



MODEL PENILAIAN KERENTANAN PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN KAWASAN KONSERVASI STUDI KASUS: TAMAN NASIONAL GUNUNG MERBABU

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 mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

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

ASTEKITA ARDIARISTO



**ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi - Studi Kasus : Taman Nasional Gunung Merbabu” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi manapun. 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 disertasi ini.

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

Bogor, Januari 2025

Astekita Ardiaristo
P062190181

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 mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

RINGKASAN

ASTEKITA ARDIARISTO. Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi – Studi Kasus: Taman Nasional Gunung Merbabu. Dibimbing oleh LILIK BUDI PRASETYO, NANDI KOSMARYANDI dan LAILAN SYAUFINA.

Perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi memiliki dampak signifikan terhadap efektivitas pengelolaan kawasan tersebut. Penutupan lahan tidak hanya mencerminkan fungsi ekologis kawasan sebagai habitat biodiversitas, tetapi juga memainkan peran penting dalam mengatur ekosistem, mendukung produksi sumber daya, dan menyediakan informasi lingkungan serta pengatur tata air. Oleh karena itu, memahami dinamika perubahan penutupan lahan merupakan langkah fundamental dalam menjaga keberlanjutan kawasan. Penutupan lahan juga mencerminkan kebijakan pengelolaan dan aktivitas manusia di sekitar kawasan konservasi. Tekanan dari aktivitas manusia, seperti alih fungsi lahan, urbanisasi, dan praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, sering kali memengaruhi keseimbangan ekosistem, terutama di daerah penyanga.

Penilaian kerentanan terhadap perubahan penutupan lahan menjadi alat penting dalam pengelolaan kawasan konservasi yang adaptif. Penelitian ini mempunyai tujuan utama untuk menghasilkan model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi dengan mengambil lokasi di Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb). Untuk mencapai tujuan utama itu dirumuskan beberapa tujuan antara yaitu 1) Menganalisis dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb; 2) Menganalisis pengaruh tekanan masyarakat daerah penyanga terhadap perubahan penutupan lahan TNGMb; 3) Mendeteksi gangguan dan tingkat pemulihan vegetasi di kawasan TNGMb; dan 4) Mengukur status keberlanjutan dari pengelolaan kawasan konservasi di TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan di TNGMb. Kebaruan yang diperoleh dalam penelitian ini yaitu model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi, penelitian analisis tekanan kawasan konservasi pada skala desa dan kawasan konservasi yang dikorelasikan dengan fragmentasi vegetasi di dalam kawasan konservasi, analisis faktor gangguan penutupan lahan kawasan konservasi secara spasial temporal dan analisis faktor keberlanjutan pengelola kawasan konservasi terhadap perubahan penutupan lahan.

Pada aspek keterpaparan untuk menganalisis dinamika perubahan penutupan lahan, penelitian ini memanfaatkan *Google Earth Engine* (GEE), sebuah platform komputasi awan, untuk mengolah data citra satelit secara efisien dan menghasilkan klasifikasi kelas penutupan lahan secara temporal dan spasial. Dengan algoritma *Random Forest*, penelitian berhasil memetakan perubahan penutupan lahan dari tahun 1995 hingga 2020 secara akurat. Hasil analisis menunjukkan di dalam kawasan TNGMb terjadi penurunan luas vegetasi dari 70% pada tahun 1995 menjadi 63,35% pada tahun 2020. Pada luar kawasan TNGMb, kelas penutupan lahan pertanian dan lahan terbangun meningkat, yaitu pada tahun 1995 sebesar 35,28% dan 3,58% dan pada tahun 2020 sebesar 36,49% dan 7,64%. Hal ini perlu menjadi perhatian bagi pengelola kawasan TNGMb mengingat kebutuhan akan lahan semakin meningkat.



Aspek tekanan dianalisis melalui pendekatan jejak manusia (*human footprint*) dan fragmentasi lanskap. Tekanan aktivitas manusia diukur berdasarkan aksesibilitas, kepadatan penduduk, aktifitas masyarakat, dan perubahan penggunaan lahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa daerah penyanga TNGMb mengalami peningkatan tekanan manusia, terutama di wilayah dekat desa dengan tingkat aktivitas tinggi. Fragmentasi lanskap, yang diukur melalui indeks lanskap seperti *total edge* dan kepadatan patch, meningkat sebesar 15,2% antara tahun 2014 dan 2020. Fragmentasi ini memengaruhi fungsi ekosistem di zona inti, menekankan pentingnya pengendalian aktivitas di daerah penyanga untuk melindungi zona inti.

Aspek sensitivitas mencakup analisis gangguan seperti kebakaran, pendakian, dan aktivitas manusia lainnya. Algoritma LandTrendr yang dikombinasikan dengan citra Landsat digunakan untuk memonitor perubahan penutupan lahan secara temporal. Hasil menunjukkan bahwa kebakaran hutan pada tahun 2015 dan 2018 menjadi gangguan utama yang mengurangi kapasitas kawasan dalam menyerap air dan mencegah erosi. Tingkat pemulihan pasca-gangguan bervariasi antar zona, dengan beberapa zona menunjukkan resiliensi lebih tinggi dibandingkan lainnya.

Dimensi keberlanjutan dievaluasi melalui pendekatan multidimensi yang melibatkan dimensi ekologi, ekonomi, sosial, dan kelembagaan. Dimensi ekologi menunjukkan tingkat keberlanjutan yang kritis akibat hilangnya tutupan vegetasi. Anggaran pengelolaan kawasan merupakan atribut pengungkit yang paling sensitif pada dimensi ekonomi terhadap keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika penutupan lahan. Dimensi sosial menunjukkan perlunya pemberdayaan masyarakat lokal melalui edukasi dan insentif untuk mengurangi tekanan terhadap kawasan konservasi. Pada dimensi kelembagaan, tingkat konflik batas kawasan, penegakan hukum terhadap pelanggaran di dalam kawasan TNGMb dan interaksi BTNGMb dan pemerintah daerah menjadi tantangan utama.

Model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan yang dirancang dalam penelitian ini mengintegrasikan keempat aspek yang berpengaruh dan pembobotan yaitu aspek keberlanjutan dengan bobot tertinggi (0,404), diikuti oleh sensitivitas (0,328), keterpaparan (0,142), dan tekanan (0,126). Strategi untuk mencegah kerentanan perubahan penutupan lahan di TNGMb dirancang dengan mempertimbangkan hasil analisis yaitu pengendalian kebakaran berbasis pencegahan, pemanfaatan teknologi untuk pengelolaan adaptif, mengurangi tekanan aktivitas manusia di daerah penyanga, restorasi terfokus pada area rentan dan evaluasi zonasi pada zona-zona yang rentan perubahan penutupan lahan

Kata kunci: fragmentasi, jejak manusia, keberlanjutan, kerentanan, perubahan penutupan lahan

SUMMARY

ASTEKITA ARDIARISTO. Model for Assessment of Land Cover Change Vulnerability in Conservation Areas – Case Study: Gunung Merbabu National Park. Supervised by LILIK BUDI PRASETYO, NANDI KOSMARYANDI and LAILAN SYAUFINA.

Land cover changes in conservation areas significantly impact the effectiveness of the area's management. Land cover not only reflects the ecological function of the area as a habitat for biodiversity but also plays an important role in regulating ecosystems, supporting resource production, providing environmental information, and regulating water systems. Therefore, understanding the dynamics of land cover changes is fundamental to maintaining the area's sustainability. The land cover also reflects management policies and human activities around the conservation area. Pressures from human activities, such as land conversion, urbanization, and unsustainable agricultural practices, often affect the balance of the ecosystem, especially in the buffer zone.

Vulnerability assessment to land cover changes is an important tool in adaptive conservation area management. The main objective of this study is to produce a land cover change vulnerability assessment model for conservation areas by taking the location in Gunung Merbabu National Park (GMbNP). Intermediate goals to achieve the main goal, namely, 1) Analyzing the dynamics of land cover changes in the GMbNP area; 2) Analyzing the influence of community pressure in the buffer zone on changes in land cover in the GMbNP area; 3) Detecting disturbances and the level of vegetation recovery in the GMbNP area; and 4) Measuring the sustainability status of conservation area management in the GMbNP area related to the dynamics of land cover changes in the GMbNP area. The innovations obtained in this study are the vulnerability assessment model for changes in land cover in conservation areas, research on the analysis of conservation area pressure at the village and conservation area scales that are correlated with vegetation fragmentation in conservation areas, analysis of disturbance factors in land cover in conservation areas spatially and temporally and analysis of sustainability factors for conservation area managers towards changes in land cover.

In terms of exposure to analyze the dynamics of land cover changes, this study utilizes Google Earth Engine (GEE), a cloud computing platform, to process satellite imagery data efficiently and produce land cover class classifications temporally and spatially. With the Random Forest algorithm, the study may accurately pipe land cover changes from 1995 to 2020. The analysis shows that in the GMbNP area, there was a decrease in vegetation area from 70% in 1995 to 63.35% in 2020. Outside the GMbNP area, the agricultural land cover class and built-up land increased, namely in 1995 by 35.28% and 3.58% and in 2020 by 36.49% and 7.64%. Considering the increasing need for land, this needs to be a concern for GMbNP area managers.

The pressure aspect was analyzed using the human footprint and landscape fragmentation approaches. Human activity pressure is measured based on accessibility, population density, community activities, and changes in land use. The results showed that the GMbNP buffer zone experienced increased human





pressure, especially in nearby villages with high activity levels. As measured by landscape index such as total edge and patch density, landscape fragmentation increased by 15.2% between 2014 and 2020. This fragmentation affects ecosystem functions in the core zone, emphasizing the importance of controlling activities in the buffer zone to protect the core zone.

The sensitivity aspect includes the analysis of disturbances such as fires, climbing, and other human activities. The LandTrendr algorithm combined with Landsat imagery was used to monitor land cover changes temporally. The results show that forest fires in 2015 and 2018 were the primary disturbances that reduced the area's capacity to absorb water and prevent erosion. The level of post-disturbance recovery varied between zones, with some zones showing higher resilience than others.

The sustainability dimension is evaluated through a multidimensional approach involving ecological, economic, social, and institutional dimensions. The ecological dimension indicates a critical level of sustainability due to the loss of vegetation cover. Area management budget is the most sensitive lever attribute in the economic dimension towards the sustainability of GMbNP area management related to land cover dynamics. The social dimension indicates the need for local community empowerment through education and incentives to reduce pressure on conservation areas. In the institutional dimension, the main challenges are area boundary conflict, law enforcement against violations within the GMbNP area, and the interaction between GMbNP official and local governments.

The land cover change vulnerability assessment model designed in this study integrates the four influential aspects and weighting, namely the sustainability aspect with the highest weight (0.404), followed by sensitivity (0.328), exposure (0.142), and pressure (0.126). Strategies to prevent vulnerability to land cover changes in GMbNP are designed by considering the results of the analysis, namely prevention-based fire control, utilization of technology for adaptive management, reducing the pressure of human activities in the buffer zone, focused restoration in vulnerable areas and evaluation of zoning in zones vulnerable to land cover changes.

Keywords: fragmentation, human footprint, land cover changes, sustainability, vulnerability,



©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, 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.



MODEL PENILAIAN KERENTANAN PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN KAWASAN KONSERVASI STUDI KASUS : TAMAN NASIONAL GUNUNG MERBABU

ASTEKITA ARDIARISTO

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan

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

**ILMU PENGELOLAAN SUMBERDAYA ALAM DAN LINGKUNGAN
SEKOLAH PASCASARJANA
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 mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

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

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi : (07 Januari 2025)

- 1 Dr. Anggit Haryoso, S.Hut.,M.Sc
- 2 Dr. Yudi Setiawan, SP, M.Env.Sc

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Anggit Haryoso, S.Hut.,M.Sc
- 2 Dr. Yudi Setiawan, SP, M.Env.Sc



Judul Disertasi : Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan
Kawasan Konservasi – Studi Kasus : Taman Nasional Gunung Merbabu

Nama : Astekita Ardiaristo
NIM : P062190181

Disetujui oleh

Pembimbing 1:

Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc

Pembimbing 2:

Dr. Ir. Nandi Kosmaryandi, , M.Sc.F.Trop

Pembimbing 3:

Prof. Dr. Ir. Lailan Syaufina, M.Sc

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:

Prof. Dr. Ir. Widiatmaka, DAA.,IPU
NIP. 19621201 198703 1 002

Dekan Sekolah Pascasarjana :

Prof. Dr.Ir. Dodik Ridho Nurrochmat, M.Sc.F.Trop., IPU
NIP. 19700329 199608 1 001

Tanggal Ujian:
7 Januari 2025

Tanggal Lulus:

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala karunia-Nya sehingga penulisan disertasi ini berhasil diselesaikan. Disertasi yang berjudul “Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi – Studi Kasus : Taman Nasional Gunung Merbabu” merupakan hasil penelitian penulis sebagai salah satu syarat penyelesaian program doktor di Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor.

Penulis mengucapkan terima kasih dan permohonan maaf kepada seluruh pihak yang telah membantu penulis selama proses studi program doktor dan penyelesaian disertasi, antara lain :

1. Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc sebagai Ketua Komisi Pembimbing, Dr. Ir. Nandi Kosmaryandi, M.Sc, F.Trop dan Prof. Dr. Ir. Lailan Syaufina, M.Sc sebagai anggota Komisi Pembimbing yang telah memberikan bimbingan dan pengetahuan selama penelitian dan penulisan disertasi.
2. Rektor Institut Pertanian Bogor, Dekan Sekolah Pascasarjana beserta seluruh staf yang telah menerima penulis untuk menempuh program doktor pada Sekolah Pascasarjana IPB University.
3. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan yang telah memberikan kesempatan dan membantu pembiayaan penulis selama menempuh program doktor di IPB University.
4. Prof. Dr. Ir. Widiatmaka, DAA, IPU dan Prof. Dr. Ir. Lina Karlinasari, S.Hut, M.Sc.F. Trop beserta staf pada Program Studi Ilmu Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan, IPB University.
5. Dr. Yudi Setiawan, SP, M.Env.Sc dan Prof. Dr. Syartinilia, SP., M.Si sebagai penguji pada ujian kualifikasi lisan.
6. Dr. Anggit Haryoso, S.Hut, M.Sc dan Dr. Yudi Setiawan, SP, M.Env.Sc sebagai penguji pada ujian tertutup dan sidang promosi.
7. Kepala Balai Taman Nasional Gunung Merbabu dan seluruh rekan-rekan di Balai Taman Nasional Gunung Merbabu yang telah memberikan banyak bantuan selama penelitian.
8. Keluarga kami, istri tercinta Nuraisya Rachmaratri, SH, M.H serta anak-anak kami Alif Danadyaksa Aristo, Alesha Silva Nareswari Aristo dan Arsyila Naifa Aristo, orang tua dan keluarga besar atas segala doa, pengorbanan, dukungan dan kasih sayangnya.
9. Rekan-rekan seperjuangan program doktor PSL 2019 dan karyasiswa KLHK atas segala bantuan, dorongan dan kerjasamanya

Semoga disertasi ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Januari 2025

Astekita Ardiaristo



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

DAFTAR ISI

PRAKATA	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xiv
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN	xvii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat	5
1.5 Kerangka Pemikiran	6
1.6 Ruang Lingkup	9
1.7 Kebaruan (<i>novelty</i>)	9
2. TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Perubahan Penutupan lahan	10
2.2 Jejak Kaki Manusia (<i>Human Footprint</i>)	11
2.3 Faktor Gangguan Perubahan Penutupan lahan	11
2.4 Penggunaan <i>Google Earth Engine</i> dalam pemodelan <i>Landuse/Landcover</i>	12
2.5 Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan	12
2.6 Hasil Penelitian Terdahulu	14
3. METODE	17
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	17
3.2 Alat dan Bahan	17
3.3 Rancangan Penelitian	18
3.4 Jenis, Sumber dan Analisis Data	20
4. Dinamika Perubahan Penutupan Lahan Menggunakan Platform <i>Cloud Computing</i>	22
4.1 Pendahuluan	22
4.2 Metode	23
4.3 Hasil dan Pembahasan	26
4.3.1 Penilaian akurasi	26
4.3.2 Distribusi dan dinamika penutupan lahan	27
4.4 Kesimpulan	33
5. Efek Tekanan terhadap Perubahan Penutupan lahan di Taman Nasional Gunung Merbabu Berdasarkan Analisis Jejak Manusia dan Fragmentasi	34
5.1 Pendahuluan	34
5.2 Metode	35
5.3 Hasil dan Pembahasan	38
5.3.1 Jejak Manusia/ <i>Human Footprint</i> (HF) di area penelitian	38
5.3.2 Indeks Lanskap	42
5.4 Kesimpulan	47

6.	Monitoring Perubahan Penutupan Lahan dan Gangguan Menggunakan Algoritma LandTrendr dan Citra Landsat	48
6.1	Pendahuluan	48
6.2	Metode	49
6.3	Hasil dan Pembahasan	51
6.3.1	Penilaian Akurasi	51
6.3.2	Gangguan Vegetasi	51
6.4	Kesimpulan	58
7.	Status Keberlanjutan Pengelolaan Taman Nasional Gunung Merbabu Terkait dengan Perubahan Penutupan Lahan	59
7.1	Pendahuluan	59
7.2	Metode	60
7.3	Hasil dan Pembahasan	65
7.3.1	Status Keberlanjutan Dimensi Ekologi	65
7.3.2	Status Keberlanjutan Dimensi Ekonomi	69
7.3.3	Status Keberlanjutan Dimensi Sosial	72
7.3.4	Status Keberlanjutan Dimensi Kelembagaan	76
7.4	Kesimpulan	81
8.	Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi	82
8.1	Pendahuluan	82
8.2	Metode	84
8.3	Hasil dan Pembahasan	86
8.3.1	Perbandingan antar variabel level 1	86
8.3.2	Perbandingan antar variabel level 2	87
8.3.3	Perbandingan antar variabel level 3	89
8.3.4	Perbandingan antar variabel level 4	91
8.4	Kesimpulan	92
9.	PEMBAHASAN UMUM	93
9.1	Penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi	93
9.2	Strategi pengendalian kerentanan perubahan penutupan lahan di TNGMb	97
10.	SIMPULAN DAN SARAN	100
10.1	Simpulan	100
10.2	Saran	101
	DAFTAR PUSTAKA	103
	LAMPIRAN	119
	RIWAYAT HIDUP	140



DAFTAR TABEL

2.1 Penelitian terdahulu terkait dengan penelitian	14
3.1 Matrik pencapaian tujuan penelitian	20
4.1 Deskripsi kategori penutupan lahan	24
4.2 Akurasi keseluruhan (<i>Overall Accuracy - OA</i>) dan koefisien Kappa (<i>Kappa Coefficient - KC</i>) untuk klasifikasi penutupan lahan menggunakan algoritma yang berbeda.	26
4.3 Distribusi Penutupan Lahan di Area Penelitian	28
5.1 Skor relatif aspek tekanan yang digunakan dalam analisis jejak manusia	36
5.2 Skor analisis indeks lanskap area penelitian	43
5.3 Perbandingan nilai indeks lanskap Tahun 2014 dan 2020 pada masing-masing zona	45
6.1 Nilai Rata-rata Magnitudo dari Vegetasi <i>Gain</i> dan <i>Loss</i>	52
7.1 Atribut dimensi ekologi dalam penilaian status keberlanjutan	62
7.2 Atribut dimensi ekonomi dalam penilaian status keberlanjutan	63
7.3 Atribut dimensi sosial dalam penilaian status keberlanjutan	63
7.3 Atribut dimensi sosial dalam penilaian status keberlanjutan (lanjutan)	64
7.4 Atribut dimensi kelembagaan dalam penilaian status keberlanjutan	64
7.5 Klasifikasi kategori status keberlanjutan	65
7.6 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi ekologi	68
7.7 Prosentase anggaran operasional kegiatan dan total anggaran dari tahun 2019-2023	70
7.8 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi ekonomi	72
7.9 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi sosial	75
7.10 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi kelembagaan	79
7.11 Analisis Status Keberlanjutan Pengelolaan Kawasan TNGMb terkait Dinamika Perubahan Penutupan Lahan	79
7.12 Atribut sensitif dari masing-masing dimensi pengelolaan kawasan TNGMb terkait dinamika perubahan penutupan lahan secara berkelanjutan	81
8.1 Matriks perbandingan berpasangan	85
8.2 Skala kepentingan yang digunakan dalam metode AHP	85
8.3 Hasil perhitungan bobot faktor Model Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi	87
8.4 Hasil perhitungan bobot faktor keterpaparan	87
8.5 Hasil perhitungan bobot untuk faktor sensitifitas	88
8.6 Hasil perhitungan bobot untuk faktor keberlanjutan	89
8.7 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria dinamika perubahan	89
8.8 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria prediksi perubahan	90
8.9 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria kebakaran	90
8.10 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria penebangan	90
8.11 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria restorasi	91
8.12 Hasil perhitungan bobot untuk alternatif zonasi	91

DAFTAR GAMBAR

1.1 Kerangka Pemikiran	8
2.1 Kerangka kerja kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi	13
3.1 Peta Lokasi Penelitian	17
3.2 Alur Penelitian	20
4.1 Diagram alir penelitian	26
4.2 Luas Cakupan Penutupan Lahan di Area Penelitian (A) dan area TNGMb (B)	27
4.3 Aliran perubahan penutupan lahan area penelitian tahun 2014 dan 2020	28
4.4 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 1995	29
4.5 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2001	30
4.6 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2007	30
4.7 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2014	31
4.8 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2020	31
5.1 Diagram alir untuk membuat peta jejak manusia	35
5.2 Nilai Atribut HF didalam, diluar dan total di Taman Nasional Gunung Merbabu	38
5.3 Peta dari masing-masing atribut HF pada tahun 2014	39
5.4. Peta dari masing-masing atribut HF pada tahun 2020	39
5.5 Nilai dari HF masing-masing desa pada tahun 2014 dan 2020	40
5.6 Peta Nilai HF pada masing-masing desa penyanga TNGMb pada Tahun 2014 dan 2020	42
5.7 Nilai HF dan selisih antara Tahun 2014-2020	42
5.8 Peta penutupan lahan Tahun 2014 yang dioverlay dengan zonasi dan grid penelitian	44
5.9 Peta penutupan lahan Tahun 2020 yang dioverlay dengan zonasi dan grid penelitian	44
6.1 Diagram alir penelitian	50
6.2 Contoh dari forest loss untuk titik sampel dari <i>Timesync</i> (A) dan <i>google earth image</i> (B)	51
6.3 Peta keluaran dari algoritma LandTrendr adalah peta durasi, magnitudo, dan tahun perubahan dalam vegetasi gain	53
6.4 Peta keluaran dari algoritma LandTrendr adalah peta durasi, magnitudo, dan tahun perubahan dalam vegetasi loss	54
6.5 Plot sampel vegetasi loss dan trajektori gangguan yang disesuaikan dengan LandTrendr berdasarkan NBR (A) dan NDVI (B)	56
6.6 Plot sampel vegetasi gain dan trajektori gangguan yang disesuaikan dengan LandTrendr berdasarkan NBR	56
6.7 Grafik luas dan rata-rata magnitudo penurunan dn peningkatan vegetasi	57
7.1 Tahapan analisis keberlanjutan dengan <i>Rap-CArea</i> , dimodifikasi dari Fauzi, 2019	61
7.2 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi ekologi masing-masing resor	66
7.3 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi ekologi	67





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

7.4 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi ekologi	68
7.5 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi ekonomi masing-masing resor	69
7.6 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi ekonomi	70
7.7 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi ekonomi	71
7.8 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi sosial masing-masing resor	73
7.9 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi sosial	74
7.10 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi sosial	75
7.11 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi kelembagaan masing-masing resor	76
7.12 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi kelembagaan	77
7.13 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi kelembagaan	78
7.14 Diagram layang-layang status keberlanjutan setiap dimensi pada masing-masing Resor	80
8.1 Hierarki pengambil keputusan Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi	84

DAFTAR LAMPIRAN

1 Hasil korelasi antara nilai HF dan indeks lanskap berdasarkan grid	120
2 Nilai Human Footprint dan Indeks Lanskap masing-masing grid pada tahun 2014, 2020 dan selisihnya	123
3 Kuisioner Analisis Status Keberlanjutan Pengelolaan Kawasan Konservasi di TNGMb	127
4 Kuisioner Penggunaan Hierarki Analitik Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi	132







I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia memiliki kawasan hutan terluas ketiga di dunia dengan keanekaragaman biodiversitas yang tinggi. Luas kawasan hutan di Indonesia berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Tahun 2018, dialokasikan 120,6 juta ha dengan rincian 68,8 juta ha berfungsi sebagai Hutan Produksi, 22,1 juta ha sebagai Hutan Konservasi dan Hutan Lindung seluas 29,7 juta ha (KLHK 2019). Dari 120,6 juta ha luas kawasan hutan yang dialokasikan ini, 85,8 juta ha yang merupakan penutupan lahan berupa hutan dan 34,7 juta ha penutupan lahannya berupa non hutan. Penutupan lahan non hutan dapat berupa perkebunan, pertanian, semak, pemukiman dan lain-lain.

Keanekaragaman biodiversitas yang tinggi dengan tingkat endemis yang tinggi pula di dalam kawasan hutan ini perlu upaya untuk melindungi dan mempertahankan biodiversitas tanpa meninggalkan kemakmuran masyarakat. Untuk itu perlu upaya konservasi yang menekankan pada 3 pilar yaitu pengawetan, perlindungan, dan pemanfaatan (KLHK 2019). Kawasan konservasi di Indonesia berjumlah 552 unit kawasan konservasi yang meliputi kawasan daratan dan lautan dengan luas 22,1 juta ha yang sebagian besar merupakan kawasan konservasi yang berstatus sebagai taman nasional (Wiratno 2018). Taman nasional ini mempunyai arti penting dalam upaya perlindungan biodiversitas dan meningkatkan kesejahteraan masyarakat. Keberadaan taman nasional tidak lepas dari tekanan atau ancaman seperti perambahan atau pembukaan lahan untuk lahan pertanian, illegal logging, penambangan, pengambilan kayu bakar, *mass tourism* yang tidak ramah lingkungan dan lainnya (Wiratno 2018; Hermawan *et al.* 2019).

Dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi tidak banyak dilihat sebagai salah satu faktor dalam penentuan keberhasilan pengelolaan kawasan konservasi. Penutupan lahan dalam kawasan dapat dikaitkan dengan struktur lanskap kawasan dimana didalamnya terdapat interaksi antara organisme dan lingkungan (Akodéwou *et al.* 2020). Perubahan struktur penutupan lahan dapat merubah fungsi dari penutupan lahan tersebut. Fungsi tersebut dapat berperan sebagai habitat (tempat hidup biodiversitas), regulator, produksi maupun informasi (Prasetyo 2017). Selain itu perubahan penutupan lahan khususnya di kawasan konservasi dapat menggambarkan kebijakan dari pengelola kawasan (Assaf *et al.* 2021) dan aktifitas masyarakat sekitar (Bendíková *et al.* 2018). Penurunan penutupan lahan hutan juga menyebabkan penurunan fungsi hutan sebagai pengatur tata air seperti berkurangnya daya simpan air dalam tanah, meningkatnya erosi dan sedimentasi (Romlah *et al.* 2018; Salim *et al.* 2019; Wasis *et al.* 2020). Tren penurunan penutupan lahan hutan di dalam kawasan lindung pada skala global hampir sama dengan kawasan non lindung (Wade *et al.* 2020).

Penelitian terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan dengan menggunakan Google Earth Engine (GEE) telah banyak dilakukan antara lain dilakukan pada kawasan *rangelands* (Xie *et al.* 2019), kawasan cagar alam (Tsai *et al.* 2019), kawasan Vu Gia - Thu Bon river basin (Nguyen *et al.* 2020), kawasan hutan bambu (Zhang *et al.* 2019), Kamboja (Venkatappa *et al.* 2019), kawasan padang rumput dan pakan ternak di Brazil (Parente *et al.* 2019), kawasan bekas kebakaran hutan (Quintero *et al.* 2019), kawasan pesisir lahan basah (Farda 2017),



kawasan pertambangan (Jena dan Pradhan 2019), kawasan hutan Indonesia (Fadli *et al.* 2019).

Pemahaman mengenai perubahan penutupan lahan dan biodiversitas ini mendukung agenda Pembangunan Berkelanjutan yang diadopsi oleh PBB dalam 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) terutama pada SDG 15 yang berfokus pada mengelola hutan secara berkelanjutan, memerangi penggurunan, menghentikan dan membalikkan degradasi lahan, menghentikan hilangnya keanekaragaman hayati (United Nations Interagency and Expert Group on and SDG Indicators (IAEG-SDGs) 2019). (Wang *et al.* 2020) dalam penelitiannya menemukan bahwa area aktif dari aktifitas manusia (seperti pusat kota) merupakan area yang secara konsisten terdegradasi sedangkan dampak faktor alam (seperti bencana) terhadap degradasi lahan terjadi pada area kecil di dataran tinggi. Pendekatan *human footprint* bisa untuk menjelaskan pengaruh aktifitas manusia terhadap kawasan (Sanderson *et al.* 2002; Correa Ayram *et al.* 2017). Terkait dengan penelitian mengenai *human footprint* yang telah dilakukan pada skala global dan regional (Sanderson *et al.* 2002; Woolmer *et al.* 2008; Venter *et al.* 2016; Correa Ayram *et al.* 2020; Dwiyahreni *et al.* 2021) sedangkan dalam penelitian ini dilakukan pada skala desa dan korelasi dengan kawasan konservasi.

Penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi penting dilakukan sebagai pedoman dalam pengelolaan yang adaptif bagi pengelola kawasan konservasi. Pemahaman mengenai kerentanan ini akan membangun kesadaran dalam mencegah resiko dan seberapa adaptif penutupan lahan terhadap pengelolaan (Nghiêm 2015). Penilaian kerentanan terhadap penutupan lahan telah banyak dilakukan dengan berbagai pendekatan seperti penilaian terhadap perubahan penutupan lahan kawasan konservasi yang dikaitkan terhadap perubahan iklim yang mencakup tingkat keterpaparan fisik kawasan terhadap perubahan iklim, tanggapan ekologi terhadap perubahan iklim dan respon manusia terhadap perubahan iklim (Hannah *et al.* 2010), penilaian kerentanan lingkungan dengan metode *spatial principal component analysis* menggunakan lima peta tematik yaitu ketinggian, kelerengan, sudut, arah, vegetasi dan penutupan lahan (Boori *et al.* 2014), pendekatan penilaian kerentanan ekosistem yang menghasilkan proyeksi perubahan pasokan jasa ekosistem yang berbeda dan perubahan berbasis skenario dalam kapasitas adaptif diintegrasikan ke dalam peta kerentanan untuk berbagai sektor sosial ekonomi (Metzger *et al.* 2006), penilaian kerentanan juga dilakukan untuk menilai bencana banjir yang diukur dengan menggunakan rasio antara kombinasi *disaster driver*, *disaster environment*, *disaster bearer* dan *severity of flood disaster* yang merupakan efisiensi relatif dari berbagai masukan dan keluaran dan untuk merinci tingkat kerentanan bencana banjir secara spasiotemporal menggunakan metode DEA (Li *et al.* 2013). Penilaian perubahan penutupan lahan kawasan konservasi yang dikaitkan dengan perubahan lahan di kawasan penyangganya dan faktor gangguan yang menyebabkan perubahan penutupan lahan ini belum pernah dilakukan. Ini penting dilakukan karena penutupan lahan di kawasan penyangga dapat menyebabkan tekanan terhadap kawasan konservasi (Palomo *et al.* 2013). Pendekatan terhadap tekanan penutupan lahan di kawasan penyangga ini menggunakan nilai dari *human footprint* kawasan penyangga.

Kerentanan adalah fungsi dari karakter, besaran dan kecepatan variasi iklim dimana sistem terpapar, termasuk sensitifitas dan kapasitas adaptifnya (IPCC 2001). Kerentanan terhadap lingkungan alam sebagai fungsi dari tiga komponen: resistansi,

kemampuan untuk menahan perubahan karena bahaya; resilensi, kemampuan untuk kembali ke keadaan semula setelah peristiwa bencana dan kerentanan; dan keadaan fisik saat ini, tanpa memperhitungkan perubahan temporal (Klein *et al.* 2003; Li *et al.* 2013; Singh *et al.* 2014). Keterpaparan menggambarkan derajat atau besar peluang suatu sistem untuk kontak dengan gangguan atau besarnya perubahan terhadap tekanan, sensitifitas menggambarkan kondisi internal dari sistem yang menunjukkan derajat kerawannya terhadap gangguan atau efek dari gangguan (Singh *et al.* 2014), tekanan menggambarkan kondisi eksternal dari sistem yang dapat menyebabkan terjadinya gangguan. Faktor adaptasi menggambarkan kemampuan suatu sistem untuk melakukan penyesuaian terhadap gangguan yang terjadi atau juga dapat diartikan sebagai potensi atau kemampuan untuk menyesuaikan diri seperti kondisi internal dari pengelola atau masyarakat dalam mengatasi/mitigasi dampak dari gangguan(Barkey *et al.* 2019). Penelitian terkait kerentanan perubahan penutupan lahan yang pernah dilakukan antara lain penilaian kerentanan penutupan lahan terhadap perubahan iklim (IPCC 2001; Hannah *et al.* 2010), penilaian kerentanan lingkungan (Boori *et al.* 2014), penilaian kerentanan ekosistem (Metzger *et al.* 2006) dan penilaian kerentanan bencana banjir (Li *et al.* 2013).

Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb) yang berada di tengah pulau Jawa merupakan taman nasional dengan tiga fungsi utama sesuai penunjukannya yaitu sebagai daerah tangkapan air bagi kehidupan masyarakat sekitar, perlindungan bagi habitat flora dan fauna yang dilindungi dan pemanfaatan potensi wisata alam dan budaya (BTNGMb 2014). Kawasan TNGMb sesuai dengan Keputusan Menteri Kehutanan Republik Indonesia Nomor: SK.3623/Menhut-VII/KUH/2014 tanggal 6 Mei 2014 tentang Penetapan Kawasan Hutan Taman Nasional Gunung Merbabu 5.820,49 Hektar di Kabupaten Semarang, Kabupaten Boyolali, dan Kabupaten Magelang, Provinsi Jawa Tengah berbatasan langsung dengan 36 desa. Tekanan terhadap kawasan juga tinggi karena masih terdapat aktifitas tradisional masyarakat sekitar di dalam kawasan seperti pengambilan kayu bakar, mencari rumput untuk pakan ternak, dan akses masuk kawasan yang sangat banyak (Gunawan *et al.* 2013; BTNGMb 2014).

Kawasan hutan ini sebagian besar kawasan merupakan hutan tanaman pinus yang ditanam pada sekitar tahun 1970-an (BTNGMb 2014) dan saat ini pohon-pohon tersebut sudah tua dan rawan tumbang. Pada saat musim hujan dan angin pohon-pohon tersebut rawan tumbang dan membahayakan bagi masyarakat sekitar serta menumbangkan pohon lainnya. Pada tahun 2018 pohon tumbang terjadi di 3 lokasi (BTNGMb 2019a). Pada bulan Oktober 2019 kawasan TNGMb diterjang badai yang sangat besar sehingga mengakibatkan ribuan pohon pinus roboh dan ratusan rumah yang berada di sekitar kawasan menjadi rusak.¹

TNGMb memiliki 5 (lima) jalur pendakian resmi yaitu jalur pendakian Selo, Thekelan, Wekas, Suwanting dan Cuntel. Pengunjung pendakian yang melewati kawasan melalui 5 jalur pendakian mengalami kenaikan yang cukup besar dari tahun 2014 hingga 2018 dimana pada tahun 2014 pengunjung pendakian sebanyak 30.836 pendaki naik lebih 300% pada tahun 2018 sebanyak 97.781 pendaki. Jalur pendakian yang menjadi favorit pendaki adalah jalur pendakian Selo (BTNGMb 2019b).

¹ [https://tngunungmerbabu.org/2019/10/22/angin-puting-beliung-malandatn-gunung-merbabu/](https://tngunungmerbabu.org/2019/10/22/angin-puting-beliung-melanda-tn-gunung-merbabu/) diakses pada 1 November 2019



Kejadian kebakaran yang hampir terjadi setiap tahun di TNGMb khususnya pada musim kemarau panjang. Dari data 2006 hingga 2020 kebakaran terjadi setiap tahun kecuali pada tahun 2009, 2010, 2016 dan 2017. Kebakaran terjadi pada penutupan lahan hutan campuran, semak belukar, sabana dengan luas rata-rata lahan yang terbakar \pm 216 Ha (BTNGMb 2019b). Walaupun kawasan yang terbakar akan kembali pulih baik melalui kegiatan restorasi atau juga suksesi alami namun penutupan lahan akan berubah dan fungsi dari kawasan akan terganti.

Perubahan lahan ini perlu dikelola agar fungsi dari kawasan tetap terjaga. Mandat kawasan TNGMb sebagai daerah tangkapan air, habitat flora dan fauna, serta wisata alam dan budaya sangat erat kaitannya dengan perubahan penutupan lahan ini. Untuk itu perlu untuk dilihat bagaimana seberapa besar kerentanan perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb yang terjadi agar dapat menjadi masukan dan bahan evaluasi dalam pengelolaan kawasan TNGMb ke depannya.

2.2 Rumusan Masalah

Penilaian efektifitas pengelolaan kawasan konservasi di Indonesia mengacu pada Peraturan Direktur Jenderal Konservasi Sumber Daya Alam dan Ekosistem Nomor P.12/KSDAE/SET/KUM.1/12/2017 tentang Pedoman Penilaian Efektifitas Pengelolaan Kawasan Konservasi. Efektifitas pengelolaan kawasan konservasi lebih banyak dilihat dari aspek manajerial (Leverington *et al.* 2010). Dinamika penutupan lahan di kawasan TNGMb walau berjalan lambat namun perubahan penutupan lahan ini akan berpengaruh pada peran kawasan sebagai penyanga ekosistem. Perubahan pengelola kawasan TNGMb dari Perhutani ke Balai TNGMb juga berpengaruh terhadap sistem pengelolaan kawasannya. SK penunjukkan taman nasional dikeluarkan sejak tahun 2004 namun Balai TNGMb baru pada tahun 2007 ditunjuk sebagai pengelola kawasan TNGMb (BTNGMb 2014). Dinamika penutupan lahan sebelum dan sesudah Balai TNGMb menjadi pengelola kawasan menjadi hal yang bisa dibandingkan untuk melihat bagaimana pengelolaan konservasi dilakukan (Wiratno 2012). Dengan pertimbangan itu penelitian ini melihat dinamika perubahan penutupan lahan sejak tahun 1995 hingga 2020. Penggunaan citra satelit dan algoritma untuk mengklasifikasikan dan dinamika penutupan lahan telah banyak digunakan namun perkembangan saat ini penggunaan *Google Earth Engine* (GEE) dalam proses klasifikasi sedang berkembang (Kumar dan Mutanga 2018; Mutanga dan Kumar 2019). Dinamika perubahan dan prediksi penutupan lahan dalam jangka waktu ke depan dapat menentukan tingkat keterpaparan atau seberapa besar penutupan lahan yang akan terjadi dan intervensi apa yang dilakukan agar fungsi dari kawasan TNGMb tidak semakin menurun. Perubahan penutupan lahan di dalam kawasan TNGMb tentu dipengaruhi juga oleh penutupan lahan di sekitar kawasan atau daerah penyanga. Nilai indeks *human footprint* kawasan penyanga perlu diketahui agar diketahui kemampuan kawasan penyanga untuk dapat memenuhi kebutuhan masyarakat sesuai dengan pola hidup masyarakat. Kegiatan pertanian yang mendominasi daerah penyanga akan menekan penutupan lahan di kawasan TNGMb yang dipengaruhi oleh kebutuhan lahan pertanian dan meningkatnya jumlah penduduk. Faktor-faktor yang menyebabkan perubahan penutupan lahan atau gangguan dapat dilihat juga dari dinamika perubahan penutupan lahan ini. Gangguan ini menentukan seberapa besar sensitifitas dari gangguan tersebut terhadap perubahan penutupan lahan yang terjadi.

Pengelolaan kawasan TNGMb yang berkelanjutan juga menjadi faktor yang dilihat sebagai mitigasi atau adaptasi terhadap perubahan penutupan lahan yang akan terjadi di kawasan TNGMb. Dengan diketahui seluruh faktor ini akan membantu dalam menyusun tingkat kerentanan kawasan terhadap perubahan penutupan lahan yang memperhitung aspek dari luar dan dalam kawasan serta kondisi perubahan penutupan lahan itu sendiri sehingga nantinya dapat digunakan sebagai bahan masukan dalam perencanaan pengelolaan kawasan TNGMb.

Berdasarkan permasalahan di atas maka perlu dirumuskan bagaimana model kerentanan penilaian perubahan kawasan konservasi dengan studi kasus di Taman Nasional Gunung Merbabu. Untuk menjawab rumusan masalah ini perlu disusun beberapa pertanyaan penelitian yang hendak dijawab antara lain:

- 1) bagaimana dinamika perubahan penutupan lahan di Kawasan TNGMb?;
- 2) bagaimana pengaruh tekanan masyarakat daerah penyangga TNGMb terhadap penutupan lahan dalam kawasan TNGMb?;
- 3) bagaimana gangguan dan tingkat pemulihan vegetasi di kawasan TNGMb?;
- 4) seberapa besar tingkat keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dengan perubahan penutupan lahan TNGMb?;

1.3 Tujuan

Berdasarkan latar belakang dan perumusan masalah diatas, tujuan utama dari penelitian ini adalah menyusun model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi- Studi Kasus: Taman Nasional Gunung Merbabu. Untuk mencapai tujuan utama tersebut maka dirancang tujuan antara yang merupakan aspek dalam model yang akan disusun, sebagai berikut:

- 1) Menganalisis dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb.
- 2) Menganalisis pengaruh tekanan masyarakat daerah penyangga terhadap perubahan penutupan lahan TNGMb.
- 3) Mendeteksi gangguan dan tingkat pemulihan vegetasi di kawasan TNGMb.
- 4) Mengukur status keberlanjutan dari pengelolaan kawasan konservasi di TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan di TNGMb.

1.4 Manfaat

Manfaat dari penelitian terkait model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi antara lain:

- 1) Sebagai bahan masukan bagi pengelola kawasan konservasi dalam menyusun kebijakan dan rencana pengelolaan kawasan konservasi khususnya terkait dinamika dan penilaian kerentanan penutupan lahan kawasan konservasi dan daerah penyangganya.
- 2) Sebagai bahan evaluasi dalam menilai pengelolaan kawasan konservasi khususnya terkait penutupan lahan.
- 3) Hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi pengembangan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi sehingga dapat memperkaya literatur terkait pengelolaan kawasan konservasi khususnya dinamika dan kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi.
- 4) Sebagai model yang dapat direplikasikan di kawasan konservasi lainnya untuk menilai kerentanan perubahan penutupan lahan.



1.5 Kerangka Pemikiran

Kawasan konservasi saat ini merupakan salah satu benteng terakhir bagi pelestarian biodiversity tanpa melupakan untuk meningkatkan kesejahteraan masyarakat di sekitarnya (Wiratno 2012). Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb) sebagai salah satu kawasan konservasi mempunyai peran sebagai Kawasan pelestarian satwa endemik prioritas Rek-rekan (*Presbytis fredericae*) dan juga kawasan yang bisa memberikan manfaat secara langsung dan tidak langsung kepada masyarakat sekitarnya (BTNGMb 2014). Sesuai dengan awal penunjukkan kawasan TNGMb ada tiga fungsi kawasan yaitu sebagai daerah tangkapan air, perlindungan bagi habitat flora dan fauna yang dilindungi dan pemanfaatan potensi wisata alam dan budaya. Memonitoring dan mengevaluasi pengelolaan kawasan lindung termasuk juga kawasan konservasi dapat menggunakan berbagai macam metode dan pada tahun 2010 dilaporkan oleh (Leverington *et al.* 2010) telah menilai lebih dari 8.000 penilaian dari efektifitas kawasan lindung di seluruh dunia. Kawasan lindung mempunyai peran penting dalam melindungi dari ancaman terhadap keanekaragaman hayati (Schulze *et al.* 2018) khususnya di kawasan TNGMb memastikan fungsi dari kawasan tetap terjaga.

Penutupan lahan di dalam kawasan menjadi salah satu faktor dalam melihat keberhasilan dalam pengelolaan kawasan. Pemahaman terhadap perubahan penutupan lahan di dalam kawasan baik secara spasial dan temporal merupakan hal mendasar dalam pengelolaan kawasan yang berkelanjutan (Bettinger *et al.* 2005; Boyle *et al.* 2014; Nguyen *et al.* 2018; Shahi *et al.* 2020). Faktor alam dan sosial-ekonomi dan pemanfaatannya oleh manusia pada waktunya telah sangat mempengaruhi pola penutupan lahan dan penutupan lahan (Singh dan Pandey 2014; Prasetyo 2017). Sebelum melihat perubahan atau dinamika penutupan lahan, penting untuk mengetahui penutupan lahan eksisting terlebih dahulu karena merupakan indikator terukur dalam ekosistem dalam kawasan (Ayala-Izurieta *et al.* 2017). Penutupan lahan di dalam kawasan hutan ditandai oleh pengelompokan dari ciri-ciri dari spesies tanaman (Remmel & Perera 2017). Perubahan penutupan lahan ini pasti akan berpengaruh pada struktur dan fungsi lanskap kawasan TNGMb. Perlindungan terhadap habitat satwa dan tumbuhan yang dilindungi seperti Rek-rekan (*Presbytis fredericae*) dan edelweiss (*Anaphalis javanica*) tentu akan berpengaruh akibat dinamika tersebut (Handayani dan Latifiana 2019). Selain itu perubahan penutupan lahan juga berpengaruh terhadap kemampuan lahan menyerap air dan terjadinya erosi (Mancino *et al.* 2016).

Pengelolaan kawasan konservasi harus melihat berbagai aspek yang terjadi didalam kawasan dan yang berpengaruh dari luar kawasan (Wiratno 2018). Perubahan penutupan lahan di dalam kawasan konservasi perlu juga melihat perubahan penutupan lahan di sekitar kawasan konservasi atau daerah penyanga. Hal ini untuk melihat seberapa jauh tekanan penutupan lahan di sekitar kawasan konservasi dan juga perubahan penutupan lahan di dalam kawasan konservasi akibat dinamika penutupan lahan di daerah penyanga (Oliveira *et al.* 2020; De Oliveira *et al.* 2020). Penutupan lahan di daerah penyanga berupa ladang, kebun campuran, pemukiman, hutan (Alkaf *et al.* 2014). Perkembangan saat ini daerah penyanga selain untuk lahan pertanian dan pemukiman juga untuk lokasi wisata swafoto. Pendekatan yang dapat digunakan salah satunya dengan mengukur *human footprint*. Apabila kawasan penyanga mengalami *overshoot* maka akan memberikan tekanan yang lebih besar pada kawasan konservasi. Kebutuhan



terhadap sumberdaya lahan yang meningkat dan terbatas akan menekan kawasan konservasi terutama pada tepi/*edge*. Penutupan lahan di kawasan penyangga dipengaruhi oleh faktor sosial ekonomi masyarakat seperti mata pencarian, konsumsi energi dan jumlah penduduk.

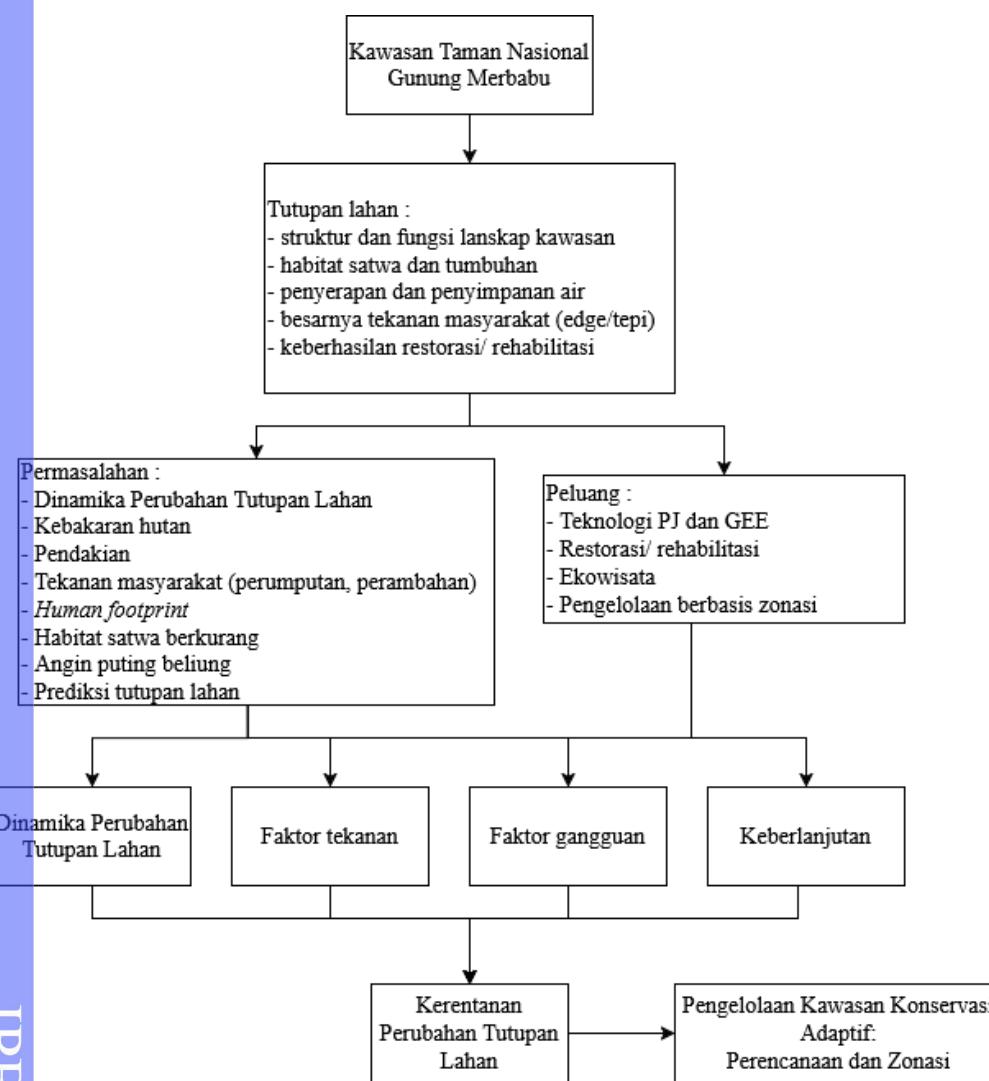
Penggunaan citra satelit dalam klasifikasi penutupan lahan ini sudah sangat banyak dilakukan dengan berbagai satelit, metode dan algoritma yang digunakan (Özdogan 2016; Shimizu *et al.* 2019a; Venkatappa *et al.* 2019). Dalam monitoring di kawasan lindung seperti yang dilaporkan oleh (Duan *et al.* 2020), penggunaan citra satelit dari tahun 1991 hingga 2018 telah dilakukan dalam 4.546 publikasi. Monitoring terhadap faktor gangguan yang menyebabkan perubahan penutupan lahan dan memprioritaskan pada suatu area dalam multi tingkatan diperlukan (Smith *et al.* 2019) terutama pada kawasan dengan pengelolaan yang intensif. Perubahan penutupan lahan di Kawasan TNGMb cukup tinggi terjadi terutama perubahan penutupan hutannya. Rata-rata laju deforestasi pada periode tahun 1991-2003 adalah 1,25% (Dewi 2009). Sedangkan periode 2001-2013 deforestasi didalam kawasan TNGMb sebesar 2,29% (Alkaf *et al.* 2014). Analisis perubahan penutupan lahan antara tahun 1995-2020 menggunakan berbagai algoritma dalam *Google Earth Engine* (GEE) selain mengetahui trend perubahan penutupan lahan, juga dapat mengetahui tingkat dan jenis dari gangguan (Nguyen *et al.* 2018) termasuk juga kemampuan resiliensinya (Soraya *et al.* 2016). Prediksi terhadap perubahan penutupan lahan hingga 10 tahun mendatang penting juga dalam perencanaan pengelolaan kawasan konservasi sesuai dengan penyusunan rencana pengelolaan kawasan konservasi. Data dan informasi mengenai dinamika perubahan dan prediksi penutupan lahan ini dapat digunakan untuk mengukur tingkat keterpaparan kawasan.

Gangguan-gangguan terhadap perubahan penutupan lahan ini perlu diidentifikasi melalui dinamika penutupan lahan tersebut agar pengelola mendapatkan masukan dalam pengelolaan kawasan secara berkelanjutan (Turner dan Simard 2017; Ansari dan Golabi 2019). Gangguan tidak bisa dihindarkan dalam ekosistem hutan dan dengan mempertahankan heterogenitas spasial dalam tipe tutupan, serangkaian tahap suksesi, dan berbagai keadaan biogeokimia dapat menumbuhkan keanekaragaman hayati dan ketahanan (Liang *et al.* 2016; Kulakowski *et al.* 2019). Gangguan ini mempengaruhi besarnya sensitifitasnya perubahan penutupan lahan yang terjadi. Perubahan penutupan lahan ini bisa diakibatkan oleh kejadian kebakaran, pendakian, hama penyakit, illegal logging, angin puting beliung, dan perambahan.

Faktor-faktor ini menggambarkan tingkat sensitifitas terhadap perubahan penutupan lahan. Kebakaran adalah salah satu gangguan paling utama dalam perubahan penutupan lahan. Kebakaran yang di kawasan TNGMb hampir setiap tahun terutama pada musim kemarau (BTNGMb 2019a). Trend perubahan penutupan lahan khususnya akibat kebakaran ini penting untuk diketahui karena seberapa besar respon terhadap perubahan penutupan lahan yang terbakar (Soulard *et al.* 2016). Pendakian yang semakin meningkat dari tahun ke tahun (BTNGMb 2019b) juga dapat menyebabkan perubahan struktur lanskap kawasan TNGMb walau tidak terlalu luas. Banyaknya pendaki menyebabkan kebutuhan akan lahan untuk berjalan/mendaki, berkemah ataupun beraktifitas semakin besar juga sehingga tumbuhan menjadi berkurang. Kegiatan restorasi/rehabilitasi juga dilakukan setiap tahunnya baik dalam bentuk kegiatan Balai TNGMb maupun yang

dilakukan oleh masyarakat dalam bentuk penamanan massal. Kegiatan ini diarahkan untuk mengembalikan fungsi kawasan pada zona rehabilitasi yang luasnya sekitar 1.298,98 Ha (BTNGMb 2018).

Dalam penelitian ini faktor keterpaparan diperoleh dari dinamika perubahan penutupan lahan di masa lalu dan prediksi penutupan lahan di masa depan, faktor sensitifitas diperoleh dari tingkat gangguan yang menyebabkan perubahan penutupan lahan, faktor tekanan diperoleh dari nilai human footprint kawasan penyangga yang berada di luar kawasan konservasi dan faktor adaptasi diperoleh dari nilai tingkat keberlanjutan pada pengelolaan kawasan konservasi. Dengan mengetahui tingkat keterpaparan, sensitifitas, tekanan dan tingkat keberlanjutan terhadap kawasan TNGMb yang dihubungkan dengan perubahan penutupan lahan ini dapat dijadikan untuk mengukur tingkat kerentanan kawasan terhadap perubahan penutupan lahan. Kerentanan kawasan ini dapat digunakan untuk mengevaluasi zonasi kawasan TNGMb sebagai ruang kelola kawasan dan juga perencanaan pengelolaan kawasan TNGMb ke depannya. Kerangka pemikiran penelitian yang akan dilakukan disajikan pada Gambar 1.1. dibawah ini :



Gambar 1.1 Kerangka Pemikiran

1.6 Ruang Lingkup

Ruang lingkup dalam penelitian ini dibatasi pada :

- 1) dalam mengukur kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi, penelitian ini berfokus pada aspek fisik terutama perubahan penutupan lahan secara spasial.
- 2) klasifikasi penutupan lahan menggunakan SNI 7645-1:2014 tentang Klasifikasi penutup lahan-skala kecil dan menengah (BSN 2014) yaitu klasifikasi untuk dalam kawasan TNGMb terdiri atas : hutan pinus, semak belukar/rumput, hutan campuran, tanah terbuka. Sedangkan untuk daerah penyangga yaitu: lahan pertanian, pemukiman, hutan campuran;
- 3) gangguan yang diteliti terbatas pada gangguan yang menyebabkan terjadinya perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb yaitu kebakaran, pendakian, angin puting beliung, hama penyakit, perambahan dan pendakian.

