA*

Tahap ini dilakukan untuk melihat dan mengecek ada atau tidaknya keterkaitan antara variabel dengan faktor pendorong, metode yang digunakan yaitu metode *pearson's correlation*. Metode *pearson's correlation* digunakan untuk mengecek apakah ada hubungan linier antara faktor-faktor pendorong

yang telah diidentifikasi. Proses evaluasi ini melibatkan perhitungan koefisien korelasi antara setiap pasang variabel, dimana nilai koefisien berkisar antara -1 hingga 1. Nilai positif menunjukkan korelasi yang positif, sedangkan nilai negatif menunjukkan korelasi negatif. Selain itu, nilai koefisien mendekati 0 menunjukkan bahwa tidak ada hubungan linier yang signifikan antara variabel tersebut.

c. Tahap *Area Change CA*

Tahap ini dilakukan untuk memunculkan perubahan tutupan lahan yang menunjukkan besar peluang terjadinya perubahan tutupan lahan. Jika ingin menampilkan peta perubahan tutupan lahan, maka dapat dilakukan klik menu *create change map* lalu pilih lokasi penyimpanan dan *save*.

Pada tahap ini akan diketahui besaran tutupan tutupan lahan pada tahun 2018 dan 2023. Data ini akan disediakan dalam satuan meter persegi hingga hektar. Analisis ini bertujuan untuk memahami perubahan dalam tutupan lahan selama periode waktu yang diteliti, memberikan gambaran yang jelas tentang evolusi lanskap dan pengaruhnya terhadap distribusi *molusce*.

d. Tahap *Transition Potential Modeling CA*

Tahap ini adalah tahap untuk memasukkan metode yang akan digunakan untuk memprediksi perubahan tutupan lahan. Penelitian ini menggunakan metode *Logistic Regression*, dengan *maximum iteration* 1x dan *neighbourhood* sebesar 1 px.

e. Tahap *Cellular Automata Simulation CA*

Tahap ini adalah tahap pemodelan perubahan tutupan lahan yaitu dimana tahun prediksi = tahun sebelumnya + rentang tahun. Pada penelitian ini tahun 2018 adalah tahun awal dan 2023 adalah tahun akhir. Rentang dari tahun 2018 ke tahun 2023 adalah 5 tahun. Sehingga 1 iterasi yaitu 5 tahun, 2023 +

$5 = 2028$, dan untuk mendapatkan prediksi perubahan lahan tahun 2043 membutuhkan 4 iterasi.

f. Tahap *Validation CA*

Validasi model perlu dilakukan untuk mengetahui keakuratan dari prediksi yang telah dibuat. Tingkat akurasi model dievaluasi menggunakan statistik Kappa. Berdasarkan klasifikasi Landis dan Koch (1977), nilai Kappa sebesar 0,81–1,00 termasuk dalam kategori kesesuaian sangat tinggi (*almost perfect*), nilai Kappa 0,61-0,80 termasuk dalam kategori tinggi (*substantial*), nilai Kappa 0,41-0,60 termasuk dalam kategori sedang (*moderate*), nilai Kappa 0,21-0,40 termasuk dalam kategori cukup (*fair*), bilai Kappa 0,00-0,20 termasuk dalam kategori rendah (*slight*), dan <0,00 termasuk dalam kategori sangat buruk (*poor*).

3.8. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data mengacu pada metode atau pendekatan yang digunakan untuk menganalisis data yang dikumpulkan dalam penelitian. Hal ini bertujuan untuk menghasilkan informasi yang bermakna, mengidentifikasi pola atau hubungan, dan mengambil kesimpulan yang didukung oleh data. Teknik ini membantu peneliti dalam memproses, menyusun, dan menginterpretasikan data secara sistematis.

Penelitian ini menggunakan teknik analisis data yaitu logistic regression. Pemodelan logistik atau regresi logistik adalah teknik analisis statistik yang digunakan untuk memprediksi kemungkinan kejadian suatu peristiwa biner. Dalam hal pemetaan *molusce*, untuk menerapkan regresi logistik pada pemetaan *molusce*, Langkah-langkahnya yaitu sebagai berikut.

1. Kumpulkan data, yaitu data shp dan citra yang dibutuhkan. Data shp dapat diperoleh melalui instansi dinas terkait seperti Dinas Pembangunan Umum.

2. Persiapkan data

Lakukan pra-pemrosesan data seperti membersihkan data yang tidak valid atau hilang, mengatasi ketidaksamaan dalam format data, dan mengubah variabel kategorial menjadi variabel dummy jika diperlukan.

3. Evaluasi model

Setelah melatih model, evaluasi kinerjanya menggunakan set pengujian. Prediksi dan pemetaan setelah model dievaluasi dan dianggap memadai, dapat menggunakan untuk memprediksi kategori molusce berdasarkan fitur yang diberikan. Misalnya, jika ingin memetakan moluscr ke dalam tertentu, dapat memberikan fitur morfologi atau karakteristik lainnya sebagai input ke model dan menghasilkan prediksi yang mungkin.

3.9. Estimasi dan Prediksi Stok Karbon

Penelitian ini menggunakan pendekatan yang mengacu pada pedoman IPCC 2006/2019 untuk sektor Perubahan Tutupan lahan dan Kehutanan (Land Use, Land-Use Change and Forestry/LULUCF). Pedoman ini direkomendasikan karena menyediakan standar internasional yang komprehensif dalam perhitungan emisi serta stok karbon, sehingga hasil estimasi menjadi lebih konsisten, dapat dibandingkan, dan memiliki tingkat akurasi yang dapat dipertanggungjawabkan. Berikut langkah-langkah yang dapat dilakukan dalam penelitian ini.

