

MODEL PENGELOLAAN EKOSISTEM GAMBUT BERBASIS TATA KELOLA AIR DAN EMISI KARBON (STUDI KASUS KESATUAN HIDROLOGIS GAMBUT PULAU RUPAT)

WALUYO YOGO UTOMO



**PROGRAM STUDI ILMU TANAH
FAKULTAS PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**

- 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 dengan judul “Model Pengelolaan Ekosistem Gambut Berbasis Tata Kelola Air dan Emisi Karbon (Studi Kasus Kesatuan Hidrologis Gambut Pulau Rupat)” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

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

Bogor, September 2026

Waluyo Yogo Utomo
A1601211007

- 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

WALUYO YOGO UTOMO. Model Pengelolaan Ekosistem Gambut Berbasis Tata Kelola Air dan Emisi Karbon (Studi Kasus Kesatuan Hidrologis Gambut Pulau Rupat). Dibimbing oleh BABA BARUS, SURIA DARMA TARIGAN, dan SYAIFUL ANWAR.

Lahan gambut Indonesia diperkirakan sekitar 13.4 hingga 26.6 juta ha (Anda *et al.* 2021; Joosten *et al.* 2009; Xu *et al.* 2018) dan menyimpan stok karbon sebesar 33.6 hingga 40.5 Gt C (Warren *et al.* 2017) dari sekitar 152 hingga 288 Gt C yang disimpan oleh gambut tropika global (Page *et al.* 2011a; Ribeiro *et al.* 2020). Penurunan Tinggi Muka Air Tanah (TMAT) sebagai pendorong utama proses negatif dari degradasi lahan gambut, sehingga restorasi hidrologi lahan gambut sangat penting dilakukan (Dohong *et al.* 2017; Urzainki *et al.* 2020). Pada kawasan tropis, dinamika TMAT masih menjadi faktor utama yang mengontrol variabilitas emisi CO₂ dari permukaan gambut dan keseimbangan neto ekosistem (Carlson *et al.* 2015; Ishikura *et al.* 2019; Evans *et al.* 2021). Selain oleh aktivitas manusia, gradien TMAT juga sangat dipengaruhi oleh anomali iklim tahunan seperti *El Niño* dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) (Dadap *et al.* 2022; Sulaiman *et al.* 2023).

Di antara berbagai komponen emisi Gas Rumah Kaca (GRK), emisi CO₂ yang berasal dari respirasi total tanah (Rs) dan respirasi heterotrof (Rh) menjadi indikator kunci dalam kajian gambut tropis (Prananto *et al.* 2020; Novita *et al.* 2021). Rs merepresentasikan total emisi CO₂ yang keluar dari permukaan gambut, tanpa memandang sumbernya. Dalam hal ini Rs merupakan gabungan dari Rh dan Ra (respirasi autotrofik yang bersumber dari akar hidup). Di sisi lain, Rh merupakan representasi emisi CO₂ akibat dekomposisi aerobik bahan gambut, sehingga Rh mencerminkan laju degradasi gambut (Deshmukh *et al.* 2023; Hirano *et al.* 2024, 2025). Saat ini, pendekatan pemodelan berbasis data (*data-driven modelling*) dengan algoritma *machine learning* (*machine learning*/ML) banyak diteliti pada berbagai bidang kebumihan, termasuk implementasinya pada studi-studi hidrologis berskala lokal hingga kontinen (Hou *et al.* 2025; Jesse *et al.* 2025; Martinsen *et al.* 2022; Refsgaard *et al.* 2022). Aplikasi model TMAT secara spesifik untuk prediksi TMAT telah dilakukan di wilayah gambut subtropis Eropa menggunakan algoritma ML *random forest* (RF) dan CatBoost- *gradient boosting decision tree* (GBDT) (Bechtold *et al.* 2014; Koch *et al.* 2023; Lendzioch *et al.* 2021). Sementara itu, implementasi algoritma ML untuk pemodelan TMAT pada gambut tropis dilaporkan oleh beberapa penelitian di Indonesia (Hikouei *et al.* 2023; Yonekura *et al.* 2025) dan Malaysia (Li *et al.* 2022) yang menggunakan *extreme gradient boosting* (XGBoost) dan jaringan syaraf tiruan (*artificial neural network*/ANN).

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengembangkan model prediksi TMAT pada gambut tropis KHG Pulau Rupat berbasis *Machine Learning* (ML); (2) mengembangkan Kurva Respon CO₂-TMAT dan mengestimasi emisi CO₂ berbasis respirasi tanah (Rs) dan respirasi heterotrofik (Rh) di lahan gambut; (3). memprediksi cadangan karbon, sekuestrasi dan emisi pada Hutan Tanaman Industri akasia; (4). memprediksi cadangan karbon, sekuestrasi dan emisi pada beberapa tipe penutupan lahan; (5). mengembangkan persamaan allometrik baru untuk prediksi cadangan karbon pada areal Hutan Tanaman Industri akasia secara lokal di

KHG Pulau Rupat; serta (6). mengembangkan model pengelolaan Ekosistem Gambut berbasis tata kelola air dan emisi CO₂ di lokasi penelitian.

Penelitian komprehensif ini mengkaji dinamika hidrologi, estimasi emisi CO₂ berbasis respirasi tanah (Rs) dan respirasi heterotrof (Rh), serta kuantifikasi cadangan karbon pada KHG Pulau Rupat menggunakan pendekatan *machine learning* (ML) dan penginderaan jauh demi mengatasi keterbatasan data lapangan yang kompleks. Pada aspek hidrologi, algoritma *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost) berhasil memprediksi TMAT dengan resolusi spasial 10 meter dan temporal dua mingguan (*biweekly*) berbasis data observasi periode 2019–2025 dengan akurasi validasi yang baik ($R^2 = 0,73$; RMSE = 8,29 cm). Hasil pemodelan distribusi spasial dan dinamika prediksi TMAT berdasarkan musim hujan dan kemarau antar tahun selama periode penelitian (2019–2025) menunjukkan bahwa rerata TMAT berskala KHG berada pada $-32,02 \pm 16,35$ cm. Rerata TMAT yang relatif dangkal (-10 hingga -30 cm) secara konsisten diprediksi di sekitar kubah bagian tengah dan area gambut yang tidak didrainase. Rerata TMAT yang lebih dalam secara konsisten diprediksi berada pada zona rawa belakang pantai (*coastal backswamps*) di sisi timur, selatan, dan barat sepanjang musim dan sepanjang tahun, dimana area tersebut dikelola dan didrainase untuk perkebunan, hutan tanaman dan pertanian. Sebaliknya, rerata TMAT yang lebih dangkal secara konsisten terlihat pada gambut di belakang sungai (*riverine backswamp*) bagian utara. Dinamika hidrologi ini menunjukkan kontras yang tajam antar tutupan lahan, dimana area perkebunan yang didrainase mengalami penurunan TMAT ekstrem hingga mencapai -55 cm selama musim kemarau, jauh lebih rendah dibandingkan dengan kondisi di hutan sekunder alami yang tidak didrainase. Kondisi penurunan air tanah yang drastis ini berimplikasi langsung terhadap peningkatan laju pelepasan karbon ke atmosfer.

Pengembangan kurva respon CO₂-TMAT melalui penerapan fungsi non-linier logistik/sigmoid Gompertz, merujuk pada metodologi Ishikura *et al.* (2019), Koch *et al.* (2023), dan Tiemeyer *et al.* (2020) menggunakan basis data emisi sungkup tertutup (*chamber*) di lahan gambut tropis Indonesia berbasis respirasi tanah (Rs) dan respirasi heterotrof (Rh). Pendekatan ini didasarkan asumsi bahwa emisi CO₂ dari kedua kompartemen tersebut akan menunjukkan pola mendatar (*flatten*) pada kondisi TMAT yang sangat dalam maupun pada kondisi tergenang dangkal. Tahap awal pengembangan kurva respon CO₂-TMAT melalui telaah pustaka sistematis terhadap dataset terdahulu yang dikompilasi oleh Novita *et al.* (2021) dan Prananto *et al.* (2020), dimana basis datanya diperbaharui dengan menambahkan laporan emisi dari studi lapangan untuk periode 2021–2026. Kriteria penyaringan artikel lebih selektif dan hanya menggunakan artikel yang telah melalui proses *peer-review* yang ketat dan terindeks *Scopus* dan/atau *Web of Science*. Selanjutnya, artikel yang tidak merepresentasikan lahan gambut (seperti tanah mineral bergambut), studi dengan periode pengukuran singkat (<5 bulan), penelitian emisi ex-situ (misalnya berbasis monolit dan inkubasi) serta penelitian yang dilakukan di luar Indonesia tidak dimasukkan kedalam basis data. Kurva respon CO₂-TMAT yang berhasil dikembangkan menunjukkan tingkat signifikansi yang sangat tinggi ($p < 0.001$) dengan total respirasi tanah (Rs) diestimasi mencapai $4,44 \pm 0,15$ Mt CO₂/tahun dan respirasi heterotrof (Rh) sebesar $3,55 \pm 0,11$ Mt CO₂/tahun. Kedua model kurva respon CO₂-TMAT mempertimbangkan dua kondisi pelandaian emisi (*emission plateaus*) pada kondisi ekstrim TMAT, yaitu



saat TMAT menurun (mendalam) dengan nilai emisi masing-masing untuk Rs dan Rh adalah 105.2 dan 86.2 Mg CO₂ ha⁻¹ tahun⁻¹, sedangkan saat TMAT tergenang (dangkal) memiliki nilai emisi sebesar 26.11 dan 22.80 Mg CO₂ ha⁻¹ tahun⁻¹ untuk Rs dan Rh. Penelitian ini berhasil mengidentifikasi kawasan gambut dangkal terdrainase di rawa belakang pantai sebagai *hotspot* emisi utama, serta mendeteksi tahun 2020 sebagai *hot moment* atau puncak emisi akibat adanya anomali iklim antar tahun.

