

PENGEMBANGAN INDEKS PERFORMA PADA BEBERAPA TIPE EKOSISTEM HUTAN ALAM

ZULKARNAIN



**PROGRAM STUDI PASCASARJANA ILMU PENGELOLAAN HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi berjudul Pengembangan Indeks Performa pada Beberapa Tipe Ekosistem Hutan Alam adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

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

Bogor, Agustus 2025

Zulkarnain
E161190011

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



@Hak cipta milik IPB University

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;



RINGKASAN

ZULKARNAIN. Pengembangan Indeks Performa Hutan pada Beberapa Tipe Ekosistem Hutan Alam. Dibimbing oleh HERI PURNOMO, BUDI KUNCAHYO, TATANG TIRYANA dan NINING PUSPANINGSIH.

Pengelolaan hutan alam menghadapi tantangan serius, tidak hanya dari sisi luasan tutupan, tetapi lebih dalam lagi terkait degradasi kualitas ekosistem yang sulit terdeteksi secara dini akibat ketiadaan indikator evaluasi yang komprehensif dan kuantitatif. Ketergantungan pada pendekatan deskriptif satu dimensi dan keterbatasan sistem pemantauan berbasis survei lapangan telah menghambat pemahaman menyeluruh terhadap dinamika ekologis, terutama dalam skala spasial dan temporal yang luas. Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan baru yang mampu menyusun indikator performa hutan yang tidak hanya merepresentasikan kondisi saat ini, tetapi juga mampu menelusuri tren perubahan ekosistem secara adaptif dan berbasis data.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem penilaian performa hutan yang terpadu, kuantitatif, dan berbasis spasial-temporal, dengan memanfaatkan integrasi data lapangan, citra penginderaan jauh, serta analisis statistik dan machine learning. Secara khusus, penelitian ini berupaya menyusun Indeks Kualitas Hutan (IKH) melalui integrasi indikator multidimensi, memetakannya ke dalam bentuk spasial yang terverifikasi di seluruh kawasan Taman Nasional Rawa Aopa Watumohai (TNRAW), serta mengembangkan model prediktif berbasis data multitemporal untuk mengevaluasi perubahan performa ekosistem hutan dalam lima tahun terakhir melalui pembentukan Indeks Performa Hutan (IPH).

Model awal yang dikembangkan dalam penelitian ini adalah Indeks Kualitas Hutan (IKH) yang dirumuskan menggunakan *Second-Order Confirmatory Factor Analysis* (SOCFA). Model ini mengintegrasikan indikator dari enam dimensi ekosistem, yakni struktur hutan, produktivitas hutan, kesuburan tanah, tekanan antropogenik, faktor iklim, dan topografi. Namun, hasil validasi statistik menunjukkan bahwa hanya empat dimensi yang signifikan secara konstruk, yaitu produktivitas hutan, struktur hutan, faktor tanah, dan antropogenik. IKH diformulasikan secara matematis berdasarkan bobot *standardized loading* dari model CFA, sehingga dapat dioperasionalkan dalam bentuk spasial menggunakan citra satelit resolusi menengah. Dimensi-dimensi penyusun IKH kemudian dipetakan secara terpisah dan digabungkan ke dalam peta kualitas hutan tahun 2023 untuk seluruh wilayah TNRAW.

Pemetaan spasial IKH tahun 2023 dilakukan dengan menggabungkan semua indikator IKH yang telah dipasialkan berdasarkan persamaan matematis yang telah dibangun sebelumnya, lalu diklasifikasi dalam lima kategori kelas IKH. Hasilnya menunjukkan bahwa lebih dari 70% kawasan TNRAW berada dalam kategori IKH sedang hingga tinggi, dengan konsentrasi nilai tertinggi berada di zona inti dan rimba, khususnya pada ekosistem dataran rendah dan mangrove. Sebaliknya, nilai IKH rendah banyak ditemukan di zona pemanfaatan dan ekosistem savana.