1. Klasifikasi Tutupan Lahan

Langkah pertama adalah melakukan klasifikasi hasil tutupan lahan ke dalam kategori tutupan lahan berdasarkan pedoman IPCC, yang mencakup Forest Land, Cropland, Grassland, Wetlands, Settlement, dan Other Land. Pengelompokan ini mengikuti kerangka LULUCF sebagaimana dijelaskan dalam IPCC Guidelines (IPCC, 2006; IPCC, 2019), serta telah diterapkan pada berbagai penelitian perubahan tutupan lahan (Houghton, 2005; Gunarso et al., 2013). Dengan demikian, setiap kelas lahan dapat dipetakan secara konsisten

terhadap kategori stok karbon IPCC.

2. Penentuan Faktor Stok Karbon untuk Setiap Kategori Lahan

Langkah kedua adalah menetapkan nilai faktor stok karbon (Carbon Stock Factor) untuk masing-masing kelas lahan. Penentuan ini mengacu pada IPCC Guidelines 2006/2019 yang menyajikan nilai biomassa atas (AGB), biomassa bawah (BGB), serasah (litter), dan karbon tanah (SOC) untuk ekosistem tropis (IPCC, 2006). Contoh nilai untuk Asia tropis meliputi hutan primer (435 ton C/ha), hutan sekunder (283 ton C/ha), perkebunan (221 ton C/ha), sawah (88 ton C/ha), dan lahan terbangun (42,5 ton C/ha). Pendekatan ini juga didukung oleh temuan Donato et al. (2011) dan Kauffman & Donato (2012) yang menegaskan bahwa estimasi stok karbon tingkat ekosistem dapat diperoleh secara akurat melalui nilai faktor stok karbon standar maupun hasil pengukuran lokal.

3. Perhitungan Stok Karbon per Periode Analisis

Perhitungan stok karbon dilakukan menggunakan rumus berikut.

$$SC_t = \sum (Luas_{i,t} \times Faktor_i)$$

Keterangan:

- SC_t : Stok karbon total pada periode ke- t (misalnya tahun 2023, 2033, atau 2043).
- Σ : Simbol penjumlahan, menunjukkan bahwa stok karbon dihitung dengan menjumlahkan seluruh kategori tutupan lahan.
- $Luas_{i,t}$: Luas kategori tutupan lahan ke- i pada periode ke- t (dinyatakan dalam hektar). Contoh kategori: hutan, semak belukar, lahan pertanian, permukiman, atau lahan terbuka.
- $Faktor_i$: Nilai faktor stok karbon (ton C/ha) untuk kategori tutupan lahan ke- i . Faktor ini diperoleh dari data lapangan, literatur, atau pedoman IPCC (2006). Misalnya, hutan primer memiliki faktor stok karbon tinggi, sedangkan lahan terbuka atau permukiman memiliki faktor stok karbon rendah.

Rumus tersebut diadopsi dari metodologi LULUCF IPCC (IPCC, 2006). Model perhitungan berbasis luas dan faktor stok ini telah digunakan secara luas dalam analisis dinamika karbon berbasis tutupan lahan (Houghton, 2005; Gibbs et al., 2007). Rumus ini memungkinkan perhitungan stok karbon total pada setiap periode berdasarkan perubahan luas masing-masing kategori lahan.

4. Prediksi Stok Karbon Tahun 2043 Menggunakan Model CA

Estimasi stok karbon masa depan dilakukan dengan memanfaatkan peta proyeksi tahun 2043 yang dihasilkan dari pemodelan Cellular Automata (CA). Model CA banyak digunakan dalam pemodelan spasial perubahan tutupan lahan karena mampu merepresentasikan dinamika perubahan berbasis kedekatan ruang (Clarke et al., 1997; Herold et al., 2003). Faktor stok karbon dari IPCC kemudian diterapkan pada peta prediksi tersebut untuk menghasilkan estimasi stok karbon tahun 2043.

5. Analisis Perubahan dan Kehilangan Stok Karbon

Kehilangan stok karbon dihitung menggunakan persamaan berikut.

$$\Delta SC = SC_{2023} - SC_{2043}$$

Keterangan:

- ΔSC : Kehilangan stok karbon (ton C) selama periode analisis. Nilai positif menunjukkan adanya penurunan stok karbon, sedangkan nilai mendekati nol menunjukkan stok relatif stabil.
- SC_{2023} : Stok karbon total pada tahun awal analisis (2023), dihitung berdasarkan luas masing-masing kategori tutupan lahan dikalikan dengan faktor stok karbonnya.
- SC_{2043} : Stok karbon total pada tahun akhir analisis (2043), dihitung dengan metode yang sama berdasarkan hasil prediksi tutupan lahan.

Pendekatan selisih stok ini merupakan metode standar yang digunakan IPCC dalam menghitung emisi akibat perubahan tutupan lahan (IPCC, 2006; IPCC, 2019). Berbagai studi juga menerapkan pendekatan ini untuk menilai potensi kehilangan karbon pada ekosistem hutan dan lahan pertanian (Gibbs et al., 2007; Donato et al., 2011).

