



# PEMANTAUAN PEMULIHAN EKOSISTEM PADA KORIDOR TAMAN NASIONAL GUNUNG HALIMUN SALAK DAN SEKITARNYA

**THERESA VINDRI PRAMESTI**



**PROGRAM STUDI KONSERVASI BIODIVERSITAS TROPIKA  
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2025**

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

## PERNYATAAN MENGENAI TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul “Pemantauan Pemulihan Ekosistem pada Koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak dan Sekitarnya” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2025

Theresa Vindri Pramesti  
E3501241016

- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University  
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

## RINGKASAN

THERESA VINDRI PRAMESTI. Pemantauan Pemulihan Ekosistem pada Koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak dan Sekitarnya. Dibimbing oleh SITI BADRIYAH RUSHAYATI dan LILIK BUDI PRASETYO.

Kegiatan pemanfaatan sumber daya yang dilakukan masyarakat di kawasan Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS) berpotensi mengubah tutupan lahan. Hal tersebut mengakibatkan daerah koridor TNGHS rentan mengalami deforestasi dan degradasi hutan. Salah satu strategi untuk mengurangi dampak kegiatan tersebut adalah melakukan upaya pemulihan ekosistem melalui kegiatan restorasi. Akan tetapi, kegiatan tersebut belum dipantau secara berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan mengkaji pemulihan ekosistem pada lahan restorasi dan sekitarnya di koridor TNGHS selama periode 2011–2024.

Pemulihan ekosistem dinilai berdasarkan tiga fungsi utama ekosistem: ameliorasi iklim mikro, kelestarian biodiversitas, dan produktivitas karbon, menggunakan pendekatan spasial berbasis citra Landsat dan analisis metrik lanskap. Penelitian ini dilakukan dengan analisis spasial dengan citra satelit Landsat 5, 7, dan 8 untuk menilai suhu permukaan, kerapatan tajuk, produktivitas primer bersih, dan indeks fragmentasi habitat. Pemantauan melalui analisis spasial dianggap lebih mampu untuk memantau pemulihan ekosistem secara cepat dan dapat dilakukan sepanjang waktu dibandingkan dengan pemantauan lapang.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kegiatan restorasi belum sepenuhnya berhasil memulihkan fungsi ekosistem hutan, karena nilai indikator di lahan restorasi masih berada di bawah kawasan hutan. Meski demikian, beberapa indikator menunjukkan tren peningkatan dibandingkan kondisi awal restorasi. Selama 14 tahun, *Land Surface Temperature* (LST) di lahan restorasi meningkat sebesar 1,09 °C menjadi 22,25 °C, namun tetap mendekati suhu di kawasan hutan sebesar 21,17 °C. Hal ini mengindikasikan bahwa restorasi berperan dalam menahan laju peningkatan LST. *Forest Canopy Density* (FCD) meningkat dari 51,33% menjadi 62,83% dan termasuk dalam kategori sedang, namun belum menyamai FCD hutan sebesar 66,66% *Net Productivity Primer* (NPP) menurun dari 29,93 tonC/ha/tahun menjadi 25,10 tonC/ha/tahun sama seperti wilayah hutan, namun tetap lebih rendah dibandingkan hutan yang mencapai 27,57 tonC/ha/tahun.

*Number of Patch* (NP) menurun dari 3,16 menjadi 2,8 namun lebih tinggi dibandingkan wilayah hutan yang bernilai 1,62. *Edge Density* (ED) menurun dari 76,71 m/ha menjadi 73,65 m/ha namun lebih tinggi dibandingkan wilayah hutan yang bernilai 17,48 m/ha. *Mean Shape Index* (MSI) yang meningkat dari 1,58 menjadi 1,61 dan lebih tinggi dibandingkan wilayah hutan yang bernilai 1,27 meskipun mengalami peningkatan nilai pula. *Interspersion and Juxtaposition Index* (IJI) yang meningkat dari 51,66% menjadi 55,81% dibandingkan wilayah hutan yang bernilai 7,4%. Hal ini menunjukkan fragmentasi habitat yang masih terjadi di lahan restorasi. Penelitian ini menegaskan pentingnya penguatan strategi restorasi dan pemantauan spasial jangka panjang untuk meningkatkan efektivitas pemulihan ekosistem dalam mendukung keberlanjutan ekosistem di kawasan konservasi TNGHS.

Kata kunci: analisis spasial, rehabilitasi ekologis, revegetasi, struktur lanskap



## SUMMARY

THERESA VINDRI PRAMESTI. Monitoring of Ecosystem Recovery in the Corridor of Gunung Halimun Salak National Park and Its Surroundings. Supervised by SITI BADRIYAH RUSHAYATI and LILIK BUDI PRASETYO.

Community resource utilization activities within the Mount Halimun Salak National Park (TNGHS) area have the potential to alter land cover. This condition makes the TNGHS corridor area vulnerable to deforestation and forest degradation. One strategy to mitigate these impacts is through ecosystem recovery efforts via restoration activities. However, these efforts have not yet been monitored sustainably. This study aims to evaluate and assess ecosystem recovery in restored lands and surrounding areas within the TNGHS corridor over the period of 2011–2024.

Ecosystem recovery was assessed based on three key ecosystem functions: microclimate amelioration, biodiversity conservation, and carbon productivity, using a spatial approach based on Landsat imagery and landscape metrics analysis. The research employed spatial analysis using Landsat 5, 7, and 8 satellite imagery to assess land surface temperature, canopy density, net primary productivity, and habitat fragmentation indices. Spatial analysis is considered more effective for ecosystem recovery monitoring as it allows faster and continuous assessment compared to field-based monitoring.

The results indicate that restoration activities have not yet fully succeeded in restoring forest ecosystem functions, as indicator values in the restored areas remain below those in forested areas. Nevertheless, some indicators have shown positive trends compared to the initial restoration conditions. Over the past 14 years, the Land Surface Temperature (LST) in restored areas increased by 1.09 °C to 22.25 °C, which remains close to the forest LST of 21.17 °C. This suggests that restoration has helped slow the rate of LST increase. Forest Canopy Density (FCD) increased from 51.33% to 62.83%, categorized as moderate, but still did not reach the forest level of 66.66%. Net Primary Productivity (NPP) decreased from 29.93 tonC/ha/year to 25.10 tonC/ha/year, aligning with trends in forest areas but still lower than the forest average of 27.57 tonC/ha/year. The Number of Patches (NP) decreased from 3.16 to 2.8 but remained higher than that of the forest (1.62). Edge Density (ED) declined from 76.71 m/ha to 73.65 m/ha, also higher than the forest value of 17.48 m/ha. The Mean Shape Index (MSI) increased from 1.58 to 1.61, compared to 1.27 in forest areas. The Interspersion and Juxtaposition Index (IJI) increased from 51.66% to 55.81%, far exceeding the forest value of 7.4%, indicating that habitat fragmentation still persists in the restored areas. This study highlights the importance of strengthening restoration strategies and implementing long-term spatial monitoring to enhance the effectiveness of ecosystem recovery in supporting landscape sustainability in the TNGHS conservation area.

**Keywords:** ecological rehabilitation, landscape structure, revegetation, spatial analysis



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2025  
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

*Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.*

*Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.*



@Hak cipta milik IPB University

IPB University



IPB University  
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

# **PEMANTAUAN PEMULIHAN EKOSISTEM PADA KORIDOR TAMAN NASIONAL GUNUNG HALIMUN SALAK DAN SEKITARNYA**

**THERESA VINDRI PRAMESTI**

Tesis  
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar  
Magister pada  
Program Studi Konservasi Biodiversitas Tropika

**PROGRAM STUDI KONSERVASI BIODIVERSITAS TROPIKA  
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN  
INSTITUT PERTANIAN BOGOR  
BOGOR  
2025**



*@Hak cipta milik IPB University*

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:

1 Dr. Adisti Permatasari Putri Hartoyo, S.Hut., M.Si.

Judul Tesis : Pemantauan Pemulihan Ekosistem pada Koridor Taman Nasional  
Gunung Halimun Salak dan Sekitarnya  
Nama : Theresa Vindri Pramesti  
NIM : E3501241016

Disetujui oleh

Pembimbing 1:  
Dr. Ir. Siti Badriyah Rushayati, M. Si.

Pembimbing 2:  
Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M. Sc.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:  
Prof. Dr. Ir. Yanto Santosa, DEA  
NIP 19601004 198501 1 001

Dekan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan:  
Prof. Dr. Ir. Naresworo Nugroho, MS  
NIP 19650122 198903 1 002

Tanggal Ujian:  
16 Juli 2025

Tanggal Lulus:  
28 JUL 2025



## PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *Subhanaahu Wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang telah dilaksanakan pada Januari 2025 hingga Maret 2025 ini ialah pemulihan ekosistem, dengan judul “Pemantauan Pemulihan Ekosistem pada Koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak dan Sekitarnya”.

Melalui kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan terima kasih kepada para pihak yang telah membantu penyusunan hingga penyelesaian penulisan tugas akhir ini, yaitu:

1. Dr. Ir. Siti Badriyah Rushayati, M.Si. selaku dosen pembimbing utama dan Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc. selaku dosen pembimbing anggota yang telah senantiasa membimbing dan memberi saran kepada penulis dalam penyusunan tesis.
2. Dr. Ir. Rachmad Hermawan, M.Sc.F.Trop. selaku dosen moderator kolokium, Dr. Ir. Nora Herdiana Pandjaitan D.E.A. selaku dosen moderator seminar, Dr. Adisti Permatasari Putri Hartoyo, S.Hut., M.Si. selaku dosen penguji sidang dan Dr. Ir. Arzyana Sunkar, M.Sc. selaku ketua sidang yang telah memberikan saran kepada penulis dalam penyusunan tesis.
3. Seluruh dosen dan staf Program Studi Konservasi Biodiversitas Tropika, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor atas segala bimbingan dan arahnya dalam penyusunan tesis.
4. Taman Nasional Gunung Halimun Salak atas pemberian izin yang diberikan dalam penyusunan tesis.
5. Supini, Romy Prayogo Utomo, Hendri Yunanto, Refiansyah Rozzie Alfariizky, Satuki, Suprpti, dan Kusyanti Wijaya atas semua bantuan baik material maupun immaterial, seperti semangat, kasih sayang, dan doanya.
6. Teman-teman sinergi KSHE 57 yang selalu kebersamai, mendukung, dan membantu, yaitu Hekmatyar, Hasan, Tesa, dan Juliana.
7. Rekan-rekan KVT-MEJ seperti Teh Luthfia, Teh Levana, Teh Nanda, Teh Ainun, Bang Rahman, dan lainnya yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang telah memberikan dukungan dan kebersamai penulis.
8. Teman-teman Lab ALGM yang selalu mendampingi penulis dalam penyusunan tesis seperti Adysa, Balqis, Melia, Fathan, Geugeut, Marshal, Addin, Muadz, dan Mas Alan.
9. Teman dekat penulis yang memberikan dukungan moral kepada penulis seperti Iis Erlina, Salsa, Lichintya, Yuki, dan Cintya.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan. Penulis berharap penelitian ini dapat memberikan informasi yang bermanfaat bagi semua pihak.

Bogor, Juli 2025

Theresa Vindri Pramesti

## DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vi
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Kerangka Pemikiran	3
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Pemulihan Ekosistem	5
2.2 Revegetasi	6
2.3 Ameliorasi Iklim Mikro	6
2.4 Fragmentasi Habitat	8
2.5 Kelestarian Biodiversitas	8
2.6 Produktivitas Karbon	9
2.7 Pendekatan Spasial Pemulihan Ekosistem	10
III METODOLOGI	12
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	12
3.2 Alat dan Bahan	12
3.3 Jenis Data	12
3.4 Metode Pengumpulan Data	13
3.5 Analisis Data	13
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	28
4.1 Kondisi Umum	28
4.2 Perubahan Tutupan Lahan	28
4.3 Tren Indeks Lingkungan <i>Land Surface Temperature</i> (LST)	31
4.4 Tren Indeks Lingkungan <i>Forest Canopy Density</i> (FCD)	34
4.5 Tren Indeks Lingkungan <i>Net Productivity Primer</i> (NPP)	38
4.6 Tren Indeks Fragmentasi <i>Number of Patch</i> (NP)	41
4.7 Tren Indeks Fragmentasi <i>Edge Density</i> (ED)	44
4.8 Tren Indeks Fragmentasi <i>Mean Shape Index</i> (MSI)	47
4.9 Tren Indeks Fragmentasi <i>Interspersion and Juxtaposition Index</i> (IJI)	50
4.10 Analisis Pemulihan Ekosistem	53
V SIMPULAN DAN SARAN	54
5.1 Simpulan	54
5.2 Saran	54
DAFTAR PUSTAKA	55
LAMPIRAN	69
RIWAYAT HIDUP	74

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang  
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :  
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah  
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



## DAFTAR TABEL

1	Rumus perhitungan akurasi	14
2	<i>Solar spectral irradiance</i> pada citra Landsat 7 ETM+	18

## DAFTAR GAMBAR

1	Kerangka pemikiran	4
2	Peta lokasi penelitian	12
3	Alur pengolahan data suhu permukaan (LST)	17
4	Alur pengolahan data kerapatan tajuk (FCD)	21
5	Alur pengolahan nilai-nilai indeks fragmentasi habitat	23
6	Alur pengolahan data NPP	24
7	Perubahan tutupan lahan pada periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	30
8	Tren perubahan luasan tutupan lahan	30
9	Perubahan LST periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	33
10	Tren perubahan rata-rata suhu permukaan	34
11	Perubahan FCD periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	37
12	Tren perubahan rata-rata kerapatan tajuk	37
13	Perubahan NPP periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	40
14	Tren perubahan rata-rata NPP	41
15	Perubahan NP periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	43
16	Tren perubahan indeks NP hutan	44
17	Perubahan ED periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	46
18	Tren perubahan indeks ED hutan	47
19	Perubahan MSI periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	49
20	Tren perubahan indeks MSI hutan	49
21	Perubahan IJI periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya	52
22	Tren perubahan indeks IJI hutan	52

## DAFTAR LAMPIRAN

1	<i>Script</i> Google Earth Engine untuk mengklasifikasikan tutupan lahan	70
2	<i>Script</i> indeks fragmentasi di RStudio	72

# I PENDAHULUAN

## 1.1 Latar Belakang

Hutan tropis merupakan salah satu ekosistem yang berperan penting dalam menyeimbangkan iklim global, konservasi keanekaragaman hayati, serta penyediaan jasa ekosistem. Namun, deforestasi dan degradasi hutan tropis telah menyebabkan penurunan signifikan dalam tutupan hutan, dengan sekitar 17% hutan tropis lembap hilang sejak tahun 1990 (Vancutsem *et al.* 2021). Perubahan ini telah berkontribusi besar terhadap peningkatan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer (Harris *et al.* 2012) dan hilangnya keanekaragaman hayati (Dubey *et al.* 2022). Apabila tingkat gangguan saat ini terus berlanjut, hutan tropis yang utuh dapat hilang seluruhnya di beberapa wilayah pada tahun 2050. Oleh karena itu, hal tersebut menekankan adanya kebijakan konservasi yang efektif (Vancutsem *et al.* 2021) dan kegiatan restorasi hutan sebagai salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menanggulangi dampak tersebut (Pita *et al.* 2024).

Restorasi hutan memiliki peran krusial dalam mitigasi perubahan iklim, konservasi keanekaragaman hayati, dan pemeliharaan layanan ekosistem (Aerts dan Honnay 2011). Salah satu bentuknya adalah revegetasi, yaitu upaya pemulihan lahan rusak melalui penanaman dan pemeliharaan vegetasi untuk mengembalikan fungsi ekologis, seperti perbaikan iklim mikro, peningkatan cadangan karbon, dan pelestarian biodiversitas (Kissinger *et al.* 2022; Riswan *et al.* 2015). Namun, meskipun restorasi telah banyak diterapkan di berbagai negara tropis, keberhasilannya masih rendah. Kegiatan restorasi di Indonesia hanya sekitar 1% yang menunjukkan pemulihan ekosistem yang berhasil (Fawzi *et al.* 2020). Restorasi hutan bukan hanya mengubah tutupan lahan, tetapi juga berdampak pada fungsi ekosistem secara menyeluruh. Oleh karena itu, diperlukan upaya yang lebih optimal untuk meningkatkan efektivitas dan keberhasilan kegiatan restorasi.

Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS) terdiri dari kawasan hutan, koridor, hingga lahan restorasi yang memiliki peran penting dalam mendukung kegiatan konservasi dan pemulihan ekosistem. Koridor tersebut merupakan jalur habitat yang berbentuk linier dan berfungsi menghubungkan area-area habitat yang terpisah, sehingga memungkinkan terjadinya pergerakan dan pertukaran spesies antar habitat (Travers *et al.* 2021). Selain itu, lahan restorasi dapat berperan untuk memulihkan fungsi ekologis di lahan-lahan yang telah mengalami kerusakan (Andi *et al.* 2024). Kerusakan tersebut dapat terjadi di kawasan hutan akibat perubahan tutupan lahan.

Perubahan tutupan lahan yang terjadi di kawasan hutan dapat memberikan dampak negatif terhadap ekosistem. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Latue (2023) bahwa perubahan tutupan lahan akibat deforestasi dapat berdampak negatif pada ekosistem dan menyebabkan adanya ketidakseimbangan ekosistem. Perubahan tutupan lahan yang terjadi di kawasan Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS) menjadi tekanan pada ekosistem kawasan tersebut hingga menyebabkan degradasi. Kegiatan restorasi ekosistem merupakan bagian dari pengelolaan kawasan konservasi. Kegiatan restorasi yang dilakukan melalui kegiatan penanaman kembali dan perlindungan koridor satwa sebagai jalur pergerakan satwa liar perlu untuk dipantau efektivitasnya.

Pemantauan ekosistem di kawasan TNGHS dapat menggunakan teknologi penginderaan jauh karena kemampuannya menjangkau wilayah yang luas dengan biaya dan waktu yang lebih efisien dibandingkan survei lapangan konvensional (Forestriko dan Hartono 2016). Pemantauan tersebut dilakukan dengan menggunakan parameter *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). Perhitungan NDVI dapat menggambarkan tingkat kehijauan vegetasi berdasarkan perbedaan pantulan antara spektrum inframerah dekat dan merah dari citra satelit (Prasetyo *et al.* 2017). NDVI tidak hanya berguna untuk memetakan tutupan lahan, tetapi juga dapat dimanfaatkan dalam estimasi cadangan karbon di suatu kawasan (Khairunnisa 2023).

Pemantauan satwa liar juga dilakukan di kawasan TNGHS, terutama spesies prioritas seperti elang jawa. Pemantauan elang jawa tersebut dilakukan dengan pemetaan lokasi potensial di peta, dilanjutkan dengan penelusuran lapangan untuk menemukan lokasi sarang secara langsung. Setelah sarang teridentifikasi, dilakukan pengamatan berkala untuk memantau kondisi sarang dan aktivitas elang jawa di sekitarnya. Pola pemantauan ini memastikan data yang diperoleh lebih komprehensif dan mendukung keberhasilan konservasi spesies secara berkelanjutan (Ridwan *et al.* 2014).

Teknologi penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) dapat menjadi sebuah alternatif yang efisien untuk memantau pemulihan ekosistem secara spasial dan temporal (de Almeida *et al.* 2020). Pemanfaatan SIG memungkinkan analisis indikator ekologis seperti suhu permukaan, kerapatan tajuk, dan produktivitas primer bersih, serta dapat mengungkap dinamika perubahan tutupan lahan dari masa lalu, masa kini, hingga proyeksi masa depan (Adil *et al.* 2021). Pengembangan analisis spasial juga memungkinkan adanya integrasi dari berbagai variabel ekosistem, sehingga dapat menggambarkan secara kuantitatif tren pemulihan ekosistem dan dapat menjadi indikator untuk evaluasi kegiatan pemulihan ekosistem. Oleh karena itu, pemantauan berbasis spasial menjadi salah satu upaya yang dapat dilakukan untuk menilai apakah kegiatan pemulihan ekosistem mampu berhasil memulihkan fungsi ekosistem dan mendukung keberlanjutan lanskap TNGHS di masa depan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Perubahan tutupan lahan restorasi menyebabkan beberapa fungsi ekosistem terganggu, seperti fungsi perbaikan iklim mikro, kelestarian biodiversitas sebagai habitat maupun koridor, beserta fungsi produktivitas karbon baik menyerap maupun menyimpan cadangan karbon. Oleh karena itu, melakukan kegiatan restorasi menjadi salah satu cara untuk mengembalikan fungsi ekosistem yang terganggu serta membawa dampak positif bagi ekosistem tersebut.

Kegiatan restorasi dilakukan di wilayah hutan koridor Gunung Halimun Salak di bawah pemantauan oleh Taman Nasional Gunung Halimun Salak dengan harapan mampu memulihkan fungsi ekosistem yang berada di wilayah tersebut. Hutan koridor tersebut merupakan hutan yang penting karena berfungsi dalam menghubungkan wilayah Gunung Halimun dan Gunung Salak (Wulansari dan Fawzi 2020). Adanya kegiatan restorasi yang dilakukan pada wilayah hutan koridor tersebut tentunya membawa dampak positif bagi lingkungan sekitar dan mampu memulihkan fungsi ekosistem sesuai dengan peruntukannya.

Selain kegiatan restorasi, terdapat kegiatan penting yang perlu dilakukan yaitu *monitoring* lahan restorasi. *Monitoring* lahan restorasi dimaksudkan untuk mengetahui seberapa berhasil lahan restorasi dapat pulih kembali seperti ekosistem sebelumnya. *Monitoring* lahan restorasi tersebut dapat dilakukan melalui pendekatan spasial, namun memerlukan beberapa algoritma pengukuran beberapa indikator sebagai acuan keberhasilan pemulihan ekosistem. Oleh karena itu, pendekatan spasial mengenai pemulihan ekosistem diharapkan mampu membantu kegiatan *monitoring* lahan restorasi.

Berdasarkan penjelasan di atas, terdapat beberapa pertanyaan yang ingin dijawab dalam penelitian ini yaitu:

1. Bagaimana pemulihan ekosistem pada lahan restorasi dan sekitarnya di koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak melalui analisis spasial dengan pendekatan tiga fungsi ekosistem (ameliorasi/perbaikan iklim mikro, kelestarian biodiversitas, dan produktivitas karbon)?
2. Bagaimana proses pemulihan ekosistem pada lahan restorasi dan sekitarnya di koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak pada kurun waktu 2011 hingga 2024 dengan pendekatan tiga fungsi (ameliorasi/perbaikan iklim mikro, kelestarian biodiversitas, dan produktivitas karbon)?

### 1.3 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengevaluasi pemulihan ekosistem pada lahan restorasi dan sekitarnya di koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak melalui analisis spasial dengan pendekatan tiga fungsi ekosistem (ameliorasi/perbaikan iklim mikro, kelestarian biodiversitas, dan produktivitas karbon).
2. Mengkaji proses pemulihan ekosistem pada lahan restorasi dan sekitarnya di koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak pada kurun waktu 2011 hingga 2024 dengan pendekatan tiga fungsi ekosistem (ameliorasi/perbaikan iklim mikro, kelestarian biodiversitas, dan produktivitas karbon).

### 1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai pemulihan ekosistem melalui kegiatan revegetasi dengan indikator tiga fungsi ekosistem (ameliorasi/perbaikan iklim mikro, kelestarian biodiversitas, dan produktivitas karbon).

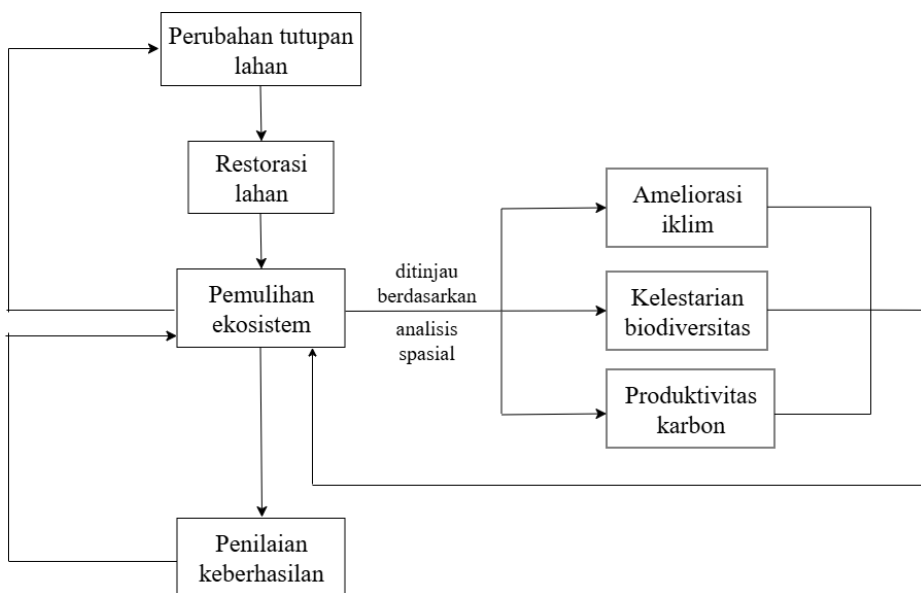
### 1.5 Kerangka Pemikiran

Kegiatan restorasi lahan dilakukan dengan menanam pohon di lahan terbuka terutama lahan rusak akibat pemanfaatan manusia dalam memanfaatkan SDA. Pohon-pohon yang ditanam tersebut tentu membawa dampak positif bagi lingkungan sekitarnya. Hal tersebut juga membawa dampak positif bagi satu kesatuan ekosistem yang ada. Restorasi lahan dapat membantu pemulihan ekosistem yang terganggu menjadi ekosistem yang pulih kembali dan dapat berfungsi sesuai peruntukannya. Penilaian pemulihan ekosistem dapat dilihat dari fungsi ameliorasi iklim dengan mengamati perubahan suhu permukaan, perubahan fragmentasi habitat, hingga besaran karbon yang dihasilkan. Hasil perhitungan ketiga hal tersebut perlu dilakukan agar dapat menganalisis tren pemulihan

ekosistem pada lahan yang dilakukan restorasi. Penelitian ini dianalisis secara deskriptif kuantitatif dengan melakukan pendekatan spasial sebagai upaya penilaian pemulihan ekosistem (Gambar 1).

@Hak cipta milik IPB University

Dampak  
Positif (+)



Gambar 1 Kerangka pemikiran

## II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Pemulihan Ekosistem

Penggunaan dan pemanfaatan sumber daya alam dalam jumlah besar dapat mengakibatkan adanya kerusakan ekosistem. Kerusakan ekosistem menyebabkan adanya struktur dan komposisi penyusunnya yang terganggu. Selain itu, kerusakan ekosistem juga memengaruhi interaksi penyusunnya dan fungsi dari ekosistem tersebut (Haneda dan Yuniar 2020). Kerusakan ekosistem dapat didefinisikan sebagai hilangnya suatu fungsi dalam ekosistem atau fungsi dari sebuah ekosistem tidak dapat berjalan secara optimal, seperti fungsi pengatur tata air, pengatur cuaca, perlindungan tanah, dan lain sebagainya (Suprijadi 2019). Oleh karena itu, apabila terdapat kegiatan penggunaan dan pemanfaatan sumber daya alam yang merusak ekosistem, maka diperlukan kegiatan pemulihan ekosistem agar ekosistem tetap terjaga dan dapat berfungsi secara optimal.

Pemulihan ekosistem merupakan kegiatan pengembalian sebuah ekosistem agar dapat kembali ke bentuk, serta kondisi semula yang dapat dilakukan dengan kegiatan pelestarian serta penanaman kembali pada suatu kawasan (Anisah *et al.* 2021). Pemulihan ekosistem dapat pula didefinisikan sebagai salah satu upaya untuk memperbaiki dan memulihkan kondisi hutan yang telah rusak atau terganggu serta salah satu upaya untuk menjaga sumber daya alam beserta flora dan fauna yang terdapat di hutan agar tetap lestari (Mariyani dan Suciati 2021). Berdasarkan Permenhut No. P48 Tahun 2014 tentang Tata Cara Pelaksanaan Pemulihan Ekosistem pada Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam, pemulihan ekosistem juga dapat didefinisikan sebagai proses pemulihan ekosistem baik dari struktur, fungsi, dan komposisi pada suatu ekosistem yang rusak atau terdegradasi.

Pemulihan ekosistem diharapkan dapat menjadi salah satu strategi yang efektif untuk menjaga ekosistem di masa depan serta meminimalisir kerugian yang dapat ditimbulkan. Salah satu contoh dari kegiatan pemulihan ekosistem tersebut adalah revegetasi, rehabilitasi, restorasi, dan lain sebagainya. Istilah pemulihan ekosistem juga erat kaitannya dengan reboisasi, penghijauan, dan reforestasi (Mariyani dan Suciati 2021). Kegiatan-kegiatan tersebut akan membawa dampak positif bagi ekosistem yang rusak, seperti adanya perbaikan iklim, pelestarian keanekaragaman hayati, produktivitas karbon meningkat, dan lain sebagainya. Selain hal tersebut, kegiatan pemulihan ekosistem dalam bentuk restorasi dapat membantu memulihkan kehidupan alami pada ekosistem yang rusak sebelumnya (Ariadica dan Sutrisno 2021).

Kegiatan pemulihan ekosistem ini seringkali dilakukan pada lahan kritis seperti pada kawasan konservasi yang mengalami penurunan fungsi ekosistem, serta lahan kritis lainnya. Kawasan konservasi yang mengalami degradasi maupun lahan dengan kondisi kritis perlu adanya perbaikan ekosistem untuk memperbaiki kondisinya (Sahrudin *et al.* 2019). Kegiatan pemulihan ekosistem menjadi salah satu bentuk tanggung jawab pemerintah beserta masyarakat dalam mengembalikan ekosistem pada keadaan semula, serta memulihkan fungsi penyediaan pangan, energi, beserta jasa lingkungan (Susmianto *et al.* 2017). Berdasarkan pernyataan Peraturan Direktur Jenderal KSDAE No. P.12 Tahun 2015 tentang Pedoman Tata Cara Penanaman dan Pengkayaan Jenis dalam Rangka Pemulihan Ekosistem Daratan pada Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam, kegiatan

pemulihan ekosistem dilakukan dengan penanaman dan pengkayaan jenis tanaman asli atau tanaman lokal di sekitar kawasan ekosistem yang rusak.

## 2.2 Restorasi

Restorasi ekosistem merupakan pendekatan penting dalam mengatasi kerusakan lingkungan akibat degradasi, baik yang berdampak pada aspek ekologi maupun hidrologi. Salah satu metode pemulihan yang sering diterapkan adalah revegetasi, yakni upaya penanaman kembali pada lahan yang telah mengalami kerusakan akibat aktivitas antropogenik seperti penambangan dan pemanfaatan lahan intensif (Singh *et al.* 2002 dalam Cahyono *et al.* 2014). Berdasarkan Permenhut No. P48/Menhut-II/2014, revegetasi dikategorikan sebagai bentuk rehabilitasi aktif, bersanding dengan pendekatan restorasi alami dan suksesi sebagai bagian dari pemulihan kawasan konservasi. Kegiatan restorasi juga mampu melestarikan keanekaragaman hayati beserta habitatnya pada lahan yang mengalami terdegradasi. Akan tetapi, proses revegetasi membutuhkan waktu yang cukup lama karena pengembalian lahan yang rusak tersebut menyebabkan komponen-komponen penyusun suatu lahan juga rusak hingga hilang, sehingga proses regenerasinya akan memakan waktu (Setyowati *et al.* 2017).