Selanjutnya, pemetaan multisektoral menggunakan algoritma *Random Forest* yang dioptimasi dengan *Monte Carlo Cross Validation* (MCCV) dan data Sentinel- mengonfirmasi variasi nilai Total Carbon Stock (TCS) yang signifikan di berbagai tipe penggunaan lahan. Hutan alami mempertahankan cadangan karbon tertinggi (1241,60±117,07 Mg C/ha), diikuti oleh perkebunan karet (827,76 Mg C/ha), hutan tanaman industri akasia (810,97 ± 135,78 Mg C/ha), kelapa sawit (709,81±96,23 Mg C/ha), dan kawasan rawa (657,58±32,29 Mg C/ha). Secara vertikal, Karbon Organik Tanah (SOC) pada kedalaman atas 0–40 cm merupakan kontributor utama mutlak yang menyumbang sekitar 93,4% hingga 94,2% dari total cadangan karbon di seluruh wilayah studi. Khusus pada area budidaya Hutan Tanaman Industri (HTI) akasia, meskipun tegakan mampu tumbuh di bawah cekaman tanah masam dengan pH rata-rata 3,76 dan menghasilkan TCS mencapai 806,45±136,48 Mg C/ha, analisis statistik membuktikan bahwa umur tanaman akasia memiliki pengaruh negatif sebesar 24% terhadap stabilitas TCS (p-value<0,001). Temuan ini menjadi peringatan krusial bahwa tanpa adanya tata kelola air dan hidrologi yang ketat, potensi sekuestrasi jangka panjang pada konsesi budidaya ini akan terus tergerus akibat degradasi gambut yang berkelanjutan di masa depan.

Untuk meminimalkan ketidakpastian dalam perhitungan biomassa di atas permukaan tanah (*Aboveground Carbon/AGC*) pada HTI Akasia, penelitian ini menyempurnakan metode kuantifikasi melalui pengembangan persamaan alometrik baru berskala lokal untuk spesies *Acacia crassicarpa*. Pengujian terhadap beberapa model regresi menunjukkan bahwa persamaan polinomial berganda yang mengombinasikan parameter diameter batang (DBH) dan tinggi pohon menghasilkan performa estimasi terbaik dengan nilai akurasi tertinggi (R² = 0,96) dan tingkat kesalahan terkecil (RMSE=38,20 kg). Penggunaan alometrik lokal baru ini berhasil mengoreksi kelemahan alometrik regional terdahulu yang sering kali kurang akurat karena menggunakan kapasitas dataset terbatas dan mengabaikan cekaman lingkungan spesifik. Secara keseluruhan, integrasi pemodelan hidrologi *XGBoost*, kurva emisi non-linier Gompertz, algoritma spasial *Random Forest*, serta pembaruan rumus alometrik lokal ini menghasilkan dataset geospasial beresolusi tinggi yang sangat esensial. Rangkaian metodologi berbasis data ini direkomendasikan secara kuat sebagai opsi saintifik tingkat tinggi untuk mendukung program aksi nasional pengurangan emisi karbon di sektor pertanian dan kehutanan serta mewujudkan tata kelola ekosistem gambut tropis yang berkelanjutan di Indonesia.

Penelitian ini mengestimasi potensi manfaat mitigasi dari intervensi pengelolaan tata air, dengan melakukan simulasi skenario *rewetting* (peningkatan TMAT) beserta proyeksi spasial emisi CO₂ gambut. Prioritas pengelolaan TMAT difokuskan pada dua tipologi area berdasarkan hasil analisis TMAT, yakni (1) area yang memiliki rerata TMAT musiman dan tahunan yang relatif dalam secara konsisten; (2) area yang memiliki deviasi (didefinisikan sebagai SD) TMAT yang

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

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

besar. Penelitian ini mengelaskan nilai persentase kejadian TMAT yang lebih dangkal dari -40 cm menjadi 4 kelas status tata kelola air, yaitu buruk (<40%), sedang (40–60%), baik (60–80%), dan sangat baik (80–100%). Skema klasifikasi ini mengadaptasi kategorisasi penilaian dari Keputusan Menteri Lingkungan Hidup/Kepala Badan Pengendalian Lingkungan Hidup Nomor 1375 Tahun 2025 tentang Program Penilaian Peringkat Kinerja Perusahaan dalam Pengelolaan Lingkungan Hidup (Kepmen LH/BPLH, 2025). Terdapat 6 skenario peningkatan TMAT secara seragam, yakni sebesar +5, +10, +20, +30, +40, dan +50 cm. Selanjutnya, keenam raster hasil simulasi tersebut diintegrasikan dengan ambang minimum TMAT berdasarkan regulasi hidrologis gambut nasional yakni -40 cm. Hasil integrasi tersebut menghasilkan raster kebutuhan peningkatan minimum (*minimum required increment*) per piksel untuk mencapai kepatuhan TMAT ≥ -40 cm dengan pengkelasan mengikuti enam kelas skenario peningkatan TMAT.

Berdasarkan matriks prioritas intervensi tata air KHG Pulau Rupat disusun 8 kelas prioritas, mulai dari Prioritas 1A (prioritas intervensi tertinggi) hingga Prioritas 4B (prioritas terendah). Pada matriks ini, area dengan tingkat ketercapaian TMAT -40 cm yang rendah memperoleh prioritas restorasi lebih tinggi, sedangkan informasi ketidakpastian digunakan untuk membedakan tingkat urgensi dan pendekatan pengelolaan yang diperlukan pada setiap kelas. Selain itu, wilayah yang memiliki SD tinggi mendapatkan bobot intervensi yang lebih tinggi (sub-kelas A) dibandingkan dengan wilayah yang memiliki SD rendah (sub-kelas B).

Berdasarkan hasil pemetaan spasial diketahui bahwa status tata kelola air yang dikategorikan baik hingga sangat baik memiliki sebaran terpusat di wilayah gambut bagian tengah dan gambut pada wilayah rawa belakang sungai (*riverine backswamp*) di bagian utara. Pada zona tersebut persentase kejadian TMAT yang lebih dalam dari -40 cm terestimasi relatif rendah, sebaliknya status tata kelola air dengan klasifikasi sedang hingga buruk terkonsentrasi pada areal pinggiran gambut yang terasosiasi dengan wilayah rawa belakang pantai (*coastal backswamps*) di pesisir barat, barat daya, dan selatan. Pada wilayah ini, persentase kejadian TMAT yang lebih dalam dari -40 cm terestimasi relatif tinggi. Area Prioritas 4A (Sangat Baik + SD Tinggi) dan Prioritas 4B (Sangat Baik + SD Rendah) mendominasi bagian tengah KHG. Sebaliknya, kelas Prioritas 2B hingga 3B tersebar pada bagian tepi gambut, khususnya pada bagian barat yang terasosiasi dengan rawa belakang pantai. Secara kuantitatif, Prioritas 4A merupakan kelas yang paling dominan dengan luas mencapai 50.032 ha (43%), diikuti Prioritas 4B seluas 26.929 ha (23%), Prioritas 3B seluas 19.736 ha (17%), dan Prioritas 3A seluas 16.378 ha (14%). Berdasarkan pendekatan ini, sekitar 97% dari total area KHG Pulau Rupat berada pada kategori Baik hingga Sangat Baik, sedangkan area yang termasuk kategori Sederang dan Buruk hanya mencakup sekitar 4% dari keseluruhan wilayah. Kelas Prioritas 2B memiliki luas 4.270 ha (4%), sedangkan Prioritas 1B hanya 87 ha (<0,1%) dan Prioritas 2A hanya 3 ha (<0,01%). Tidak ditemukan area yang termasuk ke dalam kelas Prioritas 1A.

Simulasi pembasahan kembali (*rewetting*) dilakukan dengan menerapkan kenaikan TMAT secara bertahap sebesar +5 cm, +10 cm, +20 cm, +30 cm, +40 cm, dan +50 cm terhadap kondisi TMAT awal. Pada skenario kenaikan +5 cm dan +10 cm, nilai TMAT di sebagian besar areal penelitian masih berada pada rentang negatif (di bawah 0 cm), dengan nilai terendah terkonsentrasi di wilayah tengah kubah gambut. Pada skenario +20 cm menunjukkan nilai TMAT yang mendekati 0



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.

cm di sebagian besar area, sedangkan untuk skenario kenaikan +30 cm, nilai TMAT di wilayah tengah mendekati 0 hingga positif rendah, sementara wilayah tepi khususnya bagian utara, barat, dan selatan mulai menunjukkan nilai TMAT positif lebih tinggi. Pola ini berlanjut pada skenario +40 cm dan +50 cm, di mana proporsi area dengan nilai TMAT tertinggi, mendekati atau melebihi 45 cm, semakin meluas terutama di sepanjang tepi lanskap, sementara wilayah tengah kubah tetap menunjukkan nilai TMAT yang relatif lebih rendah dibandingkan wilayah tepi pada seluruh skenario kenaikan. Pada skenario respon emisi Rs, nilai emisi tertinggi (oranye tua hingga merah gelap, mendekati 55 unit) teramati pada skenario +5 cm dan +10 cm, dengan konsentrasi tertinggi di wilayah tengah kubah gambut. Pada skenario +20 cm, nilai emisi menurun ke rentang oranye-kuning (sekitar 35–45 unit). Penurunan nilai emisi berlanjut pada skenario +30 cm dan +40 cm, ditandai dengan dominasi warna hijau-kuning (sekitar 25–35 unit), hingga mencapai nilai terendah pada skenario +50 cm yang didominasi warna biru-hijau (sekitar 15–25 unit di wilayah tengah dan di bawah 10 unit di sebagian tepi utara dan selatan). Pada kedua parameter (Rs dan Rh), pola spasial yang konsisten teramati di seluruh skenario, yaitu nilai emisi di wilayah tepi lanskap secara umum lebih rendah dibandingkan wilayah tengah pada skenario kenaikan TMAT rendah (+5 cm hingga +20 cm), sementara pada skenario kenaikan TMAT tinggi (+30 cm hingga +50 cm) sebagian wilayah tepi utara dan selatan menunjukkan nilai emisi terendah dibandingkan wilayah lainnya.

Skenario terbaik dalam intervensi hidrologis Ekosistem Gambut pada lokasi penelitian adalah dengan menaikkan TMAT sebesar +5 cm dan 10 cm, dengan kategori Prioritas 1B (Buruk+SD rendah), Prioritas 2A (Sedang+SD Tinggi) dan Prioritas 2B (Sedang+SD rendah) dengan total luasan ± 4.360 Ha (3,71%). Temuan penelitian ini mengindikasikan bahwa kebutuhan restorasi hidrologi intensif bersifat lokal (*site-specific*). Sementara sebagian besar wilayah KHG lebih membutuhkan strategi pengelolaan adaptif berupa pemantauan dan pemeliharaan untuk menjaga keberlanjutan fungsi hidrologi gambut.

Kata kunci: gambut, karbon, emisi CO₂, respirasi tanah (Rs), respirasi heterotrof (Rh), *machine learning*, TMAT, sentinel-2, *rewetting*.

