

Pemetaan Nasional Umur Kelapa Sawit di Indonesia Menggunakan Model Regresi Backscatter Sentinel-1A Berbasis *Google Earth Engine*

Muhammad Gentafani Muharram¹, Rika Hernawati^{1*}, Soni Darmawan¹, Dhimas Wiratmoko²

¹Program Studi Teknik Geodesi, Institut Teknologi Nasional, Bandung

²Pusat Penelitian Kelapa Sawit (PPKS), Medan, Sumatera Utara

*Koresponden email: rikah@itenas.ac.id

Diterima: 10 Juli 2026

Disetujui: 16 Juli 2026

Abstract

Accurate spatial information on oil palm plantation age is essential for effective estate management, yield forecasting, replanting planning, and taxation across Indonesia, the world's largest oil palm producer. This study aimed to implement an existing Synthetic Aperture Radar backscatter regression model to estimate and map the national distribution of oil palm age across Indonesia using a cloud-based satellite data processing platform. Satellite imagery was preprocessed through speckle filtering, followed by extraction of dual-polarization backscatter values restricted to national oil palm plantation boundaries. The resulting national distribution showed that productive-age stands dominate the major oil palm producing regions, while younger stands are concentrated in recently expanded plantation frontiers and older stands are concentrated in long-established state-owned estates. Validation against field reference data from a plantation site in North Sumatra showed a very strong correlation between model-estimated and actual planting age. These findings confirm that implementing an existing backscatter regression model provides a reliable and scalable basis for national-scale oil palm age mapping in tropical regions.

Keywords: *backscatter, google earth engine, oil palm age, SAR remote sensing, sentinel-1A*

Abstrak

Informasi spasial yang akurat mengenai usia perkebunan kelapa sawit sangat penting bagi pengelolaan perkebunan yang efektif, peramalan hasil panen, perencanaan penanaman kembali, serta penetapan pajak di seluruh Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar di dunia. Penelitian ini bertujuan untuk mengimplementasikan model regresi backscatter Radar Apertur Sintetis yang telah ada guna mengestimasi dan memetakan distribusi usia kelapa sawit secara nasional di seluruh Indonesia menggunakan platform pemrosesan data satelit berbasis komputasi awan. Citra satelit diproses terlebih dahulu melalui penyingkiran speckle, dilanjutkan dengan ekstraksi nilai backscatter dua polarisasi yang dibatasi pada batas perkebunan kelapa sawit nasional. Distribusi nasional yang dihasilkan menunjukkan bahwa tegakan usia produktif mendominasi wilayah-wilayah penghasil kelapa sawit utama, sementara tegakan usia muda terkonsentrasi di kawasan perluasan perkebunan yang baru, dan tegakan usia tertua terkonsentrasi di perkebunan negara yang telah lama mapan. Validasi terhadap data referensi lapangan dari sebuah lokasi perkebunan di Sumatera Utara menunjukkan korelasi yang sangat kuat antara usia hasil estimasi model dan usia tanam aktual. Temuan ini menegaskan bahwa implementasi model regresi backscatter yang telah ada memberikan dasar yang andal dan dapat diskalakan untuk pemetaan usia kelapa sawit skala nasional di wilayah tropis.

Kata Kunci: *backscatter, google earth engine, umur kelapa sawit, SAR penginderaan jauh, sentinel-1A*

1. Pendahuluan

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan tanaman palem yang dibudidayakan di lebih dari 43 negara tropis, khususnya pada wilayah yang berada di antara 10° Lintang Utara hingga 10° Lintang Selatan di sekitar garis ekuator [1]. Sehingga Indonesia merupakan negara produsen kelapa sawit terbesar di dunia dengan luas areal perkebunan mencapai 16,83 juta hektar dan total produksi sebesar 46,82 juta ton pada tahun 2022, menjadikan Indonesia sebagai penghasil utama *Crude Palm Oil* (CPO) secara global [2]. Pengelolaan perkebunan kelapa sawit yang efektif memerlukan informasi spasial yang akurat tentang sebaran umur tanaman di seluruh wilayah Indonesia [3]. Informasi umur kelapa sawit sangat penting karena berkaitan langsung dengan produktivitas, estimasi produksi Tandan Buah Segar (TBS), perencanaan replanting, dan pengelolaan perkebunan secara keseluruhan [4]. Secara konvensional, informasi umur tanaman diperoleh dari catatan manajemen perkebunan yang tidak selalu tersedia secara spasial dan tidak

efisien untuk dipetakan pada skala nasional, sehingga diperlukan pendekatan penginderaan jauh yang mampu menghasilkan peta sebaran umur kelapa sawit secara komprehensif [3] [4].

Penginderaan jauh merupakan teknologi yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan informasi tematik terkait pertumbuhan, fenologi, dan umur tanaman kelapa sawit. Kemampuan tersebut didukung oleh pola budidaya kelapa sawit yang tersusun secara sistematis, di mana setiap blok perkebunan umumnya ditanam pada tahun yang sama sehingga memiliki keseragaman umur tanaman. Di samping itu, luasnya areal perkebunan serta karakteristik kanopi kelapa sawit berbentuk melingkar menjadi faktor yang mendukung efektivitas identifikasi dan pemantauan tanaman melalui penginderaan jauh (**Gambar 1**) [5].



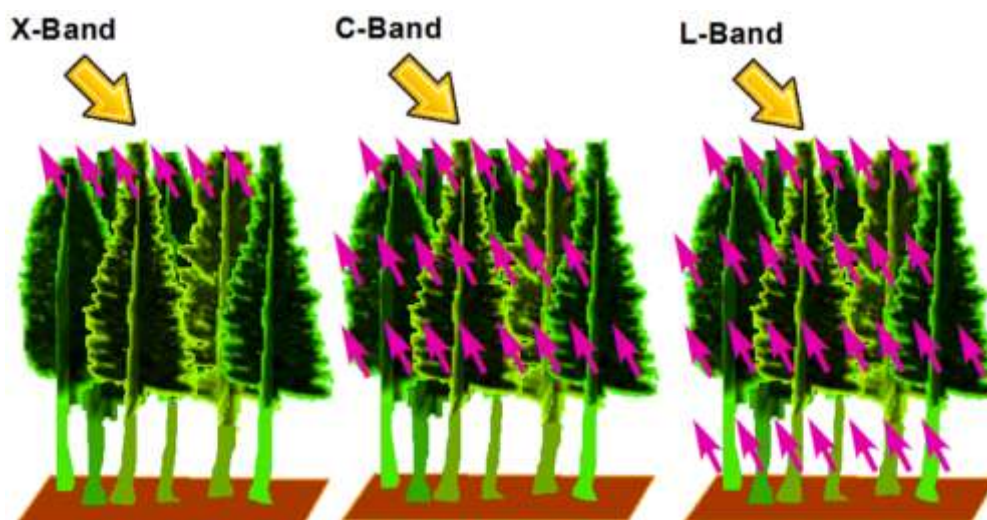
Gambar 1: Perkebunan Kelapa Sawit yang mempunyai ciri khas berupa kanopi pohon atau daun yang melingkar [6].

