

INTEGRASI CITRA SENTINEL-1 DAN SENTINEL-2 UNTUK PEMETAAN TUTUPAN LAHAN TAHUN 2024 (STUDI KASUS: BWP I IKN DAN SEKITARNYA)

Damar Prasetyo^{*}, Fakhri Luvian Fatah, Nurhadi Bashit, Firman Hadi

Departemen Teknik Geodesi-Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Jawa Tengah Indonesia Jl. Prof
Soedarto, SH, Tembalang, Semarang, Indonesia-75123 Telp./Faks: (024) 736834

*e-mail: damar.kaze@gmail.com

(Received 19 Mei 2025, Accepted 9 Juni 2025, Published 09 Juni 2025)

ABSTRAK

Pemetaan tutupan lahan yang akurat sangat penting untuk mendukung perencanaan tata ruang, khususnya di wilayah dengan dinamika perubahan tinggi seperti BWP I IKN dan sekitarnya. Kawasan ini sebagian besar masih didominasi oleh hutan dan berada di wilayah beriklim tropis dengan tingkat tutupan awan yang tinggi sepanjang tahun, sehingga penggunaan citra optik seperti Sentinel-2 sering terhambat oleh awan, yang dapat menyebabkan data tidak lengkap atau bias. Untuk mengatasi keterbatasan ini, penelitian ini mengintegrasikan citra radar Sentinel-1 dan citra optik Sentinel-2 pada tahun 2024, dengan menggunakan algoritma *random forest* untuk mengklasifikasikan empat kelas utama: badan air, vegetasi, lahan terbuka, dan lahan terbangun. Sentinel-1 memungkinkan akuisisi data secara konsisten meskipun dalam kondisi berawan, sehingga melengkapi kelemahan Sentinel-2. Hasil validasi menggunakan *confusion matrix* dengan pembagian 70% data untuk pelatihan dan 30% untuk pengujian menunjukkan bahwa pada data *testing*, akurasi meningkat dari *overall accuracy* 66,13% dan *kappa coefficient* 0,55 (tanpa integrasi) menjadi 85,47% dan 0,80 (dengan integrasi). Sementara pada data *validasi*, akurasi meningkat dari 68,42% dan 0,53 menjadi 86,30% dan 0,79. Hasil ini menunjukkan bahwa integrasi informasi tekstural dari Sentinel-1 dan informasi spektral dari Sentinel-2 mampu menghasilkan klasifikasi tutupan lahan yang lebih akurat, konsisten, dan representatif terhadap kondisi sebenarnya di lapangan.

Kata kunci : *Integrasi Sensor, Klasifikasi Random forest, Pemetaan Tutupan Lahan, Sentinel-1, Sentinel-2.*

ABSTRACT

Accurate land cover mapping is essential to support spatial planning, especially in areas experiencing rapid changes such as BWP I of the IKN and its surroundings. This region is largely dominated by forest cover and has a tropical climate with high cloud frequency throughout the year, which often hinders the use of optical imagery like Sentinel-2, resulting in incomplete or biased data. To overcome this limitation, this study integrates Sentinel-1 radar imagery with Sentinel-2 optical imagery for the year 2024, utilizing a random forest algorithm to classify four main land cover classes: water bodies, vegetation, open land, and built-up areas. Sentinel-1 allows for consistent data acquisition even under cloudy conditions, thereby complementing the limitations of Sentinel-2. Validation results using a confusion matrix with a 70% training and 30% testing data split show that for the testing data, accuracy improved from an overall accuracy of 66.13% and a kappa coefficient of 0.55 (without integration) to 85.47% and 0.80 (with integration). For the validation data, accuracy increased from 68.42% and 0.53 to 86.30% and 0.79. These findings indicate that integrating textural information from Sentinel-1 with spectral information from Sentinel-2 results in more accurate, consistent, and representative land cover classification outcomes.

Keywords : *Land Cover Mapping, Random forest Classification, Sentinel-1, Sentinel-2, Sensor Integration.*

1. PENDAHULUAN

Pemetaan tutupan lahan memainkan peran penting dalam memahami perubahan penggunaan lahan, terutama di daerah yang sedang mengalami transformasi yang cepat seperti Ibu Kota Negara (IKN) (Basin & District, 2024). Pembangunan IKN yang dimulai pada tahun 2022 telah menyebabkan perubahan struktur tutupan lahan yang signifikan, terutama akibat deforestasi dan konversi lahan untuk infrastruktur (Adriani Nur Andita et al., 2022). Oleh karena itu, pemetaan yang akurat dan berkesinambungan diperlukan untuk memantau dinamika perubahan tersebut (Wisanggeni et al., 2024).