Validasi model dengan menggunakan titik observasi lapangan menghasilkan nilai *kappa accuracy* sebesar 0,53, yang tergolong *moderate agreement* atau akurasi sedang. Meskipun belum mencapai tingkat akurasi tinggi, model ini tetap relevan



untuk pemetaan awal kualitas hutan, analisis distribusi spasial, dan identifikasi area prioritas pengelolaan. Model ini bermanfaat terutama di wilayah dengan keterbatasan akses atau sumber daya data lapangan. Untuk kebutuhan yang lebih strategis dan berdampak jangka panjang, seperti penetapan zona konservasi, evaluasi program rehabilitasi, atau perumusan kebijakan pengelolaan hutan, pemanfaatannya memerlukan dukungan validasi tambahan, integrasi dengan data lapangan yang lebih representatif, serta kemungkinan penyempurnaan model melalui perbaikan fitur prediktor dan peningkatan resolusi spasial.

Untuk mengevaluasi perubahan kualitas hutan dari waktu ke waktu, model prediksi IKH dibangun menggunakan algoritma Random Forest dengan data IKH tahun 2023 sebagai target, serta fitur citra Sentinel tahun 2019–2022 sebagai prediktor. Model ini menunjukkan kinerja terbaik dibanding model lainnya ($R^2 = 0,9496$; RMSE = 0,1852), dengan kanal merah (B4) dari Sentinel-2 sebagai fitur paling penting. Berdasarkan hasil prediksi tahunan, dilakukan evaluasi spasio-temporal perubahan kualitas hutan melalui perhitungan selisih antarperiode (Δ IKH), yang menjadi dasar perhitungan Indeks Performa Hutan (IPH). Evaluasi ini menunjukkan bahwa performa hutan di TNRAW mengalami fluktuasi selama lima tahun terakhir, dengan penurunan paling tajam terjadi pada periode 2022–2023. Penurunan performa terutama teridentifikasi di ekosistem hutan dataran rendah dan ekosistem rawa. Ekosistem mangrove menunjukkan penurunan yang progresif, sedangkan savana relatif stabil.

Secara keseluruhan, penelitian ini berhasil merumuskan pendekatan penilaian kualitas dan performa hutan yang menggabungkan kekuatan statistika multivariat, kecerdasan buatan, dan teknologi penginderaan jauh. IKH dan IPH yang dikembangkan mampu memberikan gambaran dan pendekatan operasional yang terukur atas kondisi serta dinamika mutu ekologis kawasan hutan. Pendekatan ini tidak hanya menawarkan kontribusi akademik dalam bentuk model konseptual dan metodologis baru, tetapi juga memberikan manfaat praktis bagi perencanaan pengelolaan, konservasi, restorasi ekosistem, dan pengambilan keputusan berbasis data spasial. Pendekatan yang telah dikembangkan bersifat fleksibel dan dapat direplikasi pada wilayah lain dengan penyesuaian pada karakteristik ekosistem wilayah yang dikaji, sehingga memperluas cakupan penerapan dan meningkatkan relevansi hasil dalam konteks yang lebih luas.

Kata kunci: *Confirmatory Factor Analysis*, Indeks Kualitas Hutan, Indeks Performa Hutan, Penginderaan Jauh, Sentinel, *Random Forest*, Taman Nasional Rawa Aopa Watumohai.

SUMMARY

ZULKARNAIN. Development of Forest Performance Index on Several Types of Natural Forest Ecosystem. Supervised by HERI PURNOMO of 1st, BUDI KUNCAHYO of 2nd, TATANG TIRYANA of 3rd and NINING PUSPANINGSIH of 4th SUPERVISOR.

Natural forest management faces serious challenges, not only in terms of cover area, but also in terms of ecosystem quality degradation that is difficult to detect early due to the absence of comprehensive and quantitative evaluation indicators. The reliance on a one-dimensional descriptive approach and the limitations of field survey-based monitoring systems have hampered a comprehensive understanding of ecological dynamics, especially at a wide spatial and temporal scale. Therefore, a new approach is needed that is able to compile forest performance indicators that not only represent current conditions but also are able to trace ecosystem change trends in an adaptive and data-driven manner.

This research aims to develop an integrated, quantitative, and spatial-temporal-based forest performance assessment system, utilizing the integration of field data, remote sensing imagery, as well as statistical analysis and machine learning. In particular, this study seeks to compile the Forest Quality Index (IKH) through the integration of multidimensional indicators, mapping them into verified spatial forms across the entire Aopa Watumohai Swamp National Park (TNRAW) area, and developing a multitemporal data-based predictive model to evaluate changes in forest ecosystem performance in the past five years through the establishment of the Forest Performance Index (IPH).