Teknologi *Synthetic Aperture Radar* (SAR) menawarkan keunggulan signifikan dibanding sensor optis dalam pemantauan perkebunan kelapa sawit di Indonesia. SAR mampu menembus tutupan awan dan mengumpulkan data secara kontinu sepanjang waktu siang maupun malam, sehingga sangat sesuai untuk pemantauan vegetasi di wilayah tropis seperti Indonesia yang seringkali tertutup awan. Nilai backscatter SAR merupakan ukuran energi gelombang radar yang dipantulkan kembali dari permukaan target, dan sangat dipengaruhi oleh karakteristik struktural dan dielektrik vegetasi seperti geometri kanopi, kepadatan tajuk, kandungan air, dan kekasaran permukaan. Seiring dengan pertumbuhan kelapa sawit dari fase muda ke fase tua, karakteristik struktural pohon berubah secara signifikan mencakup peningkatan tinggi batang, luas tajuk, dan densitas kanopi, yang secara langsung mempengaruhi nilai backscatter SAR. Data Sentinel-1A membuktikan perubahan nilai *backscatter* SAR yang berkorelasi dengan pertumbuhan kelapa sawit ini menjadi dasar pemanfaatan data SAR untuk estimasi dan pemetaan umur perkebunan sawit menggunakan pendekatan regresi [5] [6] [7].

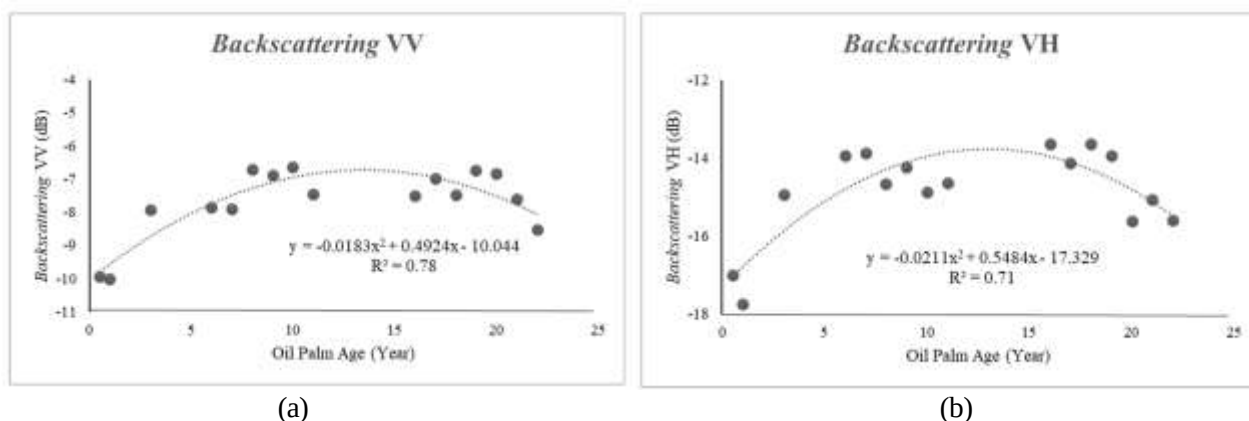
Interaksi antara gelombang radar dan vegetasi dipengaruhi oleh panjang gelombang yang digunakan, sehingga setiap band radar memiliki karakteristik penetrasi yang berbeda terhadap struktur vegetasi. **Gambar 2** menunjukkan bahwa gelombang X-band hanya sensitif terhadap bagian daun dan ranting, C-band mampu berinteraksi hingga bagian daun dan cabang kecil, sedangkan L-band dapat menembus hingga bagian cabang yang lebih besar. Sementara itu, P-band memiliki kemampuan penetrasi paling dalam hingga mencapai cabang dan batang tanaman. Perbedaan kemampuan penetrasi tersebut menyebabkan setiap panjang gelombang menghasilkan karakteristik hamburan balik (*backscatter*) yang berbeda sesuai dengan struktur biofisik vegetasi yang diamati, sehingga pemilihan band radar menjadi faktor penting dalam pemodelan fenologi dan estimasi umur kelapa sawit [8].

Berbagai penelitian telah membuktikan potensi data SAR untuk estimasi umur kelapa sawit. Penelitian sebelumnya mengkaji model *scattering* kelapa sawit menggunakan data polarimetrik SAR multiband dari TerraSAR-X (X-band), Sentinel-1A (C-band), dan ALOS PALSAR-2 (L-band) di Asahan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data C-band Sentinel-1A pada polarisasi VH dan VV menghasilkan model nonlinier dengan koefisien determinasi sebesar $R^2 = 0,56$ dan $R^2 = 0,89$ terhadap umur kelapa sawit, sedangkan X-band HH menghasilkan $R^2 = 0,65$ [9]. Penelitian lain yang menggunakan data Sentinel-1A polarisasi HH dan HV untuk memantau pertumbuhan dan umur kelapa sawit di Asahan, Sumatera Utara, menunjukkan bahwa model regresi nonlinier (kuadratik) menghasilkan nilai *backscatter* SAR yang meningkat dari fase umur muda hingga sekitar 13 tahun, kemudian menurun seiring berkurangnya produktivitas tanaman [10]. Selain itu, penelitian lain juga menunjukkan adanya korelasi kuadratik antara umur kelapa sawit dan nilai *backscatter* Sentinel-1A pada polarisasi VV dan VH di Asahan, serta

menegaskan bahwa proses pengolahan data dapat dilakukan menggunakan platform *Google Earth Engine* (GEE) [11].



Gambar 2: Interaksi panjang gelombang radar dengan vegetasi [8].