Revegetasi juga dapat diartikan sebagai upaya penanaman kembali pada lahan bekas tambang melalui beberapa tahapan. Selain itu, dalam kegiatan revegetasi perlu memerhatikan beberapa aspek seperti kondisi tanah beserta kondisi tanaman sehingga kegiatan revegetasi dapat berhasil dengan baik. Kondisi tanah yang subur atau dapat digemburkan maka akan mempermudah kegiatan revegetasi (Sanana *et al.* 2022). Kegiatan revegetasi menjadi salah satu strategi mitigasi lahan pasca penambangan dan perlu ditinjau berdasarkan kondisi lahan pasca penambangan beserta peran penting dari adanya kegiatan revegetasi tersebut. Kegiatan revegetasi juga perlu memerhatikan jenis tanaman yang akan ditanam. Jenis tanaman yang ditanam perlu diperhatikan karena revegetasi berfokus pada tanaman yang dapat bertahan hidup pada lokasi yang ditanami (Syahza *et al.* 2021).

Pemilihan jenis tanaman pada kegiatan revegetasi pada umumnya dipilih dari tanaman yang dapat beradaptasi pada lingkungan yang ekstrem maupun lingkungan baru, cepat berkembang biak, memiliki perakaran yang kuat, serta tutupan tajuk yang rindang. Hal tersebut dikarenakan, tanaman revegetasi diharapkan mampu membentuk iklim mikro yang sesuai untuk lahan pasca penambangan yang mengalami degradasi. Tanaman lokal juga dapat menjadi pilihan atau opsi sebagai tanaman revegetasi dikarenakan berasal asli dari lahan pasca penambangan (Syahza *et al.* 2021).

## 2.3 Ameliorasi Iklim Mikro

Iklim merupakan suatu kondisi atau keadaan rata-rata cuaca pada wilayah tertentu dari hari ke hari dalam kurun waktu yang lama (Trewartha dan Horn 1995). Iklim dapat dibagi menjadi tiga kategori berdasarkan skalanya yaitu iklim mikro (skala wilayah kecil), meso (skala wilayah sedang), dan makro (skala wilayah besar) (Boutet 1987). Iklim mikro merupakan iklim pada skala wilayah kecil seperti perkotaan, bersifat terbatas, dan bersifat berpengaruh terhadap makhluk hidup (Lakitan 1994). Holton (2004) juga menyebutkan bahwa iklim mikro dapat didefinisikan sebagai kondisi iklim pada sebuah ruang terbatas dengan tinggi kurang lebih sebesar dua meter dari permukaan tanah. Iklim mikro dipengaruhi oleh

beberapa unsur seperti suhu, kelembapan, radiasi matahari, beserta kecepatan angin di sebuah wilayah. Selain itu, iklim mikro juga dipengaruhi oleh objek atau benda yang ada di sebuah wilayah, radiasi termal benda tersebut, beserta faktor topografi seperti permukaan tanah (Idham 2016).

Suhu permukaan dapat diartikan sebagai suhu terluar dari sebuah objek. Apabila suhu permukaan pada lahan terbuka menandakan bahwa suhu tersebut merupakan suhu lapisan teratas pada lapisan permukaan tanah, sedangkan suhu permukaan pada lahan bervegetasi menunjukkan suhu terluar pada kanopi atau tutupan tajuk lahan bervegetasi tersebut (Wiweka 2014). Terdapat beberapa faktor yang memengaruhi suhu permukaan seperti perbedaan tutupan lahan dan curah hujan yang berbeda. Perbedaan curah hujan menyebabkan adanya perbedaan suhu permukaan yang beda pula pada satu wilayah dengan wilayah lainnya, apabila curah hujan pada suatu wilayah tinggi maka akan mengakibatkan suhu permukaan rendah, dan sebaliknya. Selain itu, curah hujan juga dapat menjadi penyebab kehijauan vegetasi karena kondisi tersebut menyebabkan tanaman tidak akan kekurangan air (Sumarni dan Jeki 2021).

Tutupan lahan bervegetasi dengan kerapatan tinggi dapat membawa dampak positif berupa perbaikan iklim atau ameliorasi iklim. Ameliorasi iklim merupakan salah satu bentuk manfaat yang diberikan oleh lingkungan khususnya tumbuhan dalam memperbaiki kondisi iklim (Hakim *et al.* 2017). Vegetasi dapat memperbaiki iklim mikro yang ada pada suatu wilayah melalui proses penyerapan refleksi dan radiasi matahari, penurunan suhu, pengendalian kecepatan angin, hingga pengurangan suhu tanah atau suhu permukaan (Obi 2014). Selain itu, daun dapat menghalangi cahaya matahari serta menyaring cahaya matahari. Daun dan ranting dapat memperlambat kecepatan angin dan laju curah hujan, sehingga dengan semakin banyak vegetasi maka dapat memberikan dampak positif pada iklim mikro.

Lahan bervegetasi dengan kerapatan tinggi memiliki suhu permukaan yang lebih rendah dibandingkan lahan terbuka atau lahan terbangun dengan kerapatan rendah hingga sedang yang memiliki suhu permukaan lebih tinggi. Oleh karena itu, kerapatan vegetasi dengan suhu permukaan memiliki hubungan terbalik (korelasi terbalik) (Indrawati *et al.* 2020). Kerapatan vegetasi juga dapat memengaruhi proses evapotranspirasi, apabila kerapatan vegetasi tinggi maka laju evapotranspirasi akan tinggi pula, sehingga terdapat lebih banyak uap air di udara yang meningkatkan kelembapan udara dan menurunkan suhu, serta menghasilkan efek pendinginan di daerah sekitar vegetasi tersebut (Wigunanti *et al.* 2024).

Kerapatan vegetasi yang membentuk kanopi pohon merupakan salah satu komponen penunjang iklim mikro. Kanopi dapat memberikan efek keteduhan dengan bentuk tajuk vegetasi yang lebar sehingga dapat meningkatkan kenyamanan termal di area sekitar vegetasi. Hal tersebut mengindikasikan adanya perbaikan iklim mikro pada lahan bervegetasi (Putra *et al.* 2021). Kerapatan tajuk yang tinggi dapat menghalangi sinar matahari sehingga menyebabkan insolasi (*incoming solar radiation* = sinar matahari yang datang) akan lebih sedikit dan sebaliknya, apabila tidak ada tutupan tajuk maka insolasi yang terjadi akan dalam taraf maksimum. Namun, insolasi yang menembus kerapatan tajuk juga dipengaruhi oleh awan yang dapat menghalanginya (Gunarsih 2012). Oleh karena itu, dengan adanya vegetasi di suatu lahan dapat memengaruhi iklim mikro di wilayah tersebut, serta menjadi faktor penting penentu kualitas iklim mikro di suatu wilayah.

## 2.4 Fragmentasi Habitat

Perubahan penggunaan lahan dapat diakibatkan oleh kegiatan manusia yang dilakukan untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Hal tersebut dapat merubah bentang lahan (*landscape*) dan berpengaruh terhadap ketersediaan lahan (Permana *et al.* 2021). Perubahan penggunaan lahan dapat menyebabkan adanya berbagai gangguan ekosistem, seperti gangguan habitat bagi biodiversitas. Habitat dapat diartikan sebagai suatu tempat yang digunakan untuk bertahan hidup serta berkembang biak bagi sebuah organisme atau komunitas yang dipengaruhi oleh berbagai komponen fisik maupun komponen biotik (Howay 2023). Perubahan penggunaan lahan atau yang dapat disebut dengan *Land Use Land Cover* (LULC) akan memengaruhi perubahan ekosistem dan mencerminkan dampak manusia terhadap lingkungan (Haque dan Basak 2017).

Gangguan habitat bagi biodiversitas yang dimaksud di atas adalah fragmentasi habitat. Fragmentasi habitat dapat didefinisikan sebagai sebuah peristiwa terpotongnya hutan atau ekosistem alami biodiversitas menjadi bagian-bagian yang lebih kecil atau sempit dan diakibatkan oleh kegiatan manusia (Meijaard *et al.* 2005). Fragmentasi habitat menyebabkan terbentuknya bagian-bagian habitat yang terpinggir atau terisolasi dan berakibat negatif pada biodiversitas pada habitat tersebut, seperti terhambatnya pergerakan satwa sehingga tidak mampu berkembang biak, tidak mampu mencari makan, dan tidak dapat melakukan migrasi ke wilayah lainnya. Dampak terbesar dari fragmentasi habitat ialah peristiwa tersebut mampu mengubah dinamika ekosistem secara keseluruhan.

Fragmentasi habitat berdampak besar terhadap lingkungan. Salah satu dampaknya adalah terbatasnya penyebaran dan kolonisasi satwa. Kondisi tersebut menyebabkan satwa sulit berpindah tempat, karena habitatnya semakin terbuka, sehingga rentan terhadap ancaman pemangsa. Dampak yang kedua, fragmentasi habitat dapat menurunkan kemampuan penyebaran tumbuhan seperti tumbuhan berdaging (makanan satwa) maupun tumbuhan yang penyebarannya perlu bantuan dari satwa tertentu (Howay 2023). Hal tersebut tentu akan mengakibatkan spesies asli akan punah dan spesies baru akan mendominasi pada habitat tersebut, sehingga menyebabkan adanya penurunan jumlah jenis pada habitat yang terfragmentasi (Primack *et al.* 1998). Fragmentasi habitat juga dapat menjadi salah satu faktor penyebab perkawinan sejenis dan terjadinya erosi genetik, serta meningkatnya kerentanan bagi satwa (Soule' 1986). Satwa-satwa berukuran besar, langka, serta satwa-satwa dengan wilayah sebaran yang sempit maka tidak akan toleran terhadap perubahan habitanya akibat adanya fragmentasi sehingga sangat rentan mengalami kepunahan (Turner 1996).

## 2.5 Kelestarian Biodiversitas

Keanekaragaman hayati dapat didefinisikan sebagai tumbuhan, hewan, maupun mikroorganisme pada suatu ruang seperti di daratan, perairan, maupun udara. Keanekaragaman hayati juga dapat didefinisikan sebagai variasi dari bentuk-bentuk serta genetik tumbuhan dan hewan (Rahma *et al.* 2023). Hutan merupakan salah satu wilayah dengan keanekaragaman biodiversitas yang tinggi. Terdapat beberapa faktor penyebab suatu wilayah dapat dikatakan memiliki keanekaragaman biodiversitas yang tinggi di antaranya, faktor lingkungan serta sifat toleransi dari spesies-spesies yang hidup pada suatu wilayah (Kusmana dan Hikmat 2015). Oleh

karena itu, hutan berperan penting dalam memberikan perlindungan biodiversitas dalam bentuk sebagai habitat sumber daya alam seperti flora dan fauna. Hutan juga berperan penting dalam pelestarian ekosistem karena dengan melestarikan biodiversitas di dalam hutan maka ekosistem pun turut terjaga secara lestari.

Namun, apabila pada wilayah hutan terjadi kerusakan maka akan membawa dampak buruk bagi kelestarian biodiversitas. Kerusakan hutan seperti alih fungsi lahan mengakibatkan menurunnya kualitas habitat, terlebih pada spesies yang memiliki status konservasi, spesies endemik, maupun spesies yang hanya mampu hidup pada satu habitat (Maharadatunkamsi *et al.* 2015). Salah satu contoh dampaknya adalah hilangnya hingga punahnya spesies endemik yang mengakibatkan *genetic erosion* dengan persebaran wilayah yang sempit (Whitmore 1993). Hal tersebut tentu menjadi sebuah ancaman bagi kelestarian biodiversitas dan perlu dilakukan kegiatan perlindungan hutan sebagai habitat spesies-spesies yang ada.

Upaya perlindungan tersebut dapat ditingkatkan melalui kegiatan konservasi untuk pemulihan habitat bagi spesies serta menjadi upaya dalam memertahankan keanekaragaman spesies. Pemulihan ekosistem ditujuk untuk mengurangi adanya fragmentasi habitat. Fragmentasi habitat merupakan peristiwa ketika suatu ekosistem seperti hutan mengalami pengurangan luasan akibat terpotongnya ekosistem akibat adanya perubahan tutupan lahan (Jainuddin 2023). Fenomena fragmentasi habitat dapat mengakibatkan gerakan, serta interaksi antarspesies menjadi terbatas dan apabila hal tersebut terjadi dalam waktu yang lama dapat mengakibatkan kepunahan.

Kegiatan pemulihan ekosistem diharapkan dapat menjadi salah satu strategi mitigasi dalam mengurangi efek *edge* atau terputusnya habitat. Salah satu contoh kegiatan tersebut adalah dengan adanya koridor hutan yang dapat membantu menghubungkan antara satu ekosistem dengan ekosistem lainnya sehingga tidak ada lagi ekosistem yang terputus satu sama lain. Hal tersebut diharapkan dapat membantu spesies dalam migrasi maupun penyebaran spesies baru sehingga kelestarian biodiversitas tetap lestari (Utami 2023).

Kegiatan pemulihan ekosistem untuk mengatasi hal tersebut dapat diwujudkan melalui pembuatan koridor hutan yang dapat menghubungkan wilayah-wilayah yang terpotong. Koridor hutan dapat membantu pergerakan satwa beserta perkembangbiakan satwa juga penyebaran tumbuhan yang ada di hutan. Semakin luas suatu koridor hutan maka akan membawa dampak positif bagi ekosistem hutan, serta koridor hutan yang luas akan memiliki kerugian lebih sedikit dari adanya gulma atau predator invasif (Hilty 2020). Adanya koridor hutan diharapkan mampu menjadi salah satu sarana satwa untuk bergerak dengan bebas di habitatnya (Garrah *et al.* 2021).

## 2.6 Produktivitas Karbon

Karbon dapat didefinisikan sebagai salah satu unsur yang tersebar di bumi dan mengalami proses daur ulang pada sebuah ekosistem. Karbon juga menjadi salah satu bahan organik yang menyusun suatu zat pada tanaman (Almulqu 2024). Karbon yang berada di atmosfer membentuk ikatan dalam senyawa CO<sub>2</sub> atau karbondioksida (Indriyanto 2010). Proses daur ulang karbon dapat terjadi pada tumbuhan. Tumbuhan yang menyerap gas karbondioksida dari sekitarnya akan menyimpan gas tersebut dalam bentuk biomassa. Biomassa merupakan materi dari

makhluk hidup ataupun yang sudah mati di atas permukaan tanah maupun di dalam tanah dengan satuan ton berat kering per satuan luas. Biomassa juga dapat diartikan sebagai energi yang berasal dari hasil fotosintesis dan dapat dikonversi menjadi karbon, hidrogen, dan oksigen (Brown 1997).

Pohon menjadi salah satu sumber karbon di dalam hutan dan berperan penting dalam penyerapan karbon di atmosfer, sehingga dapat menjadi salah satu solusi dalam mengurangi efek pemanasan global (Locatelli *et al.* 2015). Purnomo *et al.* (2023) menyatakan bahwa pohon dapat menyerap gas karbondioksida dan melepaskan gas oksigen ke atmosfer melalui mekanisme kimia berupa proses fotosintesis dan daun sebagai pemegang peranan utamanya. Proses fotosintesis pada pohon yang masih muda atau dalam masa pertumbuhan akan menyebabkan proses penyerapan karbon akan lebih cepat dibandingkan pada pohon yang tua. Hal tersebut karena pada pohon yang sudah tua lebih sedikit mengikat gas karbondioksida akan tetapi lebih banyak menyimpannya dalam bentuk biomassa dan berperan penting dalam ekosistem hutan (Mildrexler *et al.* 2020).

Jumlah simpanan karbon dalam pohon memiliki korelasi dengan pertumbuhan pohon, yang berarti berkorelasi pula dengan besarnya diameter. Hal tersebut dikarenakan jumlah simpanan karbon akan terus meningkat seiring pertumbuhan pohon hingga mencapai tahap paling optimal dan setelah itu jumlah simpanan karbon akan cenderung relatif stabil (Irfan *et al.* 2021). Selain itu, jarak tanam pohon yang memengaruhi kepadatan pohon juga menjadi salah satu faktor yang memengaruhi besarnya nilai biomassa dan berpengaruh pula pada besarnya nilai simpanan karbon (Rajagukguk *et al.* 2018). Umur dari tegakan pohon juga memengaruhi jumlah cadangan karbon karena semakin bertambah umur sebuah tegakan maka jumlah cadangan karbon juga akan meningkat pula (Masripatin *et al.* 2010). Oleh karena itu, hutan memiliki peranan penting dalam memberikan fungsi produktivitas dalam suatu ekosistem melalui penyerapan karbon dan penyimpanannya dalam bentuk biomassa. Hal tersebut menjadi sebuah ilustrasi adanya fungsi produktivitas hutan (Lu *et al.* 2017).

## 2.7 Pendekatan Spasial Pemulihan Ekosistem

Pendekatan spasial dapat digunakan untuk memantau adanya pemulihan ekosistem pada suatu kawasan (de Almeida *et al.* 2020). Terdapat beberapa pendekatan spasial yang dapat dilakukan untuk mengevaluasi pemulihan ekosistem melalui beberapa metode, seperti yang dilakukan oleh Jingxuan *et al.* (2022) dengan mengevaluasi indeks kesehatan ekosistem dari tiga indikator yaitu *vigor*, *organization*, dan *resilience* lalu diolah dan distandarkan menjadi peta perbandingan kesehatan ekosistem sebelum dan sesudah kegiatan restorasi. McCarthy *et al.* (2020) juga menggunakan model spasial untuk memetakan area yang aman dari patogen tanaman invasif sebagai acuan untuk meningkatkan keberhasilan restorasi ekologis.

Selain itu, Fivash (2022) juga mengembangkan model *cellular automata* untuk menggambarkan simulasi adanya dinamika pertumbuhan vegetasi berdasarkan model spasial *patch*. Hasil simulasi tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh pola spasial beserta adanya intensitas gangguan terhadap keberhasilan restorasi. Jiaying *et al.* (2024) menggunakan model InVEST untuk menilai jasa ekosistem setelah adanya kegiatan restorasi dengan mengombinasikannya dengan analisis spasial. Ruiming *et al.* (2022) juga

menjelaskan bahwa model InVEST-HQ yang dimodifikasi dengan menggabungkan NDVI dengan peta degradasi mampu mendeteksi perubahan kualitas habitat dari adanya kegiatan restorasi. Yuhang *et al.* (2023) juga menjelaskan bahwa analisis perubahan LULC melalui beberapa indikator seperti NDVI, NPP, GPP, dan lain-lain dapat mengidentifikasi pola restorasi ekologis berbasis data spasial multi temporal.



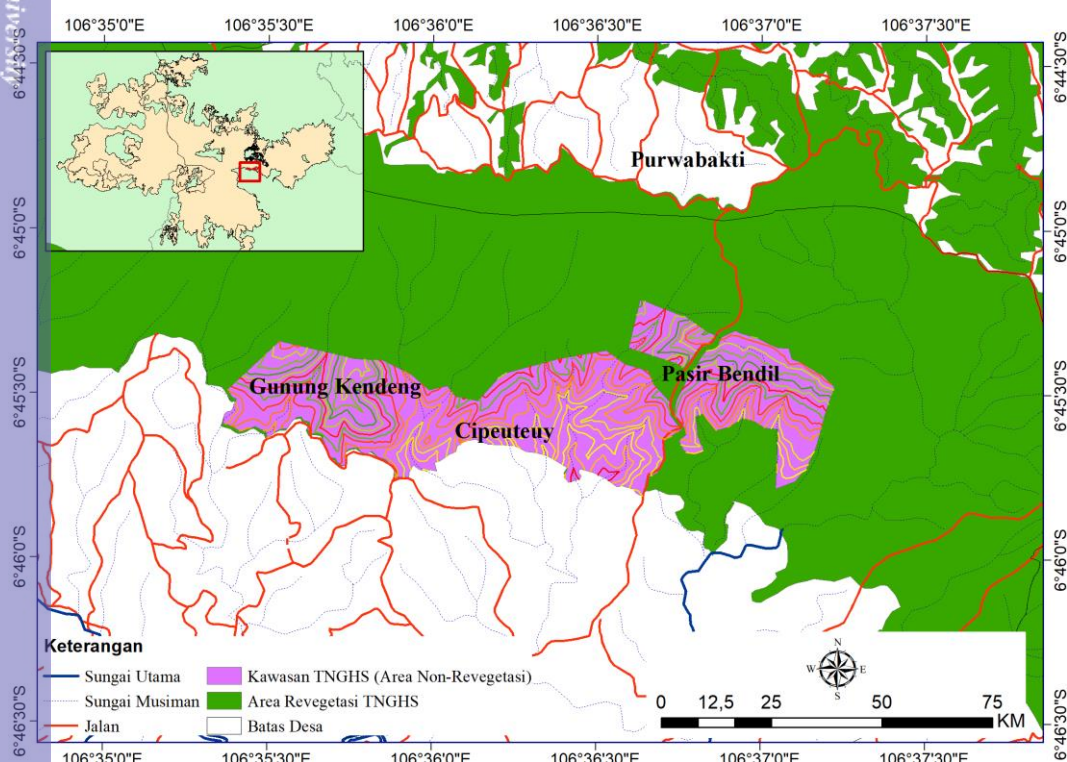
- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



## III METODOLOGI

### 3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak (Gambar 2). Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari-Maret 2025. Lokasi penelitian terletak pada 106°35'30" BT hingga 106°37'0" BT dan 6°45'0" LS hingga 6°46'0" LS. Terdapat dua lahan restorasi yang menjadi fokus lokasi penelitian yaitu lahan restorasi Gunung Kendeng dengan luas 120 ha dan Pasir Bendil dengan luas 50 ha serta wilayah sekitarnya yang dijadikan pembanding untuk penentu keberhasilan pemulihan ekosistem. Kedua lahan tersebut berada pada ketinggian yang berkisar 900 hingga 1.100 mdpl.



Gambar 2 Peta lokasi penelitian

### 3.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah perangkat komputer yang dilengkapi dengan beberapa *software* yaitu Microsoft Office (Word dan Excel), QGIS 3.36, *Google Earth Engine*, dan *RStudio*. Bahan yang digunakan meliputi citra satelit Landsat 5, Landsat 7, dan Landsat 8 Sukabumi pada tahun 2011 hingga tahun 2024 dan file shp batas lokasi penelitian.

### 3.3 Jenis Data

Data primer yang diperlukan dalam penelitian ini meliputi citra Landsat tahun 2011 hingga tahun 2024 yang akan diolah menjadi beberapa data seperti peta suhu permukaan, peta kerapatan tajuk, analisis *landscape metric*, serta nilai produktivitas primer bersih. Data sekunder berupa informasi-informasi tambahan diperlukan

untuk mendukung penelitian ini yang bersumber dari hasil studi literatur dan dokumen RPE (Rencana Pemulihan Ekosistem) TNGHS.

### 3.4 Metode Pengumpulan Data

Pengambilan data citra dilakukan dengan mengunduh peta citra Landsat 7 dan Landsat 8 Sukabumi melalui *website* [earthexplorer.usgs.gov](http://earthexplorer.usgs.gov) serta Landsat 5 dan Landsat 8 dari *Google Earth Engine*. Citra tersebut lalu diolah menjadi peta suhu permukaan, peta kerapatan tajuk, serta data-data lainnya. Selain itu, juga dilakukan *groundcheck* di lokasi penelitian sehingga dapat mengetahui tutupan lahan secara aktual. Studi literatur merupakan kegiatan pengumpulan data beserta informasi dari beberapa referensi seperti buku, jurnal, catatan, hasil penelitian dan lain sebagainya yang disesuaikan dengan topik yang diteliti (Melinda dan Zainil 2020).

### 3.5 Analisis Data

Analisis data diawali dengan melakukan pengolahan citra tahun 2011 hingga tahun 2024 dengan *software* *QGIS* 3.36. Terdapat enam tahapan analisis data yang dilakukan yaitu:

#### 3.5.1 Identifikasi Tutupan Lahan

Peta tutupan lahan digunakan sebagai salah satu acuan dalam menentukan perbandingan suhu permukaan, fragmentasi habitat, hingga perhitungan karbon. Pengklasifikasian tutupan lahan dilakukan dengan metode *supervised classification* atau klasifikasi terbimbing. Klasifikasi terbimbing merupakan metode klasifikasi tutupan lahan yang dilakukan dengan menganalisis secara manual *pixel-pixel* yang mewakili masing-masing kelas tutupan lahan (Jaya dan Etyarsah 2021). Klasifikasi tersebut dilakukan dengan menggunakan *Google Earth Engine* dengan menggunakan *script* yang tertera pada Lampiran 1. Klasifikasi tutupan lahan meliputi hutan, semak, lahan terbangun, dan lahan pertanian.

Algoritma yang dipilih untuk klasifikasi *supervised* adalah algoritma *random forest*. *Random forest* merupakan salah satu algoritma klasifikasi citra dengan pembentukan model pohon pada data yang akan diklasifikasi (Febriani *et al.* 2022). Algoritma tersebut memiliki kelebihan karena *error* yang dihasilkan lebih kecil sehingga dapat mengurangi adanya *missing data*, lalu hasil klasifikasi yang dihasilkan relatif baik dan dapat digunakan pada data dengan jumlah banyak (Fajarendra *et al.* 2024).

#### 3.5.2 Uji Akurasi Tutupan Lahan

Uji akurasi tutupan lahan merupakan tahapan untuk mengetahui besarnya persentase *error* pada hasil klasifikasi tutupan lahan juga dapat digunakan untuk melihat tingkat ketelitian klasifikasi yang dilakukan (Novianti 2021). Uji akurasi juga dapat digunakan sebagai salah satu metode untuk mengetahui tingkat kepercayaan klasifikasi tutupan lahan serta membuktikan kesesuaian antara hasil klasifikasi citra dengan hasil *groundcheck* (Hidayah dan Suharyo 2018). Besaran nilai uji akurasi dianggap hampir sempurna atau dapat disimpulkan sebagai akurasi yang terpercaya apabila nilainya  $\geq 81\%$  (Viera dan Garet 2005).

Uji akurasi nantinya akan dimuat dalam matrik kesalahan (*confusion matrix*). Uji akurasi ini dilakukan dengan menghitung *overall accuracy* dan *Kappa accuracy* (Sampurno dan Thoriq 2016). Akurasi Kappa sangat dianjurkan untuk perhitungan uji akurasi karena *overall accuracy* dianggap *over estimate* (Jaya dan Etyarsah 2021). Rumus-rumus perhitungan tersebut ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Rumus perhitungan akurasi

Jenis Perhitungan Akurasi	Rumus	Keterangan
<i>Overall Accuracy</i> (Akurasi Keseluruhan)	$\frac{\sum_{i=1}^r X_{ii}}{N} \times 100\%$	$X_{ii}$ = Nilai diagonal dari matriks kesalahan baris ke-i dan kolom ke-i
<i>Kappa Accuracy</i> (Akurasi Kappa)	$\frac{N \sum_{i=1}^r X_{ii} - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}}{N^2 - \sum_{i=1}^r X_{i+} X_{+i}} \times 100\%$	$X_{+i}$ = Jumlah piksel dalam kolom ke-i $X_{i+}$ = Jumlah piksel dalam baris ke-i N = Banyaknya piksel dalam contoh

### 3.5.3 Identifikasi Ameliorasi Iklim

#### 3.5.3.1 Koreksi radiometrik *Top of Atmosphere* (TOA)

Estimasi suhu permukaan dihitung menggunakan *QGIS* 3.36 untuk mengubah nilai *pixel* yang awalnya dalam bentuk Digital Number (DN) menjadi nilai radian. Koreksi radiometrik adalah langkah awal dalam pemrosesan citra satelit yang digunakan untuk proses koreksi yang melibatkan penyesuaian untuk meningkatkan kontras setiap pixel, sehingga data yang direkam sesuai dengan kondisi lapangan (Sinaga *et al.* 2018). Proses ini bertujuan untuk menghilangkan gangguan yang disebabkan oleh kesalahan sistem optik pada sensor, atmosfer, dan sudut elevasi matahari (Rizki *et al.* 2017). Koreksi radiometrik pada Landsat 8 dilakukan dengan menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36. mengacu pada metode yang dijelaskan oleh Sagita *et al.* (2022) pada persamaan 1 dan untuk koreksi radiometrik pada Landsat 7 ditunjukkan pada persamaan 2 (Lonita *et al.* 2015):

$$L\lambda = MLQcal + AL \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

$L\lambda$  = *Radiance spectral* TOA (watts/m<sup>2</sup> Srad  $\mu$ m)  
 $ML$  = (*Radiance\_mult\_band* x), x= *band* 10 dan *band* 11 (Landsat 8)  
 $AL$  = (*Radiance\_add\_band* x), x = *band* 10 dan *band* 11 (Landsat 8)  
 $Qcal$  = *Quantized and calibrated pixel values* (*Digital Number*)

$$L\lambda = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(Qcal_{max} - Qcal_{min})} \times (Qcal - Qcal_{min}) + L_{min} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

$L\lambda$  = *Radiance spectral* TOA (watts/m<sup>2</sup> Srad  $\mu$ m)  
 $ML$  = (*Radiance\_mult\_band* x), x= *band* 6 (Landsat 7)  
 $AL$  = (*Radiance\_add\_band* x), x = *band* 6 (Landsat 7)  
 $Qcal$  = *Quantized and calibrated pixel values* (*Digital Number*)  
 $Qcal_{max}$  = *Quantized and calibrated pixel values maximal* (*Digital Number*)  
 $Qcal_{min}$  = *Quantized and calibrated pixel values minimal* (*Digital Number*)

### 3.5.3.2 Temperature brightness (Tb)

*Temperature brightness* atau *radiance temperature* adalah radiasi gelombang mikro yang dipancarkan dari lapisan atas atmosfer bumi (Rajeshwari dan Mani 2014). Perhitungan *temperature brightness* melibatkan nilai radiasi spektral yang diperoleh dari *digital number*. *Temperature brightness* dapat digunakan untuk menentukan suhu permukaan (Perwita *et al.* 2018). Nilai radiasi ini kemudian diubah dari temperatur skala Kelvin menjadi temperatur skala Celcius. Perhitungan *temperature brightness* diolah melalui fitur *raster calculator* pada *QGIS 3.36*. Perhitungan dilakukan menggunakan persamaan konversi radiasi spektral menjadi temperatur ditunjukkan pada persamaan 3 yang mengacu pada persamaan USGS (2016):

$$T_b = \left( \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \right) - 273,15 \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan:

Tb = Suhu radian (°C)  
 K1 = Konstanta kalibrasi 1  
 K2 = Konstanta kalibrasi 2  
 L<sub>λ</sub> = *Radiance spectral TOA* (watts/m<sup>2</sup> Srad μm)

### 3.5.3.3 Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

*Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) adalah nilai kehijauan vegetasi yang dihasilkan dari analisis digital data kecerahan kanal sensor satelit, seperti pada penelitian ini menggunakan data Landat 7 dan Landsat 8 OLI/TIRS Level 2 dengan band 4 (RED) dan band 5 (NIR). Kedua band tersebut digunakan untuk menghitung nilai NDVI. Perhitungan NDVI menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS 3.36* dan didasarkan pada persamaan yang disajikan oleh Wardana *et al.* (2014) pada persamaan 4:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*  
 NIR = *Near Infrared Radiation* (band 5 Landsat 8 dan band 4 Landsat 7)  
 RED = Radiasi cahaya merah dari pixel (band 4 Landsat 8 dan band 3 Landsat 7)