The initial model developed in this study is the Forest Quality Index (IKH), formulated using Second-Order Confirmatory Factor Analysis (SOCFA). This model integrates indicators from six ecosystem dimensions: forest structure, productivity, soil fertility, anthropogenic stress, climate factors, and topography. However, the results of statistical validation show that only four dimensions are constructively significant, namely forest productivity, forest structure, soil factors, and anthropogenic. The IKH is mathematically formulated based on the standardized loading weight of the CFA model so that it can be operationalized in a spatial form using medium-resolution satellite imagery. The dimensions that make up the IKH are then mapped separately and combined into the 2023 forest quality map for the entire TNRAW region.

The spatial mapping of IKH in 2023 is carried out by combining all IKH indicators spatially based on mathematical equations built previously, then classified into five categories of IKH classes. The results showed that more than 70% of the TNRAW area was in the medium to high IKH category, with the highest concentration of values being in the core and jungle zones, particularly in lowland and mangrove ecosystems. In contrast, low IKH values are primarily found in utilization zones and savanna ecosystems.

Model validation using field observation points resulted in a *kappa accuracy value* of 0.53, which is classified as *moderate agreement* or moderate accuracy. Although it has not yet achieved a high level of accuracy, it remains relevant for

early mapping of forest quality, spatial distribution analysis, and identification of priority areas of management. This model is especially useful in areas with limited access or field data resources. For more strategic and long-term impacts, such as the establishment of conservation zones, the evaluation of rehabilitation programs, or the formulation of forest management policies, their utilization requires additional validation support, integration with more representative field data, and possible refinement of the model through improved predictor features and improved spatial resolution.

To evaluate changes in forest quality over time, the IKH prediction model was built using the Random Forest algorithm with IKH data for 2023 as a target and the Sentinel image feature for 2019–2022 as a predictor. This model performs best compared to other models ($R^2 = 0.9496$; $RMSE = 0.1852$), with the red channel (B4) of Sentinel-2 as the most essential feature. Based on the results of the annual prediction, a spatio-temporal evaluation of forest quality changes was carried out by calculating inter-period differences (ΔIKH), which is the basis for calculating the Forest Performance Index (HI). This evaluation shows that forest performance in TNRAW has fluctuated over the past five years, with the sharpest decline occurring in 2022–2023. Degradation in performance is mainly identified in lowland forest ecosystems and swamp ecosystems. The mangrove ecosystem shows a progressive decrease, while the savanna is relatively stable.

Overall, this study successfully formulated an approach to forest quality and performance assessment that combines the power of multivariate statistics, artificial intelligence, and remote sensing technology. The IKH and IPH developed are able to provide a measurable overview and operational approach to the conditions and dynamics of the ecological quality of forest areas. This approach offers academic contributions in the form of new conceptual and methodological models and provides practical benefits for management planning, conservation, ecosystem restoration, and spatial data-driven decision-making. The approach that has been developed is flexible and can be replicated in other regions with adjustments to the ecosystem characteristics of the region studied, thereby expanding the scope of implementation and increasing the relevance of results in a broader context.

Keywords: Confirmatory Factor Analysis, Forest Quality Index, Forest Performance, Random Forest, Remote Sensing, Rawa Aopa Watumohai National Park, Sentinel.

PENGEMBANGAN INDEKS PERFORMA PADA BEBERAPA TIPE EKOSISTEM HUTAN ALAM

ZULKARNAIN

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Ilmu Pengelolaan Hutan

**PROGRAM STUDI PASCASARJANA ILMU PENGELOLAAN HUTAN
FAKULTAS KEHUTANAN DAN LINGKUNGAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2025**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc
- 2 Dr. Riva Rovani, S.Hut, M.Agr

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka:

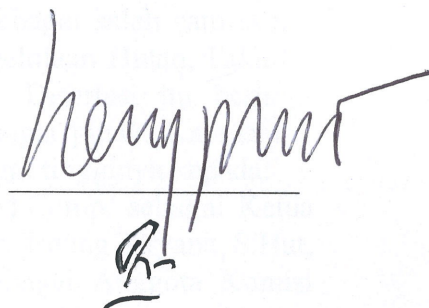
- 1 Dr. Yudi Setiawan, S.P., M.Env.Sc
- 2 Dr. Lies Indriyani, S.P., M.Si

