

STUDI PENGARUH GENANGAN AIR PADA MORFOFISIOLOGI, PERTUMBUHAN, DAN PRODUKSI TANAMAN KELAPA SAWIT SERTA DETEKSINYA MELALUI ANALISIS SPEKTRAL

YAN SUKMAWAN



**PROGRAM STUDI AGRONOMI DAN HORTIKULTURA
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.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA*

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi berjudul “Studi Pengaruh Genangan Air pada Morfofisiologi, Pertumbuhan, dan Produksi Tanaman Kelapa Sawit serta Deteksinya melalui Analisis Spektal” 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, September 2026

Yan Sukmawan
NIM A2602222019

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

YAN SUKMAWAN. Studi Pengaruh Genangan Air pada Morfofisiologi, Pertumbuhan, dan Produksi Tanaman Kelapa Sawit serta Deteksinya melalui Analisis Spektral. Dibimbing oleh AHMAD JUNAEDI, HARIYADI, SUPIJATNO, dan LILIK BUDI PRASETYO.

Tanaman kelapa sawit sering kali menghadapi cekaman abiotik yang berkaitan dengan ketersediaan air, baik defisit maupun kelebihan air. Perubahan iklim meningkatkan risiko cekaman air melalui perubahan pola curah hujan dan meningkatnya kejadian hujan ekstrem yang pada areal rendahan dengan drainase buruk berpotensi menyebabkan banjir dan genangan air. Cekaman genangan air menginduksi kondisi hipoksia pada zona perakaran yang mengganggu respirasi akar, penyerapan hara, dan keseimbangan air tanaman, yang pada akhirnya menekan pertumbuhan dan produktivitas kelapa sawit. Orientasi penelitian terdahulu masih didominasi oleh evaluasi pengaruh genangan air pada fase bibit muda dan pada skala rumah kaca atau pot percobaan serta dengan durasi yang relatif pendek. Fokus tersebut menyisakan kesenjangan dan keterbatasan informasi mengenai pengaruh genangan air jangka panjang, deteksi cekaman genangan air melalui analisis spektral, dan pengembangan model kerentanan berbasis spasial-temporal. Tiga seri percobaan telah dilakukan di Kebun Percobaan Cikabayan, Institut Pertanian Bogor mulai dari Juli 2024 sampai dengan Agustus 2025 untuk menginvestigasi pengaruh genangan air pada tanaman kelapa sawit.

Percobaan pertama bertujuan untuk mempelajari pengaruh cekaman genangan air jangka panjang pada morfofisiologi, anatomi, dan alokasi biomassa tanaman kelapa sawit. Cekaman genangan parah (tinggi muka air 0 cm) secara terus-menerus terbukti menekan performa morfofisiologis dengan penurunan tinggi tanaman (21,7%), jumlah daun (12,1%), diameter batang (15,6%), panjang anak daun (16,7%), laju fotosintesis (74,8%), laju transpirasi (56,21%), konduktansi stomata (64,1%), dan indeks kehijauan daun (14,1%). Tanaman mengembangkan mekanisme adaptasi anatomis berupa peningkatan perkembangan aerenkima di jaringan akar hingga 17,43% pada zona akar bawah, serta pembentukan pneumatofor yang dilengkapi lentisel sebagai jalur aerasi internal pada kondisi cekaman kritis. Genangan air juga menurunkan bobot brangkasan kering sebesar 36,1%, dengan korelasi positif yang kuat antara bobot brangkasan kering dan laju fotosintesis ($r = 0,76$). Analisis komponen utama (PCA) memperjelas pola diferensiasi respons, di mana genangan parah membentuk klaster dengan ciri adaptasi anatomi yang kuat namun fisiologi tertekan, genangan sedang menempati posisi transisional, sementara genangan dengan tinggi muka air lebih dalam dan kontrol (TMA -43 cm) mengelompok dengan karakter morfologi dan fisiologi yang lebih baik.