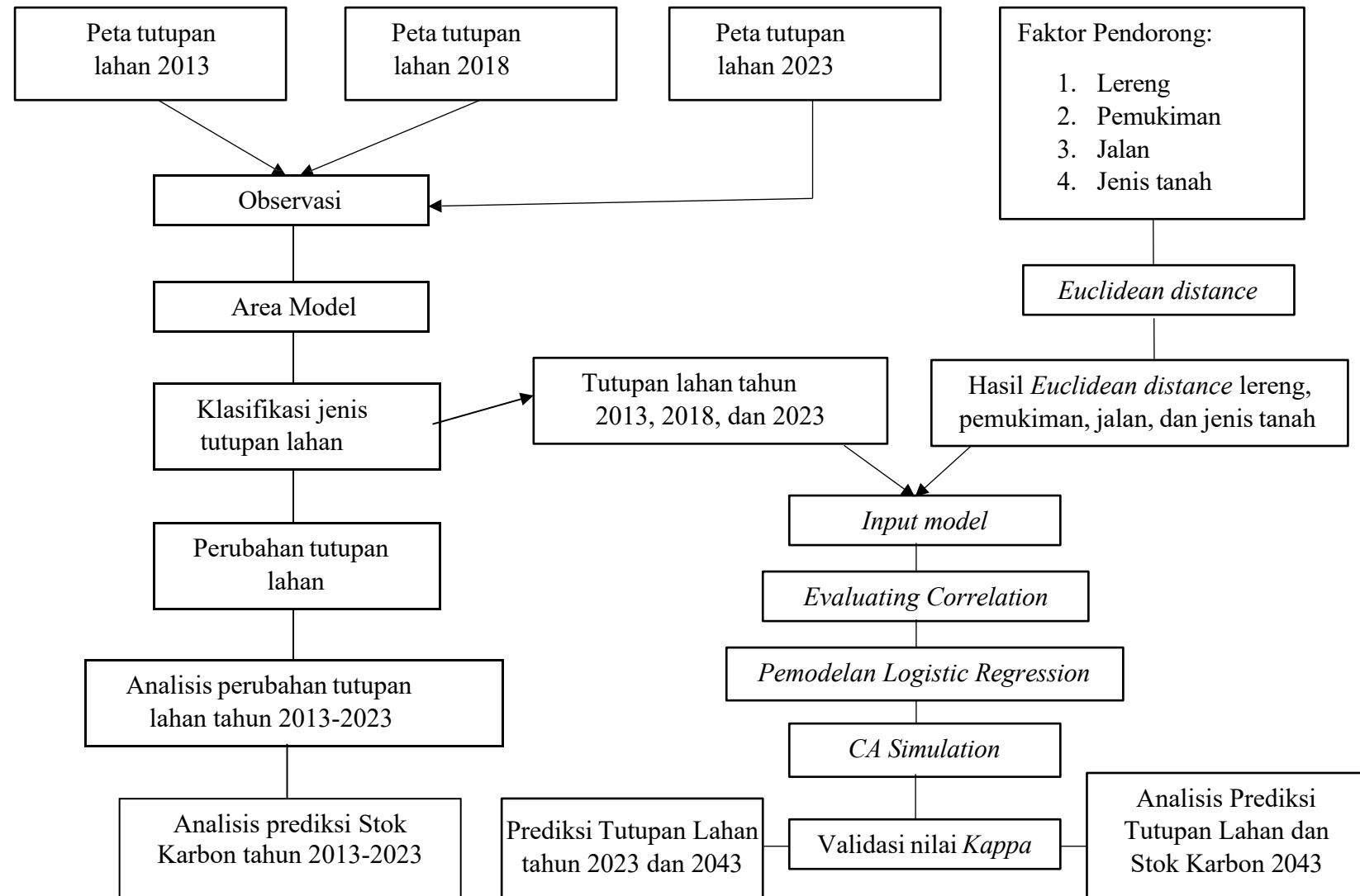
6. Konversi Perubahan Stok Karbon menjadi Emisi CO_{2e}

Perubahan stok karbon yang diperoleh selanjutnya dikonversikan menjadi emisi ekuivalen CO₂ menggunakan persamaan berikut.

$$Emisi \text{ (ton CO}_2\text{e)} = \Delta SC \times 3,67$$

Keterangan:

- Emisi (ton CO_{2e}) : Besarnya emisi karbon dioksida ekuivalen yang dihasilkan akibat kehilangan stok karbon.
- ΔSC : Kehilangan stok karbon (dalam ton C), dihitung dari selisih stok karbon tahun awal dan tahun akhir.
- 3,67 : Faktor konversi dari karbon (C) ke karbon dioksida (CO₂). Nilai ini berasal dari rasio massa molekul CO₂ (44) terhadap massa atom C (12), sehingga $\frac{44}{12} = 3,67$.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Adapun kesimpulan dari penelitian yang telah dilakukan untuk menjawab rumusan-rumusan masalah yang ada yaitu sebagai berikut.

1. Pola dan luasan perubahan tutupan lahan 2013–2023

Periode ini menunjukkan pola peningkatan pertanian lahan kering sebesar 10.560 ha dan pertanian lahan basah sebesar 1.600 ha, diiringi penurunan lahan kosong sebesar 11.753 ha serta hutan sebesar 3.300 ha. Lahan terbangun bertambah sebesar 1.254 ha, sedangkan perairan berkurang 603 ha. Pola ini mencerminkan dinamika spasio-temporal yang dipengaruhi oleh faktor ekonomi (alih fungsi ke permukiman dan industri), demografi (pertumbuhan penduduk), aksesibilitas (kedekatan dengan jaringan jalan), serta kebijakan tata ruang.

2. Prediksi perubahan tutupan lahan tahun 2043 (CA–LR)

Model CA–LR memproyeksikan pertanian lahan kering tetap menjadi kelas dengan luasan terbesar (226.570 ha), diikuti pertanian lahan basah (170.839 ha). Lahan terbangun meningkat menjadi 48.622 ha, sementara hutan menurun drastis menjadi 6.067 ha dan perairan menyusut menjadi 3.513 ha. Lahan kosong hampir hilang, tersisa hanya 348 ha. Tren dominan tetap pada ekspansi kawasan terbangun dan penurunan hutan yang berpotensi menekan fungsi ekologis wilayah.

3. Estimasi perubahan stok karbon 2013–2023

Stok karbon meningkat dari 22,436 juta ton C pada 2013 menjadi 25,423 juta ton C pada 2023, terutama karena kontribusi besar dari pertanian lahan basah dan kering. Hal ini menunjukkan adanya potensi peningkatan cadangan karbon dalam jangka pendek, meskipun penurunan hutan mulai menjadi faktor pembatas.