Judul Disertasi : Pengembangan Indeks Performa pada Beberapa Tipe Ekosistem
Hutan Alam

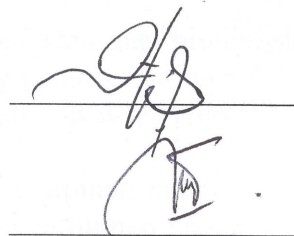
Nama : Zulkarnain
NIM : E161190011

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Heri Purnomo, M.Comp



Pembimbing 2:
Dr. Ir. Budi Kuncahyo, M.Si



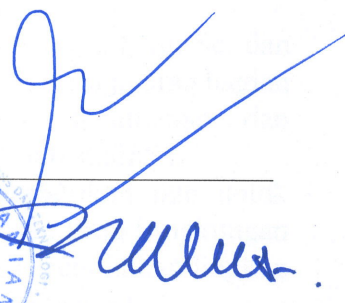
Pembimbing 3:
Dr. Tatang Tiryana, S.Hut, M.Sc

Pembimbing 4:
Dr. Dra. Nining Puspaningsih, M.Si

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Hendrayanto, M. Agr.Sc
NIP 196111261986011001

Dekan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan:
Prof. Dr. Ir. Naresworo Nugroho, M.S
NIP 196501221989031002



Tanggal Ujian: 24 Juli 2025

Tanggal Lulus: 15 AUG 2025



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas Rahmat, Hidayah dan Karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan karya ilmiah yang berjudul “Pengembangan Indeks Performa pada beberapa Tipe Ekosistem Hutan Alam”, yang disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Doktor dari Program Studi Ilmu Pengelolaan Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor. Disertasi ini berhasil diselesaikan atas bantuan, dukungan dan do'a dari berbagai pihak. Karena itu, penulis mengucapkan terima kasih dan penghargaan setinggi tingginya kepada:

1. Komisi Pembimbing, Prof. Dr. Ir. Heri Purnomo, M.Comp, sebagai Ketua Komisi Pembimbing. Dr. Ir. Budi Kuncahyo, M.Si, Dr. Tatang Tiryan, S.Hut, M.Sc dan Dr. Dra. Nining Puspaningsih, M.Si, sebagai Anggota Komisi Pembimbing atas arahan, petunjuk dan perhatiannya sehingga penyusunan disertasi ini dapat diselesaikan.
2. Almarhum Prof. Dr. Ir. Muhammad Buce Saleh, MS atas atas bimbingan, arahan, dan dukungannya selama beliau membimbing penulis. Semoga Allah Ta'ala membalas kebaikan almarhum dengan amal jariyah dan memberikan tempat terbaik di sisi-Nya.
3. Prof. Dr. Ir. Noor Farikhah Haneda, MS. sebagai pimpinan sidang ujian tertutup, Dr. Ir. Nandi Kosmaryandi, M.Sc.F sebagai pimpinan sidang saat sidang promosi. Tim Penguji Luar komisi saat ujian tertutup dan sidang Promosi yaitu Dr. Yudi Setiawan S.P., M.Env.Sc, Dr. Riva Rovani S.Hut, M.Agr, dan Dr. Lies Indriyani, SP., M.Si, atas saran dan masukan yang berharga untuk kesempurnaan disertasi ini.
4. Dekan Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB, Dekan Sekolah Pascasarjana IPB, dan dosen Program Studi Ilmu Pengelolaan Hutan, serta seluruh civitas akademika Sekolah Pascasarjana IPB University.
5. Ketua Program Studi S3 IPH Prof. Dr. Ir. Hendrayanto, M.Agr.Sc dan sekretaris program studi, Dr. Tatang Tiryan, S.Hut, M.Sc, serta jajaran bagian akademik Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan dan Lingkungan IPB atas semua bantuan saat penulis menempuh studi S3.
6. Bapak Rektor Universitas Halu Oleo yang telah memberikan izin untuk menempuh studi S3 di IPB, Dekan Fakultas Kehutanan dan Ilmu Lingkungan UHO dan jajarannya serta Bapak Ibu Dosen dan Tenaga kependidikan lingkup FHIL-UHO atas dukungannya selama penulis menempuh studi S3.
7. Kepala Balai Taman Nasional Rawa Aopa Watumohai Provinsi Sulawesi Tenggara dan segenap jajarannya atas dukungan serta bantuannya selama penulis melaksanakan penelitian.
8. Ucapan terima kasih yang tidak terhingga penulis sampaikan kepada kedua orang tua penulis, Bapak H. Lam Bara Sungkusara dan Ibu Hj. Nurniah, serta semua adik adik penulis dan seluruh keluarga besar atas doa serta dukungan yang selalu diberikan. Ucapan terima kasih juga penulis ucapkan kepada anak anaku tercinta Zayan Alfatih Zulkarnain dan Gibran Dwiputra Zulkarnain atas kesabaran, dan pengertiannya.
9. Teman-teman mahasiswa program studi S3 IPH angkatan 2019 dan teman-teman seperjuangan sesama beasiswa BPPDN S3 di IPB atas kebersamaannya.