Percobaan kedua bertujuan untuk mendeteksi cekaman genangan air pada tanaman kelapa sawit melalui pendekatan integratif yang menggabungkan pengukuran reflektansi spektral dengan indikator fisiologis dan biokimia. Hasil analisis pola *spectral signature* menunjukkan bahwa peningkatan level genangan menyebabkan perubahan reflektansi yang jelas pada beberapa wilayah spektral. Pada wilayah cahaya tampak, terutama pita biru dan merah, reflektansi cenderung

meningkat seiring meningkatnya level genangan yang mengindikasikan penurunan absorpsi cahaya oleh pigmen fotosintetik akibat degradasi klorofil. Pada wilayah *red edge*, kemiringan kurva menjadi lebih landai yang menunjukkan melemahnya transisi antara absorpsi merah dan reflektansi NIR akibat penurunan klorofil dan gangguan fisiologis daun. Sementara itu, reflektansi pada wilayah NIR mengalami penurunan yang nyata pada perlakuan genangan berat yang mengindikasikan adanya perubahan struktur internal daun dan kondisi jaringan mesofil. Temuan ini didukung oleh analisis korelasi pasangan pita spektral antara kondisi kontrol dan tergenang penuh yang menunjukkan bahwa wilayah NIR memiliki korelasi positif yang relatif homogen, sedangkan zona transisi *red edge* memperlihatkan perubahan pola korelasi yang lebih kontras sehingga menjadi wilayah spektral yang paling responsif terhadap perubahan fisiologis tanaman akibat genangan. Dari pengujian sensitivitas indeks vegetasi, ditemukan bahwa TCARI, AR11, dan $R800 \times R550 / R680$ secara konsisten mampu membedakan tingkat keparahan genangan, dengan korelasi yang kuat terhadap karakter fisiologis (laju fotosintesis dan laju transpirasi) dan biokimia (kandungan MDA dan aktivitas CAT), melampaui keterbatasan indeks konvensional seperti NDVI.

Percobaan ketiga bertujuan untuk mengestimasi kelembapan tanah, kadar air daun, dan kehijauan daun menggunakan data multispektral berbasis pesawat udara nirawak dan pembelajaran mesin serta mengklasifikasikan kerentanan tanaman kelapa sawit terhadap kelembapan tanah berlebih. Analisis temporal menunjukkan variabilitas kelembapan tanah dan kadar air daun yang berkaitan erat dengan dinamika curah hujan, sementara kehijauan daun relatif konstan, yang mengindikasikan bahwa kandungan klorofil tidak responsif terhadap fluktuasi curah hujan dalam jangka pendek. Estimasi variabel biofisik menggunakan algoritma pembelajaran mesin menunjukkan bahwa PLSR memiliki performa paling stabil untuk estimasi kelembapan tanah dan kadar air daun (R^2 tertinggi 0,613 dan 0,492 pada April 2025), sementara Random Forest unggul dalam estimasi kehijauan daun ($R^2 = 0,827$ pada Januari 2025). Kehijauan daun berkorelasi positif kuat dengan indeks berbasis *red edge* seperti NDRE, LCI, dan $CI_{red-edge}$, memperkuat keunggulan spektral *red edge* dalam mendeteksi perubahan kandungan klorofil, kondisi fisiologis tanaman, dan struktur internal daun.

Integrasi antara pengamatan morfofisiologi, respons spektral, dan pendekatan spasial berbasis penginderaan jauh menunjukkan bahwa pengaruh genangan air pada kelapa sawit perlu dipahami sebagai respons yang saling terhubung dari tingkat tanaman hingga lanskap kebun. Perubahan fisiologis dan biokimia akibat genangan yang tercermin melalui perubahan karakteristik spektral berpotensi digunakan sebagai nondestruktif untuk memantau respons tanaman terhadap cekaman genangan. Hasil penelitian ini menunjukkan pentingnya pengembangan pendekatan interdisipliner yang menghubungkan pengetahuan agronomi, fisiologi tanaman, penginderaan jauh, dan pembelajaran mesin untuk mendukung pengembangan sistem monitoring kondisi tanaman serta pemetaan kerentanan terhadap kelembapan tanah berlebih di perkebunan kelapa sawit.

Kata kunci: adaptasi cekaman genangan air, hipoksia, indeks vegetasi, pembelajaran mesin, reflektansi spektral



SUMMARY

YAN SUKMAWAN. Study on the Effects of Waterlogging on the Morphophysiology, Growth, and Yield of Oil Palm, with Detection through Spectral Analysis. Supervised by AHMAD JUNAEDI, HARIYADI, SUPIJATNO, and LILIK BUDI PRASETYO.