### 3.5.3.4 Land Surface Emissivity (LSE)

Perhitungan LSE membutuhkan *P<sub>v</sub>* yang merupakan proporsi vegetasi dari suatu citra (Rouse *et al.* 1974). Perhitungan *P<sub>v</sub>* diperoleh dengan menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS 3.36*. Perhitungan *P<sub>v</sub>* mengacu pada persamaan USGS (2016) yang ditunjukkan pada persamaan 5:

$$Pv = \left( \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2 \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

$Pv$  = *proportion of vegetation*

$NDVI$  = *Normalized Difference Vegetation Index*

$NDVI_{min}$  = *value terendah Normalized Difference Vegetation Index*

$NDVI_{max}$  = *value tertinggi Normalized Difference Vegetation Index*

Emisivitas permukaan tanah (LSE) perlu dihitung untuk dapat memprediksi suhu permukaan tanah (LST). LSE adalah faktor yang mempengaruhi cahaya *blackbody* dalam memancarkan radiasi serta menentukan efisiensi transmisi energi panas ke atmosfer (Avdan dan Jovanovska 2016). LSE berfungsi untuk mengukur kemampuan dalam mengubah energi termal atau panas menjadi energi radiasi. Perhitungan LSE dilakukan menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36 dengan acuan rumus yang melibatkan emisivitas tanah dan vegetasi yang sesuai dengan pernyataan Sobrino *et al.* (2004) menggunakan nilai  $m = 0.004$  dan  $n = 0.986$  seperti pada persamaan 6:

$$\varepsilon = m Pv + n \dots\dots\dots (6)$$

$$\varepsilon = 0,004 Pv + 0,986 \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

$\varepsilon$  = emisivitas permukaan tanah

$Pv$  = *proportion of vegetation*

### 3.5.3.5 Land Surface Temperature (LST)

Temperatur permukaan dapat dihitung menggunakan band *thermal* pada citra Landsat 8 OLI/TIRS Level 2 lalu mengubahnya menjadi nilai suhu kecerahan untuk mendapatkan temperatur permukaan. Estimasi suhu permukaan melibatkan penentuan *radiance* spektral dan temperatur kecerahan. Perhitungan LST dilakukan menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36 lalu hasil keduanya dirata-rata menggunakan rumus *mean*. Perhitungan LST mengacu pada persamaan yang disajikan oleh Baihaqi *et al.* (2020) digunakan untuk menganalisis temperatur permukaan yang ditunjukkan pada persamaan 7:

$$LST = \frac{Tb}{\left[ 1 + \left( \frac{\lambda * Tb}{c2} \right) x \ln \varepsilon \right]} \dots\dots\dots (7)$$

Keterangan:

$LST$  = *Land Surface Temperature* (suhu permukaan)

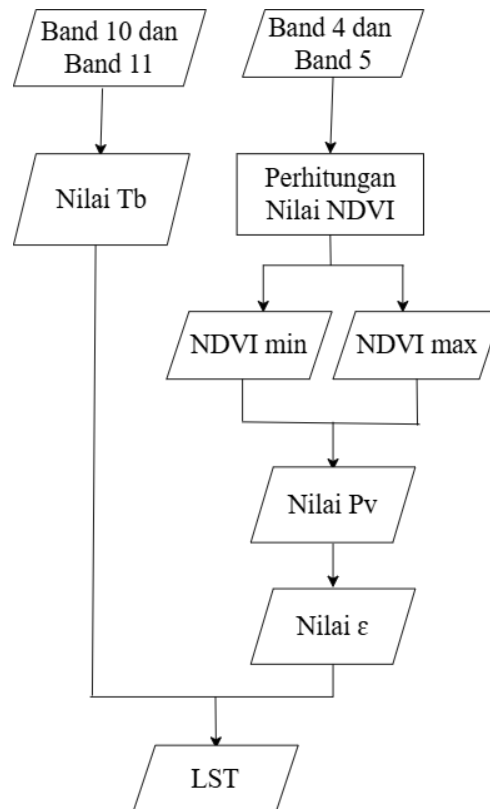
$Tb$  = *brightness temperature*

$\lambda$  = *wavelength of emitted radiance*

$c2 = h x \frac{c}{s} = 1,4388 \times 10^{-2} \text{ mK} = 14388 \text{ } \mu\text{mK}$

$\varepsilon$  = emisivitas

Perhitungan besaran nilai LST terdiri dari beberapa tahap dan mencakup indikator-indikator yang telah disebutkan di atas. Langkah-langkah perhitungan nilai LST ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Alur pengolahan data suhu permukaan (LST)

### 3.5.3.6 Analisis Kerapatan Vegetasi (*Forest Canopy Density*)

*Forest Canopy Density* (FCD) merupakan sebuah metode untuk menganalisis kerapatan vegetasi berdasarkan data citra dari penginderaan jarak jauh, selain itu FCD juga dapat digunakan untuk menilai kondisi ekologi sebuah hutan. FCD dapat memberikan indikasi adanya tingkat degradasi hutan serta memberikan informasi perlunya rehabilitasi pada hutan. Parameter FCD menggunakan kerapatan kanopi hutan untuk menggambarkan kondisi hutan serta menilai kerapatan vegetasinya (Rikimaru *et al.* 2002). Rentang nilai klasifikasi FCD adalah 0-100% yang menunjukkan persentase kerapatan kanopi vegetasi pada hutan. Kanopi yang rapat menandakan kondisi hutan yang baik, sementara kondisi kanopi yang jarang hingga tidak ada menunjukkan sebaliknya (Wijaya *et al.* 2018).

Menurut Rikimaru *et al.* (2002), model analisis FCD melibatkan pemodelan biofisik dan analisis data dari empat indeks, termasuk *Advanced Vegetation Index* (AVI), *Bare Soil Index* (BSI), *Shadow Index* (SI), dan *Thermal Index* (TI). *Advanced Vegetation Index* (AVI) merupakan indeks vegetasi lanjutan yang lebih sensitif terhadap kerapatan/kepadatan hutan dan kelas vegetasi fisiognomi. Kelebihan AVI yaitu dapat menonjolkan nilai klorofil  $-a$  yang tidak dapat disoroti perbedaannya yang halus dalam kerapatan kanopi yang diolah menggunakan NDVI, walaupun pada NDVI dapat ditingkatkan dengan menggunakan level daya dari respons infra merah (Sukmono *et al.* 2020). Model analisis FCD diawali dengan melakukan koreksi radiometrik sehingga mengurangi gangguan yang disebabkan oleh kesalahan sistem optik pada sensor, atmosfer, dan sudut elevasi matahari (Rizki *et al.* 2017) yang ditunjukkan pada persamaan 9 untuk Landsat 8

(Tarigan *et al.* 2019) sedangkan untuk Landsat 7 ditunjukkan pada persamaan 10 dan 11 (Lonita *et al.* 2015):

$$\rho_{\lambda} = \frac{(MLQ_{cal} + AL)}{\cos(\theta_{sz})} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

$L_{\lambda}$  = Radiance spectral TOA (watts/m<sup>2</sup> Srad  $\mu$ m)  
 $ML$  = Radiance\_mult\_band x)  
 $AL$  = Radiance\_add\_band x)  
 $Q_{cal}$  = Quantized and calibrated standard product pixel values (Digital Number)  
 $\theta_{sz}$  = Solar zenith angle =  $\frac{\pi}{180^{\circ}} - (90^{\circ} - \text{sun elevation})$

$$L_{\lambda} = \frac{(L_{max} - L_{min})}{(Q_{cal_{max}} - Q_{cal_{min}})} \times (Q_{cal} - Q_{cal_{min}}) + L_{min} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

$L_{\lambda}$  = Radiance spectral TOA (watts/m<sup>2</sup> Srad  $\mu$ m)  
 $ML$  = (Radiance\_mult\_band x)  
 $AL$  = (Radiance\_add\_band x)  
 $Q_{cal}$  = Quantized and calibrated pixel values (Digital Number)  
 $Q_{cal_{max}}$  = Quantized and calibrated pixel values maximal (Digital Number)  
 $Q_{cal_{min}}$  = Quantized and calibrated pixel values minimal (Digital Number)

$$\rho = \frac{\pi \times L_{\lambda} \times d^2}{E_{sun\lambda} \times \cos(\theta_s)} \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

$\rho$  = Reflectance spectral TOA (watts/m<sup>2</sup> Srad  $\mu$ m)  
 $d$  = Jarak bumi dan matahari pada unit astronomical  
 $\theta_s$  = Solar zenith angle =  $\frac{\pi}{180^{\circ}} - (90^{\circ} - \text{sun elevation})$   
 $E_{sun\lambda}$  = Mean solar exoatmopheric irradians (Tabel 2)

Tabel 2 Solar spectral irradiance pada citra Landsat 7 ETM+

Band	Watts/(meter squared x $\mu$ m)
1	1970
2	1842
3	1547
4	1044
5	225,7
7	82,06
8	1869

Sumber: The Yale Center for Earth Observation (2013)

AVI dapat dihitung menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36 dengan menggunakan band yang telah dikoreksi melalui persamaan 12 yang mengacu pada persamaan Rikimaru *et al.* (2002):

$$AVI = \sqrt[3]{(NIR) * (1 - RED) * (RED - NIR)} \dots\dots\dots (12)$$

*Bare Soil Index* (BI) merupakan indeks yang digunakan untuk membedakan kondisi vegetasi yang berbeda seperti vegetasi yang tidak memiliki kanopi, vegetasi dengan kanopi yang tipis, vegetasi dengan kanopi yang padat, dan sebagainya

(Sukmono *et al.* 2020). BI dapat dihitung menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36 dengan persamaan yang mengacu pada persamaan Rikimaru *et al.* (2002) dan ditunjukkan pada persamaan 13:

$$BI = \frac{(RED+SWIR) - (NIR+BLUE)}{(RED+SWIR) + (NIR+BLUE)} \dots\dots\dots(13)$$

Keunggulan dari model FCD adalah penggunaan *Shadow Index* (SI), yang mampu menggambarkan kerapatan secara vertikal dan menggambarkan komposisi struktural dari vegetasi yang berbeda dalam tegakan hutan (Sukmono *et al.* 2020). Perhitungan SI diolah melalui fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36. Persamaan untuk menghitung SI ditunjukkan pada persamaan 14 yang mengacu pada persamaan Rikimaru *et al.* (2002):

$$SI = \sqrt[3]{(1 - BLUE) * (1 - GREEN) * (1 - RED)} \dots\dots\dots(14)$$

*Thermal Index* (TI) dikembangkan dengan menggunakan band *infrared thermal* pada citra Landsat TM. Beberapa kasus tertentu dapat mengabaikan penggunaan *thermal index*. Hal tersebut dikarenakan penyesuaian kondisi jenis tanah dari daerah kajian. Indeks tersebut memiliki fungsi untuk membedakan antara tanah hitam terbuka dengan bayangan dari tegakan vegetasi (Rikimaru *et al.* 2002). Menurut Sitorus *et al.* (2019), perhitungan TI dilakukan melalui 2 tahap, yaitu mengubah kanal *thermal* menjadi radian dan melakukan perhitungan TI melalui fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36 dengan persamaan 15:

$$TI = K2 / \ln\left(\frac{K1}{L\lambda + 1}\right) \dots\dots\dots(15)$$

Keterangan:

- T = Suhu radian dalam satuan Kelvin (K)  
 K1 = Konstanta kalibrasi 1  
 K2 = Konstanta kalibrasi 2  
 Lλ = *Radiance spectral* TOA (watts/m<sup>2</sup> Srad μm)

Pengolahan selanjutnya yaitu data AVI dan BI diproses menggunakan *Principal Component Analysis* (PCA) menggunakan *QGIS* 3.36. Hasil analisis PCA tersebut digunakan untuk menghasilkan *Vegetation Density* (VD). Nilai VD kemudian dinormalisasikan menggunakan rumus seperti Sitorus *et al.* (2019) agar menghasilkan nilai dalam rentang 0-100 yang ditunjukkan pada persamaan 16:

$$\text{Normalisasi VD} = \frac{(B1 - \min) \times (\max' - \min')}{(\max - \min)} \dots\dots\dots(16)$$

Keterangan:

- VD = *Vegetation Density*  
 B1 = Nilai digital untuk citra hasil *cross index* AVI dan BI (citra hasil PCA)  
 max = Nilai maksimum pada citra  
 min = Nilai minimum pada citra  
 max' = Nilai maksimum normalisasi  
 min' = Nilai minimum normalisasi

Data yang dibutuhkan selanjutnya yaitu *Scaled Shadow Index* (SSI) yang dihasilkan melalui fitur PCA pada *QGIS* 3.36 menggunakan data SI dan TI. Nilai SSI menjadi faktor utama yang mempengaruhi nilai kerapatan kanopi hutan. Apabila besaran nilai VD tinggi namun besaran nilai SSI rendah, maka nilai FCD akan bernilai rendah (Sukarna 2008). Nilai SSI kemudian dinormalisasikan menggunakan rumus seperti Sitorus *et al.* (2019) agar menghasilkan nilai dalam rentang 0-100 yang ditunjukkan pada persamaan 17:

$$\text{Normalisasi SSI} = \frac{(B1 - \min) \times (\max' - \min')}{(\max - \min)} \dots \dots \dots (17)$$

Keterangan:

- SSI = *Scaled Shadow Index*
- B1 = Nilai digital untuk citra hasil *cross index* SSI dan TI (citra hasil PCA)
- max = Nilai maksimum pada citra
- min = Nilai minimum pada citra
- max' = Nilai maksimum normalisasi
- min' = Nilai minimum normalisasi

Nilai VD dan SSI yang sudah dinormalisasi maka digunakan sebagai data utama dan diolah untuk menghasilkan FCD. Nilai FCD dihitung menggunakan fitur *raster calculator* pada *QGIS* 3.36 dan mengacu pada persamaan Rikimaru *et al.* (2002) yang ditunjukkan dalam persamaan 18:

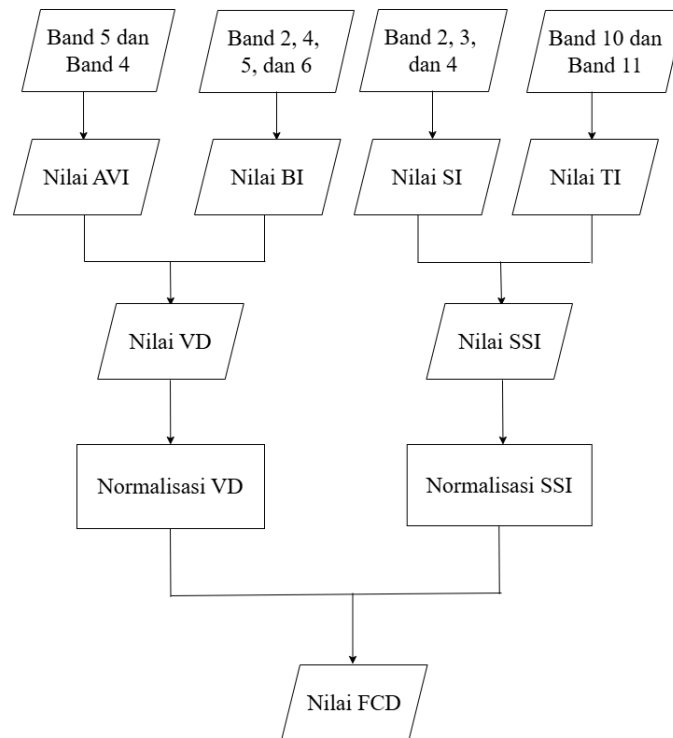
$$\text{FCD} = \sqrt{(\text{VD} * \text{SSI} + 1)} - 1 \dots \dots \dots (18)$$

Keterangan:

- FCD = *Forest Canopy Density*
- VD = *Vegetation Density*
- SSI = *Scaled Shadow Index*

Model FCD berkorelasi dengan kerapatan vegetasi di lapangan. Hal tersebut ditunjukkan dengan nilai FCD yang lebih tinggi maka kerapatan tegakan di wilayah tersebut juga akan lebih tinggi. Pengolahan data selanjutnya yaitu adanya klasifikasi kelas kerapatan berdasarkan nilai FCD, dengan tiga kelas kerapatan yang digunakan: jarang (10 - <40%), sedang (40 - <70%), dan rapat (70-100%), sesuai dengan SNI 7645:2010 tentang Klasifikasi Penutup Lahan (BSN 2010).

Perhitungan besaran nilai FCD terdiri dari beberapa tahap dan mencakup indikator-indikator yang telah disebutkan di atas. Langkah-langkah perhitungan nilai FCD ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Alur pengolahan data kerapatan tajuk (FCD)

#### 3.5.4 Indeks Fragmentasi

Penggunaan analisis spasial menggunakan GIS memberikan keuntungan dalam mengamati perubahan penggunaan lahan dalam kurun waktu tertentu (Hapsary *et al.* 2021). Salah satu contohnya yaitu analisis *metrics spasial*. *Metrics spasial* merupakan salah satu analisis spasial yang digunakan untuk memberikan penilaian terhadap karakteristik spasial penggunaan lahan. Hal tersebut menjadikan *metrics spasial* dianggap menjadi salah satu metode analisis yang akurat untuk mengetahui pola penutupan maupun pola penggunaan lahan (Wijaya 2017). Terdapat dua jenis analisis *metrics spasial* yaitu *class metric* dan *landscape metric*. *Class metric* dapat diartikan sebagai analisis pada suatu ekosistem yang berdiri sendiri tanpa adanya gabungan ekosistem lain, sedangkan *landscape metric* merupakan analisis dari dua ekosistem atau lebih yang kemudian menjadi satu kesatuan lanskap (McGarigal 2015).

*Landscape metric* merupakan salah satu cara pengukuran *patch* tutupan lahan maupun segala mosaik bentang lahan pada suatu wilayah menggunakan analisis spasial (McGarigal dan Marks 1995). *Landscape metric* dapat digunakan untuk mendefinisikan heterogenitas bentang lahan, menghitung rata-rata nilai metrik pada kawasan, serta memberikan interpretasi, hal tersebut karena *landscape metric* memiliki sifat kesatuan sehingga dapat mencerminkan suatu bentang lahan (Chakraborty 2009). Perhitungan *landscape metric* juga dapat digunakan untuk menganalisis perubahan tutupan lahan, serta dapat digunakan untuk studi ekologi bentang lahan (Singh *et al.* 2014; Rijal *et al.* 2016; Sertel *et al.* 2018).

*Landscape metric* berfungsi untuk mengamati perubahan struktur bentang lahan atau lanskap dalam suatu waktu yang ditentukan. Selain itu, *landscape metric* juga berguna untuk memahami perubahan lanskap tersebut dalam aspek visual, ekologi, dan kultur (Kirabira 2022). Penggunaan *landscape metric* dalam proses

analisis penggunaan serta penutupan lahan juga dapat digunakan untuk mengetahui pola fragmentasi sebuah lanskap, meliputi identifikasi karakteristik, pola pertumbuhan, serta dampak dari adanya fragmentasi tersebut (Varela 2009).

Analisis *metrics spasial* dapat dilakukan menggunakan *software* RStudio. Kelas metrik yang digunakan adalah *Number of Patch* (NP), *Mean Shape Index* (MSI), *Edge Density* (ED), serta *Interspersion and Juxtaposition Index* (IJI). NP dapat merepresentasikan komposisi *patch* dalam suatu lanskap sehingga dapat digunakan sebagai indikator fragmentasi sebuah lanskap (Rutledge 2003). *Number of Patch* (NP) merupakan jumlah *patch* dari tipe *patch* yang sesuai (kelas) (Sertel *et al.* 2018). NP juga dapat menggambarkan total bentuk vector dari sebuah lanskap (McGarigal 2015).

*Mean Shape Index* merupakan analisis kompleksitas sebuah *patch* dengan tingkat kompleksitas *patch* yang berbentuk lingkaran dan bujur sangkar. Nilai 1 pada MSI menggambarkan sebuah *patch* yang berbentuk lingkaran sempurna, sedangkan apabila nilai MSI lebih dari 1 menandakan sebuah *patch* yang tidak beraturan (McGarigal dan Marks 1995). Apabila nilai MSI meningkat maka menandakan semakin banyaknya daerah tepi dan mengindikasikan pengurangan luasan habitat satwa (Kaban *et al.* 2018).

*Edge Density* (ED) merupakan sebuah indeks metrik lanskap yang dapat digunakan untuk mengukur atau menunjukkan sebuah jaringan penghubung habitat (koridor habitat) (McGarigal dan Marks 1995). *Edge Density* (ED) juga dapat didefinisikan sebagai indeks perhitungan jumlah panjang segmen tepi pada lanskap yang dibagi dengan total luas lanskap (Sertel *et al.* 2018). Nilai *Edge Density* (ED) yang tinggi menunjukkan kerapatan tepi yang tinggi pada suatu lanskap serta menunjukkan bahwa lanskap tersebut lebih terfragmentasi apabila dilihat melalui aspek tepi (Wijaya *et al.* 2020). Nilai 0 pada ED menunjukkan bahwa tidak ada bagian tepi pada sebuah lanskap (Flowers *et al.* 2020).

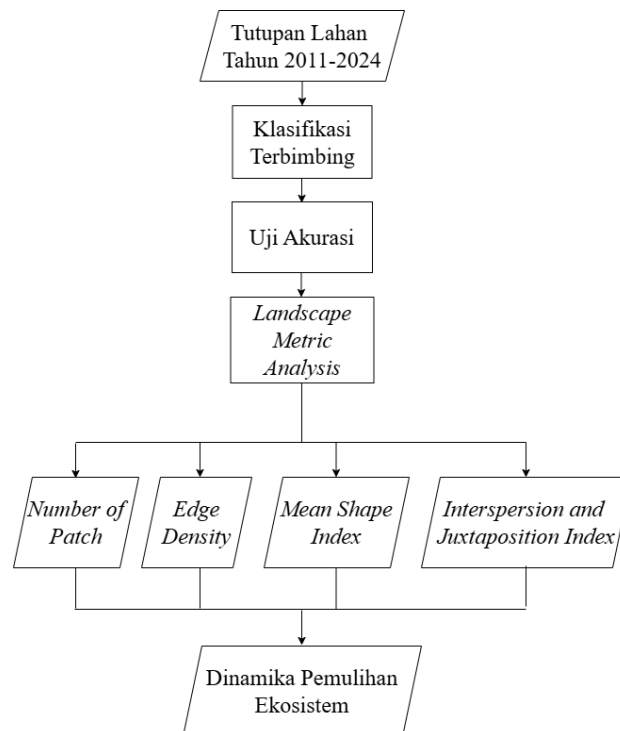
*Interspersion and Juxtaposition Index* menggambarkan pengaturan, hubungan, serta kedekatan habitat yang berbeda-beda dengan interspersi atau persilangan yang lebih tinggi dan yang terdiri dari penyebaran maupun campuran jenis penutup lahan (Masters *et al.* 2017). Terdapat nilai *Interspersion and Juxtaposition Index* (IJI) yang dapat menggambarkan konfigurasi dari sebuah *patch* (Aguilera *et al.* 2011). IJI dapat memberikan persentase besaran fragmentasi penggunaan lahan pada sebuah lanskap. Nilai IJI memiliki rentang dari 0% hingga 100% dengan nilai sebesar 0% yang menandakan persilangan pada sebuah *patch* yang rendah sedangkan nilai 100% menandakan sebuah *patch* yang memiliki persilangan tertinggi. Selain itu, nilai IJI yang semakin besar maka akan menunjukkan tingkat fragmentasi yang besar pula serta berpengaruh pada kerapatan penggunaan lahan (Musyary dan Buchori 2024). IJI dapat menggambarkan distribusi spasial dari individu spesies satwa akan tetapi IJI tidak berkorelasi dengan indeks keanekaragaman maupun metrik lain pada jarak 1 km. Selain itu, perhitungan IJI dipengaruhi seluruh *patch* dan tepi (McGarigal dan Marks 1995).

Indeks-indeks tersebut dapat diolah menggunakan data tutupan lahan. Setelah itu, dilakukan pembuatan *grid* dengan ukuran 250 m x 250 m dan telah di-clip dengan batas lokasi penelitian. *Grid* tersebut dapat dibuat menggunakan fitur *create grid* pada QGIS 3.36. Selanjutnya, untuk pengolahan *metric* dilakukan menggunakan beberapa *package* pada aplikasi RStudio seperti *landscapemetrics*, *terra*, *sf*, *tidyr*, *raster*, dan *shapefiles* (Prasetyo 2024). Tahap selanjutnya yaitu dapat

menjalankan semua *package* tersebut pada bagian *script editor* dan dapat memulai analisis *landscape metric* pada RStudio.

Tahap berikutnya yaitu dilakukan *input* data *raster* tutupan lahan beserta *grid* yang disesuaikan dengan lokasi *file* penyimpanan. Selanjutnya, menjalankan *script* “plot (nama file)” serta *script* “plot (grid, add = TRUE)”. Apabila kedua data tersebut sudah muncul pada RStudio maka dapat menjalankan *script* selanjutnya sesuai dengan *metric* yang ingin diketahui nilainya dengan menjalankan fungsi “grid\_lsm” untuk mendapatkan nilai lanskap metrik dari *number of patches* (np), *edge density* (ed), *mean shape index* (msi), dan *interspersions and juxtaposition index* (iji). *Script* yang digunakan dijelaskan pada Lampiran 2.

Tabel *attribute* nilai dapat diketahui apabila *script* telah dijalankan hingga akhir. Setelah itu, hasil tersebut dapat disimpan dalam bentuk *shapefile* (shp) sesuai dengan *metric* yang telah diolah. Perhitungan besaran nilai-nilai indeks fragmentasi habitat terdiri dari beberapa tahap dan mencakup indikator-indikator yang telah disebutkan di atas. Langkah-langkah perhitungan nilai-nilai tersebut ditunjukkan pada Gambar 5.



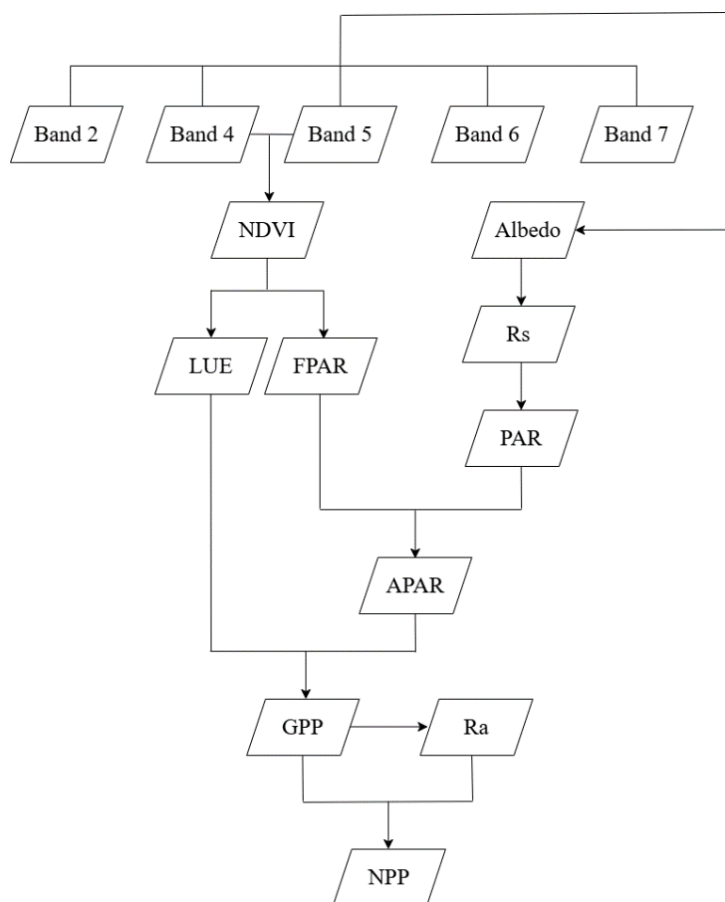
Gambar 5 Alur pengolahan nilai-nilai indeks fragmentasi habitat

### 3.5.5 Produktivitas Karbon

*Net Primary Productivity* (NPP) merupakan salah satu indikator yang digunakan untuk mengukur serapan karbon serta mengetahui produktivitas bersih hasil fotosintesis (Danardono *et al.* 2021). NPP juga dapat digunakan sebagai salah satu metode untuk penilaian kualitas lahan. Nilai NPP yang tinggi menggambarkan sebuah ekosistem yang sehat dan produktif akan tetapi apabila nilai NPP rendah maka menggambarkan suatu lahan yang sudah terdegradasi atau terganggu (Arrafi *et al.* 2024). Pola besaran nilai NPP dan serapan karbondioksida mengikuti pola tutupan lahan pada suatu lanskap. Keanekaragaman vegetasi yang homogen akan

menyebabkan NPP bernilai rendah sedangkan keanekaragaman vegetasi yang heterogen akan menyebabkan NPP bernilai tinggi (Yang *et al.* 2020). NPP juga dapat dijadikan sebagai analisis kesehatan ekosistem serta menunjukkan besaran nilai biomassa (Arrafi *et al.* 2024). Perbedaan nilai NPP juga dipengaruhi oleh musim yang ada di sekitar lanskap. Apabila saat perpindahan dari musim kemarau ke musim penghujan (*growing season*) maka nilai NPP akan mengalami peningkatan dan sebaliknya apabila saat musim kemarau maka nilai NPP akan mengalami penurunan (Danardono *et al.* 2021). Selain itu, kerapatan vegetasi serta jenis vegetasi pada suatu lahan juga akan memengaruhi nilai NPP pada lahan tersebut (Basuki *et al.* 2019).

Perhitungan nilai NPP dapat dilakukan menggunakan pendekatan spasial melalui model *Carnegie-Ames-Stanford Approach* (CASA). Selain itu, model CASA juga dapat mendistribusikan sebaran nilai NPP harian pada sebuah wilayah. Model CASA dapat mempertimbangkan proses fotosintesis serta respirasi dari tumbuhan (Arrafi *et al.* 2024). Pemodelan CASA memanfaatkan energi cahaya matahari serta radiasi efektif dari proses fotosintesis (Huang *et al.* 2022). Langkah-langkah perhitungan nilai NPP ditunjukkan pada Gambar 6.



