

**PENDUGAAN NILAI STOK KARBON DENGAN
PENDEKATAN NDVI PADA TANAMAN KELAPA SAWIT
(*Elaeis guineensis* Jacq.)**

A MUHAMMAD TOHA MIFTAHURRIDHO



**PROGRAM STUDI MAGISTER 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 TESIS DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa tesis dengan judul "Pendugaan Nilai Stok Karbon dengan Pendekatan NDVI pada Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.)" adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir tesis ini.

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

Bogor, Oktober 2026

A Muhammad Toha Miftahurridho
A2502231049

- 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

A MUHAMMAD TOHA MIFTAHURRIDHO. Pendugaan Nilai Stok Karbon dengan Pendekatan NDVI pada Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). Dibimbing oleh HARIYADI dan HERU SUKOCO.

Peningkatan konsentrasi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer akibat aktivitas antropogenik telah memperkuat urgensi pemantauan dan inventarisasi stok karbon secara presisi, cepat, dan non-destruktif pada sektor perkebunan kelapa sawit sebagai salah satu ekosistem budidaya tropis terbesar. Pendugaan biomassa dan stok karbon berbasis teknologi penginderaan jauh menggunakan *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) multispektral memberikan peluang efisiensi ruang dan waktu yang signifikan dibandingkan metode pengukuran terestrial konvensional yang membutuhkan tenaga kerja besar, biaya tinggi serta berisiko merusak vegetasi secara destruktif. Meskipun demikian, integrasi indeks vegetasi spektral berbasis UAV untuk menduga stok karbon masih dihadapkan pada tantangan metodologis, terutama terkait perbedaan arsitektur tajuk antar kelompok umur tanaman. Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis korelasi dan menyusun model regresi antara nilai *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) berbasis UAV dengan stok karbon kelapa sawit pada skala individu dan skala area; (2) mengevaluasi perbedaan performa model penduga stok karbon antara model spesifik umur (*age-specific model*) pada fase Tanaman Menghasilkan muda (TM 4) dan dewasa (TM 11) dibandingkan dengan model gabungan (*global model*); serta (3) mengidentifikasi batas keandalan dan fenomena kejenuhan spektral (*canopy saturation*) NDVI pada kanopi kelapa sawit rapat.

Penelitian dilaksanakan di Kebun Percobaan Cikabayan, IPB University, Dramaga, Bogor. Data terestrial dikumpulkan dari 20 sampel pohon individu per plot berukuran 20 × 60 m pada blok TM 4 dan TM 11 melalui pengukuran biometrika diameter batang dan tinggi vertikal dari pangkal pelepah ke-17 yang diulang 3 kali pada masing-masing blok umur. Biomassa tanaman kelapa sawit dihitung menggunakan persamaan alometrik non-destruktif Lubis (2011), sedangkan biomassa bawah tegakan kelapa sawit (tanaman herba dan rumput-rumputan) dihitung secara destruktif menggunakan subplot 1 × 1 m sebanyak 6 pada tiap plot utama untuk menggambarkan kondisi mikro di lapangan. Nilai biomassa yang didapat dikonversi menjadi stok karbon (kg C/pohon) dengan faktor fraksi karbon sebesar 0,46 (SNI 7722:2011), dengan asumsi bahwa 46% biomassa total tanaman merupakan stok karbon. Akuisisi data spasial udara memanfaatkan UAV DJI Mavic 3 Multispectral pada ketinggian terbang 50 meter dengan kalibrasi radiometrik berbasis panel reflektansi dan sensor irradiansia surya untuk meminimalkan gangguan akibat variabilitas pencahayaan dan kondisi atmosferik. Indeks vegetasi NDVI dihitung berdasarkan rasio reflektansi gelombang inframerah dekat (*Near-Infrared/NIR*) dan merah (Red), kemudian diekstrak menggunakan teknik zonal statistics pada area tajuk individu dan luas plot. Analisis statistik mencakup uji korelasi Pearson, penyusunan model regresi, evaluasi kelayakan model (koefisien determinasi R^2) dan *root mean square error* (RMSE), serta pengujian asumsi klasik regresi secara komprehensif, termasuk uji heteroskedastisitas White, uji normalitas Shapiro-Wilk, dan Q-Q plot terhadap sebaran sisa regresi menggunakan perangkat lunak SAS Studio.

@Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

IPB University

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.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa korelasi dan performa model regresi NDVI terhadap stok karbon sangat dipengaruhi oleh faktor umur serta dinamika arsitektur kanopi tanaman. Pada skala individu, model spesifik umur (*age-specific model*) pada TM 4 mampu menjelaskan variabilitas stok karbon secara linier dengan akurasi tinggi karena pertambahan biomassa tajuk berbanding lurus dengan serapan spektral dan perluasan area proyeksi tajuk. Sebaliknya, pada TM 11 yang memiliki tutupan kanopi rapat dan akumulasi biomassa dominan pada struktur batang kayu, hubungan NDVI individu terhadap stok karbon menunjukkan penurunan sensitivitas akibat fenomena kejenuhan spektral (*spectral saturation*) di mana peningkatan akumulasi biomassa batang tidak lagi diiringi oleh peningkatan nilai reflektansi spektral NDVI. Penggabungan data seluruh umur ke dalam model global terbukti memicu variabilitas acak yang tinggi, meningkatkan nilai galat, serta menimbulkan indikasi pelanggaran heteroskedastisitas pada sebaran sisa regresi. Pada skala area, penutupan kanopi memberikan pengaruh signifikan terhadap akumulasi biomassa permukaan, namun respon sinyal NDVI mencapai titik jenuh ketika indeks tutupan tajuk mendekati maksimum. Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan model *age-specific* lebih direkomendasikan daripada model global untuk menghindari bias pada nilai estimasi dan menjaga validitas prediktif. Hasil ini memberikan kontribusi metodologis yang penting dalam pengembangan pemetaan stok karbon presisi berbasis UAV untuk mendukung transparansi kerangka *Measurement, Reporting, and Verification* (MRV) serta tata kelola perkebunan kelapa sawit yang berkelanjutan.

Kata kunci: Kelapa Sawit, Model Regresi, NDVI, Stok karbon, UAV

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



SUMMARY

A MUHAMMAD TOHA MIFTAHURRIDHO. Estimation of Carbon Stock Values in Oil Palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) Plantations Using the NDVI Approach. Supervised by HARIYADI and HERU SUKOCO.

Rising atmospheric greenhouse gas (GHG) concentrations resulting from anthropogenic activities have heightened the urgency for precise, rapid, and non-destructive monitoring and inventorying of carbon stocks in oil palm plantations, one of the largest tropical cultivated ecosystems. Remote sensing-based estimation of biomass and carbon stocks using multispectral Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) offers significant spatial and temporal efficiency compared to conventional terrestrial measurement methods, which are labor-intensive, costly, and carry the risk of damaging vegetation. However, integrating UAV-based spectral vegetation indices for estimating carbon stocks presents methodological challenges, particularly due to variations in canopy architecture across plant age groups. This study aims to: (1) analyze correlations and develop regression models linking UAV-derived Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) values with oil palm carbon stocks at both individual and area scales; (2) evaluate the performance of carbon stock estimation models by comparing age-specific models covering young (TM 4) and mature (TM 11) productive plant phases against a combined (global) model; and (3) identify reliability limits and the phenomenon of spectral saturation (canopy saturation) regarding NDVI in dense oil palm canopies.