Oil palm frequently experiences abiotic stresses related to water availability, including both water deficit and water excess. Climate change is expected to increase the risk of water-related stress through altered precipitation patterns and more frequent extreme precipitation events, particularly in low-lying areas with poor drainage, thereby increasing the likelihood of flooding and waterlogging. Waterlogging induces hypoxic conditions in the root zone, disrupting root respiration, nutrient uptake, and plant water balance, ultimately suppressing oil palm growth and productivity. Previous studies have primarily focused on evaluating the effects of waterlogging on young seedlings under greenhouse or pot conditions over relatively short experimental durations. This focus has left gaps and limited information regarding the effects of long-term waterlogging, the detection of waterlogging stress using spectral analysis, and the development of spatiotemporal susceptibility models. Three experimental series were conducted at the Cikabayan Teaching Farm, IPB University, from July 2024 to August 2025 to investigate the effects of waterlogging on oil palm.

The first experiment investigated the effects of long-term waterlogging stress on the morphophysiology, anatomy, and biomass allocation of oil palm. Continuous severe waterlogging stress (0 cm water table) suppressed morphophysiological performance, reducing plant height (21.7%), leaf number (12.1%), stem diameter (15.6%), leaflet length (16.7%), photosynthesis rate (74.8%), transpiration rate (56.2%), stomatal conductance (64.1%), and leaf greenness index (14.1%). Oil palm developed anatomical adaptations, characterized by increased aerenchyma development up to 17.43% in the lower root zone and the formation of pneumatophores with lenticels as internal aeration pathways under critical stress conditions. Waterlogging also reduced total dry weight by 36.1%, with a strong positive correlation between total dry weight and photosynthesis rate ($r = 0.76$). Principal component analysis (PCA) further differentiated treatment responses, with severe waterlogging forming a distinct cluster characterized by pronounced anatomical adaptation but impaired physiological performance. Moderate waterlogging occupied a transitional position, whereas treatments with a deeper water table and the control clustered together, exhibiting superior morphological and physiological characteristics.

The second experiment aims to detect waterlogging stress in oil palm using an integrative approach that combines spectral reflectance measurements with physiological and biochemical indicators. Spectral signature analysis revealed distinct changes in canopy reflectance across several spectral regions with increasing waterlogging level, indicating reduced light absorption by photosynthetic pigments due to chlorophyll degradation. In the red edge region, the spectral slope is becoming progressively flatter, reflecting a weaker transition between red absorption and NIR reflectance due to reduced chlorophyll levels and physiological disturbances. Meanwhile, NIR reflectance decreased markedly

under severe waterlogging, indicating alterations in the internal structure of leaves and mesophyll tissue. These findings were further supported by spectral band-pair correlation analysis between the control and fully waterlogged conditions. The NIR region showed consistently high positive correlations, whereas the red edge transition zone showed a more contrasting correlation pattern than other regions. This pattern indicates that the red edge region is the spectral portion most responsive to plant physiological alterations induced by waterlogging. Sensitivity analysis of vegetation indices demonstrated that TCARI, ARI1, and $R800 \times R550 / R680$ consistently discriminated waterlogging severity and exhibited strong correlations with physiological traits (photosynthesis and transpiration rate) and biochemical traits (MDA content and CAT activity), outperforming conventional indices such as NDVI.

The third experiment aimed to estimate soil moisture, leaf water content, and leaf greenness using UAV-based multispectral imagery and machine learning algorithms, and to classify oil palm susceptibility to excess soil moisture. Temporal analysis showed that soil moisture and leaf water content varied closely with precipitation dynamics, whereas leaf greenness remained relatively constant, indicating that chlorophyll content was less responsive to short-term precipitation fluctuations. Among the evaluated machine-learning algorithms, partial least squares regression provided the most stable performance for estimating soil moisture and leaf water content (highest R^2 of 0.613 and 0.492, respectively, in April 2025), whereas Random Forest achieved the highest accuracy for estimating leaf greenness ($R^2 = 0.827$ in January 2025). Leaf greenness was strongly positively correlated with red edge-based indices such as NDRE, LCI, and $CI_{red-edge}$, confirming the superior sensitivity of red edge spectral region for detecting changes in chlorophyll content, plant physiological status, and leaf internal structure.

The integration of morphophysiological observations, spectral responses, and remote-sensing-based spatial approaches indicates that the effects of waterlogging on oil palm should be understood as interconnected responses spanning from the individual plant to the plantation landscape scale. Physiological and biochemical changes induced by waterlogging were reflected in alterations of spectral characteristics, enabling rapid, large-scale, and nondestructive monitoring of plant condition. The findings of this study highlight the importance of developing an interdisciplinary approach that integrates agronomy, plant physiology, remote sensing, and machine learning to support the development of plant condition monitoring systems and the spatial assessment of excess soil moisture susceptibility in oil palm plantations.

