

Modeling Umur Kelapa Sawit Menggunakan Radar *Forest Degradation Index* Berbasis Citra Alos-2 Palsar-2

Maria Nur Harysah¹, Rika Hernawati¹, Soni Darmawan¹, Josaphat Tetuko Sri Sumantyo²,
Dhimas Wiratmoko³

¹ Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional, Bandung

² Center for Environmental Remote Sensing, Chiba University, Japan

³ Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS), Medan, Sumatera Utara

*Koresponden email: rikah@itenas.ac.id

Diterima: 10 Juli 2026

Disetujui: 20 Juli 2026

Abstract

Oil palm stand age is a key variable for plantation management, yield planning, fertilization, and replanting decisions, yet optical monitoring in tropical regions is frequently constrained by cloud cover. This study develops an age-class-based model of oil palm stands using the Radar Forest Degradation Index (RFDI) derived from ALOS-2 PALSAR-2 L-band Synthetic Aperture Radar imagery at PTPN III Sei Dadap plantation, Asahan, North Sumatra, Indonesia. Fine Beam Dual HH and HV polarization imagery and planting-year reference data from 16 plantation blocks, covering stand ages of 0.5 to 22 years, were used. SAR data underwent radiometric calibration, multilooking, speckle filtering, and terrain correction, and RFDI values were extracted at the block scale for overall and age-class-specific regression analyses. Results reveal a nonlinear inverted-U relationship between RFDI and stand age, with the overall model explaining 83.99% of variance and age-class-specific models achieving R^2 values of 0.9529 and 0.9959 for mature and old stands, respectively. These findings demonstrate that L-band SAR-derived RFDI enables cloud-independent, age-class-based monitoring of oil palm plantations.

Keywords: *oil palm, RFDI, ALOS-2 PALSAR-2, age class modeling*

Abstrak

Umur tegakan kelapa sawit merupakan variabel kunci dalam pengelolaan perkebunan, perencanaan hasil panen, pemupukan, dan pengambilan keputusan penanaman kembali namun, pemantauan optik di wilayah tropis sering kali terhambat oleh tutupan awan. Penelitian ini mengembangkan model tegakan kelapa sawit berdasarkan kelas usia menggunakan Radar Forest Degradation Index (RFDI) yang diperoleh dari citra Radar Apertur Sintetis (SAR) ALOS-2 PALSAR-2 pita-L di perkebunan PTPN III Sei Dadap, Asahan, Sumatera Utara, Indonesia. Citra Fine Beam Dual HH dan polarisasi HV serta data referensi tahun penanaman dari 16 blok perkebunan, yang mencakup usia tegakan 0,5 hingga 22 tahun, digunakan dalam penelitian ini. Data SAR telah melalui kalibrasi radiometrik, multilooking, penyaringan speckle, dan koreksi medan, dan nilai RFDI diekstraksi pada skala blok untuk analisis regresi secara keseluruhan dan berdasarkan kelas usia. Hasil penelitian menunjukkan hubungan nonlinier berbentuk huruf U terbalik antara RFDI dan usia tegakan, dengan model keseluruhan menjelaskan 83,99% varians, sedangkan model khusus kelas usia mencapai nilai R^2 sebesar 0,9529 dan 0,9959 untuk tegakan matang dan tua, masing-masing. Temuan ini menunjukkan bahwa RFDI yang diperoleh dari SAR pita-L memungkinkan pemantauan perkebunan kelapa sawit yang tidak terpengaruh awan dan berbasis kelas Umur.

Kata Kunci: *kelapa sawit, RFDI, ALOS-2 PALSAR-2, model umur*

1. Pendahuluan

Indonesia merupakan produsen minyak sawit terbesar di dunia, dengan luas perkebunan mencapai 16,83 juta hektar dan total produksi sebesar 46,82 juta ton pada tahun 2022, sehingga menjadikan Indonesia sebagai produsen utama Minyak Sawit Mentah (MSM) di dunia. Menurut Badan Pusat Statistik pada tahun 2023 [1], sebagai produsen minyak kelapa sawit terbesar di dunia, produksi minyak kelapa sawit Indonesia menyumbang 0,57% dari total produksi global, yaitu sebesar 47.084.000 ton pada tahun 2023, meningkat dibandingkan produksi tahun 2022 [2]. Pengelolaan perkebunan kelapa sawit yang efektif memerlukan informasi akurat mengenai usia tanaman per blok perkebunan, mengingat usia pohon kelapa sawit berkaitan langsung dengan produktivitas, perencanaan pemupukan, perkiraan panen Tandan Buah Segar (TBS), dan perencanaan peremajaan. Seiring bertambahnya usia, kelapa sawit mengalami perubahan struktural yang signifikan, mulai dari fase vegetatif awal dengan kanopi yang terbuka, melalui fase produktif dengan kanopi

yang lebat, hingga fase penurunan produktivitas pada usia di atas 25 tahun dengan kanopi yang mulai menipis [3]. Berkenaan dengan usia kelapa sawit dan produktivitas TBS [4] dengan merujuk pada empat fase produktivitas kelapa sawit yang diidentifikasi telah mengidentifikasi empat fase hasil panen; 1) fase belum matang atau “fase pembentukan hasil”, 2–3 tahun setelah tanam (YAP), sebelum produksi yang dapat dipanen dimulai dan ketika kanopi belum tertutup; 2) fase dewasa muda atau “fase kenaikan hasil yang tajam”, 4–7 YAP, ketika luas daun dan hasil meningkat secara linier; 3) fase dewasa atau “fase hasil plateau”, 8–14 YAP, ketika hasil dan luas daun stabil; dan 4) fase penurunan hasil, 15–25 YAP, ketika laju produksi daun dan jumlah tandan menurun. Dalam kondisi yang mendukung, fase dewasa muda (4–7 YAP) dapat menghasilkan 10–15 t·FFB·ha⁻¹, sedangkan hasil komersial tipikal dapat mencapai 25–30 t·FFB·ha⁻¹ di perkebunan yang dikelola dengan baik.

Penginderaan jauh merupakan alat yang efektif untuk pemetaan perkebunan kelapa sawit dalam skala regional dan dapat memberikan pengamatan berulang dengan biaya rendah [5]. Teknologi penginderaan jauh berbasis *Synthetic Aperture Radar* (SAR) menawarkan solusi efektif untuk memantau perkebunan kelapa sawit di wilayah tropis Indonesia, yang sering tertutup awan. Untuk mengurangi kesulitan dalam mendeteksi perkebunan kelapa sawit di wilayah tropis, radar aperture sintesis (SAR), yang menyediakan pengamatan global dalam segala kondisi cuaca dan pada setiap waktu sepanjang hari, yang memanfaatkan data satelit radar, yaitu data pita L dari *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) sebagai sumber utama untuk mendeteksi perkebunan kelapa sawit. Dengan data satelit radar, perkebunan kelapa sawit menunjukkan distribusi pantulan balik radar yang khas, yang dapat dengan mudah dibedakan dari perkebunan tropis lainnya [6].