SUMMARY

WALUYO YOGO UTOMO. Peat Ecosystem Management Model Based on Carbon Emission and Water Governance (Case Study of the Rupert Island Peat Hydrological Unit). Supervised by BABA BARUS, SURIA DARMA TARIGAN, and SYAIFUL ANWAR.

Indonesia's peatlands are estimated to cover approximately 13.4 to 26.6 million ha (Anda *et al.* 2021; Joosten *et al.* 2009; Xu *et al.* 2018) and store carbon stocks of 13.6 to 40.5 Gt C (Warren *et al.* 2017) out of approximately 152 to 288 Gt C stored by global tropical peatlands (Page *et al.* 2011a; Ribeiro *et al.* 2020). Groundwater level decline (GST) is the main driver of the negative processes of peatland degradation, so peatland hydrological restoration is crucial (Dohong *et al.* 2017; Urzainki *et al.* 2020). In tropical regions, Water Table Depth (WTD) dynamics remain a major factor controlling the variability of CO₂ emissions from peat surfaces and the net ecosystem balance (Carlson *et al.* 2015; Ishikura *et al.* 2019; Evans *et al.* 2021). In addition to human activities, WTD gradients are also significantly influenced by annual climate anomalies such as El Niño and the Indian Ocean Dipole (IOD) (Dadap *et al.* 2022; Sulaiman *et al.* 2023).

Among the various components of Greenhouse Gas (GHG) emissions, CO₂ emissions from total soil respiration (Rs) and heterotrophic respiration (Rh) are key indicators in tropical peat studies (Prananto *et al.* 2020; Novita *et al.* 2021). Rs represents the total CO₂ emissions emitted from the peat surface, regardless of source. In this case, Rs is a combination of Rh and Ra (autotrophic respiration originating from living roots). On the other hand, Rh represents CO₂ emissions due to aerobic decomposition of peat material, thus reflecting the rate of peat degradation (Deshmukh *et al.* 2023; Hirano *et al.* 2024, 2025). Currently, data-driven modeling approaches using machine learning (ML) algorithms are widely researched in various geoscience fields, including their implementation in hydrological studies at local to continental scales (Hou *et al.* 2025; Jesse *et al.* 2025; Martinsen *et al.* 2022; Refsgaard *et al.* 2022). The WTD model has been specifically applied to TMAT prediction in subtropical European peatlands using the random forest (RF) and CatBoost-gradient boosting decision tree (GBDT) ML algorithms (Bechtold *et al.* 2014; Koch *et al.* 2023; Lendzioch *et al.* 2021). Meanwhile, the implementation of ML algorithms for WTD modeling in tropical peatland has been reported by several studies in Indonesia (Hikouei *et al.* 2023; Yonekura *et al.* 2025) and Malaysia (Li *et al.* 2022) using extreme gradient boosting (XGBoost) and artificial neural networks (ANN).

This study aims to: (1) develop a WTD prediction model on tropical peat of Rupert Island PHU based on *Machine Learning* (ML); (2) develop a CO₂-WTD response curve and estimate CO₂ emissions based on soil respiration (Rs) and heterotrophic respiration (Rh) in peatlands; (3). predict carbon stocks, sequestration and emissions in Acacia Industrial Plantation Forests; (4). predict carbon stocks, sequestration and emissions in several land cover types; (5). develop a new allometric equation for predicting carbon stocks in the Acacia Industrial Plantation Forest area locally in Rupert Island PHU; and (6). develop a Peat Ecosystem management model based on water management and CO₂ emissions at the research site.



This comprehensive study examines hydrological dynamics, CO₂ emission estimation based on soil respiration (Rs) and heterotrophic respiration (Rh), and carbon stock quantification in the Rupat Island PHU using machine learning (ML) and remote sensing approaches to overcome the limitations of complex field data. In the hydrological aspect, the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm successfully predicted WTD with a spatial resolution of 10 meters and biweekly temporal based on observation data for the 2019-2025 period with good validation accuracy ($R^2 = 0.73$; RMSE = 8.29 cm). The results of spatial distribution modeling and dynamics of WTD prediction based on the rainy and dry seasons between years during the study period (2019–2025) showed that the average WTD at the PHU scale was at -32.02 ± 16.35 cm. Relatively shallow WTD averages (-10 to -30 cm) are consistently predicted around the central dome and undrained peat areas. Consistently deeper WTD averages are predicted in the coastal backswamps on the eastern, southern, and western sides across seasons and throughout the year, where these areas are managed and drained for plantations, tree plantations, and agriculture. In contrast, shallower WTD averages are consistently observed in the northern riverine backswamp peat. These hydrological dynamics demonstrate a sharp contrast between land covers, with drained plantation areas experiencing extreme WTD declines of up to -55 cm during the dry season, significantly lower than those in undrained natural secondary forest. This drastic groundwater decline has direct implications for increasing the rate of carbon release to the atmosphere.

The development of the CO₂-WTD response curve through the application of the non-linear logistic/sigmoid Gompertz function, referring to the methodology of Ishikura *et al.* (2019), Koch *et al.* (2023), and Tiemeyer *et al.* (2020) using a closed chamber emission database in Indonesian tropical peatlands based on soil respiration (Rs) and heterotrophic respiration (Rh). This approach is based on the assumption that CO₂ emissions from both compartments will show a flattening pattern in very deep WTD conditions as well as in shallow flooded conditions. The initial stage of developing the CO₂-WTD response curve through a systematic literature review of previous datasets compiled by Novita *et al.* (2021) and Prananto *et al.* (2020), where the database was updated by adding emission reports from field studies for the period 2021–2026. The article screening criteria were more selective and only used articles that had gone through a rigorous peer-review process and were indexed by Scopus and/or Web of Science. Furthermore, articles that do not represent peatlands (such as peaty mineral soils), studies with short measurement periods (<5 months), ex-situ emission studies (e.g., monolith-based and incubation-based) and studies conducted outside Indonesia are not included in the database. The successfully developed CO₂-WTD response curve shows a very high level of significance ($p < 0.001$) with total soil respiration (Rs) estimated at 4.44 ± 0.15 Mt CO₂/year and heterotrophic respiration (Rh) at 3.55 ± 0.11 Mt CO₂/year. Both CO₂-WTD response curve models consider two emission plateaus under extreme WTD conditions, namely when WTD decreases (deepens) with emission values for Rs and Rh of 105.2 and 86.2 Mg CO₂ ha⁻¹ year⁻¹, respectively, while when WTD is flooded (shallows) has emission values of 26.11 and 22.80 Mg CO₂ ha⁻¹ year⁻¹ for Rs and Rh. This study successfully identified the drained shallow peat area in the backwater swamp as the main emission hotspot, and detected 2020 as a hot moment or peak emission due to interannual climate anomalies.

Furthermore, multisectoral mapping using the Random Forest algorithm optimized with Monte Carlo Cross Validation (MCCV) and Sentinel-2 data confirmed significant variations in Total Carbon Stock (TCS) values across land use types. Natural forests maintained the highest carbon stocks (1241.60 ± 117.07 Mg C/ha), followed by rubber plantations (827.76 Mg C/ha), acacia industrial plantations (810.97 ± 135.78 Mg C/ha), oil palm (709.81 ± 96.23 Mg C/ha), and swamp areas (657.58 ± 32.29 Mg C/ha). Vertically, Soil Organic Carbon (SOC) at the upper depth of 0–40 cm was the absolute main contributor accounting for approximately 93.4% to 94.2% of the total carbon stocks across the study area. Specifically in the acacia Industrial Plantation Forest (HTI) cultivation area, although the stands were able to grow under acid soil stress with an average pH of 3.76 and produced TCS reaching 806.45 ± 136.48 Mg C/ha, statistical analysis proved that the age of the acacia plants had a negative effect of 24% on TCS stability (p -value < 0.001). This finding is a crucial warning that without strict water and hydrological governance, the long-term sequestration potential in this cultivation concession will continue to be eroded due to ongoing peat degradation in the future.

To minimize uncertainty in the calculation of aboveground biomass (Aboveground Carbon/AGC) in Acacia plantations, this study refines the quantification method by developing a new local scale allometric equation for *Acacia crassicarpa*. Testing of several regression models shows that a multiple polynomial equation combining stem diameter (DBH) and tree height parameters produces the best estimation performance with the highest accuracy value ($R^2 = 0.96$) and the smallest error rate ($RMSE = 38.20$ kg). The use of this new local allometric successfully corrects the weaknesses of previous regional allometrics which are often inaccurate due to using limited dataset capacity and ignoring specific environmental stresses. Overall, the integration of XGBoost hydrological modeling, Gompertz nonlinear emission curves, the Random Forest spatial algorithm, and the updated local allometric formula produces a very essential high-resolution geospatial dataset. This data-driven methodology suite is strongly recommended as a high-level scientific option to support the national action program for reducing carbon emissions in the agriculture and forestry sectors and realizing sustainable tropical peat ecosystem management in Indonesia.

This study estimates the potential mitigation benefits of water management interventions by simulating rewetting scenarios (raising the WTD) and projecting spatial peat CO₂ emissions. Management priorities focused on two area typologies identified through WTD analysis: (1) areas with consistently deep average seasonal and annual WTD levels; and (2) areas exhibiting high WTD deviation (defined as standard deviation). The study classified the percentage of occurrences where WTD was shallower than -40 cm into four water management status categories: poor ($< 40\%$), moderate (40–60%), good (60–80%), and very good (80–100%). This classification scheme adapts the assessment categories from the Minister of Environment/Head of the Environmental Protection Agency Decree Number 1375 of 2025 regarding the Corporate Performance Rating Assessment Program for Environmental Management (Kepmen LH/BPLH, 2025). Six scenarios involving uniform WTD increases – specifically +5, +10, +20, +30, +40, and +50 cm – were modeled. Subsequently, the six resulting simulation rasters were integrated with the national regulatory minimum WTD threshold for peatlands (-40 cm). This



integration produced a raster representing the minimum required increment per pixel to achieve compliance with the WTD ≥ -40 cm standard, classified according to the six WTD increase scenarios.

Based on the water management intervention priority matrix for the PHU of Rupert Island, eight priority classes were established, ranging from Priority 1A (highest intervention priority) to Priority 4B (lowest priority). In this matrix, areas with low achievement levels regarding the -40 cm WTD target are assigned higher restoration priority, while uncertainty data is used to differentiate the urgency and required management approach for each class. Furthermore, areas with high subsidence rates (SD) are assigned a higher intervention weight (sub-class A) compared to areas with low subsidence rates (sub-class B).