Gambar 6 Alur pengolahan data NPP

Perhitungan menggunakan model CASA dapat dilakukan dengan tiga tahapan atau dapat terbagi dalam tiga kerangka teori utama yaitu (1) NPP yang berhubungan dengan besarnya energi matahari yang diserap vegetasi; (2) *Absorbed Photosynthetically Active Radiation* (APAR) dan *Fraction Absorbed*

*Photosynthetically Active Radiation* (FPAR) yang diperoleh dari nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) dan *Surface Reflectance* (SR); serta (3) konversi dari APAR ke karbon dengan maksimum *Light Use Efficiency* (LUE) (Running *et al.* 2024). Model perhitungan CASA memiliki satuan MJ.m<sup>-2</sup> dan LUE actual (ε) (gc.MJ<sup>-1</sup>) (Pei *et al.* 2018). Nilai FPAR dapat diperoleh dengan melibatkan indeks vegetasi berupa NDVI yang ditunjukkan pada persamaan 20:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \dots\dots\dots(20)$$

Keterangan:

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

NIR = *Near Infrared Radiation*

RED = Radiasi cahaya merah dari pixel

Selanjutnya, apabila nilai NDVI sudah diketahui maka dapat dilanjutkan pengolahan untuk mencari nilai FPAR. FPAR dapat digunakan untuk mengukur seberapa besar intensitas cahaya matahari yang digunakan oleh tanaman dalam proses fotosintesis. Nilai FPAR semakin tinggi maka mengindikasikan semakin banyaknya cahaya yang digunakan fotosintesis oleh tanaman. Selain itu FPAR juga dapat digunakan sebagai alat untuk memantau pertumbuhan vegetasi, memantau kondisi kekeringan pada suatu wilayah, hingga penggunaan lahan beserta dinamika vegetasi yang ada (Arrafi *et al.* 2024). Myneni dan Williams (1994) menjelaskan bahwa terdapat persamaan yang digunakan untuk memperoleh nilai FPAR yang ditunjukkan pada persamaan 21. Selain itu, nilai NDVI juga dapat digunakan untuk menghitung nilai LUE (*Light Use Efficiency*). Hal tersebut ditunjukkan pada persamaan 22:

$$FPAR = 1,24 \times NDVI - 0,168 \dots\dots\dots(21)$$

Keterangan:

FPAR = *Fraction Photosynthetically Active Radiation* (MJ)

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

$$LUE = 0,5 + (1,5 \times NDVI) \dots\dots\dots(22)$$

Keterangan:

LUE = *Light Use Efficiency* (gC.MJ<sup>-1</sup>)

NDVI = *Normalized Difference Vegetation Index*

Nilai albedo juga diperlukan dalam menghitung NPP. Besaran nilai albedo dapat diperoleh melalui citra landsat 7 ataupun landsat 8 (Liang 2001). Akan tetapi, untuk setiap band yang digunakan perlu dilakukan koreksi citra atau dilakukan proses *reflectance*. Nilai albedo dapat diperoleh melalui persamaan 23 dan 24:

$$\alpha L7 = (0,356 \times B1) + (0,13 \times B3) + (0,373 \times B4) + (0,085 \times B5) + (0,072 \times B7) \dots\dots\dots (23)$$

$$\alpha L8 = (0,356 \times B2) + (0,13 \times B4) + (0,373 \times B5) + (0,085 \times B6) + (0,072 \times B7) - 0,018 \dots\dots\dots (24)$$

Keterangan:

- $\alpha$  = Albedo
- B1 = Reflectance band 1
- B2 = Reflectance band 2
- B3 = Reflectance band 3
- B4 = Reflectance band 4
- B5 = Reflectance band 5
- B6 = Reflectance band 6
- B7 = Reflectance band 7

Selanjutnya, apabila nilai albedo sudah diketahui maka dapat dihitung radiasi matahari global atau radiasi matahari total ( $R_s$ ). Hal tersebut ditunjukkan pada persamaan 25:

$$R_s = (1 - \alpha) \times s \times 0,0864 \dots\dots\dots (25)$$

Keterangan:

- $R_s$  = Radiasi matahari global/total (MJ/m<sup>2</sup>/hari)
- $\alpha$  = Albedo
- $s$  = Konstanta solar = 1367 W/m<sup>2</sup>

Tahap berikutnya yaitu perhitungan nilai PAR (*Photosynthetically Active Radiation*). Nilai PAR tersebut dapat diketahui melalui perkalian nilai radiasi matahari global/total dikali dengan fraksi yang bernilai 0,45 (Moran *et al.* 1995). Perhitungan tersebut ditunjukkan pada persamaan 26:

$$PAR = f \times R_s \dots\dots\dots (26)$$

Keterangan:

- PAR = *Photosynthetically Active Radiation* (MJ)
- $R_s$  = Radiasi matahari global/total (MJ/m<sup>2</sup>/hari)
- $f$  = fraksi = 0,45

APAR (*Absorb Photosynthetically Active Radiation*) dapat diperoleh melalui perkalian FPAR dengan PAR (Kurniadi *et al.* 2016). Hal tersebut ditunjukkan dengan persamaan 27:

$$APAR = FPAR \times PAR \dots\dots\dots (27)$$

Keterangan:

- APAR = *Absorb Photosynthetically Active Radiation* (MJ.m<sup>-2</sup>)
- FPAR = *Fraction Photosynthetically Active Radiation* (MJ)
- PAR = *Photosynthetically Active Radiation* (MJ)

GPP (*Gross Primary Productivity*) dapat diketahui melalui perkalian antara nilai APAR dengan LUE (Kurniadi *et al.* 2016). Hal tersebut ditunjukkan melalui persamaan 28:

$$GPP = APAR \times LUE \dots\dots\dots(28)$$

Keterangan:

GPP = *Gross Primary Productivity*

APAR = *Absorb Photosynthetically Active Radiation* (MJ.m<sup>-2</sup>)

LUE = *Light Use Efficiency* (gC.MJ<sup>-1</sup>)

Apabila sudah diketahui nilai GPP maka dapat diketahui nilai NPP dari sebuah citra. Perhitungan nilai NPP tersebut membutuhkan besaran Ra (respirasi autotrofik) yang bernilai setengah dari nilai GPP (Zanotelli *et al.* 2013). Nilai NPP dapat diperoleh melalui persamaan 29:

$$NPP = GPP - R_a \dots\dots\dots(29)$$

$$NPP = GPP - (0,5 \times GPP) \dots\dots\dots(29)$$

Keterangan:

NPP = *Net Primary Productivity*

GPP = *Gross Primary Productivity*

R<sub>a</sub> = Respirasi autotroph

### 3.5.6 Tren

Hasil pengolahan data suhu permukaan (LST), kerapatan tajuk (FCD), indeks fragmentasi habitat, hingga nilai NPP sejak tahun 2011 hingga 2024 dibuat menjadi sebuah grafik sehingga dapat mengetahui tren data dari tahun ke tahun. Grafik dapat didefinisikan sebagai salah satu metode untuk menampilkan data berdasarkan rentang nilai yang telah ditentukan dan berdasarkan distribusi frekuensinya (Kusuma *et al.* 2023). Grafik juga dapat digunakan untuk menggambarkan pola sebaran data serta memvisualisasikannya sehingga dapat diketahui terdapat peningkatan maupun penurunan nilai dari data (Pandriadi *et al.* 2023). Grafik tersebut dapat menjadi sebuah tolak ukur keberhasilan pemulihan ekosistem pada lokasi penelitian yang telah mengalami kegiatan revegetasi.



## IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Kondisi Umum

Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS) merupakan kawasan konservasi penting di Pulau Jawa yang memiliki keanekaragaman hayati tinggi serta menjadi habitat bagi berbagai spesies endemik dan sumber daya alam yang bernilai ekologis. Pemerintah Indonesia memperluas kawasan lindung di Taman Nasional Gunung Halimun (40.000 ha) untuk digabungkan dengan Cagar Alam Gunung Salak menjadi satu kesatuan yaitu Taman Nasional Gunung Halimun Salak dengan luasan 113.357 ha (Yumarni *et al.* 2011). Hal tersebut dilakukan dengan bertujuan untuk mengurangi hilangnya hutan. Kawasan TNGHS tidak hanya meliputi hutan saja, namun terdapat pula desa-desa, pertanian, semak belukar, hingga perkebunan teh yang ada sejak dulu (Rinaldi *et al.* 2008; GHSNPMP-JICA 2009).

Koridor Gunung Halimun Salak memiliki panjang  $\pm 7,17$  km dan lebar 1,99 km. Koridor tersebut menjadi kawasan penting untuk upaya konservasi di TNGHS baik konservasi satwa maupun tumbuhan yang ada (Rinaldi *et al.* 2008). Koridor TNGHS juga berperan penting sebagai sumber penyediaan air wilayah di sekitar TNGHS seperti Kabupaten Sukabumi dan Kabupaten Bogor (Yumarni *et al.* 2011). Terdapat beberapa lahan restorasi di wilayah koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak yang terletak di Kecamatan Kabundungan, Kabupaten Sukabumi, Jawa Barat. Wilayah tersebut terletak di dalam kawasan zona rehabilitasi Taman Nasional Gunung Halimun Salak.

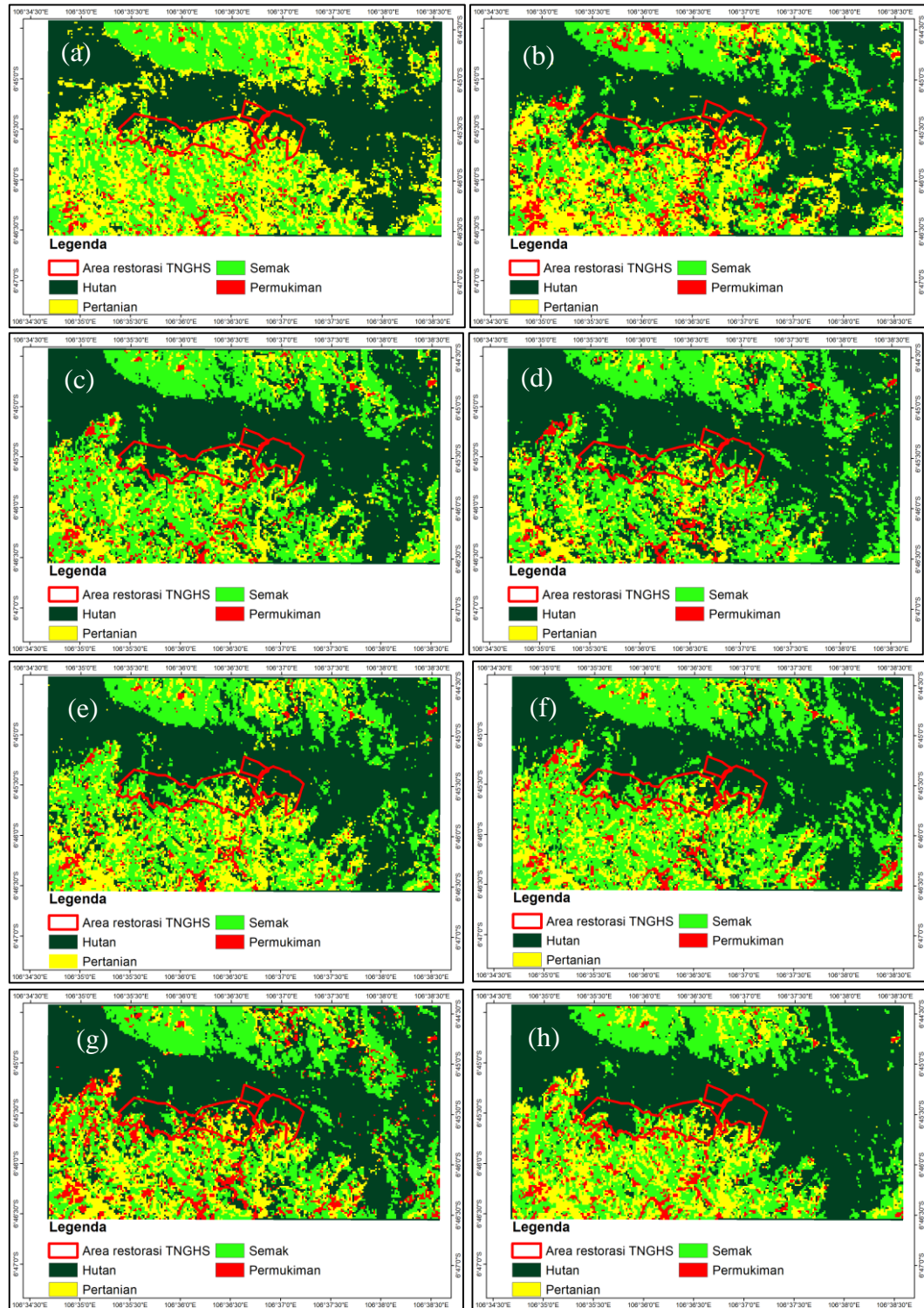
Penanaman pada lahan restorasi Pasir Bendil mulai dilakukan pada tahun 2012 sedangkan penanaman pada lahan restorasi Gunung Kendeng mulai dilakukan pada tahun 2019. Akan tetapi, kegiatan penanaman tersebut tidak dilakukan secara serentak pada tahun tersebut. Penanaman pada lahan restorasi dilakukan dalam rangka menyulam titik-titik lokasi yang kosong sehingga pada kedua lahan tersebut umur vegetasi yang ditanam berbeda-beda. Jarak pepohonan pada lahan restorasi Pasir Bendil lebih rapat dibandingkan pada lahan restorasi Gunung Kendeng. Terdapat beberapa jenis pohon yang berada pada kedua lahan restorasi tersebut yang terdiri atas lima jenis yaitu mahoni daun kecil (*Swietenia mahagoni*), rasamala (*Altingia excelsa*), saninten (*Castanopsis javanica*), damar (*Agathis loranthifolia*), dan huru (*Litsea cordata*).

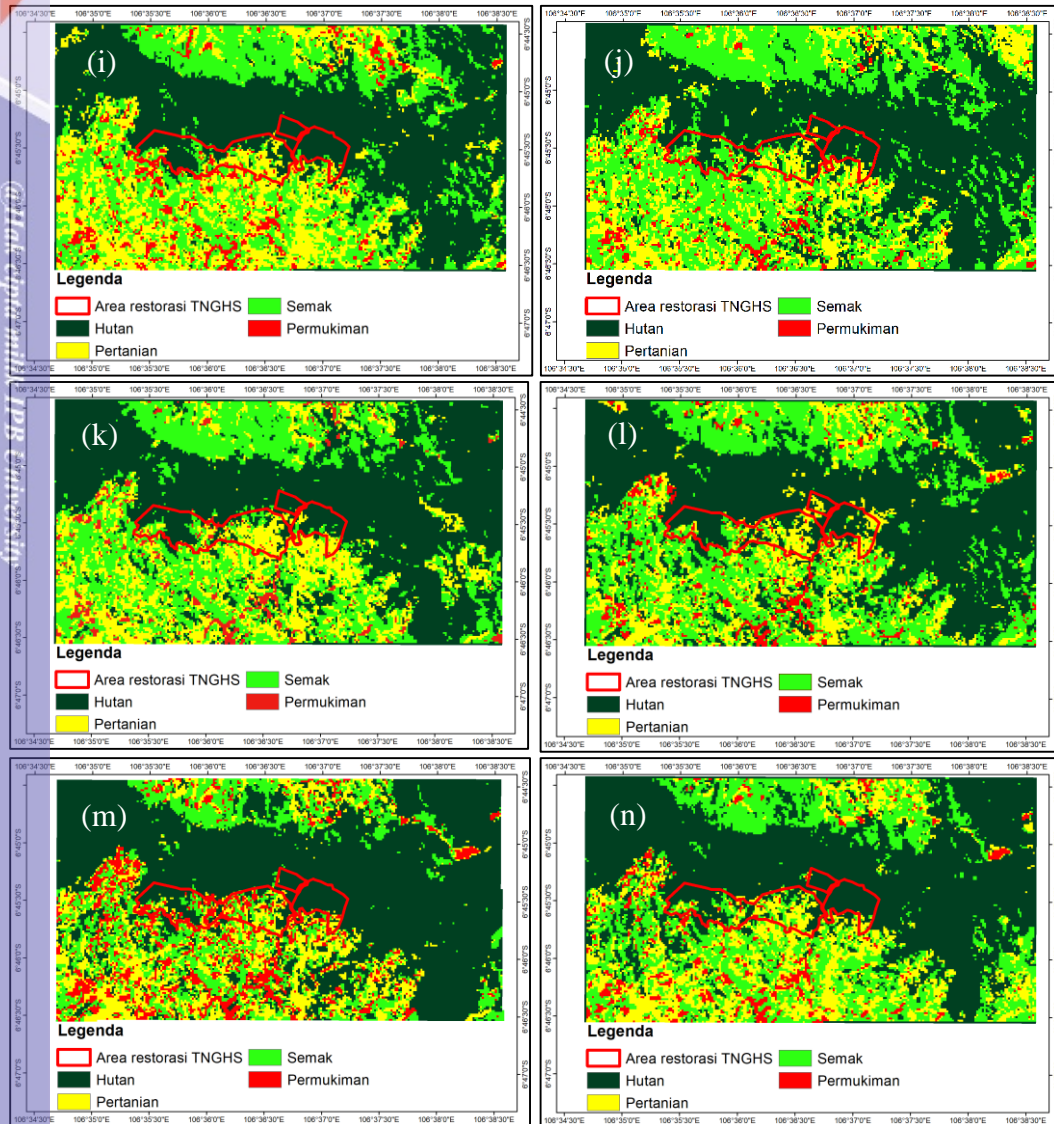
### 4.2 Perubahan Tutupan Lahan

Koridor ekologi merupakan sebuah jalur atau rute yang dapat menghubungkan antara suatu wilayah dengan wilayah lainnya sehingga mampu memperluas habitat satwa, sebagai tempat perkembangbiakan tumbuhan, dan berbagai manfaat lainnya. Koridor yang semakin luas maka akan memberikan manfaat yang lebih besar pula karena lahan yang terputus akan menjadi berdekatan kembali (Hilty 2020).

Kawasan hutan alam di wilayah TNGHS mengalami pengurangan luasan dalam rentang waktu 1998-2001 akibat adanya kegiatan penebangan serta adanya alih fungsi hutan (Prasetyo *et al.* 2006). Kawasan hutan yang tersisa dari adanya kegiatan alih fungsi hutan tersebut ditunjuk sebagai hutan produksi dan hutan lindung. Selain itu, hutan yang tersisa juga digunakan untuk kawasan koridor

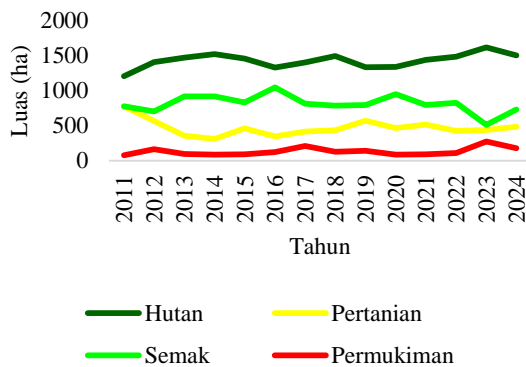
karena relatif tertutup oleh tutupan hutan alam (Fauziah 2022). Namun, terdapat pula wilayah perkebunan serta pertanian di daerah koridor (Robiansyah dan Purnomo 2013). Wilayah koridor TNGHS dalam rentang waktu 14 tahun mengalami perubahan tutupan lahan. Hal tersebut tentunya berdampak pada area restorasi serta wilayah di sekitarnya. Perubahan tutupan lahan pada lahan restorasi dan sekitarnya ditunjukkan pada Gambar 7.





Gambar 7 Perubahan tutupan lahan pada periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Perubahan tutupan lahan mengalami kenaikan atau penurunan luasan lahan. Tren perubahan tutupan lahan dapat diketahui melalui grafik pada Gambar 8.



Gambar 8 Tren perubahan luasan tutupan lahan

Grafik pada gambar di atas menunjukkan bahwa meskipun terdapat penurunan luasan tutupan hutan pada beberapa tahun tertentu, secara keseluruhan terjadi tren peningkatan luas tutupan hutan. Hal tersebut juga terjadi pada luasan permukiman yang meningkat walaupun mengalami fluktuasi. Luasan hutan mengalami peningkatan akibat adanya kegiatan restorasi yang dilakukan oleh pihak TNGHS yang melakukan kerja sama dengan berbagai pihak. Hal tersebut juga ditunjukkan oleh pihak TNGHS yang memberikan fasilitas berupa bibit pohon untuk ditanam oleh masyarakat di sekitar koridor (Ekrep dan Soetarto 2021).

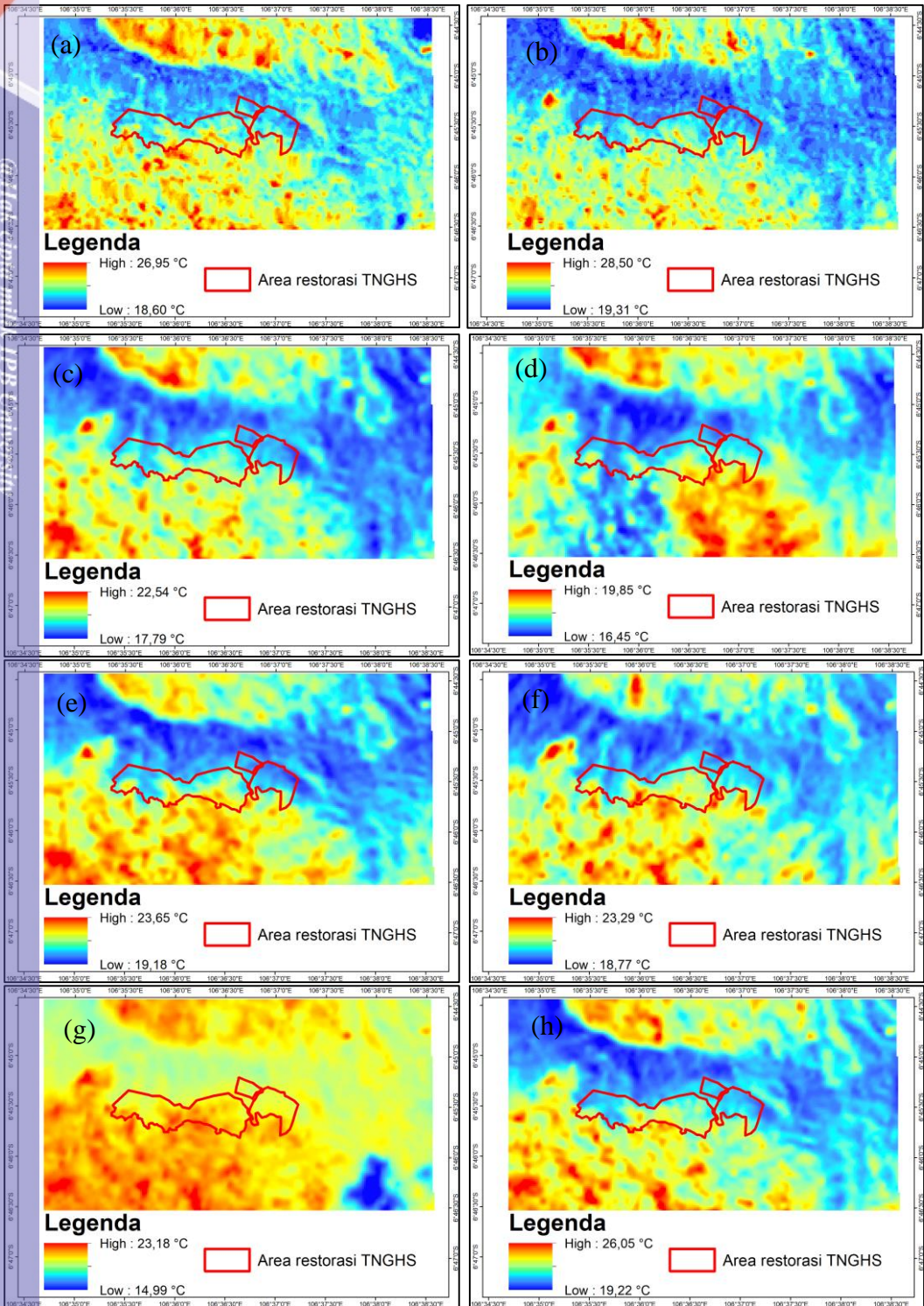
Luasan permukiman yang meningkat juga disebabkan karena terdapat beberapa wilayah *enclave* di sekitar koridor TNGHS. Perluasan permukiman juga dijelaskan oleh Supriyanto dan Ekariyono (2007) yang menyatakan bahwa jumlah kampung di kawasan TNGHS bertambah menjadi 314 kampung. Keberadaan permukiman yang berada di kawasan TNGHS juga tidak dapat dihilangkan karena masyarakat telah memiliki rumah sejak sebelum masa kolonial Belanda (Prabowo *et al.* 2010). Oleh karena itu, masih terdapat permukiman di sekitar koridor TNGHS, namun peningkatannya tidak secara masif.

Sedangkan, pada tutupan lahan pertanian dan semak mengalami penurunan luasan dibandingkan awal tahun penelitian (tahun 2011). Adanya perubahan tutupan luasan tersebut dikarenakan pada awalnya wilayah koridor TNGHS merupakan lokasi lahan garapan masyarakat (Ekrep dan Soetarto 2021). Oleh karena itu, di beberapa titik di sekitar koridor TNGHS masih terdapat wilayah pertanian. Luasan pertanian mengalami penurunan yang cukup drastis karena pihak TNGHS sudah mulai mempertegas adanya larangan bagi masyarakat untuk memperluas lahan pertanian di wilayah TNGHS. Namun, beberapa masyarakat tetap menggunakan beberapa lahan kosong yang dapat dipulihkan dan ditanami. (Ekrep dan Soetarto 2021). Lalu, untuk tutupan semak yang bertambah ataupun menurun diakibatkan karena area di sekitar koridor mengalami perubahan tutupan lahan akibat peningkatan populasi masyarakat serta adanya penggunaan lahan di dalam areal koridor (Yumarni *et al.* 2011).

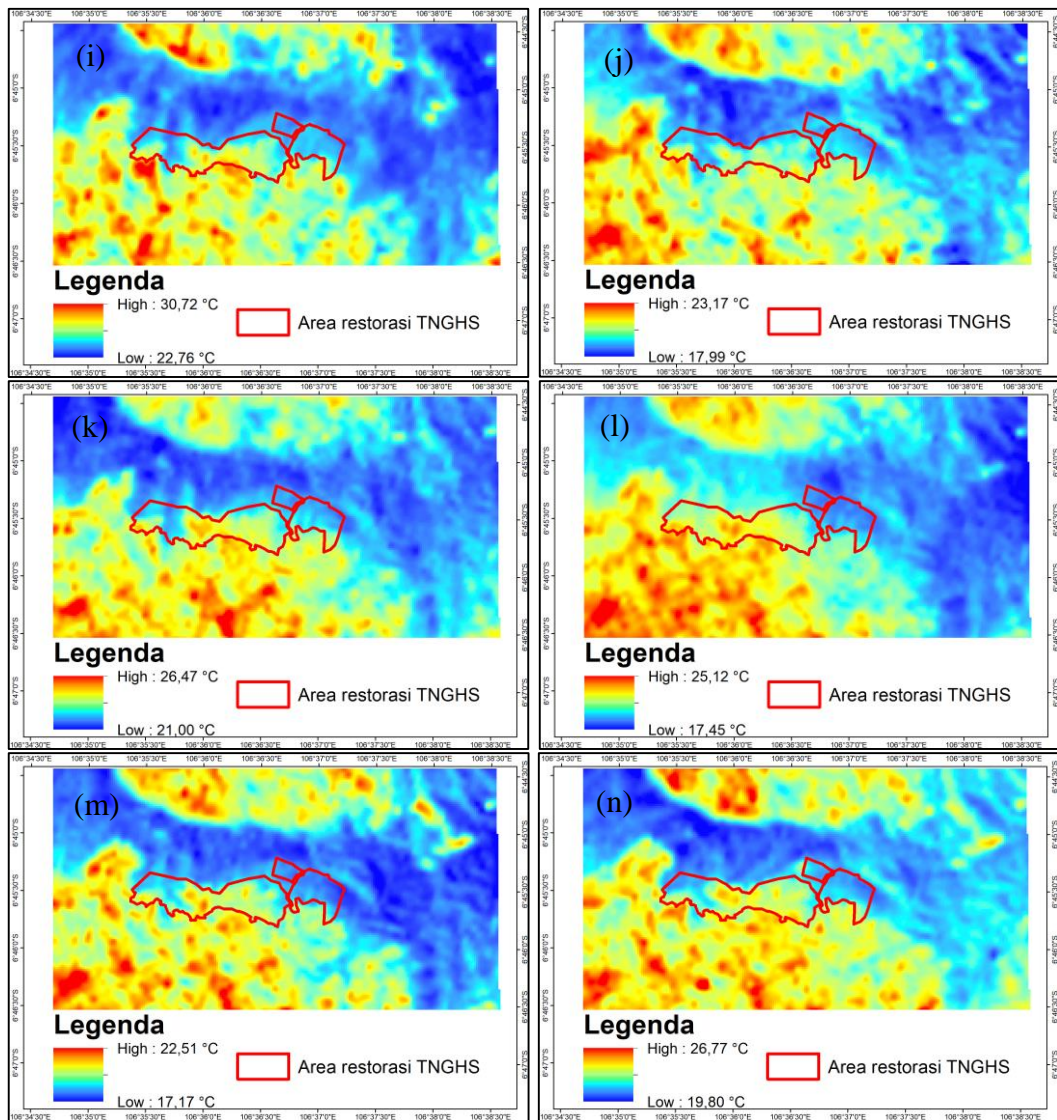
#### 4.3 Tren Indeks Lingkungan *Land Surface Temperature* (LST)

Kondisi iklim yang terdapat pada suatu wilayah dengan luasan yang kecil seperti pada hutan, lahan terbangun, lahan bervegetasi, dan lain sebagainya disebut sebagai iklim mikro. Iklim mikro dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti ada tidaknya suatu vegetasi, topografi, tutupan lahan, kelembapan, kecepatan angin hingga aktivitas manusia yang ada di suatu wilayah (Ebrahimabadi *et al.* 2015). Oleh karena itu, kondisi iklim mikro antar wilayah tentu berbeda-beda. Suhu permukaan juga menjadi salah satu faktor yang mengakibatkan adanya perbedaan iklim mikro, karena suhu permukaan juga dapat memengaruhi suhu udara (Zahrotunisa *et al.* 2020). Oleh karena itu, suhu permukaan dapat dijadikan sebagai salah satu indikator fungsi ameliorasi iklim pada lahan bervegetasi.

Perbaikan iklim mikro melalui pemulihan ekosistem pada lahan restorasi Gunung Kendeng dan Pasir Bendil dapat diketahui nilai suhu permukaan (LST). Nilai LST tentunya mengalami perubahan besaran nilai dalam kurun waktu 14 tahun. Selain itu, nilai LST pada lahan restorasi juga memiliki nilai yang berbeda dengan tutupan lahan yang berbeda pada wilayah di sekitarnya. Perubahan LST di wilayah koridor dan sekitarnya ditunjukkan pada Gambar 9.

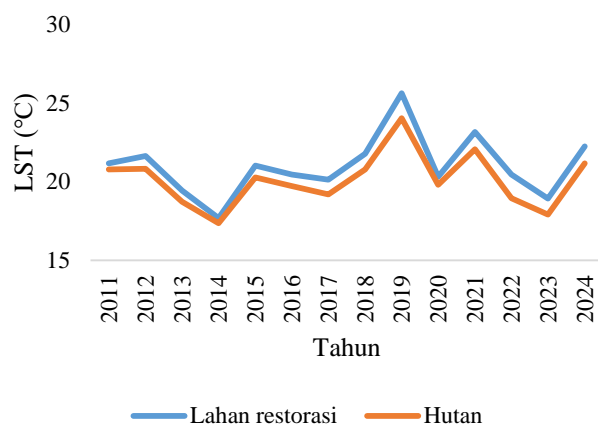


- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 9 Perubahan LST periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa secara visual LST di wilayah koridor TNGHS dalam waktu 14 tahun tidak terlalu jauh berbeda, kecuali pada tahun 2017 karena bagian biru merupakan awan dengan suhu terendah maka tutupan hutan yang memiliki suhu lebih rendah dibandingkan tutupan lainnya tidak terlalu terlihat. Tren suhu permukaan pada wilayah lahan restorasi dan sekitarnya di koridor TNGHS selama 14 tahun tersebut ditunjukkan pada Gambar 10.