Berbeda dengan sensor optik, SAR mampu menembus lapisan awan dan mengumpulkan data secara berkelanjutan dari waktu ke waktu. Di antara berbagai sensor SAR yang tersedia, ALOS-2 PALSAR-2, yang beroperasi pada pita L (panjang gelombang 23 cm), memiliki kemampuan penetrasi kanopi yang lebih dalam dibandingkan pita C, menurut [7] sebagai penelitian sebelumnya untuk mengevaluasi kemampuan sensor radar (SAR) yaitu ALOS-2 PALSAR-2 dengan memiliki panjang gelombang 23 cm sehingga mampu menembus tajuk (canopy) dan berinteraksi dengan struktur batang. sehingga lebih sensitif terhadap struktur vegetasi di lapisan kanopi bawah, termasuk batang dan cabang yang perubahannya berkaitan erat dengan usia kelapa sawit. Interaksi gelombang mikro SAR dengan vegetasi kelapa sawit melibatkan tiga mekanisme hamburan utama: hamburan permukaan, hamburan volume, dan hamburan pantulan ganda, yang dominansinya berubah secara dinamis seiring pertumbuhan kelapa sawit dari fase muda hingga fase dewasa.

Indeks Degradasi Hutan Radar (RFDI) adalah indeks polarimetrik SAR yang dikembangkan oleh [8] menggunakan rumus $RFDI = (\sigma^{\circ}HH - \sigma^{\circ}HV) / (\sigma^{\circ}HH + \sigma^{\circ}HV)$. Indeks ini mengukur keseimbangan antara dominasi hamburan permukaan dan hamburan pantulan ganda (HH) terhadap hamburan volume kanopi (HV), di mana nilai yang mendekati +1 menunjukkan lahan terbuka atau kanopi yang jarang, sedangkan nilai yang mendekati -1 menunjukkan vegetasi dengan kanopi yang lebat [9]. Sensitivitas fisik RFDI terhadap perubahan mekanisme hamburan menjadikannya indeks yang menjanjikan untuk menggambarkan perkembangan kanopi kelapa sawit seiring bertambahnya usia.

Beberapa penelitian sebelumnya menggunakan backscatter radar L-band untuk memprediksi biomassa kayu di empat lanskap Afrika yang berbeda dan menemukan hubungan yang konsisten antara nilai backscatter dengan kondisi vegetasi [10] dan penelitian lain telah menunjukkan potensi indeks SAR dalam memperkirakan usia pohon kelapa sawit. [11] Mengembangkan model HV backscatter logaritmik dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,60$ untuk membedakan antara tahap pertumbuhan muda dan dewasa. Penelitian [12] mengembangkan model fenologi kelapa sawit menggunakan *Radar Vegetation Index* (RVI) berdasarkan data Sentinel-1A C-band di lokasi yang sama, yaitu PTPN III Sei Dadap, Asahan, dan menghasilkan model kuadrat dengan nilai R^2 sebesar 0,82. Meskipun hasil-hasil ini cukup menjanjikan, terdapat perbedaan mendasar antara RVI dari pita C Sentinel-1A dan RFDI dari pita L ALOS-2 PALSAR-2 [13].

Polarisasi HH memiliki kapasitas untuk mendeteksi air di bawah kanopi, sementara polarisasi HV dapat secara efisien mengukur volume scattering dan jumlah biomassa, sehingga ketika kanopi terbuka akibat penebangan, hal ini menyebabkan RFDI meningkat. RFDI memanfaatkan kemampuan penetrasi yang lebih dalam dari gelombang pita L, sehingga lebih sensitif terhadap struktur vertikal pohon dan interaksi batang-tanah yang erat kaitannya dengan usia kelapa sawit. Penelitian yang secara khusus menggunakan RFDI dari citra ALOS-2 PALSAR-2 untuk pemodelan usia kelapa sawit masih sangat terbatas, sehingga meninggalkan celah ilmiah yang perlu diatasi.

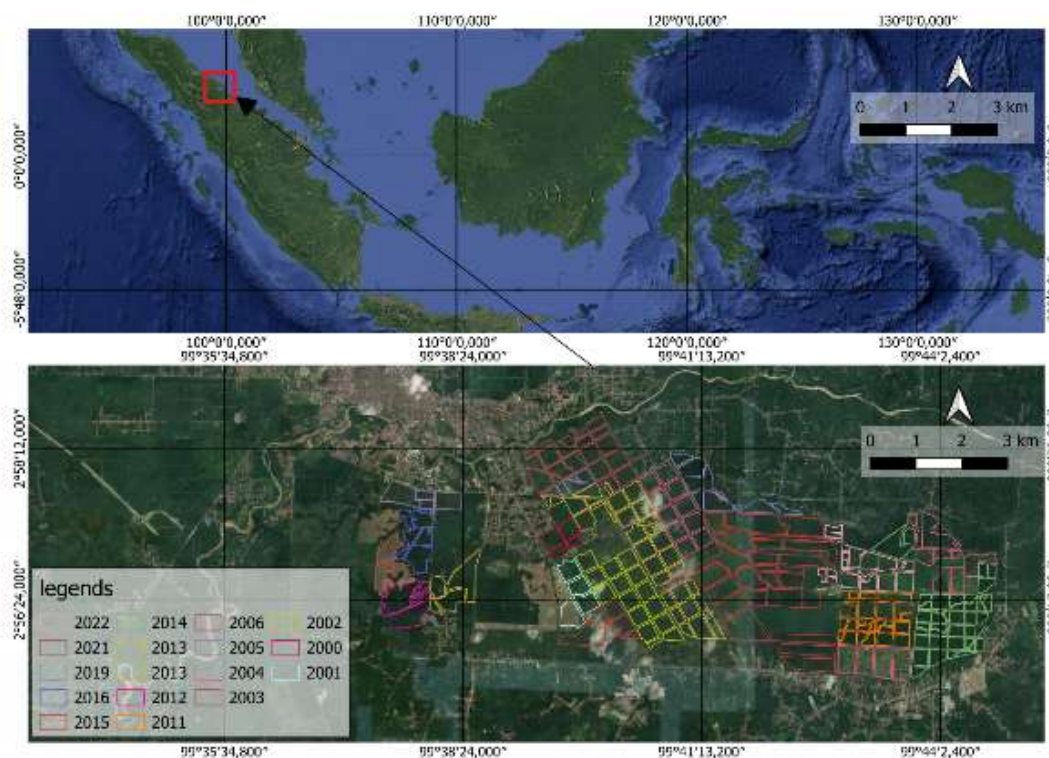
Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan model matematis yang menggambarkan hubungan antara nilai RFDI citra ALOS-2 PALSAR-2 dan usia pohon kelapa sawit di perkebunan PTPN III Sei Dadap, Asahan, Sumatera Utara, serta mengevaluasi akurasi model yang dihasilkan dalam memperkirakan usia

pohon kelapa sawit per blok perkebunan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan metode pemantauan perkebunan kelapa sawit berbasis indeks polarimetrik SAR pita-L yang efektif dan efisien, khususnya di wilayah tropis dengan tutupan awan yang tinggi.