Namun, pemetaan tutupan lahan di wilayah tropis seperti Kalimantan memiliki tantangan tersendiri, terutama karena kondisi cuaca yang sering mendung dan tutupan awan yang tinggi. Hal ini menyebabkan keterbatasan penggunaan citra optik seperti Sentinel-2 yang bergantung pada kondisi atmosfer yang cerah (Meraner et al., 2020). Untuk mengatasi keterbatasan ini, diperlukan integrasi dengan citra radar seperti Sentinel-1 yang dapat menembus awan dan memberikan informasi tambahan mengenai struktur permukaan (Sentiwiki, 2023).

Dalam penelitian ini, integrasi data dari Sentinel-1 dan Sentinel-2 digunakan untuk meningkatkan akurasi pemetaan tutupan lahan di BWP IKN dan sekitarnya. Sentinel-1 dengan sensor *Synthetic Aperture Radar* (SAR) mampu memberikan informasi mengenai tekstur dan struktur objek, sedangkan Sentinel-2 dengan sensor optiknya memberikan informasi spektral yang kaya untuk klasifikasi vegetasi dan permukaan lainnya (Burkart et al., 2022). Kombinasi kedua sensor ini memungkinkan pemetaan yang lebih komprehensif dan akurat. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemetaan tutupan lahan di wilayah BWP IKN dan sekitarnya pada periode 2020-2024. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai perubahan tutupan lahan yang terjadi dan menjadi dasar dalam pengambilan kebijakan.

2. METODOLOGI

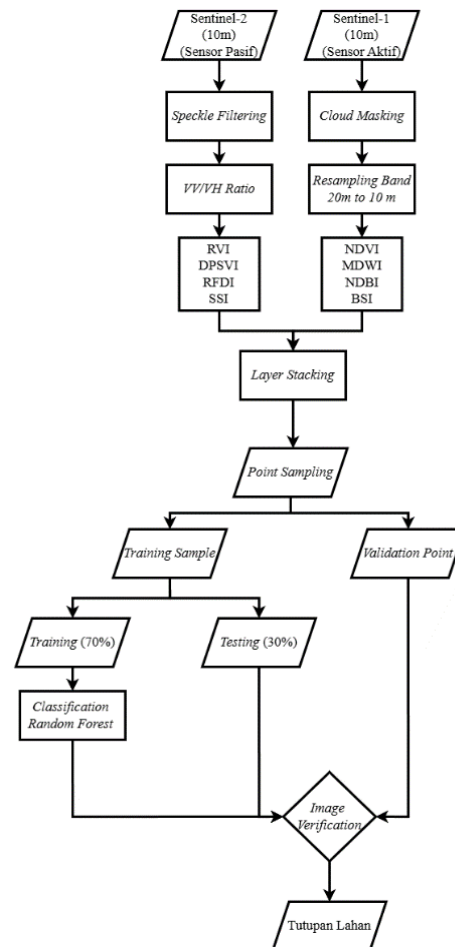
2.1 Area Studi

Wilayah penelitian berada pada koordinat $116^{\circ} 37' 13''$ hingga $116^{\circ} 46' 11''$ BT dan $0^{\circ} 51' 37''$ hingga $1^{\circ} 03' 39''$ LS, mencakup Kawasan Perencanaan (BWP) I sebagai pusat pembangunan tahap awal Ibu Kota Negara (IKN) dari tahun 2022 hingga 2024, serta area di sekitarnya dengan total luas mencapai 36.944,27 hektar. Kawasan ini merupakan bagian dari wilayah pengembangan IKN secara keseluruhan. Secara geografis, IKN memiliki karakteristik topografi berupa perbukitan landai

yang didominasi oleh hutan tropis dan berbatasan langsung dengan Selat Makassar, menjadikannya lokasi yang strategis untuk pembangunan infrastruktur, penguatan konektivitas antarwilayah, serta pelestarian lingkungan (Undang-Undang (UU) Nomor 3 Tahun 2022 Tentang Ibu Kota Negara, 2022). Lokasi penelitian tugas akhir ini berada di sekitar kawasan pengembangan IKN dan dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Peta Wilayah Penelitian