Spatial mapping results indicate that water management status classified as "good" to "very good" is concentrated in the central peat areas and the riverine backswamp peat areas in the north. In these zones, the estimated percentage of occurrences where the WTD drops below -40 cm is relatively low; conversely, water management status classified as "moderate" to "poor" is concentrated in peat margin areas associated with coastal backswamps along the western, southwestern, and southern coasts. In these areas, the estimated percentage of occurrences where the groundwater level drops below -40 cm is relatively high. Priority 4A ("Very Good" + High SD) and Priority 4B ("Very Good" + Low SD) areas dominate the central part of the KHG. In contrast, Priority classes 2B through 3B are distributed along the peat margins, particularly in the west, where they are associated with coastal backswamps. Quantitatively, Priority 4A is the most dominant class, covering an area of 50,032 ha (43%), followed by Priority 4B at 26,929 ha (23%), Priority 3B at 19,736 ha (17%), and Priority 3A at 16,378 ha (14%). Based on this approach, approximately 97% of the total area of Rupert Island PHU falls into the Good to Very Good categories, whereas areas classified as Moderate and Poor account for only about 4% of the total territory. Priority Class 2B covers an area of 4,270 ha (4%), while Priority 1B covers only 87 ha (<0.1%) and Priority 2A only 3 ha (<0.01%). No areas were found to fall within Priority Class 1A.

Rewetting simulations were conducted by applying incremental increases in the WTD of +5 cm, +10 cm, +20 cm, +30 cm, +40 cm, and +50 cm relative to the initial condition. In the +5 cm and +10 cm scenarios, WTD values across most of the study area remained in the negative range (below 0 cm), with the lowest values concentrated in the central region of the peat dome. The +20 cm scenario showed WTD values approaching 0 cm across most of the area; meanwhile, in the +30 cm scenario, WTD values in the central region approached 0 cm or slightly positive levels, whereas the peripheral areas-particularly the northern, western, and southern sections-began to exhibit higher positive WTD values. This pattern persisted in the +40 cm and +50 cm scenarios, where the proportion of the area with the highest WTD values (approaching or exceeding 45 cm) expanded, especially along the landscape edges, while the central dome region consistently showed relatively lower WTD values compared to the periphery across all increase scenarios. Regarding the Rs emission response, the highest emission values (ranging from dark orange to dark red, approaching 55 units) were observed in the +5 cm and +10 cm scenarios, with the highest concentrations in the central peat dome region. In the +20 cm scenario, emission values dropped to the orange-yellow range (approximately 35–45 units). This decline continued in the +30 cm and +40 cm



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

scenarios, characterized by a dominance of green-yellow hues (approximately 25–35 units), ultimately reaching the lowest values in the +50 cm scenario, which was dominated by blue-green hues (approximately 15–25 units in the central region and below 10 units in parts of the northern and southern periphery). For both parameters (Rs and Rh), a consistent spatial pattern was observed across all scenarios: emission values in the landscape's peripheral areas were generally lower than in the central areas under low groundwater level rise scenarios (+5 cm to +20 cm), whereas under high groundwater level rise scenarios (+30 cm to +50 cm), parts of the northern and southern peripheral areas exhibited the lowest emission values compared to other regions.

The best scenario for hydrological intervention in the Peat Ecosystem at the research site is to increase the TMA_T by +5 cm and 10 cm, with Priority 1B (Poor + Low SD), Priority 2A (Moderate + High SD), and Priority 2B (Moderate + Low SD) categories with a total area of $\geq 4,360$ Ha (3.71%). The findings of this study indicate that the need for intensive hydrological restoration is local (site-specific). Meanwhile, most PHU areas require adaptive management strategies in the form of monitoring and maintenance to maintain the sustainability of peat hydrological functions.

Keywords: peat, carbon, CO₂ emission, soil respiration (Rs), heterotrof respiration (Rh), *machine learning*, WTD, sentinel-2, rewetting.



@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.

© Hak Cipta milik IPB, Tahun 2026

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 PENGELOLAAN EKOSISTEM GAMBUT BERBASIS TATA KELOLA AIR DAN EMISI KARBON (STUDI KASUS KESATUAN HIDROLOGIS GAMBUT PULAU RUPAT)

WALUYO YOGO UTOMO

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

**PROGRAM STUDI ILMU TANAH
FAKULTAS PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@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. Wahyu Iskandar, S.Hut, M.Agr
2. Dr. Ir. Omo Rusdiana, M.Sc, F.Trop

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

1. Prof. Dr. Haruni Krisnawati, S.Hut, M.Si
2. Dr. Ir. Omo Rusdiana, M.Sc., F.Trop

Judul Disertasi : Model Pengelolaan Ekosistem Gambut Berbasis Tata Kelola Air dan Emisi Karbon (Studi Kasus Kesatuan Hidrologis Gambut Pulau Rupert)

Nama : Waluyo Yogo Utomo

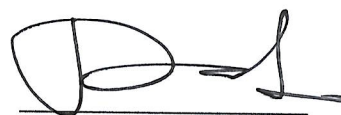
NIM : A1601211007

Disetujui oleh

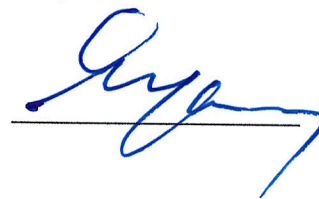
Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Baba Barus, M.Sc.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Suria Darma Tarigan, M.Sc.



Pembimbing 3:
Dr. Ir. Syaiful Anwar, M.Sc.

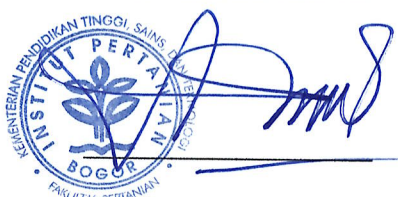


Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Arief Hartono, M.Sc. Agr
NIP. 19680628 199303 1002



Dekan Fakultas Pertanian
Prof. Dr Ir Suryo Wiyono, M.Sc.Agr
NIP. 196902121992031003




Tanggal Ujian:
10 Agustus 2026

Tanggal Lulus: 14 SEP 2026



@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 dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanaahu wa ta'ala atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak bulan September 2022 hingga Mei 2025 ini ialah teknik pendugaan potensi cadangan karbon dan emisi CO₂ berbasis respirasi total tanah (Rs) dan respirasi heterotrof (Rh) berdasarkan perubahan nilai Tinggi Muka Air Tanah (TMAT) di lahan gambut, dengan judul “Model Pengelolaan Ekosistem Gambut Berbasis Tata Kelola Air dan Emisi Karbon (Studi Kasus Kesatuan Hidrologis Gambut Pulau Rupat).”

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. Ir. Baba Barus, M.Sc., Prof. Dr. Ir. Suria Darma Tarigan, M.Sc., serta Dr. Ir. Syaiful Anwar, M.Sc. yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada penguji luar komisi pembimbing, Prof. Dr. Haruni Krisnawati, S.Hut, M.Si., Dr. Ir. Omo Rusdiana, M.Sc, F.Trop, serta Dr. Wahyu Iskandar, S.Hut, M.Agr. Di samping itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada PT. Riau Andalan Pulp and Paper dan PT. Sumatera Riang Lestari Blok IV Pulau Rupat yang telah banyak membantu dan memfasilitasi pelaksanaan penelitian ini baik dalam bentuk bantuan biaya studi maupun selama riset berlangsung, serta *Integrated Management of Peatland Landscapes in Indonesia* (IMPLI) Project 2021-2025 melalui IFAD GEF-6 yang telah membiayai sebagian dari penelitian dan publikasi. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada orang tua, istri, anak-anak serta seluruh keluarga yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya. Kepada seluruh personil dan keluarga besar Direktorat Perlindungan dan Pengelolaan Ekosistem Gambut, Deputy Bidang Tata Lingkungan dan Sumber Daya Alam Berkelanjutan, Kementerian Lingkungan Hidup/Badan Pengendalian Lingkungan Hidup; diucapkan terima kasih atas segala dukungan dan bantuannya.

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

Bogor, Agustus 2026

Waluyo Yogo Utomo



@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

DAFTAR ISI	xix
DAFTAR GAMBAR	xxv
DAFTAR TABEL	xxx
DAFTAR LAMPIRAN	xxxi
DAFTAR ISTILAH	xxxiii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	5
1.6 Kebaruan Penelitian	6
II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Biomassa dan Karbon Hutan	7
2.2 Pemanfaatan Model <i>Machine learning</i> Algorithms (MLA's) dalam Prediksi Biomassa dan Cadangan Karbon Hutan	8
2.3 Isu Lingkungan dan Pemanfaatan Lahan Gambut	10
2.4 Karakteristik Lahan Gambut	11
2.4.1 Definisi Tanah dan Lahan Gambut	11
2.4.2 Karakteristik Fisik Gambut	12
2.4.3 Karakteristik Kimia Gambut	13
2.4.4 Klasifikasi Lahan dan Bahan Gambut	14
2.4.5 Emisi dari Lahan Gambut	15
2.5 Aspek Hidrologi dalam Pengelolaan Lahan Gambut	16
2.6 Drainase Lahan Gambut	19
2.7 Pemanfaatan Lahan Gambut	21
2.8 Arahan dan Rekomendasi Kebijakan dalam Pengelolaan Lahan Gambut	21
2.9 Perbaikan Tata Kelola Air Ekosistem Gambut	21
2.10 Pemanfaatan Model <i>Machine learning</i> Algorithms (MLA's) dalam Prediksi Biomassa dan Cadangan Karbon Hutan	23
2.10.1 <i>Classification and Regression Tree</i> (CART)	24
2.10.2 <i>Cubist</i>	24
2.10.3 MARS	24
2.10.4 GLMNet	25
2.10.5 LM (linear model)	25
2.10.6 Evaluasi model dan penilaian akurasi	25
III PREDIKSI TINGGI MUKA AIR TANAH PADA GAMBUT TROPIS RUPAT BERBASIS <i>MACHINE LEARNING</i>	27
3.1 Abstrak	27
3.2 Pendahuluan	27
3.3 Metode Penelitian	30
3.3.1 Deskripsi Lokasi Studi	30
3.3.2 Akuisisi Data dan Pra-pemrosesan	30