2. Metode Penelitian

Area Studi

Penelitian ini dilakukan di perkebunan kelapa sawit PT Perkebunan Nusantara (PTPN) III di Sei Dadap, Kabupaten Asahan, Provinsi Sumatera Utara. Perkebunan kelapa sawit tersebut mencakup luas 6.075 ha dan terletak pada 2°03'–3°26' Lintang Utara, 99°1'–100°0' Bujur Timur di Zona 47 Utara, dengan batas-batas sebagai berikut:



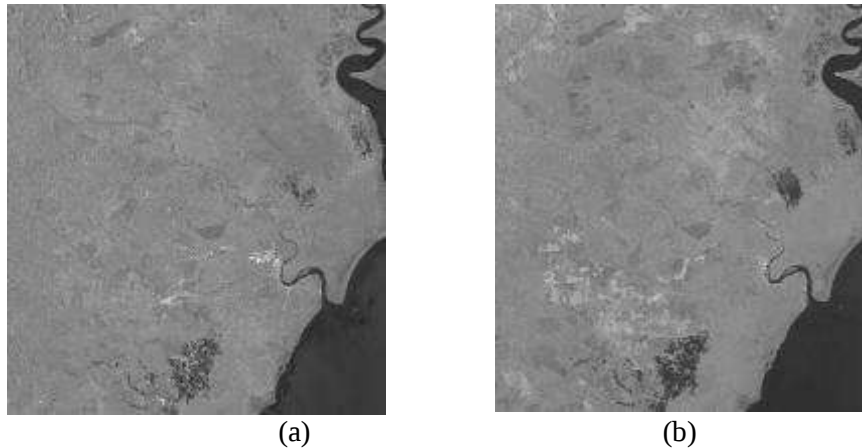
Gambar 1. Area blok perkebunan kelapa sawit di Kabupaten Asahan, Sumatera Utara

Data dan Alat

Penelitian ini menggunakan dua jenis utama data citra satelit ALOS-2 PALSAR-2 dalam mode *Fine Beam Dual* (FBD) dengan polarisasi HH dan HV, yang diperoleh dari Badan Eksplorasi Antariksa Jepang (JAXA). Citra-citra ini beroperasi pada frekuensi L-band (1270 MHz) dengan panjang gelombang sekitar 23 cm dan resolusi spasial 6 meter, teknik polarisasi yang digunakan adalah polarisasi ganda (HH dan HV). Sensor radar dengan panjang gelombang yang lebih panjang, seperti yang terpasang pada satelit *Advanced Land Observing Satellite/Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (ALOS/PALSAR), memiliki kemampuan penetrasi sinyal gelombang mikro yang dipancarkan ke dalam kanopi hutan yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sensor radar dengan panjang gelombang yang lebih pendek [14]. Selain itu, data mengenai tahun penanaman kelapa sawit per blok perkebunan dari PT. Perkebunan Nusantara III (PTPN III) Sei Dadap, Kabupaten Asahan, Sumatera Utara. Data ini mencakup usia tanaman kelapa sawit per blok perkebunan dari PTPN III Sei Dadap, Asahan, Sumatera Utara, sebagai data referensi dari tahun 2000 hingga 2006, 2011 hingga 2016, dan 2019 hingga 2022. Rentang usia tanaman pada saat pengambilan citra berkisar antara 0,5 hingga 22 tahun, yang diperoleh dari Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS) sebagai data pendukung untuk pemetaan batas-batas blok perkebunan.

Tabel 1. Data Penelitian

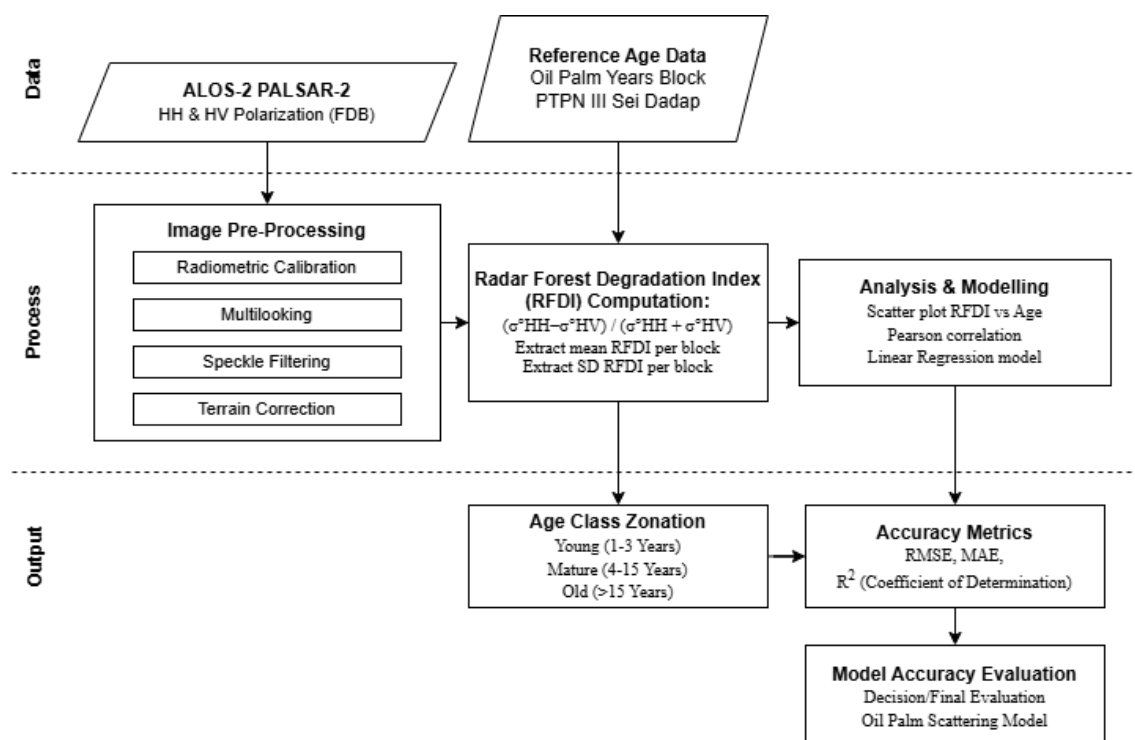
Data	Sumber	Tahun
Tahun Penanaman Kelapa Sawit	Perkebunan PTPN III Sei Dadap, Asahan	2000-2022
Citra Radar ALOS-2 PALSAR-2	Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)	2022



Gambar 2. (a) Citra ALOS-2 PALSAR-2 dengan polarisasi HH (b) Citra ALOS-2 PALSAR-2 dengan polarisasi HV

Metode

Metode secara keseluruhan terdiri dari enam tahap: (1) Persiapan data, termasuk perolehan citra ALOS-2 PALSAR-2 dalam mode Fine Beam Dual (FBD) dengan polarisasi HH dan HV dari JAXA, serta data usia tanaman per blok perkebunan dari PTPN III Sei Dadap. (2) Pra-pemrosesan citra SAR, (3) Perhitungan Indeks Degradasi Hutan Radar (RFDI) per piksel menggunakan rumus $RFDI = (\sigma^{HH} - \sigma^{HV}) / (\sigma^{HH} + \sigma^{HV})$ [8], (4) Ekstraksi nilai RFDI per blok perkebunan menggunakan analisis zonasi di QGIS, (5) Pengembangan model matematis hubungan antara RFDI dan umur menggunakan regresi linier dan perhitungan korelasi Pearson, serta (6) Evaluasi akurasi model menggunakan metrik RMSE, MAE, dan R^2 .