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

2.2 Proses Sentinel-1 (GRD)

Pengolahan citra GRD Sentinel-1A diawali dengan menyaring koleksi citra berdasarkan tanggal akuisisi, mode instrumen IW, resolusi spasial 10 meter, dan cakupan wilayah studi. Untuk mengurangi *noise* akibat *speckle*, digunakan metode *focal median filtering* dengan radius tertentu menggunakan *circular kernel*. *Specklenoise* merupakan gangguan umum pada citra radar yang dapat mempengaruhi akurasi klasifikasi tutupan lahan (Santoso et al., 2015; Quegan et al., 2000). Setelah itu, rasio polarisasi VH/VV dihitung, yang dapat memberikan informasi tambahan tentang struktur permukaan lahan. Untuk meningkatkan kemampuan dalam membedakan berbagai jenis tutupan lahan, beberapa indeks berbasis SAR dihitung, termasuk *Radar Vegetation Index* (RVI), *Dual Polarization SAR Vegetation Index* (DPSVI), *Radar Forest Degradation Index* (RFDI), dan *Surface Scattering*. Selanjutnya, komposit median dilakukan untuk mengurangi variasi temporal dan meningkatkan kestabilan nilai hamburan balik, sebelum akhirnya dilakukan pemotongan citra sesuai dengan batas wilayah studi. Informasi mengenai sistem referensi koordinat (CRS), resolusi spasial, serta daftar band yang tersedia diperiksa sebagai langkah terakhir dalam pra-pemrosesan untuk memastikan kualitas data yang optimal sebelum dilakukan analisis lebih lanjut.

2.3 Proses Sentinel-2 (SR)

Citra optik Sentinel-2 *Surface Reflectance* (SR) yang telah diselaraskan diproses dalam rangkaian waktu tahunan untuk meningkatkan kualitas data sebelum analisis tutupan lahan. Koleksi citra disaring berdasarkan periode akuisisi, batas wilayah studi, serta persentase tutupan awan yang lebih rendah dari ambang batas tertentu. Penyembunyian awan dilakukan dengan menggunakan *Scene Classification Layer* (SCL), di mana hanya piksel yang diklasifikasikan sebagai lahan terbuka, vegetasi, atau permukaan bebas awan yang dipertahankan. Selain itu, *resampling bilinear* dilakukan untuk meningkatkan resolusi spasial dari band 20 meter menjadi 10 meter, sehingga seluruh band memiliki resolusi spasial yang seragam. Beberapa indeks spektral dihitung untuk memperkaya informasi dalam analisis tutupan lahan, termasuk *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) untuk mendeteksi vegetasi, *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) untuk mengidentifikasi badan air, *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) untuk area terbangun, dan *Bare Soil Index* (BSI) untuk mendeteksi lahan terbuka.

Setelah itu, komposit median dilakukan untuk mengurangi variasi temporal dan meningkatkan stabilitas pantulan citra. Proses terakhir yang dilakukan adalah memotong citra sesuai dengan batas wilayah studi dan memeriksa sistem referensi koordinat (CRS) dan resolusi spasial untuk memastikan konsistensi data sebelum melakukan analisis lebih lanjut.

2.4 Klasifikasi Citra

Klasifikasi citra berbasis piksel dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest* (RF), yaitu metode *machine learning* berbasis kumpulan pohon keputusan yang umum digunakan dalam pemetaan tutupan lahan serta analisis dinamika perubahan lingkungan (Jin et al., 2020; Praticò et al., 2021; Ghosh et al., 2020). RF bekerja dengan membangun sekumpulan pohon keputusan secara mandiri dan menggabungkan hasilnya untuk meningkatkan akurasi klasifikasi, sehingga lebih tahan terhadap *overfitting* dibandingkan metode berbasis pohon tunggal (Cutler et al., 2007; Morin et al., 2019). Dalam penelitian ini, data sampel dibagi menjadi 70% untuk pelatihan dan 30% untuk pengujian untuk memastikan bahwa model dapat belajar dengan baik tanpa kehilangan kemampuan generalisasi untuk data baru. Model RF dikembangkan dengan beberapa parameter utama, termasuk jumlah pohon, jumlah variabel per split, ukuran minimum populasi daun, dan fraksi data yang digunakan dalam setiap iterasi. Pemilihan parameter yang optimal memainkan peran penting dalam meningkatkan akurasi klasifikasi dan dilakukan dengan pendekatan yang sistematis untuk menghindari bias dalam prediksi (Numbisi et al., 2019). Sampel data pelatihan dipilih secara representatif untuk mencakup berbagai jenis tutupan lahan di dalam wilayah studi, sehingga model dapat secara akurat mengenali pola spektral setiap kelas. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi dengan data uji untuk menilai kinerja model. Pendekatan ini memungkinkan pengukuran akurasi model dan identifikasi potensi kesalahan klasifikasi yang dapat diperbaiki melalui optimasi parameter dan peningkatan kualitas data sampel (Nicolau et al., 2021; Zhang et al., 2019).