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

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

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

10. Sahabat sahabat yang berjuang bersama di Perpustakaan LSI IPB dan bantuan seluruh pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa disertasi ini tidak luput dari kekurangan. Namun penulis berharap semoga karya ilmiah ini dapat bermanfaat bagi diri penulis maupun yang membaca tulisan ini.

Bogor, Agustus 2025

Zulkarnain

Hak cipta milik IPB University

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

DAFTAR ISI

RINGKASAN	v
SUMMARY	vii
PRAKATA	xii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR TABEL	xvii
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xix
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	3
1.5 Ruang Lingkup	4
1.6 Kebaruan (<i>novelty</i>)	5
1.7 Sistematika Penyusunan Disertasi	5
1.8 Kerangka Pikir	6
II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Hutan	9
2.2 Kualitas Hutan	10
2.3 Performa Hutan	11
2.4 Taman Nasional Rawa Aopa Watumohai (TNRAW)	12
2.5 Remote Sensing	13
2.6 Citra Sentinel	14
2.7 Confirmatory Factor Analysis (CFA)	14
2.8 Sistem Informasi Geografis	16
2.9 Machine Learning	17
III PENGEMBANGAN MODEL PENGUKURAN KUALITAS HUTAN MENGUNAKAN <i>SECOND ORDER CONFIRMATORY FACTOR ANALYSIS</i>	19
3.1 Abstrak	19
3.2 Pendahuluan	19
3.3 Metode	21
3.4 Hasil dan Pembahasan	33
3.5 Simpulan	45
IV APLIKASI MODEL IKH DALAM PEMETAAN SPASIAL KUALITAS HUTAN DI TAMAN NASIONAL RAWA AOPA WATUMOHAI	46
4.1 Abstrak	46
4.2 Pendahuluan	46
4.3 Metode	48
4.4 Hasil dan Pembahasan	55
4.5 Simpulan	85

EVALUASI SPASIO TEMPORAL PERFORMA HUTAN BERBASIS	
INDEKS KUALITAS HUTAN MENGGUNAKAN <i>MACHINE LEARNING</i>	
DAN CITRA SATELIT MULTISENSOR	86
5.1 Abstrak	86
5.2 Pendahuluan	86
5.3 Metode	88
5.4 Hasil dan Pembahasan	96
5.5 Simpulan	106
VI PEMBAHASAN UMUM	108
6.1 Kebaruan dalam Evaluasi Kualitas Hutan Tropis	108
6.2 Kontribusi Ilmiah (<i>Scientific Contribution</i>)	109
6.3 Keterbatasan Penelitian	110
6.4 Potensi Pengembangan dan Perbaikan di Masa Depan	111
6.5 Level Implementasi Model dalam Praktik Pengelolaan Hutan	112
6.6 Potensi Pengaplikasian Model pada Lokasi Berbeda	113
VII SIMPULAN UMUM DAN SARAN	115
7.1 Simpulan Umum	115
7.2 Saran	115
DAFTAR PUSTAKA	117
LAMPIRAN	141
RIWAYAT HIDUP	171