Gambar 3. Metodologi

Pra-Pemrosesan Citra

Prapemrosesan citra dilakukan menggunakan perangkat lunak ESA SNAP melalui serangkaian langkah koreksi berurutan. RFDI dibangun dari hubungan kanal HH dan HV, ketika HV = 0, nilainya menjadi 1 apa pun kondisi permukaan, sehingga RFDI sendiri tidak selalu cukup untuk membedakan hutan terganggu dari permukaan terbuka.

a. Radiometrik Kalibrasi

Kalibrasi radiometrik diterapkan pada pita intensitas HH dan HV untuk mengubah nilai angka digital (DN) menjadi koefisien pantulan balik radar yang telah dikalibrasi (σ°), sehingga nilai piksel secara akurat mencerminkan pantulan balik radar permukaan yang sebenarnya, sesuai dengan persamaan kalibrasi sigma-nol standar [15]:

$$\sigma^\circ(dB) = 10 \log_{10}(DN^2) + CF \quad (1)$$

di mana DN adalah nomor piksel digital dan CF adalah faktor kalibrasi radiometrik, yang bergantung pada parameter sensor dan tercantum dalam metadata gambar. Nilai σ° yang dihasilkan dalam desibel kemudian dikonversi ke skala linier melalui $\sigma^\circ(\text{linear})$.

b. Multilooking

Teknik multilooking diterapkan untuk menghasilkan piksel rentang permukaan berbentuk persegi dengan cara menghitung rata-rata sejumlah pengamatan sepanjang arah rentang dan azimuth. Proses ini menekan varians speckle dengan mengorbankan sebagian resolusi spasial, sehingga meningkatkan resolusi radiometrik gambar dan membuat nilai backscatter menjadi lebih representatif sebelum dilanjutkan ke tahap penyaringan speckle dan perhitungan RFDI.

c. Speckle Filtering (Refined Lee Filter)

Penyaringan speckle menggunakan filter Refined Lee untuk mengurangi noise speckle yang melekat pada citra SAR sambil tetap mempertahankan detail tepi dan struktur spasial. Filter ini bekerja dengan menghitung statistik lokal (rata-rata dan varians) di dalam jendela penyaringan di sekitar setiap piksel, kemudian menyesuaikan tingkat penghalusan secara adaptif: di area yang homogen, nilai piksel dihaluskan lebih kuat ke arah rata-rata lokal, sedangkan di dekat tepi objek, nilai piksel asli dipertahankan dalam tingkat yang lebih tinggi sehingga batas antar objek tetap tajam. Keunggulan filter Refined Lee dibandingkan filter Lee konvensional terletak pada penggunaan jendela penyaringan terarah yang menyesuaikan orientasinya dengan tepi lokal, sehingga struktur spasial dan batas-batas blok perkebunan tetap terjaga setelah penyaringan.

d. Terrain Correction

Koreksi medan dilakukan menggunakan metode SAR-Simulation Terrain Correction dengan data SRTM DEM resolusi 3 detik busur (90 m) untuk mengoreksi distorsi geometris yang disebabkan oleh efek pemendekan, tumpang tindih, dan bayangan topografi. Metode ini mensimulasikan geometri pencitraan SAR berdasarkan model elevasi digital, kemudian melakukan co-registrasi antara citra yang disimulasikan dengan citra asli untuk mengoreksi posisi piksel secara akurat sesuai dengan topografi permukaan yang sebenarnya, sekaligus menghasilkan keluaran akhir dalam proyeksi peta standar yang siap untuk analisis spasial.

Perhitungan RFDI

Mitchard dkk. (2012) [8] Indeks Degradasi Hutan Radar (RFDI) dihitung piksel demi piksel menggunakan rumus yang dikembangkan [16] sebagai berikut:

$$RFDI = \frac{\sigma^\circ_{HH} - \sigma^\circ_{HV}}{\sigma^\circ_{HH} + \sigma^\circ_{HV}} \quad (2)$$

Perhitungan dilakukan menggunakan nilai backscatter yang dihasilkan dari tahap prapemrosesan. Nilai RFDI berkisar antara -1 hingga +1 dan diinterpretasikan berdasarkan mekanisme hamburan yang dominan, istilah ini dipilih karena HH sensitif terhadap hamburan volume dan pantulan ganda, sedangkan HV sebagian besar sensitif terhadap hamburan volume. Penelitian [9] menyebutkan bahwa RFDI termasuk dalam tiga indeks polarimetrik radar yang paling umum digunakan dalam aplikasi pemantauan hutan

bersama dengan *Radar Vegetation Index* (RVI) dan *Canopy Structure Index* (CSI). Oleh karena itu, kami menemukan bahwa ini merupakan lapisan yang berguna dalam membantu membedakan berbagai jenis vegetasi, serta mengekstraksi lebih banyak informasi dari data radar polarisasi ganda, sebagai berikut:

Tabel 2. Interpretasi Nilai RFDI

RFDI	Interpretasi
-1.0 – 0.0	Sangat lebat (kelapa sawit dewasa / vegetasi lebat)
0.0 – 0.3	Sedang (kelapa sawit dewasa)
0.3 – 1.0	Jarang/terbuka (kelapa sawit muda)

Model dan Analisis

Model matematis yang menggambarkan hubungan antara nilai RFDI dan usia kelapa sawit dikembangkan dengan menggunakan regresi linier sederhana, dengan nilai rata-rata RFDI per blok sebagai variabel bebas (X) dan usia aktual tanaman sebagai variabel terikat (Y). Model regresi linier tersebut disusun dengan nilai rata-rata RFDI sebagai variabel bebas dan usia aktual sebagai variabel terikat. Kekuatan hubungan tersebut diukur menggunakan koefisien korelasi Pearson (r) [17] dihitung sebagai berikut (persamaan 3).

Pengelompokan Berdasarkan Kelompok Umur

Pengelompokan berdasarkan kelas umur dilakukan dengan membagi seluruh 16 blok perkebunan menjadi tiga kategori berdasarkan umur aktual tanaman pada saat pengambilan citra, mengikuti penelitian sebelumnya di lokasi yang sama [12].