Gambar 3: Model backscatter fenologi kelapa sawit polarisasi (a) VV dan (b) VH [12]

Membangun di atas dasar penelitian tersebut, telah dikembangkan model regresi kuadratik antara nilai backscatter Sentinel-1A polarisasi VV dan VH dengan umur kelapa sawit di PTPN III Sei Dadap, Asahan. Model yang dihasilkan adalah VV: $y = -0,0183x^2 + 0,4924x - 10,044$ dan VH: $y = -0,0211x^2 + 0,5484x - 17,329$, dengan nilai R^2 sebesar 0,82 menggunakan data backscatter dari 16 blok kebun berumur 0,5 hingga 22 tahun (**Gambar 3**). Pola kuadratik pada kedua model menunjukkan bahwa nilai backscatter meningkat dari umur muda seiring pertumbuhan kanopi, mencapai puncak pada umur pertengahan, kemudian menurun pada umur tua seiring dengan menurunnya densitas kanopi dan produktivitas pohon. Model kuadratik ini secara matematis merepresentasikan siklus pertumbuhan biologis kelapa sawit yang dimulai dari fase vegetatif, berkembang ke fase generatif produktif, hingga memasuki fase penurunan produktivitas. Meskipun model tersebut dibangun di Asahan, potensi penerapannya untuk pemetaan sebaran umur kelapa sawit di seluruh Indonesia menggunakan data Sentinel-1A yang tersedia secara global belum pernah dilakukan [12].

Sentinel-1A merupakan satelit SAR C-band milik European Space Agency (ESA) yang beroperasi pada frekuensi 5,405 GHz dengan panjang gelombang sekitar 5,55 cm dan menyediakan data dual polarisasi VV dan VH secara rutin dengan resolusi spasial 10 meter pada mode Interferometric Wide (IW) swath, dan tersedia secara gratis melalui platform *Google Earth Engine* [13]. Keunggulan Sentinel-1A dalam menembus tutupan awan menjadikannya sangat sesuai untuk pemetaan skala nasional Indonesia yang kondisi atmosfernya sering tertutup awan [14].

Pemanfaatan *Google Earth Engine* (GEE) sebagai platform komputasi berbasis cloud memungkinkan pengolahan data Sentinel-1A dalam skala nasional yang sangat besar secara efisien. GEE menyediakan akses langsung terhadap arsip data Sentinel-1A global dan berbagai fungsi pemrosesan SAR

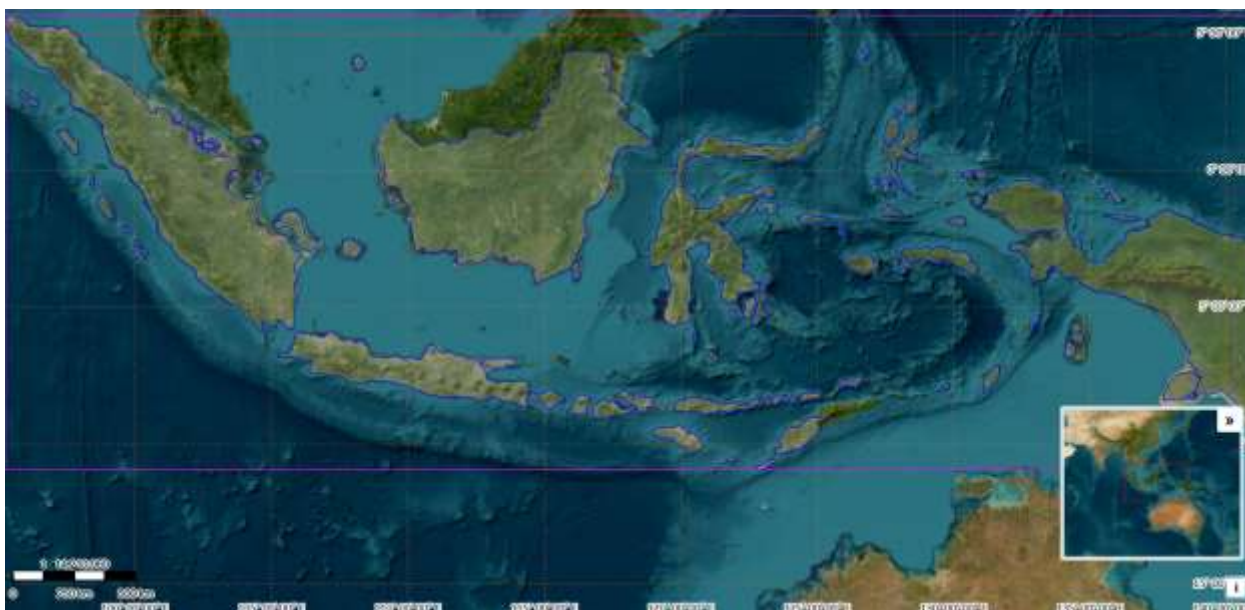
yang memungkinkan ekstraksi nilai backscatter VV dan VH per piksel dalam skala nasional tanpa memerlukan perangkat keras komputasi yang tinggi. Kemampuan GEE dalam mengelola dan memproses data geospasial berskala besar ini menjadi komponen kunci dalam pemetaan sebaran umur kelapa sawit secara nasional berbasis model regresi backscatter Sentinel-1A.

Berdasarkan kajian literatur di atas, masih terdapat peluang penelitian terkait penerapan model regresi kuadratik berbasis *backscatter* Sentinel-1A polarisasi VV dan VH untuk pemetaan sebaran umur kelapa sawit pada skala nasional menggunakan platform Google Earth Engine. Penelitian ini mengimplementasikan kedua model tersebut secara bersamaan pada data Sentinel-1A skala nasional, kemudian membandingkan hasil estimasi umur yang diperoleh dari model VV dan model VH, serta mengevaluasi kinerja masing-masing model menggunakan data validasi lapangan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan peta sebaran umur kelapa sawit skala nasional berbasis model regresi *backscatter* SAR serta memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pemantauan perkebunan kelapa sawit yang efisien melalui pemanfaatan data SAR *open-access* dan platform Google Earth Engine.

2. Metode Penelitian

2.1 Area Studi

Penelitian ini mencakup seluruh wilayah Republik Indonesia, yang terletak antara sekitar 6° LU hingga 11° LS dan 95° BT hingga 141° BT. Indonesia adalah sebuah negara kepulauan yang membentang di dua benua dan dua samudra, sehingga menjadikannya negara kepulauan terbesar di dunia. Wilayah penelitian mencakup seluruh kawasan perkebunan kelapa sawit di seluruh provinsi di Indonesia, termasuk kawasan produksi utama di Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua.