Gambar 10 Tren perubahan rata-rata suhu permukaan

Terdapat kenaikan serta penurunan besaran LST rata-rata. Hal tersebut dikarenakan adanya beberapa faktor, salah satunya seperti perubahan tutupan lahan. Wilayah dengan suhu permukaan rendah umumnya didominasi oleh hutan atau pepohonan sedangkan wilayah dengan suhu permukaan yang lebih tinggi didominasi oleh permukiman, pertanian, dan semak belukar. Hal tersebut dapat terjadi karena hutan lebih mampu menurunkan suhu permukaan dibandingkan tutupan lahan lainnya. Rushayati *et al.* (2009) menjelaskan bahwa vegetasi terutama pohon dapat mengintersepsi radiasi matahari dan memanfaatkannya sebagai energi untuk proses fotosintesis sehingga dapat membantu penurunan suhu udara di sekitar tutupan hutan. Aluyah dan Rusdianto (2019) juga menjelaskan bahwa daerah dengan tutupan vegetasi yang lebih dapat menyebabkan evapotranspirasi tinggi sehingga menyebabkan banyak uap air dan meningkatkan kelembapan udara. Apabila kelembapan udara tinggi maka suhu akan menurun.

Perubahan suhu permukaan pada daerah koridor juga dipengaruhi oleh umur pohon yang terdapat pada wilayah tersebut. Pohon yang berusia muda menandakan bahwa pohon tersebut sedang dalam masa pertumbuhan atau yang sering disebut dalam masa *net growth* (Purnamasari 2004). Pohon dalam masa *net growth* cenderung lebih mampu menyerap karbon dibandingkan pohon yang sudah dewasa (Akbar *et al.* 2019). Akan tetapi, kedua tipe pohon baik muda ataupun dewasa mampu memberikan efek perbaikan suhu permukaan. Selain karena perubahan tutupan lahan, perubahan suhu permukaan juga dapat dipengaruhi oleh efek pemanasan global. Nunez *et al.* (2019) menjelaskan bahwa pemanasan global akan menyebabkan suhu global bertambah 2-5°C bahkan dapat melebihi rentang tersebut pada tahun 2100. Oleh karena itu, tren suhu permukaan dalam kurun waktu 14 tahun tersebut menandakan bahwa kegiatan revegetasi dapat menekan laju kenaikan suhu permukaan.

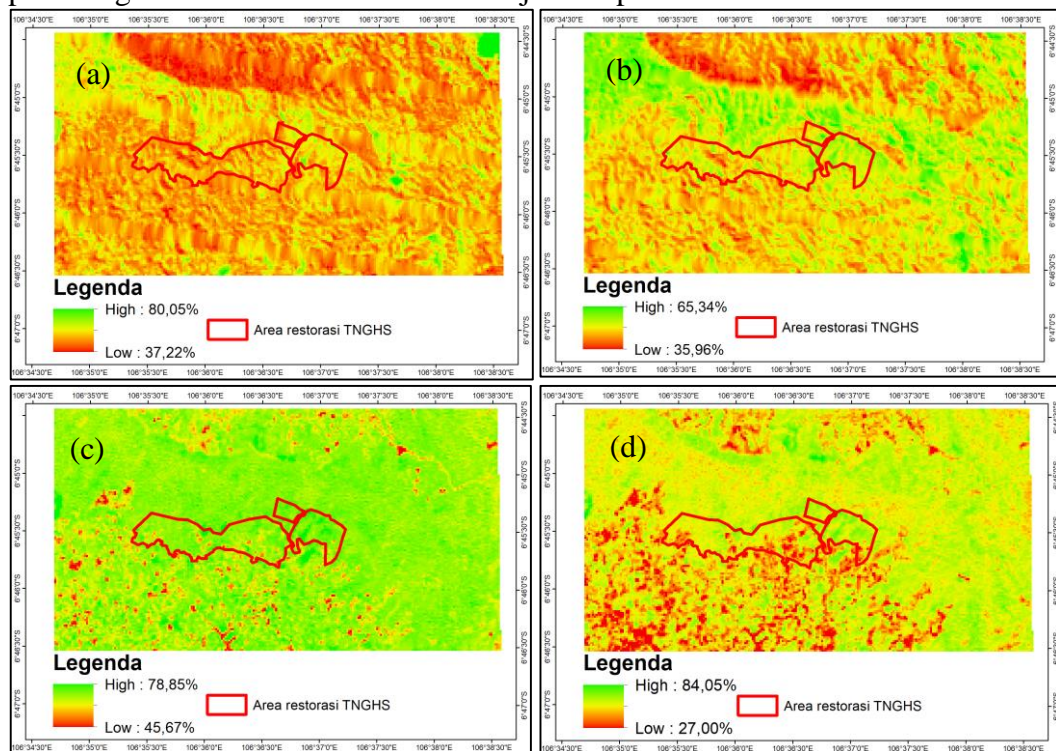
#### 4.4 Tren Indeks Lingkungan *Forest Canopy Density* (FCD)

Kegiatan restorasi ditujukan untuk memulihkan suatu lahan yang rusak karena aktivitas manusia atau faktor lainnya. Selain itu, kegiatan revegetasi juga dapat memperbaiki kondisi ekologi dan hidrologi suatu lahan yang terdegradasi serta meningkatkan keanekaragaman vegetasi melalui penanaman. Penanaman pada lahan yang rusak juga bertujuan untuk meningkatkan nilai tutupan lahan.

Lahan dengan nilai tutupan tajuk yang tinggi dapat dikatakan menyerupai hutan (Asner *et al.* 2015). Tutupan tajuk merupakan persentase proporsi lantai hutan dibandingkan arah vertikal proyeksi mahkota pohon. Selain itu, tutupan tajuk juga digunakan sebagai salah satu penentu utama suatu makrohabitat yang dapat memengaruhi pertumbuhan dan kelangsungan hidup tumbuhan sehingga menentukan sifat vegetasi pula (Jennings *et al.* 1999).

Tutupan tajuk memiliki nilai yang berbeda antara lahan bervegetasi dengan lahan terbuka serta berhubungan dengan kerapatan vegetasi. Semakin besar nilai persentase tutupan tajuk maka menunjukkan bahwa semakin rapat pula vegetasi (Triatmojo *et al.* 2022). Tutupan tajuk yang rapat dapat menurunkan suhu iklim mikro serta meningkatkan kenyamanan termal bagi lingkungan sekitarnya (Putra *et al.* 2021). Hal tersebut dikarenakan tutupan tajuk mampu memengaruhi intensitas sinar matahari yang masuk.

Persentase besaran tutupan tajuk dapat dihitung menggunakan beberapa metode, salah satunya seperti *Forest Canopy Density* (FCD). Besaran nilai FCD berkisar di angka 0 hingga 100%. FCD berkorelasi positif dengan kerapatan tegakan, apabila persentase FCD tinggi maka kerapatan tegakan tinggi pula (Nugroho 2011). Nilai FCD juga dapat menggambarkan besaran tingkat degradasi hutan sehingga dapat dijadikan sebagai acuan kegiatan revegetasi atau rehabilitasi (Rikimaru *et al.* 2002). Oleh karena itu, FCD menjadi salah satu opsi indikator yang tepat untuk mengetahui pemulihan ekosistem melalui kerapatan tegakan. Hasil perhitungan FCD selama 14 tahun ditunjukkan pada Gambar 11.

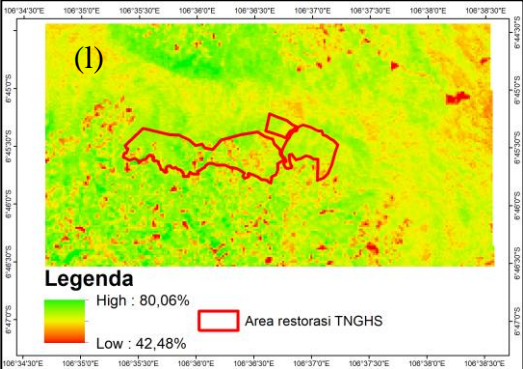
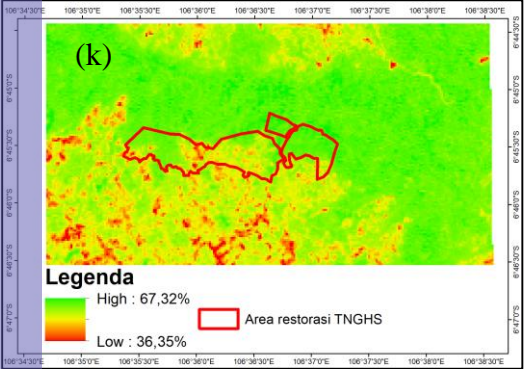
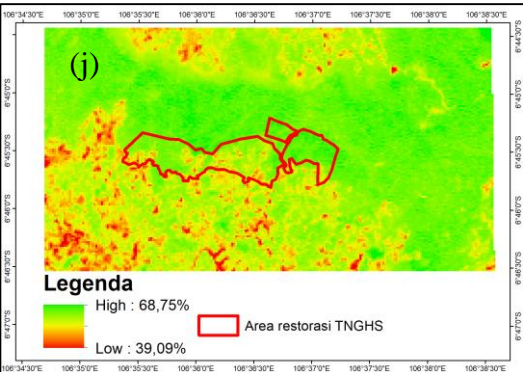
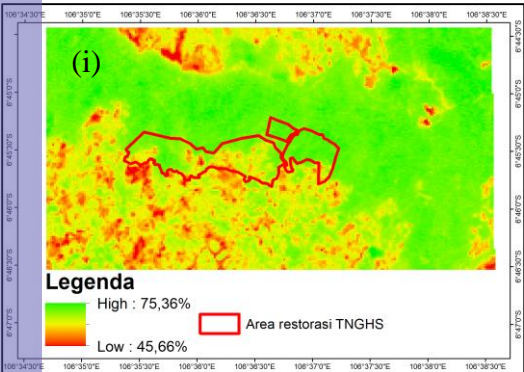
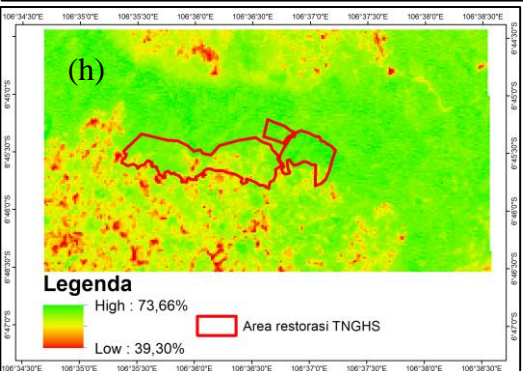
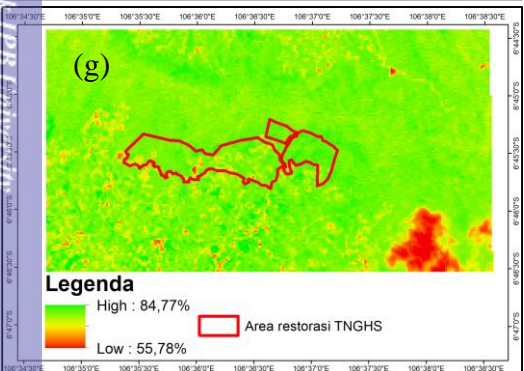
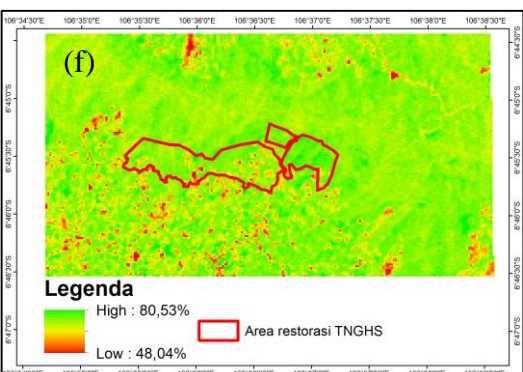
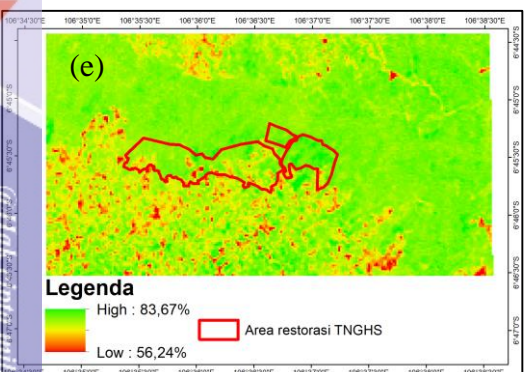


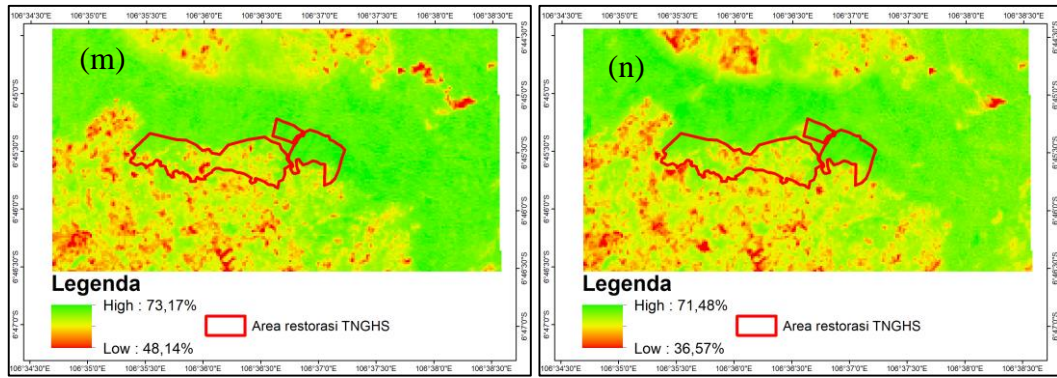
# Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

- Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

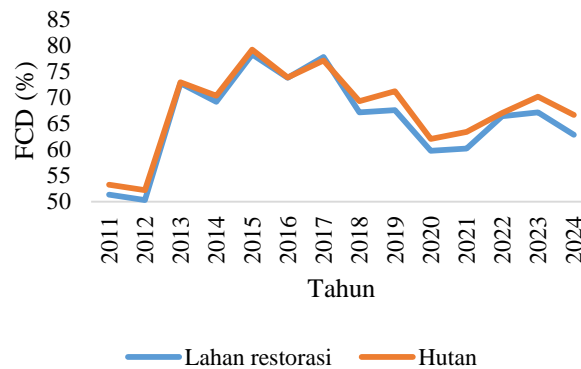
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.





Gambar 11 Perubahan FCD periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya  
(a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Berdasarkan gambar di atas, dapat diketahui bahwa secara visual FCD di wilayah koridor TNGHS dalam waktu 14 tahun mengalami perbedaan. Terdapat perbedaan warna di beberapa wilayah dari yang awalnya merah menjadi hijau maupun sebaliknya. FCD pada tahun 2017 terlihat hijau secara keseluruhan karena daerah yang berwarna merah di peta tersebut adalah awan, padahal nilai di daerah lainnya tidak jauh berbeda dengan FCD pada tahun yang berbeda. Secara keseluruhan, tren peningkatan nilai FCD dalam periode tersebut mencerminkan keberhasilan upaya restorasi di beberapa bagian koridor, meskipun masih ditemukan area dengan tutupan vegetasi yang belum optimal. Tren kepadatan tajukS pada wilayah lahan restorasi dan sekitarnya di koridor TNGHS selama 14 tahun tersebut ditunjukkan pada Gambar 12.



Gambar 12 Tren perubahan rata-rata kepadatan tajuk

Nilai rata-rata FCD selama 14 tahun pada lahan tersebut, jika diklasifikasikan berdasarkan kategori dari BSN (2010), berada pada kelas sedang hingga rapat. Nilai tersebut mencerminkan tutupan tajuk vegetasi yang cukup baik namun belum mencapai tingkat optimal. Hasil nilai FCD tersebut sejalan dengan kebijakan pemulihan yang tertuang dalam dokumen Rencana Pemulihan Ekosistem (RPE) Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS) Tahun 2020–2024. Dokumen tersebut menjelaskan bahwa kegiatan pemulihan di wilayah TNGHS lebih difokuskan pada pengayaan keanekaragaman hayati, bukan pada perbanyakan penanaman vegetasi secara masif. Meskipun demikian, berdasarkan nilai FCD yang terpantau, terlihat adanya peningkatan kepadatan tajuk pada lahan restorasi dan

sekitarnya. Hal tersebut mengindikasikan bahwa pendekatan pengayaan spesies secara bertahap tetap memberikan kontribusi terhadap pertumbuhan vegetasi dan pemulihan tutupan lahan.

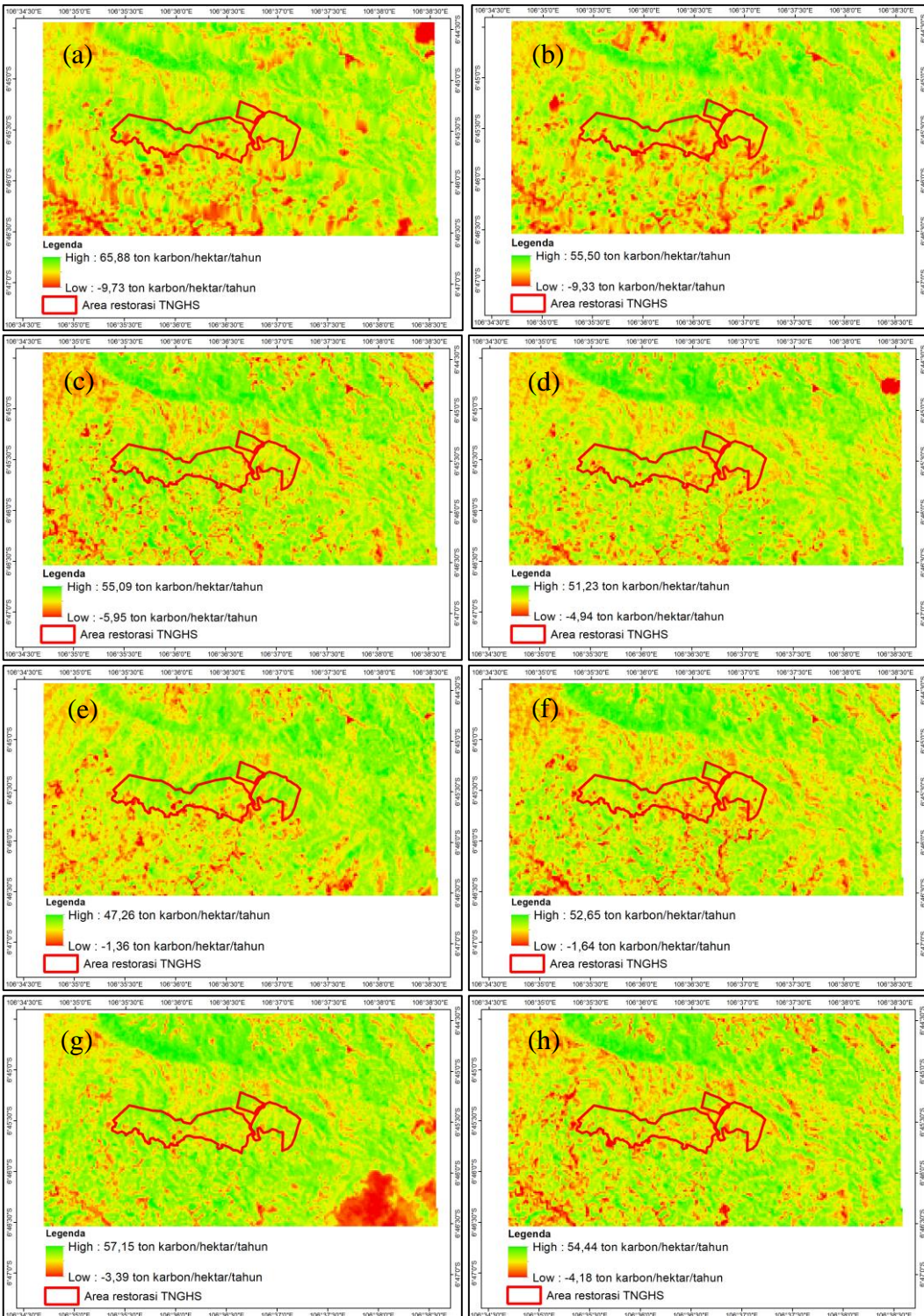
Perbedaan nilai rata-rata FCD yang ada pada Gambar 12 juga menunjukkan adanya kerapatan tutupan tajuk yang berbeda antara lahan restorasi dengan lahan lainnya. Hal tersebut dikarenakan adanya perbedaan umur tegakan, karakteristik tegakan, serta perbedaan tutupan lahan. Tegakan dewasa memiliki tutupan tajuk yang lebih tinggi dan rapat sehingga mampu untuk menahan sinar radiasi matahari dibandingkan tegakan yang berusia lebih muda (Tang dan Dubayah 2017). Karakteristik tajuk seperti kerindangan, ketinggian, hingga lebar tajuk dapat memengaruhi iklim mikro. Hal tersebut dapat terjadi karena tajuk pohon memengaruhi kemampuan transpirasi untuk meningkatkan kelembapan di lingkungan sekitarnya, refleksi, absorpsi, intersepsi hingga transmisi radiasi matahari.

Rahmawati *et al.* (2018) juga menyatakan bahwa tajuk tegakan yang lebar dapat memengaruhi suhu permukaan karena mampu mengatur kelembapan di sekitarnya dan menahan adanya radiasi balik sinar matahari. Proses transpirasi pada tegakan dengan tajuk yang lebar dan rapat memberikan hasil yang optimal dalam mengontrol suhu dan kelembapan udara (Irham *et al.* 2017; Sapariyanto *et al.* 2016). Oleh karena itu, persentase kerapatan tajuk dapat menggambarkan keberhasilan kegiatan pemulihan ekosistem, namun harus pula menganalisis lebih lanjut vegetasi yang ditanam.

#### 4.5 Tren Indeks Lingkungan *Net Productivity Primer* (NPP)

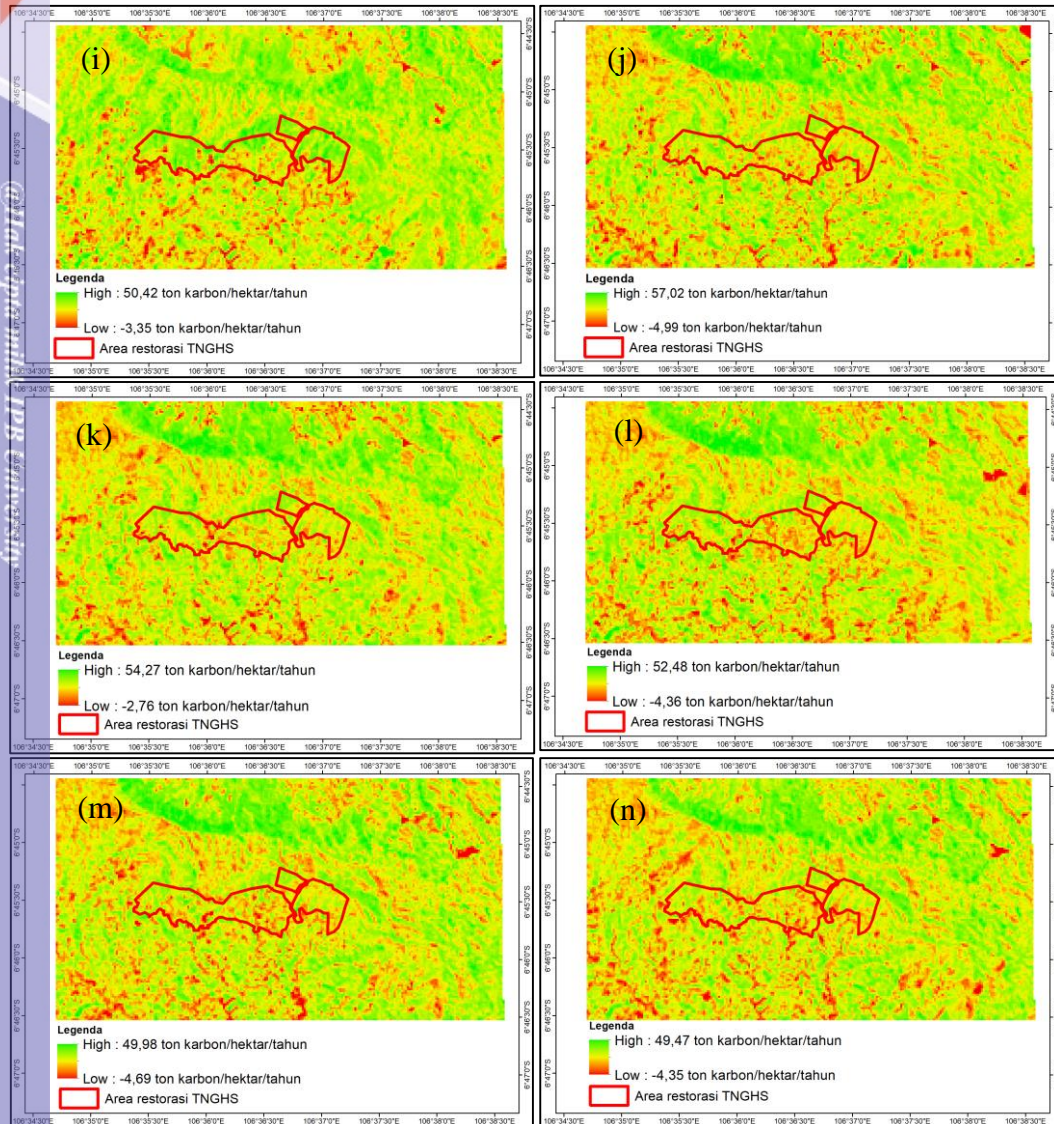
*Net Productivity Primer* (NPP) merupakan jumlah karbon bersih yang diserap oleh vegetasi namun sudah dikurangi oleh kebutuhan aktivitas vegetasi tersebut seperti respirasi (Park *et al.* 2021). NPP juga dapat didefinisikan sebagai jumlah bahan organik kering yang terakumulasi per unit area serta unit waktu melalui proses fotosintesis tumbuhan (Li *et al.* 2019). NPP dapat dijadikan sebagai indikator penentuan fungsi ekologi dan siklus karbon hingga berkaitan dengan kelangsungan hidup manusia dan pembangunan berkelanjutan (Maden dan Choy 2017). Perhitungan NPP dari waktu ke waktu dapat mencerminkan kondisi serta perubahan ekosistem pada suatu wilayah (Wei *et al.* 2018).

Terdapat beberapa metode perhitungan NPP salah satunya melalui metode analisis spasial atau penginderaan jarak jauh (Rendana *et al.* 2017). Hal tersebut dilakukan karena dianggap lebih efektif dibandingkan metode lainnya, terlebih untuk skala luasan wilayah yang besar serta dianggap lebih mampu untuk menganalisis adanya perubahan yang terjadi (Chen *et al.* 2017). Hasil perhitungan NPP pada lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 13.



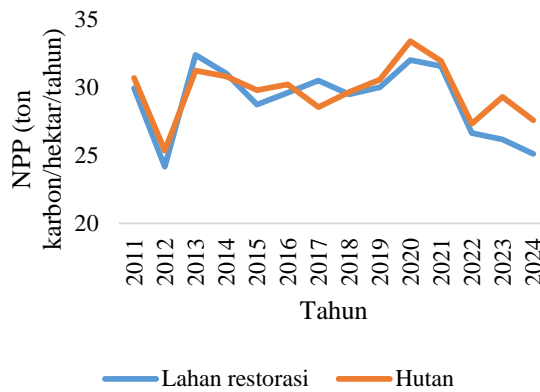
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
- a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
- b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 13 Perubahan NPP periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Hasil pada Gambar 13 menunjukkan daerah permukiman merupakan daerah dengan jumlah NPP paling rendah dibandingkan daerah dengan tutupan lahan lainnya, sedangkan daerah dengan jumlah NPP tertinggi merupakan daerah semak belukar. Meskipun wilayah hutan memiliki jumlah biomassa yang besar, akan tetapi untuk nilai produktivitas primer bersihnya tergolong rendah. Hal tersebut berbanding terbalik dengan daerah semak belukar atau padang rumput yang tidak mengakumulasi jumlah vegetasi, walaupun memiliki nilai biomassa yang rendah namun nilai produktivitas primernya tinggi (Campbell *et al.* 2002). Tren jumlah rata-rata NPP pada 14 tahun ditunjukkan pada Gambar 14.



Gambar 14 Tren perubahan rata-rata NPP

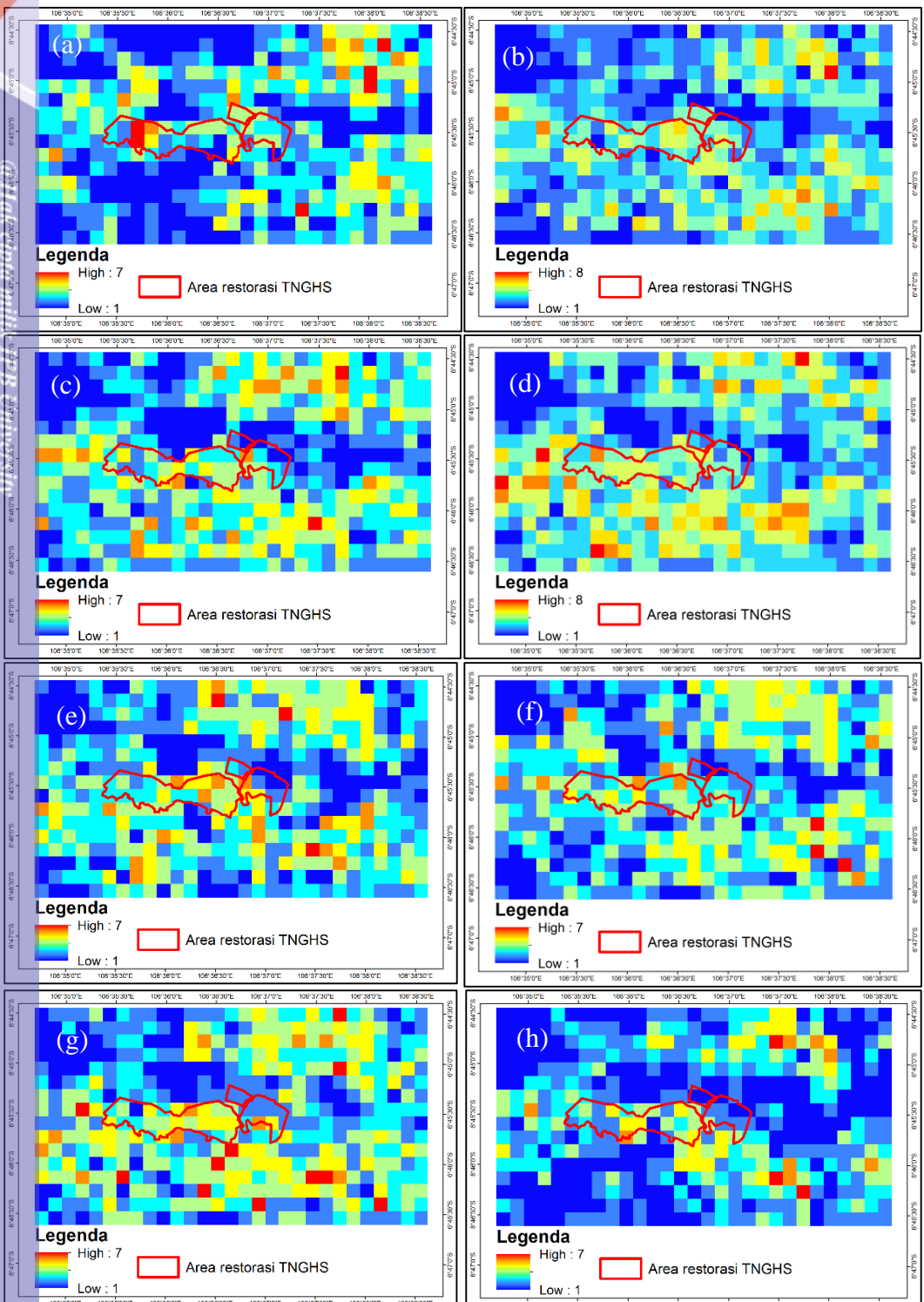
Kemampuan menyerap karbon antara satu tutupan lahan dengan tutupan lahan lainnya tentu berbeda. Kawasan permukiman tidak dapat menyerap karbon yang ada di udara sehingga memiliki jumlah NPP yang paling rendah. Sedangkan, untuk lahan pertanian yang bersifat musiman akan mampu menyerap karbon lebih banyak ketika musim hujan (Cholil *et al.* 2021). Akan tetapi, dalam perhitungan NPP ini menggunakan citra spasial saat musim kemarau sehingga menampilkan kawasan pertanian dengan jumlah NPP yang rendah.