Tabel 3 Klasifikasi Umur

Kondisi Canopy	Fase	Rentang Umur
Karang/Terbuka	Muda	0.5-3 Tahun
Sangat Lebat/Vegetasi Lebat	Dewasa	4-16 Tahun
Sedang/Sedang Tumbuh	Tua	>16 Tahun

Metrik Akurasi

Akurasi model dievaluasi menggunakan tiga metrik: RMSE (Root Mean Square Error) [18], MAE (*Mean Absolute Error*) [18], dan R^2 (koefisien determinasi) [12], dihitung sebagai berikut (persamaan 3).

$$\begin{aligned}
 MAE &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \\
 RMSE &= \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \\
 R^2 &= 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \\
 r &= \frac{(n \sum XY) - (\sum \bar{x} \sum \bar{y})}{\sqrt{[(n \sum X^2) - (\sum \bar{x})^2] [(n \sum Y^2) - (\sum \bar{y})^2]}}
 \end{aligned} \tag{3}$$

di mana y_i adalah nilai aktual (usia atau RFDI aktual) untuk blok i , $\hat{y}_i$ adalah nilai yang diprediksi oleh model, $\bar{y}$ adalah rata-rata dari semua nilai aktual, dan n adalah jumlah blok yang dianalisis. MAE dan RMSE menyatakan kesalahan prediksi dalam satuan yang sama dengan data asli. Nilai yang lebih kecil menunjukkan model yang lebih akurat; RMSE lebih sensitif terhadap nilai-nilai yang menyimpang daripada MAE karena kesalahan dikuadratkan [16]. R^2 menunjukkan proporsi varians data yang dijelaskan oleh model, berkisar antara 0 hingga 1, dengan nilai yang lebih mendekati 1 menunjukkan kesesuaian model yang lebih baik terhadap data yang diamati.

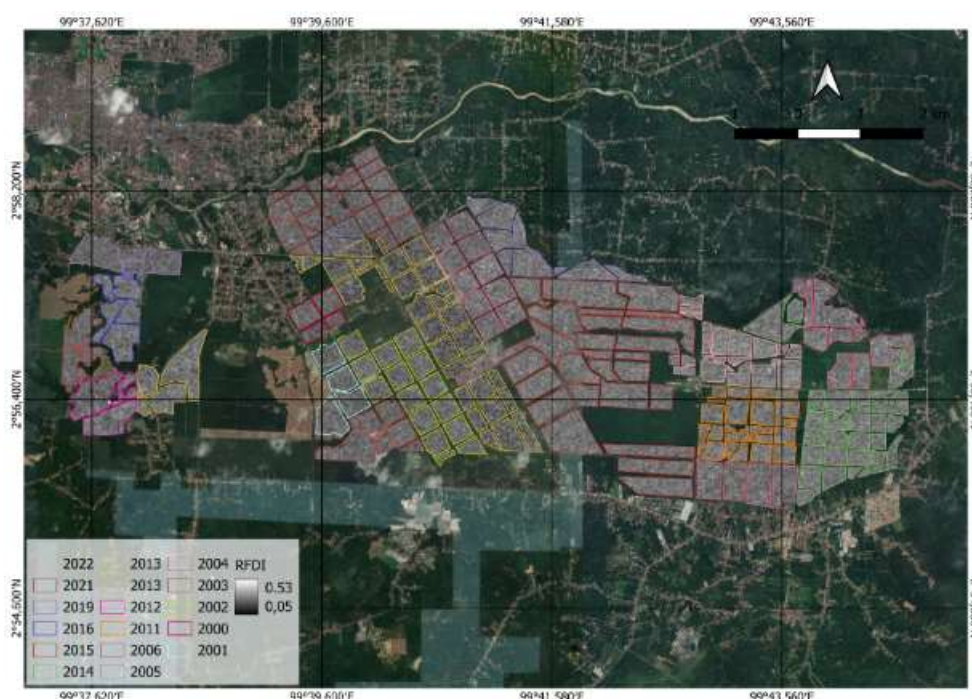
Kekuatan dan arah hubungan linier antara dua variabel diukur menggunakan koefisien korelasi Pearson (r), di mana x_i dan y_i adalah nilai variabel bebas (RFDI) dan variabel terikat (usia) untuk blok i , sedangkan $\bar{x}$ dan $\bar{y}$ adalah rata-rata masing-masing. Nilai r berkisar antara -1 hingga $+1$: nilai yang mendekati $+1$ menunjukkan hubungan linier positif yang kuat, nilai yang mendekati -1 menunjukkan hubungan linier negatif yang kuat, dan nilai yang mendekati 0 menunjukkan hubungan linier yang lemah

atau tidak ada. Evaluasi model akhir berfokus pada dua aspek: kesesuaian model sebagai alat untuk memperkirakan usia kelapa sawit, dan karakteristik pola sebaran yang teridentifikasi.

3. Hasil dan Pembahasan

Nilai RFDI dari Citra ALOS-2 PALSAR-2

Pemrosesan citra ALOS-2 PALSAR-2 dengan menggunakan pantulan balik polarisasi HH dan HV menghasilkan 16 nilai RFDI rata-rata per blok tahun tanam. Peta distribusi spasial RFDI (**Gambar 4**) menggambarkan variasi spasial di seluruh blok tanam yang sesuai dengan perbedaan usia aktual di lapangan. **Gambar 4** menunjukkan distribusi blok usia kelapa sawit di PTPN III Sei Dadap, yang dilapiskan dengan nilai RFDI dari citra ALOS-2 PALSAR-2. Nilai RFDI berkisar antara 0,0596 hingga 0,5373 dan menunjukkan variasi spasial antar blok berdasarkan tahun tanam yang berbeda. Secara umum, blok kelapa sawit yang sudah matang/produktif cenderung memiliki nilai RFDI yang lebih tinggi karena struktur kanopi yang lebih rapat serta interaksi yang lebih kompleks antara hamburan radar dengan kanopi, batang, dan permukaan tanah. Blok yang lebih muda, seperti yang ditanam pada tahun tanam 2021–2022, memiliki kanopi yang lebih terbuka, sehingga menghasilkan respons RFDI yang berbeda dan pengaruh yang lebih besar dari hamburan permukaan. Sementara itu, blok yang lebih tua, seperti yang ditanam pada tahun tanam 2000–2004, menunjukkan nilai RFDI yang lebih bervariasi akibat kemungkinan penurunan kepadatan kanopi atau perubahan struktur tegakan.



Gambar 4. Distribusi Spasial RFDI Untuk Tiap Blok Tahun Tanam Kelapa Sawit

Data tersebut diperoleh dari sampel blok perkebunan di PTPN III Sei Dadap yang mencatat usia tanam berkisar antara 0,5 hingga 22 tahun (tahun penanaman 2000–2022), sebagaimana ditunjukkan pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Rata-rata RFDI per blok berdasarkan tahun penanaman kelapa sawit di PTPN III Sei Dadap

Tahun Tanam	Age	HH σ^0 (linear)	HV σ^0 (linear)	RFDI
2000	22	0.14	0.02	0.20
2001	21	0.12	0.03	0.23
2002	20	0.12	0.02	0.26
2003	19	0.13	0.02	0.27
2004	18	0.18	0.02	0.29
2005	17	0.17	0.03	0.31
2006	16	0.15	0.02	0.48
2011	11	0.20	0.03	0.46
2012	10	0.24	0.04	0.41
2013	9	0.21	0.03	0.38
2014	8	0.22	0.03	0.36