2.5 Layer Stacking

Semua band yang telah diproses dari citra Sentinel-1 dan Sentinel-2 digabungkan ke dalam satu lapisan untuk menghasilkan tutupan lahan. Dari citra Sentinel-1, dua band utama, VH dan VV, digunakan, serta beberapa indeks berbasis radar, seperti rasio VH/VV, *Radar Vegetation Index* (RVI), *Dual Polarization SAR Vegetation Index* (DPSVI), *Radar Forest Degradation Index* (RFDI),

dan *Surface Scattering Index* (SSI). Sementara itu, dari citra Sentinel-2, hasil komposit median dari semua band reflektan permukaan setelah proses *cloud masking* dan *resampling*. Penggabungan ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi klasifikasi tutupan lahan dengan mengintegrasikan informasi dari sensor aktif dan pasif (optik), dimana data Sentinel-1 memberikan informasi mengenai struktur permukaan dan kelembapan, sedangkan Sentinel-2 menyajikan data spektral untuk membedakan jenis tutupan lahan berdasarkan karakteristik reflektansinya. Setelah semua band digabungkan, pemeriksaan nama band dilakukan untuk memastikan bahwa semua informasi yang diperlukan telah dimasukkan ke dalam lapisan akhir yang akan digunakan dalam analisis selanjutnya.

2.6 Uji Akurasi

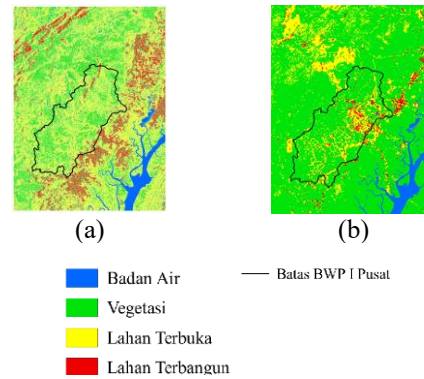
Evaluasi akurasi dilakukan dalam dua tahap, yaitu dengan menggunakan data *testing* dan data validasi berdasarkan citra PlanetScope. Akurasi pada data *testing* dihitung dengan *confusion matrix*, yaitu membandingkan hasil klasifikasi dengan data *testing* yang diperoleh dari pembagian data *training* (70% *training* - 30% *testing*). Dengan metode ini, model diuji dengan menggunakan data yang belum pernah digunakan pada proses pelatihan untuk mengukur sejauh mana model mampu menggeneralisasi klasifikasi pada data baru. Dari matriks ini diperoleh metrik evaluasi seperti *overall accuracy* (OA), *producer's accuracy* (PA), *user's accuracy* (UA), dan *kappa coefficient*, yang digunakan untuk mengukur akurasi klasifikasi secara keseluruhan serta tingkat kesalahan pada setiap kelas.

Validasi tambahan dilakukan dengan menggunakan citra PlanetScope, yang memiliki resolusi lebih tinggi dari Sentinel-2. Pendekatan ini bertujuan untuk menguji sejauh mana model dapat diterapkan pada dataset yang berbeda, sehingga dapat mengidentifikasi potensi bias atau kelemahan model dalam membedakan kelas tutupan lahan tertentu. Dengan kombinasi evaluasi ini, keandalan klasifikasi dapat lebih terjamin, terutama dalam mendukung analisis perubahan tutupan lahan dan dampaknya terhadap lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pemetaan tutupan lahan sebelum dilakukan integrasi hanya menggunakan citra Sentinel-1A saja, namun hasil dari pengolahan ini menunjukan hasil akurasi yang kurang baik. Berikut adalah hasil tutupan lahan sebelum dan sesudah dilakukan integrasi yang terlihat pada **Gambar 3**.

Integrasi Citra Sentinel-1 dan Sentinel-2 untuk Pemetaan Tutupan Lahan Tahun 2024 (Studi kasus: BWP IKN dan sekitarnya)



Gambar 3. (a) Tutupan Lahan Pada Data Sebelum Integrasi, dan (b) Tutupan Lahan Pada Data Sesudah Integrasi

3.1 Analisis Perbedaan Tutupan Lahan

Hasil klasifikasi menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam estimasi luasan dan distribusi spasial masing-masing kelas tutupan lahan.