1.7 Kebaruan (*novelty*)

Penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan seberapa besar potensi berubahnya penutupan lahan akibat gangguan dan tekanan serta kapasitas beradaptasinya. Model penilaian kerentanan ini belum pernah dilakukan dalam penelitian lainnya. Penilaian kerentanan yang telah dilakukan sebelum dalam penelitian lainnya yaitu penilaian kerentanan perubahan lahan terkait perubahan iklim (IPCC 2001; Hannah *et al.* 2010), penilaian kerentanan lingkungan (Boori *et al.* 2014), penilaian kerentanan jasa ekosistem (Metzger *et al.* 2006) dan penilaian kerentanan bencana banjir (Li *et al.* 2013).

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terdiri atas kebaruan dari aspek metode dan hasil penelitian sebagai berikut :

1. analisis tekanan kawasan konservasi dengan analisis *human footprint* pada skala desa dan kawasan konservasi yang dikorelasikan dengan fragmentasi vegetasi di dalam kawasan konservasi,
2. analisis faktor gangguan penutupan lahan kawasan konservasi secara spasial temporal dengan menggunakan algoritma LandTrendr
3. analisis status keberlanjutan pengelola kawasan konservasi terhadap perubahan penutupan lahan.
4. Output yang dihasilkan berupa model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan Taman Nasional Gunung Merbabu yang selanjutnya dapat menjadi salah satu metode dalam penilaian METT.



2.1 Perubahan Penutupan lahan

Perubahan penutupan lahan merupakan peralihan dari penutupan lahan tertentu menjadi pengunaan lainnya. Penutupan lahan yang dilakukan manusia dari waktu ke waktu terus mengalami perubahan seiring dengan perkembangan peradaban dan kebutuhan manusia. Pertambahan penduduk menyebabkan kebutuhan lahan akan semakin tinggi. Pertambahan penduduk ini juga diiringi dengan kebutuhan masing-masing individu manusia yang semakin beranekaragam. Hal ini akan semakin menekan lahan yang sudah ada dan lahan yang tersedia namun belum digunakan. Pengetahuan mengenai perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi sangat penting dalam pengelolaan berkelanjutan karena perubahan yang semakin merusak ekosistem dapat menyebabkan kepunahan spesies yang terdapat di kawasan konservasi tersebut (Akodéwou *et al.* 2020; Sobhani *et al.* 2021).

Pergeseran fungsi lahan dengan perubahan tata ruang tanpa memperhatikan kondisi geografis dengan daya dukungnya dalam jangka panjang dapat berdampak negatif terhadap lahan, lingkungan, dan pada kehidupan manusia itu sendiri. Menurut (Barlowe 1986) terdapat empat faktor penting yang perlu dipertimbangkan dalam menentukan penutupan lahan yaitu faktor fisik lahan, faktor ekonomi, faktor kelembagaan, serta faktor kondisi sosial dan budaya masyarakat setempat juga akan mempengaruhi pola penutupan lahan. Pertambahan jumlah penduduk berarti pertambahan terhadap makanan dan kebutuhan lain yang dapat dihasilkan oleh sumberdaya lahan.

Perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb telah mencapai kondisi yang mengkhawatirkan. Menurut data dari Balai Penelitian Kehutanan Solo (2007), kondisi penutupan lahan hutan di kawasan TNGMb hanya tersisa 30% dari keseluruhan kawasan. Kondisi ini terutama diakibatkan oleh aktivitas penduduk yang secara ilegal mengumpulkan kayu untuk keperluan kayu bakar dan arang, serta terjadinya kebakaran hutan. Rata-rata laju deforestasi pada periode tahun 1991-2007 adalah 3% per tahun, sedangkan penurunan luas tutupan hutan pada periode tersebut mencapai 49,86% (Dewi 2009). Sedangkan periode 2001-2013 deforestasi didalam kawasan TNGMb sebesar 2,29% (Alkaf *et al.* 2014).

(Young *et al.* 2006) menyatakan bahwa beberapa hal yang menyebabkan terjadinya perubahan penutupan lahan di kawasan lindung hutan campuran di Alberta Canada adalah kegiatan bidang pertanian, urbanisasi, kegiatan penambangan minyak dan gas serta perubahan yang dikarenakan oleh kebakaran. Hal ini didukung juga oleh (Verburg *et al.* 2006) yang melakukan penelitian di kawasan lindung di Philipina dan menyatakan bahwa perubahan penutupan dan penutupan lahan pada kawasan lindung disebabkan oleh adanya kegiatan perluasan lahan pertanian di wilayah batas kawasan lindung dan kegiatan penebangan liar yang selalu terjadi dan tidak terkendali pada batas kawasan taman nasional.

Penelitian terkait dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi diperoleh hasil bahwa sebagian besar kawasan konservasi mengalami penyusutan penutupan lahan hutan (Ardiaristo *et al.* 2024a). Pengetahuan mengenai dinamika perubahan penutupan lahan hutan di kawasan konservasi ini penting bagi pengelola kawasan konservasi sebagai pedoman untuk menyusun kebijakan,



mengevaluasi kebijakan dan melakukan mitigasi terhadap penurunan penutupan lahan hutan ini.

2.2 Jejak Kaki Manusia (*Human Footprint*)

Dalam skala lanskap, manusia memiliki pengaruh pada terhadap keanekaragaman hayati yang ada di dalam kawasan konservasi. Oleh karena itu dalam perencanaan konservasi diperlukan pemahaman mengenai seberapa relatif besar pengaruh manusia yang berada di sekitar kawasan konservasi (Trombulak *et al.* 2010). *Human footprint* dapat diartikan sebagai rangkaian pengaruh manusia dengan alam yang membentang di permukaan tanah, mengungkapkan melalui variasinya pola utama pengaruh manusia terhadap alam. *Human footprint* mewakili jumlah total jejak ekologis dari populasi manusia (Sanderson *et al.* 2002). Penggunaan *human footprint* dalam melihat hubungan antara pengaruh aktifitas manusia pada tingkatan lanskap telah dilakukan antara lain : pada skala global dengan perbandingan waktu (Sanderson *et al.* 2002; Venter *et al.* 2016), pada tingkat negara untuk mengevaluasi pengaruh antropogenik (Correa Ayram *et al.* 2017; Correa Ayram *et al.* 2020), pada tingkat negara untuk mengevaluasi taman nasional daratan di Indonesia (Dwiyahreni *et al.* 2021). Dalam penelitian ini melihat pengaruh dari *human footprint* terhadap perubahan penutupan lahan pada skala regional kawasan konservasi.

2.3 Faktor Gangguan Perubahan Penutupan lahan

Pemetaan gangguan hutan dan pola spasial merupakan komponen penting dalam pengelolaan hutan lestari dan dalam mengimplementasikan inisiatif kebijakan iklim, seperti program Pengurangan Emisi dari Deforestasi dan Degradasi Hutan (Wulder *et al.* 2006; Hirschmugl *et al.* 2020). Penggunaan citra penginderaan jauh sangat bermanfaat untuk pemetaan gangguan dalam perubahan penutupan lahan seperti citra Landsat (Kennedy *et al.* 2010; Szantoi *et al.* 2016; Nguyen *et al.* 2018; Quintero *et al.* 2019) dan citra SAR (Hirschmugl *et al.* 2020). Gangguan adalah peristiwa mendadak yang secara drastis dapat mengubah karakteristik ekosistem (Begon *et al.* 1986). Gangguan alam dapat diartikan sebagai peristiwa yang relatif dalam waktu yang berbeda yang menyebabkan terjadi gangguan terhadap ekosistem, komunitas, atau struktur populasi dan yang mengubah sumber daya, ketersediaan habitat yang sesuai, dan /atau lingkungan fisik. Peristiwa ini terjadi pada berbagai intensitas di berbagai skala ruang dan waktu dan telah berkontribusi, bersama dengan iklim, tanah, dan geomorfologi (Parminter dan Daigle 1997). Perubahan yang terjadi sebagai akibat gangguan seperti jumlah atau jenis spesies (misalnya generalis dengan spesialis, r dan K Seleksi) dan jumlah sumber daya yang tersedia (misalnya cahaya dan nutrisi). Dalam ekologi komunitas, suatu peristiwa yang dapat menghilangkan organisme dan membuka ruang yang dapat dijajah oleh individu dari spesies yang sama atau berbeda. Frekuensi, ukuran, dan intensitas gangguan bervariasi di antara ekosistem, membantu menciptakan lanskap dengan atribut yang berbeda.

Gangguan terhadap perubahan penutupan lahan dapat diakibatkan oleh dua faktor yaitu gangguan alami dan aktifitas manusia. Gangguan alami dapat dikategorikan menjadi dua yaitu 1) Abiotik: seperti kebakaran hutan, banjir, tanah longsor dan salju longsor, dan fenomena yang berhubungan dengan cuaca (seperti angin puting beliung, kekeringan, salju). 2) Biotik: seperti organisme penyakit, atau



penggembalaan dan penjelajahan oleh mamalia atau serangga (Parminter dan Daigle 1997). Gangguan oleh aktifitas manusia seperti penebangan, pembakaran dengan sengaja dan pembukaan jalan.

2.4 Penggunaan *Google Earth Engine* dalam pemodelan *Landuse/Landcover*

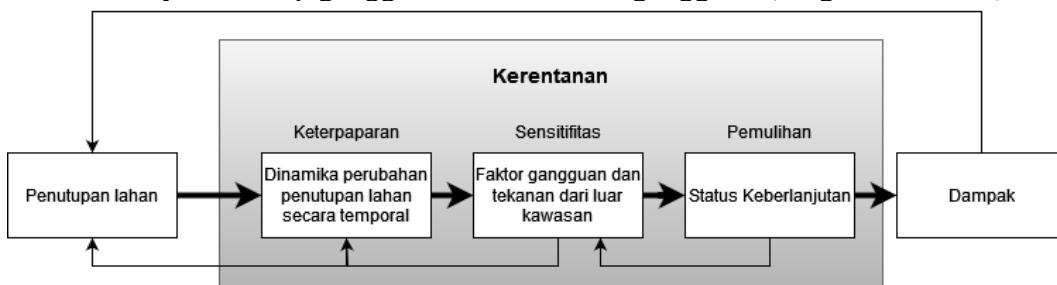
Salah satu penggunaan GEE adalah untuk memetakan *landcover/landuse* (Kumar dan Mutanga 2018). Sebagaimana yang telah direview oleh Tamiminia bahwa penggunaan GEE untuk pemodelan *landcover/landuse* ada sebanyak 56 artikel dengan berbagai citra satelit dan metode yang digunakan (Tamiminia *et al.* 2020). Sedangkan untuk penelitian dengan menggunakan GEE dari tahun 2010 hingga 2019 ada sekitar 349 publikasi yang mana setiap tahunnya mengalami kenaikan publikasi. Potensi GEE dapat digunakan untuk menangani set data dalam jangka panjang yang sangat besar pada skala global yang cukup susah ditangani bila menggunakan cara manual. Pemodelan GEE yang dilakukan oleh Ravanelli dengan menganalisis dampak perubahan penutupan lahan pada perkotaan permukaan dan mengambil keuntungan dari alat iklim yang telah mapan untuk mengekstraksi data suhu permukaan tanah yang sangat besar dengan memproses lebih dari 6000 gambar Landsat dari tahun 2000 hingga 2011 (Ravanelli *et al.* 2018). Ketersediaan data deret waktu dan platform GEE memfasilitasi pengembangan algoritma untuk memecahkan masalah tutupan awan dan efek medan dari pemetaan penutupan lahan di kawasan lindung Tiongkok (Tsai *et al.* 2018). Platform komputasi awan juga memfasilitasi perhitungan indeks vegetasi spektral dari data Landsat multi-musiman serta algoritma normalisasi iluminasi, menghasilkan hasil klasifikasi penutupan lahan yang sukses. Terlepas dari data Landsat, penelitian lain menggunakan data satelit Sentinel 1 dan 2 resolusi tinggi untuk memetakan luas lahan basah pada skala provinsi di Newfoundland, Kanada. Penelitian ini menghasilkan peta lahan basah regional terperinci pertama, meningkatkan pada Sentinel SAR resolusi tinggi dan data optik, daya komputasi GEE, dan algoritma pembelajaran mesin canggih (Mahdianpari *et al.* 2019).

2.5 Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan

Penilaian kerentanan memberikan panduan penting menuju pengelolaan berkelanjutan dimana dapat membangun kesadaran dan mencegah resiko terjadinya perubahan (Nghiem 2015). Pengertian kerentanan yang diadopsi dari konsep perubahan iklim merupakan fungsi dari karakter, besaran, dan laju perubahan iklim dan variasi di mana suatu sistem terpapar, kepekaannya, dan kapasitas adaptifnya (IPCC 2001). Kerentanan dapat juga diartikan sebagai sejauh mana suatu sistem, subsistem, atau komponen sistem akan mengalami kerusakan atau perubahan akibat paparan bahaya, baik gangguan maupun stres (Turner II *et al.* 2003). Penilaian kerentanan ini telah dilakukan dalam berbagai penelitian dengan pendekatan yang berbeda seperti penilaian kerentanan perubahan lahan terkait perubahan iklim (IPCC 2001; Hannah *et al.* 2010), penilaian kerentanan lingkungan (Boori *et al.* 2014), penilaian kerentanan jasa ekosistem (Metzger *et al.* 2006) dan penilaian kerentanan bencana banjir (Li *et al.* 2013). Penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi yang dilakukan dalam penelitian ini menunjukkan seberapa besar potensi berubahnya penutupan lahan akibat gangguan dan tekanan serta kapasitas beradaptasinya. Kerangka kerja berupa model kerentanan perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi dikembangkan

berdasarkan pemahaman mengenali penilaian kerentanan dapat memberikan panduan penting menuju pengelolaan berkelanjutan dimana dapat membangun kesadaran dan mencegah resiko terjadinya perubahan (Nghiem 2015). Pengertian kerentanan yang diadopsi dari konsep perubahan iklim merupakan fungsi dari karakter, besaran, dan laju perubahan iklim dan variasi di mana suatu sistem terpapar, kepekaannya, dan kapasitas adaptifnya (IPCC 2001). Kerentanan dapat juga diartikan sebagai sejauh mana suatu sistem, subsistem, atau komponen sistem akan mengalami kerusakan atau perubahan akibat paparan bahaya, baik gangguan maupun stres (Turner II *et al.* 2003). Model yang dibangun berdasarkan ekstraksi data dan analisis dari literatur review serta pendekatan dalam penelitian yang apabila digambarkan dalam kerangka kerja dan diadopsi dengan model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan. Kerangka kerja yang dikembangkan oleh (Turner II *et al.* 2003) untuk memitigasi perubahan terhadap bencana yang berkelanjutkan, kami adopsi untuk perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi. Pendekatan kerentanan ini memasukkan semua faktor pendekatan dalam penelitian yang kami lakukan.

Kerangka kerja kerentanan perubahan penutupan lahan dalam Gambar 2.1 terdapat tiga aspek. Aspek yang pertama yaitu keterpaparan yang menggambarkan derajat atau besar peluang suatu sistem untuk kontak dengan gangguan atau besarnya perubahan terhadap tekanan (Singh *et al.* 2014). Atribut dalam aspek ini adalah dinamika perubahan penutupan lahan secara temporal pada masa lalu, sekarang dan masa depan (Shahi *et al.* 2020). Aspek kedua yaitu sensitifitas yang menggambarkan kondisi internal dari sistem yang menunjukkan derajat kerawannya terhadap gangguan atau efek dari gangguan (Singh *et al.* 2014).



Gambar 2.1 Kerangka kerja kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi

Atribut yang dinilai dalam aspek kedua ini adalah faktor gangguan yang menyebabkan perubahan penutupan lahan terjadi dan besarnya tekanan perubahan penutupan lahan dari luar kawasan (Turner dan Simard 2017; Ansari dan Golabi 2019). Perubahan penutupan lahan di dalam kawasan konservasi perlu juga melihat perubahan penutupan lahan di sekitar kawasan konservasi atau daerah penyangga. Hal ini untuk melihat seberapa jauh tekanan penutupan lahan di sekitar kawasan konservasi dan juga perubahan penutupan lahan di dalam kawasan konservasi akibat dinamika penutupan lahan di daerah penyangga (Freitas Lima dan Ranieri 2018; Oliveira *et al.* 2020; De Oliveira *et al.* 2020). Aspek terakhir yaitu pemulihan menggambarkan kemampuan suatu sistem untuk melakukan penyesuaian terhadap gangguan yang terjadi atau juga dapat diartikan sebagai potensi atau kemampuan untuk menyesuaikan diri seperti kondisi internal dari pengelola atau masyarakat



dalam mengatasi/mitigasi dampak dari gangguan serta keberlanjutan dalam pengelolaan kawasan konservasi

2.6 Hasil Penelitian Terdahulu

Berdasarkan analisis literatur, telah diidentifikasi beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan penelitian Penilaian Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi seperti yang tercantum dalam Tabel 2.1 berikut ini :

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu terkait dengan penelitian

Peneliti	Judul	Metode	Kesimpulan
(Turner ll al. 2003)	<i>A framework for vulnerability analysis in sustainability science</i>	the risk-hazard (RH) dan pressure-and-release (PAR) models	Kerentanan tidak hanya tercatat melalui paparan bahaya (gangguan dan tekanan) tetapi juga berada dalam sensitivitas dan ketahanan sistem yang mengalami bahaya tersebut. Kerangka kerja kerentanan untuk penilaian sistem manusia-lingkungan yang saling terkait disajikan.
(Hannah et al. 2010)	<i>Spatial Planning for Area Conservation in Response to Climate Change - Methods Documentation</i>	Conservation Prioritization Network - (CPNF); Marginal Benefit of Protection Index (MBPI)	Analisis komprehensif dan dukungan keputusan untuk perencanaan kawasan lindung terestrial dalam menghadapi perubahan iklim bagi negara-negara di tiga wilayah biogeografi.
(Zhang dan Zhang 2020)	<i>Land Cover Change in the Central Region of the Lower Yangtze River Based on Landsat Imagery and the Google Earth Engine: A Case Study in Nanjing, China</i>	Proses dengan GEE Vegetation index : NDVI, NDWI, NDBI, MNDWI Metode klasifikasi : CART, RF, Naive Bayes, GmoMaxEnt, SVM	Kumpulan data lahan yang diperoleh dapat diandalkan dan sangat akurat, dengan akurasi keseluruhan berkisar antara 88% hingga 92%

Tabel 2.1 Penelitian terdahulu terkait dengan penelitian (lanjutan)

Peneliti	Judul	Metode	Kesimpulan
(López <i>et al.</i> 2020)	<i>Landscape change in Southern Ecuador: An indicator-based and multi-temporal evaluation of land use and land cover in a mixed-use protected area</i>	Metode klasifikasi : SVM dengan ArcGis Analisis statistik dan deskriptif dengan tiga skala yang berbeda → Fragstat 4.2	Pembentukan dan perampingan kawasan lindung dapat secara signifikan mengubah pengaturan spasial dan ukuran area transisi, yang, pada gilirannya, dapat mempengaruhi dinamika lanskap dengan implikasi untuk aliran energi dan fungsi habitat
(Oliveira <i>et al.</i> 2020)	<i>A multiscale analysis of land use dynamics in the buffer zone of Rio Doce State Park, Minas Gerais, Brazil</i>	Metode klasifikasi : <i>unsupervised classification</i> Indek hemeroby : <i>land use metrics</i> dengan Fragstat 4.2	Perubahan lanskap di daerah penyanga taman perubahan yang disebabkan manusia terus meningkat karena peningkatan perkebunan kayu putih dan urban sprawl yang tumbuh masing-masing sebesar 4% dan 1,9%. Lahan pertanian telah berkurang 6,35%, tetapi ada kecenderungan bahwa suatu bentuk transisi hutan sambutan telah terjadi.
(Nguyen <i>et al.</i> 2020)	<i>Land Cover Classification Based Cloud Computing Platfrom</i>	Proses dengan GEE Metode klasifikasi : RF → NDVI dan DEM, SRTM	Hasil klasifikasi menunjukkan tujuh kategori penutupan lahan termasuk hutan buatan, hutan alam, daerah sawah, daerah perkotaan, daerah pedesaan, lahan kosong, dan sistem air dengan akurasi keseluruhan 73,9% dan kappa 0,70





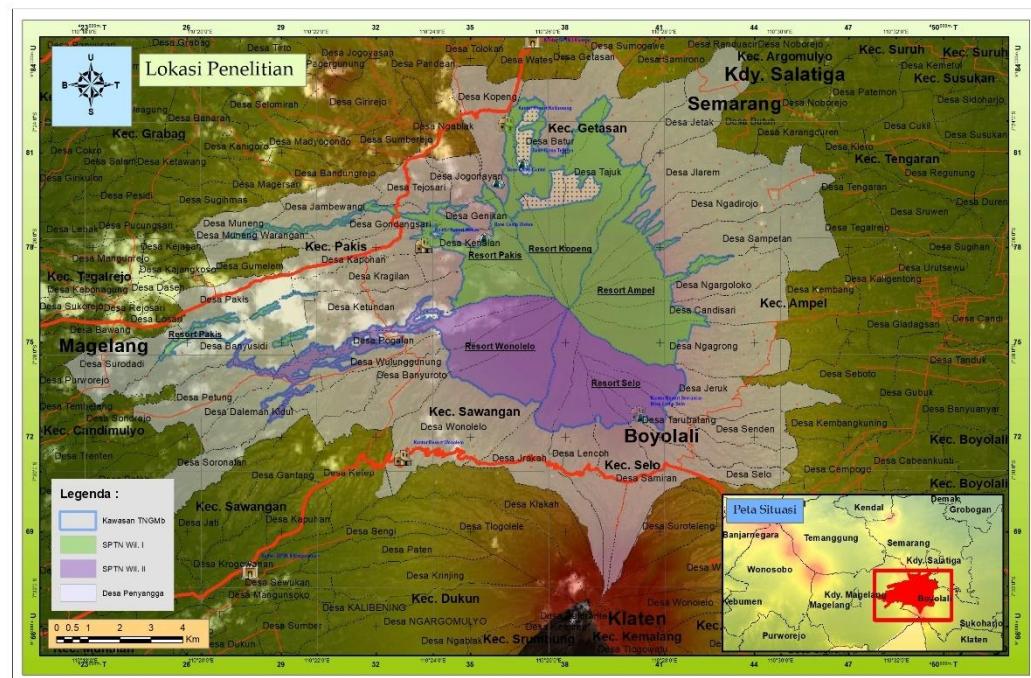
Tabel 2.1 Penelitian terdahulu terkait dengan penelitian (lanjutan)

Peneliti	Judul	Metode	Kesimpulan
(Nguyen et al. 2018)	<i>A spatial and temporal analysis of forest dynamics using Landsat time-series</i>	Vegetation indices : NBR, TCB, TCG, TCW LandTrendr segmentation algorithm, algorithm RF	metode yang kuat untuk secara komprehensif dan tren temporal dan agen penyebab gangguan hutan serta secara konsisten menandai gangguan hutan dan dinamika pemulihan bagaimana ekosistem menanggapi peristiwa gangguan.
(Jin et al. 2020)	<i>Mapping the annual dynamics of cultivated land in typical area of the Middle-lower Yangtze plain using long time-series of Landsat images based on Google Earth Engine</i>	NDVI → ESTRAFM (<i>Enhanced Spatial and Temporal Adaptive Reflectance Fusion Model</i>) approach	Dinamika lahan pertanian terutama terjadi di pegunungan, bukit, danau dan di sekitar kota, dan frekuensi perubahan sebagian besar wilayah ini satu atau dua kali
(Adimu 2018)	<i>Strategi Pengelolaan Kawasan Konservasi Yang Efektif Dan Berkelanjutan Di Taman Nasional Wakatobi</i>	Multi Dimension Scaling (MDS), Rap CArea	Berdasarkan hasil penilaian terhadap 31 atribut dari keempat dimensi ekologi, sosial, ekonomi, dan kelembagaan pada pengelolaan kawasan konservasi maka kondisi saat ini nilai indeks keberlanjutan sebesar 45.93, berarti pengelolaan konservasi di TNW saat ini berada pada status kurang berkelanjutan.

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

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di kawasan TNGMb yang secara geografis terletak pada koordinat $110^{\circ}26'22''$ BT dan $7^{\circ}27'13''$ LS dengan luas 5820,49 Ha. Secara administratif wilayah TNGMb dikelilingi oleh 3 (tiga) wilayah kabupaten yaitu Kabupaten Magelang, Kabupaten Semarang, dan Kabupaten Boyolali, Provinsi Jawa Tengah seperti pada Gambar 3.1. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei 2022 sampai dengan Juli 2024. Kawasan TNGMb dalam pengelolaan terbagi dalam 2 (dua) Seksi Pengelolaan yaitu Seksi Pengelolaan TN Wilayah I Kopeng dan Seksi Pengelolaan TN Wilayah II Krogowan. Seksi Pengelolaan TN Wilayah I Kopeng terbagi lagi menjadi 3 (tiga) resor yaitu Resor Ampel, Resor Kopeng dan Resor Wonolelo. Sedangkan Seksi Pengelolaan TN Wilayah II Krogowan terbagi menjadi Resor Selo dan Resor Wonolelo.



Gambar 3.1 Peta Lokasi Penelitian

3.2 Alat dan Bahan

Bahan dan peralatan yang diperlukan dalam penelitian ini yaitu peta citra satelit dari *google earth pro* dan *Landsat*, peta RBI, dan peta batas kawasan TNGMb. Alat yang digunakan alat tulis, alat perekam, *Global Positioning System* (GPS), kamera, peralatan survei lapangan, *software Fragstat*, *software ArcGis*, *software QGIS*, *software SPSS*, *software Rstudio*, *LandTrendr*, *Multi-Dimensional Scalling*, AHP, dan *Microsoft Office (Word, Excel, Powerpoint)*.



3.3 Rancangan Penelitian

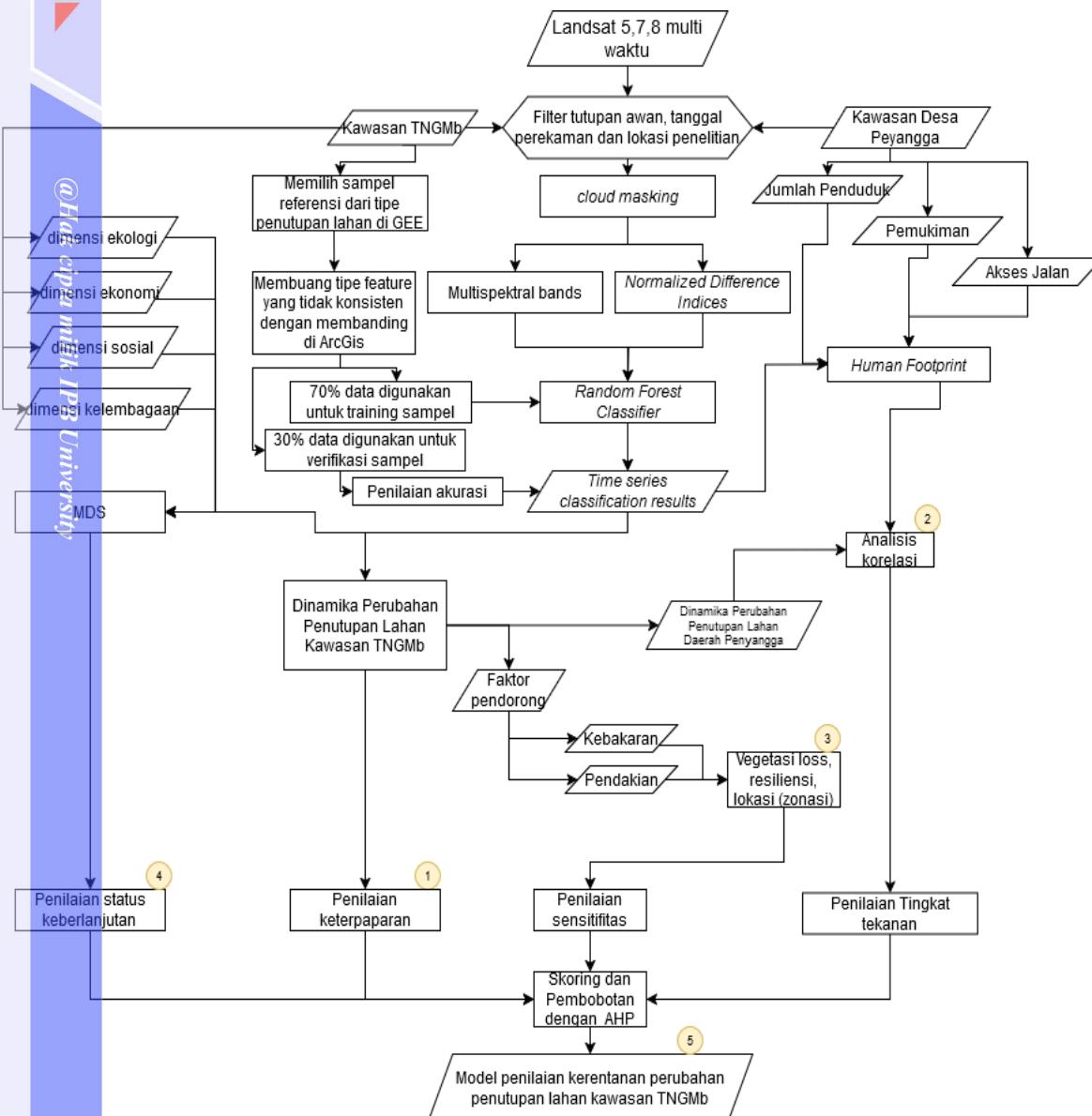
Penelitian ini dirancang untuk merumuskan model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi di Taman Nasional Gunung Merbabu yang terdiri dari 5 (lima) tahapan, yaitu:

1. Tahap pertama diawali dengan menganalisis dinamika perubahan penutupan lahan di Kawasan TNGMb dan daerah penyanga. metode untuk menganalisis perubahan penutupan lahan mulai dari preprocessing dan normalisasi gambar, dataset referensi, klasifikasi penutupan lahan, penilaian akurasi dan analisis dinamika perubahan. Teknik deteksi perubahan penutupan lahan diterapkan dan dievaluasi dengan mengembangkan kode di platform Google Earth Engine (GEE) menggunakan algoritma klasifikasi random forest. Satelit Landsat telah merekam citra terus menerus sejak tahun 1972 hingga saat ini dengan teknologi yang semakin meningkat. Citra satelit Landsat ini dapat diperoleh dalam arsip data publik di GEE yang dapat digunakan untuk mendeteksi dan memperkirakan perubahan penutupan lahan dinamis jangka panjang. Citra Landsat dipilih secara langsung dan diproses pada platform Google Earth Engine. Keseluruhan koleksi gambar Landsat 5, 7, dan 8 dianalisis menggunakan produk reflektansi Tier 1 Surface Reflectance (SR) untuk area penelitian dengan tampilan citra multi waktu mulai dari 1995 hingga 2020. Untuk menghilangkan dampak musim hujan dan tutupan awan yang lebih besar pada hasil klasifikasi, kerangka tanggal ditetapkan dari 1 April hingga 30 November setiap tahun. Berdasarkan ketersediaan gambar yang difilter, lima koleksi gambar dibuat dengan masing-masing koleksi gambar untuk memperhitungkan kesenjangan data. Node waktu yang sesuai masing-masing adalah 1995, 2001, 2007, 2014 dan 2020. Setiap simpul waktu bersama dengan tahun sebelumnya dan tahun berikutnya merupakan periode tiga tahun digabungkan dalam satu mosaik dengan mengambil piksel median dari seluruh koleksi citra Landsat. Komposit citra yang diperoleh kemudian diklasifikasikan dalam GEE menggunakan metode klasifikasi Random Forest (RF) dengan enam kategori penutupan lahan berikut: (1) hutan pinus; (2) hutan campuran; (3) semak belukar; (4) lahan terbangun; (5) lahan pertanian; dan (6) lahan terbuka. Penilaian akurasi dilakukan berdasarkan titik sampel acak yang dipilih, yang dipilih melalui interpretasi visual citra penginderaan jauh, peta RBI, data plot Perhutani, data dari aplikasi SIMERU selama tahun 2019-2021, dan survei lapangan yang dilakukan selama tahun 2020-2021.. Evaluasi akurasi berbasis sampel untuk setiap komposit Landsat yang diperoleh dihitung dengan membangun confusion matrix, yang meliputi akurasi keseluruhan, koefisien kappa, akurasi pengguna (UA), dan akurasi produsen (PA)
2. Tahap kedua dilakukan analisis pengaruh tekanan daerah penyanga TNGMb dengan membandingkan nilai indeks *human footprint* tiap desa penyanga di sekitar kawasan TNGMb secara spasial. Analisis pola lanskap kawasan TNGMb dilakukan melalui Patch Analysis yang terdapat pada software ArcMap 10.8 dengan parameter yang digunakan yaitu luas area (*Area*), bentuk rata-rata (*Mean Shape Index/MSI*), luas rata-rata patch (*Mean Patch Size/MPS*), kepadatan tepi (*Edge Density/ED*), jumlah total patch (*Number of Patch/NumP*). Analisis komparatif pola lanskap penutupan lahan area penelitian dan jejak manusia dilakukan pada grid dengan ukuran 2 km x 2 km pada tahun 2014 dan 2020. Pada setiap grid, skor jejak manusia dijumlahkan dan kemudian dibagi dengan

total luas area penelitian. Kemudian analisis korelasi dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 20 untuk menunjukkan hubungan antara perubahan indeks lanskap dan jejak manusia antara tahun 2014 dan 2020. Skor HF divalidasi menggunakan analisis Root Mean Square Error (RMSE) dan kappa (Dwiyahreni et al. 2021; Hirsh-Pearson et al. 2022)

3. Tahap ketiga menganalisis tingkat sensitifitas dari faktor gangguan yang mempengaruhi dinamika perubahan penutupan lahan dengan menggunakan algoritma LandTrendr yang dikembangkan oleh (Kennedy et al. 2010) dengan menggunakan indeks vegetasi NBR. Proses akuisisi data, pre proses dan proses LandTrendr juga dilakukan dengan GEE (Kennedy et al. 2018). Citra hanya dipilih dari bulan Juli hingga Oktober untuk mengurangi pengaruh variasi vegetasi musiman dan banyak awannya. Pendekatan ini terdiri dari enam tahap utama: menghilangkan lonjakan yang disebabkan oleh kebisingan, mengidentifikasi kemungkinan simpul melalui analisis regresi, menyesuaikan lintasan, menyederhanakan model, memilih model optimal berdasarkan nilai p statistik-F, dan menilai hasil segmentasi. Dalam penelitian ini ditetapkan parameter terpilih yaitu maxSegment dengan nilai 6, nilai *spikeThreshold* 0,9, nilai *vertexCountOvershoot* 3, nilai *prevent one-year recovery* Benar, nilai *recovery threshold* 0,25, nilai *pvalThreshold* 0,05, nilai *minObservationsNeeded* 6 (Wang et al. 2023; Ardiaristo et al. 2024b). Hilangnya hutan ditandai dengan penurunan nilai spektral, sedangkan peningkatan ditandai dengan peningkatan pada tahun-tahun berikutnya. Untuk validasi data loss dan gain yang dihasilkan dilakukan penilaian akurasi dengan menggunakan 200 titik sampel yang terpilih secara stratified random dimana masing-masing 100 titik sampel untuk forest loss dan 100 titik sampel untuk forest gain. Penilaian akurasi dengan menggunakan matrik confusin yang dikerjakan dengan R software.
4. Tahap keempat menganalisis status keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb. Metode analisis yang digunakan adalah *Multi Dimensional Scaling* (MDS) melalui teknik ordinasi Rap-CArea (*Rapid Appraisal for Conservation Area*). Penentuan atribut yang mencakup 4 (empat) dimensi antara lain dimensi ekologi, ekonomi, sosial dan kelembagaan. Penentuan atribut diperoleh dengan pendekatan *scientific judgement* berdasarkan hasil kajian maupun penelitian dan mempertimbangkan ketersediaan data dari atribut tersebut.
5. Tahap kelima untuk menentukan penilaian kerentanan kawasan terhadap perubahan penutupan lahan dibangun menggunakan empat indeks faktor yaitu indeks keterpaparan, indeks sesitifitas, tekanan kawasan, dan indeks status keberlanjutan. Setiap indeks yang digunakan untuk penentuan kerentanan kawasan pada setiap zonasi kawasan TNGMb dihitung bobotnya menggunakan teknik pembandingan berpasangan yang merupakan bagian dari metode AHP (*analytical hierarchy process*).

Secara ringkas, tahapan metode penelitian yang akan dilakukan terlihat pada Gambar 3.2.



Gambar 3.2 Alur Penelitian

3.4 Jenis, Sumber dan Analisis Data

Matriks tujuan, jenis data, sumber data, metode analisis dan keluaran yang diharapkan disajikan dalam Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Matrik pencapaian tujuan penelitian

No	Tujuan Penelitian	Jenis data yang dikumpulkan	Sumber data	Metode analisis	Keluaran yang diharapkan
1	Menganalisis dinamika penutupan lahan kawasan TNGMb	Data primer : penutupan lahan eksisting, Data sekunder : citra multi waktu Landsat, peta RBI, peta batas kawasan TNGMb	• USGS • Observasi lapangan • KLHK • BIG • BTNGMb	• GEE • random forest • Uji akurasi	Klasifikasi penutupan lahan Dinamika perubahan penutupan lahan



Tabel 3.1 Matrik pencapaian tujuan penelitian (lanjutan)

No	Tujuan Penelitian	Jenis data yang dikumpulkan	Sumber data	Metode analisis	Keluaran yang diharapkan
2	Menganalisis pengaruh tekanan masyarakat daerah penyanga terhadap perubahan penutupan lahan TNGMb	Data primer : penutupan lahan eksisting, data konsumsi energi, Data sekunder : citra multi waktu Landsat, peta RBI, peta batas kawasan TNGMb, Data Potensi desa daerah penyanga	• USGS • Observasi lapangan • KLHK • BIG • BTNGMb • BPS	• Human Footprint • Patch analysis • Analisis korelasi Pearson	Tingkat kawasan tekanan
3	Mendeteksi gangguan dan tingkat pemulihan vegetasi di kawasan TNGMb	• Kejadian kebakaran • Jumlah pendakian • Data dinamika perubahan penutupan lahan	• BTNGMb • Observasi lapangan	• LandTrendr	tingkat sensitifitas
4	Mengukur status keberlanjutan dari pengelolaan kawasan konsevasi di TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan di TNGMb	• Data dinamika perubahan penutupan lahan • Zonasi kawasan TNGMb • Data kelompok masyarakat/mitra • Kegiatan BTNGMb	• BTNGMb • Statistik BTNGMb • Laporan Kinerja • BTNGMb	MDS CArea	RAP- Status Keberlanjutan pengelolaan
5	menyusun model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi-Studi Kasus: Taman Nasional Gunung Merbabu	• Data tekanan terhadap kawasan • Data tingkat sensitifitas kawasan • Data keterpaparan kawasan • Data status keberlanjutan pengelolaan	• BTNGMb	AHP Weighted overlay	Model penilaian kerentanan kawasan terhadap perubahan penutupan lahan

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



IV. DINAMIKA PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN MENGGUNAKAN PLATFORM *COULD COMPUTING*

4.1 Pendahuluan

Dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi jarang dilihat sebagai faktor penentu keberhasilan pengelolaan kawasan konservasi. Penilaian efektifitas pengelolaan kawasan konservasi di Indonesia saat ini menggunakan penilaian dengan *Management Effectiveness Tracking Tool* (MEET) (Nugraha *et al.* 2024). Memahami perubahan penutupan lahan di suatu kawasan konservasi, baik secara spasial maupun temporal, dapat memberikan dasar untuk pengelolaan kawasan yang berkelanjutan. Penutupan lahan di suatu kawasan dapat terkait dengan struktur lanskap kawasan tersebut di mana terdapat interaksi antara organisme dan lingkungannya (Akodéwou *et al.* 2020). Perubahan penutupan lahan dapat mengubah fungsi penutupan lahan. Fungsi ini dapat berperan sebagai habitat (tempat tinggal bagi keanekaragaman hayati), regulator, produksi, dan informasi (Prasetyo 2017). Selain itu, perubahan penutupan lahan, terutama di kawasan konservasi, dapat mencerminkan kebijakan pengelola kawasan (Assaf *et al.* 2021) dan aktivitas masyarakat sekitar (Bendíková *et al.* 2018). Perubahan penutupan lahan di daerah penyangga di sekitar kawasan lindung juga harus dipertimbangkan dalam mengevaluasi perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi. Young *et al.* 2006 menyatakan bahwa beberapa faktor yang menyebabkan perubahan penutupan lahan di kawasan hutan lindung campuran di Alberta, Kanada adalah aktivitas pertanian, urbanisasi, kegiatan penambangan minyak dan gas, serta perubahan yang disebabkan oleh kebakaran. Hal ini juga didukung oleh Verburg *et al.* 2006 yang melakukan penelitian di kawasan lindung di Filipina dan menyatakan bahwa perubahan penutupan lahan di kawasan lindung merupakan ancaman besar bagi keberadaan keanekaragaman hayati. Pemahaman tentang perubahan penutupan lahan dan keanekaragaman hayati ini mendukung agenda Pembangunan Berkelanjutan yang diadopsi oleh Perserikatan Bangsa-Bangsa dalam 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), terutama pada SDG nomor 15 yang berfokus pada pengelolaan hutan secara berkelanjutan, memerangi penggurunan, menghentikan dan membalikkan degradasi lahan, serta menghentikan kehilangan keanekaragaman hayati (United Nations Interagency and Expert Group on and SDG Indicators (IAEG-SDGs) 2019).

Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb) yang terletak di tengah pulau Jawa adalah taman nasional dengan tiga fungsi utama sesuai dengan peruntukannya, yaitu sebagai (1) daerah tangkapan air bagi kehidupan masyarakat sekitar, (2) perlindungan habitat flora dan fauna yang dilindungi, dan (3) pemanfaatan potensi wisata alam dan budaya (BTNGMb 2014). Di kawasan TNGMb, tutupan hutan telah mencapai tingkat yang rendah. Menurut data dari Balai Penelitian Kehutanan Solo pada tahun 2007, kawasan hutan hanya mencakup 30% dari total luas TNGMb. Hal ini terutama disebabkan oleh aktivitas penduduk yang secara ilegal mengumpulkan kayu untuk kayu bakar dan arang, serta terjadinya kebakaran hutan. Rata-rata laju deforestasi pada periode 1991-2007 adalah 3% per tahun, sedangkan tutupan hutan menurun sebesar 49,86% selama periode tersebut (Dewi 2009). Sementara itu, untuk periode 2001-2013, deforestasi di kawasan TNGMb adalah 2,29% per tahun (Alkaf *et al.* 2014).

Dinamika penutupan lahan sebelum dan setelah TNGMb resmi menjadi pengelola kawasan dapat dibandingkan untuk melihat bagaimana pengelolaan konservasi dilakukan (Wiratno 2012). Mandat kawasan TNGMb sebagai daerah tangkapan air, habitat flora dan fauna, serta wisata alam dan budaya sangat terkait dengan perubahan penutupan lahan ini. Oleh karena itu, perlu dilihat seberapa besar kerentanan terhadap perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb sehingga dapat digunakan sebagai masukan dan bahan evaluasi dalam pengelolaan kawasan TNGMb di masa mendatang.

Penggunaan citra satelit dan algoritma untuk mempelajari dinamika penutupan lahan telah banyak digunakan (Özdogan 2016; Shimizu *et al.* 2019b; Venkatappa *et al.* 2019). Baru-baru ini, metode yang menggunakan *Google Earth Engine* (GEE) dalam proses klasifikasi semakin berkembang (Mutanga dan Kumar 2019). Penelitian terkait dinamika perubahan penutupan lahan menggunakan GEE antara lain dilakukan di kawasan padang rumput (Xie *et al.* 2019), cagar alam (Tsai *et al.* 2019), kawasan daerah aliran sungai Vu Gia - Thu Bon (Nguyen *et al.* 2020), kawasan hutan bambu (Zhang *et al.* 2019), Kamboja (Venkatappa *et al.* 2019), kawasan padang rumput dan pakan ternak di Brasil (Parente *et al.* 2019), kawasan bekas kebakaran hutan (Quintero *et al.* 2019), kawasan lahan basah pesisir (Farda 2017), kawasan pertambangan (Jena dan Pradhan 2019), dan kawasan hutan Indonesia (Fadli *et al.* 2019). Dalam penelitian ini, tujuannya adalah untuk menghasilkan citra satelit berkualitas baik dan melakukan klasifikasi pembelajaran mesin menggunakan Platform GEE untuk mengklasifikasikan penutupan lahan di TNGMb serta menganalisis dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb dari tahun 1995 hingga saat ini.

4.2 Metode

Penelitian ini memetakan perubahan penutupan lahan di platform GEE menggunakan algoritma klastering terawasi dan memanfaatkan seluruh koleksi citra Landsat 5, 7, dan 8 dari tahun 1995 hingga 2021. Penelitian ini juga menggunakan data Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) dengan resolusi spasial 30 m x 30 m untuk mengidentifikasi penutupan lahan (Farr *et al.* 2007). Dataset dipilih secara langsung dan diproses di platform GEE. Citra-citra ini dianalisis menggunakan produk *reflectance Tier 1 Surface Reflectance* (SR) untuk area penelitian dengan tampilan citra multi-waktu dari tahun 1995 hingga 2021. Area TNGMb dan daerah penyangganya, yang terdiri dari 36 desa di sekitar area TNGMb, termasuk dalam area penelitian. Untuk membuat citra komposit bebas awan berdasarkan cakupan awan saat ini dan kondisi iklim, penelitian ini memilih metode pemrosesan data yang melibatkan ketersediaan foto komposit dengan menginterseksi wilayah penelitian selama tiga tahun (Zhang dan Zhang 2020). Masking awan menggunakan Quality Assessment band (BQA) dan filter statistik berdasarkan piksel (yaitu, median) dilakukan pada citra reflectance TOA Landsat 8 sebelum analisis lebih lanjut di GEE. Karena kekhawatiran tentang tutupan awan di wilayah tropis yang lembab, penelitian ini juga melakukan analisis waktu tunda rata-rata bergerak selama 1 tahun untuk pengumpulan gambar guna membangun periode terbaru dari Landsat 8 (Condron *et al.* 2020).

Setiap tahun, rentang waktu antara 1 April hingga 30 November dipilih untuk mengurangi dampak musim hujan dan meningkatkan tutupan awan pada hasil klasifikasi. Lima koleksi gambar dibuat untuk setiap koleksi gambar untuk mengisi



kekosongan data berdasarkan ketersediaan citra yang telah difilter. Mereka adalah tahun 1995, 2001, 2007, 2014, dan 2020. Piksel median dari seluruh koleksi citra Landsat digunakan untuk menggambarkan setiap node waktu, bersama dengan tahun sebelumnya dan tahun setelahnya, sebagai tiga tahun yang diintegrasikan ke dalam satu mosaik. Analisis dinamika perubahan penutupan lahan dilakukan setelah pra-pemrosesan dan normalisasi gambar, menggunakan dataset referensi, mengklasifikasikan penutupan lahan, dan mengevaluasi ketepatan klasifikasi.

Koleksi citra yang telah difilter oleh masker awan dan rentang tanggal terbatas dipilih untuk pita multispektral. Selain itu, empat transformasi spektral diproses, yaitu *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (West *et al.* 2019; Zhang dan Zhang 2020), *Enhanced Vegetation Index* (EVI) (Huete *et al.* 2002), *Normalized Band Ratio* (NBR) (Quintero *et al.* 2019), dan *Modified Soil-adjusted Vegetation Index* (MSAVI) (Tsai *et al.* 2018).

Tabel 4.1 Deskripsi kategori penutupan lahan

No	Penutupan lahan	Deskripsi
1	Hutan pinus	Tutupan vegetasi berupa hutan yang terdiri dari satu jenis pohon pinus
2	Hutan campuran	Tutupan vegetasi berupa hutan yang terdiri dari lebih dari satu jenis pohon
3	Semak, rumput	Formasi atau struktur vegetasi berupa kelompok rumput dan semak dengan tinggi antara 50 cm hingga 2 m, yang didominasi oleh vegetasi berkayu, diselingi dengan pohon yang sangat pendek dengan tinggi ≤ 5 m
4	Lahan terbangun	Area yang telah mengalami penggantian penutupan lahan alami atau semi-alami dengan penutupan lahan buatan yang biasanya kedap air, baik permanen maupun semi-permanen, digunakan untuk pemukiman atau fasilitas lainnya
5	Pertanian	Lahan kering yang ditanami tanaman musiman yang produksinya dikonsumsi segar
6	Area terbuka	Lahan yang tidak tertutup vegetasi

Sumber: (BSN 2014) dengan modifikasi

Penelitian ini menggunakan enam kategori penutupan lahan berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI 7645 1:2014) yang disajikan dalam Tabel 4.1. Untuk kelas hutan, mereka dibagi menjadi dua, yaitu hutan pinus dan hutan campuran. Hal ini dilakukan untuk mendapatkan informasi tentang dinamika penutupan lahan hutan pinus yang merupakan tanaman utama ketika Perhutani mengelola Gunung Merbabu. Kategori penutupan lahan ini digunakan untuk menentukan dataset referensi. Dataset referensi ini diperoleh melalui interpretasi visual citra penginderaan jauh, peta RBI, data plot Perhutani, data dari aplikasi SIMERU selama tahun 2019-2021, dan survei lapangan yang dilakukan selama tahun 2020-2021. Titik referensi ditentukan untuk setiap penutupan lahan pada setiap titik waktu pada tahun 1995, 2001, 2007, 2014, dan 2020. Data referensi dilakukan dengan pengambilan sampel acak berstrata dengan mempertimbangkan klasifikasi penutupan lahan yang ditentukan. Pada tingkat piksel citra Landsat, nilai

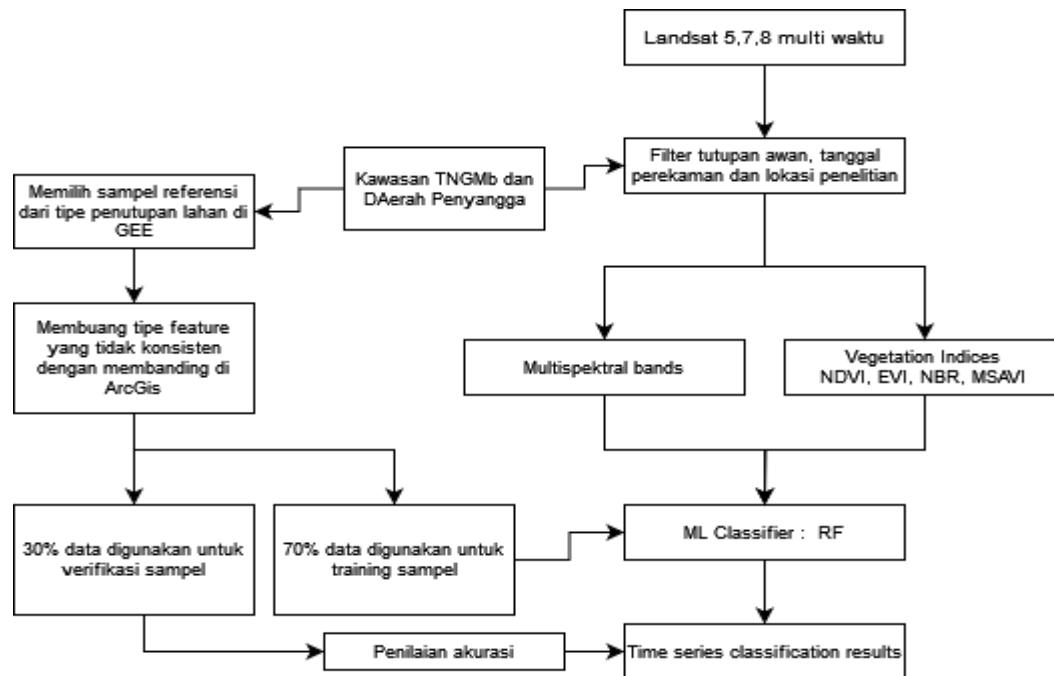
citra input yang sesuai untuk sampel diekstraksi. Pendekatan pencarian grid dan validasi silang digunakan untuk mengoptimalkan parameter classifier dan menjamin kecocokan model.

Data sampel dipilih secara acak dan dibagi menjadi dua kelompok: pelatihan (sekitar 70%) dan pengujian/verifikasi (sekitar 30%). Setiap kelas memilih sampel untuk menjaga proporsi kelas. Sampel pelatihan digunakan untuk menguji interaksi beberapa parameter secara sistematis. Set sampel uji sebesar 30% yang disisihkan untuk kinerja model yang diperkirakan kemudian digunakan untuk mengevaluasi model yang telah dilatih. Parameter classifier ideal adalah set parameter yang menghasilkan akurasi pengujian optimal.

Pada platform GEE, penelitian ini menerapkan klasifikasi pembelajaran mesin menggunakan algoritma terawasi. GEE mencakup sepuluh algoritma klasifikasi untuk memperkirakan klasifikasi berbasis piksel, termasuk decision tree, CART, *RandomForest* (RF), *Support Vector Machine* (SVM), *Gradient Tree Boost* (GTB), *Maxent*, *Naive Bayes*, dan *minimum distance* (Condro *et al.* 2020). Penelitian ini menggunakan empat algoritma: RF, CART, SVM, dan GTB. Jumlah pohon keputusan dan karakteristik pada setiap node untuk pemisahan adalah penting dalam model RF untuk hasil klasifikasi. Untuk menemukan model optimal dari berbagai parameter klasifikasi RF berdasarkan akurasi keseluruhan dan koefisien kappa, classifier RF dengan berbagai pohon digunakan dalam pekerjaan ini. Pohon klasifikasi diuji menggunakan parameter jumlah pohon (N) yang berbeda, yaitu n=100 dan n=500. Di antara semua algoritma yang ada, algoritma RF menghasilkan akurasi yang baik dan dapat berjalan efektif pada set data besar (Shetty 2019). Pita spektral asli (pita B1-B5 dan B7 untuk Landsat 5/7 dan B2-B6 dan B8 untuk Landsat 8) dan empat indeks normalisasi yang dihitung adalah set data berikutnya yang dimasukkan ke dalam model algoritma (Zhang dan Zhang 2020). Citra satelit resolusi tinggi dan produk penutupan lahan yang bersertifikat digunakan untuk membandingkan klasifikasi berbagai jenis penutupan lahan menggunakan berbagai algoritma; akurasi klasifikasi dapat ditingkatkan dengan memperbaiki sampel.

Uji akurasi dilakukan dengan menggunakan data penutupan lahan multi-sumber yang telah dikonfirmasi, interpretasi visual, dan titik sampel yang dipilih secara acak. Matriks kebingungan dibuat untuk setiap komposit Landsat yang diperoleh untuk melakukan evaluasi akurasi berbasis sampel. Matriks ini mencakup akurasi keseluruhan, koefisien kappa, akurasi pengguna (UA), dan akurasi produser (PA) (Okoro *et al.* 2016; Shetty 2019). Diagram alir berikut menggambarkan masing-masing metode ini (Gambar 4.1).