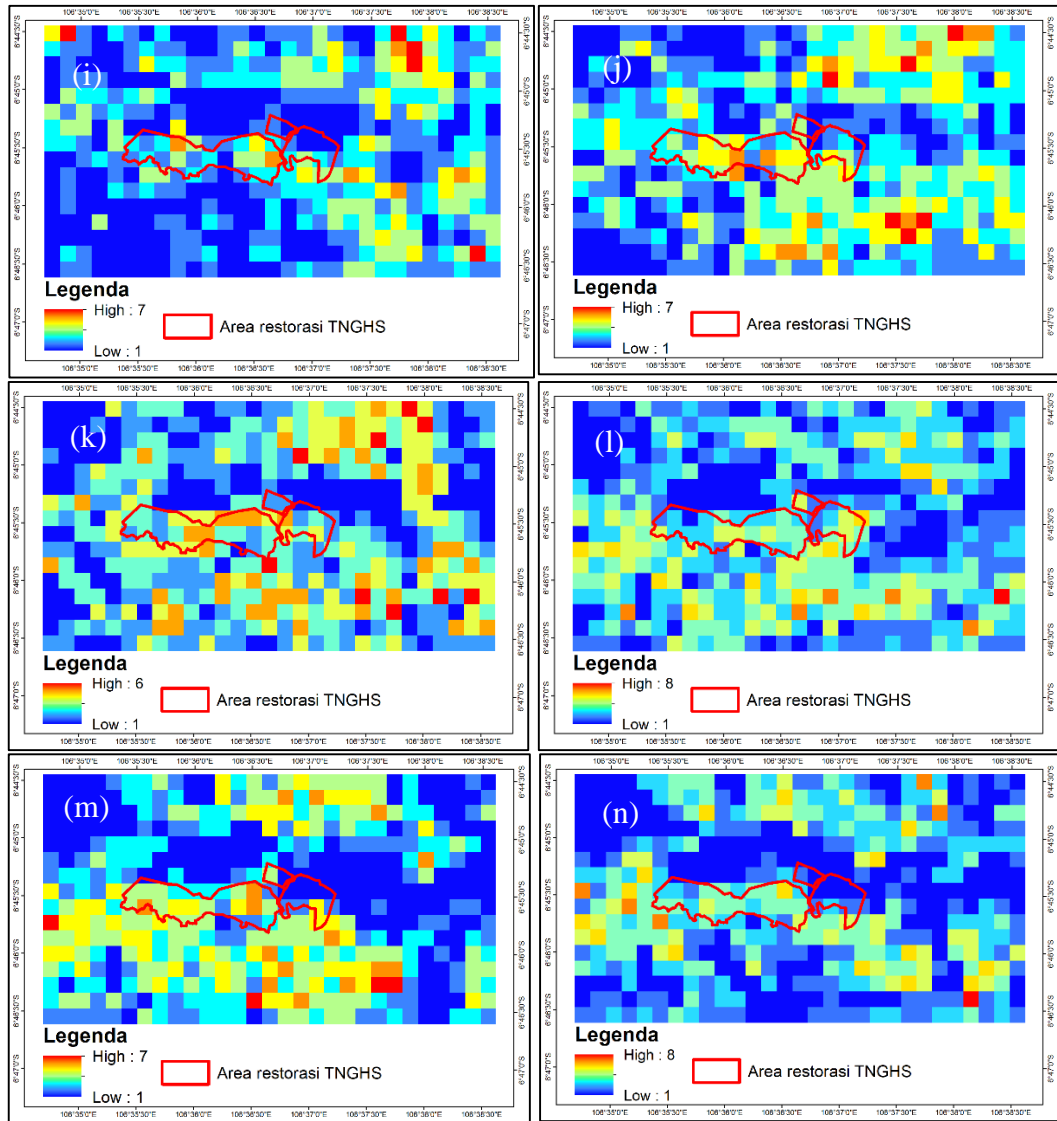
Zhu *et al.* (2017) menyatakan bahwa terjadi perbedaan NPP antara satu tutupan lahan dengan lainnya seiring dengan perbedaan NDVI pula. NPP pada wilayah semak lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Li *et al.* (2023) yang menjelaskan bahwa terdapat peningkatan NPP di wilayah semak. Oleh karena itu, terjadi fluktuasi perhitungan NPP rata-rata di lokasi penelitian karena terdapat perbedaan luasan tutupan lahan yang memengaruhi serta pergeseran musim dimana musim kemarau bisa saja terjadi lebih cepat atau lambat (tidak tetap di bulan yang sama).

#### 4.6 Tren Indeks Fragmentasi *Number of Patch* (NP)

Wilayah koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak (TNGHS) yang sering dianggap mengalami kerusakan akibat fragmentasi tentunya perlu dianalisis menggunakan *landscapemetrics*. Salah satu indeks yang dapat digunakan adalah *Number of Patch* (NP). Indeks NP dapat menggambarkan jumlah *patch* yang ada pada suatu tutupan lahan. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Rutledge (2003) bahwa NP dapat menunjukkan komposisi *patch* pada *landscape* sebagai indikator untuk menunjukkan terjadinya fragmentasi habitat. Hasil perhitungan NP di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 15.

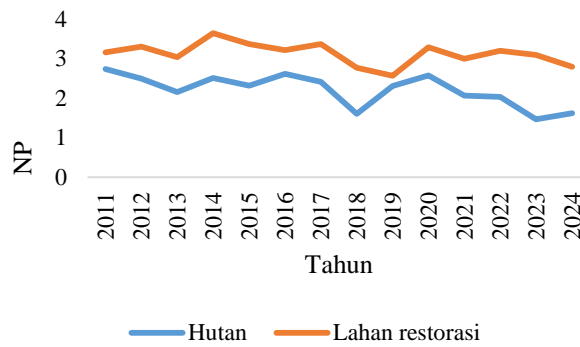
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.





Gambar 15 Perubahan NP periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Berdasarkan hasil di atas, dapat diketahui bahwa jumlah maksimal *patch* yang ada di lokasi penelitian dalam kurun waktu 14 tahun tidak terlalu berbeda. Selain itu, dapat diketahui pula jumlah NP yang berada di kelas tutupan hutan lebih kecil dibandingkan tutupan lahan lainnya. Tren perubahan NP pada kelas tutupan hutan ditunjukkan pada Gambar 16.



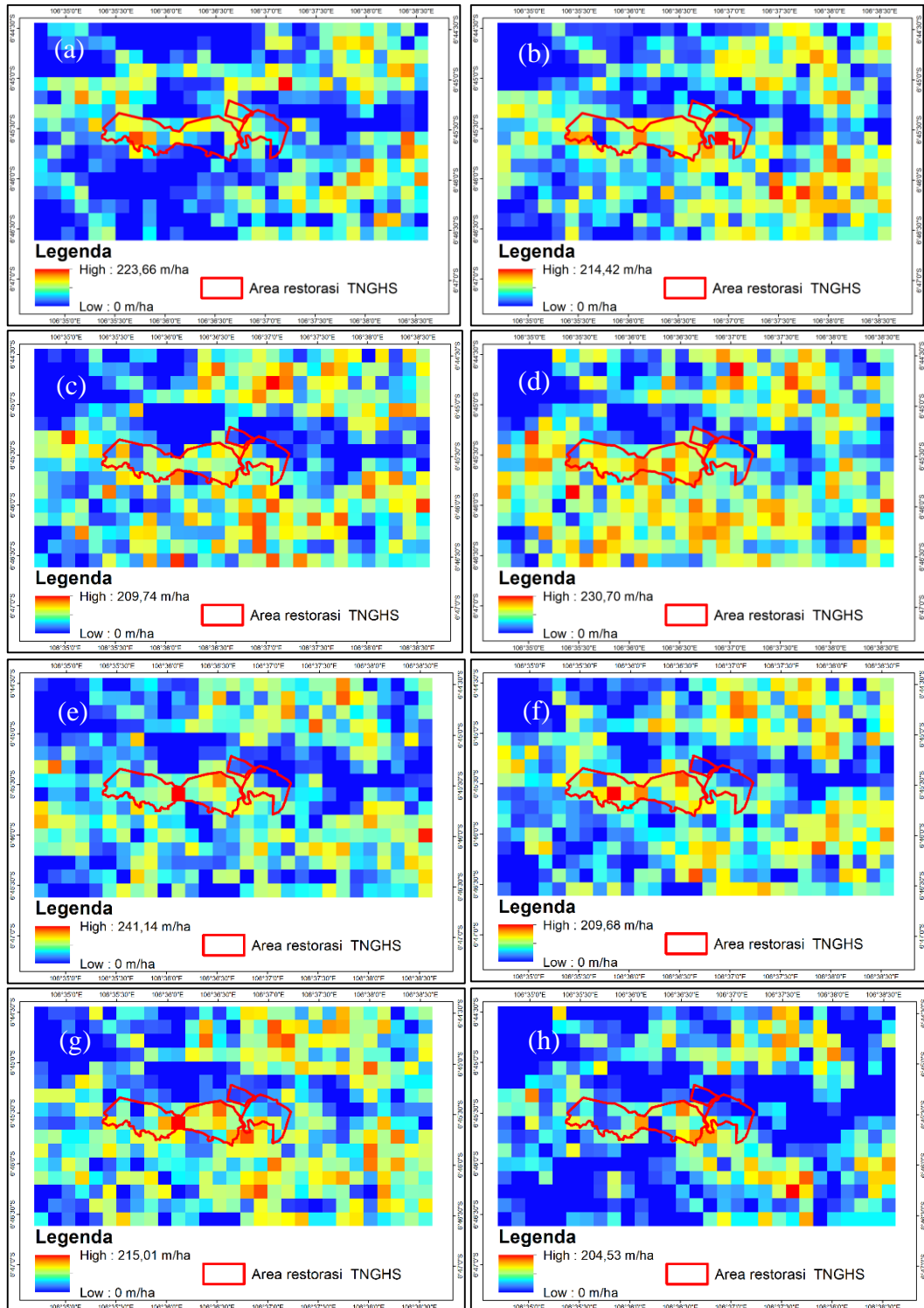
Gambar 16 Tren perubahan indeks NP hutan

Berdasarkan hasil pada Gambar 16 dapat diketahui bahwa jumlah NP mengalami fluktuasi akibat adanya perubahan tutupan lahan. Namun, pada tahun 2024 jumlah NP tergolong rendah dibandingkan NP pada tahun-tahun lainnya. Jumlah NP yang tinggi menunjukkan bahwa nilai fragmentasi juga meningkat dan sebaliknya, apabila jumlah NP rendah maka menunjukkan bahwa nilai fragmentasi yang berkurang (Musyary dan Buchori 2024). Hal tersebut dapat berdampak pada kerusakan habitat satwa. Penyebab adanya fragmentasi tersebut adalah alih guna hutan menjadi tutupan lahan lainnya. Flowers *et al.* (2020) menyatakan bahwa degradasi hutan akibat penebangan liar, penggunaan lahan pertanian, serta urbanisasi menyebabkan fragmentasi meningkat.

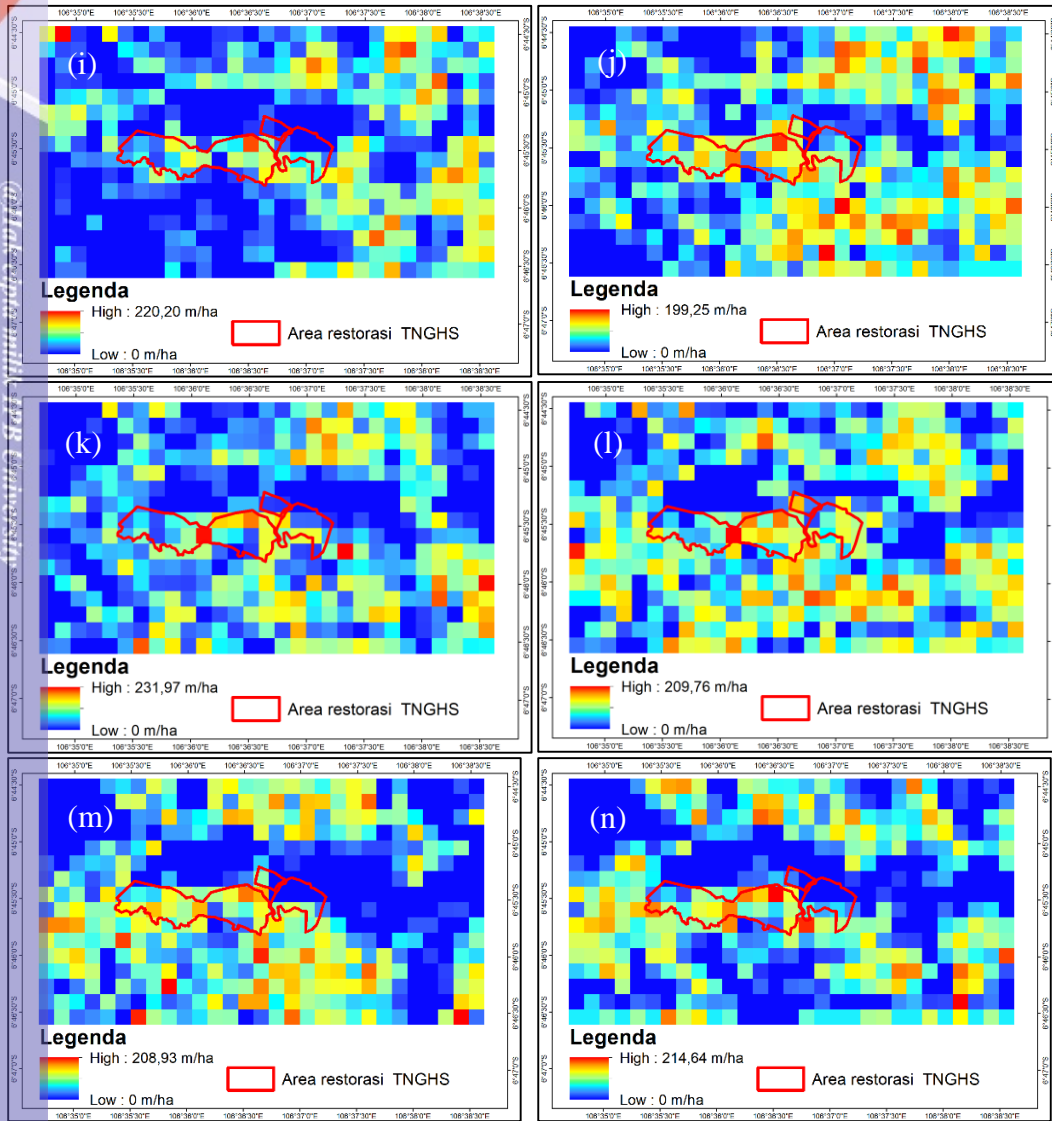
Kegiatan konversi tutupan lahan menyebabkan adanya fragmentasi di koridor TNGHS. Kegiatan tersebut dapat terjadi karena TNGHS rentan terhadap gangguan masyarakat sejak era kolonial (Galudra *et al.* 2005). Kegiatan fragmentasi di koridor TNGHS terjadi pada tahun 1990 akibat deforestasi dan mengakibatkan hutan tua yang tersisa berada di dataran tinggi dan terjal (Prasetyo *et al.* 2006). Fasilitas seperti jalan yang ada di wilayah koridor TNGHS juga memudahkan masyarakat untuk mengakses hutan dan melakukan deforestasi karena masyarakat seringkali memanfaatkan hasil hutan untuk kebutuhan ekonomi (Polosakan 2011). Akan tetapi, penurunan jumlah NP menandakan bahwa adanya usaha pemulihan dari fragmentasi yang terjadi. Hal tersebut merupakan bukti adanya dampak dari kegiatan restorasi yang mampu menghubungkan *patch* satu dengan lainnya sehingga kembali terhubung.

#### 4.7 Tren Indeks Fragmentasi *Edge Density* (ED)

Fragmentasi habitat merupakan akibat dari adanya pemisahan area habitat menjadi potongan yang lebih kecil dan terisolasi serta menyebabkan panjang tepi yang lebih besar (Sertel *et al.* 2018). Fragmentasi habitat yang terjadi di wilayah koridor TNGHS dapat dianalisis menggunakan indeks *landscapemetrics* yaitu *Edge Density* (ED). Indeks ED atau kepadatan tepi dapat didefinisikan sebagai jumlah panjang dari semua segmen tepi di suatu lanskap dibagi total luas area lanskap (Sertel *et al.* 2018). Daerah tepi sering dikaitkan dengan tekstur serta ukuran *patch* (Hargis *et al.* 1998). Hal tersebut dikarenakan daerah tepi bergantung pada bentuk dan ukuran *patch* (Griffith *et al.* 2000). *Edge Density* dapat dijadikan sebagai salah satu alat untuk mengukur jaringan habitat (McGarigal dan Marks 1995). *Edge Density* memiliki satuan m/ha pada umumnya (Flowers *et al.* 2020). Hasil perhitungan ED di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 17.

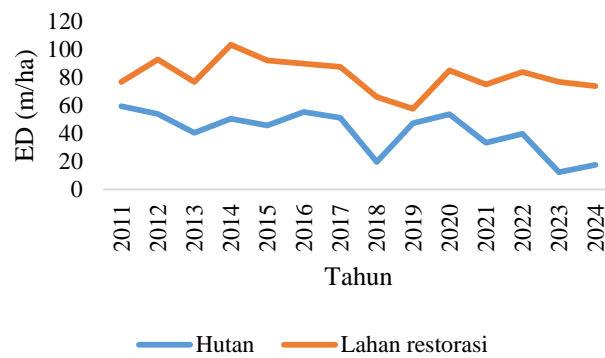


- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 17 Perubahan ED periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya  
(a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Hasil di atas menunjukkan bahwa dapat diketahui bahwa kerapatan tepi maksimal yang ada di lokasi penelitian dalam kurun waktu 14 tahun memiliki perbedaan. Selain itu, dapat diketahui pula nilai ED yang berada di kelas tutupan hutan lebih kecil dibandingkan tutupan lahan lainnya, bahkan hingga 0 m/ha. *Edge Density* yang bernilai 0 menandakan bahwa tidak ada daerah tepi dan sebaliknya nilai ED akan lebih dari 0 apabila terdapat perubahan daerah tepi (Flowers *et al.* 2020). Tren perubahan nilai ED pada kelas tutupan hutan ditunjukkan pada Gambar 18.

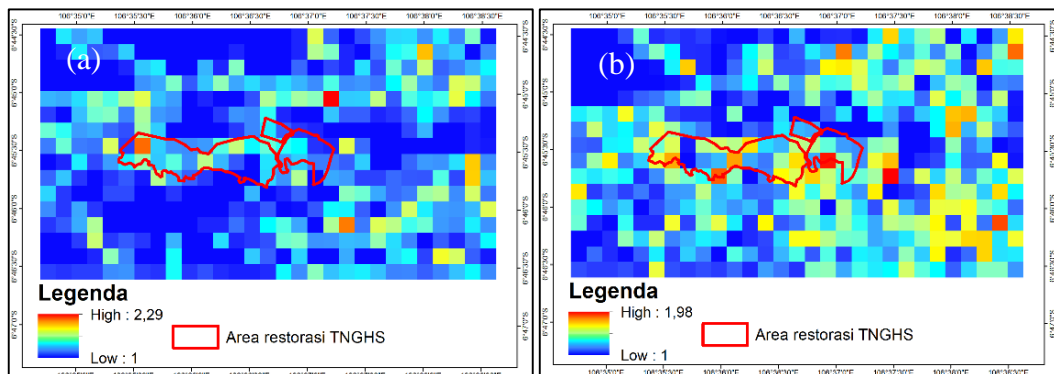


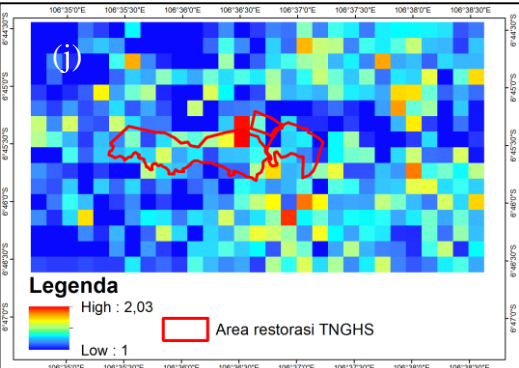
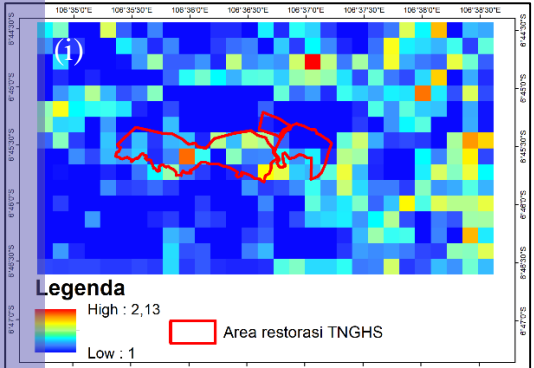
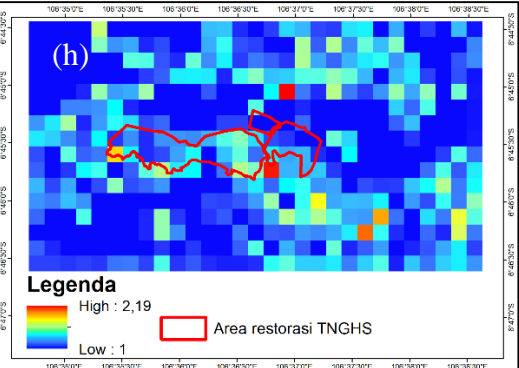
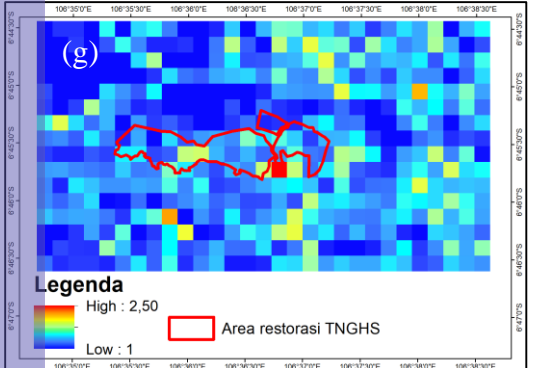
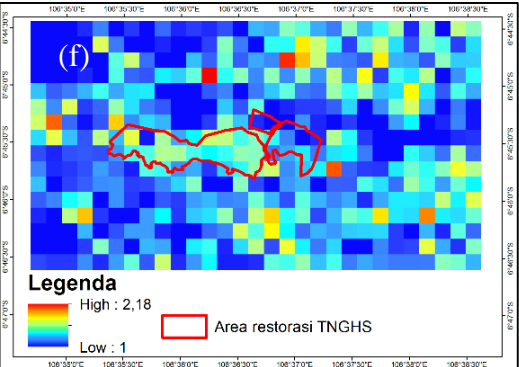
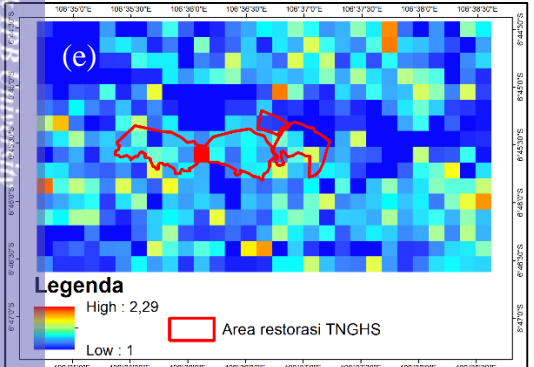
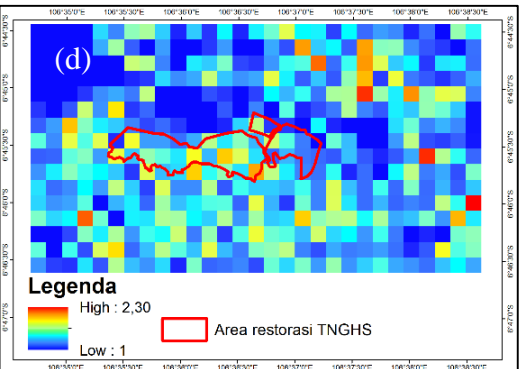
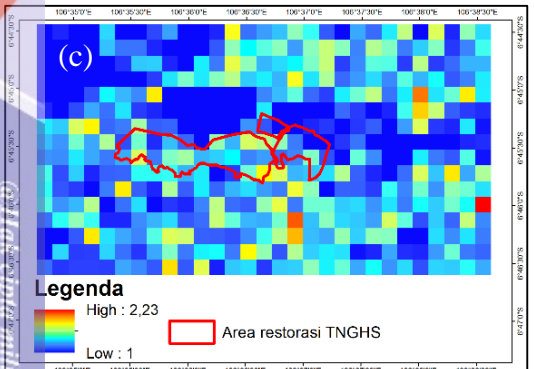
Gambar 18 Tren perubahan indeks ED hutan

Berdasarkan hasil pada Gambar 18, dapat diketahui bahwa nilai ED mengalami fluktuasi akibat adanya perubahan tutupan lahan. Nilai ED pada tahun 2024 tergolong dalam nilai ED yang rendah apabila dibandingkan dengan tahun-tahun lainnya. Nilai ED yang rendah atau mengalami penurunan menandakan bahwa pada suatu lanskap terjadi konektivitas pada lanskap (Azhar dan Anggoro 2023). Sertel *et al.* (2018) juga menyatakan bahwa *patch* yang semakin kompleks akan menyebabkan peningkatan nilai *edge density* dan akhirnya mengekspos habitat inti sehingga menyebabkan fragmentasi dan berakibat pada berkurangnya habitat inti. Perbedaan yang kontras pada kerapatan tepi menjadi salah satu faktor penting pada distribusi dan pergerakan satwa pada habitat tepi (Forman 1995).

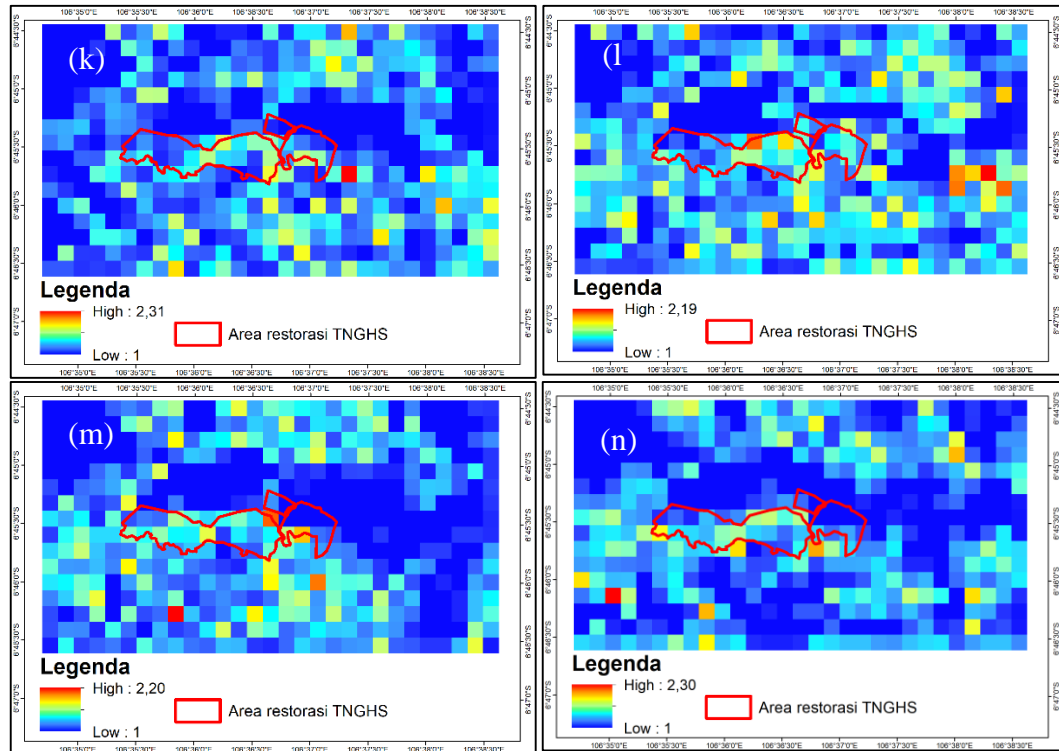
#### 4.8 Tren Indeks Fragmentasi *Mean Shape Index* (MSI)

. Terjadinya fragmentasi habitat mengakibatkan suatu habitat menjadi terpisah dan terpotong menjadi habitat yang lebih kecil lagi hingga terisolasi dan menyebabkan panjang tepi pada suatu lanskap lebih besar (Sertel *et al.* 2018). Fragmentasi habitat dapat diukur melalui indeks *landscapemetrics*. Salah satu indeks yang dapat digunakan adalah *Mean Shape Index* (MSI). *Mean Shape Index* (MSI) dapat menunjukkan tingkat kompleksitas pada sebuah *patch*. Tingkat kompleksitas tersebut bersifat relatif terhadap bentuk lingkaran atau bujur sangkar (McGarigal dan Marks 1995). MSI didapatkan dari jumlah perimeter *patch* dibagi dengan akar kuadrat dari luas *patch* untuk setiap *patch* yang bersangkutan (Flowers *et al.* 2020). Hasil perhitungan MSI di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 19.