DAFTAR TABEL

1	Indeks kebaikan model	31
2	Faktor dan Indikator yang digunakan dalam membangun Indeks kualitas Hutan di TNRAW	36
3	Rekapan evaluasi asumsi asumsi yang digunakan	37
4	<i>Standardized regression weight model</i> dan signifikansinya	39
5	Hasil perhitungan CR dan AVE	39
6	Hasil uji kecocokan model	40
7	<i>Standardized regression weight model</i> setelah perbaikan dan signifikansinya	41
8	Hasil perhitungan CR dan AVE model hasil perbaikan	41
9	Hasil uji kecocokan model setelah perbaikan	43
10	Hasil perhitungan bobot faktor dan indikator dalam penilaian IKH	44
11	Ringkasan data yang digunakan dalam penelitian	48
12	Fitur prediktor dari Citra Sentinel yang digunakan dalam penelitian ini	49
13	Interpretasi <i>overall accuracy</i>	54
14	Interpretasi <i>kappa accuracy</i>	55
15	Ringkasan Hasil Pemodelan Kerapatan Tegakan (SH1)	56
16	Hasil Uji Koefisien Regresi Model Prediksi Kerapatan Tegakan (Ln_K)	56
17	Luas dan persentase skoring kerapatan pohon di wilayah TNRAW	58
18	Luas dan persentase skoring strata tajuk di wilayah TNRAW	61
19	Ringkasan Hasil Pemodelan Biomassa (PH1)	62
20	Hasil Uji Koefisien Regresi Model Prediksi Biomassa	62
21	Luas dan persentase skor biomassa di wilayah TNRAW	64
22	Ringkasan Hasil Pemodelan Volume Pohon	65
23	Hasil Uji Koefisien Regresi Model Prediksi Volume Pohon	65
24	Luas dan persentase skor Volume Pohon di wilayah TNRAW	66
25	Luas dan persentase Skor C-Organik Tanah di wilayah TNRAW	68
26	Luas dan persentase kelas C-Organik Tanah di wilayah TNRAW	71
27	Luas dan persentase kelas jarak dari jalan di wilayah TNRAW	72
28	Luas dan persentase skor jarak dari pemukiman di wilayah TNRAW	74
29	Luas dan persentase skor jarak dari aktifitas masyarakat di wilayah TNRAW	77
30	Hasil Reklasifikasi IKH tahun 2023	79
31	Distribusi luas dan persentase IKH 2023 di TN Rawa Aopa Watumohai	80
32	Distribusi luas dan persentase IKH 2023 berdasarkan Tipe Ekosistem di TNRAW	80
33	Distribusi luas dan persentase IKH 2023 berdasarkan Tipe Ekosistem di TNRAW	81
34	Distribusi luas dan persentase IKH 2023 berdasarkan Tipe Ekosistem di TNRAW	83
35	Ringkasan data yang digunakan dalam penelitian ini	88
36	Hasil perhitungan <i>Fitur inportance</i> dengan <i>random forest regressor</i>	97
37	Rangkuman nilai rata rata metrik evaluasi seluruh model	99
38	Luas dan Presentase IKH di TNRAW tahun 2019 - 2023	101
39	Luas dan persentase Performa Hutan dan IPH TNRAW periode 2019-2020	104
40	Rekapitulasi Perubahan IKH (Δ IKH) dan IPH Berdasarkan Tipe Ekosistem di TNRAW Periode 2019–2023	105