Keywords: hypoxia, machine learning, spectral reflectance, vegetation indices, waterlogging stress adaptation



© 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.

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.

STUDI PENGARUH GENANGAN AIR PADA MORFOFISIOLOGI, PERTUMBUHAN, DAN PRODUKSI TANAMAN KELAPA SAWIT SERTA DETEKSINYA MELALUI ANALISIS SPEKTRAL

YAN SUKMAWAN

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Agronomi dan Hortikultura

**PROGRAM STUDI AGRONOMI DAN HORTIKULTURA
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 Prof. Dr. Ir. Didy Sopandie, M.Agr.
- 2 Dr. Idung Risdiyanto, S.Si., M.Sc.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Ir. Didy Sopandie, M.Agr.
- 2 Dr. Dulbari, S.P., M.Si.

Judul Disertasi : Studi Pengaruh Genangan Air pada Morfofisiologi,
Pertumbuhan, dan Produksi Tanaman Kelapa Sawit serta
Deteksinya Melalui Analisis Spektral
Nama : Yan Sukmawan
NIM : A2602222019

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Dr. Ir. Ahmad Junaedi, M.Si.

Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Hariyadi, M.S.

Pembimbing 3:
Dr. Ir. Supijatno, M.Si.

Pembimbing 4:
Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Herdhata Agusta, M.S.
NIP 19590813 198303 1 003

Dekan Fakultas Pertanian:
Prof. Dr. Ir. Suryo Wiyono, M.Sc.Agr.
NIP 19690212 199203 1 003

Tanggal Ujian: 6 Juli 2026

Tanggal Lulus: 10 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

Alhamdulillah, puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa taala yang telah memberikan taufik dan anugerah-Nya sehingga disertasi yang berjudul “Studi Pengaruh Genangan Air pada Morfofisiologi, Pertumbuhan, dan Produksi Tanaman Kelapa Sawit serta Deteksinya Melalui Analisis Spektral” ini dapat diselesaikan.

Penulis menghaturkan terima kasih dan penghargaan tinggi kepada:

1. Dr. Ir. Ahmad Junaedi, M.Si. selaku Ketua Komisi Pembimbing, Prof. Dr. Ir. Hariyadi, M.S., Dr. Ir. Supijatno, M.Si., dan Prof. Dr. Ir. Lilik Budi Prasetyo, M.Sc. selaku Anggota Komisi Pembimbing yang telah memberikan arahan dan membimbing penulis dalam penelitian dan penyusunan disertasi ini.
2. Direktur Politeknik Negeri Lampung dan Ketua Jurusan Budidaya Tanaman Perkebunan yang telah memberikan izin untuk melanjutkan pendidikan doktoral.
3. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Riset, dan Teknologi serta Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dan Balai Pembiayaan Pendidikan Tinggi (BPPT) atas dukungan finansial melalui Beasiswa Pendidikan Indonesia skema Dosen Pendidikan Tinggi Vokasi (PTV) S3, serta hibah penelitian melalui skema Penelitian Disertasi Doktor (PDD) atas nama Dr. Ir. Ahmad Junaedi, M.Si.
4. Prof. Dr. Ir. Sudradjat, M.S. dan Prof. Dr. Ir. Didy Sopandie, M.Agr. selaku Penguji Luar Komisi pada Ujian Kualifikasi Lisan yang telah memberikan saran dan koreksi sebelum penelitian dilaksanakan.
5. Prof. Dr. Ir. Didy Sopandie, M.Agr. dan Dr. Idung Risdiyanto, S.Si., M.Sc. selaku Penguji Luar Komisi pada Ujian Tertutup yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyusunan disertasi. Terima kasih juga penulis sampaikan kepada Prof. Dr. Ir. Didy Sopandie, M.Agr. dan Dr. Dulbari, S.P., M.Si. atas kesediaan menjadi penguji luar komisi pada sidang promosi doktor.
6. Prof. Dr. Ir. Herdhata Agusta, M.S. selaku Ketua Program Studi S3 Agronomi dan Hortikultura atas bimbingan dan arahan selama menempuh pendidikan doktoral.
7. Ayahanda (Suratno, S.Pd.) dan Ibunda (Ersih, S.Pd.) atas segala jerih payah dan pengorbanan dalam membesarkan dan memberikan pendidikan kepada Penulis. Ayah mertua (Hasbullah, A.Ma.) dan ibu mertua (Almh. Hasbah, S.Ag. dan Mas’amah) yang telah memberikan dukungan dan doa.
8. Istri tercinta Yulianti Salamah, S.Pd., ananda Ameera Aflah dan Afiqa Raisa Aflah yang telah mendukung dan membersamai Penulis selama menempuh pendidikan doktoral.
9. Rekan-rekan mahasiswa Pascasarjana Program Studi Agronomi dan Hortikultura 2022/2023 atas kebersamaan dan bantuan yang diberikan.