Tahun Tanam	Age	HH σ° (linear)	HV σ° (linear)	RFDI
2015	7	0.24	0.03	0.35
2016	6	0.18	0.04	0.31
2019	3	0.12	0.03	0.23
2021	1	0.16	0.03	0.21
2022	0.5	0.22	0.03	0.13

Dalam penelitian ini, berdasarkan **Tabel 4**, nilai RFDI terendah tercatat pada blok penanaman tahun 2022 (usia 0,5 tahun) sebesar 0,1311, sedangkan nilai tertinggi tercatat pada blok penanaman tahun 2006 (usia 16 tahun) sebesar 0,4840. Secara umum, terdapat pola peningkatan nilai RFDI dari kelas umur muda ke kelas umur dewasa, diikuti oleh penurunan. Nilai RFDI terendah tercatat pada blok tanam tahun 2022 (usia 0,5 tahun), yaitu sebesar 0,1311, sedangkan nilai tertinggi tercatat pada blok tanam tahun 2006 (usia 16 tahun), yaitu sebesar 0,4840. Secara keseluruhan, nilai RFDI meningkat dari kelas usia muda ke kelas usia dewasa, diikuti oleh penurunan pada kelas usia tua, yang menunjukkan perubahan dalam mekanisme hamburan radar dominan seiring dengan perkembangan kanopi kelapa sawit.

Rentang nilai RFDI yang teramati di lokasi Asahan berkisar antara sekitar 0,05 hingga 0,53. Pohon kelapa sawit muda (0,5–3 tahun) menunjukkan nilai RFDI yang relatif rendah (0,13–0,24), yang mengindikasikan kanopi terbuka yang didominasi oleh hamburan permukaan sesuai dengan interpretasi [8], bahwa nilai RFDI sebesar 0,3–1,0 mencerminkan vegetasi yang jarang atau terbuka. Seiring bertambahnya usia pohon, kanopi secara bertahap menutup, sehingga meningkatkan hamburan balik HV akibat hamburan volume dari daun-daun kecil dan daun kelapa sawit, sementara hamburan balik HH dipengaruhi oleh mekanisme pantulan ganda dan volume; kombinasi ini mendorong peningkatan RFDI selama fase dewasa. Peta distribusi spasial RFDI menunjukkan bahwa blok yang ditanam pada tahun 2006 dan 2011 (berusia 16 dan 11 tahun) secara konsisten menunjukkan nilai RFDI yang lebih tinggi (0,48 dan 0,46), yang menegaskan sensitivitas pantulan SAR pita-L terhadap perkembangan struktural kelapa sawit.

Hubungan Usia RFDI dan Model Polinomial

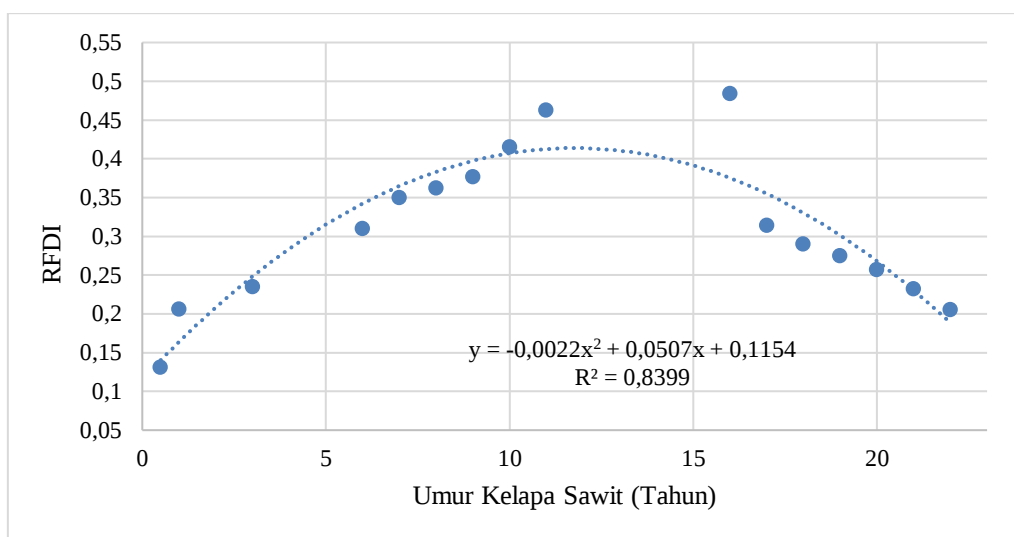
Diagram sebar antara RFDI dan usia kelapa sawit untuk keenam belas blok perkebunan menunjukkan pola huruf U terbalik yang jelas, meningkat dari sekitar 0,13 pada usia 0,5 tahun ke kisaran puncak 0,40 hingga 0,46 antara usia 9 dan 11 tahun, diikuti oleh penurunan bertahap hingga sekitar 0,21 pada usia 22 tahun. Regresi polinomial orde dua yang disesuaikan.

$$\hat{y} = -0.0022x^2 + 0.0507x + 0.1154, R^2 = 0.8399$$

Hal ini secara memadai menggambarkan tren kenaikan dan penurunan secara keseluruhan, meskipun tidak semua pengamatan individu sejalan erat dengan kurva yang diestimasi. Penyimpangan yang mencolok teramati pada usia 16 tahun, di mana nilai RFDI meningkat tajam menjadi sekitar 0,48, melampaui baik tren yang diestimasi maupun nilai-nilai yang tercatat pada usia 10 dan 11 tahun, yang sesuai dengan nilai maksimum yang diprediksi oleh model. Pengamatan ini mewakili nilai RFDI tertinggi di seluruh kumpulan data, terlepas dari perkiraan model bahwa RFDI seharusnya sudah mulai menurun setelah melewati puncaknya pada usia ini. Sebagai perbandingan, pengamatan yang mencakup rentang usia 17 hingga 22 tahun sangat sesuai dengan kurva yang disesuaikan, mengikuti tren penurunan yang mulus dan konsisten.

Di mana $\hat{y}$ adalah nilai RFDI yang diprediksi dan x adalah usia kelapa sawit dalam tahun. Nilai R^2 sebesar 0,84 menunjukkan bahwa model kuadratik tersebut menjelaskan sekitar 84% varians RFDI di seluruh 16 blok perkebunan. Hasil ini sebanding dengan model kuadratik berbasis RVI yang dikembangkan oleh [12] di lokasi yang sama menggunakan data Sentinel-1A pita C ($R^2 = 0,82$), yang menunjukkan bahwa RFDI pita L dari ALOS-2 PALSAR-2 memiliki daya penjas yang serupa atau sedikit lebih baik untuk pemodelan fenologi kelapa sawit. Puncak RFDI diprediksi terjadi pada usia 11 tahun (RFDI = 0,4627), yang sesuai dengan tahap ketika penutupan kanopi antar pohon mencapai nilai maksimumnya, sejalan dengan fase plateau hasil panen pada pohon dewasa (8–14 YAP) yang dijelaskan oleh Georges dkk., 2020 [4], mengacu pada empat fase produktivitas kelapa sawit yang diidentifikasi oleh Fairhurst & Griffiths (2014). Selama fase ini, hamburan volume (HV) paling kuat akibat kepadatan kanopi yang tertinggi, sementara hamburan pantulan ganda (HH) juga tetap tinggi akibat interaksi batang-tanah di bawah kanopi. Setelah usia 16–17 tahun, nilai RFDI mulai menurun seiring dengan menipisnya kanopi, daun-daun yang mulai layu, dan

perubahan proporsi permukaan batang-tanah yang terpapar, yang merupakan ciri khas fase penurunan hasil (>15 YAP).