The research was conducted at the Cikabayan Experimental Station of IPB University in Dramaga, Bogor. Terrestrial data were collected from 20 individual sample trees per 20 × 60 m plot within TM 4 and TM 11 blocks; measurements included biometric data such as trunk diameter and vertical height from the base of the 17th frond, for estimating carbon stocks, the present methodological challenges, particularly due to variations in canopy architecture across the process, were replicated three times for each age block. Oil palm biomass was calculated using the non-destructive allometric equation developed by Lubis (2011), while understory biomass (herbaceous plants and grasses) was determined destructively using six 1 × 1 m subplots within each main plot to capture micro-environmental conditions. The resulting biomass values were converted into carbon stocks (kg C/tree) using a carbon fraction factor of 0.46 (SNI 7722:2011), based on the assumption that 46% of the total plant biomass constitutes carbon stock. Aerial spatial data acquisition was conducted using a DJI Mavic 3 Multispectral UAV at a flight altitude of 50 meters, employing radiometric calibration via reflectance panels and solar irradiance sensors to minimize interference from lighting variability and atmospheric conditions. The NDVI vegetation index was calculated from the reflectance ratio of the Near-Infrared (NIR) and Red bands, and then extracted using zonal statistics techniques applied to individual crown areas and the total plot area. Statistical analysis encompassed Pearson correlation tests, regression model development, model performance evaluation (coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), and comprehensive testing of classical regression assumptions, including White's heteroskedasticity test, the Shapiro-Wilk normality test, and Q-Q plots of regression residuals using SAS Studio software.

The study results indicate that the correlation and performance of the NDVI-based regression model for carbon stock are strongly influenced by the plant's age and canopy architecture dynamics. At the individual level, introduce substantial random variability, increase error estimates, and indicate tree level, an age-specific model for the TM 4 (mature) stage explained carbon stock variability linearly with high accuracy, as the increase in crown biomass is directly proportional to spectral uptake and to the expansion of the projected crown area. Conversely, in the 11-year-old stands characterized by dense canopy cover and biomass accumulation concentrated in woody stems, the relationship between individual NDVI values and carbon stock was less sensitive due to spectral saturation; specifically, increases in stem biomass accumulation were no longer accompanied by corresponding increases in NDVI reflectance. Integrating data across all age groups into a global model was found to introduce substantial random variability, increase error estimates, and indicate heteroscedasticity in the regression residuals. At the plot scale, canopy cover significantly influenced above-ground biomass accumulation; however, the NDVI response plateaued as the canopy cover index approached its maximum. The study concludes that age-specific models are preferable to global models to avoid estimation bias and ensure predictive validity. These findings offer a significant methodological contribution to the development of UAV-based precision carbon stock mapping, supporting transparency in Measurement, Reporting, and Verification (MRV) frameworks and sustainable oil palm plantation management.

Keywords: Carbon stock, NDVI, Oil Palm, Regression Model, UAV

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



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

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

© 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.

**PENDUGAAN NILAI STOK KARBON DENGAN
PENDEKATAN NDVI PADA TANAMAN KELAPA SAWIT
(*Elaeis guineensis* Jacq.)**

A MUHAMMAD TOHA MIFTAHURRIDHO

Tesis
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Magister pada
Program Studi Agronomi dan Hortikultura

**PROGRAM STUDI MAGISTER 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.

Tim Penguji pada Ujian Tesis:
1 Prof. Dr.Ir. Herdhata Agusta
2 Dr. Dhika Prita Hapsari, S.P., M.Si.

Judul Tesis : Pendugaan Nilai Stok Karbon dengan Pendekatan NDVI pada
Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.)
Nama : A Muhammad Toha Miftahurridho
NIM : A2502231049

Disetujui oleh

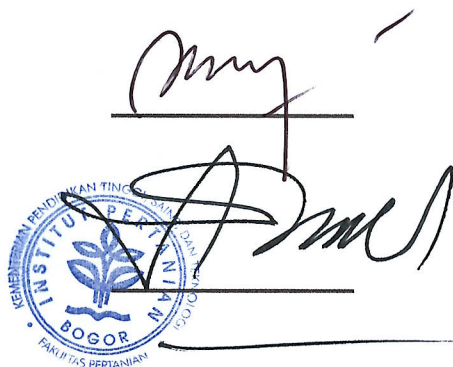
Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Hariyadi, M.S.