Gambar 4: Area studi

2.2 Metodologi

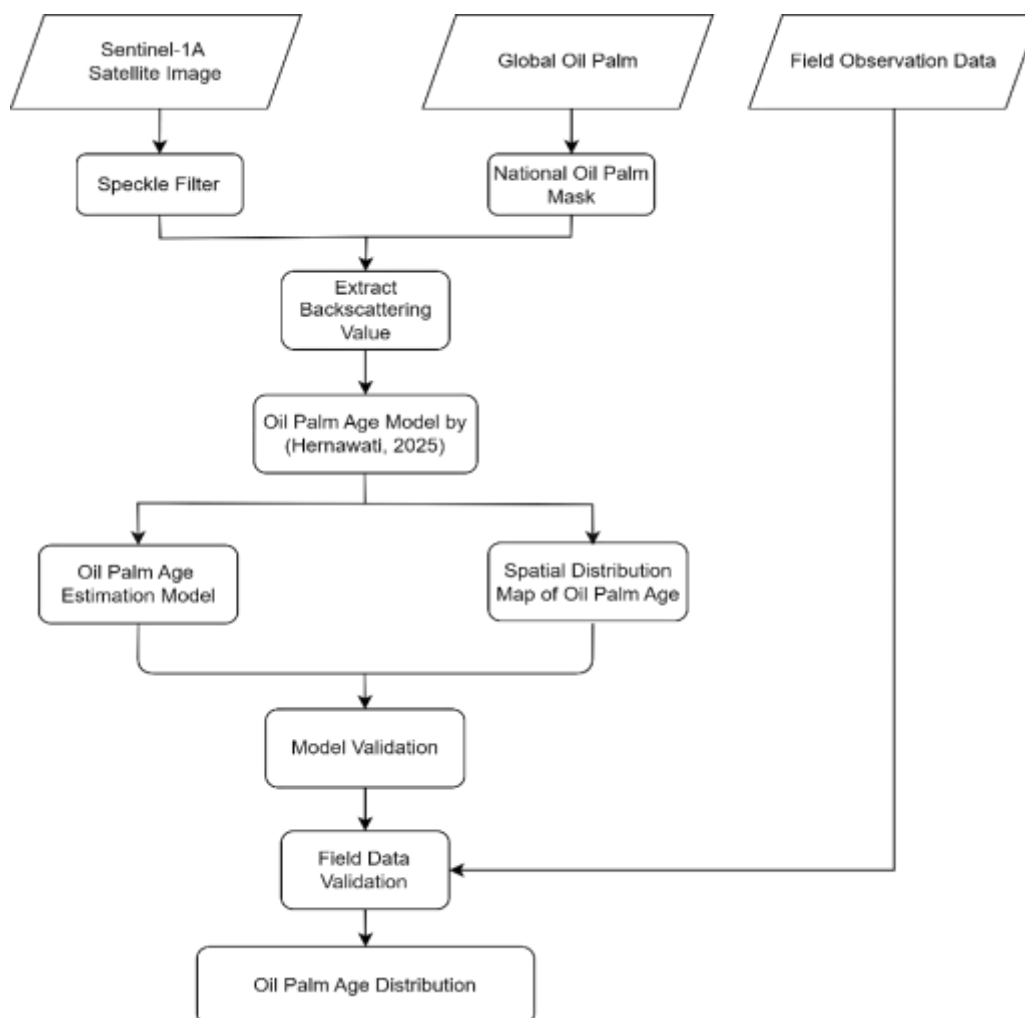
Penelitian ini menggunakan citra Sentinel-1A *Ground Range Detected* (GRD) sebagai data utama. Karakteristik dan spesifikasi citra yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Karakteristik Sentinel-1A [13]

Parameter	Spesifikasi
Tanggal akuisisi	30 Desember 2025
Orbit Akuisisi	Descending
Mode pencitraan	IW1, IW2, IW3
Frekuensi	C-Band (5.4 GHz)
Polarisasi	VV-VH
Produk data	Level-1 SLC
Sudut datang (Incidence angle)	36.6°- 45.9°
Lebar sapuan (Ground Swath Width)	250 km
Panjang irisan (slice)	170 km

Parameter	Spesifikasi
Resolusi (range × azimuth)	2.7 × 22 m 3.5 × 22 m
Jarak piksel	2.3 × 14.1 m
Resolusi temporal	12 days

Metodologi penelitian ini dimulai dari pengumpulan data citra satelit dan data lapangan, pemrosesan citra satelit Sentinel-1A dilakukan pada platform Google Earth Engine, estimasi umur kelapa sawit menggunakan model matematis, dan validasi (**Gambar 5**).



Gambar 5: Metode Penelitian

2.3 Pra-pemrosesan Data

Seluruh citra Sentinel-1A telah diproses terlebih dahulu di platform Google Earth Engine. Di platform *Google Earth Engine*, citra Sentinel telah diproses terlebih dahulu melalui Kalibrasi Radiometrik dan Koreksi Medan. Namun, *speckle filter* tidak termasuk dalam alur kerja pra pemrosesan bawaan yang disediakan oleh Google Earth Engine. Oleh karena itu, proses speckle filter secara manual diterapkan untuk mengurangi gangguan speckle dan meningkatkan kualitas citra sebelum dilakukan analisis lebih lanjut.

2.4 Fitur ekstraksi

Dari citra Sentinel-1A yang telah diproses awal dan disusun menjadi mosaik, nilai backscatter pada polarisasi VV (transmisi vertikal, penerimaan vertikal) dan VH (transmisi vertikal, penerimaan horizontal) diekstraksi sebagai fitur masukan utama untuk model estimasi usia. Ekstraksi dibatasi pada piksel yang berada di dalam masker batas perkebunan kelapa sawit nasional, yang berfungsi sebagai domain spasial analisis. Untuk setiap piksel kelapa sawit yang valid, nilai rata-rata backscatter VV dan VH dihitung dalam unit agregasi spasial yang telah ditentukan, yang sesuai dengan blok perkebunan individu atau unit statistik zona. Statistik backscatter per zona yang dihasilkan, termasuk rata-rata, median, simpangan baku, nilai minimum, dan nilai maksimum, dicatat sebagai masukan untuk langkah pemodelan usia berikutnya.