3.3.3	Pengembangan, Evaluasi, dan Interpretasi Model Prediksi TMAT	35
3.4	Hasil	38
3.4.1	Gambaran Umum Dataset TMAT dan Prediktornya	38
3.4.2	Hubungan antara TMAT dan Prediktornya	40
3.4.3	Hasil Prediksi TMAT Model ML XGBoost	43
3.4.4	Evaluasi Model ML XGBoost dalam Memprediksi TMAT	48
3.4.5	Perbandingan Model ML XGBoost dengan Model Prediksi Lainnya	48
3.4.6	Penjelasan Model ML XGBoost TMAT	49
3.5	Pembahasan	54
3.5.1	Pengembangan Model Prediksi TMAT Berbasis ML di Lahan Gambut Tropika	54
3.5.2	Pengaruh Faktor Dinamis dan Statis terhadap Variabilitas Spasial Musiman dan Tahunan dari Prediksi TMAT	56
3.5.3	Perbandingan TMAT Antar Tipe Penutupan Lahan dengan Studi Terdahulu	58
3.5.4	Implikasi Pemodelan TMAT untuk Manajemen Lahan Gambut Tropika	59
3.5.5	Keterbatasan Studi dan Evaluasi untuk Pengembangan Prediksi TMAT Kedepannya	60
3.6	Simpulan	61
IV	ESTIMASI EMISI CO ₂ BERBASIS RESPIRASI TANAH DAN HETEROTROFIK DAN KURVA RESPON CO ₂ -TMAT PADA LAHAN GAMBUT TROPIS KHG PULAU RUPAT	63
4.1	Abstrak	63
4.2	Pendahuluan	63
4.3	Metode Penelitian	67
4.3.1	Lokasi Studi	67
4.3.2	Analisis Bibliometrik untuk Pemetaan Lanskap dan Tren Riset Emisi CO ₂ pada Lahan Gambut Tropis	67
4.3.3	Pembaharuan Basis Data Emisi CO ₂ dan TMAT	69
4.3.4	Pengembangan Kurva Respon CO ₂ -TMAT	69
4.3.5	Simulasi Sensitivitas Respon Emisi CO ₂ terhadap Perubahan TMAT	70
4.3.6	Upscaling Kurva Respon CO ₂ -TMAT dan Perbandingannya dengan Penelitian Sebelumnya	70
4.4	Hasil	70
4.4.1	Tren Penelitian Emisi pada Lahan Gambut Tropis berdasarkan hasil analisis bibliometrik	70
4.4.2	Deskripsi Hasil Pembaharuan Basis Data Emisi dan TMAT Indonesia	75
4.4.3	Pengembangan Fungsi Respon CO ₂ -TMAT	79
4.4.4	Dinamika dan Distribusi Spasio-Temporal Emisi CO ₂ Rs dan Rh Hasil Estimasi	80
4.4.5	Simulasi Respon Rs dan Rh terhadap Perubahan TMAT 10-cm	83
4.4.6	Perbandingan dengan Kurva dan Faktor Emisi Lainnya	84

4.4.7	Perbandingan Hasil <i>Upscaling</i> Penelitian Ini dengan Kurva dan Faktor Emisi Lainnya	87
4.5	Pembahasan	88
4.5.1	Lanskap, Tren, dan Studi Emisi CO ₂ pada Lahan Gambut Tropis	88
4.5.2	Pembaharuan Basis Data Emisi CO ₂ dan TMAP Indonesia	90
4.5.3	Pengembangan Kurva Respon CO ₂ -TMAP	91
4.5.4	Estimasi Emisi CO ₂ Rs dan Rh di Lahan Gambut Tropis	91
4.5.5	Perbandingan dengan Faktor Emisi (EF) Saat Ini dan Implikasinya bagi Kalkulasi EF Masa Depan	92
4.5.6	Batasan Studi	93
4.6	Simpulan	94
V	PREDIKSI KARBON STOK, SEKUESTRASI, DAN EMISI DI HUTAN TANAMAN INDUSTRI AKASIA	95
5.1	Abstrak	95
5.2	Pendahuluan	95
5.3	Metode Penelitian	97
5.3.1	Deskripsi Lokasi Studi	97
5.3.2	Metode Pengumpulan Data	97
5.3.2.1	Pengumpulan Data Karbon Vegetasi	97
5.3.2.2	Pengumpulan Data Karbon Tanah	98
5.3.2.3	Pengumpulan Data Satelit	99
5.3.3	Desain Penelitian	99
5.3.4	Analisis Stok Karbon	99
5.3.4.1	Analisis Stok Karbon di Atas Vegetasi	99
5.3.4.2	Analisis Stok Karbon Organik Tanah	100
5.3.4.3	Analisis Total Stok Karbon	100
5.3.5	Estimasi Stok Karbon	100
5.4	Hasil	101
5.4.1	Karakteristik dan Kondisi Lokasi	101
5.4.2	Kondisi Lahan Gambut dan Sifat Fisikokimia Tanah	102
5.4.3	Stok Karbon Vegetasi Akasia	103
5.4.4	Cadangan Karbon Tanah Gambut	104
5.4.5	Korelasi Vegetasi dan Karbon Tanah	104
5.4.6	Total Stok Karbon dan Potensi Penyerapan Karbon	105
5.4.7	Estimasi Stok Karbon	106
5.4.7.1	Stok Karbon yang Diprediksi	106
5.4.7.2	Kinerja dan Kesalahan <i>Machine Learning</i>	106
5.4.7.3	Spasial Stok Karbon	107
5.5	Pembahasan	108
5.5.1	Stok Karbon Vegetasi	108
5.5.2	Stok Karbon Tanah	109
5.5.3	Hubungan Karbon pada Vegetasi dan Tanah	110
5.5.4	Potensi Cadangan Karbon dan Penyerapan Karbon	111
5.5.5	Estimasi Stok Karbon	112
5.5.5.1	Estimasi Stok Karbon di Area Akasia	112
5.5.5.2	Keterbatasan Pendekatan Kuantifikasi dan Rekomendasi untuk Perbaikan Metodologi	113



5.5.6	Rekomendasi Praktik untuk Pengelolaan Lahan Gambut yang Berkelanjutan	114
5.6	Simpulan	115
VI	PREDIKSI KARBON STOK, SEKUESTRASI, DAN EMISI DI BEBERAPA PENUTUPAN LAHAN	117
6.1	Abstrak	117
6.2	Pendahuluan	117
6.3	Metode Penelitian	119
6.3.1	Lokasi Penelitian	119
6.3.2	Pengumpulan Data dan Proses Data	120
6.3.2.1	Pengumpulan Data Karbon di Lokasi	120
6.3.2.1.1	Data Karbon Vegetasi	120
6.3.2.1.2	Data Karbon Tanah	120
6.3.2.2	Data Penginderaan Jauh	120
6.3.2.3	Proses Data	120
6.3.3	Analisis Stok Karbon	121
6.3.3.1	Analisis Stok Karbon Vegetasi	121
6.3.3.2	Analisis Stok Karbon Organik Tanah	122
6.3.3.3	Analisis Total Stok Karbon	122
6.3.4	Analisis Indeks Satelit	123
6.3.5	Analisis Prediksi Stok Karbon	123
6.3.6	Analisis Prediksi Sekuestrasi dan Emisi Karbon	124
6.3.7	Evaluasi Eror	124
6.3.8	Evaluasi Ketidakpastian	124
6.4	Hasil	125
6.4.1	Karakteristik dan Kondisi Ekosistem Gambut	125
6.4.2	Karakteristik dan Kondisi Biofisik Penggunaan Lahan	126
6.4.3	Stok Karbon Plot Lapang	126
6.4.3.1	Stok Karbon Tanah	126
6.4.3.2	Stok Karbon Vegetasi	127
6.4.3.3	Stok Karbon Akar	128
6.4.3.4	Total Stok karbon	128
6.4.4	Prediksi Spasial Stok Karbon	128
6.4.4.1	Karakteristik Spasial Variabel Prediksi Stok Karbon	128
6.4.4.2	Perbandingan Kemampuan Prediksi Stok Karbon	129
6.4.4.3	Evaluasi Variabel Prediksi Stok Karbon	130
6.4.4.4	Evaluasi Kemampuan Prediksi Stok Karbon	131
6.4.4.5	Spasial Hasil Modeling Stok Karbon	131
6.4.4.6	Spasial Hasil Modeling Stok Karbon	133
6.5	Pembahasan	134
6.5.1	Ekosistem Gambut dan Pemanfaatannya	134
6.5.2	Cadangan Karbon di Ekosistem Gambut	135
6.5.3	Prediksi Cadangan Karbon Menggunakan <i>Machine learning</i>	135
6.5.3.1	Kinerja Model <i>Machine learning</i>	135
6.5.3.2	Evaluasi Ketidakpastian Prediksi <i>Machine learning</i>	137
6.5.4	Keterbatasan Prediksi <i>Machine learning</i> dan Rekomendasi Pengembangan Metodologi	137

6.5.4.1	Evaluasi Metodologi, Keterbatasan, dan Rekomendasi untuk Dataset Cadangan Karbon serta Model Prediksi <i>Machine learning</i>	137
6.5.4.2	Evaluasi Metodologi, Keterbatasan, dan Rekomendasi untuk Data Satelit serta Prediksi Spasial	138
6.5.4.3	Evaluasi Metodologi, Keterbatasan, dan Rekomendasi untuk Optimasi <i>Machine Learning</i>	138
6.5.5	Potensi Total Cadangan Karbon, Penyerapan Karbon, dan Emisi Karbon	139
6.5.6	Rekomendasi Pengelolaan Lahan Gambut Berkelanjutan Berdasarkan Bukti Ilmiah	140
6.6	Simpulan	141
VII	PENGEMBANGAN PERSAMAAN ALOMETRIK BARU UNTUK PREDIKSI STOK KARBON DI AREAL HUTAN TANAMAN INDUSTRI AKASIA SECARA LOKAL DI PULAU RUPAT	143
7.1	Abstrak	143
7.2	Pendahuluan	143
7.3	Metode Penelitian	144
7.3.1	Sumber Data	144
7.3.2	Teknik Pengumpulan Data dan Preparasi Data	144
7.3.3	Pembuatan Model Alometrik	145
7.3.4	Evaluasi Model Alometrik	145
7.3.5	Pemodelan Stok Karbon Berbasis <i>Machine Learning</i>	145
7.3.6	Uji Performa Model <i>Machine Learning</i>	146
7.4	Hasil dan Pembahasan	146
7.4.1	Hasil Penelitian	146
7.4.1.1	Kondisi Data Kayu <i>Acacia</i>	146
7.4.1.2	Pengembangan Rumus Allometrik Biomassa Akasia	147
7.4.1.2.1	Rumus Allometrik Menggunakan Diameter Batang Akasia	147
7.4.1.2.2	Rumus Allometrik Menggunakan Tinggi Pohon Akasia	149
7.4.1.2.3	Rumus Allometrik Menggunakan DBH dan Tinggi Pohon Akasia	150
7.4.1.3	Evaluasi Rumus Alometrik Biomassa Akasia	150
7.4.1.4	Modeling Stok Karbon Berbasis <i>Machine Learning</i>	151
7.4.1.4.1	Hasil Modeling Stok Karbon	151
7.4.1.4.2	Variable Importance dari Hasil Modeling	152
7.4.1.4.3	Evaluasi Error	154
7.4.2	Pembahasan	155
7.4.2.1	Model Alometrik	155
7.4.2.2	Modeling Berbasis <i>Machine Learning</i>	156
7.4.2.3	Limitasi Modeling Berbasis <i>Machine Learning</i>	157
7.6.2.4	Rekomendasi Teknis Improvisasi Model <i>Machine Learning</i> dan Pengembangan Alometrik	158
7.5	Simpulan	159
VIII	PENGELOLAAN EKOSISTEM GAMBUT BERBASIS TATA KELOLA AIR DAN EMISI CO ₂ KHG PULAU RUPAT	161
8.1	Abstrak	161