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

Bogor, September 2026

Yan Sukmawan



DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR SINGKATAN	xi
DAFTAR ISTILAH	xii
PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat	6
1.5 Ruang Lingkup	6
1.6 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	8
1.7 Hipotesis Penelitian	8
II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Syarat Tumbuh dan Morfologi Tanaman Kelapa Sawit	9
2.2 Perubahan Iklim dan Cekaman Abiotik yang Ditimbulkannya	10
2.3 Cekaman Genangan Air dan Pengaruhnya pada Tanaman	11
2.4 Pemanfaatan Penginderaan Jauh untuk Asesmen Tanaman di Perkebunan	14
2.5 Hubungan Karakteristik Spektral dengan Kondisi Morfofisiologi dan Biokimia Tanaman	16
2.6 Indeks Vegetasi untuk Menilai Tingkat Cekaman pada Tanaman	17
III RESPONS MORFOFISIOLOGI, ANATOMI, DAN ALOKASI BIOMASSA TANAMAN KELAPA SAWIT TERHADAP CEKAMAN GENANGAN AIR JANGKA PANJANG	19
3.1 Pendahuluan	20
3.2 Bahan dan Metode	21
3.3 Hasil dan Pembahasan	24
3.4 Simpulan	40
IV INTEGRASI REFLEKTANSI SPEKTRAL DENGAN KARAKTER FISIOLOGI DAN BIOKIMIA UNTUK MEMANTAU CEKAMAN GENANGAN AIR PADA TANAMAN KELAPA SAWIT	41
4.1 Pendahuluan	42
4.2 Bahan dan Metode	43
4.3 Hasil dan Pembahasan	47
4.4 Simpulan	54
ESTIMASI VARIABEL BIOFISIK DAN PEMETAAN SPASIAL KERENTANAN TERHADAP KELEMBAPAN TANAH BERLEBIH	



PADA PERKEBUNAN KELAPA SAWIT MENGGUNAKAN DATA MULTISPEKTRAL	55
5.1 Pendahuluan	56
5.2 Bahan dan Metode	58
5.3 Hasil dan Pembahasan	63
5.4 Simpulan	73
VI PEMBAHASAN UMUM	75
6.1 Integrasi Hasil Penelitian	75
6.2 Keterbatasan Penelitian dan Arah Pengembangan	81
VII SIMPULAN DAN SARAN	84
7.1 Simpulan	84
7.2 Saran	84
DAFTAR PUSTAKA	86
RIWAYAT HIDUP	105



DAFTAR TABEL

2.1	Tahapan efek negatif cekaman genangan pada tanaman secara umum	12
2.2	Perubahan morfologi, fisiologi, dan pertumbuhan pada tanaman kelapa sawit di bawah kondisi cekaman genangan air	13
2.3	Tipe indeks vegetasi untuk mengukur status tanaman dan tingkat cekaman pada perkebunan kelapa sawit	18
5.1	Indeks vegetasi yang digunakan	61
5.2	Statistik deskriptif kelembapan tanah, kadar air daun, dan kehijauan daun pada empat periode pengamatan ($n = 45$)	64
5.3	Performa model prediksi untuk kelembapan tanah, kadar air daun, dan kehijauan daun	66