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



Gambar 4.1 Diagram alir penelitian

4.3 Hasil dan Pembahasan

4.3.1 Penilaian akurasi

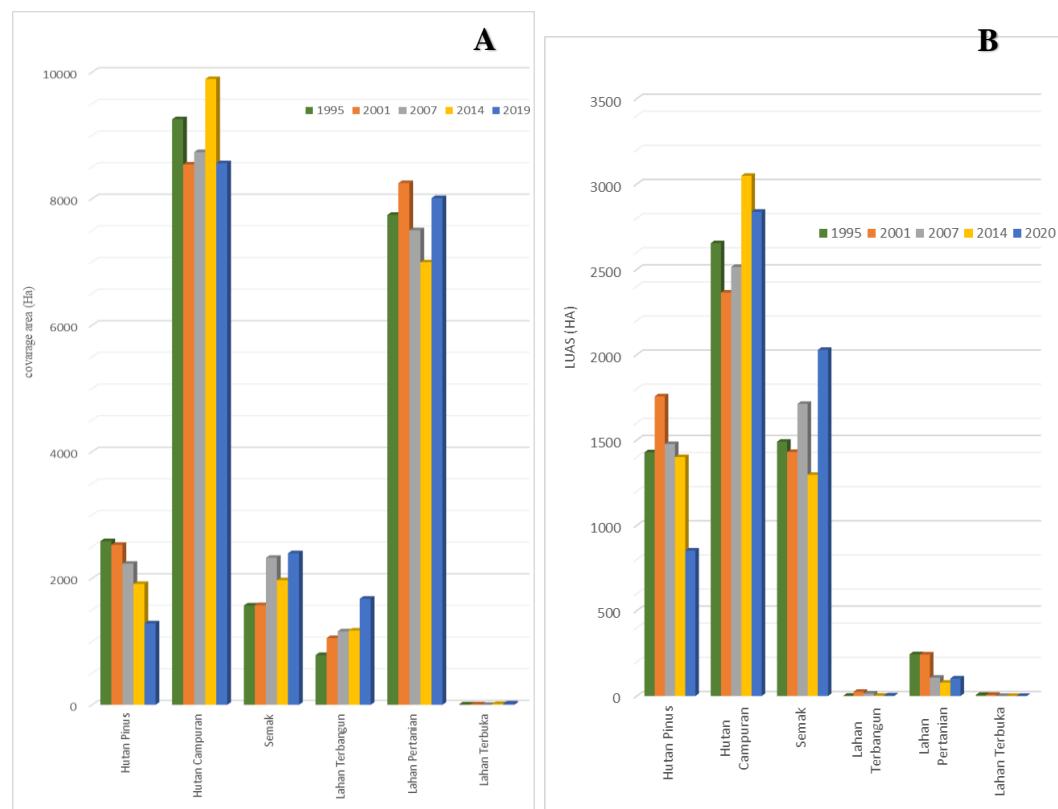
Berdasarkan hasil evaluasi setiap titik waktu, algoritma RF dengan 500 pohon memiliki nilai akurasi tertinggi berdasarkan akurasi keseluruhan dan koefisien kappa (Tabel 4.2). Menurut Belgiu dan Drăgu 2016, yang mengevaluasi penerapan RF dalam penginderaan jauh, disarankan untuk menggunakan 500 pohon. Condro *et al.* 2020 dalam penelitiannya menunjukkan bahwa dengan 100 pohon diperoleh nilai akurasi tertinggi. (Shetty 2019) berpendapat bahwa menambahkan pohon tidak berkontribusi pada prediksi label dan menjadi redundant setelah jumlah pohon tertentu. Penggunaan jumlah pohon yang lebih banyak tidak menjamin hasil klasifikasi yang lebih baik (Belgiu dan Drăgu 2016; Shetty 2019).

Tabel 4.2 Akurasi keseluruhan (*Overall Accuracy - OA*) dan koefisien Kappa (*Kappa Coefficient - KC*) untuk klasifikasi penutupan lahan menggunakan algoritma yang berbeda.

Tahun	RF 500		RF100		SVM		CART		GTB	
	OA (%)	KC (%)								
1995	0,854	0,813	0,847	0,805	0,79	0,732	0,783	0,725	0,834	0,788
2001	0,929	0,91	0,929	0,91	0,801	0,743	0,943	0,928	0,922	0,9
2007	0,957	0,946	0,957	0,946	0,906	0,881	0,902	0,875	0,949	0,935
2014	0,978	0,971	0,976	0,966	0,888	0,851	0,957	0,943	0,971	0,962
2020	0,871	0,837	0,88	0,848	0,775	0,716	0,819	0,77	0,88	0,848

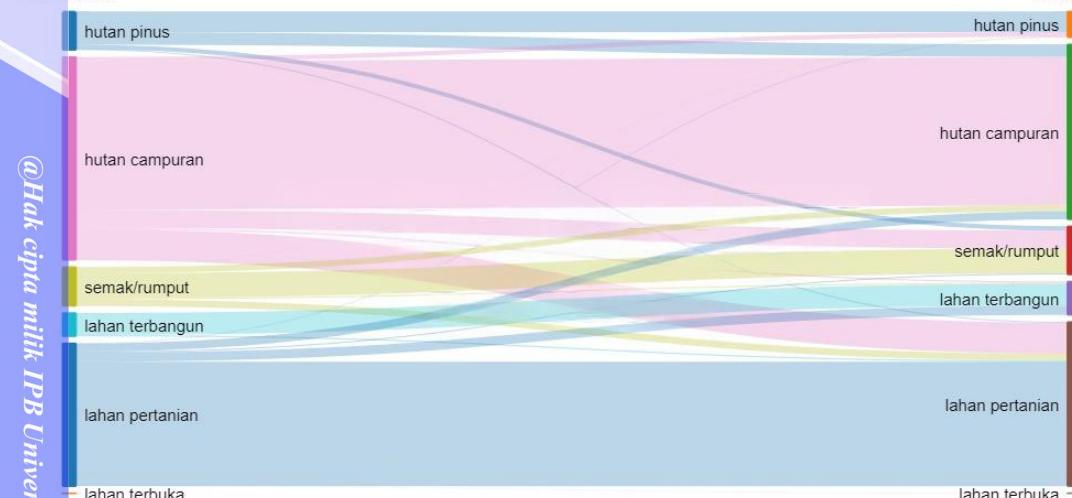
4.3.2 Distribusi dan dinamika penutupan lahan

Dari hasil perhitungan luas penutupan lahan di platform GEE di area penelitian, yaitu wilayah TNGMb dan area penyanga, hasil kelas lahan hutan campuran yang mendominasi penutupan lahan adalah 42,17%, 38,91%, 39,80%, 45,06%, dan 39,00% pada tahun 1995, 2001, 2007, 2014, dan 2020 (Gambar 4.2A). Kelas hutan campuran juga mendominasi ketika dilihat dari wilayah TNGMb saja, di mana rata-rata dari tahun 1995 hingga 2020 adalah 46,075%. Pada Gambar 4.2A, terlihat bahwa kelas hutan pinus terus menurun, dan kelas lahan terbangun meningkat pada setiap titik waktu antara tahun 1995 dan 2020, masing-masing sebesar 786,704 Ha, 1054,466 Ha, 1161,100 Ha, 1173,857 Ha, 1677,176 Ha pada tahun 1995, 2001, 2007, 2014, dan 2020.



Gambar 4.2 Luas Cakupan Penutupan Lahan di Area Penelitian (A) dan area TNGMb (B)

Kelas hutan pinus di wilayah TNGMb menurun pada tahun 2020 dibandingkan tahun 1995 sebesar 575,766 Ha (40,32%). Pada tahun 2001 kelas hutan pinus meningkat sebesar 328,029 Ha namun terus menurun luasnya hingga tahun 2020. Di wilayah TNGMb, kelas penutupan lahan yang meningkat pada tahun 2020 dibandingkan tahun 1995 adalah kelas semak dan rumput sebesar 538,33 Ha. Peningkatan terbesar terjadi antara tahun 2014 dan 2020 sebesar 732,52 Ha. Kelas penutupan lahan vegetasi (hutan pinus dan hutan campuran) menurun luasnya dari tahun 1995 hingga 2020, meskipun pada tahun 2014 terjadi peningkatan di mana pada tahun 2014 luas kelas penutupan lahan vegetasi adalah 76,38% dari wilayah TNGMb. Kelas penutupan lahan vegetasi ini kemudian menurun pada tahun 2020 sebesar 758,793 Ha, sehingga luas lahan vegetasi pada tahun 2020 adalah 3689,575 Ha (Gambar 4.2B dan Tabel 4.3).



Gambar 4.3 Aliran perubahan penutupan lahan area penelitian tahun 2014 dan 2020

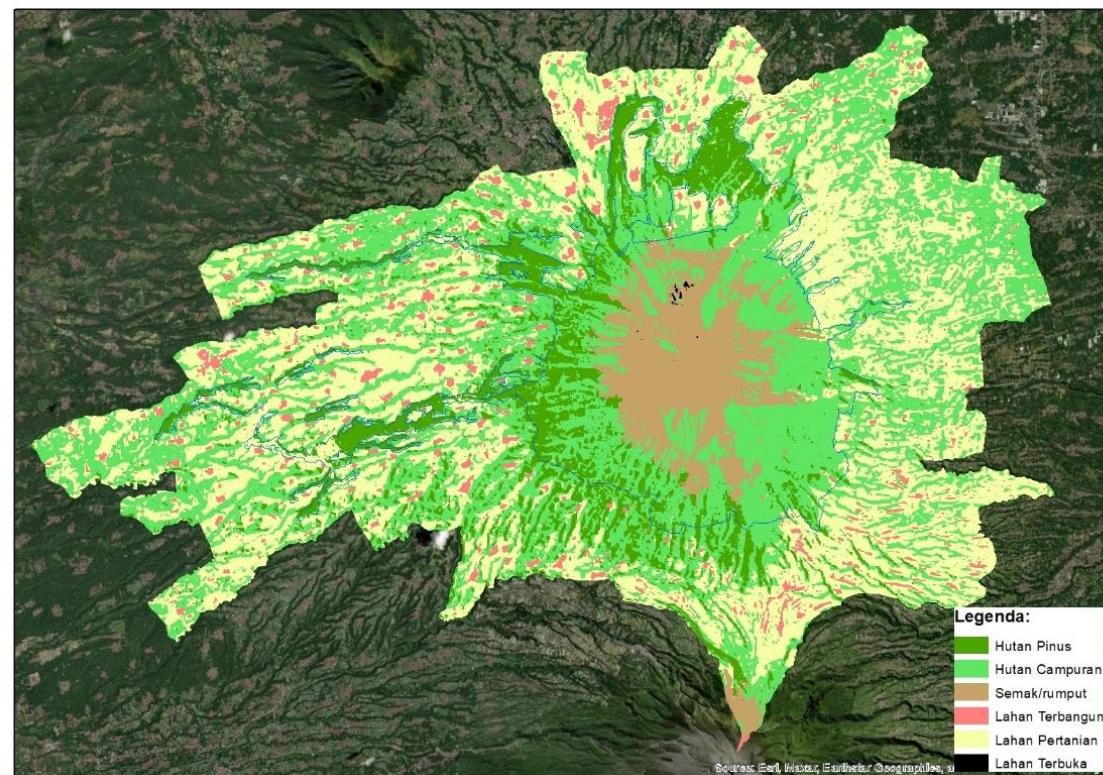
Apabila dilihat perubahan penutupan lahan dari tahun 2014 hingga 2020 yang dapat dilihat pada Gambar 4.3 menggambarkan perubahan yang paling besar yaitu pada kelas hutan campuran yang berubah menjadi kelas lahan pertanian sebesar 1514,14 Ha. Selain berubah menjadi kelas lahan pertanian, kelas hutan campuran juga mengalami perubahan yang cukup besar menjadi kelas semak/rumput sebesar 8,8% dibandingkan pada tahun 2014. Kelas lahan terbangun juga mengalami peningkatan pada tahun 2020 sebesar 447,2 Ha dari kelas lahan pertanian. Kebutuhan akan lahan untuk lahan pertanian juga lahan terbangun yang semakin meningkat ini sejalan dengan peningkatan kepadatan penduduk di area penelitian. Pada tahun 2014 kepadatan penduduk rata-rata di area penelitian sebesar 643 jiwa/Ha, meningkat menjadi 677 jiwa/Ha pada tahun 2020 .

Tabel 4.3 Distribusi Penutupan Lahan di Area Penelitian

Kelas	Cakupan Area (Ha) di TNGMb				
	1995	2001	2007	2014	2020
Hutan Pinus	1427,961	1755,990	1476,336	1399,870	852,195
Hutan Campuran	2653,366	2363,893	2513,944	3048,498	2837,380
Semak, rumput	1489,938	1429,818	1711,660	1295,752	2028,271
Lahan Terbangun	1,502	24,564	14,385	1,404	3,106
Lahan Pertanian	244,573	243,079	107,310	77,931	102,836
Area Terbuka	6,650	6,646	0,355	0,535	0,202
Total	5823,990	5823,990	5823,990	5823,990	5823,990

Kelas	Cakupan Area (Ha) di daerah penyangga				
	1995	2001	2007	2014	2020
Hutan Pinus	1159,172	771,605	752,616	510,155	434,732
Hutan Campuran	6603,027	6176,567	6222,861	6842,151	5723,947
Semak, rumput	79,742	144,863	611,345	673,408	367,857
Lahan Terbangun	785,202	1029,902	1146,715	1172,453	1674,070
Lahan Pertanian	7500,012	8003,959	7393,630	6916,500	7907,117
Area Terbuka	0,011	0,269	0,001	12,499	19,443
Total	16127,166	16127,166	16.127,166	16127,166	16127,166

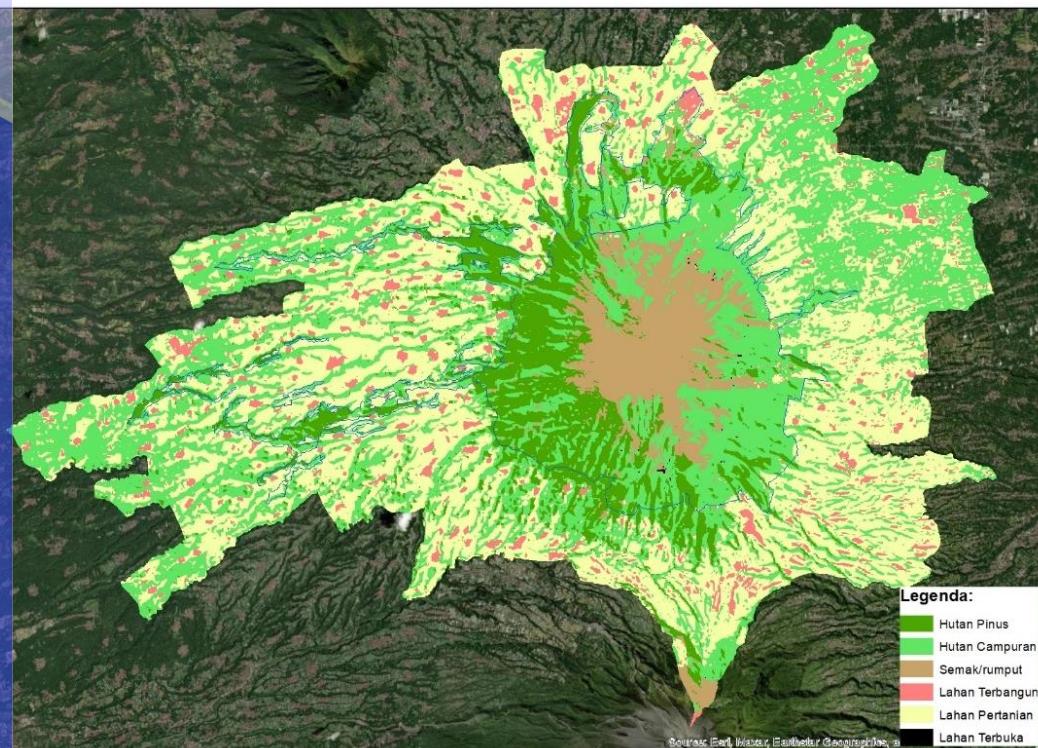
Di area penyangga, kelas lahan pertanian mendominasi dari tahun 1995 hingga 2020, yaitu 46,505%, 49,630%, 45,846%, 42,887%, dan 49,030% (Tabel 4.3). Lahan terbangun di daerah penyangga mengalami peningkatan terus menerus pada setiap titik dari tahun 1995 hingga 2020, yaitu pada tahun 1995 sebesar 785,202 Ha, meningkat menjadi 1674,070 Ha pada tahun 2020 yang dapat dilihat pada Gambar 4.4 sampai dengan Gambar 4.8. Pada peta penutupan lahan (Gambar 4.7), peningkatan kelas lahan terbangun ditemukan di bagian timur area penelitian, pada area ini dibangun beberapa pabrik industri yang juga mendorong peningkatan area pemukiman walaupun lokasinya cukup jauh dari batas kawasan TNGMb. Kelas penutupan lahan vegetasi hutan (hutan pinus dan hutan campuran) di daerah penyangga menurun pada tahun 2020 dibandingkan tahun 2014, yaitu sebesar 1193,627 Ha.



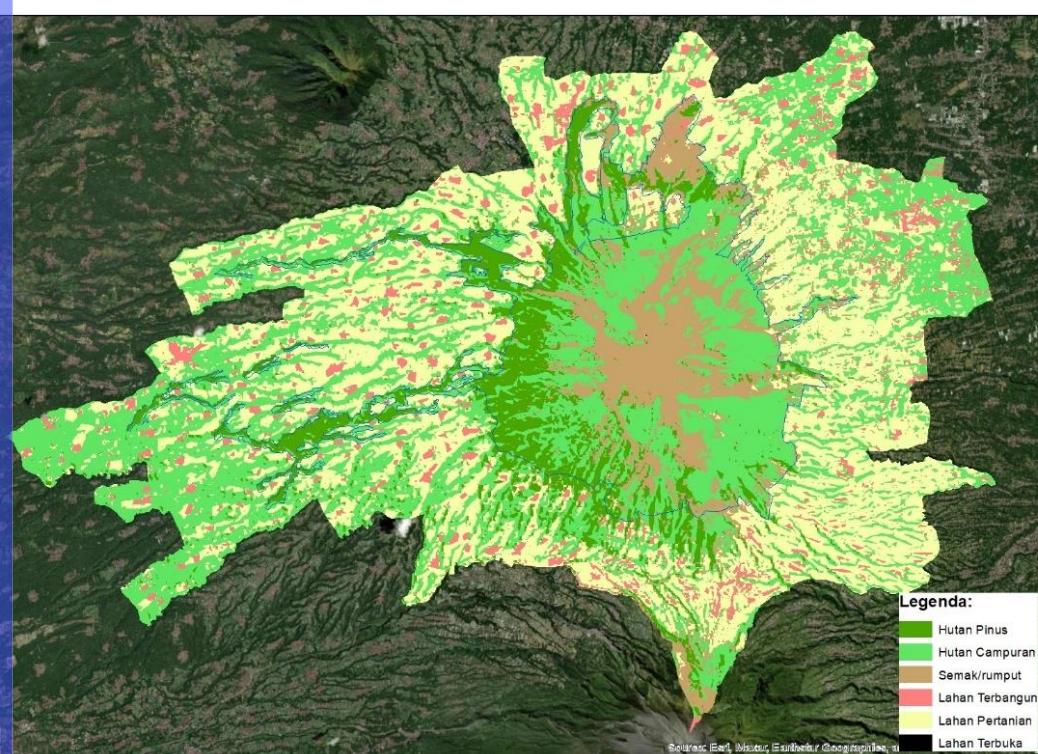
Gambar 4.4 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 1995

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

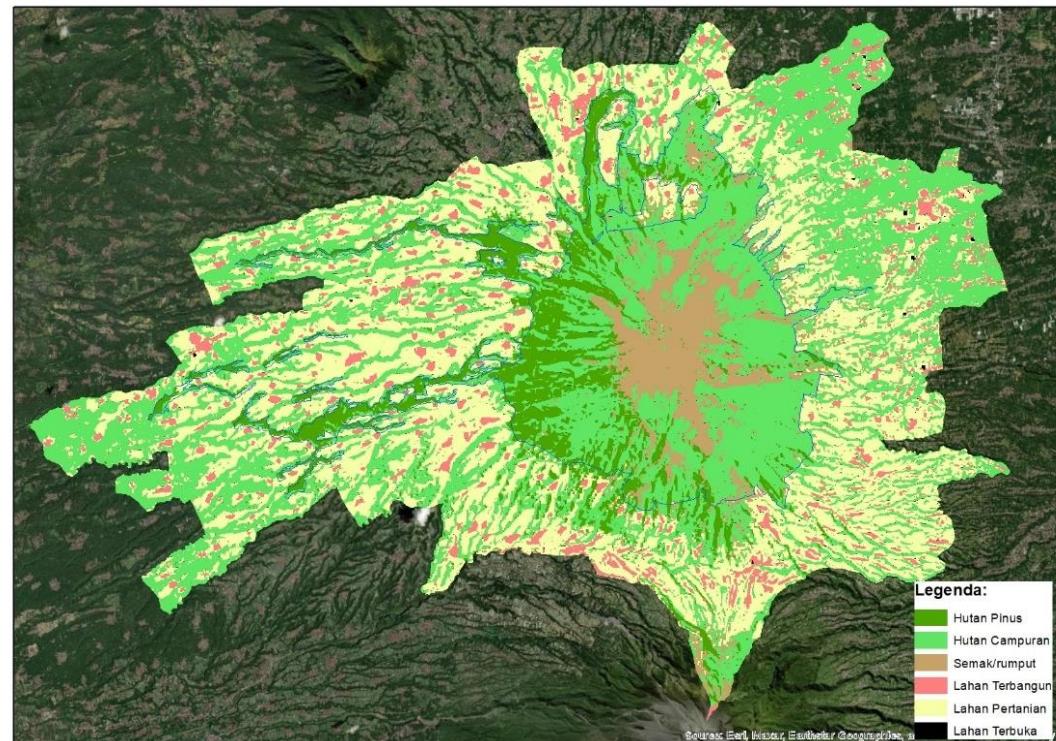
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyeberukkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan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



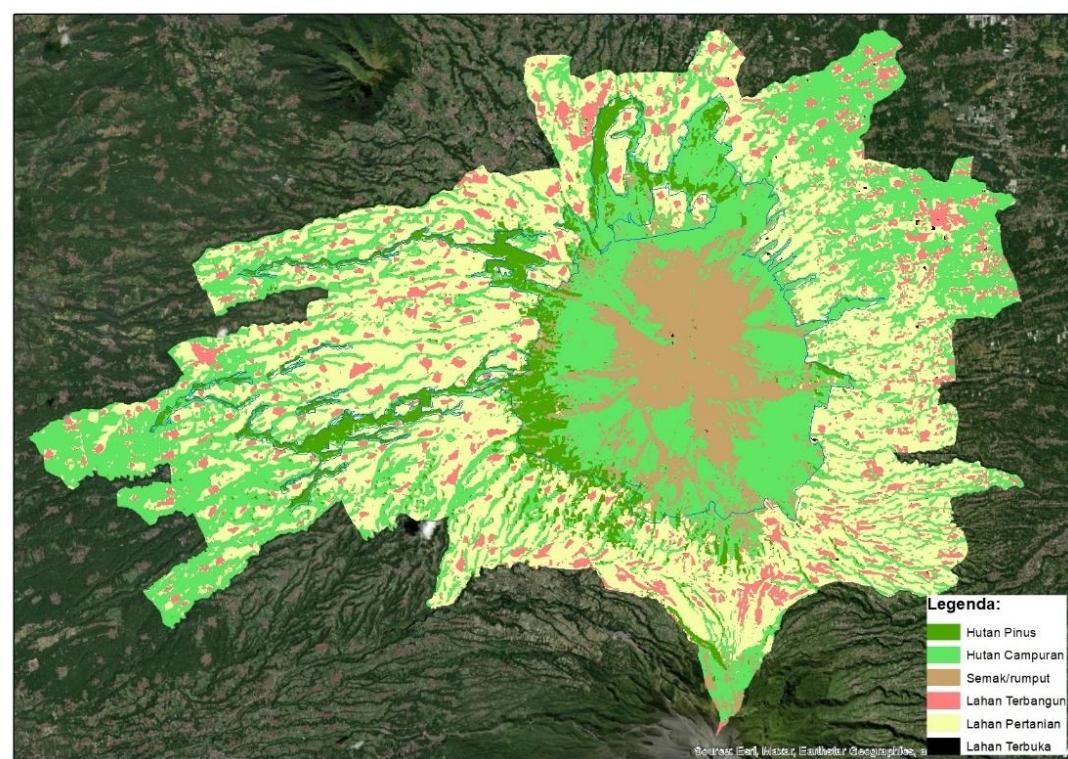
Gambar 4.5 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2001



Gambar 4.6 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2007



Gambar 4.7 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2014



Gambar 4.8 Peta Penutupan Lahan di Area Penelitian Tahun 2020

Penggunaan GEE untuk klasifikasi penutupan lahan telah banyak dilakukan dengan berbagai sumber data satelit, lokasi aplikasi, analisis data dan penggunaan(Kumar dan Mutanga 2018; Tamiminia *et al.* 2020). Klasifikasi



penutupan lahan menggunakan GEE dan time series telah dilakukan dalam beberapa penelitian terbaru dengan tujuan yang sama yaitu menyelidiki perubahan penutupan lahan dan penyebaran perkotaan (Chen *et al.* 2021; Hamud *et al.* 2021; Dubertret *et al.* 2022; Guo *et al.* 2022). Dalam penelitian ini, klasifikasi penutupan lahan dilakukan secara time series untuk melihat dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi di wilayah TNGMb dan area penyanga. Penelitian serupa di lokasi taman nasional yang sebelumnya dikelola oleh Perum Perhutani menunjukkan hasil yang hampir serupa, seperti di Taman Nasional Gunung Halimun Salak, terdapat penurunan luas hutan (Kurniawan *et al.* 2017), di taman nasional Gunung Ciremai juga menunjukkan peningkatan lahan terbuka (Darmawan *et al.* 2017). Penurunan luas hutan di taman nasional ini menjadi bahan bagi pembuat kebijakan dalam mengelola taman nasional. Penurunan luas hutan ini juga terkait dengan penurunan fungsi kawasan hutan, yaitu fungsi sebagai habitat (tempat tinggal bagi keanekaragaman hayati), regulator, produksi dan informasi (Prasetyo 2017), sebagai regulator pengelolaan air seperti berkurangnya kapasitas penyimpanan air di tanah, meningkatnya erosi dan sedimentasi (Romlah *et al.* 2018; Salim *et al.* 2019; Wasis *et al.* 2020).

Penutupan lahan di daerah penelitian menunjukkan meningkatnya permintaan lahan manusia, dengan lahan pertanian dan lahan terbangun yang terus berkembang setiap tahunnya. Banyak penelitian tentang perubahan lahan dan manusia melaporkan hal yang sama (Dewi 2009; Alkaf *et al.* 2014). Pada tahun 2020, lahan pertanian dan lahan terbangun di daerah penyanga akan mencakup sekitar 60% dari area penyanga, dengan 38,188% tertutup vegetasi. Kebutuhan lahan di sekitar wilayah TNGMb harus menjadi perhatian bagi manajemen karena meningkatnya permintaan ruang dari masyarakat akan memberi tekanan pada wilayah TNGMb, terutama untuk lahan pertanian.

Dinamika perubahan penutupan lahan di dalam wilayah TNGMb dapat dilihat pada periode wilayah tersebut dikelola oleh Perhutani dan setelah dikelola oleh Kantor TNGMb, dalam penelitian ini titik waktu yang digunakan adalah 1995-2007 dan 2007-2020. Luas kelas hutan pinus pada tahun 2001 meningkat dibandingkan tahun 1995, yaitu sebesar 328,029 Ha. Hal ini bisa terjadi karena ketika dikelola oleh Perhutani, kegiatan penanaman pinus dilakukan secara intensif di petak hutan produksi terbatas, dan tanaman yang ditanam terus dipelihara dan dirawat agar tetap hidup. Ketika wilayah tersebut dikelola oleh TNGMb, luas hutan pinus menurun karena kondisi pohon pinus yang semakin tua sehingga rentan tumbang. Keberadaan hutan pinus ini perlu mendapat perhatian bagi pengelola kawasan TNGMb karena selain menjadi bagian penting dari ekosistem, kondisi pohon pinus yang semakin tua dan rawan tumbang dapat mengancam keselamatan pengunjung wisata dan masyarakat serta mengganggu fungsi kawasan sebagai wilayah konservasi. Mengingat status kawasan TNGMb sebagai area konservasi, aktivitas penebangan tidak diperbolehkan sehingga diperlukan pendekatan yang lebih bijak dan berbasis ekologi, seperti melakukan kajian mendalam terkait upaya pengkayaan tanaman di bawah tegakan pinus dan kajian mengenai kegiatan penjarangan di kawasan konservasi. Kajian ini juga harus mempertimbangkan antropogenik sehingga dapat dirancang strategi mitigasi yang efektif tanpa melanggar prinsip konservasi.

Selain itu, peristiwa bencana seperti kebakaran, penebangan liar, dan angin topan menyebabkan luas hutan pinus menurun. Pada tahun 2019, angin puting beliung menyebabkan pohon pinus tumbang seluas sekitar 154,65 Ha (BTNGMb

2019a). Di sisi lain, TNGMb tidak dapat menanam secara homogen hanya dengan satu jenis tanaman (pohon pinus). Terjadinya kebakaran besar pada tahun 2015 dan 2018, yaitu 610 Ha dan 457 Ha (BTNGMb 2019a), menyebabkan luas semak-semak semakin meluas. Dinamika perubahan penutupan lahan sangat penting bagi pengelola wilayah TNGMb sebagai bahan evaluasi dan masukan untuk kebijakan masa depan, terutama tantangan peningkatan penutupan lahan vegetasi agar mandat fungsi TNGMb dapat dijalankan dengan lebih baik terutama sebagai daerah tangkapan air bagi masyarakat sekitar.

4.4 Kesimpulan

Penggunaan GEE dalam klasifikasi penutupan lahan di area penelitian telah berhasil menghasilkan peta kelas penutupan lahan dengan berbagai titik waktu sehingga dapat terlihat dinamika perubahan penutupan lahan mulai dari tahun 1995, 2001, 2007, 2014, dan 2020 dengan efektif dengan nilai akurasi yang tinggi. Kelas lahan pertanian dan lahan terbangun meningkat pada tahun 1995 sebesar 35,28% dan 3,58% menjadi sebesar 36,49% dan 7,64% pada tahun 2020. Di dalam area TNGMb, luas lahan vegetasi (hutan pinus dan hutan campuran) berkurang dari tahun 1995 sebesar 70% menjadi 63,35% pada tahun 2020. Data dan informasi mengenai dinamika perubahan penutupan lahan di dalam area TNGMb dan area penyangga yang diperoleh dengan cepat dan akurat melalui GEE penting untuk diketahui sebagai bahan evaluasi dan masukan dalam kebijakan pengelolaan area.



V. EFEK TEKANAN TERHADAP PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN DI TAMAN NASIONAL GUNUNG MERBABU BERDASARKAN ANALISIS JEJAK MANUSIA DAN FRAGMENTASI

5.1 Pendahuluan

Area konservasi, termasuk Taman Nasional, sangat penting dalam melindungi keanekaragaman hayati dengan mengurangi aktivitas manusia (Tan *et al.* 2022). Kemampuan untuk melihat pola spasial transformasi lanskap di area konservasi adalah salah satu hal penting dalam perencanaan konservasi. Salah satu pola transformasi ini adalah jejak manusia, yang mengintegrasikan informasi tentang akses manusia, perubahan penggunaan/penutupan lahan, pemukiman, dan pengembangan infrastruktur energi (Trombulak *et al.* 2010). Peta jejak manusia memberikan informasi tentang di mana manusia memberikan tekanan pada sistem alam dan mengubahnya dari keadaan alaminya. Mereka juga memberikan informasi tentang di mana tekanan ini tidak ada dan ekosistem cenderung beroperasi lebih alami. Peta jejak manusia awalnya didefinisikan sebagai jumlah dari pengaruh manusia yang berkelanjutan di permukaan tanah (Sanderson *et al.* 2002; Venter *et al.* 2016). Saat ini, analisis jejak manusia telah digunakan sebagai indikator prediktif untuk mengukur dan memahami dampak yang lebih luas pada spesies di dalam area konservasi, termasuk pergerakan spesies (Tucker *et al.* 2018), perilaku (Gaynor *et al.* 2018), dan penggunaan ruang (Di Marco dan Santini 2015). Selain spesies, jejak manusia juga digunakan untuk memahami dampak manusia pada bioma dunia (Sanderson *et al.* 2002; Venter *et al.* 2016), secara regional (Woolmer *et al.* 2008; Trombulak *et al.* 2010), nasional/negara (Vázquez-González *et al.* 2014; Li *et al.* 2018; Correa Ayram *et al.* 2020; Karimi dan Jones 2020; Dwiyahreni *et al.* 2021; Martinuzzi *et al.* 2021). Penggunaan jejak manusia untuk mengevaluasi area konservasi juga banyak digunakan baik untuk perencanaan manajemen maupun untuk mengevaluasi efektivitas manajemen (Geldmann *et al.* 2014; Jones *et al.* 2018; Karimi dan Jones 2020; Dwiyahreni *et al.* 2021).

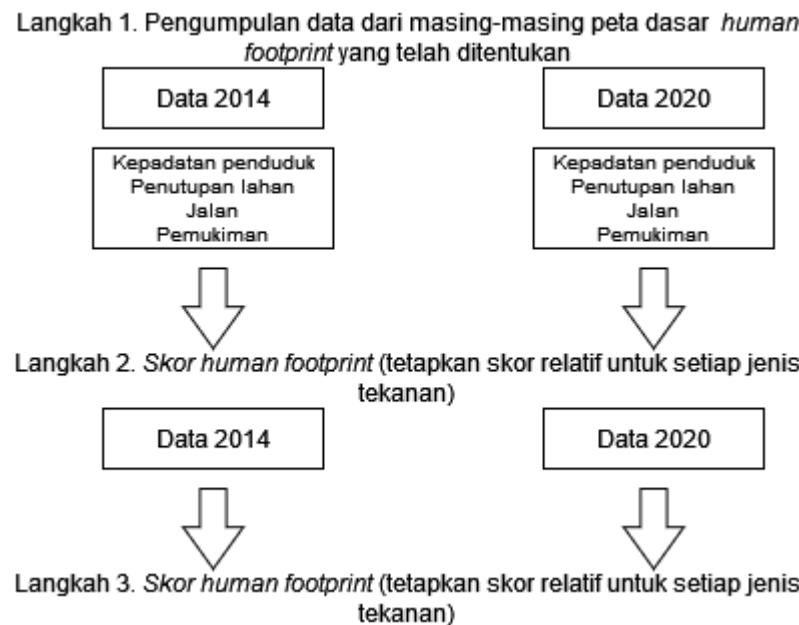
Penelitian ini mengukur tingkat tekanan yang disebabkan oleh aktivitas masyarakat di sekitar Taman Nasional Gunung Merbabu pada tahun 2014 dan 2020 serta pengaruhnya terhadap perubahan penutupan lahan di dalam area Taman Nasional yang dinilai dari beberapa atribut metrik lanskap (Oliveira *et al.* 2020). Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu di tengah Pulau Jawa memiliki luas sekitar 5.820,49 ha. Area ini dikelilingi oleh lahan milik masyarakat yang berbatasan langsung dengan area Taman Nasional Gunung Merbabu. Menurut data BPS pada tahun 2020, sekitar 130.406 orang menempati 36 desa, yang termasuk dalam desa penyangga area Taman Nasional Gunung Merbabu dan menempati area seluas \pm 16.127,167 ha (Ardiaristo *et al.* 2024b). Area Taman Nasional Gunung Merbabu menghadapi tekanan populasi yang relatif tinggi, di mana ketergantungan dan intensitas penggunaan rumput dan kayu bakar oleh masyarakat di area Taman Nasional Gunung Merbabu relatif tinggi (Gunawan dan Prasetyo 2013; Aissiyah *et al.* 2019).

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh tekanan masyarakat terhadap perubahan penutupan lahan di area Taman Nasional Gunung Merbabu.

Penelitian ini menggunakan nilai Jejak Manusia (Human Footprint, HF) yang awalnya dikembangkan oleh (Sanderson *et al.* 2002) dan dimodifikasi oleh (Venter *et al.* 2016). Dari aspek tekanan manusia yang digunakan oleh Sanderson dan Venter (Sanderson *et al.* 2002; Venter *et al.* 2016; Mammides 2020; Yang *et al.* 2022), kami memodifikasinya untuk mempertimbangkan situasi aktual di Taman Nasional Gunung Merbabu dan ketersediaan data. Dari penelitian yang dilakukan oleh (Dwiyahreni *et al.* 2021), yang mengukur nilai Jejak Manusia di Taman Nasional di Indonesia menggunakan empat aspek tekanan, yaitu populasi manusia, penggunaan lahan termasuk pemukiman, jalan, dan akses manusia, dalam penelitian ini ditambahkan aspek cahaya pada malam hari untuk mengukur nilai jejak manusia. Resolusi spasial yang digunakan dalam penelitian ini adalah 30x30 m, mengingat pengukuran dilakukan di area yang lebih kecil dibandingkan dengan pengukuran nilai jejak manusia global (Woolmer *et al.* 2008; Venter *et al.* 2016; Tan *et al.* 2022).

5.2 Metode

Penelitian ini menggunakan metode yang dikembangkan oleh (Sanderson *et al.* 2002; Venter *et al.* 2016), kami menghitung nilai indeks pengaruh manusia dengan resolusi spasial 30x30 m untuk menghasilkan peta jejak manusia. Metode untuk membuat peta jejak manusia mengikuti diagram pada Gambar 5.1 menggunakan data tekanan untuk tahun 2014 dan 2020 di area Taman Nasional Gunung Merbabu dan area penyangganya.



Gambar 5.1 Diagram alir untuk membuat peta jejak manusia

Tahap pertama untuk menentukan nilai jejak manusia secara spasial adalah mengumpulkan data tentang jenis aktivitas manusia yang mempengaruhi perubahan penutupan lahan di area konservasi. Tabel 5.1 menampilkan modifikasi klasifikasi aktivitas manusia dan kategori tekanan. Kategori sub-tekanan dan nilai skor dimodifikasi berdasarkan kondisi area konservasi Taman Nasional Gunung



Merbabu dan ketersediaan data (Venter *et al.* 2016; Dwiyahreni *et al.* 2021). Analisis indeks pengaruh manusia berfokus pada efek langsung dari infrastruktur dan populasi manusia pada wilayah dengan data geografis dan bentuk spasial yang tersedia (Sanderson *et al.* 2002). Untuk dapat menggabungkan data tekanan, perlu disajikan dalam satu proyeksi peta dan resolusi spasial yang sama yaitu 30 x 30 m dengan batas yang sama dan konsisten, menstandarkan setiap set data tekanan dalam skor standar yang sama yang mencerminkan kontribusi perkiraan terhadap pengaruh manusia pada skala dari 0 hingga 10, di mana 0 mewakili pengaruh manusia paling sedikit dan 10 mewakili pengaruh paling besar.

Tabel 5.1 Skor relatif aspek tekanan yang digunakan dalam analisis jejak manusia

Tekanan	Sub tekanan	Skor	Sumber data
Kepadatan populasi		0-10	BPS, Skor tekanan= $3.333 * \log (\text{kepadatan populasi}+1)$, IDW
Penutupan lahan	Lingkungan terbangun/pemukiman	10	Peta penutupan lahan [18]
	Pertanian	9	
	Perkebunan	9	
	Penggunaan lahan lainnya (lahan terbuka, semak belukar, rawa semak)	6	
	Habitat alami (hutan/vegetasi)	0	
Jalan	Jalan nasional	8	Jarak Euclidean per 500 meter dari jalan
	Jalan provinsi	6	
	Jalan kabupaten	4	
	Jalan lainnya	2	
Lampu malam hari (NTL)		1-10	<i>Equal quintile bins</i> <i>Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS)</i> <i>Day/Night Band (DNB)</i>

Penjelasan mengenai akuisisi setiap data tekanan dari indeks pengaruh manusia sesuai dengan Tabel 5.1 sebagai berikut:

1. Kepadatan populasi adalah salah satu faktor yang mempengaruhi pengaruh manusia terhadap lingkungan dan wilayah (Forester dan Machlis 1996). Penggunaan kepadatan populasi untuk data tekanan manusia juga digunakan oleh (Sanderson *et al.* 2002; Venter *et al.* 2016; Dwiyahreni *et al.* 2021; Mu *et al.* 2022; Tan *et al.* 2022). Kami memperoleh data kepadatan populasi untuk setiap desa dari data populasi yang dirilis oleh BPS pada tahun 2014 dan 2020. Untuk memetakan kepadatan populasi dari data BPS, kami menggunakan metode IDW (*Inverse Distance Weight*) menggunakan titik ibu kota desa dan kepadatan populasi (Nasiri *et al.* 2022) dan resolusi spasialnya adalah 30 x 30 m. Penutupan lahan dapat menggambarkan berbagai aktivitas manusia di mana setiap penutupan lahan memiliki tekanan lingkungan yang berbeda (Tan *et al.* 2022). Dalam penelitian ini, skor penutupan lahan dihitung untuk setiap penutupan lahan di area penelitian (Ardiaristo *et al.* 2022) di mana skor 0 adalah untuk pengaruh manusia paling sedikit, sedangkan skor 10 adalah untuk

pengaruh terbesar. Skor tertinggi 10 diberikan untuk lingkungan terbangun/pemukiman karena merupakan area yang dibangun oleh manusia dan tidak menyediakan habitat yang cocok untuk konservasi spesies (Venter *et al.* 2016). Demikian pula, untuk lahan pertanian dan perkebunan, pengaruh aktivitas manusia dalam mengolah lahan cukup besar. Dalam menghitung skor, peta penutupan lahan dikonversi menjadi raster dengan resolusi spasial 30x30 m.

3. Jalan adalah infrastruktur manusia yang berguna untuk menghubungkan satu tempat ke tempat lain, yang dapat langsung mengubah dan memfragmentasi habitat (Venter *et al.* 2016; Hirsh-Pearson *et al.* 2022). Keberadaan jalan dapat membuka akses bagi manusia untuk memasuki lahan dan juga sepanjang jalan, menciptakan efek tepi konversi habitat. Kami menggunakan peta jalan dari peta RBI dan jalur pendakian dengan memperkirakan pengaruh manusia sejauh 500-meter ke kanan dan kiri jalan. Setiap jenis jalan memberikan tingkat pengaruh yang berbeda (Tan *et al.* 2022). Peta jalan dan skor juga dikonversi menjadi peta raster dengan resolusi spasial 30x30 m.
 4. NTL yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) yang dikembangkan oleh *Earth Observation Group, Payne Institute for Public Policy, Colorado School of Mines* (Elvidge *et al.* 2017), yang diproses menggunakan Google Earth Engine/GEE dengan membatasi sesuai dengan area penelitian untuk tahun 2014 dan 2020. Data yang diunduh dari GEE kemudian akan diskalakan dari 0-10 menggunakan pendekatan equal quantile (Venter *et al.* 2016; Hirsh-Pearson *et al.* 2022).

Setelah menentukan sub-tekanan pada setiap piksel, nilai ditampilkan dan ditambahkan untuk membuat nilai indeks pengaruh manusia. Nilai total setiap piksel kemudian dinormalisasi sehingga berkisar dari 0 hingga 100 untuk memperoleh nilai jejak manusia, memungkinkan pembuatan peta jejak manusia. Persamaan yang digunakan untuk standarisasi adalah

$$HFI = \frac{(HII_i - HII_{min})}{(HII_{max} - HII_{min})} \times 100 \dots [1]$$

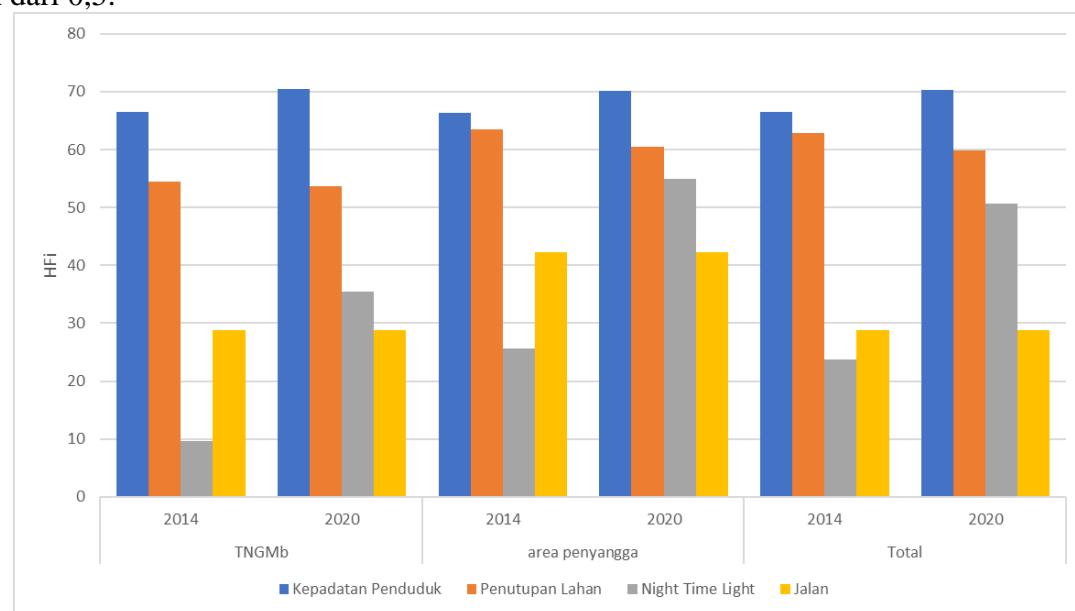
di mana i mewakili piksel pada tahun yang dihitung. Pada tahap akhir, analisis validasi dilakukan oleh [1] di mana penelitian ini menggunakan 100 titik sampel yang diambil dari semua area penelitian. Jika dibandingkan dengan (Venter *et al.* 2016) yang menggunakan 3114 titik sampel untuk memvalidasi peta jejak manusia global di seluruh dunia, dan validasi jejak manusia dari semua taman nasional di Indonesia yang dilakukan oleh (Dwiyahreni *et al.* 2021) yang menggunakan 100 titik sampel sehingga 100 titik sampel yang digunakan untuk validasi dalam penelitian ini dapat dikatakan lebih dari cukup. Evaluasi dilakukan secara visual menggunakan citra satelit resolusi tinggi dari Google Earth untuk memastikan penutupan lahan pada setiap titik sampel. Menurut Tabel 5.1, setiap area sampel titik 30x30 m diinterpretasikan sebagai penutupan lahan dominan ($> 50\%$) dan diberikan skor tekanan ini. Validasi penilaian ditentukan melalui analisis root mean squared error (RMSE) (Willmott dan Matsuura 2005) dan statistik kesepakatan Cohen kappa (Viera dan Garrett 2005) yang umum digunakan dalam analisis spasial klasifikasi penutupan lahan. Model penilaian relatif dianggap valid jika nilai Kappa Statistic > 0.5 . Analisis validasi digunakan untuk data jejak manusia pada tahun 2014 dan 2020, kemudian dilakukan perbandingan terhadap data jejak manusia antara tahun 2014 dan 2020. Analisis pola lanskap penutupan lahan di area penelitian dilakukan melalui analisis patch dengan parameter indeks lanskap yang digunakan, yaitu luas (*Landscape Area/TLA*), jumlah patch (*Number of*

*Patch/NumP), Kepadatan Patch (PD), luas patch (CA), rata-rata luas patch (*Mean Patch Size/MPS*), total tepi (*Total Edge/TE*) (Prasetyo 2017). Pemrosesan analisis patch berdasarkan wilayah/grid menggunakan ekstensi yang terdapat dalam ArcMap 10.8 (Rempel *et al.* 2012). Analisis komparatif pola lanskap penutupan lahan area penelitian dan jejak manusia dilakukan pada grid dengan ukuran 2 km x 2 km pada tahun 2014 dan 2020. Pada setiap grid, skor jejak manusia dijumlahkan dan kemudian dibagi dengan total luas area penelitian. Kemudian analisis korelasi dilakukan menggunakan perangkat lunak SPSS versi 20 untuk menunjukkan hubungan antara perubahan indeks lanskap dan jejak manusia antara tahun 2014 dan 2020. Skor HF divalidasi menggunakan analisis *Root Mean Square Error* (RMSE) dan kappa (Dwiyaheni *et al.* 2021; Hirsh-Pearson *et al.* 2022)*

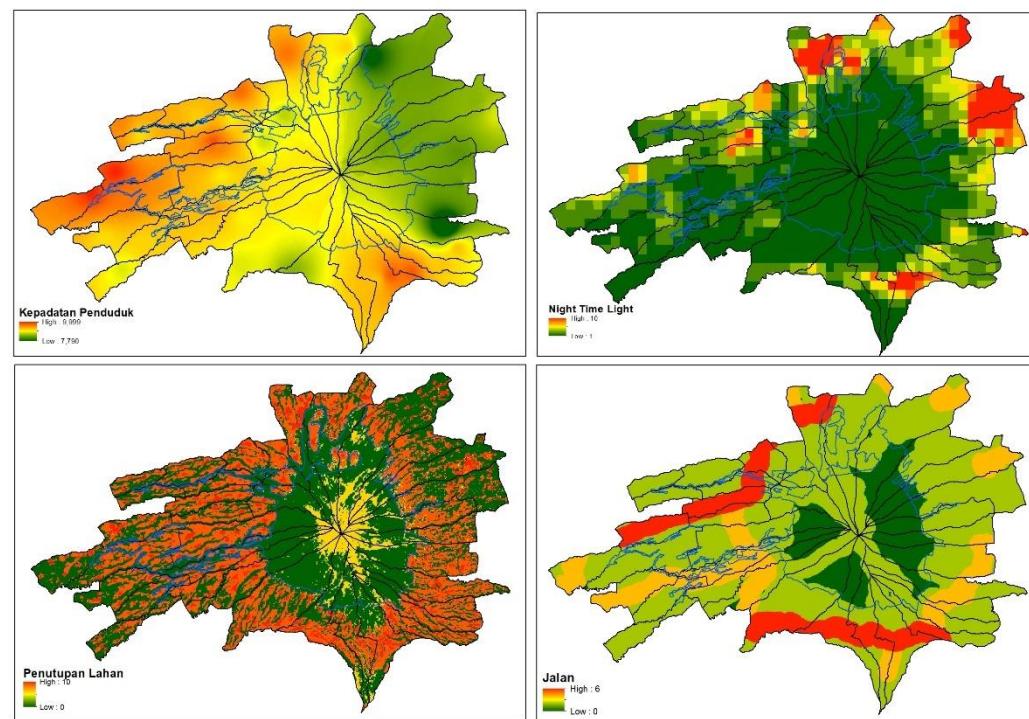
5.3 Hasil dan Pembahasan

5.3.1 Jejak Manusia/Human Footprint (HF) di area penelitian

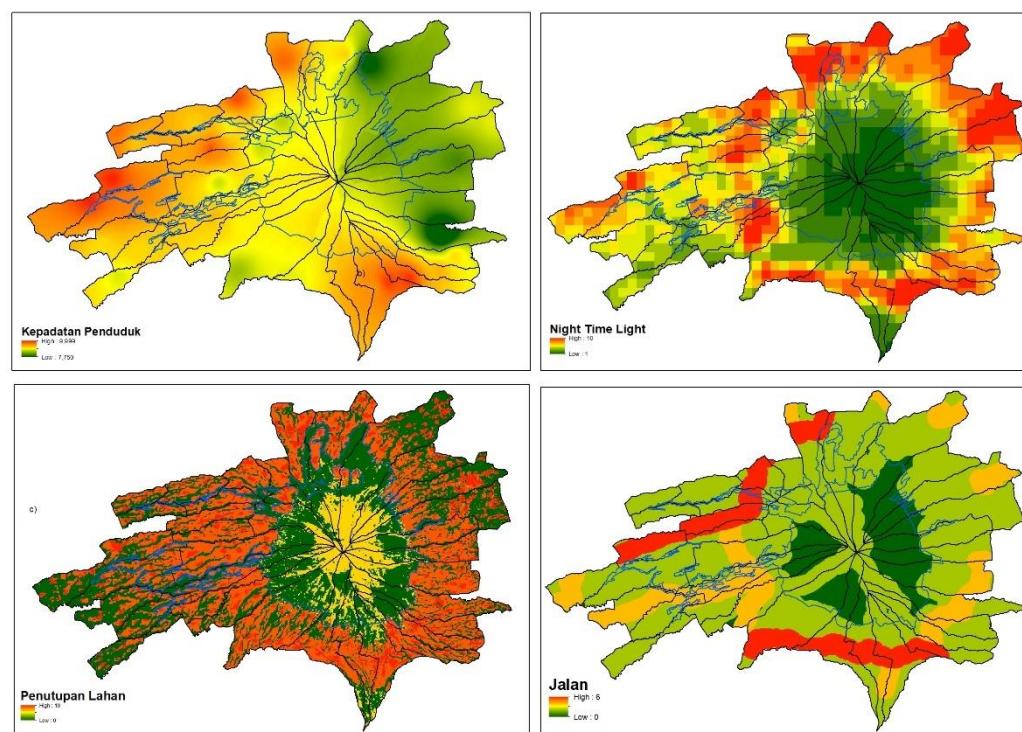
Penghitungan nilai HF di kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu dan desa-desa penyangga pada tahun 2014 dan 2020 dilakukan untuk menentukan bagaimana perubahan tekanan komunitas berdasarkan nilai HF dan seberapa besar pengaruhnya terhadap perubahan penutupan lahan di kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu. Gambar 5.2 menampilkan hasil penghitungan skor atribut HF untuk kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu dan desa-desa pendukung pada tahun 2014 dan 2020. Dari hasil analisis validasi, ditemukan bahwa penghitungan skor HF valid. Nilai RMSE untuk penghitungan skor HF pada tahun 2014 dan 2020 adalah 3,248 dan 3,189. Nilai kappa Cohen untuk validasi nilai HF pada tahun 2014 dan 2020 adalah 0,747 dan 0,748. Nilai HF yang diberikan dikatakan valid jika lebih dari 0,5.