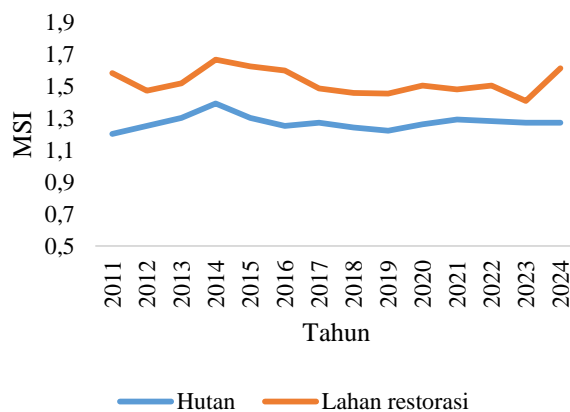


- Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
    - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
    - b. Pengutipan tidak meruikan kepentingan yang wajar IPB University.
  2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 19 Perubahan MSI periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya  
(a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Berdasarkan hasil di atas dapat diketahui bahwa nilai maksimal MSI yang berada di lokasi penelitian dalam kurun waktu 14 tahun memiliki perbedaan namun tidak terlalu berbeda jauh rentangnya. Nilai MSI yang mendekati 1 bahkan hingga 1 menandakan bahwa suatu *patch* berbentuk teratur dan semakin kompak. Sebaliknya, apabila nilai MSI melebihi 1 menandakan bahwa suatu *patch* berbentuk tidak beraturan (McGarigal dan Marks 1995). Beberapa wilayah di tutupan hutan memiliki nilai MSI yang cukup tinggi. Hal tersebut berarti bahwa tutupan hutan memiliki nilai MSI yang cukup tinggi walaupun memiliki tingkat fragmentasi yang cukup rendah. Tren perubahan MSI pada kelas tutupan hutan ditunjukkan pada Gambar 20.

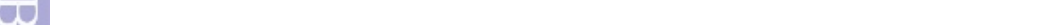
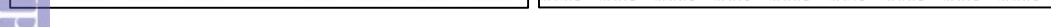
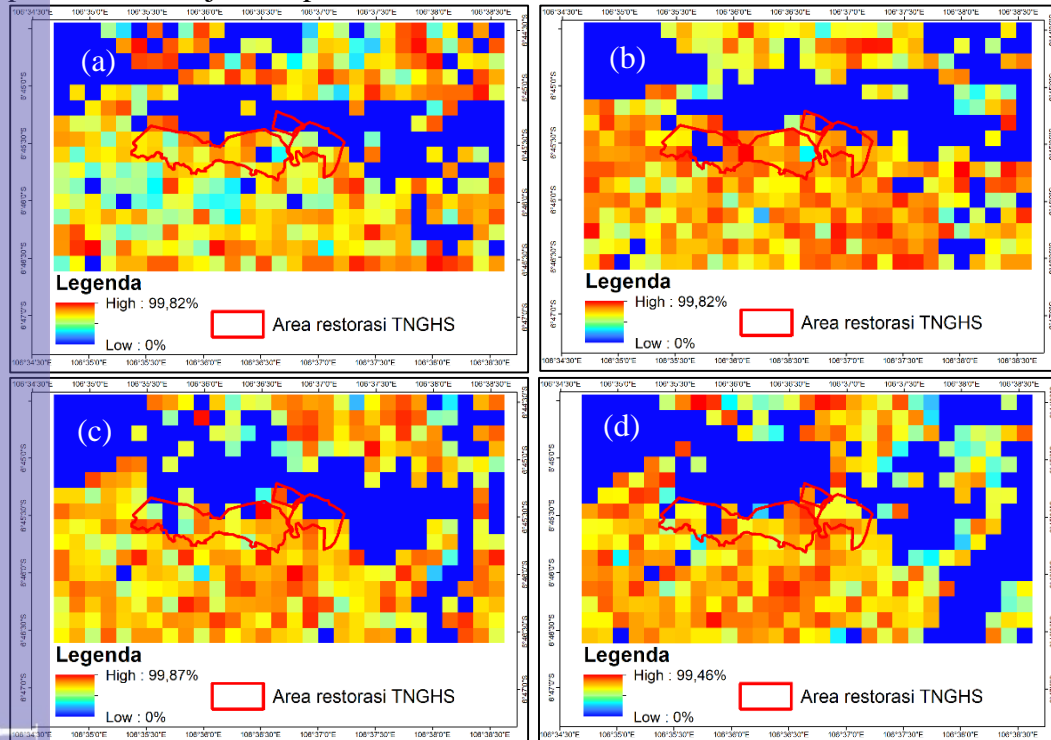


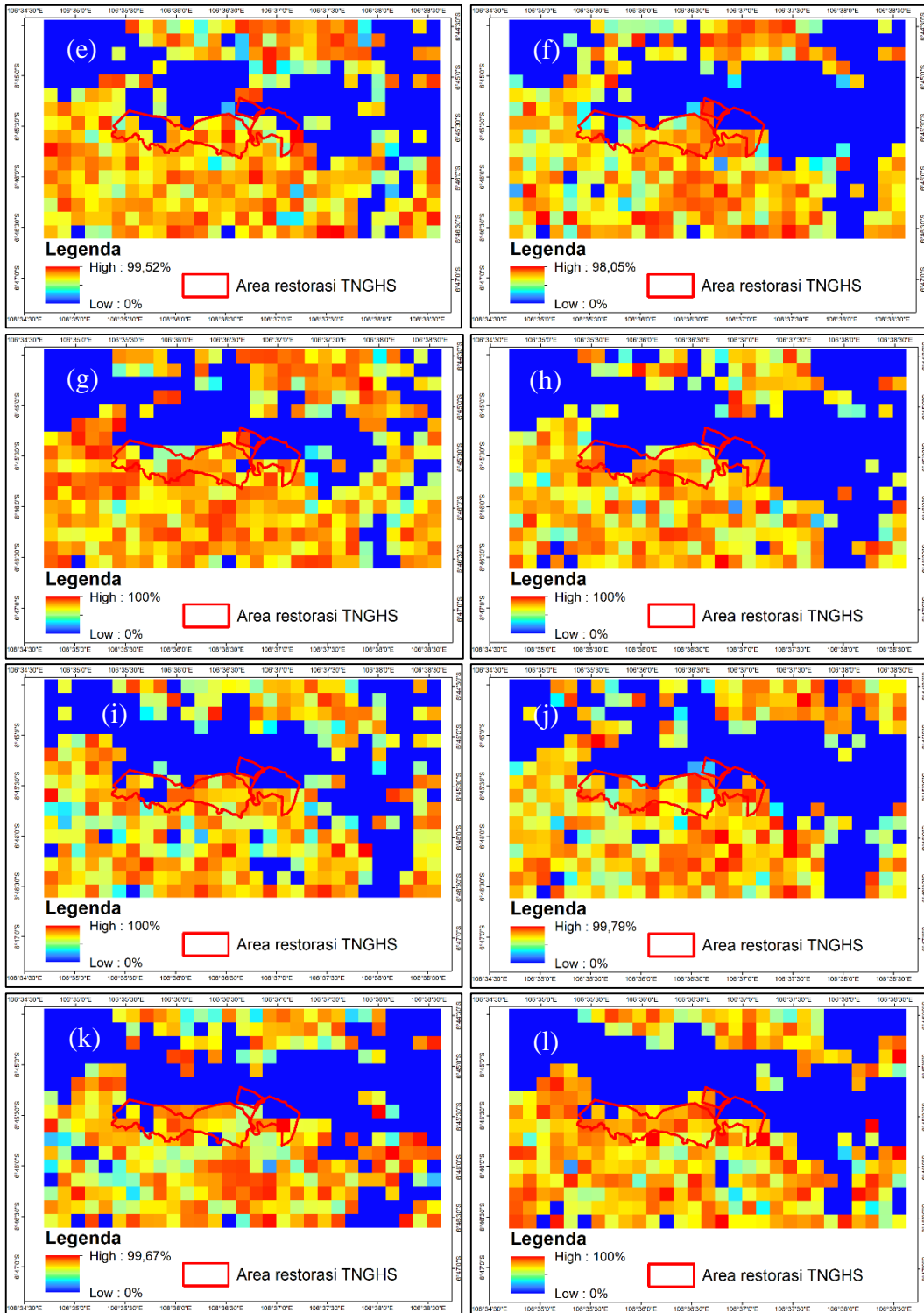
Gambar 20 Tren perubahan indeks MSI hutan

Hasil pada Gambar 20 menunjukkan bahwa nilai MSI mengalami fluktuasi akibat adanya perubahan tutupan lahan. Nilai MSI pada tahun 2024 tergolong dalam nilai MSI yang rendah apabila dibandingkan dengan nilai MSI pada tahun-tahun lainnya. Nilai MSI yang meningkat menyebabkan suatu lanskap bertransformasi dari lanskap utuh menjadi lanskap kombinasi hingga akhirnya terfragmentasi dan relik. Nilai MSI yang tinggi juga mengakibatkan semakin banyak pula daerah tepi. Perluasan daerah tepi dapat berakibat negatif bagi satwa yang tidak dapat hidup di daerah tepi, akan tetapi berdampak positif bagi satwa yang menyukai hidup di daerah tepi (Kaban *et al.* 2018).

#### 4.9 Tren Indeks Fragmentasi *Interspersion and Juxtaposition Index* (IJI)

Fragmentasi habitat dapat membawa dampak negatif pada suatu lanskap dan mengakibatkan habitat satwa maupun tumbuhan pada lanskap tersebut menjadi terpisah. Hal tersebut menyebabkan luasan habitat menjadi kecil dan berakibat fatal pada populasi satwa maupun tumbuhan yang ada (Sertel *et al.* 2018). Fragmentasi habitat dapat diukur melalui indeks *landscapemetrics* seperti *Interspersion and Juxtaposition Index* (IJI). *Interspersion and Juxtaposition Index* (IJI) dapat diartikan sebagai indeks yang dapat mengindikasikan adanya pengaturan, hubungan, dan kedekatan berbagai habitat. IJI yang tinggi terdiri dari penyebaran dan dispersi serta adanya percampuran jenis tutupan lahan (Masters *et al.* 2017). Perhitungan IJI berdasarkan pada jumlah tepi yang berkaitan dengan jenis *patch* yang berdekatan. Perhitungan IJI sangat bergantung pada kedekatan seluruh *patch* dengan daerah tepi yang terkait (Turner 1989). Hasil perhitungan IJI di lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 21.



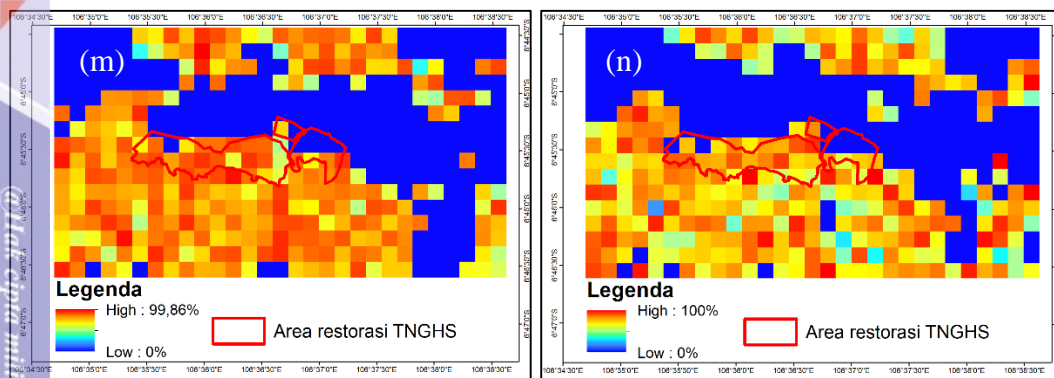


@Hak cipta milik IPB University

IPB University

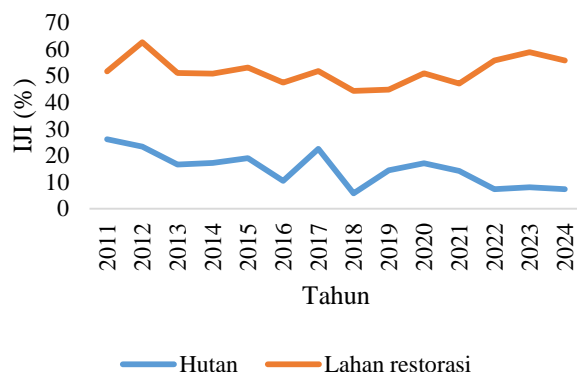
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 21 Perubahan IJI periode 2011-2024 di koridor TNGHS dan sekitarnya (a) 2011, (b) 2012, (c) 2013, (d) 2014, (e) 2015, (f) 2016, (g) 2017, (h) 2018, (i) 2019, (j) 2020, (k) 2021, (l) 2022, (m) 2023, (n) 2024

Berdasarkan hasil di atas dapat diketahui bahwa nilai IJI terendah berada di tutupan hutan, sedangkan nilai maksimal IJI berada di tutupan lahan lainnya seperti permukiman, pertanian, dan semak belukar. Nilai IJI akan mendekati 100 bahkan hingga 100 apabila semua jenis *patch* saling berdekatan satu sama lainnya secara merata. Sebaliknya, apabila nilai IJI mendekati 0 hingga 0 berarti menandakan bahwa distribusi kedekatan antar *patch* semakin tidak merata (Griffith *et al.* 2000). Selain itu, nilai IJI yang rendah juga menunjukkan adanya *intermixing* antar *patch* pada sebuah lanskap juga rendah pula. Kerapatan *patch* pada suatu tutupan lahan yang tinggi juga akan meningkatkan nilai IJI dan sebaliknya. Tren perubahan IJI pada kelas tutupan hutan ditunjukkan pada Gambar 22.



Gambar 22 Tren perubahan indeks IJI hutan

Hasil pada Gambar 22 menunjukkan bahwa nilai IJI mengalami fluktuasi akibat adanya perubahan tutupan lahan. Nilai IJI yang rendah pada tutupan hutan menandakan bahwa hutan tidak menyebar secara merata pada lanskap yang diamati. Coelho *et al.* (2022) menyatakan bahwa kelas non-hutan lebih menyebar merata dibandingkan kelas hutan karena kelas non hutan lebih mudah menyebar pada suatu lanskap. Hal tersebut juga terjadi pada area koridor TNGHS dan sekitarnya, tutupan lahan pertanian, semak belukar, serta permukiman lebih mudah menyebar di wilayah tersebut dibandingkan tutupan hutan. Oleh karena itu, tutupan hutan memiliki nilai IJI yang tidak terlalu tinggi dibandingkan tutupan lainnya.

#### 4.10 Analisis Pemulihan Ekosistem

Kerusakan ekosistem yang terjadi pada wilayah koridor TNGHS dan sekitarnya tentu membuat TNGHS beserta masyarakat perlu melakukan upaya pemulihan ekosistem. Pemulihan ekosistem diharapkan membawa dampak positif bagi ekosistem yang terdegradasi sebelumnya. Pemulihan ekosistem diharapkan mampu mengembalikan fungsi ekosistem seperti memperbaiki iklim sekitarnya, menjaga kelestarian biodiversitas, produktivitas karbon, serta dampak positif lainnya (Ariadica dan Sutrisno 2021). Kegiatan revegetasi menjadi salah satu upaya yang sesuai untuk memulihkan ekosistem di wilayah koridor TNGHS dan sekitarnya (Mariyani dan Suciati 2021).

Secara umum, hasil perhitungan beberapa indikator yang telah disebutkan menjelaskan bahwa upaya pemulihan ekosistem melalui kegiatan restorasi memberikan dampak positif bagi ekosistem. Seperti halnya, pada indikator LST, suhu permukaan antara hutan dan lahan restorasi tidak jauh berbeda. Hal tersebut menandakan bahwa kegiatan revegetasi mampu menekan laju kenaikan suhu permukaan (Rushayati *et al.* 2009; Aluyah dan Rusdianto 2019). Begitu juga, dengan indikator FCD, hasil perhitungan indikator tersebut juga menunjukkan bahwa antara hutan dengan lahan restorasi memiliki nilai yang tidak terlalu berbeda. Hasil FCD lahan restorasi yang mendekati nilai FCD hutan juga menunjukkan bahwa kegiatan revegetasi mampu mengembalikan tutupan tajuk seperti di hutan (Asner *et al.* 2015). Hasil perhitungan indikator NPP juga menunjukkan bahwa produktivitas primer bersih antara lahan restorasi dan hutan tergolong rendah serta tidak berbeda jauh. Hal tersebut sesuai dengan pernyataan Campbell *et al.* (2002) bahwa nilai NPP hutan tergolong rendah walau biomasnya tinggi.

Sedangkan, untuk indeks-indeks fragmentasi menunjukkan bahwa kegiatan revegetasi dapat mengurangi *patch-patch* yang awalnya terputus dan akhirnya terhubung lagi. Hal tersebut ditunjukkan dengan adanya penurunan nilai NP yang mengindikasikan *patch* tutupan hutan yang mulai terhubung (Musyary dan Buchori 2024). Nilai ED yang rendah juga mengindikasikan kerapatan daerah tepi yang rendah sehingga luasan daerah inti bertambah (Flowers *et al.* 2020; Azhar dan Anggoro 2023). Selanjutnya, nilai MSI yang lebih dari satu menandakan bahwa bentuk *patch* tutupan hutan tidak teratur (McGarigal dan Marks 1995). Akan tetapi, nilainya tidak jauh dari angka satu yang menandakan bahwa terdapat kemungkinan *patch* tutupan hutan teratur kembali. Lalu, untuk nilai IJI yang rendah menandakan bahwa tutupan hutan tidak menyebar merata pada lanskap tersebut (Griffith *et al.* 2000). Nilai indeks yang tidak merata tersebut mengindikasikan bahwa *patch* hutan tidak tersebar serta berbatasan dengan sedikit tutupan lain.

Hasil indeks lingkungan dan indeks fragmentasi menunjukkan bahwa tutupan hutan sudah mengalami perbaikan melalui kegiatan restorasi dan mengindikasikan adanya keberhasilan restorasi walaupun masih terdapat beberapa aspek yang perlu ditingkatkan. Oleh karena itu, kegiatan restorasi perlu untuk dipantau pelaksanaannya. Selain *monitoring*, pemilihan jenis tanaman yang sesuai juga perlu dilakukan. Jenis vegetasi yang sesuai seperti vegetasi-vegetasi pakan satwa atau vegetasi dengan tutupan tajuk yang tinggi dan rapat perlu dipertimbangkan sebagai salah satu upaya pemulihan ekosistem. Jenis vegetasi tersebut seperti kidage (*Bruinsmia styracoides*), ficus pohon (*Artocarpus nitidus*), liana ficus kisigung (*Ficus villosa*), rasamala (*Altingia excelsa*), manii (*Maesopsis manii*), saninten

(*Castanopsis argentea*), serta pasang (*Quercus oidocarpa*) (Dewi *et al.* 2016). Pemilihan spesies juga perlu dilakukan untuk meminimalkan adanya penyebaran spesies invasif di wilayah TNGHS (Fukuda 2010).

Kegiatan yang perlu dilakukan selanjutnya adalah kegiatan penyuluhan serta pendidikan lingkungan kepada masyarakat yang tinggal di lahan koridor dan sekitarnya oleh para petugas TNGHS secara berulang dalam kurun waktu tertentu mengenai pentingnya menjaga lahan restorasi di wilayah koridor serta wilayah sekitarnya. Selain itu, kerjasama antara masyarakat dengan pihak TNGHS harus dilakukan dalam rangka konservasi wilayah koridor dan sekitarnya dengan memerhatikan tujuan yang sama serta manfaat yang menguntungkan masyarakat, TNGHS, serta lingkungan. Masyarakat diajak untuk memberikan pengetahuan lokal sebagai salah satu inisiatif dalam kegiatan konservasi mendatang (Perbatakusuma *et al.* 2010). Pemanfaatan yang dilakukan oleh masyarakat dapat diarahkan oleh pihak TNGHS untuk dilakukan di zona pemanfaatan sehingga tetap memberikan keuntungan ekonomi bagi masyarakat (Galudra 2003).

#### Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
  - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
  - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



## V SIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Simpulan

Evaluasi pemulihan ekosistem berdasarkan pendekatan spasial menunjukkan bahwa kegiatan revegetasi di koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak belum sepenuhnya memulihkan fungsi ekosistem sebagaimana pada kawasan hutan alami. Nilai suhu permukaan (LST) di lahan restorasi mengalami peningkatan sebesar 1,09 °C menjadi 22,25 °C, namun masih mendekati suhu di hutan sebesar 21,17 °C, menunjukkan bahwa restorasi berkontribusi dalam menekan laju pemanasan. Forest Canopy Density (FCD) meningkat dari 51,33% menjadi 62,83%, mendekati nilai hutan sebesar 66,66%, sehingga berpotensi memperbaiki iklim mikro. Namun, Net Primary Productivity (NPP) menurun dari 29,93 tonC/ha/tahun menjadi 25,10 tonC/ha/tahun, masih lebih rendah dari kawasan hutan yang mencapai 27,57 tonC/ha/tahun, yang menunjukkan bahwa fungsi produktivitas karbon belum sepenuhnya pulih.

Pemulihan biodiversitas yang dikaji melalui analisis fragmentasi habitat menunjukkan bahwa struktur lanskap di lahan revegetasi masih lebih terfragmentasi dibandingkan hutan. Meskipun Number of Patch (NP) menurun dari 3,16 menjadi 2,80, nilainya masih lebih tinggi dibandingkan hutan (1,62). Edge Density (ED) dan Mean Shape Index (MSI) juga lebih tinggi dibandingkan kawasan hutan, yaitu masing-masing sebesar 73,65 m/ha dan 1,61, sedangkan di hutan hanya 17,48 m/ha dan 1,27. Selain itu, nilai Interspersion and Juxtaposition Index (IJI) meningkat dari 51,66% menjadi 55,81%, jauh lebih tinggi dibandingkan hutan yang hanya 7,4%, mengindikasikan bahwa distribusi patch belum merata. Secara keseluruhan, meskipun menunjukkan tren perbaikan, kegiatan revegetasi belum sepenuhnya berhasil mengembalikan fungsi ekosistem secara menyeluruh, sehingga diperlukan penguatan strategi restorasi dan pemantauan spasial jangka panjang.

### 5.2 Saran

Upaya pemulihan ekosistem melalui kegiatan restorasi dapat ditingkatkan melalui pemilihan jenis tanaman yang sesuai dan dapat meningkatkan kualitas indeks lingkungan serta indeks fragmentasi. Kriteria vegetasi yang dapat dipilih berupa tegakan bertajuk lebar atau tegakan yang digunakan sebagai habitat satwa di sekitar koridor TNGHS seperti owa jawa. Selain itu, *monitoring* kegiatan restorasi juga perlu dilakukan dengan menggabungkan data aktual sebagai data pembanding serta mempertimbangkan indikator-indikator pendukung lainnya. Kolaborasi dengan *stakeholders* terkait serta penyusunan rencana lebih lanjut juga diperlukan sehingga kegiatan pemulihan ekosistem dapat berhasil sesuai yang direncanakan.



## DAFTAR PUSTAKA

- Adil A, Triwijoyo BK. 2021. Sistem informasi geografis pemetaan jaringan irigasi dan embung di Lombok Tengah. *Matrik: Jurnal Manajemen, Teknik Informatika, dan Rekayasa Komputer*. 20(2):273-282.
- Aerts R, Honnay O. 2011. Forest restoration, biodiversity and ecosystem functioning. *BMC Ecology*. 11(29):11-10.
- Aguilera F, Valenzuela LM, Botequilha-Leitão A. 2011. Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: a case study in a Spanish metropolitan area. *Landscape and Urban Planning*. 99(3-4):226-238.
- Akbar C, Arsepta Y, Dewiyanti I, Bahri S. 2019. Dugaan serapan karbon pada vegetasi mangrove, di kawasan mangrove Desa Beureuneut, Kecamatan Seulimum, Kabupaten Aceh Besar. *Jurnal La'Ot Ilmu Kelautan*. 1(2):63-70.
- Almulqu AA. 2024. Analisis potensi simpanan karbon bambu betung (*Dendrocalamus asper*). *Biogenerasi*. 9(1):732-739.
- Aluyah C, Rusdianto. 2019. Pengaruh jenis dan jumlah pohon terhadap iklim mikro di Taman Purbakala Bukit Siguntang Kota Palembang Provinsi Sumatera Selatan. *Sylva*. 8(2):53-59.
- Andi AFAC, Adiwibowo S, Mansur I. 2024. Persepsi masyarakat dan perubahan social-vegetasi pasca program restorasi ekosistem di Taman Nasional Matalawa. *Journal of Tropical Silviculture*. 15(2):138-145.
- Anisah AP, Ju AB, Tang A, Zikra E, Weley NC, Fitri W. 2021. Dampak alih fungsi lahan terhadap keberlanjutan suplai air bersih dalam menjaga ekosistem darat. *Jurnal Syntax Admiration*. 2(12):2246-2259.
- Ariadica AA, Sutrisno E. 2021. Reposisi kebijakan pemulihan lingkungan hidup terhadap penambangan illegal galian C. *Hukum Responsif*. 12(1):21-29.
- Arrafi M, Widayani P, Arjasakusuma S. 2024. Perhitungan *Net Primary Productivity* (NPP) harian menggunakan model CASA berbasis citra penginderaan jauh di Kabupaten Muaro Jambi. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing (JGRS)*.
- Asner GP, Martin RE, Anderson CB, Knapp DE. 2015. Quantifying forest canopy traits: imaging spectroscopy versus field survey. *Remote Sensing of Environment*. 158:15-27.
- Avdan U, Jovanovska G. 2016. Algorithm for automated mapping of land surface temperature using landsat 8 satellite data. *Journal of Sensors*. 2016:1-8.
- Azhar A, Anggoro A. 2023. Perubahan tutupan dan pemanfaatan lahan di Pulau Kaledupa, Taman Nasional Wakatobi, Sulawesi Tenggara. *Jurnal Oase Nusantara*. 2(1):25-39.
- Baihaqi HF, Prasetyo Y, Bashit N. 2020. Analisis perkembangan kawasan industri Kendal terhadap perubahan suhu permukaan (studi kasus: kawasan industri Kendal, Kabupaten Kendal). *Jurnal Geodesi Undip*. 9(1):176-186.

- Basuki I, Kauffman JB, Peterson J, Anshari G, Murdiyarso D. 2019. Land cover changes reduce net primary production in tropical coastal peatlands of West Kalimantan, Indonesia. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*. 24:557–573.
- Boutet TS. 1987. *Controlling Air Movement. A Manual for Architects and Builders*. New York: McGraw-Hill.
- Brown S. 1997. *Estimating Biomass Change of Tropical Forest: A Primer*. Rome: FAO Forestry Paper.
- [BSN] Badan Standarisasi Nasional. 2010. SNI 7645 tentang Klasifikasi tutupan lahan. Jakarta: BSN.
- Cahyono A, Eka P, Dewi W, Haryono S, Saridi, Dody H. 2014. Peran revegetasi terhadap restorasi tanah pada lahan rehabilitasi tambang batubara di daerah tropika. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*. 21(1):60-66.
- Campbell NA, Reece JB, Mitchell LG. 2002. *Biologi (terjemahan) Edisi Kelima Jilid 3*. Jakarta: Erlangga.
- Chakraborty M. 2009. An approach towards urban form analysis and landuse classification: a case of Ahmedabad, India [thesis]. Netherlands: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation Enschede.
- Chen T, Peng L, Liu S, Wang Q. 2017. Spatio-temporal pattern of net primary productivity in Hengduan Mountains area, China: Impacts of climate change and human activities. *Chinese Geographical Science*. 27(6):104-118.
- Cholil M, Danardono, Sunariya MIT, Fikriyah VN, Latief MA, Wulandari KC. 2021. Serapan karbon ekosistem pada wilayah perkotaan Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia. *URECOL*. 357-364.
- Coelho AM, Sousa AMO, Goncalves AC. 2022. Spatial variability of forest species: case study for Alto Alentejo, Portugal. *Land*. 12(46):1-15.
- Danardono, Sunariya MIT, Fikriyah VN, Cholil M. 2021. Spatiotemporal variation of terrestrial carbon sequestration in tropical urban area (case study in Surakarta district, Indonesia). *Quaestiones Geographicae*. 40(3):5-20.
- de Almeida DRA, Stark SC, Valbuena R, Broadbent EN, Silva TSF, de Resende AF, Ferreira MP, Cardil A, Silva CA, Amazonas N, Zambrano AMA, Brancalion PHS. 2020. A new era in forest restoration monitoring. *Restoration Ecology*. 28(1):8-11.
- Dewi MC, Mardiasuti A, Iskandar E. 2016. Wilayah jelajah dan teritori owa jawa (*Hylobates moloch*) di Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Media Konservasi*. 21(1):73-82.
- Dubey A, Mainani R, Solanki H. 2022. Biodiversity loss and its impacts on human well-being. *International Journal of Plant and Environment*. 8(3):47-51.
- Ebrahimabadi S, Nilsson KL, Johansson C. 2015. The problems of addressing microclimate factors in urban planning of the subarctic regions. *Environment and Planning B: Planning and Design*. 42(3):415-430.

Ekrep LA, Soetarto E. 2021. Dampak penetapan taman nasional terhadap struktur agrarian dan hak kelola lahan. *Jurnal Sains Komunikasi dan Pengembangan Masyarakat*. 5(4):509-521.

Fajarendra YI, Fauzan YR, 'Uyun S. 2024. Klasifikasi citra eurosat menggunakan algoritma KNN, *decision tree*, dan *random forest*. *JATI (Jurnal Mahasiswa Teknik Informatika)*. 8(4):7754-7761.

Fauziah N. 2022. Evaluasi habitat elang jawa (*Nisaetus bartelsi*) di koridor Halimun Salak pasca restorasi [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Fawzi NI, Helms J, Emerson A, Wibawanto M.A. 2020. Forest restoration progress and lessons learned in Gunung Palung National Park, Indoneia. *Journal of Tropical Forest Science*. 32(2):195-205.

Febriani N, Yunidar S, Hidayat RA, Amor G, Indrayani P. 2022. Klasifikasi citra satelit dengan metode *random forest* untuk observasi dinamika lanskap ekosistem Kabupaten Sijunjung. *El-Jughrafiyah: Jurnal Geografi dan Terapannya*. 2(2):75-81.

Fivash GS, Belzen JV, Temmink RJM, Didden K, Lengkeek W, Heide TVD, Bouma TJ. 2022. Increasing spatial dispersion in ecosystem restoration mitigates risk in disturbance-driven environments. *Journal of Applied Ecology*. 5(4):1050-1059.

Flowers B, Huang K, Aldana GO. 2020. Analysis of the habitat fragmentation of ecosystems in Belize using landscape metrics. *Sustainability*. 12(7):1-14.

Forestriko HF, Hartono. 2016. Pemanfaatan citra landsat 8 untuk estimasi stok karbon hutan mangrove di Kawasan Segara Anakan Cilacap Jawa Tengah. *Jurnal Bumi Indonesia*. 5(1):1-10.

Forman RTT. 1995. *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. New York: Cambridge University Press.

Fukuda T. 2010. Experiment for the forest rehabilitation of corridor area between Gn. Halimun Salak dominated by *Calliandra calothyrsus* [thesis]. Kagoshima: Kagoshima University.