DAFTAR GAMBAR

1.1	Peta visualisasi hubungan antara topik-topik penelitian terdahulu terkait kelapa sawit, cekaman abiotik, genangan air, dan penginderaan jauh	3
1.2	Diagram alir penelitian	7
2.1	Cara kerja penginderaan jauh menggunakan pesawat udara nirawak	15
2.2	Panjang gelombang cahaya dan pemanfaatannya untuk menilai status kesehatan tanaman	16
3.1	Tata letak satuan percobaan pertama (a) dan ilustrasi perlakuan level genangan air (b)	22
3.2	Tinggi tanaman (a), jumlah daun (b), diameter batang (c), dan panjang anak daun (d) tanaman kelapa sawit yang mengalami cekaman genangan air jangka panjang	25
3.3	Curah hujan harian selama penelitian berlangsung	26
3.4	Laju fotosintesis (a), laju transpirasi (b), konsentrasi CO ₂ interseluler (c), konduktansi stomata (d), indeks kehijauan daun (e), dan kadar air daun (d) tanaman kelapa sawit yang mengalami cekaman genangan air jangka panjang	27
3.5	Perbedaan kehijauan daun tanaman kelapa sawit pada level tinggi muka air yang berbeda	28
3.6	Struktur anatomi daun kelapa sawit yang mengalami genangan air jangka panjang pada tinggi muka air -43 cm (a), -30 cm (b), -15 cm (c), dan 0 cm (d)	29
3.7	Lebar bukaan stomata pagi (a), lebar bukaan stomata siang (b), lebar bukaan stomata sore (c), persentase stomata membuka (d), dan kerapatan stomata (e) tanaman kelapa sawit yang mengalami cekaman genangan air jangka panjang	30
3.8	Respons pembukaan stomata pada tiga periode pengamatan. Skala batang = 10 µm	31
3.9	Perbedaan pembentukan aerenkima pada beberapa strata kedalaman tanah. Skala batang = 100 µm	32
3.10	Pembentukan aerenkima di 3 zona kedalaman akar (a) dan jumlah pneumatofor (b) pada tanaman kelapa sawit yang mengalami cekaman genangan air jangka panjang. Huruf yang berbeda menunjukkan perbedaan yang nyata berdasarkan uji BNJ ($p \leq 0,05$).	33
3.11	Pneumatofor pada akar kelapa sawit (a), individu pneumatofor (b), dan lentisel yang tumbuh pada pneumatofor (c)	34
3.12	Bobot kering tajuk (a), bobot kering akar (b), bobot brangkasan kering (c), rasio tajuk akar (d), dan laju pertambahan relatif (e) tanaman kelapa sawit yang mengalami cekaman genangan air jangka panjang	35
3.13	Keragaan akar tanaman kelapa sawit pada level tinggi muka air yang berbeda. Skala batang = 30 cm	36
3.14	Korelasi antar variabel-variabel yang diamati	37
3.15	Biplot PCA	39
4.1	Tata letak satuan percobaan	44
4.2	Peletakan bibit ke dalam kolam percobaan	45

4.3	Pengukuran variabel pertukaran gas (a) dan pengukuran reflektansi daun (b)	46
4.4	Reflektansi spektral kanopi tanaman kelapa sawit pada kondisi cekaman genangan air	47
4.5	Korelasi antara reflektansi spektral antara tanaman kontrol dan tergenang penuh	48
4.6	Pengaruh tingkat genangan air pada laju fotosintesis (a), laju transpirasi (b), konsentrasi CO ₂ interseluler (c), dan konduktansi stomata (d)	49
4.7	Pengaruh tingkat genangan air pada indeks kehijauan daun (a) dan kadar air daun (b)	50
4.8	Pengaruh tingkat genangan air pada kandungan MDA (a), aktivitas SOD (b), dan aktivitas CAT (c)	51
4.9	Pengaruh cekaman genangan pada nilai indeks vegetasi: NDVI (a), TCARI (b), WI (c), SIPI (d), R800*R550/R680 (e), dan ARI1 (f)	52
4.10	<i>Heatmap</i> korelasi antara indeks vegetasi dan pengukuran fisiologi dan biokimia	53
5.1	Peta lokasi penelitian	58
5.2	Prosedur pengumpulan data lapangan	59
5.3	Alur kerja prosedur penelitian	63
5.4	Sebaran curah hujan harian selama penelitian berlangsung	64
5.5	Perbandingan metrik performa model untuk memprediksi kelembapan tanah, kadar air daun, dan kehijauan daun	67
5.6	Nilai aktual vs prediksi dari kelembapan tanah, kadar air daun, dan kehijauan daun berdasarkan model terbaik	69
5.7	Peta estimasi kelembapan tanah (atas) dan kehijauan daun (bawah) pada tiap periode pengamatan berdasarkan model terbaik	71
5.8	Perbandingan perkiraan hasil panen antarklaster	72
5.9	Peta kerentanan kondisi kelembapan tanah berlebih	73
6.1	Respons adaptasi tanaman kelapa sawit terhadap cekaman genangan air	77
6.2	Kerangka konseptual hubungan antara cekaman genangan air, respons tanaman, dan perubahan reflektansi spektral	79