2.5 Pemodelan Usia

Usia kelapa sawit diperkirakan dengan melakukan inversi terhadap model regresi kuadratik, yang menggambarkan hubungan antara nilai backscatter Sentinel-1A dan usia kelapa sawit. Model-model tersebut memiliki bentuk sebagai berikut:

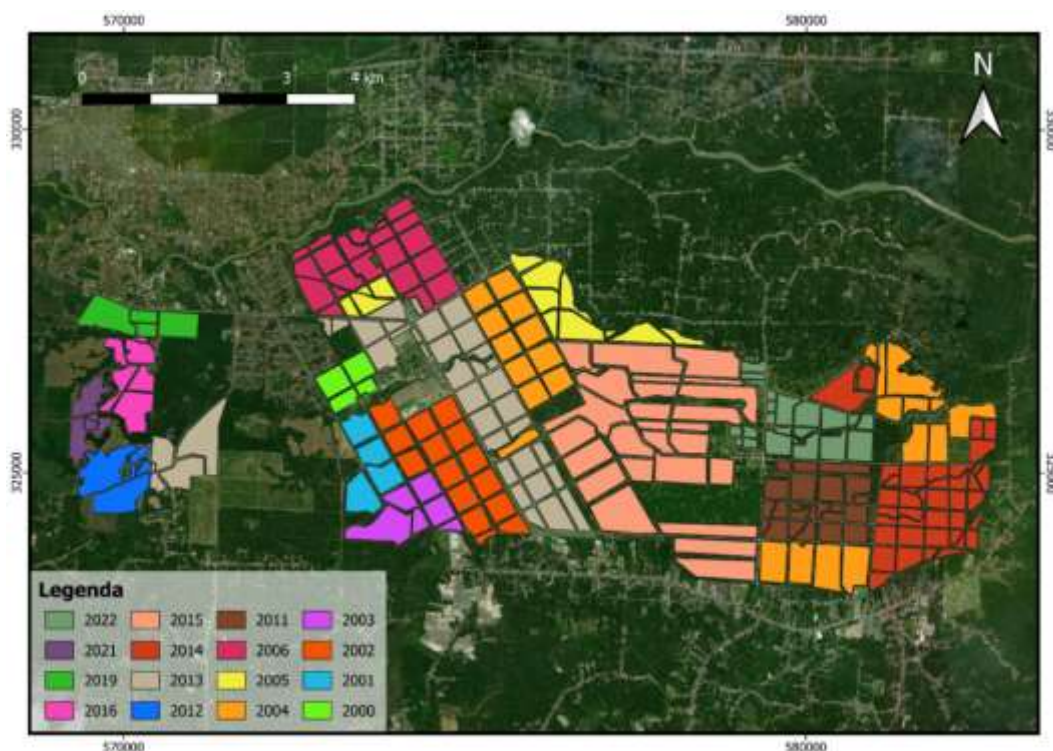
$$VV: y = -0.0183x^2 + 0.4924x - 10.044, \quad (1)$$

$$VH: y = -0.0211x^2 + 0.5484x - 17.329. \quad (2)$$

Di mana x mewakili perkiraan usia kelapa sawit dalam satuan tahun dan variabel y mewakili nilai polarisasi hamburan. Model-model ini awalnya dikalibrasi menggunakan data lapangan dari PT. Perkebunan Nusantara III, Sei Dadap, Kabupaten Asahan, Sumatera Utara, dan menunjukkan hubungan kuadratik (berbentuk huruf U terbalik) antara intensitas backscattering dan usia pohon. Perilaku kuadratik ini menggambarkan dinamika pertumbuhan biofisik kelapa sawit yang mendasarinya selama tahap pertumbuhan awal, kanopi masih jarang dan pantulan balik didominasi oleh surface scattering dari tanah yang gundul atau semak belukar; seiring pohon semakin dewasa, peningkatan tinggi batang dan perkembangan kanopi memperkuat komponen double-bounce scattering, sehingga meningkatkan nilai pantulan balik menuju puncak; dan pada tegakan yang lebih tua, penurunan kepadatan kanopi menggeser mekanisme dominan ke arah volume scattering, yang melemahkan sinyal pantulan balik dan menyebabkan penurunan bertahap.

2.5 Validasi Model

Validasi model dilakukan dengan menggunakan data referensi lapangan yang dikumpulkan dari PT. Perkebunan Nusantara III, Sei Dadap, Kabupaten Asahan, Provinsi Sumatera Utara, Indonesia. Lokasi ini dipilih sebagai lokasi validasi berdasarkan beberapa alasan ilmiah. Pertama, perkebunan Sei Dadap mewakili lokasi yang sama dengan yang digunakan dalam pengembangan model, sehingga menjadikannya lokasi yang paling tepat untuk mengevaluasi konsistensi antara model asli dan penerapannya pada citra Sentinel-1A baru yang diperoleh pada tahun 2025. Kedua, perkebunan ini mencakup blok-blok tahun tanam yang beragam, mulai dari tahun 2000 hingga 2022, sehingga memungkinkan validasi pada keenam kelas umur yang didefinisikan dalam penelitian ini. Ketiga, catatan perkebunan yang dikelola oleh PT. Perkebunan Nusantara III menyediakan informasi tahun tanam tingkat blok yang andal dan eksplisit secara spasial, yang berfungsi sebagai data acuan untuk usia pohon yang sebenarnya.



Gambar 6. Blok usia tanam kelapa sawit untuk validasi model

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Karakteristik Backscatter Sentinel-1A pada Pohon Kelapa Sawit di Indonesia

Gambar 7 menyajikan distribusi spasial nilai backscatter Sentinel-1A di seluruh kawasan kelapa sawit di Indonesia untuk polarisasi VV dan VH sedangkan **Tabel 2** merangkum sifat-sifat statistik yang sesuai pada skala nasional. Secara keseluruhan, hasil-hasil ini menetapkan garis dasar kuantitatif sinyal SAR yang digunakan sebagai masukan untuk model estimasi usia.



(a)

(b)

Gambar 7: Visualisasi data polarisasi (a) VV dan (b) VH dari Sentinel-1A di Indonesia

Tabel 2. Nilai backscatter polarisasi VV dan VH di Indonesia

Parameter	VV (dB)	VH (dB)
Mean	-7,053	-14,43
Median	-7,09	-14,40
Standard Deviasi	0,64	0,57
Minimum	-12,98	-21,96
Maksimum	-4,58	-12,19

Pada skala nasional, rata-rata nilai *backscatter* VV adalah $-7,053$ dB dengan simpangan baku $0,638$ dB, sedangkan rata-rata nilai *backscatter* VH adalah $-14,423$ dB dengan simpangan baku $0,573$ dB. Nilai-nilai tersebut konsisten dengan kisaran *backscatter* yang diharapkan untuk tegakan kelapa sawit pada fase produktif, yaitu sekitar $-6,5$ hingga $-7,0$ dB untuk polarisasi VV dan $-14,0$ hingga $-15,0$ dB untuk polarisasi VH. Kesesuaian antara nilai rata-rata *backscatter* pada skala nasional dan kisaran nilai pada fase produktif menunjukkan bahwa sebagian besar perkebunan kelapa sawit di Indonesia didominasi oleh tanaman yang berada pada fase pertumbuhan produktif. Selain itu, simpangan baku yang relatif kecil, yaitu $0,638$ dB untuk VV dan $0,573$ dB untuk VH, menunjukkan bahwa distribusi nilai *backscatter* pada skala nasional cenderung homogen, meskipun rentang nilainya masih cukup lebar, yaitu $-12,978$ hingga $-4,573$ dB untuk VV dan $-21,955$ hingga $-12,194$ dB untuk VH. Rentang nilai tersebut merepresentasikan variasi karakteristik tanaman dari kelas umur termuda hingga tertua, sekaligus mengonfirmasi hubungan non-linier antara umur kelapa sawit dan nilai *backscatter* sebagaimana dijelaskan dalam model regresi kuadratik [13].