Tabel 1. Luas Kelas Tutupan Lahan

Kelas Tutupan Lahan	Tahun 2024 (Ha)	
	Sebelum	Sesudah
Badan Air	1.450	1.435
Vegetasi	14.543	29.614
Lahan Terbuka	15.729	4.870
Lahan Terbangun	5.211	1.014

Hasil klasifikasi yang hanya menggunakan citra Sentinel-1 menunjukkan bahwa kelas lahan terbuka mendominasi dengan luasan 15.729 ha, sedangkan kelas vegetasi hanya memiliki 14.543 ha. Setelah digabungkan dengan gambar Sentinel-2, distribusi kelas berubah secara signifikan: luasan kelas vegetasi meningkat menjadi 29.614 ha, sementara kelas lahan terbuka meningkat menjadi 4.870 ha. Perubahan signifikan ini menunjukkan bahwa pendekatan menggunakan Sentinel-1 saja cenderung kurang baik dalam menghasilkan klasifikasi area vegetasi, yang dalam banyak kasus dikategorikan sebagai lahan terbuka dan bahkan lahan terbangun. Hal ini disebabkan karena citra Sentinel-1 (radar SAR) hanya menangkap informasi tekstural dan struktur permukaan, tanpa mempertimbangkan karakteristik spektral objek. Akibatnya, wilayah-wilayah dengan vegetasi rapat seperti hutan sekunder atau semak belukar, yang secara visual dalam citra optik jelas tergolong vegetasi, tidak teridentifikasi dengan akurat. Secara spasial, hasil klasifikasi menggunakan Sentinel-1 juga menunjukkan ketidaksesuaian pola

pembangunan. Kelas lahan terbangun banyak terdeteksi berada di luar area inti BWP I, yaitu kawasan yang sebenarnya belum menunjukkan aktivitas pembangunan masif berdasarkan citra resolusi tinggi. Hal ini semakin menegaskan bahwa model klasifikasi dengan Sentinel-1 saja belum mampu menggambarkan distribusi aktual area terbangun. Sebaliknya, hasil integrasi Sentinel-1 dan Sentinel-2 menunjukkan distribusi lahan terbangun yang lebih terkonsentrasi dan sesuai dengan perkembangan pembangunan fisik yang diketahui terjadi di dalam BWP I.

Adapun perubahan pada kelas lahan terbangun dari 5.211 ha menjadi hanya 1.014 ha setelah integrasi, memperkuat indikasi bahwa klasifikasi awal mengalami overestimasi pada area terbangun. Penurunan ini terjadi karena integrasi data spektral dari Sentinel-2—terutama kanal NIR dan SWIR—memberikan kemampuan tambahan bagi algoritma klasifikasi untuk mengenali material bangunan dan vegetasi secara lebih akurat. Sementara itu, kelas badan air tetap relatif stabil di kisaran 1.450 ha sebelum dan 1.435 ha sesudah integrasi, yang menunjukkan bahwa baik radar maupun optik mampu mengenali fitur air dengan baik, meskipun tingkat presisi lebih tinggi dicapai saat menggunakan data multispektral.

Citra Sentinel-1 dan Sentinel-2 digunakan untuk pemetaan tutupan lahan, yang memberikan kombinasi data radar dan optik untuk meningkatkan akurasi klasifikasi. Penggunaan kedua citra ini memungkinkan identifikasi perubahan tutupan lahan secara lebih menyeluruh, terutama dengan melihat pola vegetasi, lahan terbuka, badan air, dan lahan yang terbangun. Temuan ini secara keseluruhan menunjukkan bahwa integrasi antara citra Sentinel-1 dan citra Sentinel-2 menghasilkan klasifikasi yang lebih akurat, baik secara statistik maupun spasial. Pendekatan integrasi ini mampu mengatasi keterbatasan masing-masing sensor dan memberikan gambaran yang lebih representatif terhadap kondisi tutupan lahan aktual di wilayah studi, khususnya dalam konteks pembangunan IKN yang dinamis.

3.2 Uji Akurasi Tutupan Lahan

Untuk memastikan hasil klasifikasi memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi, proses validasi dilakukan melalui *confusion matrix* yang diperoleh dari dua sumber data referensi yang berbeda. Salah satu metode yang digunakan adalah membagi dataset menjadi dua bagian, 70% untuk *training* dan 30% untuk *testing*. Metode ini bertujuan untuk mengukur seberapa baik model mampu mengklasifikasikan data yang belum pernah digunakan dalam proses *training* tetapi tetap berasal dari sumber yang sama. Selain itu, *confusion matrix* juga dihasilkan dari pengujian menggunakan data referensi kedua untuk

mengevaluasi ketahanan model terhadap variasi sumber data, sehingga validitas hasil klasifikasi dapat lebih terjamin.