Gambar 5.2 Nilai Atribut HF didalam, diluar dan total di Taman Nasional Gunung Merbabu



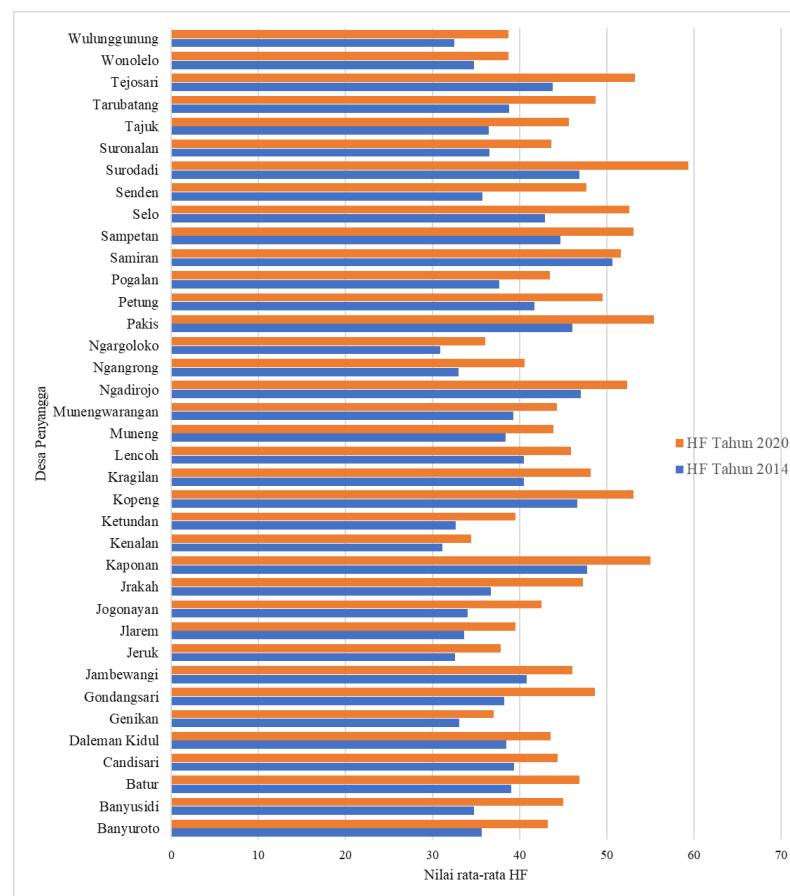
Gambar 5.3 Peta dari masing-masing atribut HF pada tahun 2014



Gambar 5.4. Peta dari masing-masing atribut HF pada tahun 2020

Penelitian ini menghitung HF berdasarkan tekanan terakumulasi dari kepadatan penduduk, penutupan lahan, pemukiman, jalan, dan cahaya malam. Dari hasil perhitungan pada total area, kepadatan penduduk merupakan faktor tekanan

tertinggi dari HF, diikuti oleh penutupan lahan, jalan, dan cahaya malam pada tahun 2014, sementara faktor jalan merupakan faktor tekanan terendah dari HF yang disajikan pada Gambar 5.3. Pada tahun 2014, di dalam taman nasional, kepadatan penduduk merupakan faktor tekanan tertinggi pada HF, diikuti oleh penutupan lahan, jalan, dan cahaya malam. Sementara itu pada Gambar 5.4 tahun 2020, di dalam taman nasional, kepadatan penduduk masih menjadi faktor tekanan tertinggi pada HF, diikuti oleh penutupan lahan, cahaya malam, dan jalan. Demikian pula, kepadatan penduduk merupakan faktor tekanan tertinggi di luar taman nasional pada HF, diikuti oleh penutupan lahan, cahaya malam, dan jalan. Di sini, dapat dilihat bahwa cahaya malam merupakan faktor tekanan yang memiliki pengaruh meningkat pada HF dari tahun 2014 hingga 2020. Dari Gambar 5.3, faktor cahaya malam berubah cukup signifikan dari tahun 2014 hingga 2020. Pada tahun 2014, area utara dan timur TNGMb lebih terang dibandingkan area lainnya antara lain Desa Kopeng dan Desa Ngadirojo. Sedangkan pada tahun 2020, area yang terang lebih banyak yang berada di sekitar kawasan taman nasional, pusat-pusat ibu kota kecamatan dan desa. Hal ini menggambarkan pertumbuhan pemukiman, perkembangan infrastruktur dan aktifitas ekonomi di area tersebut.

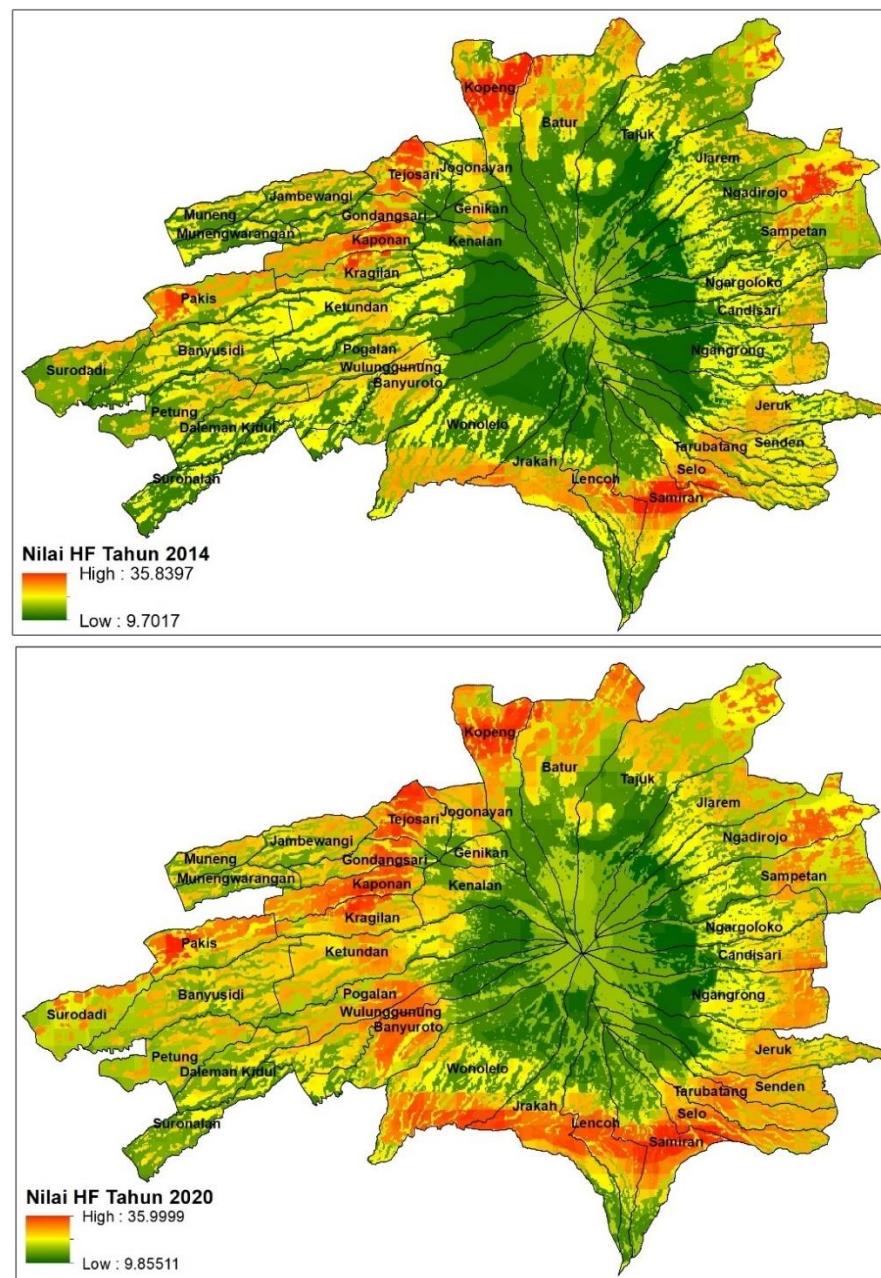


Gambar 5.5 Nilai dari HF masing-masing desa pada tahun 2014 dan 2020

Pengukuran human footprint dalam pengelolaan taman nasional adalah salah satu faktor yang menentukan tekanan pada komunitas di sekitar taman nasional, terutama terkait perubahan penutupan lahan. Dalam penelitian ini, HF diukur secara temporal antara tahun 2014 dan 2020, di mana ditemukan bahwa semua area

penyangga mengalami peningkatan nilai HF baik di dalam maupun di luar area. Dari Gambar 5.5 dan

Gambar 5.6, antara tahun 2014 dan 2020, Desa Surodadi, Pakis, dan Kaponan adalah area penyangga dengan nilai rata-rata HF tertinggi, dengan nilai HF masing-masing sebesar 53,19, 55,37, dan 55,01. Sementara itu, nilai rata-rata HF terendah ditemukan di Desa Kenalan dan Ngargoloko, dengan nilai HF masing-masing sebesar 34,41 dan 36. Perubahan nilai rata-rata HF antara tahun 2014 dan 2020, dengan persentase tertinggi, terjadi di Desa Sampetan, dengan nilai HF pada tahun 2014 sebesar 20,87, dan pada tahun 2020 sebesar 38,65. Faktor atribut yang mempengaruhi nilai HF dalam penelitian ini adalah kepadatan penduduk dan jarak dari jalan. Semakin tinggi kepadatan penduduk dan semakin dekat jalan, semakin tinggi nilai HF.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

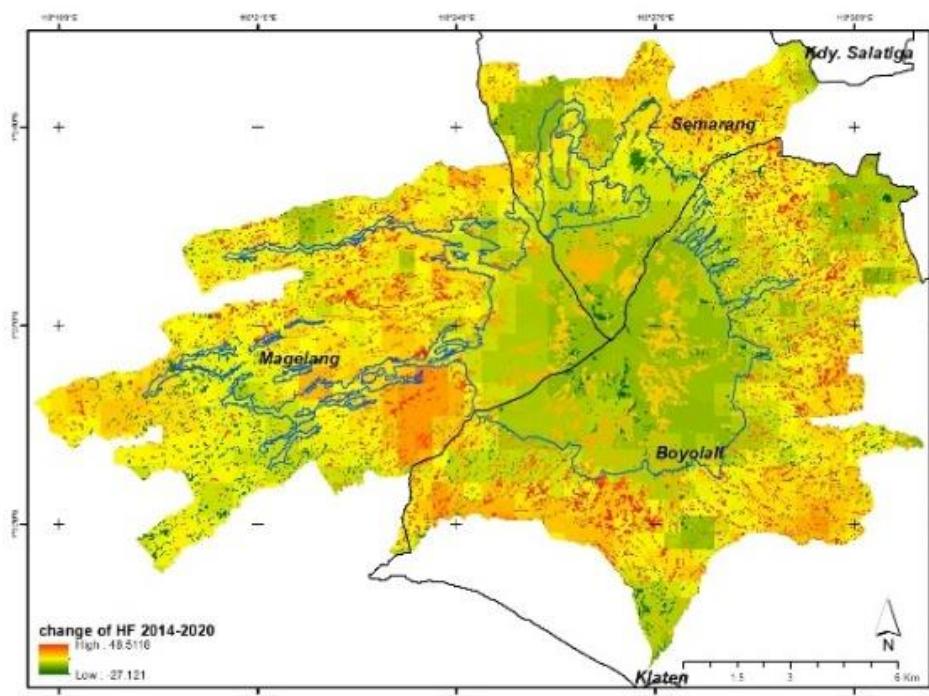
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

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

Gambar 5.6 Peta Nilai HF pada masing-masing desa penyangga TNGMb pada Tahun 2014 dan 2020

Jika melihat Gambar 5.7, peningkatan nilai HF terjadi di hampir seluruh area penelitian, tetapi di bagian selatan kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu, nilai HF menurun. Nilai HF juga terjadi di area kecil di utara area penelitian. Penghitungan nilai human footprint yang dilakukan dalam penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Dwiyahreni *et al.* 2021), di mana nilai human footprint selalu meningkat setiap tahun di dalam dan di luar kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu. Jika kita melihat lebih dekat, peningkatan human footprint dalam penelitian ini dipengaruhi oleh peningkatan kepadatan penduduk (Qu *et al.* 2022). Kehadiran komunitas di sekitar area tidak selalu memiliki potensi negatif bagi kawasan konservasi, tetapi juga dapat memiliki potensi positif bagi kawasan konservasi (Du *et al.* 2015). Peningkatan kepadatan penduduk di area penelitian juga sejalan dengan peningkatan cahaya malam (Mu *et al.* 2021) dan peningkatan lahan pertanian serta pemukiman (Ardiaristo *et al.* 2022). Peningkatan human footprint di sekitar kawasan taman nasional perlu ditangani dengan bijak oleh pengelola area (Hua *et al.* 2022). Keterlibatan komunitas dalam pengelolaan area dan kesadaran akan konservasi serta pentingnya kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu memiliki potensi positif untuk mewujudkan fungsi kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu.



Gambar 5.7 Nilai HF dan selisih antara Tahun 2014-2020

5.3.2 Indeks Lanskap

Dari hasil perhitungan menggunakan ekstensi *Patch Analysis* di ArcMap 10.8, hasil Indeks Lanskap yang diperoleh antara tahun 2014 dan 2020 (Tabel 5.2) menunjukkan bahwa luas kelas hutan pinus dan hutan campuran mengalami penurunan, sementara luas kelas rumput, semak, lahan terbangun, lahan pertanian, dan area terbuka mengalami peningkatan antara tahun 2014 dan 2020. Jumlah patch

(NumP) untuk kelas yang mengalami peningkatan antara tahun 2014 dan 2020 adalah hutan campuran, lahan terbangun, dan area terbuka, masing-masing sebesar 9,72%, 15,47%, dan 50,67%. Sementara itu, yang mengalami penurunan jumlah patch dalam kelas adalah hutan pinus, rumput, semak, dan lahan pertanian sebesar 12,91%, 46,24%, dan 7,33%. Nilai area kelas dan NumP menunjukkan peningkatan fragmentasi hutan campuran menjadi patch yang lebih kecil. Nilai PD yang meningkat pada hutan campuran mencerminkan peningkatan fragmentasi patch (Babí Almenar et al., 2019). Di sisi lain, patch semak menjadi lebih besar dalam ukuran dan bentuk pada lahan pertanian dan rumput karena bergabung antara patch (agregasi).

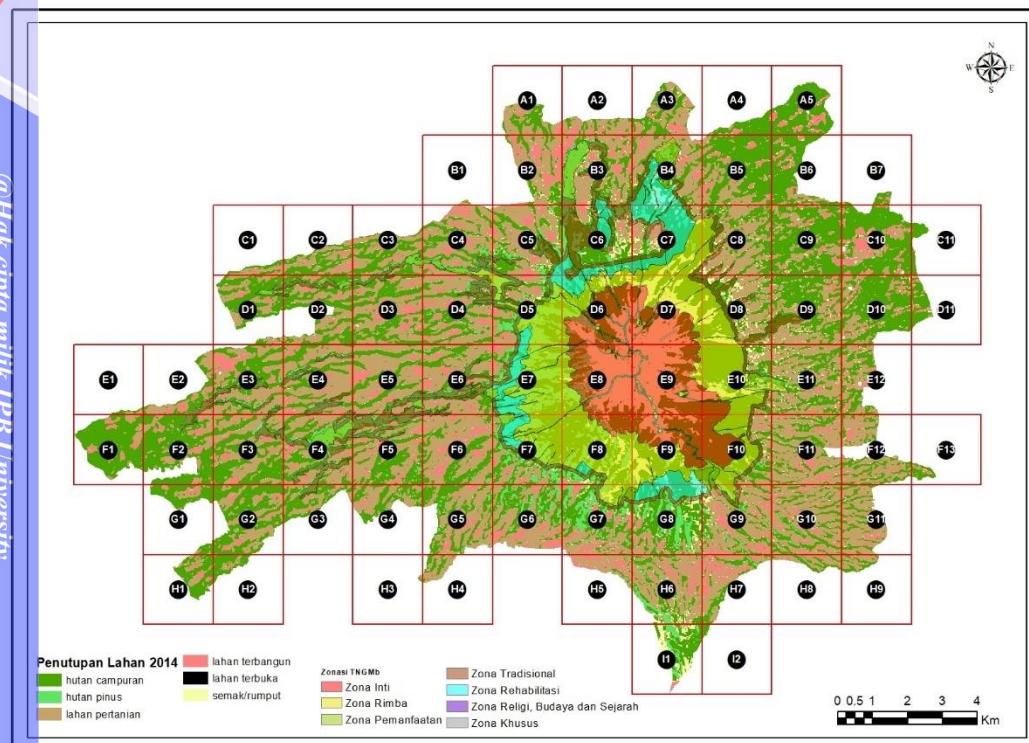
Tabel 5.2 Skor analisis indeks lanskap area penelitian

Kelas	Tahun	TLA	NumP	CA	PD	MPS	TE
Hutan Pinus	2014	21.936,15	1.797	1.889,96	8,19	7.328,72	692.756,92
	2020	21.936,15	1.565	1.275,79	7,13	5.621,63	535.146,25
Hutan Campuran	2014	21.936,15	3.221	9.959,08	14,68	61.146,94	2.493.913,04
	2020	21.936,15	3.534	8.579,19	16,11	64.379,31	2.249.195,33
Semak/rumput	2014	21.936,15	4.206	1.916,39	19,17	7.647,39	899.189,02
	2020	21.936,15	2.261	2.366,40	10,31	22.395,51	678.999,56
Lahan Terbangun	2014	21.936,15	1.228	1.146,90	5,60	9.930,70	476.385,17
	2020	21.936,15	1.418	1.645,31	6,46	11.871,02	610.430,00
Lahan Pertanian	2014	21.936,15	3.125	7.012,66	14,25	26.521,36	2.020.742,13
	2020	21.936,15	2.896	8.052,27	13,20	36.835,72	2.054.139,46
Lahan Terbuka	2014	21.936,15	75	11,16	0,34	1.633,28	11.709,13
	2020	21.936,15	113	17,19	0,52	1.495,24	17.614,69

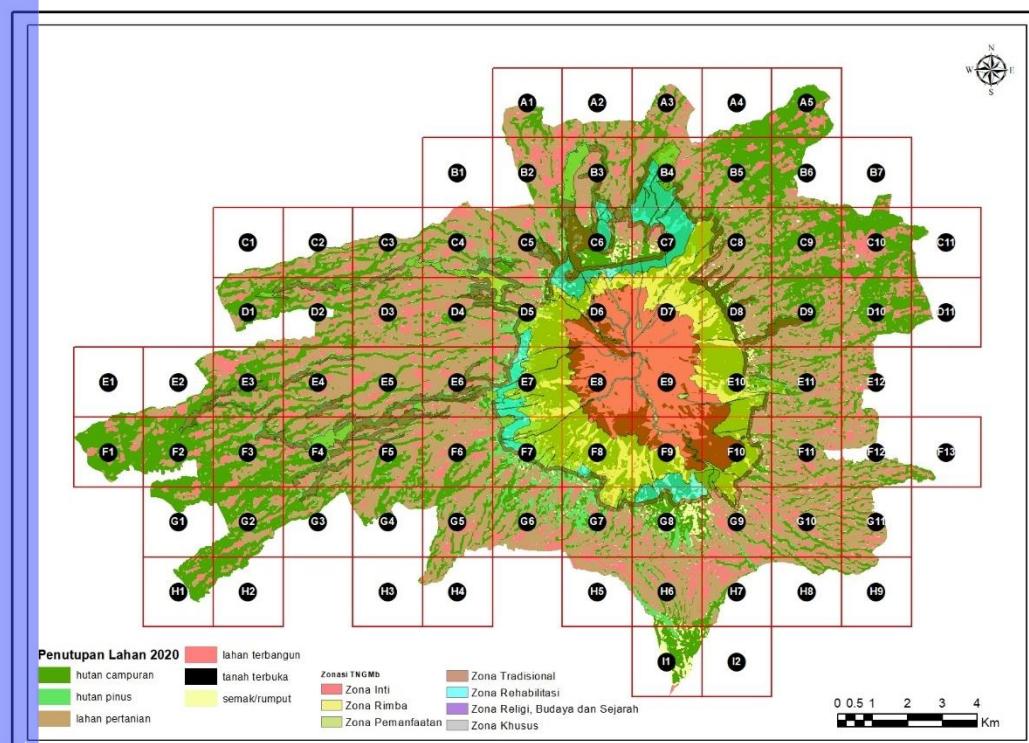
Keterangan : total area lanskap (TLA), jumlah patch (NumP), area kelas (CA), kepadatan patch (PD), ukuran rata-rata patch (MPS), total edge (TE)

Perbandingan nilai HF dan parameter indeks lanskap pada grid 2x2 km dilakukan untuk menentukan pengaruh nilai HF terhadap indeks lanskap penutupan lahan. Dalam Gambar 5.8 dan Gambar 5.9, terdapat 81 grid yang mencakup seluruh area penelitian. Hasil pengukuran indeks lanskap pada setiap grid untuk area penelitian disajikan di Lampiran 1. Nilai HF meningkat di setiap grid dari tahun 2014 hingga 2020. Grid E7, F8, dan I2 mengalami peningkatan lebih dari 100%. Nilai indeks lanskap untuk setiap grid mengalami peningkatan dan penurunan. Untuk jumlah kelas yang didominasi oleh jumlah kelas tetap, peningkatan terjadi di grid di utara area penelitian, dan penurunan jumlah kelas terjadi di sisi timur area penelitian yang dapat dilihat pada Gambar 5.8 dan 5.9. Fragmentasi grid ditunjukkan oleh peningkatan jumlah patch dan kepadatan patch, serta pengurangan ukuran rata-rata patch. Hal ini dapat dilihat di beberapa grid, seperti A4, E2-E4, E10, dan F3, yang berada di sisi barat area penelitian.





Gambar 5.8 Peta penutupan lahan Tahun 2014 yang dioverlay dengan zonasi dan grid penelitian



Gambar 5.9 Peta penutupan lahan Tahun 2020 yang dioverlay dengan zonasi dan grid penelitian

Tabel 5.3 Perbandingan nilai indeks lanskap Tahun 2014 dan 2020 pada masing-masing zona

Tahun	2014	2020	2014	2020	2014	2020	2014	2020	2014	2020	2014	2020	2014	2020	2014	2020
Zonasi	luar kawasan		Zona Inti		Zona Rimba		Zona Pemanfaatan		Zona Rehabilitasi		Zona Tradisional		Zona Khusus		Zona Religi, Budaya dan Sejarah	
Hutan Pinus	1023	1108	186	11	299	138	180	149	111	120	263	297	38	45	5	3
Hutan Campuran	2355	2382	158	144	240	250	313	285	108	126	470	475	37	38	5	6
Semak/rumput	1939	802	187	58	268	422	156	180	113	187	320	363	18	23	5	4
Lahan Terbangun	1106	1110	4	2	4	2	9	15	4	0	11	20	3	3	1	1
Lahan Pertanian	2632	2570	2	0	15	38	60	77	10	17	180	201	18	34	2	3
Tanah Terbuka	58	63	1	5	1	4	4	7	0	0	0	1	0	0	0	0
Hutan Pinus	499,46	456,42	99,15	1,60	518,70	180,06	168,45	179,24	209,18	170,72	474,50	455,99	8,57	8,70	0,72	0,63
Hutan Campuran	6733,81	5792,05	688,60	465,58	1283,78	1294,44	137,04	121,47	353,95	364,34	590,87	559,67	6,74	5,75	2,12	1,54
Semak/rumput	327,65	216,07	712,05	1032,43	313,60	634,86	38,09	42,01	59,74	86,91	58,54	76,12	1,11	1,16	0,41	0,58
Lahan Terbangun	1226,33	1652,60	0,36	0,30	0,22	0,12	0,67	0,74	0,23	0,00	0,86	1,24	0,10	0,07	0,02	0,01
Lahan Pertanian	7316,96	7989,61	0,07	0,00	1,20	7,88	19,15	19,83	1,48	2,61	68,46	100,20	1,39	2,22	0,21	0,70
Tanah Terbuka	11,45	8,91	0,06	0,39	0,01	0,15	0,05	0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Hutan Pinus	6,35	6,88	12,40	0,73	14,12	6,52	49,52	40,99	1,60	2,72	22,04	24,89	212	251	144	86,3
Hutan Campuran	14,61	14,78	10,53	9,60	11,33	11,81	86,11	78,41	6,51	6,72	39,39	39,81	207	212	144	173
Semak/rumput	12,03	4,98	12,46	3,87	12,66	19,93	42,92	49,52	14,12	6,52	26,82	30,42	101	128	144	115
Lahan Terbangun	6,86	6,89	0,27	0,13	0,19	0,09	2,48	4,13	11,33	11,81	0,922	1,676	16,8	16,8	28,8	28,8
Lahan Pertanian	16,33	15,95	0,13	0,00	0,71	1,79	16,51	21,18	12,66	19,93	15,08	16,84	101	190	57,6	86,3
Tanah Terbuka	0,36	0,39	0,07	0,33	0,05	0,19	1,10	1,93	0	0	0	0	0	0	0	0
Hutan Pinus	0,49	0,41	0,53	0,15	1,73	1,30	0,94	1,20	0,148	0,153	1,804	1,535	0,23	0,19	0,14	0,21
Hutan Campuran	2,86	2,43	4,36	3,23	5,35	5,18	0,44	0,43	8,398	8,294	1,257	1,178	0,18	0,15	0,42	0,26
Semak/rumput	0,17	0,27	3,81	17,80	1,17	1,50	0,24	0,23	1,735	1,305	0,183	0,21	0,06	0,05	0,08	0,15
Lahan Terbangun	1,11	1,49	0,09	0,15	0,06	0,06	0,07	0,05	5,349	5,178	0,079	0,062	0,03	0,02	0,02	0,01
Lahan Pertanian	2,78	3,11	0,04	0,00	0,08	0,21	0,32	0,26	1,17	1,504	0,38	0,498	0,08	0,07	0,1	0,23
Tanah Terbuka	0,20	0,14	0,06	0,08	0,01	0,04	0,01	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0

Pada Tabel 5.3 dan Gambar 5.9 dilihat bahwa pada zona inti terjadi peningkatan agregasi pada hampir semua kelas penutupan lahan, kelas penutupan lahan semak/rumput mengalami peningkatan luas area dan ukuran rata-rata patch sedangkan jumlah patch mengalami penurunan. Hal ini menggambarkan bahwa patch kelas penutupan lahan semak/rumput bergabung atau mengalami agregasi. Peningkatan kelas penutupan semak/rumput ini disebabkan kejadian kebakaran yang terjadi pada tahun 2015-2019 yang terjadi hingga ke zona inti/puncak. Sedangkan untuk kelas penutupan hutan mengalami penurunan luas areanya dan juga jumlah patchnya khususnya pada kelas penutupan hutan pinus yang luas areanya berkurang dari 99,15 Ha menjadi 1,60 Ha yang berada di sebelah utara kawasan TNGMb. Penetapan zona inti TNGMb yang menjadi parameter antara lain yaitu merupakan areal konsentrasi komunitas ekosistem Sub Alpin yang berada di ketinggian >2.400 mdpl dan tipe tutupan sabana sebagai ekosistem khas Gunung Merbabu. Dengan adanya kejadian yang hampir berulang setiap tahunnya saat musim kemarau yang panjang dan ketentuan-ketentuan kegiatan yang diperbolehkan di zona inti kedepannya dapat menjadi pertimbangan dalam mengevaluasi zona inti TNGMb, apakah tetap dipertahankan atau diubah menjadi zona rimba yang memungkinkan adanya kegiatan didalamnya terutama untuk kegiatan pemulihian ekosistem.

Pada zona rimba terjadi peningkatan fragmentasi khususnya pada kelas penutupan semak/rumput dan hutan campuran. Pada kelas penutupan semak/rumput dan hutan campuran ini jumlah patch, luas area dan kepadatan patch mengalami peningkatan. Tutupan semak/rumput di zona rimba meningkat signifikan, dari 313,60 hektar pada tahun 2014 menjadi 634,86 hektar pada tahun 2020. Peningkatan ini disertai fragmentasi yang lebih tinggi, dengan patch density naik dari 12,66 menjadi 19,93 patch/ha. Kenaikan luas semak/rumput sering kali mencerminkan degradasi ekosistem hutan yang sebelumnya lebih kompleks, yang mungkin disebabkan oleh aktivitas manusia atau gangguan alami seperti kebakaran. Untuk kelas penutupan hutan pinus mengalami penurunan luas area sebesar 65,29%. Dalam hal fragmentasi, terlihat bahwa patch density juga menurun dari 14,12 menjadi 6,52 patch/ha. Penurunan fragmentasi ini tidak selalu positif, karena dapat mengindikasikan hilangnya patch kecil dan menyisakan area yang lebih homogen, namun dengan luas yang lebih kecil.

Pada zona rehabilitasi dapat dilihat luas kelas penutupan hutan campuran menunjukkan sedikit peningkatan dari 353,95 hektar menjadi 364,34 hektar, tetapi fragmentasi tetap tinggi. Hal ini mengindikasikan adanya upaya pemulihan yang terbatas atau bahkan konversi tutupan menjadi hutan campuran, namun tekanan aktivitas manusia di zona ini masih signifikan. Pada zona rehabilitasi juga dapat dilihat kelas penutupan hutan pinus terlihat mengalami penurunan luas dari 209,18 hektar menjadi 170,72 hektar, meskipun jumlah patch relatif stabil. Sedangkan kelas penutupan hutan campuran mengalami peningkatan luas area namun fragmentasi terjadi yang ditandai dengan meningkatnya jumlah patch dan patch density serta penurunan ukuran rata-rata patch kelas penutupan hutan campuran.

Korelasi antara nilai HF dan nilai indeks lanskap secara signifikan berkorelasi tetapi tidak kuat. Korelasi signifikan antara nilai HF dan nilai indeks lanskap terjadi pada jumlah kelas, area kelas, dan nilai MPS. Jika kita melihat korelasi antara atribut indeks lanskap, korelasi signifikan yang kuat terjadi pada jumlah patch



dengan total edge, area kelas, dan jumlah kelas, yang berkorelasi positif, dan dengan ukuran rata-rata patch, yang berkorelasi negatif. Dalam penelitian ini, korelasi antara perubahan human footprint dan fragmentasi penutupan lahan tidak signifikan. Namun, jika kita melihat lebih dekat, perubahan signifikan dalam human footprint antara tahun 2014 dan 2020 terjadi pada grid dengan nilai patch dan kepadatan patch dengan nilai besar yang menggambarkan fragmentasi (Zhang *et al.* 2022). Grid yang mengalami fragmentasi terjadi di grid di sisi barat dan menjari dari area Taman Nasional Gunung Merbabu. Perubahan lahan menjadi lahan pertanian dan lahan terbangun yang selalu meningkat setiap tahun di area penelitian menjadi perhatian bagi pengelola kawasan TNGMb (Ardiaristo *et al.* 2022).

Dalam penelitian ini, analisis efek tekanan komunitas terhadap perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb telah dilakukan menggunakan pendekatan HF dan analisis fragmentasi. Human footprint adalah nilai yang dapat menggambarkan tekanan manusia pada suatu area (Qu *et al.* 2022). Hasil analisis menggambarkan bahwa terdapat korelasi antara HF dan area yang terfragmentasi. Kebutuhan lahan yang semakin meningkat oleh komunitas perlu ditangani dengan bijak oleh pengelola kawasan konservasi yang berbatasan langsung dengan komunitas (Ospino dan Yepes 2024). Seperti di Santa Fe, keberadaan komunitas perlu diprioritaskan dalam pengelolaan kawasan konservasi (Cristaldi *et al.* 2019).

5.4 Kesimpulan

Dari hasil penelitian ini menggambarkan efek tekanan manusia terhadap fragmentasi kelas penutupan lahan baik di dalam maupun di luar kawasan TNGMb. Penelitian ini menunjukkan korelasi yang signifikan antara jejak manusia/*human footprint* dan beberapa atribut metrik lanskap, yaitu jumlah kelas, luas kelas, dan MPS. Analisis jejak manusia/*human footprint* yang dilakukan dalam penelitian ini di TNGMb menunjukkan nilai jejak manusia pada desa penyanga TNGMb selama tahun 2014-2020 mengalami peningkatan. Desa Surodadi, Pakis, dan Kaponan adalah area penyanga dengan nilai rata-rata HF tertinggi, dengan nilai HF masing-masing sebesar 53,19, 55,37, dan 55,01. Fragmentasi di area penelitian terjadi pada kelas lahan hutan campuran, sementara pada kelas lahan pertanian dan semak/rumput terjadi agregasi dengan peningkatan luas setiap tahun. Peningkatan jejak manusia juga terjadi pada grid yang terfragmentasi. Pengetahuan tentang jejak manusia dan fragmentasi kelas penutupan lahan ini dapat membantu pengelola area kawasan TNGMb dalam menyusun kebijakan pengelolaan yang lebih spesifik dan efektif serta dapat menjadi bahan dalam mengevaluasi zonasi yang ada saat ini.



VI. MONITORING PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN DAN GANGGUAN MENGGUNAKAN ALGORITMA LANDTRENDR DAN CITRA LANDSAT

6.1 Pendahuluan

Kawasan konservasi sebagai garda depan dalam menjaga keanekaragaman hayati dan ekosistem menghadapi ancaman serius akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim. Mengingat pentingnya kawasan konservasi ini, pemahaman mengenai berbagai bentuk gangguan yang dapat merusak kawasan konservasi ini perlu dilakukan. Gangguan adalah peristiwa mendadak yang secara drastis dapat mengubah karakteristik ekosistem (Begon *et al.* 1986). Gangguan-gangguan terhadap perubahan penutupan lahan ini perlu diidentifikasi melalui dinamika penutupan lahan tersebut agar pengelola mendapatkan masukan dalam pengelolaan kawasan secara berkelanjutan (Turner dan Simard 2017; Ansari dan Golabi 2019). Pemetaan gangguan hutan dan pola spasial merupakan komponen penting dalam pengelolaan hutan lestari dan dalam mengimplementasikan inisiatif kebijakan iklim, seperti program Pengurangan Emisi dari Deforestasi dan Degradasi Hutan (Wulder *et al.* 2006; Hirschmugl *et al.* 2020). Sensitivitas perubahan penutupan lahan sangat dipengaruhi oleh gangguan ini. Perubahan penutupan lahan ini bisa diakibatkan oleh kejadian kebakaran, pendakian, hama penyakit, illegal logging, angin puting beliung, dan perambahan. Tingkat sensitifitas terhadap perubahan penutupan lahan ditunjukkan oleh faktor-faktor ini.

Untuk memvisualisasikan gangguan dalam perubahan penutupan lahan digunakan gambar penginderaan jauh seperti Landsat (Kennedy *et al.* 2010; Szantoi *et al.* 2016; Nguyen *et al.* 2018; Quintero *et al.* 2019) dan citra SAR (Hirschmugl *et al.* 2020). Perkembangan algoritma penginderaan jauh berjalan signifikan saat ini, termasuk juga pendekatan algoritma dalam pemetaan penutupan lahan dan deteksi faktor gangguan hutan. Pendekatan algoritma seperti pada *Breaks for Additive Seasonal and Trend* (BFAST)(Verbesselt *et al.* 2010), *Landsat-based detection of trends in disturbance and recovery* (LandTrendr) (Kennedy *et al.* 2010; Kennedy *et al.* 2018) dan *Continuous change detection and classification* (CCDC)(Zhu dan Woodcock 2014) telah banyak digunakan dan diaplikasikan di berbagai penelitian dan wilayah. Dalam penelitian ini digunakan algoritma LandTrendr karena mampu memberikan informasi mengenai waktu dan besarnya gangguan serta pemulihannya yang terdapat dalam perubahan penutupan lahan di suatu kawasan (Liu *et al.* 2022). Penggunaan algoritma LandTrendr telah banyak digunakan dalam berbagai penelitian terkait perubahan kawasan hutan (Banskota *et al.* 2014; Ding dan Li 2023; Li *et al.* 2023; Umarhadi *et al.* 2023), area tambang (Xiao *et al.* 2020; Liu *et al.* 2022), dan mangrove (Chen *et al.* 2022). Penggunaan algoritma LandTrendr juga digunakan dalam penelitian dikawasan konservasi yang memantau perubahan penutupan lahan hutan di kawasan konservasi dan deteksi gangguan yang menyebabkan perubahan (Komba *et al.* 2021; Toker *et al.* 2021; Zhang *et al.* 2023). Monitoring terhadap faktor gangguan yang menyebabkan perubahan penutupan lahan dan memprioritaskan pada suatu area dalam multi tingkatan diperlukan (Smith *et al.* 2019) terutama pada kawasan dengan pengelolaan yang intensif. Di Indonesia untuk memonitoring faktor gangguan dan pemulihannya belum mendapat perhatian yang besar, untuk itu tujuan dari penelitian

ini mendeteksi gangguan dan tingkat pemulihan vegetasi di kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu.

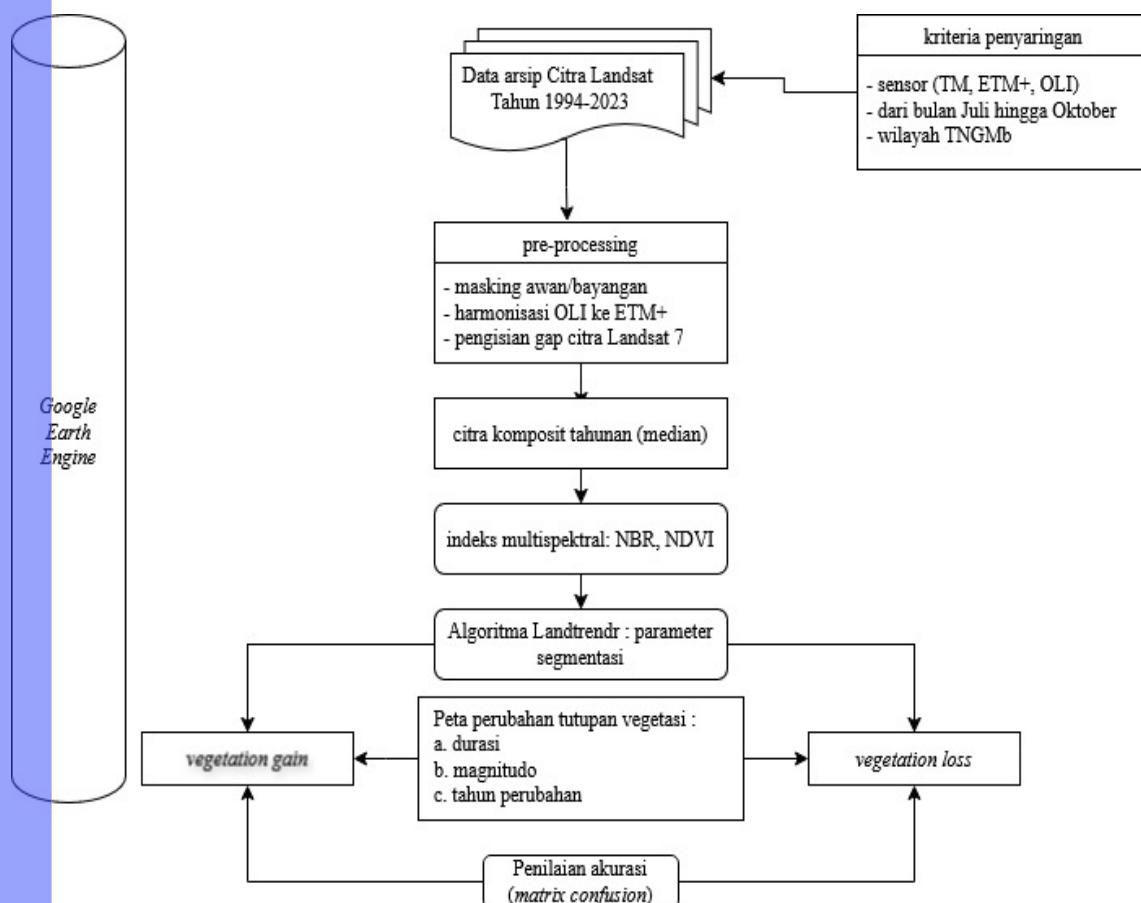
Salah satu gangguan paling penting dalam perubahan penutupan lahan adalah kebakaran. Kebakaran yang di kawasan TNGMb hampir setiap tahun terutama pada musim kemarau (BTNGMb 2019a). Trend perubahan penutupan lahan khususnya akibat kebakaran ini penting untuk diketahui karena seberapa besar respon terhadap perubahan penutupan lahan yang terbakar (Soulard *et al.* 2016). Pendakian yang semakin meningkat dari tahun ke tahun (BTNGMb 2019b) juga dapat menyebabkan perubahan struktur lanskap kawasan TNGMb walau tidak terlalu luas. Banyaknya pendaki menyebabkan kebutuhan akan lahan untuk berjalan/mendaki, berkemah ataupun beraktifitas semakin besar juga sehingga tumbuhan menjadi berkurang. Kegiatan restorasi/rehabilitasi juga dilakukan setiap tahunnya baik dalam bentuk kegiatan Balai TNGMb maupun yang dilakukan oleh masyarakat dalam bentuk penamanan massal. Kegiatan ini diarahkan untuk mengembalikan fungsi kawasan pada zona rehabilitasi yang luasnya sekitar 1.298,98 Ha (BTNGMb 2018). Dalam ekosistem hutan, gangguan tidak dapat dihindari, dan mempertahankan heterogenitas spasial dalam tipe tutupan, berbagai tahap suksesi, dan berbagai keadaan biogeokimia dapat meningkatkan ketahanan dan keanekaragaman hayati (Liang *et al.* 2016; Kulakowski *et al.* 2019).

6.2 Metode

Penelitian ini menggunakan berbagai satelit Landsat, termasuk Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+, dan Landsat 8 dan 9 OLI, mulai tahun 1994 hingga 2023. Data arsip citra Landsat dapat diakses secara publik dengan menggunakan Google Earth Engine (GEE). Proses akuisisi data, pre proses dan proses LandTrendr juga dilakukan dengan GEE (Kennedy *et al.* 2018). Citra hanya dipilih dari bulan Juli hingga Oktober untuk mengurangi pengaruh variasi vegetasi musiman dan banyak awannya. Gambar-gambar tersebut telah diproses sebelumnya secara ekstensif, yang melibatkan penyesuaian reflektansi permukaan menggunakan teknik LEDAPS untuk Landsat 5–7 dan algoritma LaSRC untuk Landsat 8–9. Untuk menjaga keseragaman di beberapa sensor, harmonisasi sensor-ke-sensor diimplementasikan menggunakan persamaan (Roy *et al.* 2016). Teknik pemfilteran medoid digunakan untuk memilih piksel yang paling representatif untuk setiap tahun dengan memilih nilai piksel yang paling dekat dengan median di semua pita. Pilihan ini penting untuk menciptakan observasi deret waktu yang tepat pada tingkat piksel. Kajian ini dikonsentrasi pada Normalized Burn Ratio (NBR), suatu statistik rasio yang tanggap terhadap gangguan hutan, dengan tujuan untuk mengidentifikasi perubahan tutupan hutan. NBR dihitung menggunakan formula khusus yang memanfaatkan pita inframerah dekat dan gelombang pendek, yang dikenal karena kemanjurannya dalam mendeteksi gangguan hutan.

Penelitian ini menggunakan algoritma LandTrendr, yaitu metode multi-tahap yang khusus dibuat untuk mendeteksi dan mengukur perubahan vegetasi, khususnya hilangnya dan peningkatan hutan. Pendekatan ini terdiri dari enam tahap utama: menghilangkan lonjakan yang disebabkan oleh kebisingan, mengidentifikasi kemungkinan simpul melalui analisis regresi, menyesuaikan lintasan, menyederhanakan model, memilih model optimal berdasarkan nilai p statistik-F, dan menilai hasil segmentasi. Dalam penelitian ini ditetapkan parameter terpilih yaitu *maxSegment* dengan nilai 6, nilai *spikeThreshold* 0,9, nilai

vertexCountOvershoot 3, nilai *prevent one-year recovery* Benar, nilai *recovery threshold* 0,25, nilai *pvalThreshold* 0,05, nilai *minObservationsNeeded* 6 (Wang *et al.* 2023; Ardinaristo *et al.* 2024b). Metodenya sangat ketat, dan setiap langkah penting untuk mendapatkan hasil yang tepat. Penelitian ini berkonsentrasi pada penentuan perubahan tutupan hutan yang paling menonjol dengan menggunakan filter magnitudo untuk mempertimbangkan perubahan nilai NBR yang melebihi 0,1. Investigasi tersebut menguji variasi pada area minimum 0,54 hektar, yang kira-kira setara dengan enam piksel citra Landsat. Prosedur yang menyeluruh menghasilkan hasil yang spesifik mengenai panjang, luas, dan waktu penurunan dan pemulihannya, seperti yang terlihat dalam visual penelitian. Hilangnya hutan ditandai dengan penurunan nilai spektral, sedangkan peningkatan ditandai dengan peningkatan pada tahun-tahun berikutnya. Untuk validasi data loss dan gain yang dihasilkan dilakukan penilaian akurasi dengan menggunakan 200 titik sampel yang terpilih secara stratified random dimana masing-masing 100 titik sampel untuk forest loss dan 100 titik sampel untuk forest gain. Penilaian akurasi dengan menggunakan matriks confusin yang dikerjakan dengan R software. Diagram alir penelitian digambarkan pada Gambar 6.1 berikut ini:

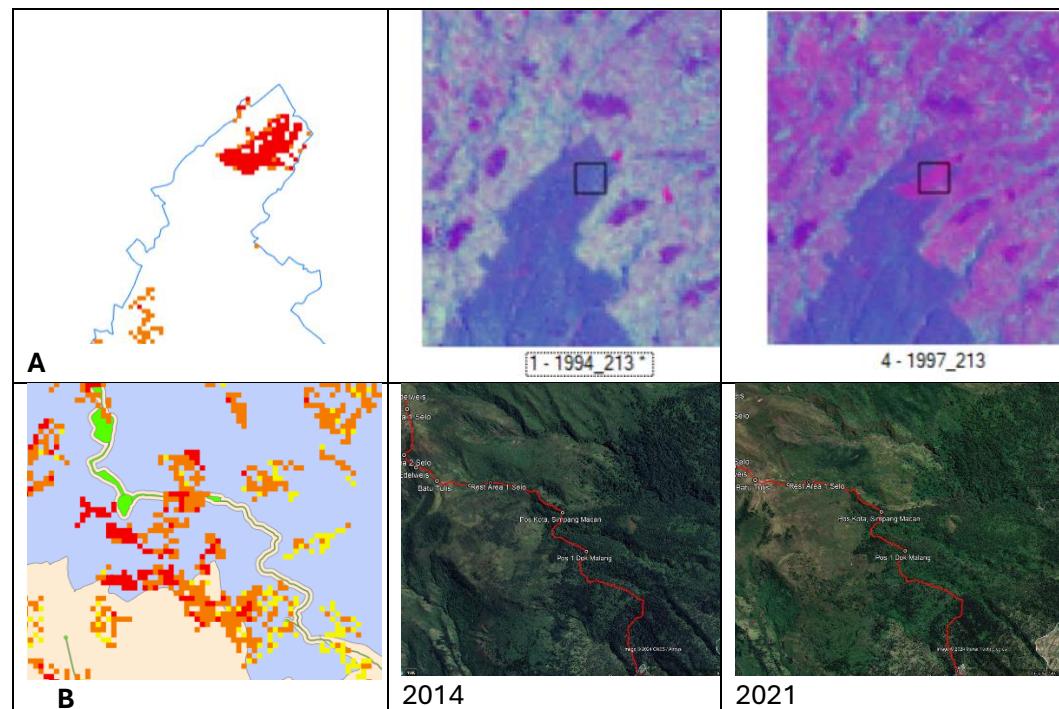


Gambar 6.1 Diagram alir penelitian

6.3 Hasil dan Pembahasan

6.3.1 Penilaian Akurasi

Algoritma LandTrendr merupakan salah satu tools yang dapat digunakan untuk memonitoring perubahan secara temporal (Tao *et al.* 2023). Untuk memperoleh hasil dengan akurasi tinggi selain penerapan parameter dan tahapan yang tepat juga diperlukan data referensi untuk menvalidasi hasil yang diperoleh.



Gambar 6.2 Contoh dari forest loss untuk titik sampel dari *Timesync* (A) dan *google earth image* (B)

Dalam penelitian ini selain menggunakan data Google Earth images dan citra Landsat juga informasi mengenai kejadian yang dapat berpengaruh terhadap perubahan seperti kejadian kebakaran atau penebangan (Komba *et al.* 2021). Selain itu digunakan juga visualisasi dari Timesync untuk melihat perkembangan dari suatu plot pengamatan secara temporal (Cohen *et al.* 2010). Seperti yang bisa dilihat dalam Gambar 6.2 (A) perubahan penutupan vegetasi yang hilang akibat penebangan yang divisualisasi dari Timesync. Pada lokasi tersebut pada tahun 1996 dilakukan penebangan karena lokasi tersebut merupakan petak hutan produksi pinus yang dahulu lokasi tersebut dikelola Perhutani (BTNGMb 2014). Penilaian akurasi terhadap forest loss dan gain yang diperoleh LandTrendr alorithm diperoleh hasil untuk forest loss sebesar 80,42% dan forest gain sebesar 87,76%. Hasil ini menunjukkan hasil dari algoritma LandTrendr dalam penelitian ini kuat.

6.3.2 Gangguan Vegetasi

Salah satu hasil dari algoritma LandTrendr adalah peta perubahan vegetasi yang mengandung durasi, besarnya magnitudo dan tahun perubahan (Kennedy *et al.* 2010). Dalam penelitian ini perubahan vegetasi dipilih loss (kehilangan) dan gain

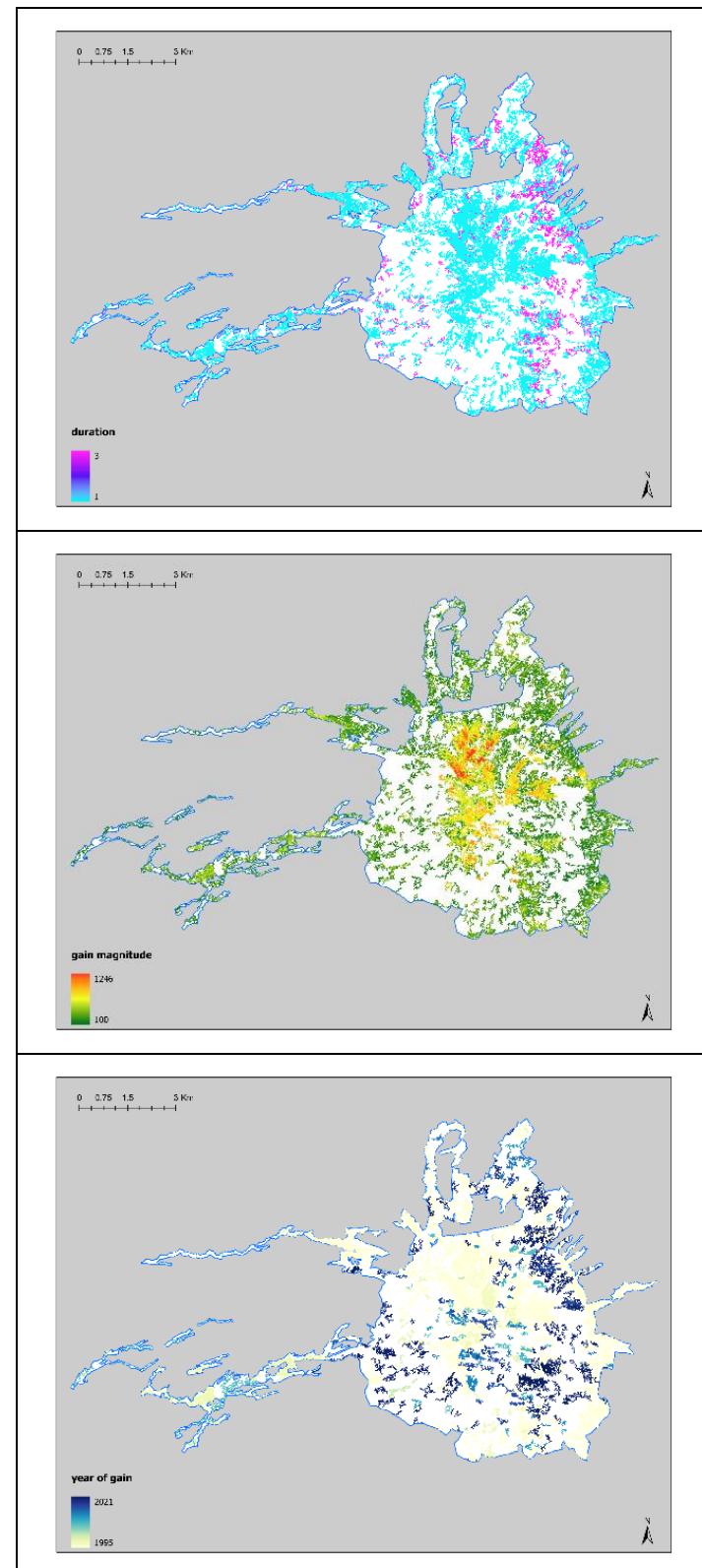
(peningkatan) sehingga dapat menggambarkan sensitifitas dari gangguan terhadap vegetasi yang disajikan pada Gambar 6.3. Dari gambar tersebut dapat dilihat total gain lebih besar daripada total loss selama 1994-2021 dengan luasan total gain sebesar 2279,52 Ha dan luasan total loss sebesar 933,57 Ha. Rata-rata besarnya magnitude gain selama periode penelitian sebesar 323 dan magnitude loss sebesar 335. Durasi dari vegetasi gain dan loss rata-rata sebesar 1 tahun yang menggambarkan cukup cepatnya perubahan vegetasi terjadi dimana perubahan dalam 1 tahun tersebut (Umarhadi *et al.* 2023).

Tabel 6.1 Nilai Rata-rata Magnitudo dari Vegetasi *Gain* dan *Loss*

Tahun	Loss		Gain	
	Rata-rata magnitude (NBRx1000)	Area (Ha)	Rata-rata magnitude (NBRx1000)	Area (Ha)
1995	293	109,98	328	1294,38
1996	396	90,72	442	21,51
1997	365	101,07	568	27,45
1998	302	12,69	338	159,57
1999	313	16,02	291	9,54
2000	337	13,77	209	7,38
2001	264	24,66	286	9,90
2002	383	33,03	237	5,76
2003	341	12,06	411	5,67
2004				
2005	242	15,84	314	5,49
2006	343	104,4		
2007	278	26,28	304	83,61
2008	385	12,87	272	15,03
2009	232	15,3	419	2,16
2010			298	19,35
2011	547	49,05	195	3,42
2012	177	11,88	516	40,77
2013			264	27,27
2014			336	2,25
2015	484	74,88		
2016	298	24,84	441	110,16
2017	287	43,20	268	3,51
2018	213	121,95		
2019	232	7,65	153	0,18
2020	275	10,17	236	369,27
2021	224	1,26	315	55,89

Dari Tabel 6.1 dapat dilihat ada beberapa tahun tidak ada nilai loss dan gain dari vegetasi yaitu pada tahun 2004, 2010, 2013 dan 2014 untuk loss sedangkan yang tidak terdapat gain pada tahun 2004, 2006, 2015 dan 2018. Ada beberapa kemungkinan hal ini terjadi antara lain pengaruh dari citra Landsat yang buruk akibat pengaruh awan pada lokasi penelitian (Shen *et al.* 2022) ataupun tidak ada perubahan yang sangat berarti dalam jangka waktu tertentu. Hasil perhitungan

berdasarkan Gambar 6.4 dan Tabel 6.1 diperoleh luasan vegetasi loss terbesar terjadi pada tahun 2018 dengan luas 121,95 Ha.