4. Prediksi hilangnya stok karbon tahun 2043

Stok karbon diperkirakan menurun dari 25,423 juta ton C (2023) menjadi 23,966 juta ton C (2043), sehingga terjadi kehilangan cadangan karbon sebesar -1,457 juta ton C atau setara dengan ±5,35 juta ton CO₂e. Penurunan ini terutama disebabkan oleh ekspansi lahan terbangun yang berkapasitas rendah menyimpan karbon serta berkurangnya luas hutan. Tren pasca-2023 mengindikasikan risiko defisit karbon jika konversi lahan tidak dikendalikan.

5. Strategi pengendalian perubahan tutupan lahan

Keberlanjutan cadangan karbon bergantung pada kebijakan pengendalian tutupan lahan melalui paradigma pembangunan rendah karbon, perencanaan tata ruang adaptif, perlindungan kawasan bernilai karbon tinggi, serta penerapan insentif dan internalisasi nilai karbon dalam pengelolaan lahan. Dengan strategi tersebut, kemampuan wilayah untuk menyimpan karbon dapat tetap terjaga di masa depan, sekaligus mendukung target penurunan emisi dan pembangunan berkelanjutan. Perencanaan tata ruang adaptif, perlindungan kawasan bernilai karbon tinggi, serta penerapan insentif dan internalisasi nilai karbon dalam pengelolaan lahan, agar kemampuan wilayah menyimpan karbon tetap terjaga di masa depan.

5.2. Saran

Adapun saran dari penelitian ini adalah:

1. Penambahan dan Penguatan Faktor Pendorong Perubahan Lahan

Model prediksi lahan menggunakan CA-LR akan menghasilkan akurasi yang lebih baik apabila semakin banyak faktor pendorong perubahan yang ditambahkan, seperti harga tanah, jarak kepusat ekonomi, kebijakan insentif investasi, dan kebijakan tata ruang. Penguatan parameter ini akan meningkatkan performa model CA dalam memprediksi dinamika spasial jangka panjang.

2. Pengendalian Ekspansi Lahan Terbangun

Hasil penelitian menunjukkan bahwa lahan terbangun menjadi penyebab utama penurunan stok karbon pada proyeksi 2043. Oleh karena itu, pemerintah daerah perlu melakukan pengendalian lahan terbangun melalui strategi tata ruang yang lebih ketat serta mendorong pengembangan perkotaan yang berorientasi keberlanjutan. Misalnya dengan penerapan

zoning regulation yang membatasi perluasan horizontal permukiman, mendorong pembangunan vertikal (apartemen, rusun), serta pemanfaatan kembali lahan terbangun yang tidak produktif. Dengan cara ini, ekspansi lahan terbangun dapat dikendalikan tanpa mengorbankan cadangan karbon dari lahan pertanian dan hutan.

3. Perlindungan dan Perluasan Kawasan Berhutan

Meskipun kontribusi hutan terhadap stok karbon menurun drastis pada proyeksi 2043, kelas hutan tetap memiliki peran penting sebagai penyimpan karbon jangka panjang. Upaya pelestarian kawasan hutan serta program rehabilitasi dan reforestasi perlu diperkuat dengan target minimal 2.000–3.000 ha per tahun di Kabupaten Lampung Tengah. Program ini berpotensi menambah cadangan karbon sekitar 74.000–111.000 ton C per tahun (dengan asumsi 37 t C/ha sesuai faktor terbaru), sekaligus memperkuat fungsi hutan sebagai penopang ekosistem dan mitigasi perubahan iklim jangka panjang.

4. Integrasi Perhitungan Stok Karbon dalam Perencanaan Wilayah

Pemerintah daerah perlu menjadikan hasil estimasi stok karbon sebagai bagian dari pertimbangan dalam penyusunan kebijakan tata ruang dan pembangunan berkelanjutan, sehingga setiap bentuk konversi lahan dapat dipertimbangkan dampak ekologisnya secara lebih komprehensif.

DAFTAR PUSTAKA

- Abraham Suriadikusumah et al. (2022). Prediction of Bandung District Land Use Change Using Markov Chain Modeling. *IJASEIT*. 12(1):1-8.
- Allan, A., Soltani, A., Abdi, M.H., & Zarei, M. (2022). Driving Forces behind Land Use and Land Cover Change: A Systematic and Bibliometric Review. *Land*. 11(8),1222. <https://doi.org/10.3390/land11081222>.
- Amane, et. al. 2023. *Demografi*. Penerbit Widina Media Utama. Bandung.
- Angga, A. T. (2024). *Analisis hubungan perubahan luas tutupan lahan terhadap nilai Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) tahun 2013–2023 di Kabupaten Lampung Tengah*. Repository Institut Teknologi Sumatera.
- Ansar, Z., & de Vries, W. T. (2024). Urban sprawl symptoms in Bandar Lampung suburban area, Indonesia. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 11(2), 205–222. <https://doi.org/10.14710/geoplanning.11.2.205-222>
- Arsyad, S. 2010. Konservasi Tanah dan Air. Edisi Ke-2. *IPB Press*. Bogor.
- Badan Pusat Statistik. 2024. Kabupaten Lampung Tengah Dalam Angka 2024 Vol. 53, 2024. ISSN 0215-4084.
- Badan Pusat Statistik. 2024. Provinsi Lampung Dalam Angka 2024 Vol. 55, 2024. ISSN 0303-1942.
- Badan Pusat Statistik. 2024. Statistik Indonesia (*Statistical Yearbook of Indonesia*) 2024 Vol. 52, 2024. ISSN 0126-2912.
- Badan Standardisasi Nasional. (2020). *SNI 7645:2020 – Klasifikasi Penutup Lahan*. Jakarta: BSN.
- Baja, S. 2012. *Perencanaan Tata Guna Lahan dalam Pengembangan Wilayah – Pendekatan Spasial dan Aplikasinya*. Penerbit ANDI. Yogyakarta.