Berikut ini adalah *confusion matrix* pada data *testing* tahun 2024 untuk sebelum dan sesudah dilakukan integrasi.

Tabel 2. (a) Uji akurasi Pada Data *Testing* Tahun 2024 Sebelum Integrasi, dan (b) Uji Akurasi Pada Data *Testing* Tahun 2024 Sesudah Integrasi

<i>Accuracy Assessment (Sentinel-1)</i>				
Kelas Tutupan Lahan	Badan Air	Vegetasi	Lahan Terbuka	Lahan Terbangun
<i>Producers Accuracy (%)</i>	77,78	71,88	57,15	60
<i>Users Accuracy (%)</i>	84	71,88	54,05	60
<i>Overall Accuracy (%)</i>	66,13	<i>Kappa Coefficient (T)</i>	0,55	

(a)

<i>Accuracy Assessment (Integrasi Sentinel-1 dan Sentinel-2)</i>				
Kelas Tutupan Lahan	Badan Air	Vegetasi	Lahan Terbuka	Lahan Terbangun
<i>Producers Accuracy (%)</i>	100	92,50	88,64	72,13
<i>Users Accuracy (%)</i>	100	94,87	67,24	91,67
<i>Overall Accuracy (%)</i>	85,47	<i>Kappa Coefficient (T)</i>	0,80	

(b)

Pemetaan tutupan lahan dilakukan sebelum dan sesudah integrasi menggunakan citra Sentinel-1 serta integrasi Sentinel-1 dan Sentinel-2. Berdasarkan hasil uji akurasi pada data *testing* tahun 2024, klasifikasi yang hanya menggunakan Sentinel-1 menghasilkan akurasi yang tergolong rendah dengan nilai *Overall Accuracy* sebesar 66,13% dan *Kappa Coefficient* hanya mencapai 0,55. Nilai ini menunjukkan ketidakakuratan dalam membedakan kelas tutupan lahan, khususnya pada kelas lahan terbuka dan lahan terbangun yang memiliki nilai *producers* dan *users accuracy* masing-masing di bawah 61%. Kelemahan ini disebabkan oleh keterbatasan citra Sentinel-1 yang merupakan citra radar SAR, di mana hanya menangkap informasi fisik seperti tekstur dan kelembapan permukaan, sehingga kelas dengan tekstur mirip sulit dibedakan dan hasil klasifikasinya terdampak oleh *speckle noise*.

Setelah dilakukan integrasi antara citra Sentinel-1 dan Sentinel-2, hasil uji akurasi menunjukkan peningkatan yang signifikan. Nilai Overall Accuracy naik menjadi 85,47% dan *Kappa Coefficient* meningkat menjadi 0,80, yang menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi dan pemetaan yang dapat diandalkan. Hampir semua kelas mengalami peningkatan, terutama kelas badan air dan vegetasi dengan nilai *producers* dan *users accuracy* di atas 90%. Hal ini menunjukkan bahwa integrasi antara sensor optik Sentinel-2 dan radar Sentinel-1 memberikan informasi yang saling melengkapi, sehingga mampu meningkatkan kemampuan klasifikasi dengan lebih baik dalam membedakan jenis tutupan lahan yang secara spektral dan struktural mirip.

Tabel 3. (a) Uji akurasi Pada Data Validasi Tahun 2024 Sebelum Integrasi, dan (b) Uji Akurasi Pada Data Validasi Tahun 2024 Sesudah Integrasi

Accuracy Assessment (Sentinel-1)				
Kelas Tutupan Lahan	Badan Air	Vegetasi	Lahan Terbuka	Lahan Terbangun
<i>Producers Accuracy (%)</i>	83,33	80	55,56	45
<i>Users Accuracy (%)</i>	83,33	70	45,45	69,23
<i>Overall Accuracy (%)</i>	68,42	<i>Kappa Coefficient (T)</i>	0,53	

(a)

Accuracy Assessment (Integrasi Sentinel-1 dan Sentinel-2)				
Kelas Tutupan Lahan	Badan Air	Vegetasi	Lahan Terbuka	Lahan Terbangun
<i>Producers Accuracy (%)</i>	100	100	58,82	72,73
<i>Users Accuracy (%)</i>	100	87,18	76,92	80
<i>Overall Accuracy (%)</i>	86,30	<i>Kappa Coefficient (T)</i>	0,79	

(b)