Gambar 6.3 Peta keluaran dari algoritma LandTrendr adalah peta durasi, magnitudo, dan tahun perubahan dalam vegetasi gain

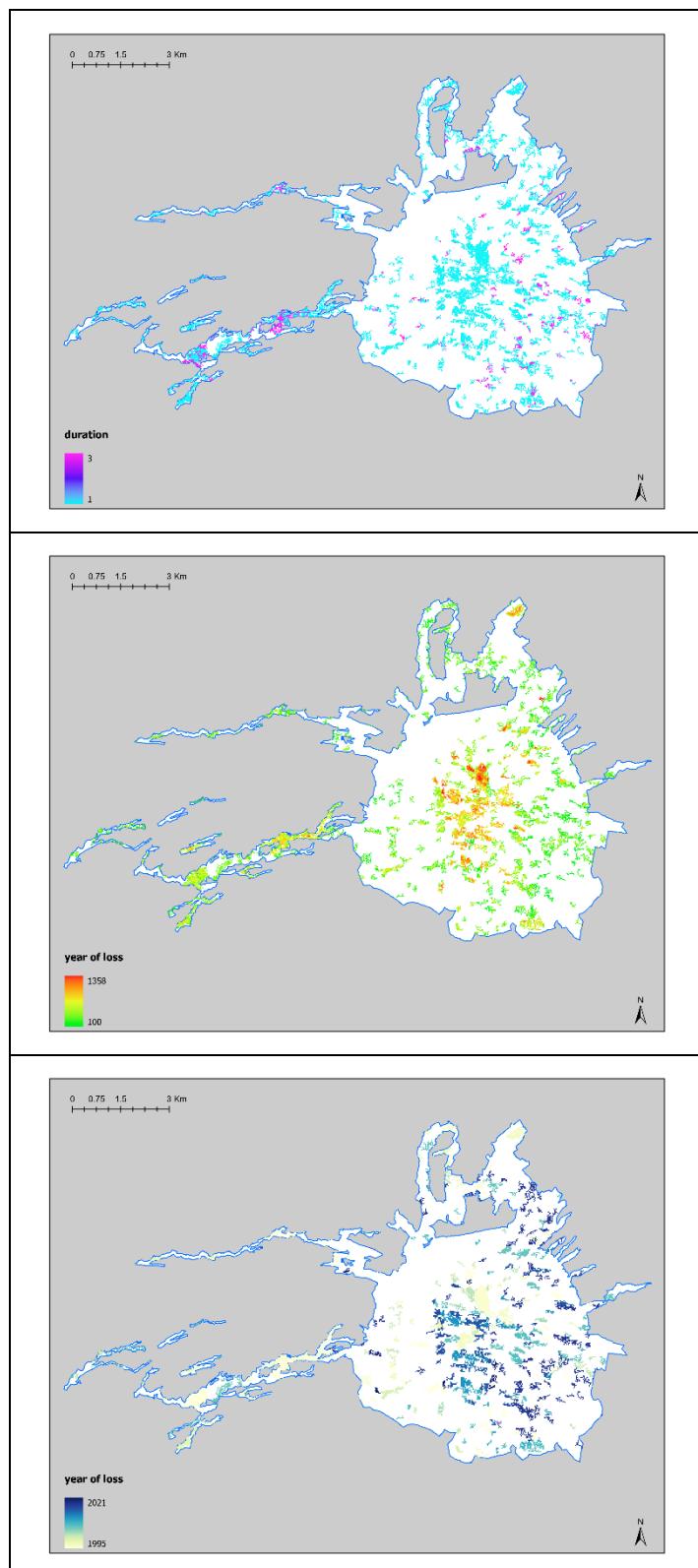
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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 mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

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



Gambar 6.4 Peta keluaran dari algoritma LandTrendr adalah peta durasi, magnitudo, dan tahun perubahan dalam vegetasi loss

Apabila ditelisik lebih lanjut pada tahun 2018 terjadi kebakaran yang cukup besar di kawasan TNGMb hingga 457 Ha (BTNGMb 2019a). Penyebab terjadinya

kebakaran di TNGMb terjadi pada musim kemarau panjang yang disebabkan oleh berbagai hal antara lain:

1. aktifitas penyiapan lahan oleh masyarakat yang dilakukan dengan membakar seresah/rumput di area dekat dengan kawasan TNGMb,
2. pembakaran serasah atau rumput yang dilakukan didalam kawasan TNGMb dengan maksud akan tumbuh rumput kembali pada musim hujan (Untoro *et al.* 2017)
3. kegiatan pembakaran seresah atau rumput yang diletakkan dibawah batang pohon dengan harapan pohon menjadi mati dan dilakukan pembalakan terhadap pohon yang mati tersebut.
4. Adanya konflik kepentingan yang merugikan salah satu pihak dengan cara membakar pada dalam kawasan TNGMb.
5. Aktifitas pendakian yang terkadang lupa mematikan api atau bara api.

Kejadian kebakaran hutan dan lahan di TNGMb pada musim kemarau panjang perlu diwaspadai dan segera dilakukan pemadaman. Hal ini mengingat apabila sudah timbul api maka dapat merambat dengan cepat karena bahan bakar (vegetasi yang kering), kondisi cuaca/angin yang bertiup kencang dan topografi pegunungan yang sulit dijangkau (Donald McKenzie 2000).

Demikian pula pada tahun 1997 terjadi vegetasi loss seluas 101.07 Ha yang salah satu areanya adalah di petak Perhutani yang dilakukan penebangan. Hal ini dapat dilihat dari contoh ini dapat dilihat pada Gambar 6.5 yang pada titik vegetasi loss tersebut apabila dilihat nilai spektral NDVInya dapat terlihat fluktuasi dari nilai spektralnya dimana saat terjadi vegetasi loss nilai NDVI mendadak turun dan tahun selanjutnya naik.

Vegetasi gain terbesar pada tahun 1994 sebesar 1294,38 Ha yang mencakup 56% dari total vegetasi gain yang terjadi periode 1994-2021. Tidak terdapat informasi yang cukup mengenai apa yang terjadi pada tahun 1995 karena pengelolaan masih dilakukan oleh Perhutani namun bila melihat dari lokasi dan citra landsat pada tahun 1995 dan sebelumnya dimungkinkan karena pulihnya vegetasi dari kejadian kebakaran yang cukup besar yang terjadi pada tahun 1994 dan pulih kembali pada tahun 1995. Seperti yang terlihat pada Gambar 6.5 nilai spektral NBR pada tahun 1994 sebesar -260 dan pada tahun 1995 meningkat menjadi 329. Nilai NBR yang rendah atau negatif bisa menunjukkan bahwa area tersebut telah mengalami kebakaran, dengan reflektansi tinggi di band *short-wave infrared* karena keberadaan karbon dan material terbakar lainnya (Li *et al.* 2021).

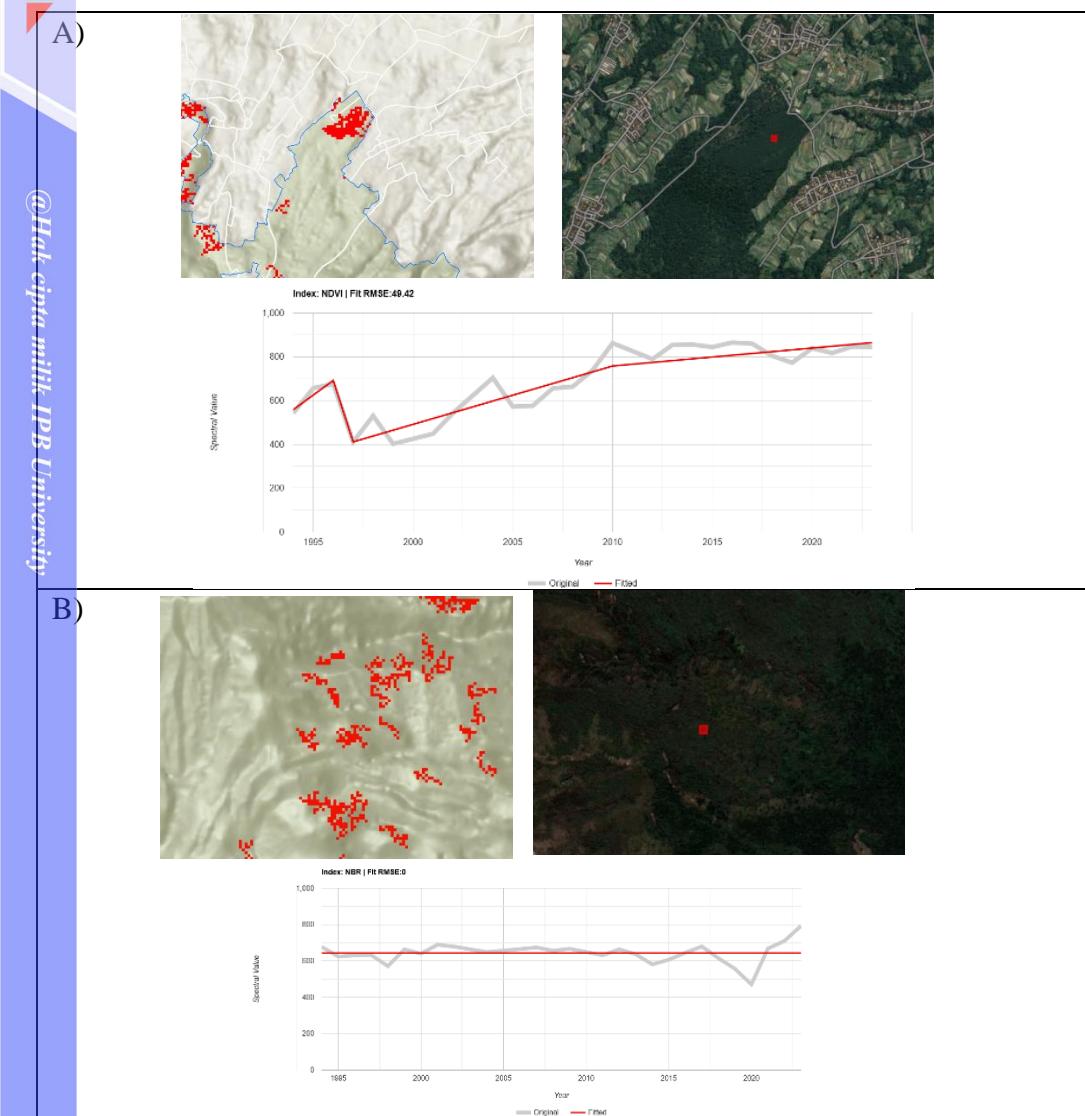
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

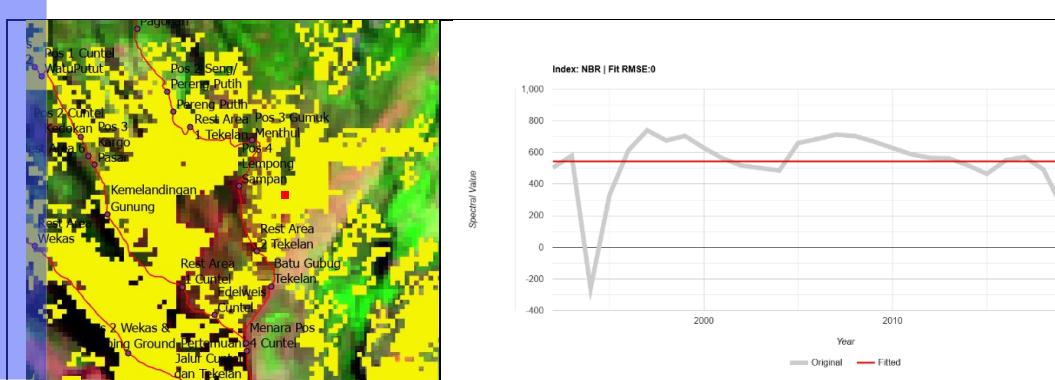
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

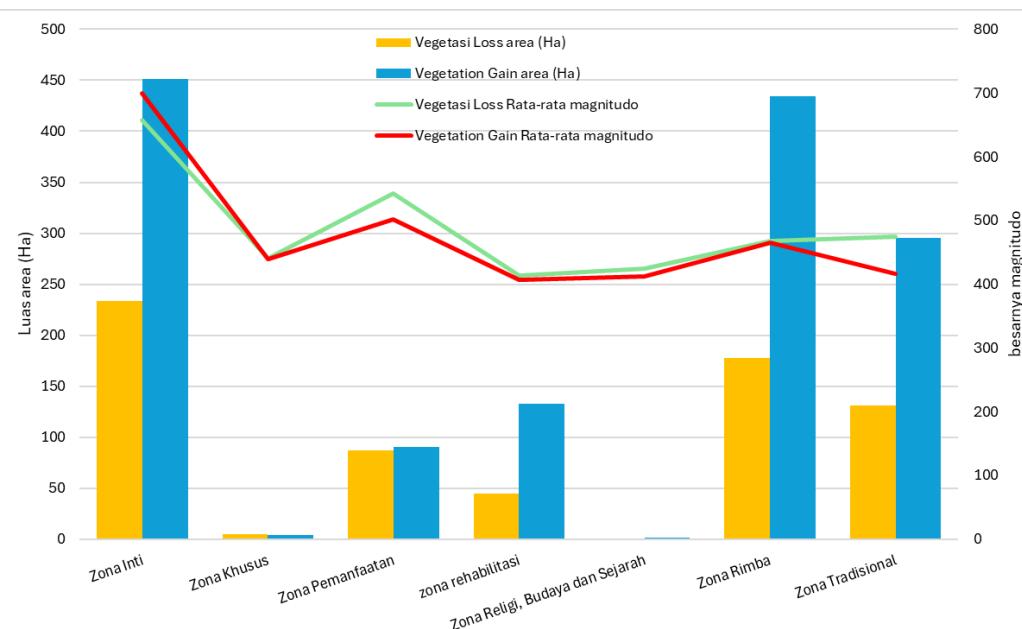
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



Gambar 6.5 Plot sampel vegetasi loss dan trajektori gangguan yang disesuaikan dengan LandTrendr berdasarkan NBR (A) dan NDVI (B)



Gambar 6.7 menunjukkan bahwa perubahan vegetasi baik loss dan gain terbesar terjadi di zona inti dengan magnitude yang cukup besar. Luasan vegetasi loss selama periode 1994-2022 sebesar 373,68 Ha dengan besar rata-rata magnitude 411 sedangkan luasan vegetasi gain sebesar 722,01 Ha dan rata-rata magnitude sebesar 437. Hal ini menggambarkan perubahan dan tingkat gangguan yang cukup besar terjadi di zona inti ini. Lokasi zona inti yang sebagian besar berada pada ketinggian lebih dari 2400 mdpl dan tutupan vegetasi selain berupa sabana juga merupakan perlindungan bagi habitat Rek-rekan (*Presbytis commata fredericae*). Gangguan yang terjadi di zona inti ini disebabkan oleh kejadian kebakaran yang terjadi pada musim kemarau yang panjang. Walaupun pulihnya vegetasi dapat dikatakan berlangsung cukup cepat namun gangguan kebakaran perlu diantisipasi baik yang dapat disebabkan oleh pengaruh manusia ataupun alami.



Gambar 6.7 Grafik luas dan rata-rata magnitudo penurunan dn peningkatan vegetasi

Penggunaan algoritma LandTrendr untuk memonitoring perubahan vegetasi dalam penelitian sangat bermanfaat untuk mengetahui bagaimana gangguan terhadap vegetasi berlangsung dalam periode tertentu. Area penelitian yang merupakan kawasan konservasi memerlukan data dan informasi yang akurat mengenai tutupan vegetasi yang berada didalamnya dan gangguan yang berpengaruh terhadap perubahan vegetasi. Pengaplikasian algoritma LandTrendr ini dapat melihat hal tersebut karena algortima ini menganalisis histori nilai spektral dari tiap-tiap pixel dalam image untuk jangka waktu tertentu (Komba *et al.* 2021). Penggunaan algoritma LandTrendr juga dapat dilakukan secara cepat dan tidak memerlukan sumberdaya yang besar karena pengolahan dilakukan melalui *google earth engine* atau *could computing* (Kennedy *et al.* 2018; He *et al.* 2023). Disisi lain terdapat juga limitasi dalam pengaplikasian algoritma LandTrendr ini dalam penelitian ini yaitu informasi mengenai gangguan yang terjadi di masa lampau terutama sebelum pengelolaan kawasan dilakukan oleh Balai Taman Nasional Gunung Merbabu yang dapat menyebabkan beberapa informasi mengenai gangguan terlewatkan. Selain itu penggunaan citra Landsat dengan resolusi spasial



yang medium menyebabkan deteksi terhadap perubahan vegetasi menjadi terlewatkhan (Fu *et al.* 2022). Penerapan citra dengan resolusi yang lebih besar ke depannya seperti Sentinel 2 ataupun lidar (Li *et al.* 2023).

Apabila dilihat dari pengelola kawasan TNGMb dimana baru pada tahun 2007 pengelola kawasan dilakukan oleh Balai TNMGb dapat dilihat bahwa vegetation loss dari tahun 2007 hingga 2021 seluas 399,33 Ha dan vegetation gain seluas 732,87 Ha. Pengelolaan kawasan konservasi yang berfokus perlindungan habitat flora dan fauna dan daerah tangkapan air mengharuskan pengelola untuk menjaga keberadaan vegetasi dan ini berbeda pada saat kawasan dikelola oleh Perhutani, masih diperbolehkan untuk dilakukan penebangan dalam rangka penjarangan ataupun pergantian tanaman. Vegetation gain terbesar dalam rentang waktu 2007-2021 pada tahun 2020 seluas 369.27 Ha. Lokasi vegetation gain ini tersebar di sebelah timur kawasan TNGMb yang pada merupakan zona rehabilitasi (BTNGMb 2018) yang dilakukan kegiatan pemulihan ekosistem dari tahun 2015 hingga 2019 dan untuk saat ini sudah dikeluarkan dari zona rehabilitasi menjadi zona rimba (BTNGMb 2020). Vegetation loss pada tahun 2018 apabila dioverlay dengan jalur pendakian, diperoleh terdapat vegetation loss yang berdekatan dengan jalur pendakian selo sebelum Pos 3 Watu tulis. Apabila ditelisik lebih lanjut pada lokasi ini bekas lokasi kebakaran pada tahun 2018 dan 2019 selain itu juga banyak pohon kemlandingan gunung (*Albizia lophanta*) yang mati.

6.4 Kesimpulan

Temuan penelitian menunjukkan bahwa algoritma LandTrendr secara efektif mengidentifikasi perubahan vegetasi, dengan pertumbuhan vegetasi melebihi kehilangan dari tahun 1994-2021 yaitu pertumbuhan vegetasi sebesar 2279,52 Ha dan luasan total kehilangan vegetasi sebesar 933,57 Ha. Penerapan algoritma LandTrendr dalam penelitian ini memberikan wawasan mendalam tentang dinamika perubahan vegetasi di TNGMb. Analisis mengungkapkan perubahan signifikan di zona inti akibat kebakaran dan aktivitas penebangan. Penelitian ini memberikan pemahaman perubahan vegetasi temporal dan wawasan yang relevan bagi pengelola area konservasi untuk mengambil langkah mitigasi yang tepat guna menjaga integritas ekosistem serta habitat flora dan fauna di TNGMb.



VII. STATUS KEBERLANJUTAN PENGELOLAAN TAMAN NASIONAL GUNUNG MERBABU TERKAIT DENGAN PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN

7.1 Pendahuluan

Aktivitas manusia seperti penebangan hutan dan pertanian terus mengubah lingkungan alami dunia, mengancam kelangsungan hidup banyak spesies. Saat ini, antara 13 hingga 41% vertebrata darat diperkirakan terancam punah, dengan lebih dari 7.400 spesies berisiko (Ducatez dan Shine 2017; IUCN 2020). Pembentukan kawasan konservasi di dunia salah satunya bertujuan mengurangi hilangnya keanekaragaman hayati dan hutan dan untuk mencapai sasaran pembangunan berkelanjutan (SDGs 15) dan target keanekaragaman hayati Aichi (Schulze *et al.* 2018; Yu *et al.* 2024). Kawasan konservasi akan memainkan peran yang penting dalam menjaga habitat, spesies prioritas, stok karbon dan peningkatan kesejahteraan masyarakat disekitarnya apabila dikelola dengan baik (Geldmann *et al.* 2013; Geldmann *et al.* 2014; Ayivor *et al.* 2020; Nugraha *et al.* 2024). Selain itu kawasan konservasi juga mempunyai peran penting dalam penyerapan emisi karbon dan mitigasi perubahan iklim (Duncanson *et al.* 2023).

Efektifitas pengelolaan kawasan konservasi yaitu apabila ruang geografis yang didefinisikan dengan jelas, diakui, didedikasikan dan dikelola, melalui cara-cara legal atau cara efektif lainnya, untuk mencapai konservasi alam jangka panjang dengan jasa ekosistem dan nilai-nilai budaya terkait (Dudley 2008). Dengan demikian, kawasan lindung yang benar-benar efektif akan mencapai konservasi alam jangka panjang, setidaknya dalam batas-batas wilayahnya, atau lebih baik lagi jika bekerja sebagai jaringan yang efektif. Efektivitas dalam praktiknya bukanlah sebuah sifat biner ya-atau-tidak, melainkan sebuah gradien multifaset yang mengukur sejauh mana kontribusi kawasan lindung terhadap hasil-hasil konservasi. (Rodrigues & Cazalis, 2020). Saat ini belum terdapat standar yang seragam untuk menilai efektivitas konservasi di dunia. Penelitian sebelumnya telah menggunakan berbagai metode untuk menilai efektivitas konservasi di dunia, pendekatan mencakup perbandingan antara sebelum dan sesudah pembentukan kawasan konservasi dan perbandingan perubahan di dalam dan di luar kawasan konservasi (Yang *et al.* 2023). Lebih dari 50 alat yang berbeda untuk menilai efektifitas pengelolaan kawasan konservasi dengan berbagai kriteria, indikator dan metodologi (Pulido-Chadid *et al.* 2023). Untuk di Indonesia penilaian efektifitas pengelolaan kawasan konservasi dilakukan menggunakan *Management Effectiveness Tracking Tools* (METT) untuk menilai 422 kawasan (Nugraha *et al.* 2024). Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb) sebagai salah satu kawasan konservasi juga dilakukan penilaian dengan METT secara periodik dan pada tahun 2022 nilai METT sebesar 83%. Taman nasional ini mempunyai tiga fungsi utama sesuai penunjukannya yaitu sebagai daerah tangkapan air bagi kehidupan masyarakat sekitar, perlindungan bagi habitat flora dan fauna yang dilindungi dan pemanfaatan potensi wisata alam dan budaya (BTNGMb 2014).

Pemahaman terhadap perubahan penutupan lahan di dalam kawasan baik secara spasial dan temporal merupakan hal mendasar dalam pengelolaan kawasan konservasi yang berkelanjutan (Bettinger *et al.* 2005; Boyle *et al.* 2014; Nguyen *et al.* 2018; Shahi *et al.* 2020). Penutupan lahan yang optimal memastikan bahwa

ekosistem tetap sehat dan mampu menjalankan fungsi alaminya, seperti penyediaan habitat bagi satwa liar, penyerapan karbon, serta pengaturan siklus air (Singh dan Pandey 2014; Prasetyo 2017). Ancaman terhadap kawasan konservasi dan juga biodivesitas yang ada didalamnya sering disebabkan oleh aktifitas manusia seperti perusakan habitat, polusi, penebangan yang berlebihan, spesies invasif dan perubahan iklim (Pulido-Chadid *et al.* 2023; Zeng *et al.* 2023).

Pengelolaan kawasan konservasi secara berkelanjutan menjadi semakin penting seiring dengan meningkatnya tekanan terhadap ekosistem alami akibat aktivitas manusia. Hal ini perlu melibatkan pendekatan holistik yang menggabungkan perlindungan lingkungan dengan pemberdayaan masyarakat lokal, peningkatan kapasitas institusi pengelola, serta pemanfaatan teknologi modern untuk pemantauan dan evaluasi terutama terkait dengan penutupan lahan. Penilaian keberlanjutan dari dimensi ekologi, ekonomi, sosial dan kelembagaan ini diperlukan untuk menilai sejauhmana pengelolaan kawasan konservasi ini dilakukan. TNGMb saat ini belum pernah dilakukan penilaian mengenai status keberlanjutan pengelolaan kawasannya. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur status keberlanjutan dari pengelolaan kawasan konsevasi di TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan di TNGMb. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan masukan kepada pengelola kawasan TNGMb untuk meningkatkan efektifitas pengelolaan terutama terkait dengan dinamika penutupan lahan di TNGMb yang berhubungan erat dengan fungsi penting dari penutupan lahan.

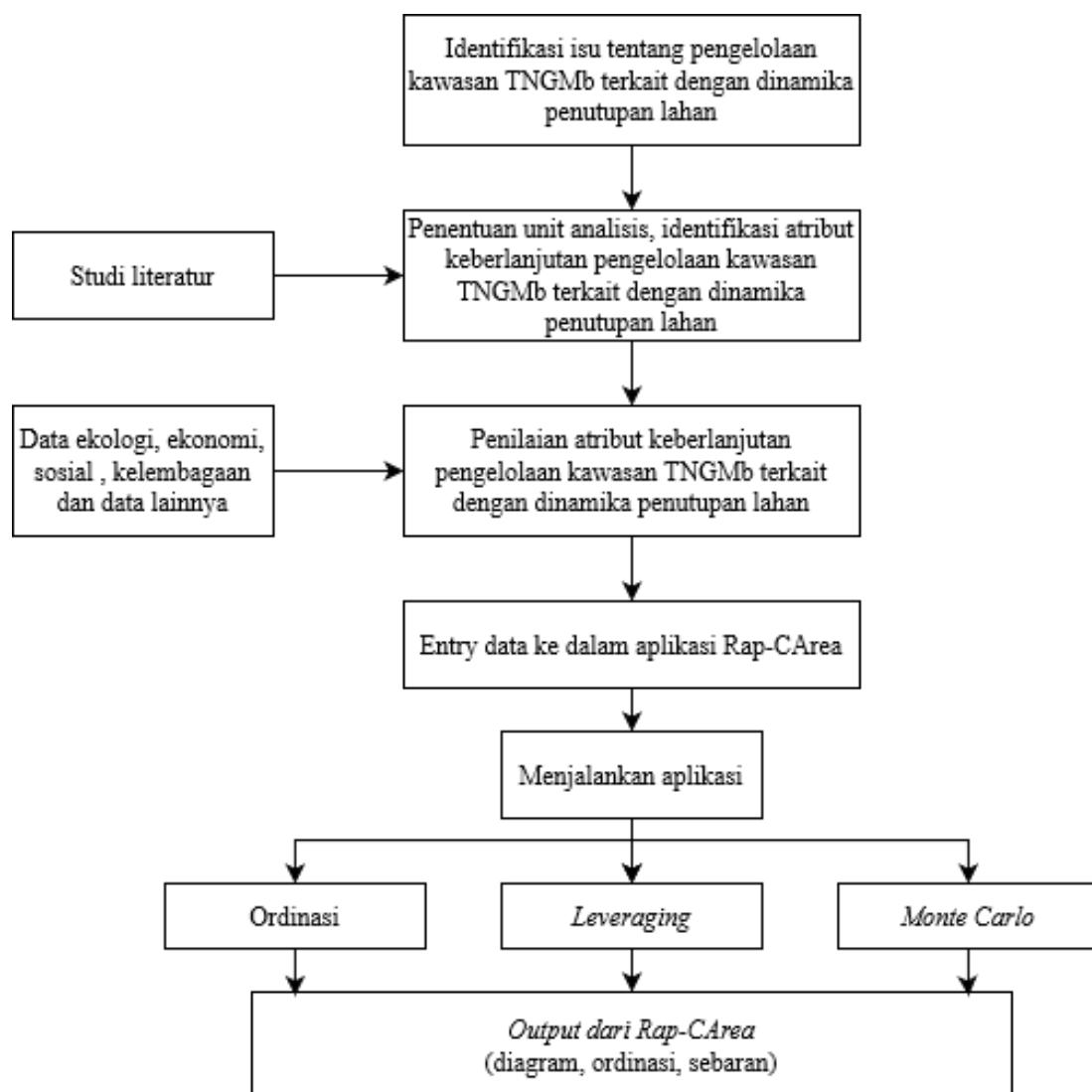
7.2 Metode

Data yang digunakan dalam penelitian ini meliputi data ekologi, ekonomi, sosial dan kelembagaan. Pengumpulan data dilakukan melalui dua cara yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dengan pengisian kuisioner dan wawancara terhadap pengelola kawasan TNGMb. Data sekunder diperoleh dari hasil penelitian terdahulu, laporan kegiatan TNGMb, data SIMERU dan publikasi lainnya yang terkait dengan penelitian. Hasil dari pengumpulan data tersebut digunakan sebagai bahan untuk analisis *Multi Dimensional Scaling* (MDS) (Jonni *et al.* 2024). Unit pengelolaan yang diukur status pengelolaan adalah pada tingkat resor. Ada 5 (lima) resor pada TNGMb yaitu Resor Ampel, Resor Kopeng, Resor Pakis, Resor Wonolelo dan Resor Selo.

Metode analisis yang digunakan adalah MDS melalui teknik ordinasi *Rap-CArea* (*Rapid Appraisal for Conservation Area*). Rap-CArea merupakan modifikasi dari RAPFISH (*Rapid Appraisal for Fisheries*) yang dikembangkan oleh tim dari Fisheries Center University of British Columbia untuk menentukan keberlanjutan perikanan (Kavanagh dan Pitcher 2004; Fauzi 2019). *Rap-CArea* digunakan untuk mengevaluasi keberlanjutan dalam pengelolaan kawasan konservasi yang didasarkan pada teknik ordinasi dengan menggunakan data MDS (Adimu 2018).

Analisis keberlanjutan/MDS dengan *Rap-CArea* dilakukan dengan beberapa tahapan yaitu : (1) penentuan atribut yang mencakup 4 (empat) dimensi antara lain dimensi ekologi, ekonomi, sosial dan kelembagaan. Penentuan atribut diperoleh dengan pendekatan *scientific judgement* berdasarkan hasil kajian maupun penelitian dan mempertimbangkan ketersediaan data dari atribut tersebut; (2) Penilaian setiap atribut dalam skala ordinal (skoring) berdasarkan kriteria keberlanjutan setiap

dimensi. Penilaian dilakukan melalui *judgement* berbasis data yang ada, pengisian kuisioner dan prinsip penilaian cepat. Penentuan rentang skor berkisar antara 0 – 3 atau tergantung pada keadaan masing-masing atribut yang diartikan mulai dari yang buruk (0) sampai baik (3).; (3) Analisis ordinasi *Rap-CArea* dengan metode MDS untuk menentukan ordinasi dan nilai stress. Analisis dilakukan untuk masing-masing dimensi dengan memasukan semua atribut yang ada dalam dimensi yang dianalisis dan divisualisasikan dalam *scatter plot* ordinasi atribut; (4) Menilai indeks dan status keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi secara multidimensi; (5) Analisis kepekaan (*Leverage Analysis*) untuk menentukan peubah yang sensitif mempengaruhi keberlanjutan; (6) Analisis Monte Carlo untuk memperhitungkan aspek ketidakpastian. Tahapan analisis keberlanjutan dengan *Rap-CArea* dapat dilihat pada Gambar 7.1 berikut :



Gambar 7.1 Tahapan analisis keberlanjutan dengan *Rap-CArea*, dimodifikasi dari Fauzi, 2019



Dimensi dan atribut untuk penilaian keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi di TNGMb terkait dengan dinamika penutupan lahan sebagai berikut :

1. Ekologi, dimensi ini dimaksudkan untuk melihat sejauhmana pengelolaan kawasan konservasi dalam mendukung dinamika penutupan lahan secara ekologi secara berkelanjutan. Atribut dari dimensi ekologi dapat dilihat pada Tabel 7.1 :

Tabel 7.1 Atribut dimensi ekologi dalam penilaian status keberlanjutan

No	Atribut dimensi ekologi	Baik	Buruk	Kategori
1	Tipe penutupan lahan (Akodéwou <i>et al.</i> 2020)	2	0	0 = tanah terbuka, lahan pertanian, 1 = semak belukar 2 = hutan, sabana
2	Konversi vegetasi (Tsai <i>et al.</i> 2019)	2	0	0 = tidak menjadi tutupan hutan kembali 1 = kembali ke tutupan vegetasi bukan hutan 2 = kembali ke tutupan hutan
3	Kejadian kebakaran (Syaufina <i>et al.</i> 2018)	3	0	0 = setiap tahun terjadi, jumlah hot spot > 30 1 = jumlah hot spot > 20 2 = jumlah hot spot > 10 3 = tidak terjadi kebakaran
4	Restorasi/rehabilitasi (Xi <i>et al.</i> 2008)	2	0	0 = tidak ada restorasi/rehabilitasi 1 = ada restorasi/rehabilitasi, kurang berdampak 2 = ada restorasi/ rehabilitasi, berdampak
5	Biodiversitas (Araia <i>et al.</i> 2020)	2	0	0 = rendah (< 10 spesies) 1 = sedang (< 20 spesies) 2 = tinggi (> 20 spesies)
6	Kejadian perambahan (Tacconi <i>et al.</i> 2019)	3	0	0 = tinggi (>10 kejadian/bulan) 1 = sedang (4-10 kejadian/bulan) 2 = rendah (1-3 kejadian/bulan) 3 = tidak ada kejadian
7	Sumber air (Dewi <i>et al.</i> 2024)	3	0	0 = tidak ada sumber air dalam kawasan 1 = rendah (ada sumber air, tidak dimanfaatkan) 2 = sedang (ada sumber air, dimanfaatkan, tidak mengalir sepanjang waktu) 3 = tinggi (ada sumber air, dimanfaatkan, mengalir sepanjang waktu)
8	Durasi pemulihan vegetasi (Nguyen <i>et al.</i> 2017)	3	0	0 = tidak ada recovery 1 = lambat (> 3 tahun) 2 = sedang (1-2 tahun) 3 = cepat (<1 tahun)
9	Fragmentasi penutupan lahan (Rahman dan Islam 2021)	3	0	0 = fragmentasi tinggi 1 = fragmentasi sedang 2 = fragmentasi rendah 3 = tidak terjadi fragmentasi
10	Ketersediaan persemaian (Luna-Nieves <i>et al.</i> 2019)	2	0	0 = tidak ada persemaian 1 = ada persemaian, bibit tidak tersedia 2 = ada persemaian, bibit tersedia
11	Kejadian pohon tumbang (Liang <i>et al.</i> 2016)	3	0	0 = tinggi (>10 kejadian/bulan) 1 = sedang (4-10 kejadian/bulan) 2 = rendah (1-3 kejadian/bulan) 3 = tidak ada

2. Ekonomi, dimensi ini dimaksudkan untuk melihat sejauhmana aktifitas ekonomi yang ada di masyarakat dan pengelola kawasan berhubungan dengan keberlanjutan. Adapun atribut dari dimensi ekonomi yang dipakai dalam penelitian ini dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 7.2 Atribut dimensi ekonomi dalam penilaian status keberlanjutan

No	Atribut dimensi ekonomi	Baik	Buruk	Kategori
1	Pendapatan masyarakat sekitar kawasan (Aissiyah <i>et al.</i> 2019)	2	0	0 = dibawah UMP 1 = sama dengan UMP 2 = diatas UMP
2	Kelompok pemberdayaan masyarakat (Gaodirelwé <i>et al.</i> 2020)	3	0	0 = tidak ada 1 = rendah (1 kelompok/desa, tidak aktif) 2 = sedang (1 kelompok/desa, aktif) 3 = tinggi (>1 kelompok/desa, aktif)
3	Jumlah pendakian (Smith <i>et al.</i> 2023)	3	0	0 = tinggi (kouta penuh setiap bulan) 1 = sedang (kuota >50%/bulan) 2 = rendah (kuota < 50%/bulan) 3 = tidak ada
4	Tingkat interaksi dengan kawasan (Aissiyah <i>et al.</i> 2019)	2	0	0 = rendah 1 = sedang 2 = tinggi
5	Multiplier efek (Chidakel <i>et al.</i> 2021)	2	0	0 = tidak ada Multiplier efek 1 = ada Multiplier efek dan dirasakan beberapa orang 2 = ada Multiplier efek dan dirasakan sebagian besar masyarakat
6	Anggaran pengelolaan kawasan (Nugraha <i>et al.</i> 2024)	2	0	0 = belanja operasional lebih rendah dibanding belanja pegawai 1 = belanja operasional sama dengan dibanding belanja pegawai 2 = belanja operasional lebih tinggi dibanding belanja pegawai
7	Tingkat kontribusi PNBP (Nugraha <i>et al.</i> 2024)	2	0	0 = rendah, kurang dari target 1 = sedang, sama dengan target 2 = tinggi, lebih dari target
8	Nilai ekonomi air (Dewi <i>et al.</i> 2024)	2	0	0 = rendah (<1 miliar/tahun) 1 = sedang (1<5 miliar/tahun) 2 = tinggi (>5 miliar/tahun)

3. Sosial, dimensi ini dimaksudkan untuk melihat sejauhmana pemahaman masyarakat tentang pengelolaan kawasan konservasi, tingkat pendidikan, intensitas sosial terhadap kawasan konservasi. Atribut dari dimensi sosial yang digunakan sebagai berikut :

Tabel 7.3 Atribut dimensi sosial dalam penilaian status keberlanjutan

No	Atribut dimensi sosial	Baik	Buruk	Kategori
1	Tingkat pendidikan masyarakat sekitar kawasan (Kadir W. <i>et al.</i> 2012)	2	0	0 = rendah (rata-rata tamat SD sederajat) 1 = sedang (rata-rata tamat SMP sederajat) 2 = tinggi (rata-rata tamat SMA sederajat)

Tabel 7.4 Atribut dimensi sosial dalam penilaian status keberlanjutan (lanjutan)

No	Atribut dimensi sosial	Baik	Buruk	Kategori
2	Pemahaman tentang zonasi TNGMb (Firnanda <i>et al.</i> 2020)	2	0	0 = rendah (tidak tahu mengenai zonasi) 1 = sedang (mengerti tentang zonasi namun tidak mengimplementasikan) 2 = tinggi (mengerti tentang zonasi dan mengimplementasikan)
3	Pelibatan masyarakat dalam pengelolaan kawasan (Sadono 2013)	2	0	0 = rendah (tidak ada libatannya masyarakat) 1 = sedang (masyarakat terlibat namun tidak aktif) 2 = tinggi (libatannya masyarakat secara aktif)
4	Konflik pemanfaatan sumberdaya alam (Roque <i>et al.</i> 2022)	2	0	0 = tinggi (konflik terjadi ada penyelesaian) 1 = sedang (konflik terjadi, penyelesaian lambat) 2 = rendah (tidak ada konflik)
5	Jumlah Masyarakat Peduli Api (Widuri <i>et al.</i> 2023)	3	0	0 = tidak ada 1 = rendah (<30 orang/desa) 2 = sedang (<60 orang/desa) 3 = tinggi (>60 orang/desa)
6	Kepadatan penduduk (Kadir W. <i>et al.</i> 2012), SNI 03 1733-2004	3	0	0 = sangat padat (>400 jiwa/ha) 1 = tinggi (201-400 jiwa/ha) 2 = sedang (151-200 jiwa/ha) 3 = rendah (<150jiwa/ha)
7	Edukasi konservasi (Firnanda <i>et al.</i> 2020)	2	0	0 = rendah (tidak ada) 1 = sedang (ada, tetapi bersifat temporal) 2 = tinggi (ada sepanjang waktu)
8	Jejak kaki manusia (Qu <i>et al.</i> 2022)	2	0	0 = tinggi (HF>50) 1 = sedang (30 < HF < 50) 2 = rendah (HF< 30)

4. Kelembagaan, dimensi ini dimaksudkan untuk melihat sejauhmana lembaga, pemerintah daerah dan pengelola kawasan konservasi untuk mendukung pengelolaan kawasan konservasi berkelanjutan terkait dengan dinamika penutupan lahan secara kelembagaan. Atribut dari dimensi kelembagaan dapat dilihat sebagai berikut :

Tabel 7.5 Atribut dimensi kelembagaan dalam penilaian status keberlanjutan

No	Atribut dimensi kelembagaan	Baik	Buruk	Kategori
1	Interaksi BTNGMb dengan pemerintah daerah (Sasmitha 2022)	2	0	0 = rendah (tidak ada interaksi) 1 = sedang (ada interaksi, tidak aktif) 2 = tinggi (interaksi aktif pengelolaan)
2	Kebijakan pemerintahan daerah (Sasmitha 2022)	2	0	0 = rendah (tidak mendukung pengelolaan) 1 = sedang (mendukung pengelolaan, tidak aktif) 2 = tinggi (mendukung aktif pengelolaan)
3	Pelibatan organisasi masyarakat dan Pemerintah daerah dalam pengelolaan (Sasmitha 2022)	2	0	0 = rendah (tidak ada libatannya) 1 = sedang (terlibat namun tidak aktif) 2 = tinggi (libatannya secara aktif)

Tabel 7.4 Atribut dimensi kelembagaan dalam penilaian status keberlanjutan (lanjutan)

No	Atribut dimensi kelembagaan	Baik	Buruk	Kategori
4	Penegakan hukum (Tacconi <i>et al.</i> 2019)	2	0	0 = rendah (tidak ada penegakan hukum) 1 = sedang (ada penegakan hukum tapi pilih-pilih) 2 = tinggi (penegakan hukum sesuai aturan)
5	Patroli kawasan (Sukarman 2018)	3	0	0 = tidak ada patroli/bulan 1 = rendah (1-5 hari patroli/bulan) 2 = sedang (5-15 hari patroli/bulan) 3 = tinggi (>15 patroli/bulan)
6	Konflik batas kawasan (Suwondo <i>et al.</i> 2018)	2	0	0 = rendah (tidak ada konflik) 1 = sedang (batas kawasan jelas tapi tata batas belum jelas) 2 = tinggi (batas kawasan dan tata batas jelas)
7	Monitoring dan evaluasi (Nugraha <i>et al.</i> 2024)	3	0	0 = tidak ada 1 = rendah (monev dilakukan namun tidak ada tindak lanjut) 2 = sedang (monev dilakukan dan ada tindak lanjut namun tidak diimplementasikan) 3 = tinggi (monev dilakukan dan ada tindak lanjut dan diimplementasikan)

Skala indeks keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi di TNGMb terkait dengan dinamika penutupan lahan mempunyai interval 0%-100%. Untuk mempermudah penentuan status keberlanjutan dilakukan klasifikasi terhadap nilai indeks keberlanjutan tersebut (Abdillah *et al.* 2023; Jonni *et al.* 2024). Klasifikasi kategori status keberlanjutan untuk tiap dimensi disajikan pada Tabel 7.6 berikut :

Tabel 7.6 Klasifikasi kategori status keberlanjutan

Nilai Indeks	Kategori
0-25	berkelanjutan buruk
25-50	kurang berkelanjutan
50-75	cukup berkelanjutan
75-100	baik berkelanjutan

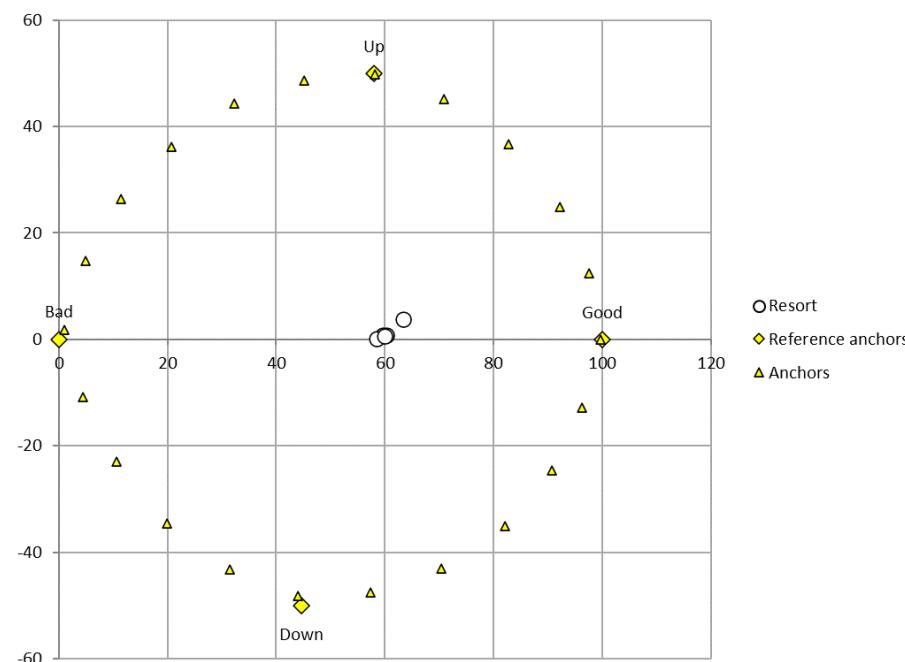
7.3 Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan analisis keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan di TNGMb dengan menggunakan metode MDS Rap-CArea pada 4 (empat) dimensi yaitu dimensi ekologi, ekonomi, sosial dan kelembagaan diperoleh hasil bahwa 4 (empat) dimensi tersebut memenuhi unsur keberlanjutan.

7.3.1 Status Keberlanjutan Dimensi Ekologi

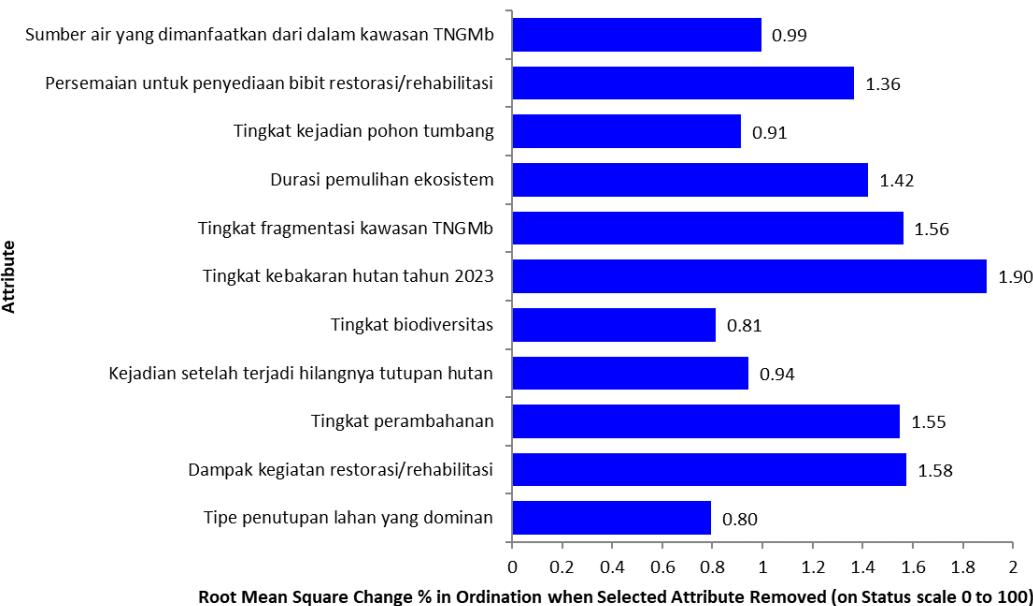
Nilai keberlanjutan dimensi ekologi pada masing-masing resor dapat dilihat pada grafik ordinasi rapfish (Gambar 7.2) yang menunjukkan nilai tertinggi pada Resor Ampel dengan nilai 63,43 dengan status cukup berkelanjutan pada skala 0-100 yaitu termasuk pada kategori kisaran nilai 50-75%. Nilai keberlanjutan dimensi

ekologi pada Resor Kopeng dengan nilai 60,30 dengan status cukup berkelanjutan kategori nilai kisaran 50-75%. Resor Pakis memiliki nilai keberlanjutan dimensi ekologi dengan nilai 59,60 dengan status cukup berkelanjutan yaitu termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Resor Wonolelo dan Resor Selo juga termasuk dalam status cukup berkelanjutan dengan nilai keberlanjutan pada dimensi ekologi masing-masing 58,46 dan 60,01 yang termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Grafik ordinasi keberlanjutan masing-masing resor pada dimensi ekologi dapat dilihat pada Gambar 7.2 berikut:



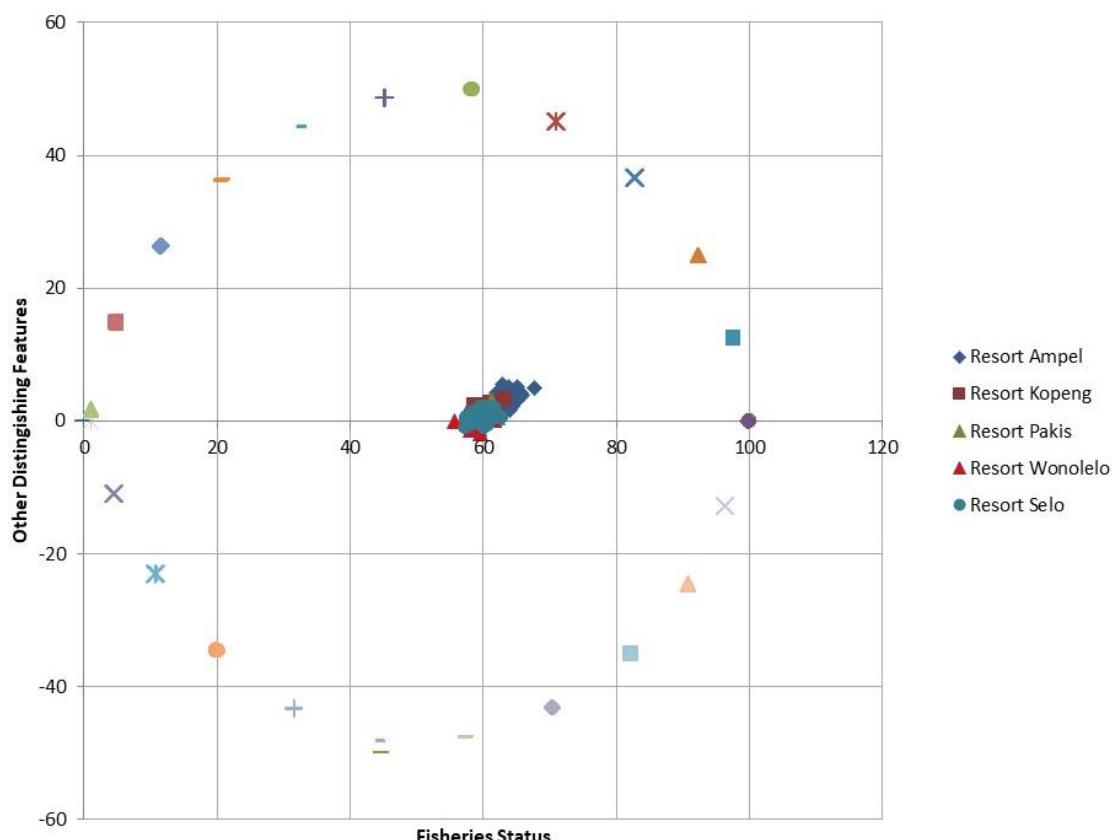
Gambar 7.2 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi ekologi masing-masing resor

Ada 11 (sebelas) atribut yang digunakan untuk melihat aspek yang mempengaruhi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika penutupan lahan di TNGMb yaitu : (1) Sumber air yang dimanfaatkan dari dalam kawasan TNGMb, (2) Tingkat fragmentasi kawasan TNGMb, (3)Tipe penutupan lahan yang dominan,(4) Tingkat kebakaran hutan tahun 2023, (5) Tingkat biodiversitas, (6) Persemaian untuk penyediaan bibit restorasi/rehabilitasi ,(7) Dampak kegiatan restorasi/rehabilitasi,(8) Tingkat kejadian pohon tumbang, (9) Durasi pemulihan ekosistem, (10) Kejadian setelah hilangnya penutupan lahan, dan (11) Tingkat perambahan. Keberlanjutan dimensi ekologi dengan 11 atribut dilakukan analisis leverage untuk melihat atribut yang sensitif dan memberikan kontribusi pada dimensi ekologi. Hasil dari analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi ekologi diperoleh atribut yang dominan yang menjadi faktor pengungkit yaitu tingkat kebakaran hutan tahun 2023, dampak kegiatan restorasi/rehabilitasi dan tingkat fragmentasi yang disajikan pada Gambar 7.3.



Gambar 7.3 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi ekologi

Tingkat kebakaran hutan pada tahun 2023 merupakan atribut pengungkit yang paling sensitif pada dimensi ekologi terhadap keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika penutupan lahan selain dampak dari kegiatan restorasi/rehabilitasi dan tingkat fragmentasi kawasan TNGMb yang perlu mendapatkan perhatian dari pengelola kawasan TNGMb. Berdasarkan hasil inventarisasi dan analisis citra Sentinel tahun 2023 terhadap bekas kebakaran di TNGMb tahun 2023 diperoleh kurang lebih 1.176,89 Ha (BTNGMb 2024). Kebakaran tersebut menyebabkan kerusakan ekosistem seperti hutan campuran, semak belukar dan sabana. Kebakaran tersebut juga menyebabkan rusaknya habitat dari satwa prioritas Surili Jawa (*Presbytis fredericaea*). Kejadian kebakaran hutan di TNGMb tidak berlangsung setiap tahunnya namun apabila terjadi kebakaran akan menyebabkan kerusakan yang sangat luas dan lama mengingat penutupan lahan didominasi oleh hutan dan semak belukar serta lokasi kebakaran yang cukup sulit dijangkau pada ketinggian dan lereng-lereng. Kejadian kebakaran hutan yang cukup besar selain pada tahun 2023 terjadi juga pada tahun 2018 dan 2019 dengan luas kebakaran masing-masing kurang lebih 457,1 Ha dan 613,57 Ha. Oleh sebab itu pencegahan dan pengendalian kebakaran hutan perlu menjadi perhatian bagi pengelola kawasan TNGMb terutama saat musim kemarau panjang. Kegiatan restorasi/rehabilitasi dilakukan setiap tahun di kawasan TNGMb terutama pada zona rehabilitasi dan lokasi-lokasi bekas kebakaran (BTNGMb 2023). Dampak kegiatan restorasi/rehabilitasi juga tergambar pada hasil analisis LandTrendr dimana pada tahun 2020 peningkatan vegetasi tertinggi seluas kurang lebih 369,27 Ha yang tersebar pada sebelah timur kawasan TNGMb yang merupakan zona rehabilitasi sesuai dengan zonasi 2017 (Ardiaristo *et al.* 2024b). Kegiatan restorasi/rehabilitasi di kawasan TNGMb tidak hanya dilakukan oleh pengelola kawasan TNGMb namun juga dilakukan oleh masyarakat, Balai PDASRH, TNI, Kelompok Pecinta Alam, LSM, Pemerintah Daerah dan pihak lainnya.



Gambar 7.4 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi ekologi

Validitas analisis MDS ditunjukkan dengan hasil analisis Monte Carlo dimana selisih antara indeks hasil analisis MDS dan indeks analisis Monte Carlo yang kecil (nilai kurang dari 1) mengindikasikan bahwa dalam proses analisis terjadinya kesalahan pembuatan skor relatif kecil, ketidakpastiannya kecil dan kesalahan pemasukan data ataupun data hilang dapat dihindari. Selain itu validitas dilakukan dengan melihat nilai stress kurang dari 0,25 dan nilai R^2 mendekati 1 yang mengindikasikan bahwa penambahan atribut tidak perlu dilakukan dan aspek-aspek yang dianalisis secara mendekati kondisi sebenarnya. Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo dimensi ekologi serta nilai stress dan R^2 pada masing-masing resor disajikan dalam Gambar 7.4 dan Tabel 7.6.