8.2	Pendahuluan	161
8.3	Metode Penelitian	163
8.3.1	Lokasi Studi	163
8.3.2	Identifikasi Area Prioritas Umum Pengelolaan TMAT dan Intervensi Hidrologis Lahan Gambut di Lokasi Kajian	163
8.3.3	Simulasi Skenario <i>Rewetting</i> dan Proyeksi Emisi CO ₂ Gambut	166
8.4	Hasil	167
8.4.1	Dinamika Emisi dan TMAT secara Umum pada KHG Pulau Rupat	167
8.4.2	Ekspektasi Ketercapaian Level TMAT berdasarkan Regulasi Nasional	167
8.4.3	Distribusi Variabilitas TMAT Hasil Prediksi	169
8.4.4	Identifikasi Area Prioritas Intervensi Tata Air di Ekosistem Gambut KHG Pulau Rupat	171
8.4.5	Simulasi Respon Emisi terhadap Berbagai Skenario Kenaikan TMAT	173
8.4.6	Skenario Minimum <i>Rewetting</i> Tahunan dan Potensi Reduksi Emisi CO ₂ berdasarkan Simulasi Pembasahan Kembali	179
8.5	Pembahasan	180
8.5.1	Keterkaitan Dinamika Curah Hujan, TMAT, dan Emisi CO ₂ pada Skala KHG	180
8.5.2	Identifikasi Area Prioritas Umum Pengelolaan TMAT dan Skenario Intervensi Hidrologis Lahan Gambut	182
8.5.3	Status Tata Kelola Air Berbasis Skenario Intervensi Hidrologis	182
8.6	Simpulan	183
IX	PEMBAHASAN UMUM	185
9.1	Prediksi TMAT pada Gambut Tropis KHG Pulau Rupat Berbasis MLA's	188
9.2	Estimasi Emisi CO ₂ Berbasis Respirasi Tanah dan Heterotrofik Berdasarkan Kurva Respon CO ₂ -TMAT pada Lahan Gambut Tropis KHG Pulau Rupat	189
9.3	Prediksi Karbon Stok, Sekuestrasi, dan Emisi pada Hutan Tanaman Industri Akasia	191
9.4	Prediksi Karbon Stok, Sekuestrasi, dan Emisi pada Beberapa Penutupan Lahan	193
9.5	Pengembangan Persamaan Allometrik Baru untuk Prediksi Stok Karbon pada areal Hutan Tanaman Industri Akasia secara Lokal di Pulau Rupat	195
9.6	Pengelolaan Ekosistem Gambut Berbasis Tata Kelola Air dan Emisi CO ₂ pada KHG Pulau Rupat	196
X	SIMPULAN DAN SARAN	199
	DAFTAR PUSTAKA	202
	LAMPIRAN	248
	RIWAYAT HIDUP	283

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 GAMBAR

1.1	Bagan alir penelitian	6
2.1	Modifikasi tata kelola air ekosistem gambut, kanal dan blok/kompartemen lahan dibangun dengan mengikuti pola garis kontur	22
2.2	Modifikasi tata kelola air ekosistem gambut berdasarkan pola garis kontur (zonasi pengelolaan air)	23
2.3	Modifikasi tata kelola air ekosistem gambut berdasarkan pola garis kontur (zonasi pengelolaan air)	23
3.1	Lokasi penelitian KHG Pulau Rupat, Provinsi Riau. Data cakupan lahan gambut Indonesia dan global diperoleh dari Anda <i>et al.</i> (2021) dan Xu <i>et al.</i> (2018).	30
3.2	Ilustrasi proses resampling menggunakan <i>cubic convolution</i> dengan proses <i>sequential halving</i>	32
3.3	Ilustrasi proses pengisian cekungan (sinks dan pits; a dan b) serta metode perhitungan arah aliran menggunakan metode D-8 (c) dan D-Inf (d)	34
3.4	Histogram frekuensi yang menggambarkan distribusi TMAT pada (a) keseluruhan data dan (b) dataset pelatihan dan validasi	38
3.5	Boxplot menggambarkan distribusi prediktor pada kelas TMAT setiap 10 cm	40
3.6	Hubungan antara TMAT dan keseluruhan prediktor melalui (a) analisis univariat korelasi Spearman (tanpa prediktor <i>dummy</i>) dan (b) analisis multivariat regresi linier berganda	41
3.7	Hubungan antara nilai TMAT lapangan dengan curah hujan (a) dua minggu saat ini dan anteseden kumulatif (b) 1 bulan dan (c) 1.5 bulan yang berasal dari dataset CHIRPS. Data didapatkan dari pengelompokan (<i>binning</i>) data curah hujan kedalam kelas TMAT setiap 5 cm.	42
3.8	Hubungan antara nilai TMAT lapangan dengan simpanan air parsial ($S = P - ET$) (a) dua minggu saat ini dan anteseden kumulatif (b) 1 bulan dan (c) 1.5 bulan yang berasal dari dataset CHIRPS dan MOD16A2.061. Data didapatkan dari pengelompokan (<i>binning</i>) data S kedalam kelas TMAT setiap 5 cm.	43
3.9	Hubungan antara nilai TMAT lapangan dengan kelembaban tanah (SM) (a) dua minggu saat ini dan anteseden rerata (b) 1 bulan dan (c) 1.5 bulan yang berasal dari dataset Sentinel-1. Data didapatkan dari pengelompokan (<i>binning</i>) data SM kedalam kelas TMAT setiap 5 cm	43
3.10	Dinamika temporal TMAT yang diprediksi dibandingkan dengan yang diamati (diklasifikasikan sebagai dataset pelatihan dan validasi) pada beberapa titik pemantauan terpilih	45
3.11	Variasi spasial-temporal dari prediksi TMAT yang mewakili dua periode dua minggu (periode dua minggu pertama bulan Maret 2020 dan periode dua minggu kedua bulan Juli 2023). Profil TMAT diekstraksi dari transek yang mencakup area perkebunan (transek A-B), hutan tanaman (transek C-D), dan hutan non drainase (transek E-F).	47
3.12	Distribusi spasial dan dinamika hasil prediksi TMAT yang dirata-ratakan berdasarkan musim dan tahun selama periode penelitian	48

3.13	Metrik akurasi kalibrasi dan validasi pada model XGBoost	48
3.14	Metrik akurasi kalibrasi dan validasi pada model prediksi lainnya	49
3.15	Plot <i>beeswarm</i> (kiri) dan diagram batang tingkat kepentingan (kanan) yang merepresentasikan distribusi nilai SHAP dari prediktor serta tingkat kepentingan setiap prediktor yang dihitung berdasarkan rerata nilai SHAP	50
3.16	Peran faktor pengendali (<i>driving factors</i>) yang bersifat umum (kiri) dan khusus (kanan) hasil pengelompokan tingkat kepentingan individual prediktor dalam prediksi TMAT model XGBoost	50
3.17	Force-plot menggambarkan kontribusi 15 prediktor terkuat terhadap prediksi TMAT individual oleh model XGBoost	51
3.18	Force-plot menggambarkan kontribusi faktor pengendali umum terhadap prediksi TMAT individual oleh model XGBoost	52
3.19	Force-plot menggambarkan kontribusi faktor pengendali khusus terhadap prediksi TMAT individual oleh model XGBoost	52
3.20	Plot dependensi pada prediktor dinamis merepresentasikan hubungan nilai prediktor terhadap prediksi TMAT. Gradien warna menggambarkan interaksi dengan prediktor lain yang nilai SHAPnya berkorelasi sangat kuat	53
3.21	Plot dependensi pada prediktor statik merepresentasikan hubungan nilai prediktor terhadap prediksi TMAT. Gradien warna menggambarkan interaksi dengan prediktor elevasi permukaan gambut	54
4.1	Peta lokasi kajian emisi KHG Pulau Rupat	67
4.2	Tren publikasi riset emisi CO ₂ pada lahan gambut tropis pada dokumen <i>Scopus</i> melalui (a) jumlah artikel tahunan, (b) jumlah artikel per negara penulis, (c) jumlah artikel per institusi, dan (d) kolaborasi per-negara	71
4.3	Visualisasi (a) jejaring ko-okurensi kata kunci dan (b) tren tahunannya pada riset emisi CO ₂ pada lahan gambut tropis	72
4.4	Tren tahunan 40 kata kunci terkuat dalam riset emisi CO ₂ pada lahan gambut tropis	73
4.5	Peta tematik strategis pada dua periode riset emisi CO ₂ pada lahan gambut tropis (a) periode awal 1997-2010 dan (b) periode lanjutan 2011-2026	74
4.6	Analisis <i>life cycle</i> pada tema riset emisi CO ₂ di lahan gambut tropis menggunakan fungsi logistik kumulatif: (a) dinamika publikasi tahunan dan estimasi tahun puncak dan (b) kurva pertumbuhan kumulatif dan estimasi kapasitas jenuh publikasi	75
4.7	Sebaran spasial titik observasi emisi hasil pembaharuan basis data kurva respon CO ₂ -TMAT di Indonesia. Areal gambut berwarna hijau menggunakan sebaran gambut PEATGRIDS (Widyastuti <i>et al.</i> 2024, 2025).	75
4.8	Distribusi jumlah artikel dan data observasi secara umum dan berdasarkan pulau tempat gambut diteliti dan dilaporkan emisinya	76
4.9	Distribusi jumlah artikel dan data observasi berdasarkan kombinasi pulau dan provinsi tempat gambut diteliti dan dilaporkan emisinya	76

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.