Uji akurasi pada data validasi tahun 2024 dilakukan untuk membandingkan hasil klasifikasi tutupan lahan sebelum dan sesudah integrasi citra Sentinel-1 dan Sentinel-2. Berdasarkan hasil uji akurasi sebelum integrasi, yaitu hanya menggunakan Sentinel-1, diperoleh nilai *Overall Accuracy* sebesar 68,42% dan *Kappa Coefficient* sebesar 0,53. Nilai ini tergolong rendah dan menunjukkan bahwa klasifikasi belum optimal. Hal ini terutama terlihat pada kelas lahan terbuka dan lahan terbangun yang memiliki *users accuracy* masing-masing hanya

sebesar 45,45% dan 69,23%. Rendahnya akurasi disebabkan oleh keterbatasan Sentinel-1 sebagai citra radar yang hanya menangkap informasi struktur permukaan tanpa informasi spektral, sehingga sulit membedakan objek dengan karakteristik permukaan yang mirip.

Setelah dilakukan integrasi antara Sentinel-1 dan Sentinel-2, terjadi peningkatan yang signifikan pada hasil klasifikasi. *Overall Accuracy* meningkat menjadi 86,30% dan *Kappa Coefficient* mencapai 0,79. Peningkatan ini menunjukkan bahwa integrasi kedua jenis citra, yang masing-masing merekam informasi berbeda (struktur permukaan dari Sentinel-1 dan informasi spektral dari Sentinel-2), memberikan hasil yang lebih komprehensif dan akurat. Hampir seluruh kelas mengalami peningkatan akurasi, terutama kelas badan air dan vegetasi yang mencapai *producers* dan *users accuracy* sebesar 100%. Dengan demikian, integrasi citra Sentinel-1 dan Sentinel-2 terbukti mampu meningkatkan kualitas pemetaan tutupan lahan secara signifikan pada data validasi tahun 2024.