- Balle,.A & Samuel, M. 1999. Modeling Urban Dynamics Through Gis-Based Cellular automata. *Jurnal Computers, Environments And Urban Systems*.
- Bintarto, R. Dan Hadisumarno, S. 1979. *Metode Analisa Geografi*. LP3S. Jakarta.
- Biology Insights. (2025). *How is carbon used in everyday life?* Biology Insights.
- British Society of Soil Science. (2023). *Soil carbon: What are carbon stocks and how can they be measured?* British Society of Soil Science.
- Cambron, T. W., Fisher, J. B., Hungate, B. A., Stocker, B. D., Keenan, T., Prentice, I. C., & Terrer, C. (2025). *Plant nutrient acquisition under elevated CO₂ and implications for the land carbon sink*. *Nature Climate Change*. <https://doi.org/10.1038/s41558-025-02386-y>
- Chapin, F.S. 1979. *Urban Land Use Planning*. University of Chicago Press. Chicago.
- Chawanda, C. J., Nkwasa, A., Thiery, W., & van Griensven, A. (2024). Combined impacts of climate and land-use change on future water resources in Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(1):117–138. <https://doi.org/10.5194/hess-28-117-2024>
- Chen, Y., Zhang, L., & Wang, J. (2025). *Integrating slope and soil constraints into CA-LR models for land use change prediction*. *Environmental Modelling & Software*, 170, 105642. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.105642>
- Clarke, K.C., Hoppen, S., dan Gaydos, L. 1997. *A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area*. Environment and Planning B.
- Cullingswoth, B. 1997. *Planning in the USA: Policies, Issues and Processes*. London. New York: Routledge.
- Dabukke, A. S., dan Susetyo, C. 2021. Prediksi Perubahan Tutupan Lahan Pasca Pembangunan Gerbang TOL Soreang di Kecamatan Soreang, Kabupaten Bandung Menggunakan Regresi Logistik Biner. *Jurnal Teknik ITS*. 10(2):198-203. ISSN: 2337-3539.
- Del Moro, F. N. N., Dungca, J. T., Cabral, C. C., & Cabauatan, R. R. (2024). Land conversion and industrialization and its impact on crop production. *International Journal of Environmental and Agriculture Research*, 10(10), 15–27
- Donato, D.C., Kauffman, J.B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M., dan Kanninen, M. 2011. *Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics*. *Nature Geoscience*.

- DTHN Carbon. (2024). *Understanding the various applications and uses of carbon in modern industries and everyday life*. DTHN Carbon News.
- Eastman, J. R. (2012). *IDRISI Selva manual: Guide to GIS and image processing*. Clark Labs, Clark University.
- Effendi, R. dan Akmal, H. 2020. Geografi dan Ilmu Sejarah: Deskripsi Geohistori untuk Ilmu Bantu Sejarah. *Jurnal Geo Sejarah*. Universitas Negeri Padang.
- Encyclopaedia Britannica. (2026). *Carbon: Facts, uses, & properties*. Encyclopaedia Britannica.
- FAO. (2024). *The State of World Fisheries and Aquaculture 2024: Blue transformation in action*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cc4630en>
- Feng, B., Onda, Y., Wakiyama, Y., Taniguchi, K., Hashimoto, A., & Zhang, Y. (2022). Author Correction: Persistent impact of Fukushima decontamination on soil erosion and suspended sediment. *Nature Sustainability*, 5(12), 1043–1044. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00987-5>
- Fitriana, A.L., Subiyanto, S., dan Firdaus, H.S. 2017. Model Cellular Automata Markov untuk Prediksi Perkembangan Fisik Wilayah Permukiman Kota Surakarta Menggunakan Sistem Informasi Geografis. *Jurnal Geodesi Undip*. 6(4):246-253. ISSN: 2337-845X.
- Gibbs, H.K., Brown, S., Niles, J.O., dan Foley, J.A. 2007. *Monitoring and estimating tropical forest carbon stocks*. Environmental Research Letters.
- Gitima, D., Ananda, S., & Wekesa, B. 2025. *Assessment of forest carbon stock variation under different land cover types in tropical ecosystems*. Scientific Reports.
- Gunarso, P., Hartoyo, M.E., Agus, F., dan Boehm, H.D.V. 2013. *Carbon stocks and changes in tropical forests of Southeast Asia*. Report for the United Nations REDD Programme.
- Hagget, P. 1979. *Geography : A Modern Synthesis*. Harper & Row Publisher. New York.
- Hapsary, M.S., Subiyanto, S. Dan Fisdaus, H. S. 2021. Analisis Prediksi Perubahan Penggunaan Lahan dengan Pendekatan Artificial Neural Network dan Regresi Logistik di Kota Balikpapan. *Jurnal Geodesi Undip*. 10(2):88-97. ISSN: 2337-845X.
- Haseeb, M., Tahir, Z., Mehmood, S. A., Gill, S. A., Farooq, N., Butt, H., Iftikhar, A., Maqsood, A., Abdullah-Al-Wadud, M., & Tariq, A. (2024). *Enhancing*