Pembimbing 2:
Dr.Eng. Heru Sukoco, S.Si, MT.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ani Kurniawati, S.P., M.Si.
NIP : 196911131994032001

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



Tanggal Ujian:
25 September 2026

Tanggal Lulus:
19 OCT 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 dapat diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan berjudul "Pendugaan Nilai Stok Karbon dengan Pendekatan NDVI pada Tanaman Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.)".

Penulis mengucapkan terima kasih kepada para pembimbing, Prof. Dr. Ir. Hariyadi, M.S., dan Dr.Eng. Heru Sukoco, S.Si., M.T., yang telah membimbing serta banyak memberikan saran dalam penyusunan tesis ini. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh staf pengajar, rekan mahasiswa, serta pihak-pihak yang telah membantu, baik secara langsung maupun tidak langsung. Tak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kepada kedua orang tua, saudara, serta sahabat-sahabat yang selalu memberikan dukungan moral, doa, dan motivasi.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan di bidang agronomi, khususnya penilaian stok karbon pada tanaman kelapa sawit

Bogor, Oktober 2026

A Muhammad Toha Miftahurridho



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 TABEL	iii
DAFTAR GAMBAR	iii
DAFTAR LAMPIRAN	iii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	3
1.4 Manfaat	4
1.5 Ruang Lingkup	4
II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Potensi Tanaman kelapa Sawit	5
2.2 Stok Karbon	5
2.3 Pendugaan Stok Karbon Tanaman Kelapa Sawit	6
2.4 Penggunaan Penginderaan Jauh dalam Perkebunan	6
2.5 <i>Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)</i>	7
2.6 Hubungan NDVI dan Stok Karbon	8
III METODE	9
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	9
3.2 Alat dan Bahan	9
3.3 Prosedur Kerja	9
3.4 Analisis data	12
IV HASIL DAN PEMBAHASAN	14
4.1 Stok Karbon Individu	14
4.2 NDVI Individu	16
4.3 Model Penduga Stok Karbon Individu	18
4.4 Stok Karbon Area	21
4.5 NDVI Area	23
4.6 Model Penduga Stok Karbon Area	25
V SIMPULAN DAN SARAN	28
5.1 Simpulan	28
5.2 Saran	28
DAFTAR PUSTAKA	29
LAMPIRAN	34
RIWAYAT HIDUP	39



DAFTAR TABEL

2.1	Kisaran tingkat kerapatan dan kesehatan tanaman	7
4.1	Tinggi dan diameter tanaman kelapa sawit pada TM 4 dan TM 11	14
4.2	Stok karbon area tanaman kelapa sawit pada TM 4 dan TM 11	22
4.3	Nilai NDVI area tanaman kelapa sawit pada TM 4 dan TM 11	23
4.4	Perbandingan nilai rata-rata stok karbon dan NDVI	25

DAFTAR GAMBAR

4.1	Grafik stok karbon individu tanaman kelapa sawit pada TM 4 dan TM11	15
4.2	Grafik nilai NDVI individu tanaman kelapa sawit pada umur TM 4 dan TM 11	17
4.3	Scatter plot dan garis regresi gabungan (<i>global model</i>) NDVI vs stok karbon untuk seluruh sampel (TM 4 dan TM 11)	19
4.4	Perbandingan distribusi nilai stok karbon (A) dan NDVI (B) antara kelompok umur TM 4 dan TM 11	21
4.5	Kurva regresi linier untuk pendugaan stok karbon berdasarkan NDVI pada (A) TM 4 dan (B) TM 11	21
4.6	Perbandingan distribusi stok karbon antar-plot/ulangan pada kelompok umur TM 4 (A) ($p < 0,0001$) dan TM 11 (B) ($p = 0,2415$)	21
4.7	Peta spasial NDVI yang diperoleh dari UAV pada perkebunan kelapa sawit di TM 4 (A) dan TM 11 (B) di Kebun Penelitian Cikabayan, IPB	24
4.8	<i>Fit plot</i> untuk stok karbon dengan interval kepercayaan 95%	26

DAFTAR LAMPIRAN

1	Data penelitian TM 4	35
2	Data penelitian TM 11	36
3	Denah penelitian	37
4	Peta NDVI	38