DAFTAR GAMBAR

1	Kerangka pemikiran penelitian	8
2	Lokasi penelitian	21
3	Bentuk: (a) cluster dan (b) plot pengamatan	24
4	Ilustrasi pengukuran tinggi pohon	25
5	Diagram alir penelitian	32
6	Spesifikasi model pengukuran kualitas hutan	36
7	Model <i>second order</i> CFA ke-1 dan loading faktornya	37
8	Model <i>second order</i> CFA ke-2 dan loading faktornya	38
9	Model <i>second order</i> CFA ke-3 dan loading faktornya	38
10	Perbaikan model dan loading faktornya	41
11	Peta Distribusi Kerapatan Pohon di wilayah TNRAW	57
12	Peta skoring Kerapatan Pohon di wilayah TNRAW	57
13	Distribusi akurasi pada <i>10-fold cross validation</i> model klasifikasi stratifikasi tajuk	59
14	Hasil analisis fitur penting model klasifikasi stratifikasi tajuk	59
15	Peta Distribusi strata tajuk di wilayah TNRAW	60
16	Peta skoring stratifikasi tajuk di wilayah TNRAW	60
17	Peta distribusi biomassa di wilayah TNRAW	63
18	Peta skoring biomassa di wilayah TNRAW	63
19	Peta distribusi volume tegakan di wilayah TNRAW	65
20	Peta skoring volume tegakan di wilayah TNRAW	66
21	Peta distribusi C-Organik Tanah di wilayah TNRAW	67
22	Peta skoring C-Organik Tanah di wilayah TNRAW	68
23	Peta distribusi <i>Bulk Density</i> Tanah di wilayah TNRAW	70
24	Peta skoring <i>Bulk Density</i> Tanah di wilayah TNRAW	70
25	Peta klasifikasi Jarak dari jalan di wilayah TNRAW	72
26	Peta Skoring Jarak dari jalan di wilayah TNRAW	73
27	Peta Jarak dari pemukiman di wilayah TNRAW	74
28	Peta Skoring Jarak dari pemukiman di wilayah TNRAW	75
29	Peta Jarak dari aktifitas masyarakat di wilayah TNRAW	76
30	Peta Skoring Jarak dari aktifitas masyarakat di wilayah TNRAW	77
31	Peta spasial distribusi IKH di wilayah TNRAW tahun 2023	78
32	Peta Klasifikasi IKH di wilayah TNRAW tahun 2023	79
33	Peta Klasifikasi IKH 2023 Berdasarkan Tipe Ekosistem TNRAW	81
34	Peta Klasifikasi IKH 2023 Berdasarkan Zonasi Pengelolaan TNRAW	82
35	Confusion matrix uji akurasi Model IKH	84
36	Ilustrasi 10-fold CV	91
37	<i>Flow cart</i> penelitian	94
38	<i>Features with importance >1%</i>	97
39	Evaluasi Model dengan 10-fold CV	98
40	Visualisasi scatter plot Prediksi vs Aktual seluruh model	99
41	Peta Hasil prediksi IKH tahun 2019 – 2020	100
42	Peta Klasifikasi IKH tahun 2019 – 2020	101
43	Grafik perubahan IKH di TNRAW periode 2019 - 2023	102
44	Performa Hutan di TNRAW periode 2019-2023	103

DAFTAR LAMPIRAN

1	Metode skoring indikator indikator yang digunakan pada penelitian	142
2	Statistik deskriptif indikator-indikator yang digunakan pada penelitian	144
3	Uji normalitas indikator model sebelum perbaikan	144
4	Identifikasi model sebelum perbaikan	145
5	Output CFA model sebelum perbaikan	145
6	Uji normalitas indikator model setelah perbaikan	148
7	Identifikasi model setelah perbaikan	148
8	Output CFA model setelah perbaikan	149
9	Titik pengambilan sampel lapangan	151
10	Rescaling data IKH hasil pengukuran lapangan menggunakan min max scalling	153
11	Rescaling data IKH hasil prediksi spasial menggunakan min max scalling	153
12	Peta Lokasi Penelitian di wilayah TNRAW	155
13	Peta Lokasi pengambilan sampel di wilayah TNRAW	156
14	Peta Distribusi Spasial IKH Tahun 2019 di wilayah TNRAW	157
15	Peta Distribusi Spasial IKH Tahun 2020 di wilayah TNRAW	158
16	Peta Distribusi Spasial IKH Tahun 2021 di wilayah TNRAW	159
17	Peta Distribusi Spasial IKH Tahun 2022 di wilayah TNRAW	160
18	Peta Distribusi Spasial IKH Tahun 2023 di wilayah TNRAW	161
19	Peta Klasifikasi Spasial IKH Tahun 2019 di wilayah TNRAW	162
20	Peta Klasifikasi Spasial IKH Tahun 2020 di wilayah TNRAW	163
21	Peta Klasifikasi Spasial IKH Tahun 2021 di wilayah TNRAW	164
22	Peta Klasifikasi Spasial IKH Tahun 2022 di wilayah TNRAW	165
23	Peta Klasifikasi Spasial IKH Tahun 2023 di wilayah TNRAW	166
24	Peta performa hutan tahun 2019 - 2020	167
25	Peta performa hutan tahun 2020 - 2021	168
26	Peta performa hutan tahun 2021 - 2022	169
27	Peta performa hutan tahun 2022 - 2023	170



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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