4. KESIMPULAN

- Integrasi citra Sentinel-1 dan Sentinel-2 terbukti meningkatkan akurasi klasifikasi tutupan lahan baik secara statistik maupun spasial. Pendekatan ini mampu mengatasi keterbatasan sensor radar Sentinel-1 yang cenderung mengoverestimasi area lahan terbuka dan terbangun akibat keterbatasan informasi spektral. Dengan tambahan data multispektral dari Sentinel-2, klasifikasi menjadi lebih representatif terhadap kondisi aktual, terutama dalam membedakan vegetasi rapat, lahan terbuka, dan area terbangun di wilayah studi pembangunan IKN yang bersifat dinamis.
- Integrasi citra Sentinel-1 dan Sentinel-2 secara signifikan meningkatkan akurasi klasifikasi tutupan lahan. Pada data testing tahun 2024, akurasi meningkat dari Overall Accuracy sebesar 66,13% dan Kappa Coefficient 0,55% (tanpa integrasi) menjadi 85,47% dan 0,80% (dengan integrasi). Sementara pada data validasi, akurasi naik dari 68,42% dan 0,53% menjadi 86,30% dan 0,79%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa penggabungan informasi tekstural dari Sentinel-1 dan spektral dari Sentinel-2 mampu menghasilkan klasifikasi yang lebih akurat, konsisten, dan representatif terhadap kondisi tutupan lahan sebenarnya. Dengan memahami pola perubahan dan akurasi klasifikasi, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar untuk perencanaan tata ruang dan kebijakan pengelolaan lahan yang lebih berkelanjutan di masa depan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adriani Nur Andita, W., Muti Rahmah, I., & Nurul Anggraeni, F. (2022). Analisis Perubahan Lahan pada Wilayah Inti Ibu Kota Negara (IKN) di Kabupaten Penajam Paser Utara, Provinsi Kalimantan Timur Tahun 2019 dan Tahun 2023 Menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). *Jurnal Sains Geografis*, 1(1), 91–103. <https://doi.org/10.2210/jsg.vx1ix.xxx>
- Basin, R., & District, H. (2024). *Mapping and Analyzing Land Use / Land Cover Changes : A Case Study of Tawa*. 13(1000498), 1–9. <https://doi.org/10.35248/2168-9776.24.13.498.Citation>
- Burkart, K., Causey, K., Cohen, A. J., Wozniak, S. S., Salvi, D. D., Abbafati, C., Adekanmbi, V., Adsuar, J. C., Ahmadi, K., Alahdab, F., Al-Aly, Z., Alipour, V., Alvis-Guzman, N., Amegah, A. K., Andrei, C. L., Andrei, T., Ansari, F., Arabloo, J., Aremu, O., ... Brauer, M. (2022). Estimates, trends, and drivers of the global burden of type 2 diabetes attributable to PM2.5 air pollution, 1990–2019: an analysis of data from the Global Burden of Disease Study 2019. *The Lancet Planetary Health*, 6(7), e586–e600. [https://doi.org/10.1016/S2542-5196\(22\)00122-X](https://doi.org/10.1016/S2542-5196(22)00122-X)
- Cutler, D. R., Edwards, T. C., Beard, K. H., Cutler, A., Hess, K. T., Gibson, J., & Lawler, J. J. (2007). RANDOM FORESTS FOR CLASSIFICATION IN ECOLOGY. *Ecology*, 88(11), 2783–2792. <https://doi.org/10.1890/07-0539.1>
- Ghosh, S. M., Behera, M. D., & Paramanik, S. (2020). Canopy Height Estimation Using Sentinel Series Images through Machine Learning Models in a Mangrove Forest. *Remote Sensing*, 12(9), 1519. <https://doi.org/10.3390/rs12091519>
- Jin, Z., Shang, J., Zhu, Q., Ling, C., Xie, W., & Qiang, B. (2020). *RFRSF: Employee Turnover Prediction Based on Random Forests and Survival Analysis* (pp. 503–515). https://doi.org/10.1007/978-3-030-62008-0_35
- Meraner, A., Ebel, P., Zhu, X. X., & Schmitt, M. (2020). Cloud removal in Sentinel-2 imagery using a deep residual neural network and SAR-optical data fusion. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166(January), 333–346. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.05.013>
- Morin, D., Planells, M., Guyon, D., Villard, L., Mermoz, S., Bouvet, A., Thevenon, H., Dejoux, J.-F., Le Toan, T., & Dedieu, G. (2019). Estimation and Mapping of Forest Structure Parameters from Open Access Satellite Images: Development of a Generic Method with a Study Case on Coniferous Plantation. *Remote Sensing*, 11(11), 1275. <https://doi.org/10.3390/rs11111275>
- Nicolau, A. P., Flores-Anderson, A., Griffin, R., Herndon, K., & Meyer, F. J. (2021). Assessing SAR C-band data to effectively distinguish modified land uses in a heavily disturbed Amazon forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 94, 102214. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102214>
- Numbisi, F. N., Van Coillie, F. M. B., & De Wulf, R. (2019). Delineation of Cocoa Agroforests Using Multiseason Sentinel-1 SAR Images: A Low Grey Level Range Reduces Uncertainties in GLCM Texture-Based Mapping. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(4), 179. <https://doi.org/10.3390/ijgi8040179>
- Undang-undang (UU) Nomor 3 Tahun 2022 Tentang Ibu Kota Negara, Pub. L. No. 41, 30 (2022). <https://ikn.go.id/letak-ibu-kota-baru-indonesia-bernama-nusantara-ini-detail-lokasinya?>
- Praticò, S., Solano, F., Di Fazio, S., & Modica, G. (2021). Machine Learning Classification of Mediterranean Forest Habitats in Google Earth Engine Based on Seasonal Sentinel-2 Time-Series and Input Image Composition Optimisation. *Remote Sensing*, 13(4), 586. <https://doi.org/10.3390/rs13040586>
- Quegan, S., Le Toan, T., Yu, J. J., Ribbes, F., & Floury, N. (2000). Multitemporal ERS SAR analysis applied to forest mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38(2), 741–753. <https://doi.org/10.1109/36.842003>
- Santoso, A. W., Pebrianti, D., Bayuaji, L., & Zain, J. M. (2015). Performance of various speckle reduction filters on Synthetic Aperture Radar image. *2015 4th International Conference on Software Engineering and Computer Systems (ICSECS)*, 11–14. <https://doi.org/10.1109/ICSECS.2015.7333103>
- Sentiwiki. (2023). *Sentinel1: Overview of S1 Applications*. Copernicus Sentinel Data. <https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s1-applications>
- Wisanggeni, D. H., Sitorus, J. E., Halim, K., Putra, P., & Adityawan, M. B. (2024). *Pengaruh*

Perubahan Tutupan Lahan Terhadap Debit Banjir di Kawasan Inti Pusat Pemerintahan (KIPP) Ibu Kota Nusantara. 09(02), 327–338. <https://doi.org/10.29244/jsil.9.2.327-338>

Zhang, W., Brandt, M., Wang, Q., Prishchepov, A. V., Tucker, C. J., Li, Y., Lyu, H., & Fensholt, R. (2019). From woody cover to woody canopies: How Sentinel-1 and Sentinel-2 data advance the mapping of woody plants in savannas. *Remote Sensing of Environment*, 234, 111465. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111465>