4.10	(a) Boksplot disertai <i>jitter</i> dan (b) histogram frekuensi yang merepresentasikan sebaran nilai emisi CO ₂ dari artikel terpilih hasil pembaharuan basis data kurva respon CO ₂ -TMAT di Indonesia	77
4.11	(a) Boksplot disertai <i>jitter</i> dan (b) histogram frekuensi yang merepresentasikan sebaran nilai TMAT dari artikel terpilih hasil pembaharuan basis data kurva respon CO ₂ -TMAT di Indonesia	77
4.12	Boksplot disertai <i>jitter</i> yang merepresentasikan sebaran nilai emisi CO ₂ artikel terpilih hasil pembaharuan yang dibagi berdasarkan lima kelas penggunaan lahan utama	79
4.13	Kurva respon CO ₂ -TMAT umum hasil pembaharuan basis data emisi untuk (a) Rs dan (b) Rh yang dikembangkan menggunakan fungsi logistik Gompertz 3PL. Interval kepercayaan menggunakan metode <i>residual bootstrapping</i> . Titik observasi terpilih dikelompokkan berdasarkan lima penggunaan lahan utama.	80
4.14	Potongan melintang hasil ekstraksi transek topohidrosekuen sebagai representasi variasi spasial dan temporal estimasi Rs dan Rh terpilih area perkebunan (transek A-B, kiri), hutan tanaman (transek C-D, tengah), dan hutan non-drainase (transek E-F, kanan)	82
4.15	Emisi CO ₂ Rh (Mg CO ₂ ha ⁻¹ tahun ⁻¹) dikelompokkan berdasarkan musim dan total tahunan di KHG Pulau Rupert	83
4.16	Emisi CO ₂ Rh (Mg CO ₂ ha ⁻¹ tahun ⁻¹) dikelompokkan berdasarkan musim dan total tahunan di KHG Pulau Rupert	83
4.17	Sensitivitas emisi terhadap perubahan TMAT yang diwakili oleh persentase perubahan emisi CO ₂ relatif pada (a) Rs dan (b) Rh hasil berdasarkan skenario kenaikan dan penurunan TMAT setiap 10 cm. Warna keabuan menunjukkan perubahan emisi yang tidak signifikan (<i>ns</i> ; <i>P</i> > 0.05)	84
4.18	Perbandingan kurva antara kurva Rs dan Rh hasil kajian ini dengan kurva-kurva hasil penelitian lainnya yang telah dilaporkan sebelumnya.	85
4.19	Dinamika emisi CO ₂ tahunan (a dan b) dan emisi kumulatif (c dan d) hasil estimasi kurva respon CO ₂ -TMAT yang merepresentasikan Rs (a dan c) dan Rh (b dan d) hasil penelitian ini dan penelitian sebelumnya	88
4.20	Perbandingan emisi Rs (a, b) dan (a) tahunan rata-rata (Mg CO ₂ /ha/tahun) dan (b) emisi tahunan kumulatif (Mt CO ₂ /tahun) yang diprediksi dari kurva respon penelitian ini dibandingkan hasil penelitian sebelumnya	88
5.1	Lokasi penelitian di ekosistem gambut Pulau Rupert	98
5.2	Diagram alir penilaian dan estimasi stok karbon	99
5.3	Karakteristik vegetasi di area perkebunan hutan akasia	102
5.4	Sifat fisikokimia tanah	103
5.5	AGC pada beberapa usia <i>Acacia</i>	103
5.6	Karakteristik SOC berdasarkan gradien umur perkebunan akasia	104
5.7	Hubung <i>regresi linier</i> karbon vegetasi dan karbon tanah	105
5.8	TCS dan CSP pada gambut	105
5.9	Stok karbon yang diprediksi dari beberapa model pembelajaran	106



@Hak Cipta Dinamika IPB University

IPB University

5.10	<i>Variable importance</i> pada random forest <i>machine learning</i> untuk prediksi AGC, SOC, dan TCS	107
5.11	Pengujian kesalahan pada beberapa model <i>machine learning</i>	108
5.12	Perbandingan model RF untuk distribusi spasial stok karbon	108
5.13	Spasial stok karbon yang diprediksi dari beberapa model <i>machine learning</i>	109
6.1	Lokasi penelitian ekosistem lahan gambut di Pulau Rupert	119
6.2	Proses data pemodelan total stok karbon di ekosistem lahan gambut	121
6.3	Indikator stok karbon pada berbagai penggunaan lahan	127
6.4	Hubungan karbon stok tanah gambut dengan kedalaman gambut di beberapa tipe penggunaan lahan	127
6.5	Persentase cadangan karbon pada berbagai penggunaan lahan	128
6.6	Distribusi nilai variabel <i>importance</i> berdasarkan RMSE	130
6.7	Evaluasi model prediksi menggunakan data validasi	131
6.8	Prediksi akumulasi cadangan karbon oleh model Random Forest (RF) pada berbagai penggunaan lahan	132
6.9	Prediksi spasial cadangan karbon	133
6.10	Evaluasi prediksi TCS berdasarkan hubungan antara TCS hasil prediksi dan TCS (SOC+AGC+BGC)	134
7.1	Frekuensi data DBH dan tinggi pohon <i>Acacia</i>	147
7.2	Frekuensi data berat kering dan berat basah <i>Acacia</i>	148
7.3	Persamaan allometrik biomass <i>Acacia</i> menggunakan diameter batang <i>Acacia</i>	148
7.4	Persamaan allometrik biomass <i>Acacia</i> menggunakan tinggi pohon akasia	149
7.5	Evaluasi model alometrik berbasis regresi sederhana model Polinomial dengan model alometrik sebelum	151
7.6	Evaluasi model alometrik berbasis regresi berganda model Power dengan model alometrik sebelum	151
7.7	Dinamika hasil modeling <i>machine learning</i>	152
7.8	<i>Variable importance</i> dari modeling stok karbon	153
7.9	Pengaruh variabel terhadap nilai stok karbon pada alometrik baru	154
7.10	Uji error menggunakan data validasi (30%) pada modeling stok karbon	155
8.1	Dinamika temporal dua mingguan dari emisi (a) kumulatif dan (b) rerata, serta rerata (c) TMAT dan (d) curah hujan pada keseluruhan KKG Pulau Rupert. Emisi Rh dan Rs masing-masing diwakili oleh garis merah dan biru	168
8.2	Probabilitas ketercapaian level TMAT yang lebih dalam dari -40 cm divisualisasikan melalui ekspektasi tahunan ketercapaian TMAT > -40 cm berbasis data raster (a) dua mingguan dan (b) agregat tahunan, serta persentase kejadian TMAT > -40 cm selama periode penelitian berbasis data raster (c) dua mingguan dan (d) agregat tahunan	169
8.3	(a) Persentase kejadian TMAT yang lebih dangkal dari -40 cm dan (b) klasifikasi status tata kelola air	169
8.4	Variabilitas TMAT (SD) hasil pengkelasan K-means dan prediksi algoritma CART berbasis data raster agregat (a) musiman dan (b)	

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

tahunan, (c) kesesuaian antara model musiman dan tahunan serta (d) status konsensus antara kedua model tersebut	170
8.5 Matriks prioritas intervensi tata air KHG Pulau Rupert	171
8.6 Distribusi spasial kelas prioritas intervensi KHG Pulau Rupert	172
8.7 Distribusi luasan kelas prioritas intervensi KHG Pulau Rupert	172
8.8 Distribusi luasan penggunaan lahan utama dalam kelas prioritas intervensi KHG Pulau Rupert. Satu kotak pada gambar mewakili luasan 100 ha	173
8.9 Visualisasi TMAP hasil simulasi <i>rewetting</i> pada areal penelitian KHG Pulau Rupert	174
8.10 Visualisasi emisi Rs hasil simulasi pembasahan kembali (<i>rewetting</i>) pada areal penelitian KHG Pulau Rupert	175
8.11 Visualisasi emisi Rh hasil simulasi pembasahan kembali (<i>rewetting</i>) pada areal penelitian KHG Pulau Rupert tahun 2025	176
8.12 Visualisasi reduksi emisi Rs hasil simulasi berbagai skenario pembasahan kembali (<i>rewetting</i>) pada areal penelitian KHG Pulau Rupert tahun 2025. Nilai negatif menunjukkan reduksi emisi.	177
8.13 Visualisasi reduksi emisi Rh hasil simulasi berbagai skenario pembasahan kembali (<i>rewetting</i>) pada areal penelitian KHG Pulau Rupert tahun 2025. Nilai negatif menunjukkan reduksi emisi.	178
8.14 Total potensial reduksi emisi (Rs dan Rh) hasil simulasi berbagai skenario pembasahan kembali (<i>rewetting</i>) pada areal penelitian KHG Pulau Rupert tahun 2025	179
8.15 Perubahan Emisi CO ₂ pada Setiap Skenario Kenaikan atau Penurunan TMAP tiap 10 cm (Berdasarkan Fungsi Logistic Gompertz)	179
8.16 Skenario minimum <i>rewetting</i> tahunan 2019 hingga 2025	180
8.17 Luasan area berdasarkan skenario minimum <i>rewetting</i> tahunan 2019 hingga 2025	180