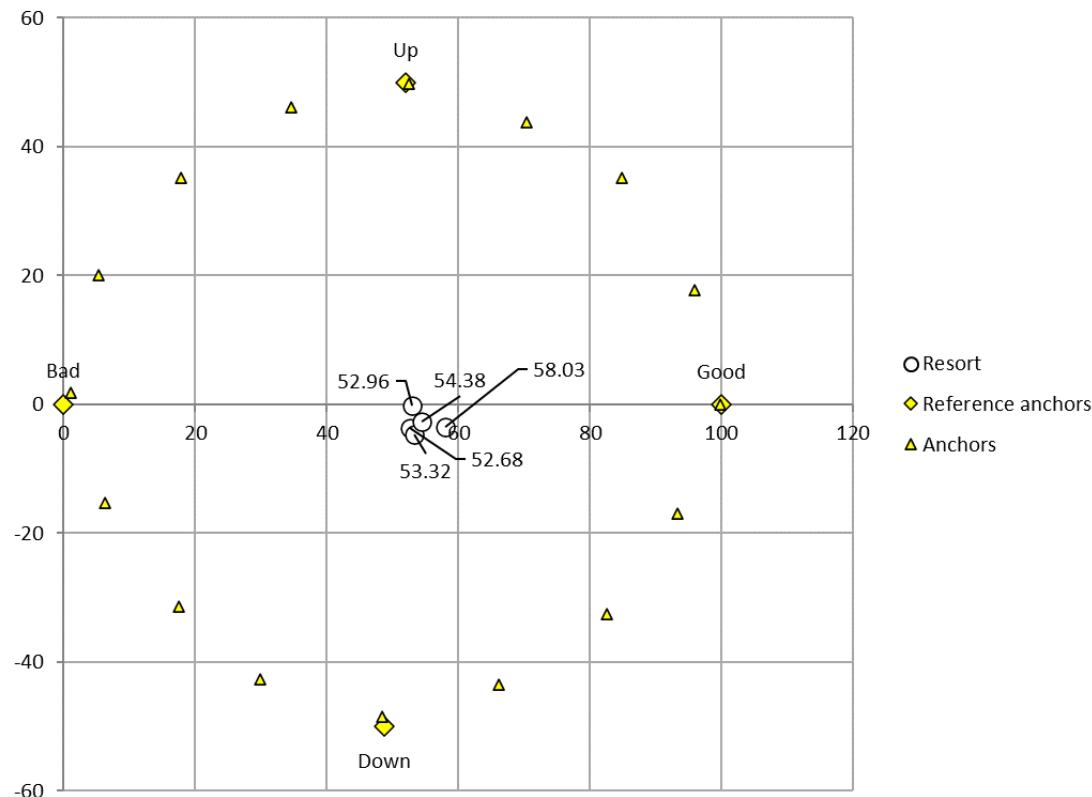
Tabel 7.7 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi ekologi

No	Resor	Hasil MDS	Hasil Monte Carlo	Selisih	Nilai Stress	R^2
1	Resor Ampel	63,43	63,86	0,43	0,168	94,09
2	Resor Kopeneng	60,30	60,34	0,04		
3	Resor Pakis	59,60	60,22	0,62		
4	Resor Wonolelo	58,46	58,69	0,23		
5	Resor Selo	60,01	59,94	0,07		

Hasil analisis MDS dan Monte Carlo masing-masing Resor pada dimensi ekologi diperoleh hasil selisih kurang dari 1, nilai stres 0,168 dan R^2 94,09 yang menunjukkan validitas hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara statistik. Selain itu atribut-atribut yang digunakan mendekati kondisi sebenarnya dan atribut dapat digunakan untuk menjelaskan kondisi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

7.3.2 Status Keberlanjutan Dimensi Ekonomi

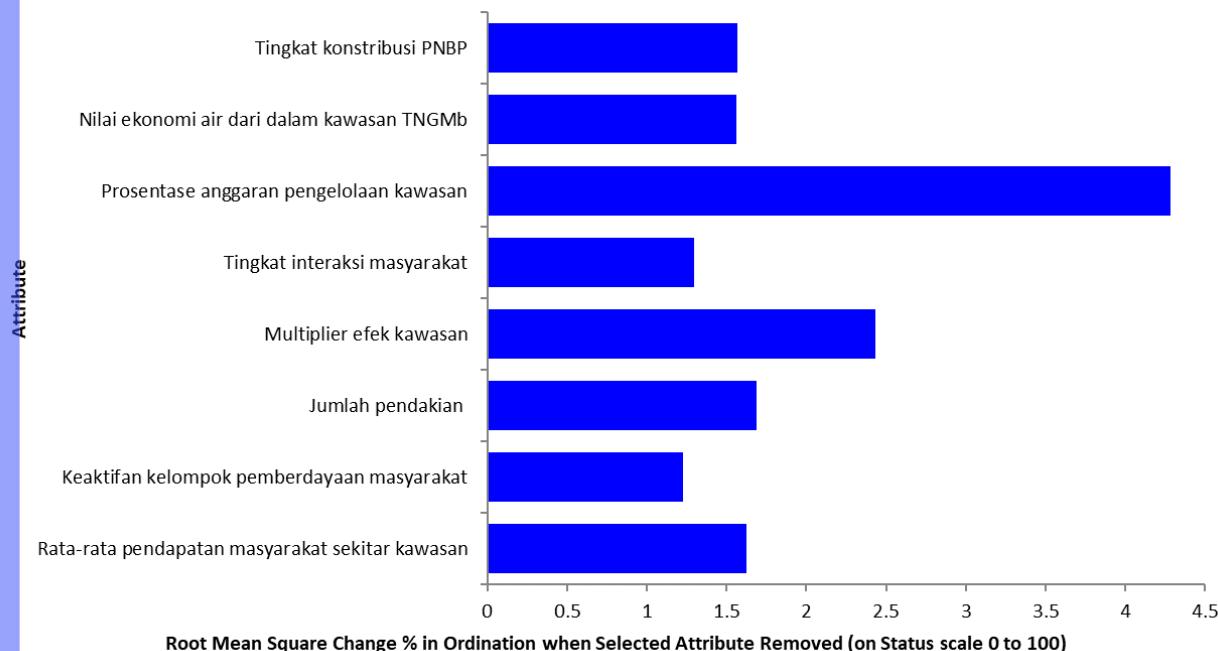
Nilai keberlanjutan dimensi ekonomi pada masing-masing resor dapat dilihat pada grafik ordinasi rapfish (Gambar 7.5) yang menunjukkan nilai tertinggi pada Resor Ampel dengan nilai 58,03 dengan status cukup berkelanjutan pada skala 0-100 yaitu termasuk pada kategori kisaran nilai 50-75%. Nilai keberlanjutan dimensi ekonomi pada Resor Selo dengan nilai 54,38 dengan status cukup berkelanjutan kategori nilai kisaran 50-75%. Resor Wonolelo memiliki nilai keberlanjutan dimensi ekonomi dengan nilai 53,32 dengan status cukup berkelanjutan yaitu termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Resor Kopeng dan Resor Pakis juga termasuk dalam status cukup berkelanjutan dengan nilai keberlanjutan pada dimensi ekonomi masing-masing 52,68 dan 52,96 yang termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Grafik ordinasi keberlanjutan masing-masing resor pada dimensi ekonomi dapat dilihat pada Gambar 7.5.



Gambar 7.5 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi ekonomi masing-masing resor

Ada 8 (delapan) atribut yang digunakan untuk melihat aspek yang mempengaruhi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika penutupan lahan di TNGMb dari dimensi ekonomi yaitu : (1) Rata-rata

pendapatan masyarakat sekitar kawasan, (2) Keaktifan kelompok pemberdayaan masyarakat, (3) Jumlah pendakian, (4) Prosentase anggaran pengelolaan kawasan, (5) Nilai ekonomi air dari dalam kawasan TNGMb, (6) Multiplier efek kawasan, (7) Tingkat kontribusi PNBP, dan (8) Tingkat interaksi masyarakat. Keberlanjutan dimensi ekonomi dengan 8 atribut dilakukan analisis leverage untuk melihat atribut yang sensitif dan memberikan kontribusi pada dimensi ekonomi. Hasil dari analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi ekonomi diperoleh atribut yang dominan yang menjadi faktor pengungkit yaitu prosentase anggaran pengelolaan kawasan yang disajikan pada Gambar 7.6.



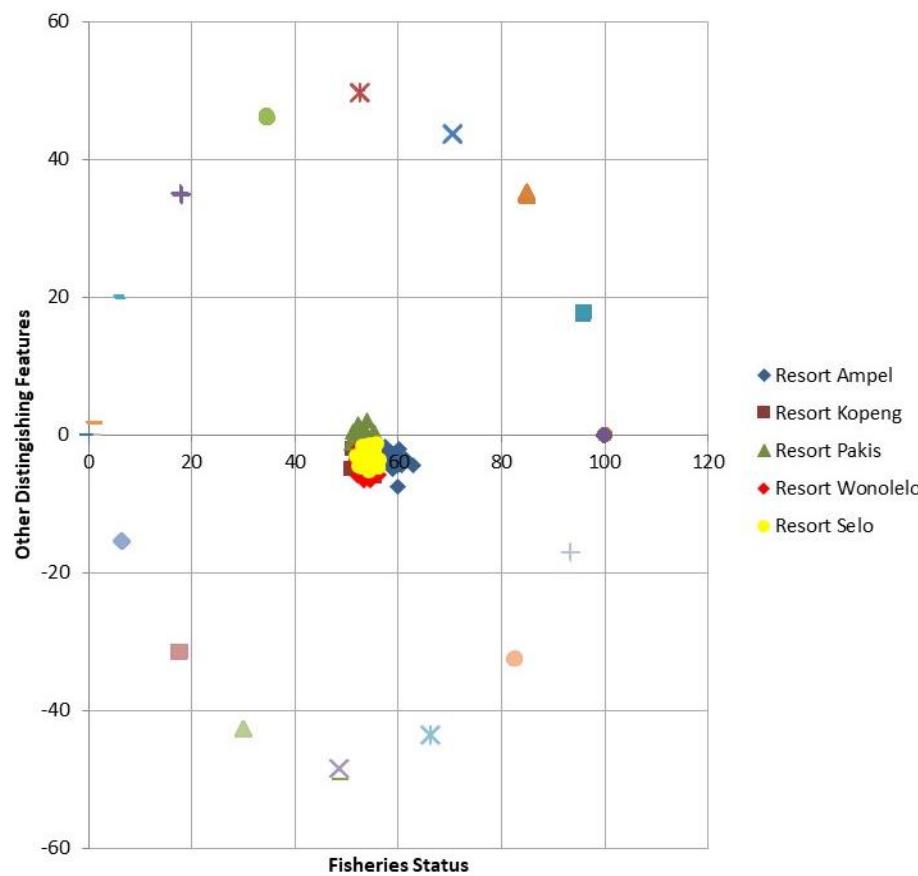
Gambar 7.6 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi ekonomi

Prosentase anggaran pengelolaan kawasan merupakan atribut pengungkit yang paling sensitif pada dimensi ekonomi terhadap keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika penutupan lahan selain multiplier efek kawasan yang perlu mendapatkan perhatian dari pengelola kawasan TNGMb. Berdasarkan laporan keuangan Balai TNGMb tahun 2019-2023 prosentase anggaran untuk operasional kegiatan berkisar antara 24-29% dari total anggaran yang disajikan dalam Tabel 7.7.

Tabel 7.8 Prosentase anggaran operasional kegiatan dan total anggaran dari tahun 2019-2023

Tahun	Total Anggaran	Anggaran operasional kegiatan	%
2019	10.681.720.000	2.672.259.578	25,02
2020	15.057.069.000	4.389.154.302	29,15
2021	12.437.571.000	3.277.991.139	26,36
2022	13.001.981.000	3.692.686.592	28,40
2023	14.133.632.000	3.514.188.953	24,86

Anggaran pengelolaan dipergunakan untuk kegiatan inventarisasi flora fauna, patroli kawasan, pemadaman kebakaran, promosi wisata, groundcheck lapangan terkait permasalahan tenurial, peningkatan kapasitas, pengamanan pendakian dan kegiatan lainnya. Pengalokasian anggaran sesuai dengan rencana serta prioritas merupakan yang penting dalam pengelolaan kawasan konservasi. Anggaran yang cukup dan tepat guna memungkinkan pelaksanaan berbagai kegiatan yang krusial untuk menjaga keberlanjutan ekosistem dan fungsi konservasi kawasan walau peningkatan anggaran tidak cukup menggambarkan faktor yang signifikan dalam peningkatan efektifitas pengelolaan kawasan konservasi (Nugraha *et al.* 2024). Anggaran pengelolaan dapat menjadi komponen fundamental dalam memastikan bahwa kawasan konservasi dapat beradaptasi dan bertahan dalam menghadapi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dinamika perubahan penutupan lahan. Dengan adanya dukungan finansial yang memadai, pengelola kawasan dapat melaksanakan strategi yang lebih efektif untuk konservasi, pengelolaan sumber daya alam, dan keterlibatan masyarakat, sehingga memastikan kelestarian dan keberlanjutan fungsi ekologis kawasan. Dukungan anggaran untuk pengelolaan kawasan konservasi sebaiknya tidak hanya mengandalkan anggaran dari negara saja namun diperlukan dukungan anggaran dari pihak lain. Dukungan tersebut dapat dalam bentuk kerjasama penelitian dengan universitas, dukungan CSR dalam bentuk hibah sarana prasarana, sinkronisasi kegiatan dengan pemerintah daerah setempat ataupun kolaborasi kegiatan dengan NGO.



Gambar 7.7 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi ekonomi



Validitas analisis MDS ditunjukkan dengan hasil analisis Monte Carlo dimana selisih antara indeks hasil analisis MDS dan indeks analisis Monte Carlo yang kecil (nilai kurang dari 1) mengindikasikan bahwa dalam proses analisis terjadinya kesalahan pembuatan skor relatif kecil, ketidakpastiannya kecil dan kesalahan pemasukan data ataupun data hilang dapat dihindari. Selain itu validitas dilakukan dengan melihat nilai stress kurang dari 0,25 dan nilai R^2 mendekati 1 yang mengindikasikan bahwa penambahan atribut tidak perlu dilakukan dan aspek yang dianalisis secara mendekati kondisi sebenarnya. Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo dimensi ekonomi serta nilai stress dan R^2 pada masing-masing resor disajikan dalam Gambar 7.6 dan Tabel 7.8 berikut:

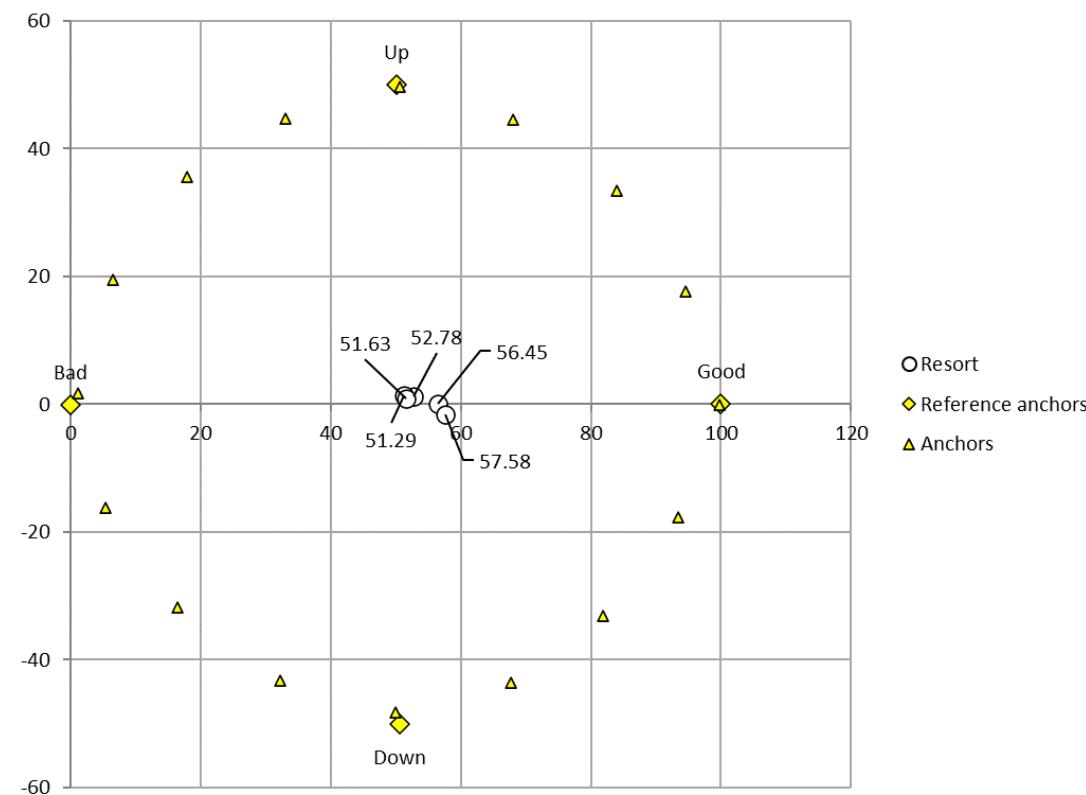
Tabel 7.9 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi ekonomi

No	Resor	Hasil MDS	Hasil Monte Carlo	Selisih	Nilai Stress	R^2
1	Resor Ampel	58.03	58.76	0.74	0,164	94,15
2	Resor Kopeng	52.68	53.15	0.47		
3	Resor Pakis	52.96	53.20	0.24		
4	Resor Wonolelo	53.32	53.61	0.29		
5	Resor Selo	54.38	54.57	0.20		

Hasil analisis MDS dan Monte Carlo masing-masing resor pada dimensi ekonomi diperoleh hasil selisih kurang dari 1, nilai stres 0,164 dan R^2 94,15 yang menunjukkan validitas hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara statistik. Selain itu atribut-atribut yang digunakan mendekati kondisi sebenarnya dan atribut dapat digunakan untuk menjelaskan kondisi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan dari dimensi ekonomi dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

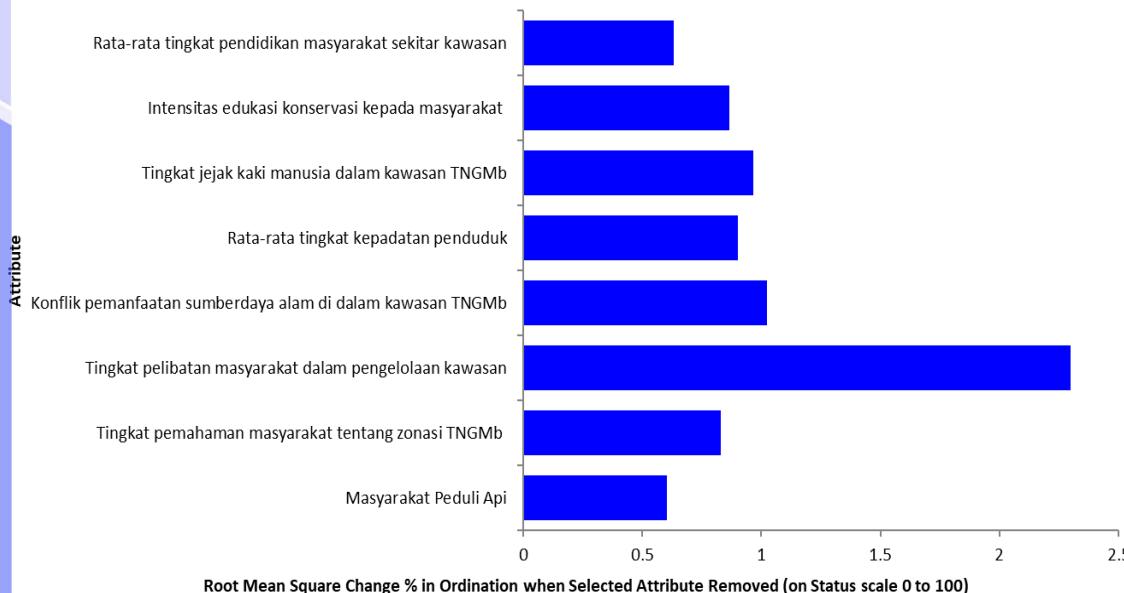
7.3.3 Status Keberlanjutan Dimensi Sosial

Nilai keberlanjutan dimensi sosial pada masing-masing resor dapat dilihat pada grafik ordinasi rapfish (Gambar 7.8) yang menunjukkan nilai tertinggi pada Resor Pakis dengan nilai 57,58 dengan status cukup berkelanjutan pada skala 0-100 yaitu termasuk pada kategori kisaran nilai 50-75%. Nilai keberlanjutan dimensi sosial pada Resor Ampel dengan nilai 56,45 dengan status cukup berkelanjutan kategori nilai kisaran 50-75%. Resor Kopeng memiliki nilai keberlanjutan dimensi sosial dengan nilai 52,78 dengan status cukup berkelanjutan yaitu termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Resor Selo dan Resor Wonolelo juga termasuk dalam status cukup berkelanjutan dengan nilai keberlanjutan pada dimensi sosial masing-masing 51,63 dan 51,29 yang termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Grafik ordinasi keberlanjutan masing-masing resor pada dimensi sosial dapat dilihat pada Gambar 7.8.



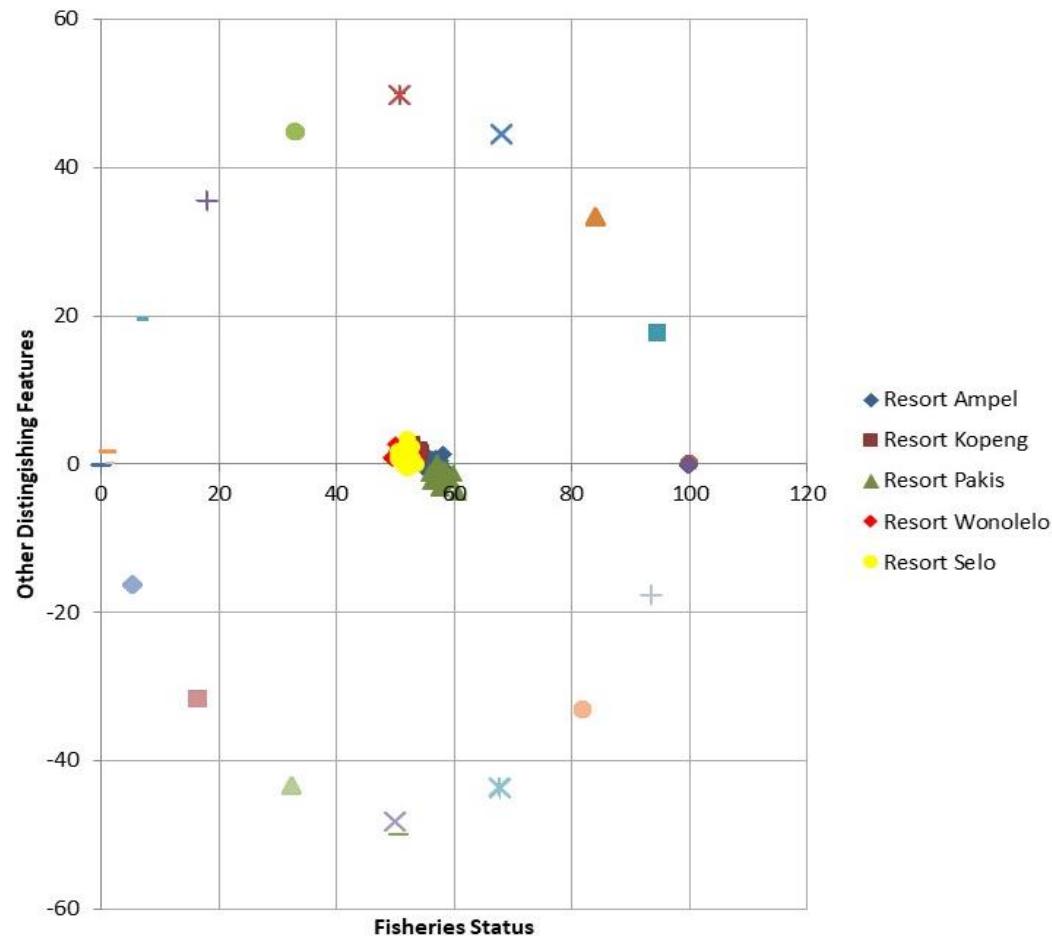
Gambar 7.8 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi sosial masing-masing resor

Ada 8 (delapan) atribut yang digunakan untuk melihat aspek yang mempengaruhi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika penutupan lahan di TNGMb dari dimensi sosial yaitu : (1) Rata-rata tingkat pendidikan masyarakat sekitar kawasan, (2) Intensitas edukasi konservasi kepada masyarakat, (3) Tingkat jejak kami manusia dalam kawasan TNGMb, (4) Rata-rata tingkat kepadatan masyarakat , (5) Konflik pemanfaatan sumberdaya alam di dalam kawasan TNGMb, (6) Masyarakat Peduli Api, (7) Tingkat pelibatan masyarakat dalam pengelolaan kawasan, dan (8) Tingkat pemahaman masyarakat tentang zonasi TNGMb. Keberlanjutan dimensi sosial dengan 8 atribut dilakukan analisis leverage untuk melihat atribut yang sensitif dan memberikan kontribusi pada dimensi sosial. Atribut yang sensitif ini memerlukan intervensi kebijakan yang tepat karena perubahannya berpengaruh terhadap nilai indeks keberlanjutan pada dimensi sosial. Hasil dari analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi sosial diperoleh atribut yang dominan yang menjadi faktor pengungkit yaitu tingkat pelibatan masyarakat dalam pengelolaan kawasan yang disajikan pada Gambar 7.9 berikut:



Gambar 7.9 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi sosial

Tingkat pelibatan masyarakat dalam pengelolaan kawasan TNGMb menjadi faktor pengungkit dalam mewujudkan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika penutupan lahan. Apabila faktor atau atribut ini tidak dikelola dengan baik dimasa akan datang maka akan berdampak negatif terhadap pengelolaan kawasan konservasi terkait dinamika perubahan penutupan lahan. Pelibatan masyarakat dalam pengelolaan kawasan TNGMb sebagai mitra pengelola kawasan TNGMb dapat berupa kerjaantara yang terlibat aktif ikut dalam patroli kawasan, pelibatan partisipatif dalam kegiatan rehabilitasi/restorasi mulai dari pembibitan hingga penanaman, pelibatan dalam kegiatan pengambilan data dilapangan, pelibatan sebagai ranger dalam pendakian dan juga pelibatan dalam usaha pemadaman kebakaran hutan di kawasan TNGMb. Pelibatan masyarakat sekitar kawasan TNGMb ini merupakan usaha untuk memperkuat keterlibatan masyarakat dalam upaya konservasi, menjaga keberlanjutan ekosistem, dan meningkatkan pemahaman dan kepedulian terhadap pentingnya konservasi dan kawasan TNGMb. Dengan melibatkan masyarakat sebagai mitra dalam pengelolaan kawasan konservasi, tidak hanya meningkatkan efektivitas pengawasan dan pengelolaan, tetapi juga memberikan manfaat sosial dan ekonomi bagi masyarakat setempat, seperti peningkatan keterampilan, peluang kerja, dan pendapatan tambahan. Selain itu, keterlibatan ini juga dapat memperkuat ikatan antara masyarakat dan kawasan konservasi, menciptakan rasa memiliki, dan komitmen yang lebih besar untuk melindungi dan memelihara lingkungan alam sekitar. Oleh karena itu pelibatan masyarakat dalam pengelolaan perlu terus ditingkatkan mengingat faktor/atribut ini sangat berpengaruh dalam mendukung keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan.



Gambar 7.10 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi sosial

Validitas analisis MDS ditunjukkan dengan hasil analisis Monte Carlo dimana selisih antara indeks hasil analisis MDS dan indeks analisis Monte Carlo yang kecil (nilai kurang dari 1) mengindikasikan bahwa dalam proses analisis terjadinya kesalahan pembuatan skor relatif kecil, ketidakpastiannya kecil dan kesalahan pemasukan data ataupun data hilang dapat dihindari. Selain itu validitas dilakukan dengan melihat nilai stress kurang dari 0,25 dan nilai R^2 mendekati 1 yang mengindikasikan bahwa penambahan atribut tidak perlu dilakukan dan aspek-aspek yang dianalisis secara mendekati kondisi sebenarnya. Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo dimensi sosial serta nilai stress dan R^2 pada masing-masing resor disajikan dalam Gambar 7.10 dan Tabel 7.9 berikut ini:

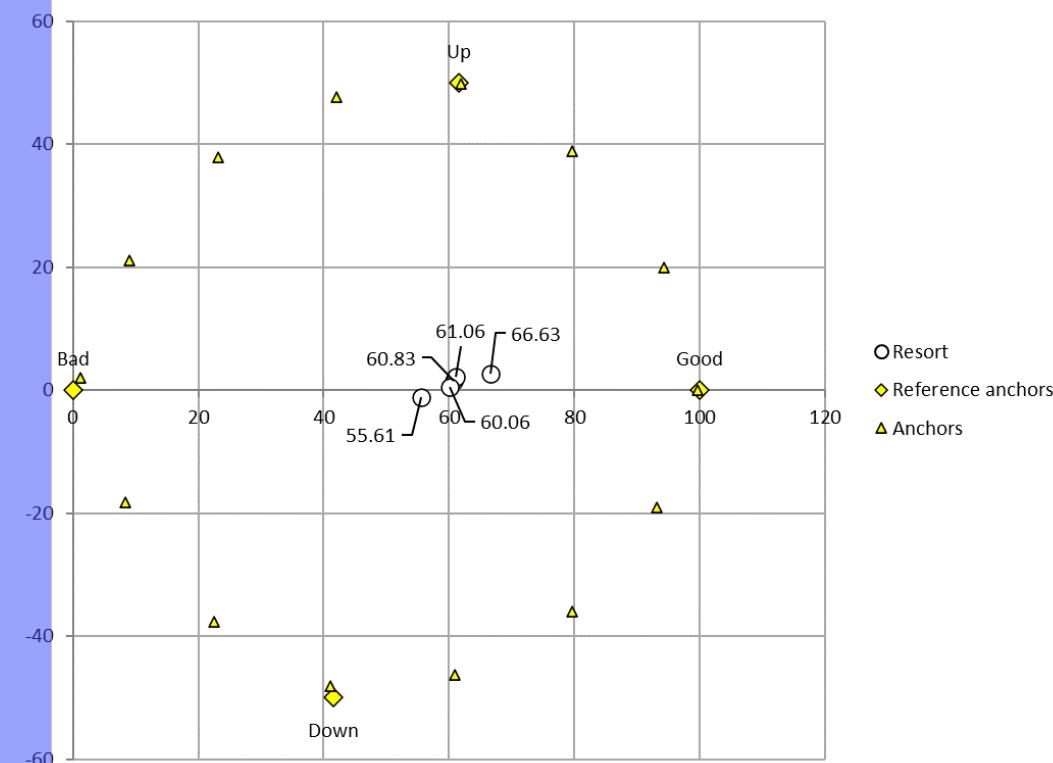
Tabel 7.10 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi sosial

No	Resor	Hasil MDS	Hasil Monte Carlo	Selisih	Nilai Stress	R^2
1	Resor Ampel	56.45	56.42	0.03	0,205	92,71
2	Resor Kopeng	52.78	52.59	0.19		
3	Resor Pakis	57.58	57.67	0.09		
4	Resor Wonolelo	51.29	51.23	0.05		
5	Resor Selo	51.63	51.73	0.10		

Hasil analisis MDS dan Monte Carlo masing-masing resor pada dimensi ekonomi diperoleh hasil selisih kurang dari 1, nilai stres 0,205 dan R^2 92,17 yang menunjukkan validitas hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara statistik. Selain itu atribut-atribut yang digunakan mendekati kondisi sebenarnya dan atribut dapat digunakan untuk menjelaskan kondisi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan dari dimensi sosial dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

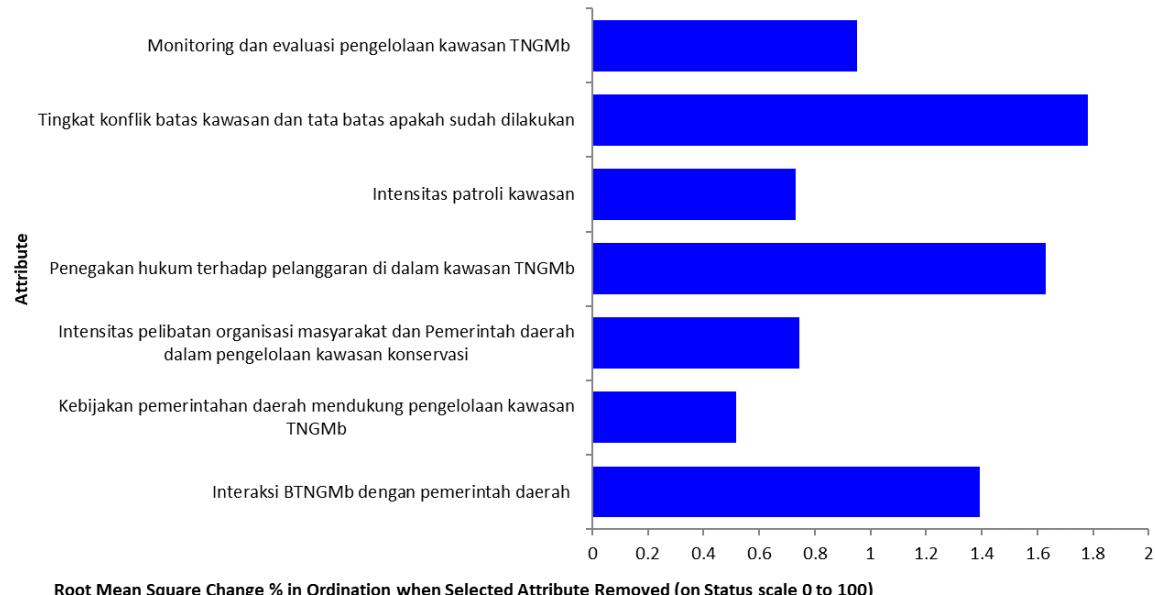
7.3.4 Status Keberlanjutan Dimensi Kelembagaan

Nilai keberlanjutan dimensi kelembagaan pada masing-masing resor dapat dilihat pada grafik ordinasi rapfish (Gambar 7.11) yang menunjukkan nilai tertinggi pada Resor Pakis dengan nilai 66,63 dengan status cukup berkelanjutan pada skala 0-100 yaitu termasuk pada kategori kisaran nilai 50-75%. Nilai keberlanjutan dimensi sosial pada Resor Wonolelo dengan nilai 61,06 dengan status cukup berkelanjutan kategori nilai kisaran 50-75%. Resor Ampel memiliki nilai keberlanjutan dimensi kelembagaan dengan nilai 60,83 dengan status cukup berkelanjutan yaitu termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Resor Selo dan Resor Kopeng juga termasuk dalam status cukup berkelanjutan dengan nilai keberlanjutan pada dimensi kelembagaan masing-masing 60,06 dan 55,61 yang termasuk dalam kategori kisaran nilai 50-75%. Grafik ordinasi keberlanjutan masing-masing resor pada dimensi kelembagaan dapat dilihat pada Gambar 7.11 berikut:



Gambar 7.11 Grafik ordinasi keberlanjutan dimensi kelembagaan masing-masing resor

Ada 7 (tujuh) atribut yang digunakan untuk melihat aspek yang mempengaruhi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika penutupan lahan di TNGMb dari dimensi kelembagaan yaitu: (1) Interaksi BTNGMb dengan Pemerintah Daerah, (2) Kebijakan Pemerintah Daerah mendukung pengelolaan kawasan TNGMb, (3) Penegakan hukum terhadap pelanggaran di dalam kawasan TNGMb, (4) Tingkat konflik batas kawasan dan tata batas, (5) Intensitas patroli kawasan, (6) Intensitas pelibatan organisasi masyarakat dan pemerintah daerah dalam pengelolaan kawasan konservasi, dan (7) Monitoring dan evaluasi pengelolaan kawasan TNGMb. Keberlanjutan dimensi kelembagaan dengan tujuh atribut dilakukan analisis leverage untuk melihat atribut yang sensitif dan memberikan kontribusi pada dimensi kelembagaan. Hasil dari analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi kelembagaan diperoleh atribut yang dominan yang menjadi faktor pengungkit disajikan pada Gambar 7.12 berikut:



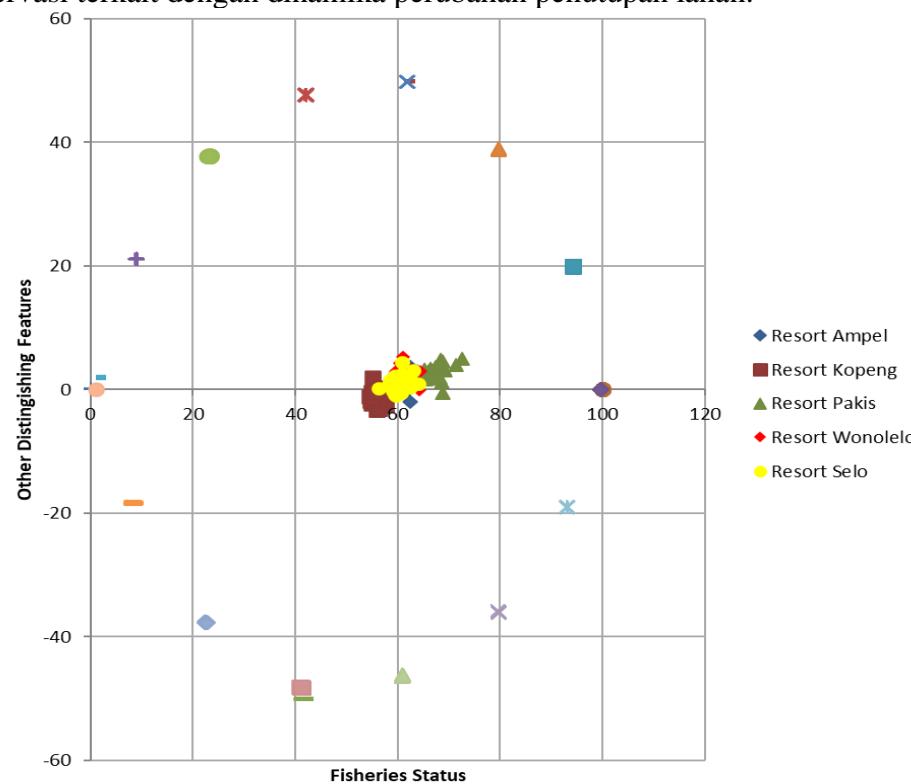
Gambar 7.12 Hasil analisis leverage atribut keberlanjutan dimensi kelembagaan

Gambar 7.12 menunjukkan bahwa tingkat konflik batas kawasan, penegakan hukum terhadap pelanggaran di dalam kawasan TNGMb dan interaksi BTNGMb dan pemerintah daerah merupakan faktor yang menentukan dalam mewujudkan pengelolaan berkelanjutan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan. Konflik batas kawasan sering terjadi karena ketidakjelasan atau perselisihan mengenai delineasi batas yang tepat antara kawasan konservasi dan wilayah lain seperti pemukiman atau lahan pertanian. Konflik ini dapat mengarah pada perambahan ilegal dan penggunaan lahan yang tidak sesuai dengan tujuan konservasi, yang berpotensi merusak ekosistem. Penyelesaian konflik ini memerlukan upaya mediasi, dialog terbuka antara pihak-pihak yang terlibat, serta penetapan dan sosialisasi batas yang jelas dan diakui secara hukum. Konflik tenurial di kawasan TNGMb terjadi pada Desa Jrakah dimana terdapat batas kawasan yang belum direkonstruksi dan pada lokasi tersebut dimanfaatkan oleh masyarakat untuk lahan pertanian. Upaya resolusi konflik telah dilakukan dengan melibatkan Balai Pemantapan Kawasan Hutan dan Tata Lingkungan Wilayah IX

Yogyakarta, Camat Selo, perangkat desa dan masyarakat setempat (BTNGMb 2024).

Penegakan hukum yang konsisten terhadap pelanggaran di dalam kawasan konservasi adalah kunci untuk menjaga kelestarian ekosistem. Ini mencakup tindakan terhadap aktivitas ilegal seperti penebangan hutan, pembakaran didalam kawasan hutan dan eksplorasi sumber daya lainnya yang tidak sah. Penegakan hukum yang efektif membutuhkan koordinasi dengan aparat keamanan, dukungan hukum, serta keterlibatan masyarakat untuk meningkatkan kesadaran dan partisipasi dalam upaya konservasi. Penegakan hukum saat ini lebih pada pencegahan dan pembinaan kepada masyarakat yang mana penanganan pelanggaran yang lebih humanis (Wiratno 2018).

Kerja sama yang erat antara BTNGMb dan pemerintah daerah adalah elemen penting dalam pengelolaan kawasan konservasi TNGMb. Pemerintah daerah memiliki peran dalam mendukung kebijakan konservasi melalui regulasi tata ruang, perizinan, dan fasilitasi pengembangan pariwisata berkelanjutan. Selain itu, pemerintah daerah dapat membantu mengintegrasikan kebijakan konservasi dengan pembangunan lokal, memastikan bahwa kepentingan konservasi dan kebutuhan masyarakat lokal dapat diakomodasi secara seimbang. Kolaborasi juga mencakup upaya untuk melibatkan masyarakat dalam kegiatan konservasi, pendidikan lingkungan, dan pembangunan kapasitas lokal. Dengan menangani konflik batas, memastikan penegakan hukum yang tegas, dan membangun kerja sama yang kuat dengan pemerintah daerah, pengelola kawasan dapat lebih efektif dalam melindungi ekosistem dan memastikan keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan.



Gambar 7.13 Diagram analisis Monte Carlo masing-masing Resor dimensi kelembagaan

Validitas analisis MDS ditunjukkan dengan hasil analisis Monte Carlo dimana selisih antara indeks hasil analisis MDS dan indeks analisis Monte Carlo yang kecil (nilai kurang dari 1) mengindikasikan bahwa dalam proses analisis terjadinya kesalahan pembuatan skor relatif kecil, ketidakpastiannya kecil dan kesalahan pemasukan data ataupun data hilang dapat dihindari.

Tabel 7.11 Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo pada dimensi kelembagaan

No	Resor	Hasil MDS	Hasil Monte Carlo	Selisih	Nilai Stress	R ²
1	Resor Ampel	60.83	61.33	0.51	0,200	92,95
2	Resor Kopeng	55.61	55.70	0.09		
3	Resor Pakis	66.63	67.42	0.79		
4	Resor Wonolelo	61.06	61.13	0.07		
5	Resor Selo	60.06	59.75	0.31		

Selain itu validitas dilakukan dengan melihat nilai stress kurang dari 0,25 dan nilai R² mendekati 1 yang mengindikasikan bahwa penambahan atribut tidak perlu dilakukan dan aspek-aspek yang dianalisis secara mendekati kondisi sebenarnya. Hasil validitas analisis MDS dan Monte Carlo dimensi kelembagaan serta nilai stress dan R² pada masing-masing resor disajikan dalam Gambar 7.13 dan Tabel 7.11.

Hasil analisis MDS dan Monte Carlo masing-masing resor pada dimensi ekonomi diperoleh hasil selisih kurang dari 1, nilai stres 0,200 dan R² 92,95 yang menunjukkan validitas hasil analisis dapat dipertanggungjawabkan secara statistik. Selain itu atribut-atribut yang digunakan mendekati kondisi sebenarnya dan atribut dapat digunakan untuk menjelaskan kondisi keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan dari dimensi kelembagaan dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

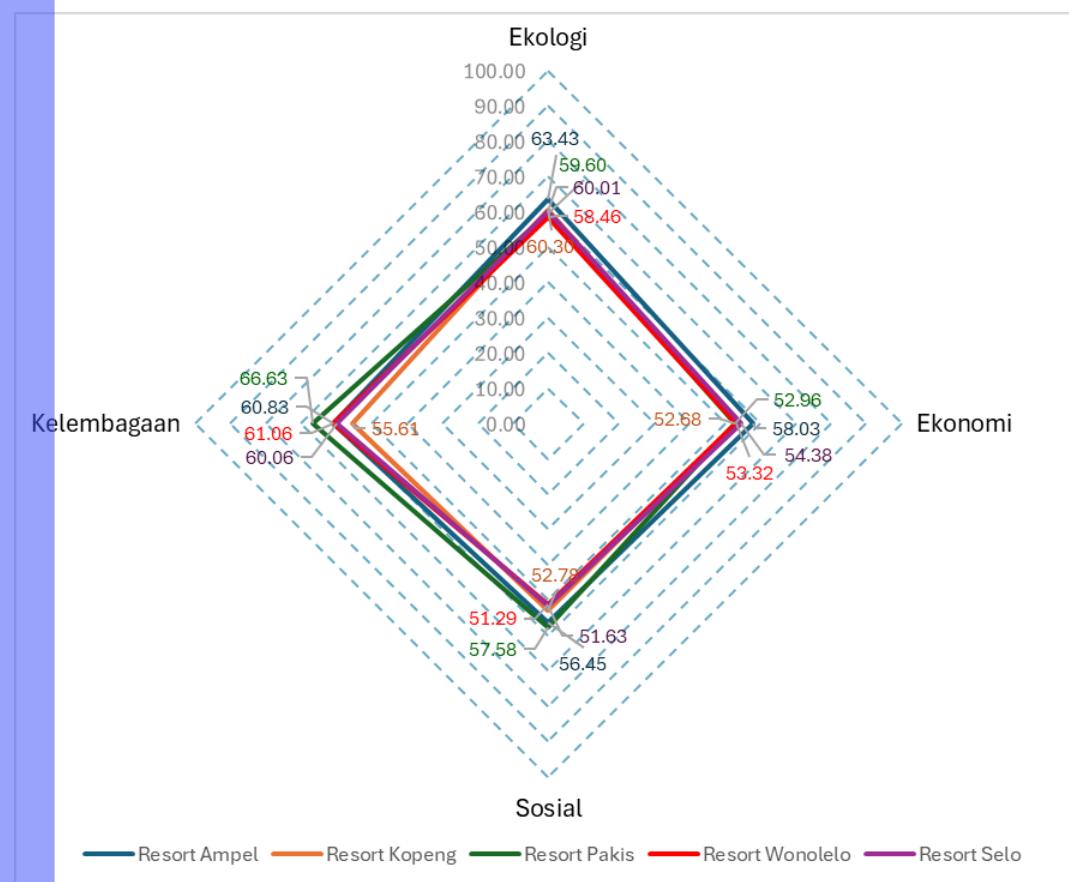
Tabel 7.12 Analisis Status Keberlanjutan Pengelolaan Kawasan TNGMb terkait Dinamika Perubahan Penutupan Lahan

Dimensi	Resor Ampel	Resor Kopeng	Resor Pakis	Resor Wonolelo	Resor Selo	Indeks	Status Berkelaanjutan
Ekologi	63.43	60.30	59.60	58.46	60.01	50-75	Cukup berkelanjutan
Ekonomi	58.03	52.68	52.96	53.32	54.38	50-75	Cukup berkelanjutan
Sosial	56.45	52.78	57.58	51.29	51.63	50-75	Cukup berkelanjutan
Kelembagaan	60.83	55.61	66.63	61.06	60.06	50-75	Cukup berkelanjutan

Analisis penilaian status keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan dari dimensi ekologi, sosial, ekonomi dan kelembagaan yang telah diuraikan sebelumnya secara ringkas disajikan pada Tabel 7.11 dan dibuat dalam diagram layang-layang seperti disajikan pada Gambar 7.14. Status keberlanjutan pada seluruh dimensi dan masing-masing resor menunjukkan hasil status cukup berkelanjutan. Pada dimensi ekologi nilai indeks status keberlanjutan dengan nilai tertinggi pada Resor Ampel dengan nilai 63,43 dengan status cukup berkelanjutan berdasarkan kirisan interval 50-75%. Hal ini dipengaruhi pada tingkat kebakaran hutan dan lahan pada tahun 2023 yang tidak

terlalu besar di Resor Ampel sehingga penutupan lahan dapat terjaga, selain itu tingkat biodiversitas yang tinggi di Resor Ampel. Nilai indeks status keberlanjutan dari dimensi ekonomi dengan nilai tertinggi terletak pada Resor Ampel dengan nilai 58,03 berdasarkan kisaran interval 50-75%. Hal ini yang mempengaruhi adalah tidak adanya jalur pendakian pada Resor Ampel sehingga gangguan dari pendakian terhadap perubahan penutupan lahan tidak ada.

Resor Pakis memiliki nilai tertinggi indeks status keberlanjutannya pada dimensi sosial dengan nilai 57,58 berdasarkan interval 50-75%. Konflik pemanfaatan yang tidak ada pada Resor Pakis saat penelitian dan besarnya intensitas edukasi kepada masyarakat merupakan faktor yang menyebabkan Resor Pakis memiliki nilai status keberlanjutan tertinggi dari dimensi sosial. Nilai tertinggi indeks status keberlanjutan pada dimensi kelembagaan terletak pada Resor Pakis dengan nilai 66,63 dengan status cukup berkelanjutan berdasarkan kisaran interval 50-75%. Hal yang mempengaruhi besarnya status keberlanjutan pada Resor Pakis dari dimensi kelembagaan adalah interaksi dan dukungan dari pemerintah daerah yang cukup intens.



Gambar 7.14 Diagram layang-layang status keberlanjutan setiap dimensi pada masing-masing Resor

Secara ekologis, pengendalian kebakaran hutan dan lahan penting dilakukan guna mempertahankan dinamika perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb secara berkelanjutan. Dari perspektif ekonomi, alokasi anggaran untuk operasional

pengelolaan kawasan harus dijaga agar kegiatan operasional dapat dilaksanakan sesuai dengan rencana dan prioritas yang telah disusun. Secara sosial, partisipasi aktif dan optimal dari masyarakat dalam pengelolaan kawasan TNGMb perlu ditingkatkan. Dari sisi kelembagaan, penting untuk mengendalikan tingkat konflik terkait batas kawasan dan menegakkan hukum terhadap pelanggaran di dalam kawasan TNGMb secara konsisten. Selain itu, diperlukan penguatan interaksi antara BTNGMb dan pemerintah daerah untuk memastikan keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb. Perbaikan terhadap seluruh atribut pada semua dimensi dengan cara intervensi kebijakan dari pengelola kawasan TNGMb secara tepat perlu dilakukan untuk memperoleh pengelolaan kawasan TNGMb berkelanjutan berkaitan dengan dinamika perubahan penutupan lahan. Atribut-atribut sensitif dari masing-masing dimensi berkelanjutan yang merupakan atribut pengungkit harus menjadi pedoman dalam melakukan intervensi dalam kebijakan yang akan disusun. Bentuk intervensi yang tepat baik berupa kebijakan maupun bentuk lain non kebijakan akan sangat berpengaruh pada status keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb berkaitan dengan dinamika perubahan penutupan lahan. Atribut-atribut sensitif dari masing-masing dimensi disajikan dalam Tabel 7.13 berikut:

Tabel 7.13 Atribut sensitif dari masing-masing dimensi pengelolaan kawasan TNGMb terkait dinamika perubahan penutupan lahan secara berkelanjutan

No	Dimensi	Atribut sensitif
1	Ekologi	Kebakaran hutan dan lahan
2	Ekonomi	Prosentase anggaran operasional pengelolaan kawasan
3	Sosial	Partisipasi masyarakat dalam pengelolaan kawasan
4	Kelembagaan	Konflik terkait batas kawasan, penegakan hukum terhadap pelanggaran, interaksi BTNGMb dan pemerintah daerah

7.4 Kesimpulan

Status keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb yang dikaitkan dengan dinamika penutupan lahan menghasilkan nilai cukup berkelanjutan. Analisis menggunakan metode MDS Rap-CArea dengan validitas yang teruji melalui Monte Carlo, menunjukkan bahwa nilai indeks keberlanjutan pada masing-masing resor umumnya berada dalam kategori cukup berkelanjutan, dengan nilai pada kisaran 50-75%. Resor Ampel dan Resor Pakis memiliki nilai status keberlanjutan yang paling tinggi pada setiap dimensi keberlanjutan. Keseluruhan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengelolaan kawasan TNGMb dapat lebih ditingkatkan menuju keberlanjutan yang lebih optimal dalam menghadapi dinamika perubahan penutupan lahan. Penguatan kebijakan dan upaya pengelolaan yang responsif terhadap atribut-atribut kritis ini akan sangat berpengaruh pada peningkatan status keberlanjutan pengelolaan kawasan konservasi di TNGMb.



VIII. MODEL PENILAIAN KERENTANAN PERUBAHAN PENUTUPAN LAHAN KAWASAN KONSERVASI

8.1 Pendahuluan

Kawasan konservasi pada hakikatnya ditetapkan mencakup perlindungan keanekaragaman hayati dan jasa lingkungan yang mencakup didalamnya (Muise *et al.* 2022). Kawasan konservasi diharapkan dapat membatasi aktivitas manusia dan perubahan penutupan lahan yang terjadi didalamnya sehingga dapat mencegah hilangnya keanekaragaman hayati di kawasan yang ditetapkan (Lee *et al.* 2019). Selain itu, kawasan konservasi juga harus dapat meningkatkan kesejahteraan masyarakat yang berada disekitarnya (Wiratno 2012). Kesadaran akan perubahan penutupan lahan di dalam kawasan konservasi sangat penting untuk pengelolaan lingkungan yang efisien dan keberlanjutan (Sobhani *et al.* 2021). Pemahaman mengenai perubahan penutupan lahan dan keanekaragaman hayati mendukung agenda Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya SDG 15, yang menekankan pengelolaan hutan berkelanjutan, perang melawan penggurunan, penghentian dan pembalikan degradasi lahan, dan pemberantasan hilangnya keanekaragaman hayati (United Nations Interagency and Expert Group on SDG Indicators (IAEG-SDGs) 2019). Analisis mengenai perubahan penutupan lahan di dalam kawasan konservasi dapat menunjukkan keberhasilan praktik pengelolaan di wilayah tersebut (Shahi *et al.* 2020). Penutupan lahan di kawasan konservasi berfungsi sebagai habitat bagi keanekaragaman hayati, pengatur, sumber produksi, dan penyedia informasi (Prasetyo 2017). Disamping itu penutupan lahan hutan dapat mengatur pengelolaan air dan mengurangi erosi dan sedimentasi(Romlah *et al.* 2018; Salim *et al.* 2019; Wasis *et al.* 2020). Dinamika perubahan penutupan lahan di zona konservasi dapat dikarakterisasi dan digunakan sebagai dasar untuk merumuskan kebijakan pengelolaan kawasan (Shumba *et al.* 2020; Assaf *et al.* 2021) dan untuk menjelaskan aktivitas masyarakat sekitar kawasan konservasi (Bendíková *et al.* 2018).

Penilaian kerentanan menawarkan wawasan penting untuk pengelolaan berkelanjutan, menumbuhkan kesadaran, dan mengurangi risiko yang terkait dengan perubahan (Nghiem 2015). Kerentanan sebagaimana didefinisikan dalam konteks perubahan iklim, ditentukan oleh jenis, intensitas, dan laju perubahan iklim, bersama dengan paparan sistem terhadap fluktuasi, sensitivitasnya, dan potensinya untuk adaptasi (IPCC 2001). Kerentanan dapat didefinisikan sebagai suatu sistem, subsistem, atau komponen terhadap kerusakan atau perubahan sebagai akibat dari paparan bahaya, termasuk gangguan dan tekanan (Turner II *et al.* 2003). Penilaian kerentanan ini telah dilakukan melalui berbagai penelitian yang menggunakan berbagai metodologi, termasuk penilaian kerentanan penggunaan lahan terkait perubahan iklim (IPCC 2001; Hannah *et al.* 2010), penilaian kerentanan lingkungan (Boori *et al.* 2014), penilaian kerentanan jasa ekosistem (Metzger *et al.* 2006), dan penilaian kerentanan bencana banjir (Li *et al.* 2013).

Model kerentanan untuk perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi didasarkan pada pemahaman bahwa penilaian kerentanan dapat menghasilkan panduan penting untuk pengelolaan berkelanjutan, menumbuhkan kesadaran, dan mengurangi risiko perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi (Nghiem 2015). Model ini dibangun menggunakan ekstraksi dan analisis data dari tinjauan

pustaka dan metodologi penelitian, yang diuraikan dalam suatu kerangka kerja dan diintegrasikan dengan model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan. Paradigma yang ditetapkan oleh Turner II et al., 2003 diadopsi untuk mengatasi perubahan yang berkaitan dengan perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi. Strategi kerentanan ini mencakup semua parameter yang dipertimbangkan dalam kerentanan untuk perubahan penutupan lahan yang terdiri dari empat aspek yaitu dimensi paparan, tekanan, sensitifitas dan pemulihan. Aspek pertama terkait keterpaparan yang menggambarkan tingkat atau intensitas kemungkinan sistem menghadapi gangguan atau tingkat fluktuasi tekanan (Singh et al. 2014). Dalam aspek ini mencakup dinamika perubahan temporal pada penutupan lahan di masa lalu, sekarang, dan masa depan (Shahi et al. 2020).