Dasar fisik dari pola non-linier ini dapat dijelaskan melalui evolusi berurutan dari mekanisme hamburan yang dominan seiring bertambahnya usia pohon kelapa sawit. Pada tegakan yang masih sangat muda ($0-3$ tahun), tutupan kanopi masih minimal dan tinggi pohon terbatas pada kurang dari sekitar $1-2$ meter. Dalam kondisi ini, sinyal radar pada panjang gelombang C-band ($\approx 5,55$ cm) berinteraksi terutama dengan permukaan tanah dan serasah yang terpapar, sehingga menghasilkan hamburan yang didominasi oleh permukaan. Hamburan permukaan dari tanah yang relatif halus atau sedikit kasar menghasilkan sinyal pantulan balik yang lemah, yang menjelaskan nilai-nilai rendah yang teramati pada batas bawah distribusi VV dan VH. Seiring pertumbuhan pohon dari usia 5 hingga sekitar 15 tahun, batang menjadi menonjol dan kanopi daun meluas secara bertahap. Pada tahap pertumbuhan menengah ini, geometri batang vertikal relatif terhadap permukaan tanah menciptakan double-bounce scattering yang kuat, di mana sinyal radar memantul dari tanah dan sekali lagi dari permukaan batang sebelum kembali ke sensor. Mekanisme ini secara signifikan memperkuat koefisien pantulan balik, terutama pada polarisasi VV, yang lebih sensitif terhadap elemen struktural vertikal karena respons saluran ko-polarisasi terhadap pemantul yang berorientasi vertikal. Puncak pantulan balik VV pada tahap ini oleh karena itu disebabkan oleh kontribusi

gabungan dari pantulan ganda antara batang dan permukaan tanah, serta peningkatan pantulan kanopi akibat penyebaran daun [10] [13].

Untuk pohon yang lebih tua, yaitu yang berusia sekitar 15–20 tahun ke atas, kepadatan kanopi umumnya menurun seiring masuknya pohon palem ke fase pasca-produktif yang ditandai dengan berkurangnya laju peremajaan daun dan meningkatnya tinggi batang, yang secara fisik menurunkan ketinggian kanopi produktif. Pada frekuensi band-C, di mana panjang gelombang yang lebih pendek membatasi kedalaman penetrasi melalui kanopi yang lebat, volume scattering dari lapisan daun paling atas menjadi interaksi yang dominan. Volume scattering umumnya kurang terarah dan menghasilkan koefisien backscattering yang lebih rendah dibandingkan dengan double-bounce, yang menjelaskan penurunan nilai VV dan VH yang diamati pada ujung kanan model kuadratik. Nilai VH yang secara konsisten lebih rendah dibandingkan dengan VV di semua kelas usia mengindikasikan sensitivitas polarisasi silang yang lebih besar terhadap mekanisme multiple scattering, yang cenderung kurang dominan dibandingkan komponen spekulat atau dihedral yang ditangkap oleh VV.

3.2 Distribusi Spasial Umur Kelapa Sawit di Indonesia

Pola spasial distribusi usia menunjukkan perbedaan geografis yang jelas di seluruh wilayah penghasil kelapa sawit utama di Indonesia. **Gambar 8** menyajikan sebaran spasial skala nasional dari perkiraan usia kelapa sawit di seluruh Indonesia, yang diklasifikasikan ke dalam enam kategori usia. Kuning (0–3 tahun), oranye (3–4 tahun), merah (5–8 tahun), ungu (9–15 tahun), biru (16–20 tahun), dan coklat (>20 tahun). Setiap kelas mewakili fase pertumbuhan yang berbeda dengan signifikansi agronomis dan ekologis tertentu. Kategori usia yang dominan di Sumatra dan Kalimantan berada dalam rentang 9–15 tahun (ungu), yang mewakili pohon-pohon yang berada pada fase produktivitas puncak. Hal ini sejalan dengan ekspansi pesat perkebunan kelapa sawit yang tercatat di wilayah-wilayah tersebut selama periode 2010–2015, yang diperkirakan bertepatan dengan usia tegakan sekitar 10–15 tahun pada saat pengambilan citra tahun 2025. Konsentrasi kelas usia menengah ini di dataran rendah Riau, Sumatera Selatan, dan pedalaman Kalimantan merupakan kawasan konsesi berskala besar yang dikembangkan terutama oleh perusahaan negara dan swasta selama periode ekspansi tersebut. Area yang diklasifikasikan sebagai umur muda (0–3 dan 3–4 tahun, berwarna kuning dan oren) tersebar lebih jarang, namun secara mencolok terdapat di zona pinggiran dan zona perkebunan yang baru dibuka di Kalimantan Tengah dan Papua. Pola-pola ini sejalan dengan tren yang terdokumentasi terkait perluasan batas perkebunan di wilayah-wilayah tersebut, di mana kegiatan penanaman baru terus berlanjut hingga awal tahun 2020-an. Pengelompokan spasial kelas umur yang lebih muda di kawasan perbatasan ini berkaitan erat dengan ketersediaan lahan yang sesuai serta siklus investasi yang umum terjadi dalam pengembangan kelapa sawit skala besar.



Gambar 8: Peta sebaran spasial usia kelapa sawit di Indonesia yang diperoleh dari model regresi backscatter Sentinel-1A