DAFTAR SINGKATAN

A	ACO	: 1-aminocyclopropane-1-carboxylate oxidase
	ANN	: artificial neural networks
	ACS	: 1-aminocyclopropane-1-carboxylate synthase
	ARI	: anthocyanin reflectance index
C	CAT	: catalase
	CI _{green}	: chlorophyll index green
	CI _{red edge}	: Chlorophyll index red edge
	CPO	: crude palm oil
E	EVI	: enhanced vegetation index
	ERF	: ethylene response factor
G	GAPKI	: Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia
	GNDVI	: green normalized difference vegetation index
K	KB	: kejenuhan basa
	KTK	: kapasitas tukar kation
L	LCI	: leaf chlorophyll index
	LPR	: laju pertumbuhan relatif
M	MPRI	: modified photochemical reflectance index
	MSR	: modified simple ratio
N	NDRE	: normalized difference red edge
	NDVI	: normalized difference vegetation index
	NIR	: near infrared
P	PLSR	: partial least squares regression
	PRI	: photochemical reflectance index
	PUNA	: pesawat udara nirawak
R	RE	: red edge
	RF	: random forest
	RVI	: ratio vegetation index
	ROS	: reactive oxygen species
S	SAM	: S-AdoMet sintetase
	SAVI	: soil adjusted vegetation index
	SCR	: support vector regression
	SIPI	: structure insensitive pigment index
	SOD	: superoxide dismutase
	SR	: simple ratio
T	TBM	: tanaman belum menghasilkan
	TBS	: tandan buah segar
	TCARI	: transformed chlorophyll absorption reflectance index
	TM	: tanaman menghasilkan
W	WI	: water index

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 ISTILAH

A	Adaptasi	: <i>Adaptation</i> ; proses perubahan morfologi, fisiologi, anatomi, atau biokimia secara bertahap yang dilakukan oleh tanaman sebagai respons terhadap kondisi lingkungan yang tidak menguntungkan.
	Aerenkima	: <i>Aerenchyma</i> ; jaringan tanaman yang memiliki ruang antarsel besar berisi udara yang berfungsi meningkatkan difusi oksigen pada kondisi kekurangan oksigen, seperti saat tanah tergenang.
	Analisis komponen utama	: <i>Principal Component Analysis (PCA)</i> ; metode statistik multivariat untuk mereduksi dimensi data dengan mengubah sejumlah variabel berkorelasi menjadi beberapa komponen utama yang saling bebas.
	Anaerob	: <i>Anaerobic</i> ; kondisi lingkungan tanpa atau dengan kandungan oksigen yang sangat rendah sehingga respirasi aerob terganggu.
C	Cekaman abiotik	: <i>Abiotic stress</i> ; tekanan atau gangguan pada tanaman yang disebabkan oleh faktor lingkungan nonhayati seperti kekeringan, genangan, suhu ekstrem, atau salinitas.
G	Genangan air	: <i>Waterlogging</i> ; kondisi kelebihan air pada tanah ketika tinggi muka air berada hingga mencapai atau sangat dekat dengan permukaan tanah sehingga pori-pori tanah jenuh air dan pertukaran gas di zona perakaran menjadi terhambat.
H	Hipoksia	: <i>Hypoxia</i> ; kondisi rendahnya oksigen pada jaringan tanaman akibat terbatasnya difusi oksigen.
I	Indeks vegetasi	: <i>Vegetation index</i> ; kombinasi matematis beberapa kanal spektral yang digunakan untuk menggambarkan kondisi vegetasi, seperti kehijauan, biomassa, atau kesehatan tanaman.
K	Kapasitas lapang	: <i>Field capacity</i> ; kondisi kandungan air tanah maksimum yang dapat dipertahankan tanah setelah kelebihan air gravitasi mengalir keluar.
	Katalase	: <i>Catalase (CAT)</i> ; enzim antioksidan yang berperan menguraikan hidrogen peroksida (H_2O_2) menjadi air dan oksigen untuk mengurangi kerusakan oksidatif pada sel tanaman.
	Kelembapan tanah berlebih	: <i>Excess soil moisture</i> ; kondisi kandungan air tanah yang melebihi kebutuhan optimum



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.