Gambar 5. Hubungan Antara Nilai RFDI dan Usia pada Pohon Kelapa Sawit

Evaluasi Akurasi Model

Akurasi model secara keseluruhan dievaluasi menggunakan MAE, RMSE, R^2 , dan koefisien korelasi Pearson pada seluruh 17 blok (Tabel 5). Model linier secara keseluruhan menghasilkan nilai R^2 yang sangat rendah (0,010), yang memang sudah diperkirakan mengingat sifat kuadratik dari hubungan usia RFDI di seluruh rentang usia. Menerapkan model linier tunggal pada kumpulan data dengan pola huruf U terbalik secara inheren menghasilkan korelasi linier yang mendekati nol, karena tren positif dan negatif pada kelas usia yang berbeda saling meniadakan satu sama lain. Hal ini menegaskan bahwa hubungan usia RFDI tidak dapat dijelaskan secara memadai oleh model linier global tunggal, melainkan memerlukan pendekatan polinomial atau model regresi khusus kelas.

Model polinomial keseluruhan ($R^2 = 0,8399$) dan model polinomial khusus kelas (Tabel 6) secara signifikan lebih unggul daripada model linier global. MAE sebesar 0,079 dan RMSE sebesar 0,094 (pada skala RFDI -1 hingga +1) menunjukkan bahwa kesalahan prediksi absolut rata-rata kurang dari 0,1 unit RFDI, yang dapat diterima untuk aplikasi pemantauan skala blok perkebunan. RMSE yang sedikit lebih tinggi dibandingkan MAE menunjukkan adanya beberapa blok dengan residual prediksi yang lebih besar, yang kemungkinan besar disebabkan oleh blok-blok dalam rentang usia transisi (sekitar 15–17 tahun) di mana RFDI mendekati puncaknya dan kurva polinomial paling sensitif terhadap perbedaan usia yang kecil.

Tabel 5. Metrik Akurasi Keseluruhan dari Model Penentuan Umur Pohon Kelapa Sawit Berbasis RFDI

Metric	Value
MAE	0.0794
RMSE	0.0942
R^2	0.0100
r	0.100

Model polinomial keseluruhan ($R^2 = 0,8399$) dan model polinomial khusus kelas usia (Tabel 6) secara signifikan lebih unggul daripada model linier global. MAE sebesar 0,079 dan RMSE sebesar 0,094 (pada skala RFDI dari -1 hingga +1) menunjukkan bahwa kesalahan prediksi absolut rata-rata kurang dari 0,1 unit RFDI dapat diterima untuk aplikasi pemantauan skala blok perkebunan. RMSE yang sedikit lebih tinggi dibandingkan MAE menunjukkan adanya blok dengan residual yang lebih besar, yang kemungkinan besar terjadi pada rentang usia transisi (sekitar 15–17 tahun) di mana RFDI mendekati puncaknya dan kurva polinomial paling sensitif terhadap perbedaan usia yang kecil. Dibandingkan dengan model RVI pita C dari [12], yang melaporkan nilai $R^2 = 0,82$ untuk perkebunan yang sama, model RFDI pita-L dari ALOS-2 PALSAR-2 mencapai akurasi yang sebanding ($R^2 = 0,84$) sekaligus menawarkan keunggulan tambahan berupa penetrasi kanopi yang lebih dalam. Panjang gelombang pita-L (23 cm) sensitif terhadap interaksi pantulan ganda antara batang pohon dan tanah serta terhadap struktur di bawah kanopi, sehingga memberikan informasi yang melengkapi indeks pita-C. Kelas “Dewasa” dan “Tua” yang mencakup rentang

usia paling penting secara komersial (4–22 tahun) mencapai nilai R^2 masing-masing sebesar 0,953 dan 0,996, yang menegaskan bahwa pemantauan berbasis RFDI dapat secara andal membedakan subkelompok usia dalam fase-fase kritis ini. Hal ini menunjukkan bahwa RFDI dari ALOS-2 PALSAR-2 merupakan indeks yang layak dan relevan secara operasional untuk estimasi usia kelapa sawit di wilayah tropis dengan tutupan awan yang tinggi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan dan mengevaluasi pendekatan pemodelan berbasis kelas umur untuk tegakan kelapa sawit dengan menggunakan Indeks Degradasi Hutan Radar (RFDI) yang diperoleh dari citra SAR pita-L ALOS-2 PALSAR-2. Berdasarkan 16 blok perkebunan di PTPN III Sei Dadap, dengan umur tegakan berkisar antara 0,5 hingga 22 tahun, hasil penelitian menunjukkan bahwa RFDI cukup sensitif terhadap variasi struktural yang berkaitan dengan umur di perkebunan kelapa sawit. RFDI secara keseluruhan menunjukkan pola nonlinier berbentuk huruf U terbalik, yaitu meningkat dari tegakan muda ke tegakan dewasa dan menurun pada tegakan yang lebih tua. Pola ini menunjukkan bahwa tahap pertumbuhan kelapa sawit memengaruhi mekanisme hamburan radar yang dominan, terutama melalui perubahan tingkat penutupan kanopi, struktur daun, interaksi batang dengan tanah, serta heterogenitas tegakan. Model secara keseluruhan mampu menjelaskan 83,99% variasi RFDI, yang menegaskan bahwa usia tegakan memiliki pengaruh yang kuat terhadap respon RFDI yang diperoleh dari SAR pita-L.

Secara keseluruhan, RFDI yang diperoleh dari ALOS-2 PALSAR-2 memiliki potensi besar sebagai indikator yang tidak terpengaruh oleh awan untuk memantau perkembangan tegakan kelapa sawit pada skala blok perkebunan. Penelitian selanjutnya sebaiknya mencakup lokasi perkebunan tambahan, pengambilan data SAR multitemporal, serta validasi lapangan independen guna meningkatkan ketahanan model dan mendukung penerapan operasional yang lebih luas.

5. Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada JAXA atas penyediaan citra ALOS-2 PALSAR-2 yang digunakan dalam penelitian ini. Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) dan Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia (Kemendikti Saintek) atas dukungan pendanaan yang diberikan dalam penelitian ini. Terima kasih kepada PT Perkebunan Nusantara III Sei Dadap, Asahan, Sumatera Utara. Kepada LP2M Itenas Bandung, Program Studi Teknik Geodesi Itenas Bandung, serta *Center for Environmental Remote Sensing (CEReS)*, Chiba University.