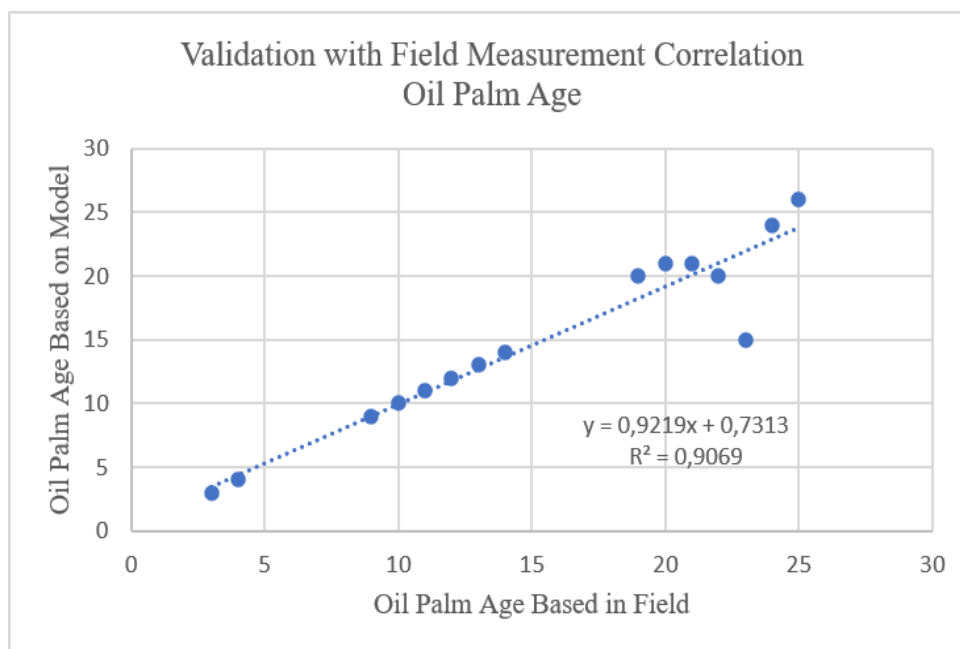
Kelas umur tertua (>20 tahun, berwarna coklat) terkonsentrasi secara mencolok di provinsi Sumatera Utara dan Riau, khususnya di kawasan yang secara historis terkait dengan perkebunan milik

negara yang sudah mapan, seperti entitas PT Perkebunan Nusantara yang ditanam pada akhir 1990-an hingga awal 2000-an. Kelapa sawit berusia di atas 20 tahun di wilayah-wilayah ini menunjukkan bahwa sebagian besar perkebunan mapan di Sumatra mendekati atau telah melampaui ambang batas penanaman kembali yang lazim secara ekonomi, yang menurut peraturan Kementerian Pertanian Indonesia ditetapkan pada usia 25 tahun.

Distribusi geografis kelas usia 5–8 tahun (merah) menunjukkan kawasan yang ditanami pada 2010 dan sesuai dengan pohon kelapa sawit yang saat ini berada pada fase transisi pra-puncak (belum matang) atau awal produktif. Hutan tanaman ini paling terlihat di Kalimantan Timur dan sebagian Kalimantan Barat, yang mengalami pengembangan perkebunan secara aktif selama periode 2016–2019. Kelas usia 16–20 tahun (merah) yang relatif rendah dibandingkan dengan kelas puncak usia 9–15 tahun memiliki makna fisik, hal ini menunjukkan bahwa perkebunan kelapa sawit nasional terkonsentrasi pada tegakan usia produktif, dengan proporsi yang lebih kecil namun penting secara ekologis yang memasuki fase pasca-puncak, di mana pertimbangan penanaman kembali menjadi relevan.

3.3 Analisis Validasi dan Korelasi

Analisis korelasi yang disajikan pada **Gambar 8** dilakukan untuk mengevaluasi konsistensi antara perkiraan usia kelapa sawit yang diperoleh melalui penerapan model regresi dan usia tanam aktual yang tercatat dalam catatan blok perkebunan di Sei Dadap. Analisis ini berfungsi sebagai langkah validasi utama untuk memastikan apakah suatu model yang semula dikalibrasi di satu lokasi perkebunan dapat diterapkan secara andal untuk memperkirakan usia kelapa sawit di lokasi-lokasi di luar wilayah kalibrasi aslinya.



Gambar 9: Korelasi antara usia kelapa sawit yang diperkirakan menggunakan model regresi backscatter Sentinel-1A dan usia kelapa sawit yang sebenarnya berdasarkan data survei lapangan

Hasil regresi linear antara usia estimasi model dan usia lapangan menghasilkan persamaan $y = 0,9219x + 0,7313$ dengan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9069. Nilai ini setara dengan koefisien korelasi (r) sekitar 0,952. Kemiringan garis regresi yang mendekati satu (0,9219) menunjukkan bahwa usia hasil estimasi model meningkat secara proporsional hampir sebanding dengan peningkatan usia aktual di lapangan, sementara intersep yang kecil (0,7313) mengindikasikan bahwa model tidak menghasilkan bias sistematis yang berarti pada estimasi usia muda.

Berdasarkan klasifikasi kekuatan korelasi, koefisien korelasi pada rentang 0,80–1,00 dikategorikan sebagai korelasi sangat kuat [16]. Nilai koefisien korelasi (r) sebesar 0,952 yang diperoleh dalam penelitian ini berada dalam kategori tersebut, sehingga menunjukkan bahwa hubungan antara usia hasil estimasi dan usia aktual di lapangan tergolong sangat kuat. Selain itu, nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9069 menunjukkan bahwa sekitar 90,7% variasi usia kelapa sawit di lapangan dapat dijelaskan oleh model estimasi berbasis *backscatter* Sentinel-1A, sedangkan sekitar 9,3% sisanya dipengaruhi oleh faktor lain yang tidak dijelaskan oleh model.

Tingkat korelasi yang sangat kuat ini menunjukkan bahwa model regresi kuadratik yang digunakan tetap memiliki keandalan yang tinggi, meskipun awalnya dikalibrasi menggunakan data dari satu lokasi Perkebunan. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model mampu diterapkan pada citra Sentinel-1A dengan waktu akuisisi yang berbeda serta pada skala analisis yang lebih luas. Dengan demikian, model tersebut layak diimplementasikan sebagai dasar estimasi umur kelapa sawit, tidak hanya pada lokasi asal kalibrasinya, tetapi juga pada wilayah lain dengan karakteristik yang serupa.