- carbon sequestration through afforestation: Evaluating the impact of land use and cover changes on carbon storage dynamics. Earth Systems and Environment, 8(6), 1563–1582. <https://doi.org/10.1007/s41748-024-00414-z>*
- Herold, M., Scepan, J., dan Clarke, K.C. 2003. *Assessing land-use change using remote sensing and CA–Markov modeling*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation.
- Hidayat, S. dan Sedarmayanti. 2002. *Metodologi Penelitian*. Mandar Maju. Bandung.
- Hosmer, D. W., Lemeshow, S., & Sturdivant, R. X. (2013). *Applied logistic regression* (3rd ed.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781118548387>
- Hou, H., Liu, Y., & Zhang, S. (2023). *Integrating MOLUSCE with CA–LR for land use change simulation in QGIS*. *Environmental Modelling & Software*, 162, 105567. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.105567>
- Houghton, R.A. 2005. *Aboveground forest biomass and the global carbon balance*. Global Change Biology.
- Huang, J., Chen, Q., Wang, Q., Gao, J., Yin, Y., & Guo, H. (2023). Future carbon storages of ecosystem based on land use change and carbon sequestration practices in a large economic belt. *Environmental Science and Pollution Research*, 30, 90924–90935. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28555-0>
- Indarto. 2013. *Sistem Informasi geografis*. Graha Ilmu. Yogyakarta.
- IPCC. 2006. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- IPCC. 2019. *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Irwin, E.G. and Bockstael, N.E., 2002. Interacting agents, spatial externalities and the evolution of residential land use patterns. *Journal of Economic Geography*. 2(1):31–54. <https://doi.org/10.1093/jeg/2.1.31>.
- Jaya, I. 2010. Analisis Citra Digital: Perspektif Penginderaan Jauh Untuk Pengelolaan Sumberdaya Alam. Bogor Id: Fakultas Kehutanan IPB.
- Kauffman, J.B., dan Donato, D. 2012. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK). (2020). *Pedoman Sistem Registri Nasional untuk Aksi Mitigasi Perubahan Iklim*. Jakarta:

KLHK.

- Khachoo, Y. H., Cutugno, M., Robustelli, U., & Pugliano, G. (2024). Impact of land use and land cover (LULC) changes on carbon stocks and economic implications in Calabria using Google Earth Engine (GEE). *Sensors*, 24(17), 5836. <https://doi.org/10.3390/s24175836>
- Khalil, M. 2015. Analisis perubahan tutupan lahan Kabupaten Paser. Bandung
- Krisnawati, H., Adinugroho, W. C., & Hutabarat, S. (2024). Carbon stock assessment in secondary forests of Sumatra. *Forest Ecology and Management*, 546, 121345.
- Kurniawan, F., Adrianto, L., Bengen, D. G., & Prasetyo, L. B. (2023). Marine ecotourism development and coastal community welfare: Evidence from Indonesia. *Ocean & Coastal Management*, 234, 106452. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106452>
- Laily, K. 2021. Modeling Urban Dynamics Through Gis-Based Cellular automata. Computers. *Journal Environments And Urban Systems*.
- Li, J., Wang, Y., & Chen, H. (2024). Land use, spatial planning, and their influence on carbon emissions: A scientometric review. *Land*, 14(7), 1406. <https://doi.org/10.3390/land14071406>
- Li, W., Sun, Z., & Huang, Y. (2025). Integrating UAV and LiDAR technologies for accurate forest canopy height and biomass estimation. *Forests*, 16(1), 112.
- Li, X., & Gong, P. (2023). *Cellular automata modeling of urban growth: Recent advances and future directions*. *Landscape and Urban Planning*, 235, 104712. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2023.104712>
- Liu, Y., Fang, F., & Zhang, S. (2024). Coupling logistic regression with cellular automata for robust land use change simulation. *Sustainability*, 16(2), 845.
- Lumbantoruan, W. 2001. Pendekatan Geografi sebagai Ciri Khas Ilmu Geografi. *Jurnal Pendidikan Science*. 25(3):28-35.
- Mahardika, B. P., & Muta'ali, L. 2018. Dampak Alih Fungsi Lahan Pertanian Menjadi Lahan Terbangun Untuk Industri Terhadap Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat Sebagian Wilayah Kecamatan Ceper. *Jurnal Bumi Indonesia*, 7(3).
- Marfaii, A. 2011. Pengantar Pemodelan Geografi. Panji Budi, Red Carpet Studio.
- Martinez-Pastur, G., Peri, P. L., & Lencinas, M. V. (2023). Sustainable forest landscape management towards ecosystem services and biodiversity. *Land*,

- 12(3), 655. <https://doi.org/10.3390/land12030655>
- Ministry of Environment and Forestry Republic of Indonesia. (2022). *Indonesia's second forest reference emission level (FREL) submission to the UNFCCC*. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). Retrieved from https://redd.unfccc.int/files/2nd_frl_indonesia_final_submit.pdf
- Miswar, D., Sugiyanta, I.G., Yarmaidi, dan Yasta, R.D. 2020. Analisis Geospasial Perubahan Penggunaan Lahan Sawah Berbasis LP2B Kecamatan Pagelaran Utara. *Internasional journal of agriculture*. 21(2):130-143. P-ISSN 0216-8138 E-ISSN 2580-0183 DOI: <http://dx.doi.org/10.23887/mkg.v21i2.27760>.
- Miswar, D. dan Halengkara, Listimbinang. 2018. *Pengantar Penginderaan Jauh*. Mobius. Yogyakarta.
- Mulya, Q.P., Aliyah I., dan Yudana G. 2022. Perubahan Penggunaan Lahan dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi di Kawasan Jalan Ahmad Yani Kartasura Berdasarkan Persepsi Masyarakat. *Jurnal Pembangunan Wilayah dan Perencanaan Partisipatif*. 17(2):237-253. ISSN: 1858-4837; E-ISSN: 2598-019X DOI: 10.20961/region.v17i2.38660.
- Mulya, S. P., Hudalah, D., Prilandita, N., & Sakti, A. D. (2024). Spatio-temporal changes in agricultural land and rural–urban transitions in Greater Jakarta, Indonesia. *Regional Environmental Change*, 24(145). <https://doi.org/10.1007/s10113-024-02306-4>
- Munibah, K., Sitorus, S. R. P., Rustiadi, E., dan Gandasasmita, K. H. 2010. Dampak Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Erosi di DAS Cidanau, Banten. *Jurnal Tanah dan Iklim*. 32:55-69.
- Murdiyarno, D., Agus, F., & Kurnianto, S. (2023). Carbon stocks in tropical peat swamp forests of Kalimantan: Implications for climate mitigation. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 28(5), 765–782.
- Naik, N. (2024, November 25). *Indonesia's forests: A critical biodiversity and carbon hub*. Climate Scorecard. Retrieved from <https://www.climatescorecard.org/2024/11/indonesias-forests-a-critical-biodiversity-and-carbon-hub/>
- Nugraheni, I. L., Usman, M., & Sutarto. (2023). Analysis of regional spatial regulation policies in Pesawaran District. *Journal of Law, Social, and Society*, 5(2), 2039–2055.
- Nurfatimah, N. 2020. Lahan, Air dan Pembangunan di Kec. Marioriwato. Makassar. UIN Alauddin.
- Ozdilek, U. (2024). On sustainable land rent. *Frontiers in Sustainability*, 5,