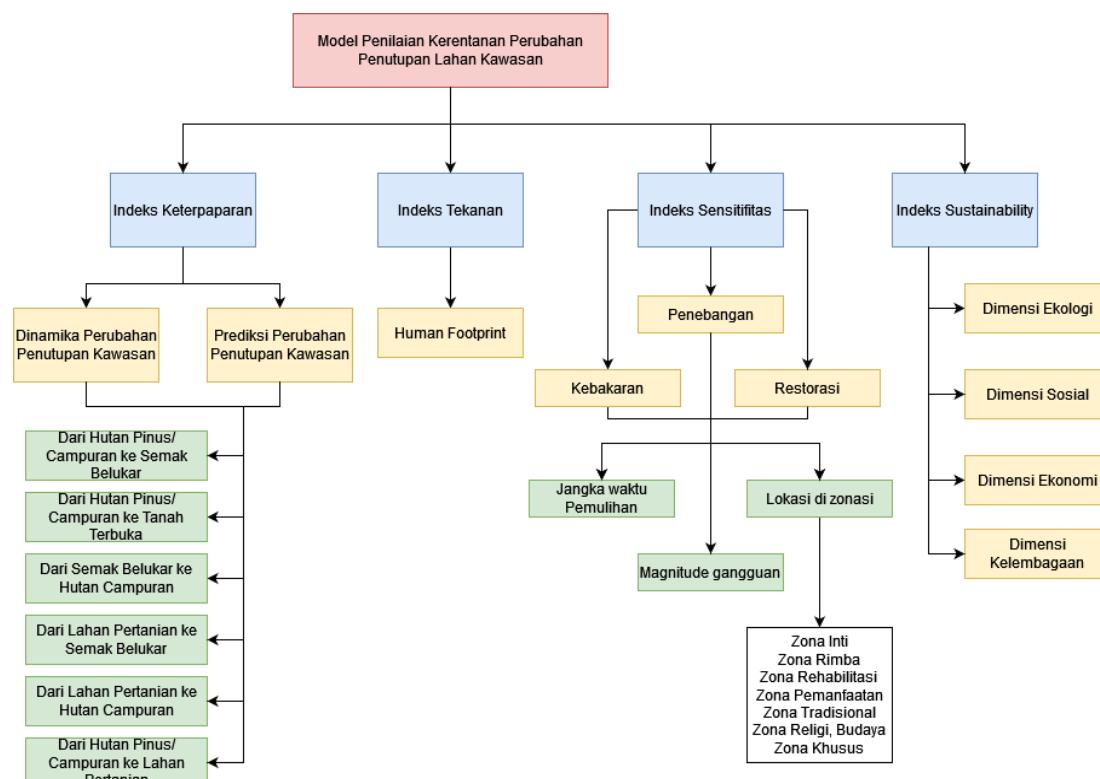
Aspek kedua adalah tekanan yang menggambarkan tekanan dari eksternal yang berpengaruh pada perubahan penutupan lahan kawasan konservasi. Pada aspek tekanan mencakup besarnya nilai human footprint pada desa penyanga kawasan konservasi (Zhang et al. 2022). Perubahan penutupan lahan dalam kawasan konservasi juga harus mempertimbangkan modifikasi penutupan lahan di sekitar kawasan konservasi atau daerah penyanga. Hal ini bertujuan untuk menilai dampak tekanan penutupan lahan di sekitar kawasan konservasi dan perubahan penutupan lahan di dalam kawasan konservasi yang diakibatkan oleh dinamika penutupan lahan di daerah penyanga (Freitas Lima dan Ranieri 2018; Oliveira et al. 2020; De Oliveira et al. 2020). Aspek ketiga yaitu sensitivitas yang menunjukkan karakteristik internal sistem yang mencerminkan tingkat kerentanan terhadap gangguan atau dampaknya (Singh et al. 2014). Aspek ketiga ini mengevaluasi faktor gangguan yang menyebabkan perubahan penutupan lahan (Turner dan Simard 2017; Ansari dan Golabi 2019). Faktor terakhir, pemulihan, mengacu pada kapasitas sistem untuk menanggapi gangguan, yang juga dapat dipahami sebagai potensi atau kemampuan pengelolaan atau masyarakat untuk pengelolaan yang berkelanjutan (McGarigal et al. 2018).

Dalam konteks analisis kerentanan perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi, teknologi secara spasial memainkan peran penting dalam membantu mengintegrasikan berbagai kriteria kerentanan perubahan penutupan lahan yang relevan. Aspek-aspek yang telah dijelaskan sebelumnya menjadi indikator utama dalam menentukan tingkat kerentanan suatu kawasan konservasi terhadap perubahan penutupan lahan. Analisis ini dapat membantu untuk memprediksi kemungkinan perubahan yang dapat memengaruhi keberlanjutan kawasan konservasi. Pendapat pemangku kepentingan sangat memengaruhi tingkat kerentanan suatu kawasan terhadap perubahan penutupan lahan. Oleh karena itu, masukan dari para pakar dan partisipasi pembuat kebijakan sangat penting untuk merumuskan strategi mitigasi yang efektif. *Analytical Hierarchy Process* (AHP) merupakan metode yang potensial untuk memasukkan pandangan para pakar ke dalam analisis berbasis spasial. Dengan pendekatan ini, data yang dihasilkan dapat lebih akurat dalam mengidentifikasi kawasan konservasi yang rentan terhadap perubahan serta memastikan validitas hasil deteksi perubahan (Nurda dan Noguchi 2020).

Tujuan dari penelitian ini untuk menyusun model kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi di Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb) yang dilakukan dengan overlay keempat aspek yang berpengaruh dan pembobotan dengan pendekatan *Analytical Hierarchy Process* (AHP).

8.2 Metode

Metode yang digunakan dalam menyusun model kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi secara spasial dengan menyusun atribut dari aspek-aspek yang mempengaruhi kerentanan perubahan dan memberikan bobot pada masing-masing aspek. Aspek-aspek kerentanan untuk perubahan penutupan lahan yang terdiri dari empat aspek yaitu dimensi paparan, tekanan, sensitifitas dan keberlanjutan yang dilakukan secara spasial. Setelah mengidentifikasi variabel masing-masing aspek melalui penelitian teori, kesimpulan dibuat berdasarkan pemahaman peneliti dan disesuaikan dengan lingkungan penelitian. Model kerentanan perubahan penutupan lahan mempunyai struktur aspek, faktor dan kriteria yang dapat dilihat pada Gambar 8.1:



Gambar 8.1 Hierarki pengambil keputusan Model Penilaian Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi

Pengkajian AHP dilakukan dengan menata elemen masalah dalam bentuk hierarki seperti yang telah disusun diatas (Saaty 2008). Selanjutnya dilakukan pembandingan berpasang antar elemen dan tingkat sesuai dengan persyaratan kriteria yang lebih tinggi dengan melibatkan penilaian dari pakar. Dalam penelitian ini melibatkan pakar yang berasal dari Direktorat Pengelolaan Kawasan Konservasi. Prioritas dibuat oleh berbagai perbandingan ini, dan prioritas yang lebih besar dibuat oleh sintesis. AHP dimaksudkan untuk mengumpulkan persepsi rasional orang tentang masalah tertentu melalui tahapan yang dirancang sampai pada suatu skala preferensi di antara berbagai alternatif. Penyusunan atau pemilihan prioritas dilakukan secara logis dan terstruktur. Spesialis yang berpengalaman menyusun strategi tersebut. Mereka juga mewakili alternatif yang akan diprioritaskan.

Pengisian matriks perbandingan berpasangan dengan menggunakan bilangan/skala yang menggambarkan kepentingan suatu elemen dibanding elemen yang lain. Bentuk perbandingan berpasangan dalam matriks adalah sebagai berikut:

Tabel 8.1 Matriks perbandingan berpasangan

C	A1	A2	A3	An
A1	1			
A2		1		
A3			1	
An				1

Tingkat kepentingan relatif antara dua kriteria ditunjukkan dengan skala numerik, yang terdiri dari nilai 1,3,5,7, dan 9. Nilai genap, yang terdiri dari 2,4,6, dan 8, menunjukkan tingkat kepentingan antara nilai skor 1 hingga 9. Skala kepentingan yang digunakan dalam metode AHP ini adalah seperti dalam Tabel 8.2 (Saaty 2008)

Tabel 8.2 Skala kepentingan yang digunakan dalam metode AHP

Nilai Perbandingan (A dibandingkan B)	Definisi
1	A sama pentingnya dengan B
3	A sedikit lebih penting dari B
1/3	Kebalikannya (B sedikit lebih penting dari)
5	A jelas lebih penting dari B
1/5	Kebalikannya (B jelas lebih penting dari)
7	A sangat jelas lebih penting dari pada B
1/7	Kebalikannya (B sangat jelas lebih penting dari pada A)
9	A mutlak lebih penting dari pada B
1/9	Kebalikannya (B mutlak lebih penting daripada A)
2, 4, 6, 8 atau ½, ¼, 1/6, 1/8	Diberikan apabila terdapat sedikit perbedaan dengan patokan di atas

Pembobotan tingkat kepentingan atau penilaian perbandingan berpasangan ini berlaku hukum aksioma reciprocal, artinya apabila suatu elemen A dinilai lebih esensial (5) dibandingkan dengan elemen B, maka B lebih esensial 1/5 dibandingkan dengan elemen A. Apabila elemen A sama pentingnya dengan B maka masing-masing bernilai = 1.

Untuk matriks berpasangan yang dibuat oleh beberapa pakar, formula perkalian geometris digunakan untuk masing-masing item dalam hasil akhir yaitu nilai sentral yang dianggap mewakili nilai seluruh data yang diperoleh dari perkalian kualifikasi persepsi antar responden dan dicari pangkat dari jumlah responden. (Marimin. dan Magfiroh 2010). Formula ini menggunakan fungsi yang ada dalam aplikasi *Excel* yaitu *GEOMEAN*. Hasil dari perkalian geometris ini digunakan dalam pengisian matriks berpasangan yang dilakukan dengan menggunakan aplikasi *Superdecision*. Rasio konsistensi/*consistency ratio* (CR) acak matriks penilaian diuji untuk mendapatkan bobot. Ketika CR <0,1, matriks



penilaian yang dibangun dianggap efektif. Dalam hal ini, vektor eigen maksimum dinormalisasi ke bobot akhir. (Hu *et al.* 2021)

8.3 Hasil dan Pembahasan

8.3.1 Perbandingan antar variabel level 1

Pada level 1 ini dilakukan pembobotan terhadap faktor yang berpengaruh pada model kerentanan perubahan penutupan lahan yaitu keterpaparan, sensitifitas, tekanan dan keberlanjutan.

Keterpaparan dalam penelitian ini merupakan dinamika perubahan penutupan lahan yang terjadi di kawasan konservasi, untuk penelitian ini penelitian kasus pada Taman Nasional Gunung Merbabu (Ardiaristo *et al.* 2022). Selain dinamika perubahan yang terjadi sebelum dan pada tahun dilakukan penelitian juga mempertimbangkan prediksi perubahan penutupan lahan yang akan terjadi pada 10 tahun mendatang.

2. Tekanan dalam penelitian ini merupakan faktor yang berasal dari aktifitas masyarakat yang berada disekitar kawasan konservasi yang dilakukan melalui pendekatan nilai jejak manusia/*human footprint* (HF) pada masing-masing desa penyangga.
3. Sensitifitas dalam penelitian ini merupakan faktor gangguan yang mempengaruhi perubahan penutupan lahan secara spasial. Perubahan penutupan lahan ini bisa diakibatkan oleh kejadian kebakaran, pendakian, hama penyakit, illegal logging, angin puting beliung, dan perambahan serta juga kegiatan restorasi atau rehabilitasi (Ardiaristo *et al.* 2024b).
4. Keberlanjutan dalam penelitian ini menggambarkan status keberlanjutan dari pengelolaan kawasan konsevasi di TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan di TNGMb.

Hasil perhitungan AHP diperoleh hasil yang ditunjukkan pada Tabel 8.3. Aspek keberlanjutan menunjukkan bobot yang paling tertinggi diikuti oleh aspek sensitifitas, aspek keterpaparan dan aspek tekanan. Hal ini menggambarkan bahwa terjadinya perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi dipengaruhi oleh kebijakan yang diambil pengelola kawasan konservasi. Kebijakan pengelolaan terkait pengendalian kebakaran, penanganan konflik batas atau keterbatasan penganggaran seperti yang telah dijelaskan pada bab sebelumnya mempunyai peran yang cukup penting dalam kerentanan perubahan penutupan lahan yang dapat terjadi. Nilai sensitifitas mempunyai bobot yang cukup tinggi karena adanya gangguan dan kegiatan pemulihian ekosistem mempunyai pengaruh langsung terhadap kerentanan perubahan penutupan lahan yang terjadi di TNGMb. Kejadian kebakaran yang apabila tidak mampu dikendalikan dapat merusak penutupan lahan di TNGMb yang cukup luas. Nilai keberlanjutan yang masih cukup berkelanjutan dapat ditingkatkan dengan kebijakan-kebijakan yang berorientasi pada pengendalian perubahan penutupan lahan seperti pemetaan kawasan rawan gangguan, pembentukan koordinator urusan pengendalian kebakaran, pelibatan aparat pemerintah daerah dalam kegiatan-kegiatan lapangan, mempromosikan

kegiatan-kegiatan lapangan dan pemenuhan sarana prasarana dengan kolaborasi dengan BUMN, BUMD dan swasta.

Tabel 8.3 Hasil perhitungan bobot faktor Model Kerentanan Perubahan Penutupan Lahan Kawasan Konservasi

No	Faktor	Bobot	CR
1	Keterpaparan	0,142	
2	Tekanan	0,126	
3	Sensitifitas	0,328	
4	Keberlanjutan	0,404	0,0474

8.3.2 Perbandingan antar variabel level 2

Pada level 2 ini dilakukan pembobotan terhadap faktor pada aspek yang berpengaruh terhadap model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan. Faktor yang berpengaruh pada masing-masing aspek tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Keterpaparan, terdapat dua faktor yang mempengaruhi keterpaparan ini yaitu dinamika perubahan penutupan lahan dan prediksi perubahan penutupan lahan. Pada pembobotan ini nilai dinamika perubahan penutupan lahan memiliki bobot yang paling tinggi karena dinamika perubahan yang terjadi berpengaruh langsung terhadap perubahan yang terjadi. Dari dinamika perubahan penutupan lahan ini kita dapat menelisik kejadian yang terjadi dimasa lalu dan menyiapkan strategi agar tidak kembali terulang kejadian yang dapat menyebabkan perubahan penutupan lahan. Hasil perhitungan AHP untuk pembobotan pada faktor keterpaparan ini disajikan pada Tabel 8.4:

Tabel 8.4 Hasil perhitungan bobot faktor keterpaparan

No	Faktor	Bobot	CR
1	Dinamika Perubahan	0,825	
2	Prediksi Perubahan	0,175	0,0000

2. Tekanan, hanya terdapat satu faktor yang mempengaruhi aspek tekanan ini yaitu jejak manusia sehingga nilai bobotnya pada faktor ini adalah 1. Perhitungan nilai jejak manusia dilakukan secara spasial dengan berbasiskan desa penyangga kawasan konservasi.
3. Sensitifitas, terdapat tiga faktor yang mempengaruhi aspek sensitifitas ini yaitu kebakaran, penebangan dan restorasi. Ketiga faktor ini merupakan faktor yang dominan sebagai gangguan dalam perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi khususnya di Taman Nasional Gunung Merbabu. Hasil perhitungan AHP untuk pembobotan faktor sensitifitas ditunjukkan pada tabel berikut ini:



Tabel 8.5 Hasil perhitungan bobot untuk faktor sensitifitas

No	Faktor	Bobot	CR
1	Kebakaran	0,339	
2	Penebangan	0,140	0,0876
3	Restorasi	0,521	

Restorasi menempati bobot tertinggi dengan nilai 0,521, menunjukkan bahwa upaya pemulihan ekosistem memainkan peran kunci dalam memengaruhi perubahan penutupan lahan. Tingginya bobot ini mengindikasikan bahwa aktivitas restorasi seperti reboisasi, penanaman vegetasi asli, dan perbaikan ekosistem dengan suksesi alami sangat signifikan dalam menentukan dinamika lanskap kawasan konservasi. Di Taman Nasional Gunung Merbabu, program restorasi kemungkinan telah memberikan dampak besar dalam mengembalikan area yang terdegradasi menjadi tutupan vegetasi baru, seperti semak belukar atau hutan campuran. Namun, tingginya bobot ini juga menyoroti pentingnya pengelolaan restorasi yang tepat agar hasilnya berkelanjutan.

Faktor kebakaran memiliki bobot kedua tertinggi dengan nilai 0,339 pada aspek sensitifitas, hal ini menggambarkan bahwa faktor ini berkontribusi terhadap perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi seperti di TNGMb, kebakaran menjadi ancaman serius, terutama di musim kemarau panjang. Kebakaran dapat menyebabkan degradasi vegetasi secara langsung, mengurangi kelas penutupan hutan, dan mengubah ekosistem menjadi semak belukar atau lahan kosong. Selain itu, dampak kebakaran sering kali meluas, mengakibatkan fragmentasi ekosistem dan hilangnya habitat bagi satwa liar. Upaya mitigasi seperti pengawasan intensif, penyediaan infrastruktur pemadaman, dan edukasi kepada masyarakat sekitar harus menjadi prioritas untuk mengurangi risiko kebakaran. Tingginya bobot ini mengindikasikan bahwa penanganan kebakaran harus menjadi bagian integral dalam strategi pengelolaan kawasan.

Faktor penebangan menunjukkan bobot 0,140, yang merupakan nilai terendah di antara ketiga faktor. Meskipun bobotnya terhadap perubahan penutupan lahan lebih kecil dibandingkan kebakaran dan restorasi, penebangan tetap menjadi ancaman yang rentan untuk terjadi perubahan penutupan lahan. Penebangan ilegal atau aktivitas eksplorasi kayu secara selektif dapat mengurangi densitas hutan dan mempercepat fragmentasi. Pengelola kawasan TNGMb perlu meningkatkan pengawasan terhadap aktivitas manusia di sekitar zona rimba atau tradisional yang menjadi zona yang berbatasan langsung dengan desa atau area terbuka.

4. Keberlanjutan, terdapat empat faktor yang mempengaruhi aspek keberlanjutan ini yaitu ekologi, ekonomi, sosial dan kelembagaan. Hasil perhitungan AHP untuk pembobotan faktor keberlanjutan ditunjukkan pada Tabel 8.6. Berdasarkan hasil perhitungan bobot menggunakan AHP, aspek keberlanjutan dalam perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi paling dipengaruhi oleh faktor ekologi, yang memiliki bobot tertinggi sebesar 0,536. Hal ini menunjukkan bahwa kelestarian ekosistem, konservasi keanekaragaman hayati, dan perlindungan terhadap kerusakan lingkungan menjadi prioritas utama dalam mencapai tujuan keberlanjutan. Faktor ekologi yang dominan ini sejalan

dengan peran kawasan konservasi sebagai benteng terakhir bagi ekosistem alami yang terancam oleh aktivitas manusia. Faktor kelembagaan juga memainkan peran penting dengan bobot 0,230, mencerminkan pentingnya struktur organisasi, kebijakan, dan kapasitas manajemen yang kuat dalam memastikan keberhasilan pengelolaan kawasan. Kelembagaan yang efektif diperlukan untuk menciptakan sinergi antara pemerintah, masyarakat, dan pihak swasta dalam mendukung program konservasi. Sementara itu, faktor ekonomi (0,174) dan sosial (0,060) meskipun bobotnya lebih rendah, tetap relevan dalam mendukung keberlanjutan melalui pemberdayaan masyarakat lokal. Konsistensi rasio (CR) sebesar 0,0693 menunjukkan bahwa evaluasi terhadap keempat faktor dilakukan secara rasional, menjadikan hasil ini sebagai dasar yang andal untuk merancang kebijakan keberlanjutan yang terintegrasi dan berkelanjutan.

Tabel 8.6 Hasil perhitungan bobot untuk faktor keberlanjutan

No	Faktor	Bobot	CR
1	Ekologi	0,536	
2	Ekonomi	0,174	
3	Sosial	0,060	0,0693
4	Kelembagaan	0,230	

8.3.3 Perbandingan antar variabel level 3

Pada level 3 ini dilakukan pembobotan terhadap kriteria pada masing-masing faktor pada aspek yang mempengaruhi perubahan penutupan lahan. Kriteria yang berpengaruh pada masing-masing faktor tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Dinamika perubahan, dalam penentuan kriteria menggunakan perubahan penutupan lahan yang mungkin terjadi baik berupa penurunan vegetasi dan juga peningkatan vegetasi. Terdapat 6 kriteria perubahan penutupan lahan yang digunakan dalam penentuan bobot yang disajikan dalam hasil perhitungan AHP sebagai berikut:

Tabel 8.7 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria dinamika perubahan

No	Faktor	Bobot	CR
1	Hutan Pinus/Campuran ke Lahan Pertanian	0,100	
2	Hutan Pinus/Campuran ke Semak Belukar	0,289	
3	Hutan Pinus/Campuran ke Tanah Terbuka	0,105	0,0901
4	Lahan Pertanian ke Hutan Campuran	0,099	
5	Lahan Pertanian ke Semak Belukar	0,083	
6	Semak Belukar ke Hutan Campuran	0,324	



Prediksi perubahan, dalam penentuan kriteria menggunakan perubahan penutupan lahan yang mungkin terjadi baik berupa penurunan vegetasi dan juga peningkatan vegetasi. Terdapat 6 kriteria perubahan penutupan lahan yang digunakan dalam penentuan bobot yang disajikan dalam hasil perhitungan AHP sebagai berikut:

Tabel 8.8 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria prediksi perubahan

No	Faktor	Bobot	CR
1	Hutan Pinus/Campuran ke Lahan Pertanian	0,141	
2	Hutan Pinus/Campuran ke Semak Belukar	0,240	
3	Hutan Pinus/Campuran ke Tanah Terbuka	0,132	0,0992
4	Lahan Pertanian ke Hutan Campuran	0,139	
5	Lahan Pertanian ke Semak Belukar	0,092	
6	Semak Belukar ke Hutan Campuran	0,256	

Kebakaran, dalam penentuan kriteria yang digunakan dalam faktor sensitifitas yang berpengaruh perubahan penutupan lahan yaitu jangka waktu, magnitude dan zonasi. Hasil perhitungan AHP untuk kriteria kebakaran disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 8.9 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria kebakaran

No	Faktor	Bobot	CR
1	Jangka waktu	0,649	
2	Magnitude	0,193	0,0934
3	Zonasi	0,158	

Penebangan, dalam penentuan kriteria yang digunakan dalam faktor sensitifitas yang berpengaruh perubahan penutupan lahan yaitu jangka waktu, magnitude dan zonasi. Hasil perhitungan AHP untuk kriteria penebangan disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 8.10 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria penebangan

No	Faktor	Bobot	CR
1	Jangka waktu	0,587	
2	Magnitude	0,208	0,0166
3	Zonasi	0,205	

5. Restorasi, dalam penentuan kriteria yang digunakan dalam faktor sensitifitas yang berpengaruh perubahan penutupan lahan yaitu jangka waktu, magnitude dan zonasi. Hasil perhitungan AHP untuk kriteria restorasi disajikan dalam tabel berikut:

Tabel 8.11 Hasil perhitungan bobot untuk kriteria restorasi

No	Faktor	Bobot	CR
1	Jangka waktu	0,650	
2	Magnitude	0,171	0,0991
3	Zonasi	0,179	

8.3.4 Perbandingan antar variabel level 4

Pada level 4 ini dilakukan pembobotan terhadap alternatif kriteria pada faktor zonasi yang mempengaruhi perubahan penutupan lahan. Terdapat 7 alternatif pada kriteria zonasi yang berpengaruh pada perubahan penutupan lahan yang digunakan dalam penentuan bobot dan disajikan dalam hasil perhitungan AHP sebagai berikut:

Tabel 8.12 Hasil perhitungan bobot untuk alternatif zonasi

No	Faktor	Bobot	CR
1	Zona Inti	0,468	
2	Zona Rimba	0,242	
3	Zona Pemanfaatan	0,042	
4	Zona Tradisional	0,045	0,0949
5	Zona Rehabilitasi	0,068	
6	Zona Religi, budaya	0,084	
7	Zona Khusus	0,051	

Model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi ini dapat menjadi panduan bagi pengelola kawasan konservasi mengidentifikasi daerah-daerah yang rentan akan terjadinya perubahan penutupan lahan dan menelisik lebih dalam faktor mana yang saja yang dapat menyebabkan terjadinya perubahan penutupan lahan terjadi. Hal ini selanjutnya akan menjadikan bahan bagi pengelola kawasan konservasi untuk menyusun kebijakan yang efektif dan adaptif. Penelitian tentang kerentanan perubahan penutupan lahan di TNGMb menggunakan pendekatan AHP menghasilkan wawasan mendalam tentang faktor-faktor yang memengaruhi dinamika perubahan penutupan lahan. Empat aspek utama, yaitu keterpaparan, tekanan, sensitivitas, dan keberlanjutan diidentifikasi sebagai penentu utama kerentanan kawasan terhadap perubahan penutupan lahan yang terjadi. Hasil menunjukkan bahwa aspek keberlanjutan memiliki bobot tertinggi (0,404), diikuti oleh sensitivitas (0,328), keterpaparan (0,142), dan tekanan (0,126).



8.4 Kesimpulan

Model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi di TNGMb yang dilakukan dengan overlay keempat aspek yang berpengaruh dan pembobotan dengan pendekatan AHP. Empat aspek tersebut yaitu keterpaparan, tekanan, sensitifitas dan keberlanjutan. Aspek keberlanjutan memiliki bobot tertinggi (0,404), diikuti oleh sensitivitas (0,328), keterpaparan (0,142), dan tekanan (0,126). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kebijakan keberlanjutan dan mitigasi gangguan harus menjadi prioritas utama untuk mencegah degradasi penutupan lahan di TNGMb.

IX. PEMBAHASAN UMUM

9.1 Penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi

Perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi memiliki dampak signifikan terhadap efektivitas pengelolaan kawasan tersebut. Penutupan lahan tidak hanya menjadi cerminan dari fungsi ekologis kawasan sebagai habitat biodiversitas, tetapi juga memiliki peran penting sebagai pengatur ekosistem, sumber produksi, dan penyedia informasi lingkungan. Ketika terjadi perubahan pada penutupan lahan, fungsi-fungsi ini dapat terganggu, yang berdampak pada kualitas pengelolaan kawasan konservasi secara keseluruhan. Sebagai contoh, penurunan tutupan hutan di kawasan konservasi dapat mengurangi kapasitas tata kelola air, meningkatkan risiko erosi, dan mengancam stabilitas ekosistem. Oleh karena itu, memahami dinamika perubahan penutupan lahan menjadi langkah fundamental dalam upaya menjaga keberlanjutan kawasan.

Penutupan lahan juga mencerminkan kebijakan pengelolaan dan aktivitas manusia di sekitar kawasan konservasi. Tekanan dari aktivitas manusia, seperti alih fungsi lahan, urbanisasi, dan praktik pertanian yang tidak berkelanjutan, sering kali memengaruhi keseimbangan ekosistem di kawasan konservasi, terutama di daerah penyangga. Daerah penyangga memainkan peran penting dalam melindungi inti kawasan konservasi, namun perubahan penggunaan lahan di wilayah ini dapat memberikan tekanan besar yang merambat ke dalam kawasan inti. Aktivitas manusia yang tidak terkendali, ditambah dengan kebijakan pengelolaan yang kurang adaptif, dapat mempercepat degradasi kawasan konservasi, mengancam keberadaan keanekaragaman hayati, dan merusak fungsi ekologisnya.

Penilaian kerentanan terhadap perubahan penutupan lahan menjadi salah satu alat penting dalam pengelolaan kawasan konservasi yang adaptif. Metode penilaian ini membantu mengidentifikasi tingkat keterpaparan, sensitivitas, dan kapasitas adaptif kawasan terhadap tekanan. Berbagai pendekatan telah dikembangkan untuk memahami kerentanan ini, termasuk analisis spasial, penilaian ekosistem, hingga proyeksi berbasis skenario. Penilaian semacam ini memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai sejauh mana suatu kawasan mampu bertahan dan beradaptasi terhadap perubahan, baik yang disebabkan oleh aktivitas manusia maupun faktor lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan kawasan konservasi dengan mengambil lokasi di Taman Nasional Gunung Merbabu. Pendekatan dalam menghasilkan model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan ini diadopsi dari (Turner II *et al.* 2003) yang terdiri dari empat aspek yaitu aspek paparan, tekanan, sensitifitas dan pemulihan.

Pada aspek pertama keterpaparan penting untuk memahami dinamika penutupan lahan sebagai bagian integral dalam pengelolaan kawasan konservasi yang berkelanjutan. TNGMb menjadi studi kasus karena fungsi kawasannya yang vital sebagai kawasan penyangga ekosistem yang berada di tengah Pulau Jawa dan dikelilingi oleh 36 desa penyangga. Perubahan penutupan lahan dapat menunjukkan kondisi ekosistem, termasuk fungsi sebagai habitat biodiversitas, pengatur tata air, hingga penyedia jasa lingkungan lainnya. Penelitian ini memanfaatkan *Google Earth Engine* (GEE), sebuah platform komputasi awan, untuk mengolah data citra satelit secara efisien. Dengan menggunakan algoritma *Random Forest*, penelitian



berhasil memetakan dan memonitor perubahan penutupan lahan dari tahun 1995 hingga 2020 secara akurat. Teknologi ini memungkinkan analisis spasial-temporal yang tidak hanya memberikan informasi historis tetapi juga proyeksi masa depan terkait perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi.

Hasil penelitian menunjukkan penurunan signifikan dalam luas area vegetasi di kawasan TNGMb. Pada tahun 1995, vegetasi menutupi sekitar 70% wilayah, tetapi angka ini menurun menjadi 63,35% pada tahun 2020. Penurunan ini disebabkan oleh tekanan aktivitas manusia, seperti pembukaan lahan untuk pertanian dan permukiman, terutama di daerah penyanga. Selain itu, kebijakan pengelolaan kawasan yang belum sepenuhnya optimal turut berkontribusi terhadap degradasi ini. Temuan ini menunjukkan bahwa kawasan konservasi TNGMb menghadapi tantangan besar dalam mempertahankan fungsinya sebagai kawasan penyanga ekosistem.

Pada aspek kedua yaitu tekanan, untuk melihat dampak tekanan manusia terhadap perubahan penutupan lahan di kawasan TNGMb dengan menggunakan analisis jejak manusia (*human footprint*) dan fragmentasi lanskap. Metode yang digunakan mencakup pengukuran skor jejak manusia berdasarkan aktivitas seperti kepadatan penduduk, aktifitas masyarakat dan perubahan penutupan lahan. Penelitian ini juga menganalisis tingkat fragmentasi lanskap yang terjadi akibat tekanan aktivitas manusia di daerah penyanga, serta dampaknya terhadap zona inti konservasi. Kajian ini memberikan pemahaman tentang hubungan erat antara aktivitas manusia dengan perubahan ekosistem di TNGMb.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kawasan TNGMb mengalami peningkatan tekanan jejak manusia selama periode penelitian. Skor jejak manusia tertinggi ditemukan di daerah penyanga yang berdekatan dengan desa-desa yang memiliki tingkat aktivitas tinggi, seperti pertanian, pembangunan permukiman, dan penggalian sumber daya. Secara khusus, daerah yang memiliki aksesibilitas tinggi, seperti yang dekat dengan jalan utama, menunjukkan tingkat tekanan yang lebih besar. Fragmentasi lanskap diukur melalui indikator metrik spasial, seperti total edge (*total edge*), jumlah patch (*number of patches*), dan kepadatan patch (*patch density*). Hasil analisis menunjukkan bahwa kepadatan patch meningkat sebesar 15,2% antara tahun 2014 dan 2020, yang menandakan tingkat fragmentasi yang lebih tinggi pada lanskap kawasan konservasi.

Selain itu, temuan penting lainnya adalah penurunan luas kelas hutan campuran sebesar 6,5% di kawasan penyanga akibat konversi menjadi lahan pertanian dan pemukiman. Sementara itu, zona inti masih mampu mempertahankan struktur penutupan lahannya meskipun mengalami peningkatan tekanan pada area yang berbatasan langsung dengan kawasan penyanga. Kondisi ini menunjukkan pentingnya memperkuat kebijakan zonasi dan pengendalian aktivitas di kawasan penyanga untuk melindungi fungsi ekologis kawasan inti. Melalui pendekatan jejak manusia, penelitian ini mampu memetakan distribusi tekanan secara spasial dan mengidentifikasi area-area prioritas untuk tindakan konservasi. Hasil ini memberikan dasar ilmiah bagi pengelola TNGMb untuk mengembangkan strategi mitigasi yang lebih efektif, seperti restorasi ekosistem di wilayah yang terkena dampak tinggi dan pengelolaan yang lebih ketat di daerah penyanga.

Aspek selanjutnya yaitu sensitifitas. Perubahan penutupan lahan dapat terjadi karena kejadian kebakaran, pendakian, hama penyakit, illegal logging, angin puting beliung, dan perambahan. Tingkat sensitifitas terhadap perubahan penutupan lahan



ditunjukkan oleh faktor-faktor ini. Dalam penelitian ini menggunakan algoritma LandTrendr yang dikombinasikan dengan citra Landsat digunakan untuk memonitor perubahan penutupan lahan serta mendeteksi gangguan yang terjadi di kawasan TNGMb. Algoritma LandTrendr memungkinkan analisis perubahan penutupan lahan secara temporal, mencakup waktu, besaran, dan pola gangguan, serta proses pemulihan. Teknologi ini memberikan informasi yang sangat berharga untuk memahami dinamika ekosistem, terutama dalam konteks gangguan seperti kebakaran hutan, aktivitas manusia, dan bencana alam.

Hasil monitoring menunjukkan bahwa kebakaran hutan menjadi salah satu gangguan utama yang memengaruhi penutupan lahan di kawasan TNGMb. Pada tahun 2015 dan 2018, kebakaran besar terjadi, menyebabkan peningkatan luas semak belukar, yang secara signifikan mengurangi kapasitas kawasan untuk menyerap air dan mencegah erosi. Selain itu, aktivitas manusia, seperti pendakian yang meningkat dari tahun ke tahun, juga memberikan tekanan pada ekosistem, meskipun dampaknya relatif kecil dibandingkan gangguan alam.

Penelitian ini juga mengungkapkan bahwa tingkat pemulihan pasca-gangguan bervariasi antar zona di dalam kawasan konservasi. Zona tertentu menunjukkan kemampuan resiliensi yang lebih tinggi, sementara zona lainnya memerlukan intervensi manusia melalui program restorasi. Informasi ini memberikan panduan yang berharga untuk menentukan prioritas pengelolaan, termasuk upaya mitigasi risiko kebakaran dan pengendalian aktivitas manusia di area yang rentan.

Aspek yang terakhir aspek keberlanjutan pengelolaan TNGMb yang dievaluasi melalui pendekatan multidimensi, yang meliputi dimensi ekologi, ekonomi, sosial, dan kelembagaan. Pendekatan ini memberikan gambaran holistik mengenai efektivitas pengelolaan kawasan konservasi dalam menghadapi tekanan, termasuk dinamika perubahan penutupan lahan. Penilaian dilakukan menggunakan metode *multidimensional scaling* (MDS) untuk mengidentifikasi status keberlanjutan dari setiap dimensi. Hasil analisis ini menjadi panduan penting dalam menyusun kebijakan yang dapat mendukung pengelolaan konservasi secara lebih efektif.

Dimensi ekologi menunjukkan tingkat keberlanjutan yang kritis. Salah satu faktor utama adalah hilangnya tutupan vegetasi akibat kebakaran, pendakian, dan aktivitas manusia di daerah penyanga. Analisis leverage atribut menunjukkan bahwa kebijakan restorasi, perlindungan habitat kritis, dan pengurangan tekanan manusia menjadi faktor paling sensitif yang harus segera diintervensi. Sebagai contoh, kebakaran hutan yang hampir terjadi setiap tahun tidak hanya memengaruhi keberlanjutan ekosistem tetapi juga mengancam keberadaan spesies endemik, seperti Rek-rekan (*Presbytis fredericae*). Pemantauan ekologi yang lebih intensif diperlukan untuk mengatasi tantangan ini, termasuk rehabilitasi kawasan yang rusak dan penguatan regulasi untuk mencegah gangguan lebih lanjut.

Pada dimensi ekonomi, penelitian menemukan bahwa potensi ekowisata di TNGMb belum dioptimalkan untuk mendukung keberlanjutan kawasan. Data menunjukkan bahwa pendapatan dari aktivitas wisata belum sebanding dengan biaya konservasi yang diperlukan. Misalnya, alokasi anggaran untuk konservasi dari tahun 2019 hingga 2023 hanya mencakup sekitar 25% dari kebutuhan ideal.

Dimensi sosial menunjukkan adanya tantangan dalam melibatkan masyarakat lokal dalam upaya konservasi. Banyak masyarakat di daerah penyanga masih



mengandalkan aktivitas yang menekan kawasan konservasi, seperti pengambilan kayu bakar dan pembukaan lahan untuk pertanian. Program pemberdayaan yang telah dilakukan, seperti pelatihan budidaya tanaman non-kayu dan pemberian insentif, menunjukkan dampak positif, tetapi implementasinya perlu ditingkatkan. Selain itu, edukasi lingkungan secara terus-menerus dapat membangun kesadaran masyarakat mengenai pentingnya menjaga kawasan konservasi. Dengan pendekatan ini, masyarakat dapat menjadi mitra strategis dalam pengelolaan TNGMb.

Dimensi kelembagaan menjadi dimensi kunci yang memengaruhi keberlanjutan pengelolaan TNGMb. Tingkat konflik batas kawasan, penegakan hukum terhadap pelanggaran di dalam kawasan TNGMb dan interaksi BTNGMb dan pemerintah daerah merupakan faktor yang menentukan dalam mewujudkan pengelolaan berkelanjutan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan. Oleh karena itu, peningkatan kapasitas kelembagaan menjadi rekomendasi utama, termasuk penguatan regulasi zonasi dan pengembangan kemitraan strategis.

Hasil evaluasi keberlanjutan ini memberikan kerangka kerja yang kuat untuk mengintegrasikan dimensi ekologi, ekonomi, sosial, dan kelembagaan dalam pengelolaan TNGMb. Rekomendasi mencakup peningkatan alokasi anggaran konservasi, pemberdayaan masyarakat, serta penguatan kapasitas kelembagaan. Dengan langkah-langkah ini, keberlanjutan kawasan konservasi dapat lebih terjamin, sehingga TNGMb tetap dapat menjalankan fungsi ekologis, ekonomi, dan sosialnya secara berkelanjutan di masa depan.

Model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi dirancang untuk mengintegrasikan empat aspek utama: keterpaparan, tekanan, sensitivitas, dan keberlanjutan. Dengan menggunakan pendekatan *Analytical Hierarchy Process* (AHP), model ini menyediakan kerangka evaluasi yang sistematis dan berbasis data. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang mendalam tentang distribusi kerentanan di seluruh kawasan konservasi, sehingga pengelola dapat mengidentifikasi zona prioritas untuk intervensi. Misalnya, zona dengan kerentanan tinggi dapat diarahkan untuk program restorasi atau penguatan regulasi, sementara zona yang lebih stabil dapat difokuskan untuk pelestarian jangka panjang. Integrasi model ini dengan data spasial dan temporal memungkinkan pengambilan keputusan yang lebih adaptif dan responsif terhadap dinamika perubahan. Model ini tidak hanya mendukung pengurangan risiko gangguan tetapi juga memastikan keberlanjutan fungsi ekosistem di kawasan konservasi, menjadikannya alat yang sangat berguna dalam pengelolaan kawasan konservasi secara holistik.

Model penilaian yang dihasilkan dalam penelitian ini dirancang untuk menghadapi dinamika perubahan penutupan lahan dalam kawasan konservasi dengan adaptif untuk memastikan fungsi konservasi tetap terjaga walau menghadapi berbagai gangguan dan tekanan. Pendekatan pengelolaan adaptif ini bersifat siklus mencakup perencanaan, implementasi, pemantauan, evaluasi dan penyesuaian kebijakan serta kembali lagi ke perencanaan. Pendekatan ini mencakup berbagai dimensi yang saling berkaitan untuk menghasilkan kebijakan yang berbasis dengan data, responsif terhadap resiko dan berorientasi pada keberlanjutan. Dalam penerapan model ini menggunakan teknologi informasi yang update dan mudah digunakan seperti GEE, penggunaan algoritma LandTrendr

untuk memetakan perubahan penutupan lahan secara spasial dan temporal. Data yang dihasilkan dapat memberikan gambaran detil mengenai pola perubahan, tekanan dan gangguan yang terjadi di dalam kawasan konservasi. Data yang dihasilkan tidak hanya mencakup kondisi historis tetapi juga proyeksi ke depannya yang memungkinkan pengelola kawasan konservasi untuk membuat keputusan yang lebih terarah dan strategis. Sebagai contoh gangguan kebakaran terjadi menjadi faktor dominan yang menyebabkan perubahan penutupan lahan di TNGMb. Dengan model penilaian ini data spasial mengenai kebakaran dapat membantu pengelola kawasan konservasi untuk menentukan lokasi-lokasi yang paling rentan dan memerlukan perhatian khusus untuk mencegah terjadinya kebakaran di masa mendatang.

9.2 Strategi pengendalian kerentanan perubahan penutupan lahan di TNGMb

Strategi untuk mencegah kerentanan perubahan penutupan lahan di TNGMb dirancang dengan mempertimbangkan hasil analisis empat aspek utama: keterpaparan, tekanan, sensitivitas, dan keberlanjutan. Dinamika perubahan penutupan lahan yang telah terjadi, seperti penurunan luas vegetasi, peningkatan tekanan aktivitas manusia, serta ketidakseimbangan dalam pengelolaan kawasan, memberikan dasar penting dalam merumuskan langkah-langkah mitigasi yang terintegrasi dan berkelanjutan. Beberapa strategi yang dapat dirumuskan dari hasil penelitian ini, antara lain:

1. Pengendalian kebakaran

Kebakaran hutan di TNGMb tidak hanya menurunkan kapasitas vegetasi tetapi juga mempercepat degradasi ekosistem. Untuk mencegah kebakaran, strategi pencegahan harus diutamakan kegiatan pencegahan seperti :

- Pengembangan sistem peringatan dini berbasis teknologi, seperti pemanfaatan data cuaca, kelembapan tanah, dan citra satelit melalui platform seperti *Google Earth Engine* (GEE) untuk menyusun daerah rawan gangguan kebakaran sehingga mempermudah dalam menjangkau kawasan TNGMb
- Patroli tematik dengan melibatkan aparat pemerintah daerah dan aparat penegak hukum pada daerah rawan pembakaran di musim kemarau panjang.
- Membangun dan memperkuat infrastruktur pemadaman, seperti pos pemadam kebakaran, jalur evakuasi, dan penyediaan sumber air berupa tumpungan air hujan di titik-titik strategis. Sumber air ini selain bisa menjadi sarana untuk pemadaman juga bisa menjadi sumber air minum bagi satwa. Pembangunan CCTV/*thermal imaging camera* untuk mendeteksi dini kejadian kebakaran.
- Menyusun tim urusan pengendalian kebakaran yang lebih berfokus pada pencegahan dan respon cepat kebakaran hutan serta mengkoordinir kelompok masyarakat peduli api yang sudah dibentuk oleh TNGMb. Sesuai dengan Peraturan Menteri LHK Nomor P.32/MENLHK/SETJEN/KUM.1/3/2016 tentang Pengendalian Kebakaran Hutan dan Lahan, Kesatuan Pengelolaan Hutan Konservasi wajib untuk membentuk



organisasi Brigade Pengendalian Kebakaran Hutan dan Lahan (Brigdalkarhutla).

- Edukasi masyarakat di sekitar kawasan tentang risiko kebakaran dan pentingnya menjaga lingkungan. Sosialisasi bisa dilakukan melalui pelatihan pencegahan kebakaran dan simulasi tanggap darurat.
- Penggunaan drone untuk memantau lokasi asap pada musim kemarau apakah berada di dalam atau luar kawasan secara cepat sehingga dapat diambil keputusan dengan efektif dan efisien. Selain itu penggunaan drone ini cukup efektif juga untuk memberikan rasa takut pada masyarakat yang melakukan pembakaran lahan.

Pemanfaatan teknologi untuk pengelolaan adaptif

Teknologi modern dapat memberikan solusi efektif dalam pengendalian kebakaran dan gangguan perubahan penutupan lahan. Pemanfaatan algoritma LandTrendr dalam penelitian ini, misalnya, dapat digunakan secara berkelanjutan untuk memonitor perubahan penutupan lahan dan mendeteksi gangguan. Data yang dihasilkan memungkinkan pengelola kawasan untuk mengambil tindakan berbasis bukti dalam merespons ancaman secara cepat dan tepat. Data ini dapat dimanfaatkan untuk membuat daerah rawan gangguan sehingga kegiatan pengendalian dapat fokus pada lokasi yang rawan gangguan. Penggunaan teknologi drone dalam pemantauan penutupan lahan perlu dilakukan mengingat kondisi topografi TNGMb sulit dijangkau dengan perjalanan darat. Selain itu juga penggunaan drone ini juga dapat membantu pada saat penanganan kebakaran untuk memantau daerah mana saja yang masih kebakaran dan akses untuk menjangkau lokasi kebakaran. Pembangunan menara CCTV yang dapat menampilkan gambar secara *real-time* pada lokasi-lokasi yang rentan gangguan seperti di batas kawasan atau jalur pendakian dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam pengelolaan kawasan konservasi yang dibatasi oleh kuantitas pegawai dan lokasi yang tidak mudah dijangkau setiap saat. CCTV memungkinkan pemantauan kejadian seperti kebakaran hutan, perambahan ilegal, atau aktivitas pendakian yang melanggar aturan dapat terdeteksi lebih awal. Dengan adanya rekaman visual, pengelola kawasan dapat mengambil langkah cepat untuk mencegah atau mengatasi gangguan sebelum dampaknya meluas.

3. Mengurangi Tekanan Aktivitas Manusia di Daerah penyangga

Daerah penyangga menjadi area kritis karena tingginya skor jejak manusia, terutama di wilayah dengan aksesibilitas tinggi seperti yang dekat jalan utama dan desa penyangga seperti yang dihasilkan dalam penelitian ini. Strategi mitigasi meliputi:

- Pemberdayaan masyarakat, yang tidak hanya mengurangi tekanan terhadap kawasan inti tetapi juga memberikan manfaat ekonomi bagi masyarakat lokal. Hal ini sudah sejalan dengan apa yang dilakukan oleh Balai TNGMb dengan kegiatan pemberdayaan masyarakat melalui pemberian bantuan ekonomi.
- Penegakan hukum terhadap aktivitas ilegal, seperti perambahan dan penebangan liar. Pengelola kawasan perlu bekerja sama dengan penegak hukum untuk meningkatkan pengawasan dan penanganan perkara.

Ketegasan pengelola kawasan terhadap aktifitas yang melanggar hukum untuk dibawa ke jalur hukum selain bisa memberikan efek jera juga bisa meningkatkan wibawa pengelola kawasan oleh masyarakat.

- Penanganan konflik tenurial yang terjadi di Jrakah yang berkepanjangan memerlukan penanganan yang holistik dengan melibatkan BPKHTL Wilayah IX Yogyakarta dan juga aparat pemerintah desa untuk dapat menyelesaikan permasalahan konflik tenurial dengan baik.
4. Restorasi Terfokus pada Area Rentan
- Hasil analisis menunjukkan fragmentasi lanskap yang meningkat sebesar 15,2% antara 2014 dan 2020, serta penurunan luas hutan campuran sebesar 6,5% di daerah penyangga. Restorasi di kawasan yang mengalami degradasi parah perlu menjadi prioritas, terutama di area yang menunjukkan rendahnya kapasitas pemulihian alami. Pemulihan harus diarahkan pada peningkatan struktur dan fungsi ekosistem, termasuk memperkuat daya serap air dan mengurangi risiko erosi. Kegiatan restorasi perlu juga untuk dilakukan pemantauan secara periodik berupa pembuatan petak ukur permanen di lokasi restorasi baik pengkayaan tanaman maupun suksesi alami.
5. Evaluasi zonasi pada zona-zona yang rentan perubahan penutupan lahan
- Dari hasil penelitian pada bab-bab sebelumnya diperoleh bahwa zona inti menjadi lokasi yang rentan akan terjadi perubahan penutupan lahan. Penurunan vegetasi yang cukup besar terjadi pada zona inti dan permasalahan kebakaran menjadi hal menyebabkan perubahan penutupan lahan ini. Untuk itu perlu menjadi masukan bagi pengelola untuk mempertimbangkan lokasi yang sering menjadi lokasi kebakaran untuk dijadikan zona rimba dengan pertimbangan kegiatan-kegiatan yang bisa dilakukan di zona rimba masih memungkinkan dilakukan dibandingkan pada zona inti. Kegiatan pengendalian kebakaran seperti pembuatan sekat bakar atau kegiatan pengkayaan tanaman dapat dilakukan dengan mempertimbangkan faktor ekologis dari ekosistem zona inti saat ini.



X. SIMPULAN DAN SARAN

10.1 Simpulan

Penelitian ini berhasil menyusun model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan di kawasan konservasi, dengan fokus studi kasus pada Taman Nasional Gunung Merbabu (TNGMb). Model ini memberikan panduan yang komprehensif dalam memahami dinamika perubahan penutupan lahan, pengaruh tekanan aktivitas manusia, dan tingkat keberlanjutan pengelolaan kawasan. Beberapa simpulan yang didapatkan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Strategi mitigasi berupa pengendalian perubahan lahan secara terencana dan pemantauan berkala melalui teknologi seperti citra satelit dan *cloud computing* sangat diperlukan untuk menjaga keberlanjutan kawasan konservasi. Penggunaan algoritma Random Forest dengan 500 pohon pada platform *Google Earth Engine* (GEE) untuk klasifikasi penutupan lahan TNGMb dalam penelitian ini menghasilkan nilai akurasi yang tinggi dengan proses dan waktu yang cepat pada 5 titik waktu yang digunakan. Perubahan signifikan pada penutupan lahan di TNGMb selama periode 1995-2020 menunjukkan penurunan luas vegetasi sebesar 6,65%. Sedangkan pada area penyangga TNGMb kelas penutupan lahan yang semakin meningkat adalah kelas penutupan lahan pertanian dan lahan terbangun. Dinamika perubahan penutupan lahan secara temporal yang terjadi di dalam dan luar kawasan TNGMb memberikan data dan informasi kepada pengelola kawasan untuk memahami perubahan fungsi ekosistem, merencanakan zonasi yang lebih efektif dan memitigasi tekanan perubahan penutupan lahan di area penyangga kawasan TNGMb.
2. Tekanan yang disebabkan oleh aktifitas masyarakat dapat mempengaruhi fragmentasi lanskap di kawasan konservasi. Analisis dengan jejak manusia (*Human Footprint/HF*) di kawasan TNGMb dan area penyangga pada skala desa menunjukkan peningkatan nilai jejak manusia selama tahun 2014-2020, baik di dalam maupun di luar area TNGMb. Desa Surodadi, Pakis dan Kaponan menjadi desa dengan nilai rata-rata jejak manusia tertinggi. Faktor-faktor yang mempengaruhi perubahan nilai jejak manusia ini adalah kepadatan penduduk, penutupan lahan, *Night Time Light* (NTL), dan jalan, secara berturut-turut. Fragmentasi di area penelitian terjadi pada kelas lahan hutan campuran, sementara pada kelas lahan pertanian dan semak/rumput terjadi agregasi dengan peningkatan luas setiap tahunnya. Peningkatan jejak manusia mempunyai korelasi yang cukup singnifikan pada area yang terfragmentasi.
3. Memonitoring perubahan penutupan lahan dan faktor gangguan yang menyebabkan perubahan itu terjadi dengan menggunakan algoritma LandTrendr pada platform GEE secara efektif mengidentifikasi perubahan vegetasi di kawasan TNGMb. Dari algortima LandTrendr yang menghasilkan data mengenai besarnya magnitude, durasi perubahan dan tahun perubahan dapat memberikan wawasan mendalam mengenai dinamika perubahan vegetasi di TNGMb. Kebakaran hutan, yang sering terjadi terutama pada musim kemarau panjang, menjadi gangguan utama yang memengaruhi penutupan lahan di TNGMb. Gangguan ini mengurangi kapasitas kawasan untuk menyerap air dan meningkatkan risiko erosi.

4. Pengukuran status keberlanjutan pengelolaan kawasan TNGMb terkait dengan dinamika perubahan penutupan lahan menunjukkan bahwa pengelolaan dapat lebih ditingkatkan terutama faktor-faktor pengungkit pada setiap dimensi keberlanjutan yang dihasilkan. Analisis status keberlanjutan menggunakan metode MDS Rap-CArea dengan validitas yang teruji melalui Monte Carlo, menunjukkan bahwa nilai indeks keberlanjutan pada masing-masing resor TNGMb umumnya berada dalam kategori cukup berkelanjutan, dengan nilai pada kisaran 50-75%. Resor Ampel dan Resor Pakis memiliki nilai status keberlanjutan yang paling tinggi pada setiap dimensi keberlanjutan. Pengelolaan adaptif yang mencakup multidimensi (ekologi, sosial, ekonomi, dan kelembagaan) harus menjadi prioritas untuk memastikan keberlanjutan jangka panjang.
5. Model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan yang dikembangkan dalam penelitian ini mencakup empat aspek utama: keberlanjutan (bobot tertinggi 0,404), sensitivitas (0,328), keterpaparan (0,142), dan tekanan (0,126). Model ini tidak hanya memberikan kerangka penilaian yang komprehensif tetapi juga alat untuk mendukung pengambilan keputusan yang lebih terfokus, khususnya dalam menjaga fungsi ekologis dan keseimbangan antara konservasi dan kebutuhan masyarakat. Keberlanjutan, yang memiliki bobot tertinggi, menekankan perlunya perlindungan vegetasi di zona inti dan pemberdayaan masyarakat lokal di zona penyanga. Sensitivitas kawasan terhadap gangguan seperti kebakaran hutan menunjukkan perlunya restorasi intensif pada area rentan, didukung oleh pengawasan berbasis teknologi. Tekanan dari zona penyanga harus dikendalikan melalui kebijakan penggunaan lahan yang berkelanjutan, edukasi masyarakat, dan pengembangan ekowisata berbasis komunitas. Dinamika perubahan penutupan lahan yang mencakup penurunan vegetasi dan peningkatan fragmentasi lanskap menggarisbawahi pentingnya evaluasi dan penyesuaian zonasi untuk menjaga fungsi ekologis kawasan.

10.2 Saran

1. Model penilaian kerentanan perubahan penutupan lahan diharapkan dapat menjadi masukan dan pertimbangan salah satu faktor penting dalam penilaian efektifitas pengelolaan kawasan konservasi yang saat ini menggunakan *Management Effectiveness Tracking Tool (METT)*. Salah satu elemen penting dalam METT adalah pemahaman mengenai ancaman dan tekanan yang memengaruhi kawasan konservasi serta respon pengelola terhadap ancaman tersebut. Model penilaian kerentanan ini dapat menyediakan analisis berbasis data mengenai dinamika perubahan penutupan lahan, tingkat tekanan masyarakat dan sensitifitas ekosistem terhadap gangguan yang semuanya dapat di integrasikan dalam penilaian METT.
2. Model yang dihasilkan dalam penelitian ini dengan studi kasus di TNGMb dapat direplikasikan pada kawasan konservasi lainnya dengan memperhatikan atribut-atribut dominan yang terdapat pada kawasan konservasi tersebut. Empat aspek kerentanan yang dihasilkan dalam penelitian ini yaitu



keterpaparan, tekanan, sensitifitas dan keberlanjutan menjadi faktor utama. Seperti contoh aspek sensitifitas gangguan pada kawasan konservasi bisa berbeda-beda karena faktor gangguan yang dapat menyebabkan perubahan penutupan lahan bisa berbeda-beda. Penerapan model ini di kawasan konservasi lainnya dengan penyesuaian yang tepat dapat membantu pengelola kawasan konservasi untuk menghadapi tantangan lokal selaras memastikan keberlanjutan fungsi ekologis, sosial dan ekonomi kawasan konservasi tersebut di masa mendatang.

Penggunaan teknologi dalam penilaian perubahan penutupan lahan harus selalu diupdate untuk memperoleh hasil secara spasial dan temporal yang lebih baik dan presisi seperti penggunaan data citra dengan resolusi yang lebih besar dan algoritma baru yang mudah digunakan.