6. Singkatan

SAR	<i>Synthetic Aperture Radar (Radar Apertur Sintetis)</i>
RFDI	<i>Radar Forest Degradation Index (Indeks Degradasi Hutan Radar)</i>
ALOS	<i>Advanced Land Observing Satellite</i>
PALSAR	<i>Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar</i>
PTPN	<i>Perusahaan Terbatas Perkebunan Nusantara (dalam konteks ini PTPN III)</i>
PPKS	<i>Pusat Penelitian Kelapa Sawit</i>
FBD	<i>Fine Beam Dual</i>
HH	<i>Polarisasi Horisontal-Horisontal (arah pancar dan terima gelombang radar)</i>
HV	<i>Polarisasi Horisontal-Vertikal (arah pancar dan terima gelombang radar)</i>
MSM	<i>Minyak Sawit Mentah</i>
TBS	<i>Tandan Buah Segar</i>
YAP	<i>Years After Planting (Tahun Setelah Penanaman)</i>
FFB	<i>Fresh Fruit Bunch</i>
RVI	<i>Radar Vegetation Index</i>
CSI	<i>Canopy Structure Index</i>
JAXA	<i>Japan Aerospace Exploration Agency (Badan Eksplorasi Antariksa Jepang)</i>
ESA SNAP	<i>European Space Agency Sentinel Application Platform (perangkat lunak pemrosesan citra)</i>
DN	<i>Digital Number (Angka Digital)</i>

CF	Calibration Factor (Faktor Kalibrasi)
dB	Desibel (satuan intensitas atau penguatan sinyal radar)
SRM DEM	Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model
QGIS	Quantum Geographic Information System (perangkat lunak analisis spasial/SIG)
MAE	Mean Absolute Error (Kesalahan Absolut Rata-rata)
RMSE	Root Mean Square Error (Akar Kuadrat Kesalahan Rata-rata)
R ²	Koefisien Determinasi (metrik evaluasi akurasi model statistik)
LPDP	Lembaga Pengelola Dana Pendidikan
LP2M	Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat
CEReS	Center for Environmental Remote Sensing (Universitas Chiba, Jepang)

7. Referensi

- [1] BPS-statistics, *Statistik Kelapa Sawit Indonesia: Indonesia Oil Palm Statistics 2023*, vol. 17. Badan Pusat Statistik, 2024.
- [2] BPS-statistics, *Statistik Kelapa Sawit Indonesia: Indonesia Oil Palm Statistics 2022*. BPS–Statistics Indonesia, 2023. doi: 5504003.
- [3] S. Darmawan, W. Takeuchi, A. Haryati, R. A. M. Najib, dan M. Na’Aim, “An investigation of age and yield of fresh fruit bunches of oil palm based on ALOS PALSAR 2,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 37, no. 1, 2016, doi: 10.1088/1755-1315/37/1/012037.
- [4] G. K. Kome dan F. O. Tabi, “Towards Sustainable Oil Palm Plantation Management: Effects of Plantation Age and Soil Parent Material,” *Agric. Sci.*, vol. 11, no. 01, hal. 54–70, 2020, doi: 10.4236/as.2020.111004.
- [5] N. E. Mohd Najib, K. D. Kanniah, A. P. Cracknell, dan L. Yu, “Synergy of active and passive remote sensing data for effective mapping of oil palm plantation in Malaysia,” *Forests*, vol. 11, no. 8, 2020, doi: 10.3390/F11080858.
- [6] K. Xu *et al.*, “A new machine learning approach in detecting the oil palm plantations using remote sensing data,” *Remote Sens.*, vol. 13, no. 2, hal. 1–17, 2021, doi: 10.3390/rs13020236.
- [7] A. Oon, K. D. Ngo, R. Azhar, A. Ashton-Butt, A. M. Lechner, dan B. Azhar, “Assessment of ALOS-2 PALSAR-2L-band and Sentinel-1 C-band SAR backscatter for discriminating between large-scale oil palm plantations and smallholdings on tropical peatlands,” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*. [Daring]. Tersedia pada: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352938517301969>
- [8] E. T. A. Mitchard *et al.*, “Mapping tropical forest biomass with radar and spaceborne LiDAR in Lopé National Park, Gabon: Overcoming problems of high biomass and persistent cloud,” *Biogeosciences*, vol. 9, no. 1, hal. 179–191, 2012, doi: 10.5194/bg-9-179-2012.
- [9] Sassan Saatchi, “SAR Methods for Mapping and Monitoring Forest Biomass,” in *The SAR handbook*, E. C. Africa Ixmucane Flores-Anderson, Kelsey E. Herndon, Rajesh Bahadur Thapa, Ed., California, 2019, 5, hal. 207-. doi: : 10.25966/hbm1-ej07.
- [10] Mitchard, Edward TA, *et al.* "Using satellite radar backscatter to predict above-ground woody biomass: A consistent relationship across four different African landscapes." *Geophysical Research Letters* 36.23 (2009).
- [11] I. Carolita *et al.*, “Comparison of Optic Landsat-8 and SAR Sentinel-1 in Oil Palm Monitoring, Case Study : Asahan, North Sumatera, Indonesia,” *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 280, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1755-1315/280/1/012015.
- [12] R. Hernawati, A. B. Harto, S. Darmawan, dan K. Wikantika, “Leaf area index retrieval of oil palm plantation by Sentinel-1 satellite radar imaging,” *2023 8th Asia-Pacific Conf. Synth. Aperture Radar*, hal. 1–5, 2023, doi: 10.1109/APSAR58496.2023.10388510.
- [13] Singh, Minerva, *et al.* "Remote sensing-based landscape indicators for the evaluation of threatened-bird habitats in a tropical forest." *Ecology and Evolution* 7.13 (2017): 4552-4567.
- [14] N. C. Wiederkehr *et al.*, “Discriminating Forest Successional Stages , Forest,” *Remote Sens.*, vol. 12, no. 3512, hal. 1–30, 2020.
- [15] H. Chen, J. C. White, dan A. Beaudoin, “Derivation and assessment of forest-relevant polarimetric indices using RCM compact-pol data,” *Int. J. Remote Sens.*, vol. 44, no. 1, hal. 381–406, 2023, doi: 10.1080/01431161.2022.2164528.

-
- [16] Saatchi, Sassan S., et al. "Benchmark map of forest carbon stocks in tropical regions across three continents." *Proceedings of the national academy of sciences* 108.24 (2011): 9899-9904.
- [17] N. P. Daulay, A. Alyani Putri, O. N. Ramadani, E. V. Agata, dan M. Hamid, "Analisis Perkembangan Produksi Kelapa Sawit Berdasarkan Luas Lahan dan Jumlah Pabrik Kelapa Sawit (Studi Pada Kabupaten Rokan Hulu)," *J. Pengabd. Masy. dan Ris. Pendidik.*, vol. 4, no. 2, hal. 11335–11342, 2025, [Daring]. Tersedia pada: <https://doi.org/10.31004/jerkin.v4i2.3935>
- [18] M. Irpan dan U. Rio, "Model Prediksi Jumlah Produksi Kelapa Sawit Menggunakan Regresi Linear Berganda di PT.Surya Argolika Reksa," *Besemah Teknol. Inf. dan Komput.*, vol. 16, no. 2, hal. 122–130, 2025.