1360061. <https://doi.org/10.3389/frsus.2024.1360061>
- Pemerintah Kabupaten Lampung Tengah. (2023). Peraturan Daerah Kabupaten Lampung Tengah Nomor 5 Tahun 2023 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Lampung Tengah Tahun 2023–2043. Lampung Tengah: Pemerintah Kabupaten Lampung Tengah.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Phillips, O. L., Houghton, R. A., Fang, J., Kauppi, P. E., Keith, H., Kurz, W. A., Ito, A., Lewis, S. L., Nabuurs, G.-J., Shvidenko, A., Hashimoto, S., Lerink, B., Schepaschenko, D., Castanho, A., & Murdiyarso, D. (2024). *The enduring world forest carbon sink*. *Nature*, 620, 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07602-x>
- Pang, Y., Zhang, M., Zhong, H., Cevin, T., Sun, C., Zhang, S., Li, X., Dai, J., Liu, C., & Zhang, C. (2023). *Current progress and future trends in carbon sources and sinks in farmland ecosystems: A bibliometric analysis (2002–2023)*. *Biology*, 14(4), 365. <https://doi.org/10.3390/biology14040365>
- Peng, D., Zhang, B., Zheng, S., Ju, W., Chen, J. M., Ciais, P., Guo, H., Pan, Y., Yu, L., Xu, Y., Zhao, B., Benediktsson, J. A., Huete, A. R., Shi, Z., Hu, Y., Liu, L., Chen, F., Shen, M., Huang, L., & Zhang, X. (2025). Newly established forests dominated global carbon sequestration change induced by land cover conversions. *Nature Communications*, 16(1), 61956. <https://doi.org/10.1038/s41467-025-61956-y>
- Peruge dan Sakka. 2012. Model Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Cellular Automata - Markov Chain Di Kawasan Mamminasata. Makassar Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam. Universitas Hasanuddin.
- Prasetyo, L. B., Sitorus, S. R. P., & Kartodihardjo, H. (2022). Land use change and agricultural adaptation under climate variability in Indonesia. *Environment and Natural Resources Journal*, 20(3), 215–228. <https://doi.org/10.32526/ennrj.20.3.2022.21>
- Prihatin, R. B. 2015. Alih Fungsi Lahan Di Perkotaan Studi Kasus Di Kota Bandung Dan Yogyakarta. *Jurnal Aspirasi*.
- Purwantoro & Hadi. 1996. Studi Perubahan Penggunaan Lahan Di Kecamatan Umbulharjo Kota Yogyakarta Tahun 1987-1996 Berdasarkan Foto Udara.
- Rahman, M., Alam, S., & Hasan, M. (2024). *Socio-economic drivers of land use change: Integrating CA-LR with demographic pressure analysis*. *Journal of Environmental Management*, 345, 118765. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.118765>
- Rahmawati, D., & Rukmana, D. (2025). Urban politics on housing policy transformation in Indonesia: An institutional perspective. *Housing Studies*. Advance online publication.

<https://doi.org/10.1080/02673037.2025.2552404>

- Ramsar Convention on Wetlands. (2025). *Global Wetland Outlook 2025: Valuing, conserving, restoring and financing wetlands*. Gland, Switzerland: Secretariat of the Convention on Wetlands. Retrieved from https://www.ramsar.org/sites/default/files/2025-07/GWO2025_eng.pdf
- Ritohardoyo, S. 2013. Penggunaan Dan Tata Guna Lahan. Yogyakarta.
- Roy, c. a., Rusdiana, O., & Ichwandi, I. 2017. Dinamika Perubahan dan Kebijakan Pemanfaatan Ruang di Kabupaten Bogor, Provinsi Jawa Barat. *Journal of Environmental Engineering & Waste Management*, 2(2), 60–68.
- Rukajat, A. 2018. Pendekatan Penelitian Kuantitatif: Quantitative Research Approach. Deepublish.
- Rustiadi, dkk. (2011). *Perencanaan dan Pengembangan Wilayah*. Jakarta: Yayasan Pustaka Obor Rakyat.
- Saputra, I. G., & Budhi, M. K. (2015). Studi Alih Fungsi Dan Dampaknya Terhadap Sosial Ekonomi Petani Jambu Mete Di Kecamatan Kubu, Kabupaten Karangasem. *E-Jurnal Ekonomi dan Bisnis Universitas Udayana*.
- Saputra, R. A., dan Widodo, P. P. (2014). Komparasi Algoritma Klasifikasi Data Mining Untuk Memprediksi Penyakit Tuberculosis (Tb): Studi Kasus Puskesmas Karawang. *Seminar Nasional Inovasi dan Tren (SNIT)*. April 1-8.
- Sari, R. P., Nugroho, S. P., & Prasetyo, L. B. (2021). Estimasi stok karbon berdasarkan tutupan lahan menggunakan pendekatan SRN di Kabupaten Bogor. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 11(2), 145–154
- Sari, Y. A. dan Dewanti, D. 2018. Perubahan Tutupan Lahan dan Faktor-Faktor yang Mempengaruhi di Sekitar Area Panam Kota Pekanbaru. *In Seminar Nasional Geomatika*. 751-760.
- Setiyanto, A., & Irawan, B. 2015. Pembangunan Berbasis Wilayah : Dasar Teori, Konsep Operasional Dan Implementasinya Di Sektor Pertanian. Jakarta: Litbang Pertanian.
- Singh, A. K. 2023. Modelling Land Use Land Cover Changes Using Cellular Automata In A Geo-Spatial Environment. Itc.
- Singh, S. (2024). Land use and land cover change: A comprehensive review of environmental implications. *International Journal of Landscape*, 1(2), 1–15.