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 mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

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

DAFTAR PUSTAKA

- Abdillah N, Thamrin T, Nofrizal N, Wijayanto G. 2023. Quantifying Ecological, Economic, Social, and Governance Attributes for Urban Forest Eco-Tourism Using MDS-RAPFISH Approach. *Int J Sustain Dev Plan.* 18(8):2369–2378. doi:10.18280/ijsdp.180807.
- Adimu HE. 2018. Strategi Pengelolaan Kawasan Konservasi Yang Efektif Dan Berkelanjutan Di Taman Nasional Wakatobi. Bogor (ID): IPB Univeristy.
- Aissiyah AK, Faida LRW, Hermawan MTT. 2019. Pemanfaatan Rumput Dan Kayu Bakar Untuk Kebutuhan Subsistens Masyarakat Di Taman Nasional Gunung Merbabu (Utilization of Grass and Fuel Wood for Community Subsistence Needs in Gunung Merbabu National Park). *J Mns dan Lingkung.* 26(1):20–27. doi:10.22146/jml.23635.
- Akodéwou A, Oszwald J, Saïdi S, Gazull L, Akpavi S, Akpagana K, Gond V. 2020. Land use and land cover dynamics analysis of the Togodo protected area and its surroundings in Southeastern Togo, West Africa [Export Date: 1 September 2020Correspondence Address: Akodéwou, A.; CIRAD, Forêts et SociétésFrance; email: makodewou@gmail.com]. *Sustain.* 12(13). doi:10.3390/su12135439.
- Alkaf M, Munibah K, Rusdiana O. 2014. Model Spasial Perubahan Penggunaan Lahan Di Taman Nasional Gunung Merbabu dan Daerah Penyangganya. *Maj Ilm Globe.* 16(1):43–50.
- Ansari A, Golabi MH. 2019. Prediction of spatial land use changes based on LCM in a GIS environment for Desert Wetlands – A case study: Meighan Wetland, Iran. *Int Soil Water Conserv Res.* 7(1):64–70. doi:10.1016/j.iswcr.2018.10.001.
- Araia MG, Chirwa PW, Syampungani S. 2020. Do strictly protected areas protect vulnerable local tree species better than human land use? Disentangling conservation value from biodiversity value [Export Date: 30 March 2022Correspondence Address: Araia, M.G.; Fort Cox Agriculture and Forestry Training InstituteSouth Africa; email: araia30@gmail.com]. *J Nat Conserv.* 58. doi:10.1016/j.jnc.2020.125919.
- Ardiaristo A, Prasetyo LB, Syaufina L, Kosmaryandi N. 2022. The dynamics of land cover in conservation areas using cloud computing platform: Cases in Gunung Merbabu National Park [Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access]. Di dalam: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* Vol. 1109.
- Ardiaristo A, Prasetyo LB, Syaufina L, Kosmaryandi N. 2024a. Tinjauan Literatur Pengelolaan Penutupan Lahan di Kawasan Konservasi. *J Ilmu Lingkung.* 22(6):1602–1614. doi:10.14710/jil.22.6.
- Ardiaristo A, Prasetyo LB, Syaufina L, Kosmaryandi N. 2024b. Monitoring Vegetation Changes and Disturbances in Gunung Merbabu National Park Using Landtrendr Algorithm and Landsat Images. *Ecol Eng Environ Technol.* 25(7):298–307. doi:10.12912/27197050/188872.
- Assaf C, Adams C, Ferreira FF, França H. 2021. Land use and cover modeling as a tool for analyzing nature conservation policies – A case study of Juréia-Itatins [Export Date: 1 September 2020Correspondence Address: Assaf, C.; School of Arts, Sciences and Humanities, University of São PauloBrazil; email: camilac.assaf@gmail.com]. *Land use policy.* 100.





doi:10.1016/j.landusepol.2020.104895.

Ayala-Izurieta JE, Márquez CO, García VJ, Recalde-Moreno CG, Rodríguez-Llerena M V., Damián-Carrión DA. 2017. Land cover classification in an ecuadorian mountain geosystem using a random forest classifier, spectral vegetation indices, and ancillary geographic data. *Geosci.* 7(2):34. doi:10.3390/geosciences7020034.

Ayivor JS, Gordon C, Tobin GA, Ntiamoa-Baidu Y. 2020. Evaluation of management effectiveness of protected areas in the Volta Basin, Ghana: perspectives on the methodology for evaluation, protected area financing and community participation. *J Environ Policy Plan.* 22(2):239–255. doi:10.1080/1523908X.2019.1705153.

Banskota A, Kayastha N, Falkowski MJ, Wulder MA, Froese RE, White JC. 2014. Forest Monitoring Using Landsat Time Series Data: A Review. *Can J Remote Sens.* 40(5):362–384. doi:10.1080/07038992.2014.987376.

Barkey R, Nursaputra M, Mappiase MF. 2019. Assessing drought vulnerability using climate change models around Bantimurung Bulusaraung National Park, Indonesia. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 270(1):12007. doi:10.1088/1755-1315/270/1/012007.

Barlowe R. 1986. *Land Resource Economics: The Economics of Real Estate*. Volume ke-68. United States: Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, NJ.

Begon M, Harper JL, Townsend CR. 1986. Ecology: individuals, populations and communities. *Ecol Individ Popul communities..* doi:10.2307/6030.

Belgiu M, Drăgu L. 2016. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 114:24–31. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011.

Bendíková L, Šantrúčková M, Lipský Z. 2018. Evaluation of land cover/ land use development in selected landscape conservation areas in comparison to non-protected areas [Cited By:1Export Date: 1 September 2020]. *Geogr CGS.* 123(3):295–316. doi:10.37040/geografie2018123030295.

Bettinger P, Lennette M, Johnson KN, Spies TA. 2005. A hierarchical spatial framework for forest landscape planning. *Ecol Model.* 182(1):25–48. doi:10.1016/j.ecolmodel.2004.07.009.

Boori MS, Vozenilek V, Choudhary K. 2014. Land Use / Cover Change and Vulnerability Evaluation in Olomuc, Czech Republic. *ISPRS Ann Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci.* II–8(December):77–82. doi:10.5194/isprsaannals-ii-8-77-2014.

Boyle MF, Abella SR, Shelburne VB. 2014. An ecosystem classification approach to assessing forest change in the southern Appalachian Mountains. *For Ecol Manage.* 323:85–97. doi:10.1016/j.foreco.2014.03.005.

BSN [Badan Standarisasi Nasional]. 2014. Klasifikasi penutup lahan - Bagian 1 : Skala kecil dan menengah. Indonesiahlm 61.

BTNGMb [Balai Taman Nasional Gunung Merbabu]. 2014. *Rencana Pengelolaan Taman Nasional Gunung Merbabu Periode 2014-2023(review)*. Boyolali (ID): Balai Taman Nasional Gunung Merbabu.

BTNGMb [Balai Taman Nasional Gunung Merbabu]. 2018. *Zona Pengelolaan Taman Nasional Gunung Merbabu*. Boyolali (ID): Balai Taman Nasional Gunung Merbabu.

BTNGMb [Balai Taman Nasional Gunung Merbabu]. 2019a. *Laporan Kinerja*



- 2018 *Balai Taman Nasional Gunung Merbabu*. Boyolali (ID): Balai Taman Nasional Gunung Merbabu.
- BTNGMb [Balai Taman Nasional Gunung Merbabu]. 2019b. *Statistik Balai Taman Nasional Gunung Merbabu tahun 2018*. Boyolali (ID): Balai Taman Nasional Gunung Merbabu.
- BTNGMb [Balai Taman Nasional Gunung Merbabu]. 2020. *Zona Pengelolaan (Revisi) Taman Nasional Gunung Merbabu Kabupaten Boyolali, Semarang dan Magelang Provinsi Jawa Tengah*. Boyolali (ID): Balai Taman Nasional Gunung Merbabu.
- BTNGMb [Balai Taman Nasional Gunung Merbabu]. 2023. *Statistik Balai Taman Nasional Gunung Merbabu 2022*. Boyolali (ID): Balai Taman Nasional Gunung Merbabu.
- BTNGMb [Balai Taman Nasional Gunung Merbabu]. 2024. *Laporan kinerja Balai Taman Nasional Gunung Merbabu 2023*. Boyolali (ID): Balai Taman Nasional Gunung Merbabu.
- Chen G, Zhong C, Li M, Yu Z, Liu X, Jia M. 2022. Disturbance of mangrove forests in Guangxi Beilun Estuary during 1990—2020 [Cited by: 5; All Open Access, Bronze Open Access]. *Natl Remote Sens Bull.* 26(6):1112 – 1120. doi:10.11834/jrs.20221579.
- Chen S, Woodcock CE, Bullock EL, Arévalo P, Torchinava P, Peng S, Olofsson P. 2021. Monitoring temperate forest degradation on Google Earth Engine using Landsat time series analysis. *Remote Sens Environ.* 265(August). doi:10.1016/j.rse.2021.112648.
- Chidakel A, Child B, Muyengwa S. 2021. Evaluating the economics of park-tourism from the ground-up: Leakage, multiplier effects, and the enabling environment at South Luangwa National Park, Zambia. *Ecol Econ.* 182(January):106960. doi:10.1016/j.ecolecon.2021.106960.
- Cohen WB, Yang Z, Kennedy R. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync - Tools for calibration and validation [Cited by: 434]. *Remote Sens Environ.* 114(12):2911 – 2924. doi:10.1016/j.rse.2010.07.010.
- Condron AA, Setiawan Y, Prasetyo LB, Pramulya R, Siahaan L. 2020. Retrieving the national main commodity maps in indonesia based on high-resolution remotely sensed data using cloud computing platform. *Land.* 9(10):1–15. doi:10.3390/land9100377.
- Coops N, Wulder M, White J. 2007. Identifying and Describing Forest Disturbance and Spatial Pattern. Di dalam: Wulder MA, Franklin SE, editor. *Understanding Forest Disturbance and Spatial Pattern; Remote Sensing and GIS Approaches*. Florida (US): CRC Press. hlm. 31–61.
- Correa Ayram CA, Etter A, Díaz-Timoté J, Rodríguez Buriticá S, Ramírez W, Corzo G. 2020. Spatiotemporal evaluation of the human footprint in Colombia: Four decades of anthropic impact in highly biodiverse ecosystems. *Ecol Indic.* 117(April):106630. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106630.
- Correa Ayram CA, Mendoza ME, Etter A, Pérez Salicrup DR. 2017. Anthropogenic impact on habitat connectivity: A multidimensional human footprint index evaluated in a highly biodiverse landscape of Mexico. *Ecol Indic.* 72:895–909. doi:10.1016/j.ecolind.2016.09.007.
- Cristaldi MA, Sarquis JA, Arzamendia V, Bellini GP, Giraudo AR. 2019. Human



- activity and climate change as determinants of spatial prioritization for the conservation of globally threatened birds in the southern Neotropic (Santa Fe, Argentina). *Biodivers Conserv.* 28(10):2531–2553. doi:10.1007/s10531-019-01774-z.
- Darmawan AR, Puspaningsih N, Saleh MB. 2017. Study Of Land Cover Change Using Multi Layer Perceptron And Logistic Regression Methods In Gunung Ciremai National Park. *Media Konserv.* Vol. 31 No(Yuniandra 2007):252–261.
- Dewi K. 2009. *Forest Cover Change and Vulnerability of Gunung Merbabu National Park*. VDM Verlag Dr. Müller.
- Dewi K, Hardian AS, Cahyono SA. 2024. Assessing the Economic Value of Water Environmental Services in Mount Merbabu National Park. *J Sylva Lestari.* 12(2):338–352. doi:10.23960/jsl.v12i2.802.
- Ding N, Li M. 2023. Mapping Forest Abrupt Disturbance Events in Southeastern China—Comparisons and Tradeoffs of Landsat Time Series Analysis Algorithms [Cited by: 0]. *Remote Sens.* 15(22). doi:10.3390/rs15225408.
- Donald McKenzie CM and DAF. 2000. *The Landscape Ecology of Fire*. Springer Dordrecht London Heidelberg New York.
- Du W, Penabaz-Wiley SM, Njeru AM, Kinoshita I. 2015. Models and approaches for integrating protected areas with their surroundings: A review of the literature. *Sustain.* 7(7):8151–8177. doi:10.3390/su7078151.
- Duan P, Wang Y, Yin P. 2020. Remote sensing applications in monitoring of protected areas: A bibliometric analysis. *Remote Sens.* 12(5):1–20. doi:10.3390/rs12050772.
- Dubertret F, Tourneau FM Le, Villarreal ML, Norman LM. 2022. Monitoring Annual Land Use/Land Cover Change in the Tucson Metropolitan Area with Google Earth Engine (1986–2020). *Remote Sens.* 14(9):1–22. doi:10.3390/rs14092127.
- Ducatez S, Shine R. 2017. Drivers of Extinction Risk in Terrestrial Vertebrates. *Conserv Lett.* 10(2):186–194. doi:<https://doi.org/10.1111/conl.12258>.
- Dudley N (Editor). 2008. *Guidelines for Applying Protected Area Management Categories*. Gland, Switzerland: IUCN.
- Duncanson L, Liang M, Leitold V, Armston J, Krishna Moorthy SM, Dubayah R, Costedoat S, Enquist BJ, Fatoyinbo L, Goetz SJ, et al. 2023. The effectiveness of global protected areas for climate change mitigation. *Nat Commun.* 14(1). doi:10.1038/s41467-023-38073-9.
- Dwiyahreni AA, Fuad HAH, Muhtar S, Soesilo TEB, Margules C, Supriatna J. 2021. Changes in the human footprint in and around Indonesia's terrestrial national parks between 2012 and 2017. *Sci Rep.* 11(1):1–14. doi:10.1038/s41598-021-83586-2.
- Elvidge CD, Baugh K, Zhizhin M, Hsu FC, Ghosh T. 2017. VIIRS night-time lights. *Int J Remote Sens.* 38(21):5860–5879. doi:10.1080/01431161.2017.1342050.
- Fadli AH, Kosugo A, Ichii K, Ramli R. 2019. Satellite-based monitoring of forest cover change in indonesia using google earth engine from 2000 to 2016. *J Phys Conf Ser.* 1317(1). doi:10.1088/1742-6596/1317/1/012046.
- Farda NM. 2017. Multi-temporal Land Use Mapping of Coastal Wetlands Area using Machine Learning in Google Earth Engine. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 98(1). doi:10.1088/1755-1315/98/1/012042.
- Farr TG, Rosen PA, Caro E, Crippen R, Duren R. 2007. The shuttle radar

- topography mission. *Rev Geophys.* 45(RG2004):1–33. doi:10.1029/2005RG000183.
- Fauzi A. 2019. *Teknik Analisis Keberlanjutan*. Jakarta (ID): Gramedia Pustaka Utama.
- Firnanda E, Harianto SP, Winarno GD, Wulandari C, Dewi BS, Fitriana YR. 2020. Persepsi Masyarakat Daerah Penyangga Terhadap Fungsi Ekologi Taman Nasional Bukit Barisan Selatan. *J Hutan Trop.* 9(3):1–10.
- Forester DJ, Machlis GE. 1996. Modeling Human Factors That Affect the Loss of Biodiversity. *Conserv Biol.* 10(4):1253–1263. doi:10.1046/j.1523-1739.1996.10041253.x.
- Freitas Lima EAC, Ranieri VEL. 2018. Land use planning around protected areas: Case studies in four state parks in the Atlantic forest region of southeastern Brazil [Cited By :20Export Date: 30 March 2022Correspondence Address: Freitas Lima, E.A.C.Avenida Brasil, 56, Brazil; email: eacflima@bio.feis.unesp.br]. *Land use policy.* 71:453–458. doi:10.1016/j.landusepol.2017.12.020.
- Fu B, Lan F, Xie S, Liu M, He H, Li Y, Liu L, Huang L, Fan D, Gao E, et al. 2022. Spatio-temporal coupling coordination analysis between marsh vegetation and hydrology change from 1985 to 2019 using LandTrendr algorithm and Google Earth Engine [Cited by: 16; All Open Access, Gold Open Access]. *Ecol Indic.* 137. doi:10.1016/j.ecolind.2022.108763.
- Gaodirelwe I, Masunga GS, Motsholapheko MR. 2020. Community-based natural resource management: a promising strategy for reducing subsistence poaching around protected areas, northern Botswana. *Environ Dev Sustain.* 22(3):2269–2287. doi:10.1007/s10668-018-0288-7.
- Gaynor KM, Hojnowski CE, Carter NH, Brashares JS. 2018. The influence of human disturbance on wildlife nocturnality. *Science (80-).* 360(6394):1232–1235. doi:10.1126/science.aar7121.
- Geldmann J, Barnes M, Coad L, Craigie ID, Hockings M, Burgess ND. 2013. Effectiveness of terrestrial protected areas in reducing habitat loss and population declines. *Biol Conserv.* 161:230–238. doi:10.1016/j.biocon.2013.02.018.
- Geldmann J, Joppa LN, Burgess ND. 2014. Mapping Change in Human Pressure Globally on Land and within Protected Areas. *Conserv Biol.* 28(6):1604–1616. doi:<https://doi.org/10.1111/cobi.12332>.
- Gunawan H, Bismark M, Krisnawati H. 2013. Kajian Sosial Ekonomi Masyarakat Sekitar Sebagai Dasar Penetapan Tipe Penyangga Taman Nasional Gunung Merbabu. *Penelit Sos dan Ekon Kehutan.* 10(2):103–119.
- Gunawan H, Prasetyo LB. 2013. *Fragmentasi Hutan : Teori yang mendasari penataan ruang hutan menuju pembangunan berkelanjutan*. Bogor (ID): Pusat Penelitian dan Pengembangan Konservasi dan Rehabilitasi.
- Guo X, Ye J, Hu Y. 2022. Analysis of Land Use Change and Driving Mechanisms in Vietnam during the Period 2000–2020. *Remote Sens.* 14(7). doi:10.3390/rs14071600.
- Hamud AM, Shafri HZM, Shaharum NSN. 2021. Monitoring Urban Expansion and Land Use/Land Cover Changes in Banadir, Somalia Using Google Earth Engine (GEE). *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 767(1). doi:10.1088/1755-1315/767/1/012041.



- Handayani KP, Latifiana K.** 2019. Distribusi Spasial Surili Jawa (*Presbytis comata*) di Taman Nasional Gunung Merbabu. Di dalam: *Riset Sebagai Fondasi Konservasi dan Pemanfaatan Tumbuhan dan Satwa Liar. Seminar Nasional Konservasi dan Pemanfaatan Tumbuhan dan Satwa Liar*. Bogor (ID): Pusat Penelitian Biologi LIPI. hlm. 118–125.
- Hannah L, Roehrdanz PR, Midgley G, Lovett J, Foden W, Corlett R, Enquist B, Marquet P.** 2010. Spatial Planning for Area Conservation in Response to Climate Change - Methods Documentation.
- He T, Zhang M, Guo A, Zhai G, Wu C, Xiao W.** 2023. A novel index combining temperature and vegetation conditions for monitoring surface mining disturbance using Landsat time series [Cited by: 2]. *Catena*. 229. doi:10.1016/j.catena.2023.107235.
- Hermawan MTT, Faida LRW, Wianti KF, Marhaento H, Anindia A.** 2019. *Pengelolaan Kawasan Konservasi*. cet. kedua. Yogyakarta (ID): Gadjah Mada University Press.
- Hirschmugl M, Deutscher J, Sobe C, Bouvet A, Mermoz S, Schardt M.** 2020. Use of SAR and optical time series for tropical forest disturbance mapping. *Remote Sens.* 12(4). doi:10.3390/rs12040727.
- Hirsh-Pearson K, Johnson CJ, Schuster R, Wheate RD, Venter O.** 2022. Canada's human footprint reveals large intact areas juxtaposed against areas under immense anthropogenic pressure. *Facets*. 7:398–419. doi:10.1139/facets-2021-0063.
- Hu X, Ma C, Huang P, Guo X.** 2021. Ecological vulnerability assessment based on AHP-PSR method and analysis of its single parameter sensitivity and spatial autocorrelation for ecological protection – A case of Weifang City, China. *Ecol Indic.* 125:107464. doi:10.1016/j.ecolind.2021.107464.
- Hua T, Zhao W, Cherubini F, Hu X, Pereira P.** 2022. Continuous growth of human footprint risks compromising the benefits of protected areas on the Qinghai-Tibet Plateau. *Glob Ecol Conserv.* 34(November 2021):e02053. doi:10.1016/j.gecco.2022.e02053.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LG.** 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ.* doi:10.1016/S0034-4257(02)00096-2.
- IPCC [Intergovernmental Panel on Climate Change].** 2001. *Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability*. McCarthy JJ, Canziani OF, Leary NA, Dokken DJ, White KS, editor. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- IUCN [International Union for Conservation of Nature].** 2020. IUCN Red List 2017-2020 Report. *Iucn*.:2–40.
- Jena R, Pradhan B.** 2019. A Model to Detect Forest Change Relating to Mining Using Google Earth Engine Application in Belitung Island, Indonesia. *Int Conf Sp Sci Commun Iconsp.* 2019-July(July):47–52. doi:10.1109/IconSpace.2019.8905960.
- Jin Y, Liu X, Yao J, Zhang X, Zhang H.** 2020. Mapping the annual dynamics of cultivated land in typical area of the Middle-lower Yangtze plain using long time-series of Landsat images based on Google Earth Engine. *Int J Remote Sens.* 41(4):1625–1644. doi:10.1080/01431161.2019.1673917.
- Jones JM, Passow U, Fradkin SC.** 2018. Characterizing the vulnerability of intertidal organisms in Olympic National Park to ocean acidification. *Elem Sci*



- Anthr.* 6. doi:10.1525/elementa.312.
- Jonni, Nurhayati, Sutjahjo SH, Pravitasari AE, Rosadi. 2024. Agro-tourism development sustainable analysis based on agricultural landscapes in Nagari Pandai Sikek, Tanah Datar District, West Sumatera. *J Degrad Min Lands Manag.* 11(2):5339–5351. doi:10.15243/jdmlm.2024.112.5339.
- Kadir W. A, Awang SA, Purwanto RH, Poedjirahajoe E. 2012. Analisis Kondisi Sosial Ekonomi Masyarakat Sekitar Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung, Provinsi Sulawesi Selatan. *J Mns dan Lingkung.* 19(1):1–11.
- Karimi A, Jones K. 2020. Assessing national human footprint and implications for biodiversity conservation in Iran. *Ambio.* 49(9):1506–1518. doi:10.1007/s13280-019-01305-8.
- Kavanagh P, Pitcher TJ. 2004. Implementing Microsoft Excel software for Rapfish : a technique for the rapid appraisal of fisheries status. *Fish Cent Res Reports.* 12(2):1–80.
- Kennedy RE, Yang Z, Cohen WB. 2010. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr - Temporal segmentation algorithms. *Remote Sens Environ.* 114(12):2897–2910. doi:10.1016/j.rse.2010.07.008.
- Kennedy RE, Yang Z, Gorelick N, Braaten J, Cavalcante L, Cohen WB, Healey S. 2018. Implementation of the LandTrendr algorithm on Google Earth Engine [Cited by: 287; All Open Access, Gold Open Access]. *Remote Sens.* 10(5). doi:10.3390/rs10050691.
- Klein RJT, Nicholls RJ, Thomalla F. 2003. Resilience to natural hazards: How useful is this concept? *Environ Hazards.* 5(1):35–45. doi:10.1016/j.hazards.2004.02.001.
- KLHK [Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan]. 2019. *Status Hutan dan Kehutanan Indonesia 2018.* Nurbaya S, editor. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan RI.
- Komba AW, Watanabe T, Kaneko M, Chand MB. 2021. Monitoring of vegetation disturbance around protected areas in central tanzania using landsat time-series data [Cited by: 7; All Open Access, Gold Open Access]. *Remote Sens.* 13(9). doi:10.3390/rs13091800.
- Kulakowski D, Buma B, Guz J, Hayes K. 2019. *The Ecology of Forest Disturbances.* Elsevier Inc.
- Kumar L, Mutanga O. 2018. Google Earth Engine Applications Since Inception: Usage, Trends, and Potential. *Remote Sens.* 10(10):1509. doi:10.3390/rs10101509.
- Kurniawan I, Barus B, Pravitasari AE. 2017. Pemodelan Spasial Perubahan Penggunaan Lahan di Taman Nasional Gunung Halimun Salak dan Daerah Penyangganya. *J Reg Rural Dev Plan.* 1(3):270. doi:10.29244/jp2wd.2017.1.3.270-286.
- Lee WH, Abdullah SA, Nor SBM. 2019. Land use and landscape pattern changes on the inside and outside of protected areas in urbanizing Selangor state, peninsular Malaysia [Cited By :3Export Date: 30 March 2022Correspondence Address: Lee, W.H.; Institute for Environment and Development (LESTARI), Malaysia; email: nicole_kwy@yahoo.com]. *J Landsc Ecol Republic.* 12(2):41–63. doi:10.2478/jlecol-2019-0009.
- Leverington F, Costa KL, Pavese H, Lisle A, Hockings M. 2010. A global analysis



of protected area management effectiveness. *Environ Manage.* 46(5):685–698. doi:10.1007/s00267-010-9564-5.

Li C-H, Li N, Wu L-C, Hu A-J. 2013. A relative vulnerability estimation of flood disaster using data envelopment analysis in the Dongting Lake region of Hunan. *Nat Hazards Earth Syst Sci.* 13(7):1723–1734. doi:10.5194/nhess-13-1723-2013.

M, Zuo S, Su Y, Zheng X, Wang W, Chen K, Ren Y. 2023. An Approach Integrating Multi-Source Data with LandTrendr Algorithm for Refining Forest Recovery Detection [Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access]. *Remote Sens.* 15(10). doi:10.3390/rs15102667.

Shicheng, Wu J, Gong J, Li Shaowei. 2018. Human footprint in Tibet: Assessing the spatial layout and effectiveness of nature reserves. *Sci Total Environ.* 621:18–29. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.11.216.

Y, Wu Z, Xu X, Fan H, Tong X, Liu J. 2021. Forest disturbances and the attribution derived from yearly Landsat time series over 1990–2020 in the Hengduan Mountains Region of Southwest China [Cited by: 11; All Open Access, Gold Open Access]. *For Ecosyst.* 8(1). doi:10.1186/s40663-021-00352-6.

Liang L, Hawbaker TJ, Zhu Z, Li X, Gong P. 2016. Forest disturbance interactions and successional pathways in the Southern Rocky Mountains. *For Ecol Manage.* 375:35–45. doi:10.1016/j.foreco.2016.05.010.

Liu Y, Xie M, Liu J, Wang H, Chen B. 2022. Vegetation Disturbance and Recovery Dynamics of Different Surface Mining Sites via the LandTrendr Algorithm: Case Study in Inner Mongolia, China [Cited by: 3; All Open Access, Gold Open Access]. *Land.* 11(6). doi:10.3390/land11060856.

López S, López-Sandoval MF, Gerique A, Salazar J. 2020. Landscape change in Southern Ecuador: An indicator-based and multi-temporal evaluation of land use and land cover in a mixed-use protected area. *Ecol Indic.* 115(January 2019):106357. doi:10.1016/j.ecolind.2020.106357.

Luna-Nieves AL, García-Frapolli E, Bonfil C, Meave JA, Ibarra-Manríquez G. 2019. Integrating conservation and socioeconomic development: the potential of community nurseries in Mexican protected areas. *Environ Conserv.* 46(4):310–317. doi:DOI: 10.1017/S0376892919000201.

Mahdianpari M, Salehi B, Mohammadimanesh F, Homayouni S, Gill E. 2019. The first wetland inventory map of newfoundland at a spatial resolution of 10 m using sentinel-1 and sentinel-2 data on the Google Earth Engine cloud computing platform. *Remote Sens.* 11(43). doi:10.3390/rs11010043.

Mammides C. 2020. A global analysis of the drivers of human pressure within protected areas at the national level. *Sustain Sci.* 15(4):1223–1232. doi:10.1007/s11625-020-00809-7.

Mancino G, Nolè A, Salvati L, Ferrara A. 2016. In-between forest expansion and cropland decline: A revised USLE model for soil erosion risk under land-use change in a Mediterranean region. *Ecol Indic.* 71:544–550. doi:10.1016/j.ecolind.2016.07.040.

Di Marco M, Santini L. 2015. Human pressures predict species' geographic range size better than biological traits. *Glob Chang Biol.* 21(6):2169–2178. doi:<https://doi.org/10.1111/gcb.12834>.

Marimin., Magfiroh N. 2010. *Applikasi Teknik Pengambilan Keputusan dalam*



- Manajemen Rantai Pasok.* Bogor (ID): IPB Press.
- Martinuzzi S, Radeloff VC, Pastur GM, Rosas YM, Lizarraga L, Politi N, Rivera L, Herrera AH, Silveira EMO, Olah A, *et al.* 2021. Informing forest conservation planning with detailed human footprint data for Argentina. *Glob Ecol Conserv.* 31:e01787. doi:10.1016/j.gecco.2021.e01787.
- Mcgarigal K, Compton B, Plunkett E, Deluca B. 2018. Designing Sustainable Landscapes : Executive Summary Designing Sustainable Landscapes : Project.
- Metzger MJ, Rounsevell MDA, Acosta-Michlik L, Leemans R, Schröter D. 2006. The vulnerability of ecosystem services to land use change. Di dalam: *Agriculture, Ecosystems and Environment*. Vol. 114. hlm. 69–85.
- Mu H, Li X, Du X, Huang J, Su W, Hu T, Wen Y, Yin P, Han Y, Xue F. 2021. Evaluation of light pollution in global protected areas from 1992 to 2018. *Remote Sens.* 13(9):1–16. doi:10.3390/rs13091849.
- Mu H, Li X, Wen Y, Huang J, Du P, Su W, Miao S, Geng M. 2022. A global record of annual terrestrial Human Footprint dataset from 2000 to 2018. *Sci Data.* 9(1):1–9. doi:10.1038/s41597-022-01284-8.
- Muise ER, Coops NC, Hermosilla T, Ban SS. 2022. Assessing representation of remote sensing derived forest structure and land cover across a network of protected areas [Cited by: 2; All Open Access, Green Open Access, Hybrid Gold Open Access]. *Ecol Appl.* 32(5). doi:10.1002/eap.2603.
- Mutanga O, Kumar L. 2019. Google Earth Engine Applications. *Remote Sens.* 11(5). doi:10.3390/rs11050591.
- Nasiri R, Akbarpour S, Zali A, Khodakarami N, Boochani M, Noory A, Soori H. 2022. Spatio-temporal analysis of COVID-19 incidence rate using GIS: a case study—Tehran metropolitan, Iran. *GeoJournal.* 87(4):3291–3305. doi:10.1007/s10708-021-10438-x.
- Nghiem QH. 2015. GIS-based Spatial Multi-criteria Analysis: A vulnerability Assessment Model for the Protected Areas of Vietnam. *J Geogr Inf Sci.* 1:103–112. doi:10.1553/giscience2015s103.
- Nguyen HT, Soto-Berelov M, Jones SD, Haywood A, Hislop S. 2017. Mapping forest disturbance and recovery for forest dynamics over large areas using Landsat time-series remote sensing [Cited by: 5]. Di dalam: A. M, C.M.U. N, editor. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*. Vol. 10421. SPIE.
- Nguyen NV, Trinh THT, Pham HT, Tran TTT, Pham LT, Nguyen CT. 2020. Land Cover Classification Based Cloud Computing Platfrom. *Southwest Jiaotong Univ.* 55(2):1–8. doi:10.35741/issn.0258-2724.55.2.61.
- Nguyen TH, Jones SD, Soto-Berelov M, Haywood A, Hislop S. 2018. A spatial and temporal analysis of forest dynamics using Landsat time-series. *Remote Sens Environ.* 217(March):461–475. doi:10.1016/j.rse.2018.08.028.
- Nugraha RT, Komara WY, Krisna PAN, Puspita OR, Muslich M, Mardhiah U, Marthy W. 2024. Evaluating the effectiveness of protected area management in Indonesia. *ORYX*.:1–11. doi:10.1017/S003060532300145X.
- Nurda N, Noguchi R. 2020. Change-detection-and-land-suitability-analysis-for-extension-of-potential-forest-areas-in-Indonesia-using-satellite-remote-sensing-and-GIS_2020_MDPI-AG-Postfach-Basel-CH4005-rasettimdpicom.pdf. :1–22.
- Okoro SU, Schickhoff U, Böhner J, Schneider UA. 2016. A novel approach in



- monitoring land-cover change in the tropics: Oil palm cultivation in the Niger Delta, Nigeria. *Erde*. 147(1):40–52. doi:10.12854/erde-147-3.
- Oliveira BR de, Carvalho-Ribeiro SM, Maia-Barbosa PM. 2020. A multiscale analysis of land use dynamics in the buffer zone of Rio Doce State Park, Minas Gerais, Brazil. *J Environ Plan Manag*. 63(5):935–957. doi:10.1080/09640568.2019.1617681.
- Oliveira BR, Da Costa EL, Carvalho-Ribeiro SM, Maia-Barbosa PM. 2020. Land use dynamics and future scenarios of the Rio Doce State Park buffer zone, Minas Gerais, Brazil. *Environ Monit Assess*. 192(1). doi:10.1007/s10661-019-8016-9.
- Ospino JO, Yépes GYF. 2024. Effectiveness and management of terrestrial protected areas: a bibliometric analysis. *Ambient Água - An Interdiscip J Appl Sci.* 19. doi:10.4136/1980-993X.
- Özdoğan M. 2016. Image Classification Methods in Land Cover and Land Use. Di dalam: Thenkabail PS, editor. *Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies*. Vol. 1. Florida (US): CRC Press. hlm. 231–245.
- Palomo I, Martín-López B, Potschin M, Haines-Young R, Montes C. 2013. National Parks, buffer zones and surrounding lands: Mapping ecosystem service flows. *Ecosyst Serv*. 4:104–116. doi:10.1016/j.ecoser.2012.09.001.
- Parente L, Mesquita V, Miziara F, Baumann L, Ferreira L. 2019. Assessing the pasturelands and livestock dynamics in Brazil, from 1985 to 2017: A novel approach based on high spatial resolution imagery and Google Earth Engine cloud computing. *Remote Sens Environ*. 232(July):111301. doi:10.1016/j.rse.2019.111301.
- Parminter J, Daigle P. 1997. Landscape Ecology and Natural Disturbances: Relationships to Biodiversity (Part 2 of 7). *Ext Note No 10*. (January):9 pages.
- Prasetyo LB. 2017. *Pendekatan Ekologi Lanskap untuk Konservasi Biodiversitas*. Bogor (ID): Fakultas Kehutanan, Institut Pertanian Bogor.
- Pulido-Chadid K, Virtanen E, Geldmann J. 2023. How effective are protected areas for reducing threats to biodiversity? A systematic review protocol. *Environ Evid*. 12(1):1–10. doi:10.1186/s13750-023-00311-4.
- Qu Z, Zhao Y, Luo M, Han L, Yang S, Zhang L. 2022. The Effect of the Human Footprint and Climate Change on Landscape Ecological Risks: A Case Study of the Loess Plateau, China. *Land*. 11(2). doi:10.3390/land11020217.
- Quiñtero N, Viedma O, Urbieta IR, Moreno JM. 2019. Assessing landscape fire hazard by multitemporal automatic classification of landsat time series using the Google Earth Engine in West-Central Spain. *Forests*. 10(6):518. doi:10.3390/f10060518.
- Rahman MF, Islam K. 2021. Effectiveness of protected areas in reducing deforestation and forest fragmentation in Bangladesh. *J Environ Manage*. 280(November 2020):111711. doi:10.1016/j.jenvman.2020.111711.
- Ravanelli R, Nascetti A, Cirigliano RV, Di Rico C, Leuzzi G, Monti P, Crespi M. 2018. Monitoring the impact of land cover change on surface urban heat island through Google Earth Engine: Proposal of a global methodology, first applications and problems. *Remote Sens*. 10(9):1–21. doi:10.3390/rs10091488.
- Remmel TK, Perera AH. 2017. Mapping Forest Landscapes: Overview and a Primer. Di dalam: Remmel TK, Perera AH, editor. *Mapping Forest Landscape*



- Patterns*. New York (US): Springer. hlm. 1–62.
- Rempel RS, Kaukinen D, Carr AP. 2012. Patch Analyst and Patch Grid. *Ontario Minist Nat Resour Cent North For Ecosyst Res Thunder Bay, Ontario*.
- Romlah DR, Yuwono SB, Hilmanto R, Banuwa IS. 2018. Pengaruh Perubahan Tutupan Hutan Terhadap Debit Way Seputih Hulu. *J Hutan Trop*. 6(2):197. doi:10.20527/jht.v6i2.5408.
- Roque MPB, Neto JAF, de Faria ALL. 2022. Degraded grassland and the conflict of land use in protected areas of hotspot in Brazil [Cited by: 4]. *Environ Dev Sustain*. 24(1):1475–1492. doi:10.1007/s10668-021-01501-1.
- Roy DP, Kovalevskyy V, Zhang HK, Vermote EF, Yan L, Kumar SS, Egorov A. 2016. Characterization of Landsat-7 to Landsat-8 reflective wavelength and normalized difference vegetation index continuity. *Remote Sens Environ*. 185:57–70. doi:10.1016/J.RSE.2015.12.024.
- Saaty TL. 2008. Decision making with the Analytic Hierarchy Process. *Int J Serv Sci*. 1(1):83–98. doi:10.1504/ijssci.2008.017590.
- Sadono Y. 2013. Peran Serta Masyarakat dalam Pengelolaan Taman Nasional Gunung Merbabu di Desa Jeruk Kecamatan Selo, Kabupaten Boyolali. *J Pembang Wil Kota*. 9(1):53. doi:10.14710/pwk.v9i1.6526.
- Salim AG, Dharmawan IWS, Narendra BH. 2019. Pengaruh Perubahan Luas Tutupan Lahan Hutan Terhadap Karakteristik Hidrologi DAS Citarum Hulu. *J Ilmu Lingkung*. 17(2):333. doi:10.14710/jil.17.2.333-340.
- Sanderson EW, Jaiteh M, Levy MA, Redford KH, Wannebo A V., Woolmer G. 2002. The human footprint and the last of the wild. *Bioscience*. 52(10):891–904. doi:10.1641/0006-3568(2002)052[0891:THFATL]2.0.CO;2.
- Sasmitha A. 2022. Implementasi Kebijakan Pemerintah Daerah Kabupaten Lampung Timur Dalam Pengembangan Objek Wisata di Taman Nasional Way Kambas. *J Polit Gov Stud*. 11(3):1–15.
- Schulze K, Knights K, Coad L, Geldmann J, Leverington F, Eassom A, Marr M, Butchart SHM, Hockings M, Burgess ND. 2018. An assessment of threats to terrestrial protected areas. *Conserv Lett*. 11(3):1–10. doi:10.1111/conl.12435.
- Shahi E, Karimi S, Jafari HR. 2020. Monitoring and modeling land use/cover changes in Arasbaran protected Area using and integrated Markov chain and artificial neural network [Cited By:1Export Date: 1 September 2020Correspondence Address: Karimi, S.; College of Engineering, School of Environment, University of Tehran, Azin Alley- Qods St- Enghelab Ave, Iran; email: karimis@ut.ac.ir]. *Model Earth Syst Environ*. 6(3):1901–1911. doi:10.1007/s40808-020-00801-1.
- Shen J, Chen G, Hua J, Huang S, Ma J. 2022. Contrasting Forest Loss and Gain Patterns in Subtropical China Detected Using an Integrated LandTrendr and Machine-Learning Method [Cited by: 7; All Open Access, Gold Open Access]. *Remote Sens*. 14(13):3238. doi:10.3390/rs14133238.
- Shetty S. 2019. Analysis of Machine Learning Classifiers for LULC Classification on Google Earth Engine Analysis of Machine Learning Classifiers for LULC Classification on Google Earth Engine. University of Twente.
- Shimizu K, Ota T, Mizoue N. 2019a. Detecting forest changes using dense Landsat 8 and Sentinel-1 time series data in tropical seasonal forests. *Remote Sens*. 11(16):1–22. doi:10.3390/rs11161899.
- Shimizu K, Ota T, Mizoue N, Yoshida S. 2019b. ISPRS Journal of Photogrammetry

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyeberukkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah

b. Pengutipan tidak mengurangi kepentingan yang wajar IPB University.

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



and Remote Sensing A comprehensive evaluation of disturbance agent classification approaches: Strengths of ensemble classification , multiple indices , spatio-temporal variables , and direct prediction. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 158(October):99–112. doi:10.1016/j.isprsjprs.2019.10.004.

Shumba T, De Vos A, Biggs R, Esler KJ, Ament JM, Clements HS. 2020. Effectiveness of private land conservation areas in maintaining natural land cover and biodiversity intactness [Cited By :17Export Date: 30 March 2022Correspondence Address: Shumba, T.; Centre for Complex Systems in Transition, South Africa; email: tafadzwashumba@rocketmail.com]. *Glob Ecol Conserv.* 22. doi:10.1016/j.gecco.2020.e00935.

Singh BM, Voženílek V, Singh M, Vít B. 2014. Land Use / Cover , Vulnerability Index and Exposer Intensity. *Asian online J.* 1(1):1–7.

Singh SK, Pandey AC. 2014. Land Use Fragmentation Analysis Using Remote Sensing and Fragstats. Di dalam: P. S, S. M, M. G, T. I, editor. Springer, Cham. hlm. 151–176.

Smith I, Velasquez E, Norman P, Pickering C. 2023. Effect of the COVID-19 pandemic on the popularity of protected areas for mountain biking and hiking in Australia: Insights from volunteered geographic information [Special Issue on Covid-19 and outdoor recreation]. *J Outdoor Recreat Tour.* 41:100588. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jort.2022.100588>.

Smith V, Portillo-Quintero C, Sanchez-Azofeifa A, Hernandez-Stefanoni JL. 2019. Assessing the accuracy of detected breaks in Landsat time series as predictors of small scale deforestation in tropical dry forests of Mexico and Costa Rica. *Remote Sens Environ.* 221(May 2018):707–721. doi:10.1016/j.rse.2018.12.020.

Sobhani P, Esmaeilzadeh H, Mostafavi H. 2021. Simulation and impact assessment of future land use and land cover changes in two protected areas in Tehran, Iran [Cited By :2Export Date: 30 March 2022Correspondence Address: Esmaeilzadeh, H.; Environmental Sciences Research Institute, Iran; email: H_esmaeilzadeh@sbu.ac.ir]. *Sustain Cities Soc.* 75. doi:10.1016/j.scs.2021.103296.

Soraya E, Wardhana W, Sadono R. 2016. Pemodelan Spasial Resiliensi Ekosistem Gunungapi Merapi Pasca Erupsi. *J Ilmu Kehutan.* 10(2):86–97.

Soulard CE, Albano CM, Villarreal ML, Walker JJ. 2016. Continuous 1985–2012 Landsat monitoring to assess fire effects on meadows in Yosemite National Park, California. *Remote Sens.* 8(5):1–16. doi:10.3390/rs8050371.

Sukarman. 2018. Partisipasi Masyarakat Mitra Polhut Pada Upaya Perlindungan Dan Pengamanan Hutan Di Taman Nasional Way Kambas. *J Sylva Lestari.* 6(1):85–98.

Suwondo, Darmadi, Yunus M. 2018. The dynamic of urban and protected areas at Balai Raja Wildlife Reserve, Riau, Indonesia: A social ecology approach. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 106(1). doi:10.1088/1755-1315/106/1/012028.

Syaufina L, Darojat SN, Sitanggang IS, Apriliantomo. 2018. Forest fire as a threat for biodiversity and urban pollution. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 203(1). doi:10.1088/1755-1315/203/1/012015.

Szantoi Z, Brink A, Buchanan G, Bastin L, Lupi A, Simonetti D, Mayaux P, Peedell S, Davy J. 2016. A simple remote sensing based information system for



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

- monitoring sites of conservation importance. *Remote Sens Ecol Conserv.* 2(1):16–24. doi:10.1002/rse2.14.
- Tacconi L, Rodrigues RJ, Maryudi A, Muttaqin MZ. 2019. Law enforcement and deforestation: Lessons for Indonesia from Brazil. *For Policy Econ.*(May):101943. doi:10.1016/j.forpol.2019.05.029.
- Tamiminia H, Salehi B, Mahdianpari M, Quackenbush L, Adeli S, Brisco B. 2020. Google Earth Engine for geo-big data applications: A meta-analysis and systematic review. *ISPRS J Photogramm Remote Sens.* 164(January):152–170. doi:10.1016/j.isprsjprs.2020.04.001.
- Tan L, Guo G, Li S. 2022. The Sanjiangyuan Nature Reserve Is Partially Effective in Mitigating Human Pressures. *Land.* 11(1):1–15. doi:10.3390/land11010043.
- Tao C, Guo T, Shen M, Tang Y. 2023. Spatio-Temporal Dynamic of Disturbances in Planted and Natural Forests for the Saihanba Region of China [Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access]. *Remote Sens.* 15(19). doi:10.3390/rs15194776.
- Toker M, Çolak E, Sunar F. 2021. Spatiotemporal change analysis of the protected areas: A case study - Ä°neada floodplain forests [Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access]. Di dalam: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives.* Vol. 43. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing. hlm. 735–740.
- Trombulak SC, Baldwin RF, Woolmer G. 2010. The Human Footprint as a Conservation Planning Tool. Di dalam: *Landscape-scale Conservation Planning.* Dordrecht: Springer Netherlands. hlm. 281–301.
- Tsai Y, Stow D, Chen H, Lewison R, An L, Shi L. 2018. Mapping Vegetation and Land Use Types in Fanjingshan National Nature Reserve Using Google Earth Engine. *Remote Sens.* 10(6):927. doi:10.3390/rs10060927.
- Tsai YH, Stow D, An L, Chen HL, Lewison R, Shi L. 2019. Monitoring land-cover and land-use dynamics in Fanjingshan National Nature Reserve. *Appl Geogr.* 111(August 2018). doi:10.1016/j.apgeog.2019.102077.
- Tucker MA, Böhning-Gaese K, Fagan WF, Fryxell JM, Van Moorter B, Alberts SC, Ali AH, Allen AM, Attias N, Avgar T, et al. 2018. Moving in the Anthropocene: Global reductions in terrestrial mammalian movements. *Science* (80-). 359(6374):466–469. doi:10.1126/science.aam9712.
- Turner II BL, Kasperson RE, Matsone PA, McCarthy JJ, Corell RW, Christensen L, Eckley N, Kasperson JX, Luers A, Martello ML, et al. 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proc Natl Acad Sci U S A.* 100(14):8074–8079. doi:10.1073/pnas.1231335100.
- Turner MG, Simard M. 2017. Using Spatial Statistics and Landscape Metrics to Compare Disturbance Mosaics. Di dalam: Gergel SE, Turner MG, editor. *A Practical Guide to Concepts and Techniques. Learning Landscape Ecology.* New York (US): Springer. hlm. 175–190.
- Umarhadi DA, Wardhana W, Senawi, Soraya E. 2023. Monitoring forest gain and loss based on LandTrendr algorithm and Landsat images in KTH Pati social forestry area, Indonesia [Cited by: 0; All Open Access, Hybrid Gold Open Access]. *J Appl Nat Sci.* 15(3):1051 – 1060. doi:10.31018/jans.v15i3.4781.
- United Nations Interagency and Expert Group on, SDG Indicators (IAEG-SDGs). 2019. Tier Classification for Global SDG Indicators. *United Nation.*(April):36.



- doi:10.1080/10717540500313661.
- Untoro Y, Hikmat A, Prasetyo LB. 2017. Pemodelan Spasial Kesesuaian Habitat Akasia Hijau (*Acacia decurens*) di Kawasan Taman Nasional Gunung Merbabu. *Media Konserv.* 22(2):49–63.
- Vázquez-González C, Fermán-Almada JL, Moreno-Casasola P, Espejel I. 2014. Scenarios of vulnerability in coastal municipalities of tropical Mexico: An analysis of wetland land use. *Ocean Coast Manag.* 89:11–19. doi:10.1016/j.ocecoaman.2013.12.004.
- Venkatappa M, Sasaki N, Shrestha RP, Tripathi NK, Ma HO. 2019. Determination of vegetation thresholds for assessing land use and land use changes in Cambodia using the Google Earth Engine cloud-computing platform. *Remote Sens.* 11(13):1514. doi:10.3390/rs11131514.
- Venter O, Sanderson EW, Magrach A, Allan JR, Beher J, Jones KR, Possingham HP, Laurance WF, Wood P, Fekete BM, et al. 2016. Global terrestrial Human Footprint maps for 1993 and 2009. *Sci Data.* 3:1–10. doi:10.1038/sdata.2016.67.
- Verbesselt J, Hyndman R, Newnham G, Culvenor D. 2010. Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sens Environ.* doi:10.1016/j.rse.2009.08.014.
- Verburg PH, Overmars KP, Huigen MGA, de Groot WT, Veldkamp A. 2006. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. *Appl Geogr.* 26(2):153–173. doi:10.1016/j.apgeog.2005.11.005.
- Viera AJ, Garrett JM. 2005. Anthony J. Viera, MD; Joanne M. Garrett, PhD (2005). Understanding interobserver agreement: the kappa statistic. *Fam Med* 2005;37(5):360-63. *Fam Med.* 37(5):360–3.
- Wade CM, Austin KG, Cajka J, Lapidus D, Everett KH, Galperin D, Maynard R, Sobel A. 2020. What is threatening forests in protected areas? A global assessment of deforestation in protected areas, 2001-2018 [Cited By :1Export Date: 1 September 2020Correspondence Address: Wade, C.M.; RTI International, 3040 E Cornwallis Rd, United States; email: chwade@rti.org]. *Forests.* 11(5). doi:10.3390/F11050539.
- Wang T, Giuliani G, Lehmann A, Jiang Y, Shao X, Li L, Zhao H. 2020. Supporting sdg 15, life on land: Identifying the main drivers of land degradation in honghe prefecture, china, between 2005 and 2015. *ISPRS Int J Geo-Information.* 9(12). doi:10.3390/ijgi9120710.
- Wang W, Zhu L, Li L, Xue X, Feng Y, Xing H. 2023. A LandTrendr Algorithm-Based Study of Forest Disturbance from 2000 to 2020 in Jilin Province, China [Cited by: 0; All Open Access, Bronze Open Access]. *Polish J Environ Stud.* 32(1):309 – 319. doi:10.15244/pjoes/153969.
- Wasis B, Harlan D, Putra MHW. 2020. Impact of forest land cover on runoff, erosion and sedimentation in the Karai Watershed, Simalungun Regency, North Sumatra Province, Indonesia. *Arch Agric Environ Sci.* 5(1):40–49. doi:10.26832/24566632.2020.050106.
- West H, Quinn N, Horswell M. 2019. Remote sensing for drought monitoring & impact assessment: Progress, past challenges and future opportunities. *Remote Sens Environ.* 232(November 2018):111291. doi:10.1016/j.rse.2019.111291.
- Widuri PD, Qomaruddin MB, Hargono R. 2023. Overview of the Empowerment of Masyarakat Peduli Api (MPA) in Kereng Bangkirai and Sabaru Village



- Palangka Raya City Kalimantan Tengah. *Media Gizi Kesmas*. 12(1):42–47. doi:10.20473/mgk.v12i1.2023.42-47.
- Willmott CJ, Matsuura K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim Res*. 30(1):79–82. doi:10.3354/cr030079.
- Wiratno. 2012. *Solusi jalan tengah*. Jakarta (ID): Direktorat Kawasan Konservasi dan Bina Hutan Lindung.
- Wiratno. 2018. *Sepuluh Cara baru Kelola Kawasan Konservasi di Indonesia: Membangun “Organisasi Pembelajar.”* Jakarta (ID): Direktorat Jenderal KSDAE Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan.
- Woolmer G, Trombulak SC, Ray JC, Doran PJ, Anderson MG, Baldwin RF, Morgan A, Sanderson EW. 2008. Rescaling the Human Footprint: A tool for conservation planning at an ecoregional scale. *Landsc Urban Plan*. 87(1):42–53. doi:10.1016/j.landurbplan.2008.04.005.
- Xi W, Coulson RN, Tchakerian MD, Birt AG, Waldron JD, Lafon CW, Cairns DM, Klepzig KD. 2008. Landscape modeling for forest restoration planning and assessment: Lessons from the southern Appalachian Mountains. *J For*. 106(4):191–197. doi:10.1093/jof/106.4.191.
- Xiao W, Deng X, He T, Chen W. 2020. Mapping annual land disturbance and reclamation in a surface coal mining region using google earth engine and the landtrendr algorithm: A case study of the shengli coalfield in Inner Mongolia, China [Cited by: 49; All Open Access, Gold Open Access]. *Remote Sens*. 12(10). doi:10.3390/rs12101612.
- Xie Z, Phinn SR, Game ET, Pannell DJ, Hobbs RJ, Briggs PR, McDonald-Madden E. 2019. Using Landsat observations (1988–2017) and Google Earth Engine to detect vegetation cover changes in rangelands - A first step towards identifying degraded lands for conservation. *Remote Sens Environ*. 232(July):111317. doi:10.1016/j.rse.2019.111317.
- Yang L, Bian C, Pan S, Chen W, Zeng J, Xu H, Gu T. 2023. Assessing the conservation effectiveness of theWorld 's protected areas : A habitat quality and human activities perspective. *J Clean Prod*. 431(68):139772. doi:10.1016/j.jclepro.2023.139772.
- Yang W, Ma Y, Jing L, Wang S, Sun Z, Tang Y, Li H. 2022. Differential Impacts of Climatic and Land Use Changes on Habitat Suitability and Protected Area Adequacy across the Asian Elephant's Range [Cited by: 3; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access]. *Sustain*. 14(9). doi:10.3390/su14094933.
- Young JE, Sánchez-Azofeifa GA, Hannon SJ, Chapman R. 2006. Trends in land cover change and isolation of protected areas at the interface of the southern boreal mixedwood and aspen parkland in Alberta, Canada. *For Ecol Manage*. 230(1–3):151–161. doi:10.1016/j.foreco.2006.04.031.
- Yu C, Zhang Z, Jeppesen E, Gao Y, Liu Yuexin, Liu Yongjie, Lu Q, Wang C, Sun X. 2024. Assessment of the effectiveness of China's protected areas in enhancing ecosystem services. *Ecosyst Serv*. 65(January 2023):101588. doi:10.1016/j.ecoser.2023.101588.
- Zeng Y, Senior RA, Crawford CL, Wilcove DS. 2023. Gaps and weaknesses in the global protected area network for safeguarding at-risk species. *Sci Adv*. 9(22):1–10. doi:10.1126/sciadv.adg0288.



- Zhang DD, Zhang L. 2020. Land cover change in the central region of the lower yangtze river based on landsat imagery and the google earth engine: A case study in Nanjing, China. *Sensors (Switzerland)*. 20(7):1–20. doi:10.3390/s20072091.
- Zhang M, Gong P, Qi S, Liu C, Xiong T. 2019. Mapping bamboo with regional phenological characteristics derived from dense Landsat time series using Google Earth Engine. *Int J Remote Sens.* 40(24):9541–9555. doi:10.1080/01431161.2019.1633702.
- Zhang X, Yan M, Zhang L, Chen B. 2023. A Study to Assess the Conservation Effectiveness of Nature Reserves in Hainan, China, from 2000 to 2021 [Cited by: 0; All Open Access, Gold Open Access, Green Open Access]. *Forests*. 14(7). doi:10.3390/f14071293.
- Zhang Xiaoyu, Ning X, Wang H, Zhang Xiaoyuan, Liu Y, Zhang W. 2022. Quantitative assessment of the risk of human activities on landscape fragmentation: A case study of Northeast China Tiger and Leopard National Park. *Sci Total Environ.* 851(August):158413. doi:10.1016/j.scitotenv.2022.158413.
- Zhu Z, Woodcock CE. 2014. Continuous change detection and classification of land cover using all available Landsat data. *Remote Sens Environ.* 144:152–171. doi:10.1016/j.rse.2014.01.011.