Meskipun demikian, sebagaimana terlihat pada sebaran titik di **Gambar 9**, tetap terdapat penyimpangan (error) antara usia estimasi dan usia aktual pada beberapa titik data, termasuk satu titik yang menunjukkan usia estimasi jauh lebih rendah dibandingkan usia lapangannya. Penyimpangan semacam ini secara ilmiah dapat dijelaskan oleh beberapa faktor. Pertama, speckle yang melekat pada citra SAR, meskipun telah direduksi melalui speckle filter, tetap dapat menyisakan noise residual yang memengaruhi nilai backscatter pada piksel tertentu. Kedua, variasi kondisi biofisik tanaman antar blok, seperti perbedaan kepadatan tanam, riwayat pemupukan, dan tingkat kesehatan tajuk, dapat mengubah respons backscatter tanpa mengubah usia tanam yang sebenarnya. Ketiga, heterogenitas struktur tajuk akibat perbedaan praktik silvikultur menyebabkan variasi dalam mekanisme hamburan (surface, double-bounce, dan volume scattering) yang tidak sepenuhnya diakomodasi oleh formulasi kuadratik model. Keempat, pengaruh kelembapan permukaan tanah dan kanopi pada saat akuisisi citra dapat mengubah konstanta dielektrik target sehingga memengaruhi intensitas backscatter secara independen dari faktor usia. Kelima, resolusi spasial Sentinel-1A yang tergolong menengah menyebabkan efek pencampuran piksel (mixed pixel) pada blok-blok kebun berukuran kecil atau pada zona transisi antarblok dengan tahun tanam berbeda. Faktor-faktor tersebut tidak mengurangi validitas implementasi model, tetapi menjelaskan batas toleransi kesalahan yang wajar terjadi ketika model regresi diterapkan lintas lokasi dan lintas waktu akuisisi.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengimplementasikan model regresi *backscatter* Sentinel-1A untuk mengestimasi dan memetakan distribusi spasial umur kelapa sawit di Indonesia menggunakan *Google Earth Engine*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik nilai *backscatter* VV dan VH mengikuti pola nonlinier yang sesuai dengan tahapan pertumbuhan kelapa sawit, sehingga mampu digunakan untuk mengestimasi umur tanaman. Peta distribusi umur menunjukkan bahwa sebagian besar perkebunan kelapa sawit di Indonesia didominasi oleh tegakan usia produktif (9–15 tahun), sedangkan tegakan muda dan tua terkonsentrasi pada wilayah-wilayah tertentu. Validasi menggunakan data lapangan menghasilkan koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,9069 yang menunjukkan tingkat kesesuaian yang sangat kuat antara umur hasil estimasi dan umur aktual. Hasil tersebut menunjukkan bahwa model yang diimplementasikan memiliki potensi untuk mendukung pemetaan umur kelapa sawit pada skala nasional secara efisien menggunakan data Sentinel-1A dan platform *Google Earth Engine*.

5. Ucapan Terimakasih

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, Dhimas Wiratmoko PPKS Medan. Kepada LP2M Itenas Bandung, Program Studi Teknik Geodesi Itenas Bandung, serta *Center for Environmental Remote Sensing (CEReS)*, *Chiba University*.

6. Singkatan

SAR	Synthetic Aperture Radar
%	Percentage
CPO	Crude Palm Oil
ESA	European Space Agency
GEE	Google Earth Engine
GRD	Ground Range Detected
VV	Vertical-Vertical
VH	Vertical-Horizontal

7. Referensi

- [1] Chemura, A., van Duren, I., dan van Leeuwen, L. M. L. M. (2015). "Determination of the age of oil palm from crown projection area detected from WorldView 158 2 multispectral remote sensing data: The case of Ejisu-Juaben district, Ghana," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 100, 118–127
- [2] Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian. (2024). "Outlook kelapa sawit 2024," Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- [3] Fitrianto, A. C., Darmawan, A., Tokimatsu, K., & Sufwandika, M. (2018). "Estimating The Age Of Oil Palm Trees Using Remote Sensing Technique," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 148, 012020.
- [4] Danylo, O., Pirker, J., Lemoine, G., Ceccherini, G., See, L., McCallum, I., Hadi, H., Kraxner, F., Achard, F., & Fritz, S. (2021). "A map of the extent and year of detection of oil palm plantations in Indonesia, Malaysia and Thailand," *Scientific Data*, 8, 96.
- [5] Hernawati, R. (2024). "Pemodelan fenologi berbasis biofisik kelapa sawit menggunakan machine learning dan penginderaan jauh radar" (Disertasi doktor, Institut Teknologi Bandung). Perpustakaan Digital Institut Teknologi Bandung.
- [6] Mullissa, A., Vollrath, A., Odongo-braun, C., Slagter, B., Balling, J., Gou, Y., Gorelick, N., & Reiche, J. (2021). "Sentinel-1 SAR Backscatter Analysis Ready Data Preparation in Google Earth Engine," *Remote Sensing*, 13(10), Article 1954
- [7] Hernawati, R., Wikantika, K., Darmawan, S., Harto, A. B., Sri Sumantyo, J. T., & Safitri, S. (2024). "Phenology Model of Oil Palm Plantation Based on Biophysical Parameter on Sentinel 1A Using Multiple Linear Regression (MLR)," *In Journal of the Indian Society of Remote Sensing*.
- [8] Kellndorfer, J. (n.d.). "Using SAR data for mapping deforestation and forest degradation," *In The SAR handbook* (Chapter 3). Earth Big Data LLC.
- [9] Pratiwi, G., Sasmito, B., & Bashit, N. (2021). "Analisis Prediksi Nilai Biomassa Atas Permukaan (Aboveground Biomass) Pohon Karet Menggunakan Citra Sentinel-1A Terhadap Usia Tegakan," *Elipsoida : Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 4(01), 27-33.
- [10] Darmawan, S., Carolita, I., Hernawati, R., Dirgahayu, D., Agustan, Permadi, D. A., Sari, D. K., Suryadini, W., Wiratmoko, D., & Kunto, Y. (2021). "The potential scattering model for oil palm phenology based on spaceborne X-, C-, and L-band polarimetric SAR imaging," *Journal of Sensors*, 2021, Article 6625774.
- [11] Carolita, I., Darmawan, S., Permana, R. P., Dirgahayu, D., Wiratmoko, D., Kartika, T., dan Arifin, S. (2019). "Comparison of Optic Landsat-8 and SAR Sentinel-1 in Oil Palm Monitoring, Case Study : Asahan, North Sumatera, Indonesia," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 280(1), 1–9.
- [12] Fauzan, M. I., Sutrisno, A. P., Darmawan, S., & Hernawati, R. (2021). "Correlation model of oil palm age based on optical and radar sensors," *In Proceedings of the 42nd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2021)*, Can Tho, Vietnam.
- [13] Hernawati, R., Darmawan, S., & Sumantyo, J. T. S. (2025). "C-band SAR-based backscatter modeling for monitoring oil palm age," *Proceedings of the 46th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2025)*, Makassar, Indonesia.
- [14] European Space Agency (ESA). (2026). *S1 Mission*. SentiWiki. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-mission>
- [15] Rulian, N., Armijon, A., & Murdapa, F. (2022). "Analisa Hamburan Balik Citra Sentinel-1 Untuk Pemantauan Kelas Umur Tanaman Kelapa Sawit (Studi Kasus: PT. Perkebunan Nusantara VII Unit Rejosari, Natar, Kabupaten Lampung Selatan)," *Datum: Journal of Geodesy and Geomatics*, 1(02), 55–66
- [16] Hess, A. S., & Hess, J. R. (2017). "Linear regression and correlation," *Transfusion*, 57(1), 9–11.