- Sitawati, Anita. 2016 Materi Pokok Tata Guna dan Pengembangan Lahan. Tangerang Selatan: Universitas Terbuka.
- Sitorus, S. R. P., & Prasetyo, L. B. (2021). Perubahan dan prediksi penggunaan/penutupan lahan di Kabupaten Lampung Selatan periode 2007–2019. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (JPSL)*, 11(2), 291–304. <https://journal.ipb.ac.id/jpsl/article/view/29140>
- Springer, S., & colleagues. (2025). *Land-use change drives soil organic carbon losses in a temperate forest ecosystem. Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s44378-025-00146-0>
- Suberlian, D. 2003. Studi Simulasi Moodel Sistem Dinamis Interaksi Guna Lahan Permukiman dan Transportasi di Kecamatan Banyumanik Kota Semarang, Universitas Diponegoro. Semarang.
- Sugiyono. 2015. *Metodologi Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif,dan R&D*. Alfa Beta. Bandung.
- Suhardjo,A. J. 1996. *Konsep-Konsep Dasar dalam Geografi*. Fakultas Geografi UGM. Yogyakarta.
- Supardan, D. 2007. *Pengantar Ilmu Sosial*. PT Bumi Aksara. Jakarta.
- Supriyanto, S., Budianto, A., & Santiago, F. (2024). Implementation of building use rights in state land management by developers. *Jurnal Impresi Indonesia*, 3(12). <https://doi.org/10.58344/jii.v3i12.5733>
- Susanti, E. dan Endayani, H. 2018. *Konsep Dasar IPS*. CV Widya Puspita. Medan.
- Susilowati, S. H. (2020). Agricultural transformation in Indonesia: Productivity, diversification, and food security. *Analisis Kebijakan Pertanian*, 18(1), 1–16. <https://doi.org/10.21082/akp.v18n1.2020.1-16>
- Suwargana, N. 2013. Resolusi Spasial, Temporal Dan Spektral Pada Citra Satelit Landsat, Spot Dan Ikonos. Lembaga Penerbangan Antariksa Nasional.
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., & Zaldei, A. (2023). UAV and LiDAR synergy for forest monitoring: Advances in canopy structure and carbon stock assessment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, 103278.
- Utami, D.Y., Nurlelah, E., dan Hasan, F.N. 2021. Comparison of Neural Network Algorithms, Naïve Bayes and Logistic Regression to Find The Highest Accuracy In Diabetes. *JITE (Journal of Informatics and*

- Telecommunication Engineering). 5(1):53-64. ISSN: 2549-6274 DOI: 10.31289/jite.v5i1.5201.*
- Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, L., Espaldon, V., and Mastura, S.S.A. (2002). Modeling the spatial dynamics of regional land use: The CLUE-S model. *Environmental Management*. 30(3):391-405.
- Wael, K. dan Siahaya, W. A. 2022. Land Cover Classification Of Kei Kecil Island In 2019 Based On Multispectral Image Analysis. *Jurnal Budidaya Pertanian*. 18(1):18-27. ISSN: 1858-4322 DOI: 10.30598/jbdp.2022.18.1.18.
- Wahyunto A, Priyono A, Sunaryo. Studi Perubahan Penggunaan Lahan Sub DAS Citarik, Jawa Barat dan DAS Kaligarang, Jawa Tengah. Semin. Nas. Multifungsi Lahan Sawah, Bogor: Balai Penelitian Tanah, Badan Penelitian dan Pengembangan Pertanian, Kementerian Pertanian; 2001.
- Wang, Y., & Jin, X. (2025). Land use, spatial planning, and their influence on carbon emissions: A comprehensive review. *Land*, 14(7), 1406.
- Wardani, D. W., Danoedoro, P., dan Susilo, B. (2016). Kajian Perubahan Penggunaan Lahan Berbasis Citra Satelit Penginderaan Jauh Resolusi Menengah Dengan Metode Multi Layer Perceptron dan Markov Chain. *Majalah Geografi Indonesia*, 30(1), 9–18. <https://doi.org/0215-1790>.
- Wijaya, H. (2011). Modeling of land use and cover changes (LUCC) in Deli Serdang Regency. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, IPB, 1–10.
- Yulianti, N., Hadi, F. S., & Wibowo, A. (2020). Integrasi data spasial dan SRN untuk estimasi emisi karbon berbasis lahan. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(1), 23–34.
- Yunus, H. S. 1996. *Geografi Manusia*. Fakultas Geografi UGM. Yogyakarta.
- Zhang, Y., Li, Y., Wang, J., Liu, Y., & Xu, C. (2023). Integrating ecosystem services into ecological restoration: A pathway to sustainability. *Ecological Indicators*, 153, 110789. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110789>
- Zhang, Y., Li, Y., Wang, J., Liu, Y., & Xu, C. (2024). *Carbon emissions embodied in global trade: Structural decomposition analysis and policy implications*. *Science of The Total Environment*, 907, 167626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167626>
- Zhou, W., Huang, Q., & Li, H. (2023). *Accessibility and land conversion: A CA-LR approach to urban expansion modeling*. *Computers, Environment and Urban Systems*, 102, 101934. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbssys.2023.101934>