DAFTAR TABEL

3.1	Nilai <i>hyperparameter</i> terpilih (hasil pelatihan) dari model ML XGBoost dan model pembandingan lainnya	36
3.2	Statistik deskriptif data TMAT dan prediktornya	38
3.3	Rerata TMAT (rerata $\pm$ bootstrap-SD) hasil prediksi model XGBoost yang dikelompokkan berdasarkan beberapa faktor utama	44
4.1	Deskripsi komposisi klaster pada riset emisi CO ₂ pada lahan gambut tropis	72
4.2	Deskripsi statistik keseluruhan rerata emisi CO ₂ dan TMAT dari artikel terpilih hasil pembaharuan	78
4.3	Estimasi emisi CO ₂ (Rs dan Rh) dan TMAT (rerata $\pm$ standar deviasi) di KHG Pulau Rupat, dikelaskan berdasarkan beberapa faktor	80
4.4	Besarnya CO ₂ Rs dan Rh kumulatif tahunan yang diemisikan oleh KHG Pulau Rupat, dikelaskan berdasarkan beberapa faktor	81
4.5	Deskripsi statistik nilai emisi CO ₂ Rs dan Rh hasil evaluasi prediksi kurva respon CO ₂ -TMAT penelitian ini dan perbandingannya dengan kurva emisi penelitian sebelumnya	86
5.1	Indeks pada pita MSI Sentinel-2	101
5.2	Gambaran statistik karakteristik vegetasi dan tanah	102
6.1	Persamaan alometrik berbagai spesies	121
6.2	Daftar indeks berbasis Sentinel-2 MSI	123
6.3	Statistik parameter lahan gambut dan karakteristik biofisik	125
6.4	Statistik kinerja model Random Forest (RF) berdasarkan nilai R ² , RMSE (Mg C/ha), dan MAE (Mg C/ha) untuk pemodelan cadangan karbon (CS)	129
6.5	Distribusi nilai hasil prediksi AGC, SOC, dan TCS menggunakan dua model	130
7.1	Persamaan allometrik yang digunakan	145
7.2	Statistik deskripsi dari karakteristik data <i>Acacia crassicaarpa</i>	147
7.3	Perbandingan kemampuan model regresi linear dan non-linear berbasis data DBH	149
7.4	Perbandingan kemampuan model regresi linear dan non-linear berbasis data tinggi pohon	150
7.5	Perbandingan kemampuan model regresi linear berganda dan non-linear berganda dengan menggunakan data diameter batang (DBH) dan tinggi total pohon akasia (TT)	150
7.6	Model terbaik dalam modeling stok karbon pada alometrik baru	152
7.7	Ringkasan statistik dari evaluasi eror model	155
9.1	Estimasi emisi CO ₂ (Rs Tahunan dan Kumulatif Rs Tahunan) dan TMAT (rerata $\pm$ standar deviasi) di KHG Pulau Rupat, dikelaskan berdasarkan beberapa faktor	186
9.2	Estimasi emisi CO ₂ (Rh Tahunan dan Kumulatif Rh Tahunan) dan TMAT (rerata $\pm$ standar deviasi) di KHG Pulau Rupat, dikelaskan berdasarkan beberapa faktor	187

DAFTAR LAMPIRAN

1	Perubahan penggunaan lahan pada KHG Pulau Rupat selama masa penelitian	248
2	Peubah respon dan determinan untuk model TMAT	249
3	Curah hujan bulanan di KHG Pulau Rupat selama periode penelitian	250
4	Ketidakpastian prediksi TMAT (atas: SD; bawah: SE)	251
5	Kueri pencarian dokumen <i>Scopus</i> yang digunakan sebagai input analisis bibliometri	252
6	Hasil analisis co-authorships data perkembangan riset emisi CO ₂ pada lahan gambut tropis pada dokumen <i>Scopus</i>	252
7	Referensi terpilih yang telah melalui tinjauan sistematis, mewakili riset emisi berbasis sungkup tertutup (<i>closed chamber</i>) di lahan gambut tropis Indonesia	253
8	Deskripsi statistik keseluruhan rerata emisi CO ₂ dan TMAT dari artikel terpilih hasil pemutakhiran yang dibagi berdasarkan lima (5) kelas penggunaan lahan utama	256
9	Ketidakpastian prediksi Rs (atas: SD; bawah: SE)	257
10	Ketidakpastian prediksi Rh (atas: SD; bawah: SE)	258
11	Detil persentase, selang kepercayaan dan signifikansi hasil uji sensitivitas emisi CO ₂ Rs terhadap 10-cm perubahan TMAT berbasis metode Delta	259
12	Detil persentase, selang kepercayaan dan signifikansi hasil uji sensitivitas emisi CO ₂ Rh terhadap 10-cm perubahan TMAT berbasis metode Delta	261
13	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi AGC akasia menggunakan algoritma RF model rf	263
14	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi AGC akasia menggunakan algoritma RF model ranger	264
15	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi AGC akasia menggunakan algoritma RF model rborist	266
16	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi SOC akasia menggunakan algoritma RF model rf	267
17	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi SOC akasia menggunakan algoritma RF model ranger	268
18	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi SOC akasia menggunakan algoritma RF model rborist	270
19	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi TCS akasia menggunakan algoritma RF model rf	271
20	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi TCS akasia menggunakan algoritma RF model ranger	272
21	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi TCS akasia menggunakan algoritma RF model rborist	274
22	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi AGC menggunakan algoritma RF model rf	275
23	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi AGC menggunakan algoritma RF model ranger	276
24	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi SOC menggunakan algoritma RF model rf	278

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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



25	Hasil <i>hyperparameter</i> tuning pada model training untuk prediksi SOC menggunakan algoritma RF model ranger	279
26	Alometrik biomassa dan <i>wood density</i> dari beberapa spesies pada tutupan lahan di area studi	281

@Hak cipta milik IPB University

DAFTAR ISTILAH

1. AGB : *Aboveground Biomass*
2. AGC : *Aboveground Carbon*
3. ANN : *Artificial Neural Network*
4. ARIMA : *Autoregressive Integrated Moving Average*
5. BAPPENAS : *Badan Perencanaan Pembangunan Nasional*
6. BAU : *Business As Usual*
7. BBSDL P : *Balai Besar Sumber Daya Lahan Pertanian*
8. BP : *Before Period*
9. BD : *Bulk Density*
10. BGC : *Below Ground Carbon*
11. CART : *Classification and Regression Tree*
12. CEP : *Carbon Emission Potential*
13. CH₄ : *Methane*
14. CHIRPS : *Climate Hazards group Infrared Precipitation with Stations*
15. CO₂ : *Karbon Dioksida*
16. COP : *Conference of the Parties*
17. CPU : *Central Processing Unit*
18. CSP : *Carbon Sequestration Potential*
19. DBH : *Diameter-at-Breast Height (Diameter setinggi dada)*
20. DEM : *Digital Elevation Model*
21. ENDC : *Enhanced Nationally Determined Contribution*
22. ESA : *European Space Agency*
23. ET : *Evapotranspirasi*
24. FREL : *Forest Reference Emission Level*
25. GBDT : *CatBoost- gradient boosting decision tree*
26. GBM : *Gradient Boosting Machine*
27. GEE : *Google Earth Engine*
28. GEF : *Global Environmental Facility*
29. GLMNet : *Generalized Linear Model*
30. GPI : *Global Peatlands Initiative*
31. GPU : *Graphical Processing Unit*
32. GRK : *Gas Rumah Kaca*
33. GSTAR : *Generalized Space-Time Autoregressive*
34. GWL : *Ground Water Level*
35. HFC : *Hydrofluorocarbon*
36. HTI : *Hutan Tanaman Industri*
37. INCAS : *Indonesian National Carbon Accounting System*
38. IOD : *Indian Ocean Dipole*
39. ITCZ : *Inter-Tropical Convergence Zone*
40. IW : *Interferometric Wide*
41. KHG : *Kesatuan Hidrologis Gambut*
42. LAI : *Leaf Area Index*
43. LCA : *Life Cycle Analysis*
44. LiDAR : *Light Detection and Ranging*
45. LM : *Linear Model*



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

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

IPB University

Perpustakaan IPB University

46.	LoI	: <i>Loss on Ignition</i>
47.	LTSLCCR	: <i>Long Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience</i>
48.	MAD	: <i>Mean Absolute Deviation</i>
49.	MAE	: <i>Mean Absolute Error</i>
50.	MAPE	: <i>Mean Absolute Percentage Error</i>
51.	MARS	: <i>Algoritma Multivariate Adaptive Regression Splines</i>
52.	MCCV	: <i>Monte Carlo Cross Validation</i>
53.	MCP	: <i>Multiple Country Publication</i>
54.	Mg C/ha	: <i>Mega gram Carbon per Hektar, Ton Carbon per Hektar</i>
55.	MLA's	: <i>Machine Learning Algorithm's</i>
56.	MODFLOW	: <i>U.S. Geological Survey modular finite-difference flow model</i>
57.	MSI	: <i>MultiSpectral Instrument</i>
58.	NEE	: <i>Nett Ecosystem Exchange</i>
59.	NO	: <i>Nitrouse Oxide</i>
60.	NZE	: <i>Nett Zero Emission</i>
61.	OLS	: <i>Ordinary Least Squares</i>
62.	OPTRAM	: <i>Optical Trapezoid Model</i>
63.	PFC	: <i>Perfluorocarbon</i>
64.	PHU	: <i>Peat Hydrological Unit</i>
65.	QRF	: <i>Quantile Random Forest</i>
66.	R ²	: <i>R-squared</i>
67.	Ra	: <i>Respirasi akar</i>
68.	RE	: <i>Respirasi Ekosistem</i>
69.	REDD	: <i>Reducing Emission from Deforestation and Forest Degradation</i>
70.	RF	: <i>Random Forest</i>
71.	RI	: <i>Ruggedness Index</i>
72.	Rh	: <i>Respirasi Heterotrof</i>
73.	Rs	: <i>Respirasi Tanah Total</i>
74.	RMSE	: <i>Root Mean Square Error</i>
75.	SAAS	: <i>Search-Appraisal-Analysis-Synthesis</i>
76.	SCP	: <i>Single Country Publication</i>
77.	SD	: <i>Standard Deviation</i>
78.	SENDC	: <i>Second Enhanced Nationally Determined Contribution</i>
79.	SF	: <i>Sulfurehexa-fluoride</i>
80.	SHAP	: <i>SHapley Additive exPlanation</i>
81.	SLR	: <i>Systematic Literature Review</i>
82.	SIMATAG	: <i>Sistem Informasi Muka Air Tanah Gambut</i>
83.	SIMGRO	: <i>SIMulation of GROundwater flow and surface water levels</i>
84.	SM	: <i>Soil Moisture</i>
85.	SOC	: <i>Soil Organic Carbon</i>
86.	SVM	: <i>Support Vector Machines</i>
87.	SVR	: <i>Support Vector Regression</i>
88.	TCS	: <i>Total Carbon Stock</i>
89.	TMAT	: <i>Tinggi Muka Air Tanah</i>



- 90. TRI : *Terrain Roughness Index*
- 91. TWI : *Topographic Wetness Index*
- 92. UNFCCC : *United Nations Framework Convention on Climate Change*
- 93. XGBoost : *Extreme Gradient Boosting*
- 94. WTD : *Water Table Depth*

- 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.