Garrah E, Danby R, Eberhardt E, Cunningham G, Mitchell G. 2021. Hot spot and hot times: wildlife road mortality in a regional conservation corridor. *Environmental Management*. 56:874-889.

Galudra G. 2003. *Kasepuhan and Their Socioculture Interaction to The Forest*. Bogor: World Agroforestry Centre.

Galudra G, Sirat M, Ramdhaniaty N, Nurzaman B. 2005. Sejarah kebijakan tata ruang dan penetapan kawasan Taman Nasional Gunung Halimun-Salak. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 11(1):1-13.

GHSNPMP-JICA. 2009. *Rencana Aksi Restorasi Koridor Halimun-Salak (2009-2013)*. Sukabumi: Balai Taman Nasional Gunung Halimun-Salak.

Griffith JA, Martinko EA, Price KP. 2000. Landscape structure analysis of Kansas at three scales. *Landscape and Urban Planning*. 52:45-61.

Gunarsih. 2012. *Klimatologi dan Udara*. Jakarta: Bumi Aksara.

- Hakim L, Putra PT, Zahratu AL. 2017. Efektivitas jalur hijau dalam mengurangi polusi udara oleh kendaraan bermotor. *Jurnal Arsitektur NALARs*. 16(1):91-100.
- Haneda NF, Yuniar N. 2020. Peranan semut di ekosistem transformasi hutan hujan tropis dataran rendah. *Jurnal Ilmu Kehutanan*. 14(1):16-27.
- Hapsary MSA, Subiyanto S, Firdaus HS. 2021. Analisis prediksi perubahan penggunaan lahan dengan pendekatan artificial neural network dan regresi logistik di Kota Balikpapan. *Jurnal Geodesi UNDIP*. 10(2):88-97.
- Hargis C, Bissonette J, David J. 1998. The behavior of landscape metrics commonly used in the study of habitat fragmentation. *Landscape Ecology*. 13:167-186.
- Harris NL, Brown S, Hagen SC, Saatchi SS, Petrova S, Salas W, Hansen MCT, Potapov PV, Lotsch A. 2012. Baseline map of carbon emissions from deforestation in tropical regions. *Science*. 336:1573-1576.
- Haque MI, Basak R. 2017. Land cover change detection using GIS and remote sensing techniques: a spatio-temporal study on Tanguar Haor, Sunamganj, Bangladesh. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 20: 251-262.
- Hidayah Z, Suharyo OS. 2018. Analisa perubahan penggunaan lahan wilayah pesisir Selat Madura. *Jurnal Ilmiah Rekayasa*. 11(1):19-30.
- Hilty JL. 2020. *Ekologi Koridor: Ilmu Pengetahuan dan Praktik dalam Menghubungkan Bentang Alam untuk Konservasi Keanekaragaman Hayati*. Washington DC: AS Island Press, Inc.
- Holton JR. 2004. *An Introduction to Dynamic Meteorology*. Burlington: Elsevier.
- Howay IJ. 2023. Studi habitat kuskus bertotol biasa (*Spilocuscus maculatus*) pada kawasan Taman Wisata Alam Bariat Kabupaten Sorong Selatan [skripsi]. Sorong: Universitas Muhammadiyah Sorong.
- Huang X, He L, He Z, Nan X, Lyu P, Ye H. 2022. An improved Carnegie-Ames-Stanford Approach model for estimating ecological carbon sequestration in mountain vegetation. *Frontiers in Ecology and Evolution*. 10:1-17.
- Idham NC. 2016. *Arsitektur dan Kenyamanan Termal*. Yogyakarta: Andi Yogyakarta.
- Indrawati DM, Suharyadi, Widayani P. 2020. Analisis pengaruh kerapatan vegetasi terhadap suhu permukaan dan keterkaitannya dengan fenomena UHI. *Media Komunikasi Geografi*. 21(1):99-109.
- Indriyanto. 2010. *Pengantar Budi Daya Hutan*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Irfan M, Widhanarto GO, Dewantara I. 2021. Estimasi cadangan karbon dari kegiatan reklamasi blok tambang PT. Citra Mineral Investido Tbk. Kecamatan Sandai Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat. *Jurnal Hutan Lestari*. 9(3):354-365.
- Irham A, Elvitriana, Yulianti CS, Nizar M. 2017. Analisis ketersediaan ruang terbuka hijau berdasarkan kebutuhan oksigen di Kota Banda Aceh. *Serambi Engineering*. 2(4):188-196.

Jainuddin N. 2023. Dampak deforestasi terhadap keanekaragaman hayati dan ekosistem. *HUMANITIS: Jurnal Humaniora, Sosial dan Bisnis*. 1(2):131-140.

Jaya INS, Etyarsah S. 2021. *Analisis Citra Digital Perspektif Pengideraan Jauh untuk Pengelolaan Sumber Daya Alam*. Bogor: IPB Press.

Jennings SB, Browns NB, Sheil D. 1999. Assessing forest canopies and understory illumination: canopy closure, canopy cover, and other measures. *Forestry*. 72(1):59-73.

Jiaying Z, Zijian W, Ying H, Peizhong L, Jie X, Cai L, Guangchun L, Li W. 2024. Evaluating the effects of wetland restoration on ecosystem services using invest and geostatistics: a case study of Dongting Lake in China. *Remote Sensing*. 16(21):1-19.

Jingxuan L, Lina H, Yanan W, Xia L. 2022. Geospatial modeling and assessment of island ecosystem health after restoration projects: a case study in Qinshan Island, Jiangsu Province, China. *Journal of Applied Remote Sensing*. 16(4):1-25.

Kaban A, Mardiasuti A, Prasetyo LB. 2018. Struktur lanskap mempengaruhi komunitas burung di Kota Bogor Jawa Barat. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*. 7(2):109-118.

Khairunnisa S. 2023. Keanekaragaman jenis vegetasi dan cadangan karbon pada zona tradisional Taman Nasional Gunung Halimun Salak [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Kirabira A. 2022. Urban growth monitoring using spatial landscape. *ScienceOpen Preprints*. 1-52.

Kissinger. 2022. Prioritas tanaman revegetasi pascatambang batubara berdasarkan nilai kelayakan ekologi. *Jurnal Hutan Tropis*. 10(1):64-69.

Kurniadi KG, Bayupati IPA, Putra IDNN. 2016. Aplikasi penghitungan *gross primary production* dari data penginderaan jauh. *LONTAR KOMPUTER*. 7(1):706-714.

Kusmana C, Hikmat A. 2015. Keanekaragaman hayati flora di Indonesia. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. 5(2):187-198.

Kusuma BH, Azies IA, Yulianto, Pranowo WS. 2023. Karakteristik salinitas di perairan Teluk Jakarta periode 1996-2020. *Jurnal Riset Jakarta*. 16(2):69-78.

Lakitan B. 1994. *Dasar-dasar Klimatologi*. Jakarta: PT. Raja Grafindo Persada.

Latue PC. 2023. Analisis spasial temporal perubahan tutupan lahan di Pulau Ternate Provinsi Maluku Utara citra satelit resolusi tinggi. *BUANA: Jurnal Geografi, Ekologi dan Kebencanaan*. 1(1):31-38.

Li C, Wang R, Tan ML. 2019. Spatio-temporal changes in vegetation net primary productivity and its responses to climatic factors in Jiangsu Province, Eastern China. *Sains Malaysiana*. 48(11):2317-2324.

- Li T, Hu J, Li L, Liang J, Li D, Liu Q. 2023. Temporal variation and factors influencing the stability of NPP in Chinese shrubland ecosystems. *Forests*. 15(531):1-15.
- Liang S. 2001. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I Algorithms. *Remote Sensing of Environment*. 76:213-238.
- Locatelli B, Catterall CP, Imbach P, Kumar C, Lasco R, Marin-Spiotta E, Mercer B, Powers JKS, Schwartz N, Uriarte M. 2015. Tropical reforestation and climate change: beyond carbon. *Restoration Ecology*. 23(4):337-343.
- Lonita IB, Prasetyo Y, Hani'ah. 2015. Analisis perubahan luas dan kerapatan hutan menggunakan algoritma NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) dan EVI (*Enhanced Vegetation Index*) pada citra Landsat 7 ETM+ Tahun 2006, 2009, dan 2012. *Jurnal Geodesi Undip*. 4(3):112-120.
- Lu Y, Ranjitkar S, Harrison RD, Xu J, Ou X, Ma X, He J. 2017. Selection of native tree species for subtropical forest restoration in Southwest China. *PLoS One*. 12:1-15.
- Maden AA, Choy LK. 2017. Vegetation phenology response towards rainfall distribution using MODIS-Aqua vegetation satellite index data. *Sains Malaysiana*. 46(3):421-428.
- Maharadatunkamsi, Prakarsa TBP, Kurnianingsih. 2015. Struktur komunitas mamalia di Cagar Alam Leuweung Sancang, Kabupaten Garut, Jawa Barat. *Zoo Indonesia*. 24(1):51-59.
- Mariyani I, Suciati LP. 2021. Modal sosial petani rehabilitasi dalam pemulihan ekosistem Taman Nasional Meru Betiri. *AGRIEKONOMIKA*. 10(1):51-58.
- Masripatin N, Ginoga K, Pari G, Dharmawan WS, Siregar CA, Wibowo A, Puspasari D, Utomo AS, Sakuntaladewi A, Lugina M, *et al.* 2010. *Cadangan Karbon pada Berbagai Tipe Hutan dan Jenis Tanaman di Indonesia*. Bogor: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perubahan Iklim dan Kebijakan.
- Masters R., Ditchkoff S, Farley SC. 2017. *Edge and Other Wildlife Concepts*. Oklahoma: Oklahoma State University.
- McCarthy JK, Wiser SK, Bellingham PJ, Beresford RM, Campbell RE, Turner R, Richardson SJ. 2020. Using spatial models to identify refugia and guide restoration in response to an invasive plant pathogen. *Journal of Applied Ecology*. 58:192-201.
- McGarigal K. 2015. *Fragstats*. Amherst: University of Massachusetts.
- McGarigal K, Marks BJ. 1995. *FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure*. Vol. 351. New York: US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- Meijaard E, Sheil D, Nasi R. 2005. Wildlife conservation in Borneo: a case study. *Conservation Biology*. 19(5):1222-1232.
- Melinda V, Zainil M. 2020. Penerapan model *project based learning* untuk meningkatkan kemampuan komunikasi matematis siswa sekolah dasar (studi literatur). *Jurnal Pendidikan Tambusai*. 4(2):1526-1539.

- Mildrexler DJ, Berner LT, Law BE, Birdsey RA, Moomaw WR. 2020. Large trees dominate carbon storage in forests east of the Cascade Crest in the United States Pacific Northwest. *Frontier in Forest and Global Change*. 3:1-15
- Moran MS, Maas SJ, Pinter PJ. 1995. Combining remote sensing and modeling for estimating surface evaporation and biomass production. *Remote Sensing Reviews*. 12(3-4):335- 353.
- Musyary MD, Buchori I. 2024. Analisis kebutuhan ruang terbuka hijau dalam mengurangi pencemaran udara di kawasan metropolitan Surakarta untuk mewujudkan *Sustainable Development Goals* (SDGs). *Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan*. 8(2):137-149.
- Myneni RB, Williams DL. 1994. On the relationship between FAPAR and NDVI. *Remote Sensing of Environment*. 49:200–221.
- Novianti TC. 2021. Klasifikasi landsat 8 OLI untuk tutupan lahan di Kota Palembang menggunakan *Google Earth Engine*. *Jurnal Swarnabhumi*. 6(1):75-85.
- Nugroho S. 2011. Metode deteksi degradasi hutan menggunakan citra satelit landsat di hutan lahan kering TNGHS [disertasi] Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Nunez S, Arets E, Alkemade R. Verwer C, Leemans R. 2019. Assessing the impacts of climate change on biodiversity: is below 2 °C enough? *Climatic Change*. 154(3-4):351–365.
- Obi NI. 2014. The influence of vegetation on microclimate in hot humid tropical environment-a case of Enugu Urban. *International Journal of Energy and Environmental Research*. 2(2):28-38.
- Pandriadi, Harling VNV, Wahab A, Vaulina S, Sutjiningtyas S, Ningsih EK, Setyono BDH, Rizqi V, Harisuddin MI, Gaffar S, *et al*. 2023. *Statistika Dasar*. Bandung: Widina Media Utama.
- Park JH, Gan J, Park C. 2021. Discrepancies between global forest net primary productivity estimates derived from MODIS and forest inventory data and underlying factors. *Remote Sensing*. 13(1441):1-15.
- Pei Y, Huang J, Wang L, Chi H, Zhao Y. 2018. An improved phenology-based CASA model for estimating net primary production of forest in central China based on Landsat images. *International Journal of Remote Sensing*. 39(21):7664–7692.
- Perbatakusuma EA, Supriatna J, Wijayanto IH, Soedjito H, Damanik A, Azmi K, Arif MC, Lubis AH. 2010. *Strengthening Biodiversity Conservation at Key Landscape in Northern Sumatra Biodiversity Corridor*. Jakarta: CI Indonesia.
- [PerDirjen] Peraturan Direktur Jenderal Konservasi Sumber Daya Alam dan Ekosistem Nomor 12 Tahun 2015 Tentang Pedoman Tata Cara Penanaman dan Pengkayaan Jenis dalam Rangka Pemulihan Ekosistem Daratan pada Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam. 2015.
- Permana M, Sitorus SRP, Darmawan D. 2021. Analisis perubahan penggunaan lahan dan prediksinya dengan menggunakan *markov-cellular* automata di Wilayah Peri Urban Kota Malang. *Tataloka*. 23(3):307-319.

- [Permenhut] Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Nomor 48 Tahun 2014 Tentang Tata Cara Pelaksanaan Pemulihan Ekosistem pada Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam. 2014.
- Perwita CA, Maryanto S, Ghufro M, Prakoso M, Abigail S, Zamhar UZN. 2018. Korelasi peningkatan temperatur permukaan tanah dan aktivitas seismic di Gunung Anak Krakatau pada tahun 2018. *JLBG: Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*. 11(3):135-142.
- Pita K, Wickham SB, Davis EL, Lauriault P, Johnson A, Le NQ, Mullally S, Schang K, Smitas-Kraas MMA, Witmann E, Trant AJ. 2024. How does restoration ecology consider climate change uncertainties in forested ecosystems? *Restoration Ecology*. 32(8): 1-10.
- Polosakan R. 2011. Tree diversity and timber potential utilization by local community in Gunung Halimun Salak National Park Sukabumi. *Berkala Penelitian Hayati*. 5(A):67-72.
- Prabowo AS, Basuni S, Suharjito D. 2010. Konflik tanpa henti: permukiman dalam kawasan Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 16(3):137-142.
- Prasetyo LB. 2024. *Pendekatan Ekologi Lanskap untuk Konservasi Biodiversitas (Edisi Kedua)*. Bogor: IPB Press.
- Prasetyo LB, Setiawan Y, Permadi T. 2006. *Land use and land cover change Gunung Halimun Salak National Park 1989-2004*. Jakarta: JICA & Department of Forestry Indonesia. ]
- Prasetyo NN, Sasmito B, Prasetyo Y. 2017. Analisis perubahan kerapatan hutan menggunakan metode ndvi dan evi pada citra satelit landsat 8 tahun 2013 dan 2016 (area studi : Kabupaten Semarang). *Jurnal Geodesi Undip*. 6(3):21–27.
- Primack RB, Supriatna J, Indrawan M, Kramadibrata P. 1998. *Biologi Konservasi*. Jakarta: Yayasan Obor Indonesia.
- Putra BU, Krisnandika AAK, Dharmadiatmika IMA. 2021. Pengaruh kombinasi kerapatan kanopi pohon terhadap kenyamanan termal di Lapangan Puputan Margarana, Denpasar. *Jurnal Lanskap Indonesia*. 14(1):16-21.
- Purnamasari DR. 2004. Karakteristik hutan kota tipe permukiman dan perannya dalam pelestarian burung (studi kasus di kawasan permukiman kota mandiri Bumi Serpong Damai, Tangerang) [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.
- Purnomo DW, Prasetyo LB, Widyatmoko D, Rushayati SB, Usmadi D, Wati RK, Solihah SM. 2023. Kemampuan penyerapan karbon dioksida dan karakter stomata pada pohon-pohon asli dataran rendah tropis. *Buletin Kebun Raya*. 26(2):84-96.
- Putra BU, Krisnandika AAK, Dharmadiatmika IMA. 2021. Pengaruh kombinasi kerapatan kanopi pohon terhadap kenyamanan termal di Lapangan Puputan Margarana, Denpasar. *Jurnal Lanskap Indonesia*. 14(1):16-21.
- Rahma KA, Nugroho AS, Mulyaningrum ER. 2023. *E-Modul keanekaragaman hayati sebagai implementasi hasil penelitian jenis tumbuhan obat dan*

pemanfaatannya Desa Kayen. *Titian Ilmu: Jurnal Ilmiah Multi Sciences*. 15(1):71-75.

Rahmawati SN, Darusman D, Hermawan R. 2018. Nilai ekonomi hutan kota di Jakarta (studi kasus Hutan Kota Srengseng, Jakarta Barat). *Media Konservasi*. 23(3):262-273.

Rajagukguk CP, Febryanto IG, Herwanti S. 2018. Perubahan komposisi jenis tanaman dan pola tanam pada pengelolaan agroforestri damar. *Jurnal Sylva Lestari*. 6(3):18-27

Rajeshwari A, Mani ND. 2014. Estimation of land surface temperature of dindigul district using landsat 8 data. *International Journal of Research in Enginneering and Technology*. 3(5):122-126.

Rendana M, Rahim SA, Idris WMR, Lihan T, Rahman ZA. 2017. Soil erosion assessment in Tasik Chini Catchment using remote sensing and GIS techniques. *Sains Malaysiana*. 42(8):1041-1050.

Ridwan I, At M, Rusli AR. 2014. Pemantauan ekologi sarang elang jawa (*Spizaets bartelsi*) di wilayah hutan Cikaniki Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Jurnal Nusa Sylva Lestari*. 14(2):43-46.

Rijal S, Saleh MB, Jaya INS, Tiryana T. 2016. Spatial metrics of deforestation in Kampar and Indragiri Hulu, Riau Province. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*. 22(1):24-34.

Rikimaru A, Roy PS, Miyatake S. 2002. Tropical forest cover density mapping. *Tropical Ecology*. 43(1):39-47.

Rinaldi D, Harahap SA, Prawiradilaga DM, Wiriadinata H, Purwaningsih SE, Febriana I, Ningrum IK, Faizin N. 2008. *Ekologi Koridor Halimun Salak Taman Nasional Gunung Halimun Salak*. Bogor: GHSNP.MP-JICA.

Riswan, Harun U, Irsan. 2015. Keragaman flora di lahan reklamasi pasca tambang batubara PT BA Sumatera Selatan. *Jurnal Manusia dan Lingkungan*. 22(2):160-168.

Rizki F, Situmorang ADL, Wau N, Lubis MZ, Anurogo W. 2017. Mapping of vegetation and mangrove distribution level in Batam Island using SPOT-5 satellite imagery. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*. 2(4):264-267.

Robiansyah I, Purnomo DW. 2013. Pengaruh jalan terhadap keragaman jenis tumbuhan bawah dan habitatnya di koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Jurnal Biologi Indonesia*. 9(2):183-197.

Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC. 1974. *Monitoring the vernal advancements and retrogradation*. Texas (US): Texas A&M University.

Ruiming M, Yihe L, Bojie F, Da L, Xing W, Siqi S, Yunlong Z. 2022. A modified habitat quality model to incorporate the effects of ecological restoration. *Environmental Research Letters*. 17(10):1-12.

- Running SW, Nemani RR, Heinsch FA, Zhao M, Reeves M, Hashimoto H. 2024. A continuous satellite-derived measure of global terrestrial primary production. *Biosciences*. 54(6):547–560.
- Rushayati SB, Filmarasa EN, Hermawan R. 2009. Ameliorasi iklim melalui zonasi bentuk dan tipe hutan Kota. Prosiding seminar dan hasil-hasil penelitian; 2009: Bogor.
- Rutledge DT. 2003. *Landscape Indices as Measures of The Effects of Fragmentation: Can Pattern Reflect Process?* New Zealand: DOC Science Publishing.
- Sagita AR, Margaliu ASC, Rizal F, Mazzaluna HP. 2022. Analisis korelasi suhu permukaan, NDVI, elevasi dan pola perubahan suhu daerah panas bumi Rendingan-Ulubelu-Waypanas, Tanggamus menggunakan citra Landsat 8 OLI/TIRS. *Jurnal Geosains dan Remote Sensing*. 3(1):43-51.
- Sahrudin S, Tjoneng A, Numba S. 2019. Kajian kawasan terdegradasi dan pola pemulihan ekosistem di kawasan Suaka Margasatwa Ko'Mara Kabupaten Takalar. *AGROTEK: Jurnal Ilmiah Ilmu Pertanian*. 2(2):1-14.
- Sampurno RM, Thoriq A. 2016. Klasifikasi tutupan lahan menggunakan citra landsat 8 *Operational Land Imager* (OLI) di Kabupaten Sumedang. *Jurnal Teknotan*. 10(2):62-71.
- Sanana STS, Asmarahman C, Riniarti M, Duryat. 2022. Keanekaragaman fungsi mikoriza arbuskular pada rhizofor areal revegetasi lahan pascatambang emas PT Natarang Mining. *Jurnal Belantara*. 5(1):81-95.
- Sapariyanto S, Budi SB, Riniarti M. 2016. Kajian iklim mikro di bawah tegakan ruang terbuka hijau Universitas Lampung. *Jurnal Sylva Lestari*. 4(3):114-123.
- Sertel E, Topaloğlu RH, Şalli B, Yay AY, Aksu GA. 2018. Comparison of landscape metrics for three different level land cover/land use maps. *International Journal of Geo-Information*. 7(10):408-428.
- Setyowati RDN, Amala NA, Aini NNU. 2017. Studi pemilihan tanaman revegetasi untuk keberhasilan reklamasi lahan bekas tambang. *AL-ARD: Jurnal Teknik Lingkungan*. 3(1):14-20.
- Sinaga SH, Suprayogi A, Haniah. 2018. Analisis ketersediaan ruang terbuka hijau dengan metode normalized difference vegetation index dan soil adjusted 34 vegetation index menggunakan citra satelit Sentinel-2a (studi kasus: Kabupaten Demak). *Jurnal Geodesi Undip*. 7(1):202-211.
- Singh AN, Raghubanshi AS, Singh JS. 2002. Plantation as a tool for mine spoil restoration. *Current Science*. 82(12):1436-1441.
- Singh SK, Pandey AC, Singh D. 2014. *Land Use Fragmentation Analysis Using Remote Sensing and Fragstats*. Sristava PK, Gupta M, Mukherjee S, Islam T, editor. Switzerland: Springer International Publishing
- Sitorus WM, Sukmono A, Bashit N. 2019. Identifikasi perubahan kerapatan hutan dengan metode *forest canopy density* menggunakan citra landsat 8 tahun

2013, 2015 dan 2018 (studi kasus: Taman Nasional Gunung Merbabu, Jawa Tengah). *Jurnal Geodesi Undip*. 8(1):338-347.

Sobrino JA, Jiménez-Muñoz JC, Paolini L. 2004. Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*. 90(4):434-440.

Soule' ME. 1986. Conservation biology. The science of scarcity and diversity. *Journal of Tropical Ecology*. 4(1):91-92.

Sukarna RM. 2008. Aplikasi model *forest canopy density* citra landsat 7 ETM untuk menentukan indeks luas tajuk (*crown area index*) dan kerapatan tegakan (*stand density*) hutan rawa gambut di DAS Sebangau Provinsi Kalimantan Tengah. *Majalah Geografi Indonesia*. 22(1):1-21.

Sukmono A, Pratama ASP, Sabri LM. 2020. Analisa perubahan kerapatan vegetasi pada DAS Blorong menggunakan metode *Forest Canopy Density* (FCD) dari citra landsat 8. *Jurnal Geodesi dan Geomatika*. 3(1):92-97.

Sumarni S, Jeki A. 2021. Karakteristik habitat pohon ensuna (*Elateriospermum* sp.) pada kawasan hutan adat rimba menawa Kabupaten Melawi. *PIPER*. 17(1):69-74.

Suprijadi DAP. 2019. Kajian hukum pemulihan pencemaran lingkungan daerah bekas pertambangan menurut Undang-Undang Nomor 32 Tahun 2009 tentang perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup. *Lex Et Societatis*. 7(3):140-147.

Supriyanto B, Ekariyono W. (2007). *5 Strategi Rekonstruksi & Sosial Konservasi di Taman Nasional Gunung Halimun Salak*. Sukabumi: GHSNP.

Susmianto A, Wawandono NB, Triswanto A, Pujiati, Munawir A, Gunawan, Gumilang RS. 2017. *Kisah Keberhasilan Pemulihan Ekosistem di Kawasan Suaka Alam dan Kawasan Pelestarian Alam*. Bogor: FORDA Press.

Syahza A, Kozan O, Sutikno S, Irianti M, Mizuno K, Hosobuchi M. 2021. Restorasi ekologi lahan gambut berbasis kelompok masyarakat mandiri melalui revegetasi di Desa Tanjung Leban Kabupaten Bengkalis, Riau. *RAJE: Riau Journal of Empowerment*. 4(2):69-81.

Tang H, Dubayah R. 2017. Light-driven growth in Amazon evergreen forests explained by seasonal variations of vertical canopy structure. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 114(10):2640-2644.

Tarigan VA, Sasmito B, Hani'ah. 2019. Kajian akurasi penentuan garis pantai menggunakan citra Landsat 8. *Jurnal Geodesi Undip*. 8(1):328-337.

The Yale Center for Earth Observation. (2013). *Converting Digital Numbers to Top of Atmosphere (ToA) Reflectance*. New Haven (USA): Yale University.

Travers E, Härdtle W, Matthies D. 2021. Corridors as a tool for linking habitats – shortcomings and perspectives for plan conservation. *Journal for Nature Conservation*. 60:1-9.

Trewartha GT, Horn HL. 1995. *Pengantar Iklim*. Yogyakarta: UGM Press.

- Triatmojo MR, Pamoengkas P, Darwo. 2022. Pengaruh tutupan tajuk terhadap pertumbuhan *Dryobalanops lanceolata* Burck pada umur 5 tahun di KHDTK Haurbentes, Jasinga. *Jurnal Penelitian Hutan Tanaman*. 19(1):47-57.
- Turner IM. 1996. Species loss in fragments of tropical rain forest: a review of the evidence. *Journal of Applied Ecology*. 33(2):200-209.
- Turner MG. 1989. Landscape ecology: the effect of pattern on process. *Annual Review of Ecology and Systematics*. 20:171-197.
- USGS. 2016. *Landsat 8 (L8) Data Users Handbook*. South Dakota (US): U.S. Geological Survey
- Utami BMD. 2023. Pelestarian ekosistem: urgensi pengaturan sanksi pemulihan bagi spesies dalam kejahatan terhadap satwa liar. *Jurnal Hukum & Pembangunan*. 53(1):33-48.
- Vancutsem C, Achard F, Pekel JF, Vieilledent G, Carboni S, Simonetti D, Gallego J, Aragão LEOC, Nasi R. 2021. Long-term (1990-2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics. *Science Advances*. 7:1-21.
- Varela ES. 2009. Fragmentación urbana y su relevancia en la planificación urbana y territorial actual. *Ignire – Centro De Estudio De Política Pública*. 1(1):49-58.
- Viera AJ, Garret JM. 2005. Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Family Medicine*. 37(5):360-363.
- Wardana H, Sukojo BM, Wahyu U. 2014. Analisis indeks vegetasi NDVI dan MCARI untuk penentuan tutupan lahan sawah (studi kasus: Kabupaten Karawang). *GEOID*. 9(2):180-185.
- Wei J, Chen Y, Li W, Zhu C, Li Z. 2018. Estimation of net primary productivity and its driving factors in the Ili River Valley, China. *Journal of Arid Land*. 10(5):781-793.
- Whitmore TC. 1993. *An Introduction to Tropical Rain Forest*. New York: Oxford University Press.
- Wigunanti R, Rahmansyah RMRPR, A'yun Q, Oktaviana AK, Ihsan HM. 2024. Pengaruh kerapatan vegetasi terhadap kenaikan *Land Surface Temperature* (LST) di area Gunung Parang, Kecamatan Tegalwaru, Kabupaten Purwakarta. *El-Jughrafiyah: Jurnal Geografi dan Terapannya*. 4(1):134-149.
- Wijaya A. 2017. Analisis dinamika pola spasial penggunaan lahan pada wilayah terdampak kenaikan muka air laut di Kota Pekalongan [skripsi]. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Wijaya MS, Aryaguna PA, Rudiastuti AW, Rahmayani W, Widiastuti R, Hartini S. 2018. Penentuan prioritas pembaharuan peta mangrove Indonesia menggunakan model *forest canopy density* (studi kasus: Delta Mahakam Kalimantan Timur). *Majalah Ilmiah Globe*. 20(2):99-106.
- Wijaya AW, Wijaya AP, Rahmawati AI, Paryani E, Lestari HD, Amri I, Ardianti L, Putri SR, Haryono E. 2020. Analisis ekologi bentanglahan di Taman Nasional Baluran dan sekitarnya. *Majalah Geografi Indonesia*. 34(1):34-42.

Wiwaka. 2014. Pola suhu permukaan dan udara menggunakan citra satelit landsat multitemporal. *Ecolab*. 8(1):1-52.

Wulansari M, Fawzi IL. 2020. Peran Yayasan KEHATI dalam program prakarsa lintasan hijau Halimun Salak. *Jurnal Ilmu Kesejahteraan Sosial*. 21(1):1-13.

Yang H, Hu D, Xu H, Zhong X. 2020. Assessing the spatiotemporal variation of NPP and its response to driving factors in Anhui province, China. *Environmental Science and Pollution Research*. 27:14915-14932.

Yuhang Z, Zhenqi H, Jiazheng H, Xizhao L, Zhanjie F, Xi Z. 2023. Spatiotemporal relationship between ecological restoration space and ecosystem services in the Yellow River Basin, China. *Land*. 12(4):1-16.

Yumarni, Alikodra HS, Prasetyo LB, Soekmadi R. 2011. Analisis populasi owa jawa (*Hylobates moloch*, Audebert 1797) di Koridor Taman Nasional Gunung Halimun Salak. *Media Konservasi*. 16(3):133-140.

Zahrotunisa S, Jatmiko RH, Widyatmanti W. 2020. Analisis pengaruh suhu permukaan lahan terhadap elemen iklim mikro di Surakarta menggunakan citra penginderaan jauh multitemporal. *Majalah Ilmiah Globe*. 22(1):31-40.

Zanotelli D, Montagnani L, Manca G, Tagliavini M. 2013. Net primary productivity, allocation pattern and carbon use efficiency in an apple orchard assessed by integrating eddy covariance, biometric and continuous soil chamber measurements. *Biogeosciences*. 10:3089-3108.

Zhu Q, Zhao J, Zhu Z, Zhang H, Zhang Z, Guo X, Bi Y, Sun L. 2017. Remotely sensed estimation of Net Primary Productivity (NPP) and its spatial and temporal variations in the Greater Khingan Mountain Region, China. *Sustainability*. 9(1213):1-16.