	Kematian sel terprogram	: <i>Programmed cell death (PCD)</i> ; mekanisme biologis terkontrol yang menyebabkan kematian sel secara teratur sebagai bagian dari respons adaptif tanaman terhadap cekaman.
M	Malondealdehida	: <i>Malondialdehyde (MDA)</i> ; senyawa hasil peroksidasi lipid yang digunakan sebagai indikator kerusakan membran sel akibat cekaman oksidatif.
	Multispektral	: <i>Multispectral</i> ; teknologi penginderaan jauh yang merekam informasi objek pada beberapa pita spektral (<i>spectral bands</i>) yang terpisah pada panjang gelombang tertentu, umumnya terdiri atas 3-20 band.
O	Ortomosaik	: <i>Orthomosaic</i> ; citra hasil penggabungan beberapa foto udara yang telah dikoreksi secara geometrik sehingga memiliki skala dan posisi spasial yang seragam.
P	Pembelajaran mesin	: <i>Machine learning</i> ; cabang kecerdasan buatan yang memungkinkan komputer mempelajari pola dari data untuk melakukan prediksi atau klasifikasi secara otomatis.
	Penginderaan jauh	: <i>Remote sensing</i> ; teknik memperoleh informasi objek atau permukaan bumi tanpa kontak langsung melalui sensor yang merekam energi elektromagnetik.
	Pertampalan depan	: <i>Front overlap</i> ; persentase pertampalan foto udara pada arah jalur terbang yang digunakan untuk memastikan kontinuitas dan kualitas rekonstruksi citra.
	Pertampalan samping	: <i>Side overlap</i> ; persentase pertampalan antarfoto udara pada arah samping jalur terbang untuk meningkatkan kualitas mosaik citra.
	Pesawat udara nirawak	: <i>Unmanned Aerial Vehicle (UAV)</i> ; wahana terbang tanpa awak yang dikendalikan secara otomatis atau jarak jauh untuk pengambilan data udara.
	PLSR	: <i>Partial Least Squares Regression</i> ; metode regresi multivariat yang digunakan untuk memodelkan hubungan antara variabel prediktor dan respons pada data berdimensi tinggi.
	Pneumatofor	: <i>Pneumatophore</i> ; akar khusus yang tumbuh ke atas permukaan tanah atau air untuk membantu pertukaran gas pada kondisi tanah kekurangan oksigen.
R	Random Forest	: <i>Random Forest</i> ; algoritma pembelajaran mesin



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.

		berbasis kumpulan pohon keputusan (<i>decision tree ensemble</i>) yang digunakan untuk klasifikasi dan regresi.
Red edge	:	wilayah spektral transisi antara panjang gelombang merah dan inframerah dekat yang sensitif terhadap kandungan klorofil dan kondisi fisiologis tanaman.
Reflektansi spektral	:	<i>Spectral reflectance</i> ; proporsi energi elektromagnetik yang dipantulkan oleh objek pada panjang gelombang tertentu.
Rendaman	:	<i>Inundation/submergence</i> ; kondisi keberadaan air dengan tinggi muka yang melampaui permukaan tanah sehingga sebagian atau seluruh bagian atas tanaman terliputi oleh air.
Spektral	:	<i>Spectral</i> ; berkaitan dengan karakteristik energi elektromagnetik pada berbagai panjang gelombang.
Spektroradiometer	:	<i>Spectroradiometer</i> ; instrumen yang digunakan untuk mengukur intensitas radiasi elektromagnetik atau reflektansi objek pada berbagai panjang gelombang secara rinci.
Superoksida dismutase	:	<i>Superoxide dismutase (SOD)</i> ; enzim antioksidan yang berfungsi mengubah radikal superoksida menjadi hidrogen peroksida dan oksigen.
Support Vector Regression	:	<i>Support Vector Regression (SVR)</i> ; metode pembelajaran mesin berbasis <i>support vector machine</i> yang digunakan untuk analisis regresi dan prediksi data kontinu.
T Tanda spektral	:	<i>Spectral signature</i> ; pola khas reflektansi atau respons spektral suatu objek pada berbagai panjang gelombang yang dapat digunakan untuk identifikasi objek.
Taksasi produksi	:	<i>Yield estimation</i> ; proses memperkirakan jumlah produksi tandan buah segar kelapa sawit pada periode tertentu berdasarkan sensus lapangan, data produksi, atau parameter tanaman untuk mendukung perencanaan panen dan pengelolaan perkebunan.
Tinggi muka air	:	<i>Water table level</i> atau <i>water level</i> ; posisi permukaan air relatif terhadap permukaan tanah yang digunakan untuk menggambarkan kondisi kejenuhan tanah atau genangan.
Toleransi	:	<i>Tolerance</i> ; ketahanan tanaman untuk bertahan dan meminimalkan kerusakan (<i>strain</i>) agar tetap dapat hidup dan memproduksi di bawah kondisi cekaman.