

Analisis Multitemporal Perubahan Tutupan Lahan dan Sebaran Genangan Banjir di Kompleks Percandian Batujaya Menggunakan Citra Sentinel

MUHAMAD RAHMAN HAKIM¹, GUSTI AYU JESSY KARTINI¹, SINTA RIDWAN²

¹Program Studi Teknik Geodesi, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Institut Teknologi Nasional Bandung, Jl. PHH Hasan Mustopa No.23, Neglasari, Kota Bandung, Jawa Barat 40124, Indonesia

²Program Studi Arkeologi, Fakultas Ilmu Pengetahuan Budaya, Universitas Indonesia, Jalan Prof. Dr. Nugroho Notokusanto, Depok, Jawa Barat, 16424, Indonesia

Email: ayujessy@itenas.ac.id

Article History: Submitted 18 August 2026 Revised 8 September 2026 Accepted 9 September 2026

ABSTRAK

Kompleks Percandian Batujaya merupakan kawasan arkeologi penting yang perlu dipantau akibat dinamika tutupan lahan dan genangan. Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan tutupan lahan 2017–2025, memetakan sebaran genangan, dan mengkaji hubungan spasial keduanya. Data Sentinel-2 digunakan untuk klasifikasi tutupan lahan, Sentinel-1 SAR untuk deteksi genangan, dan LiDAR untuk informasi topografi. Klasifikasi dilakukan menggunakan Random Forest, perubahan dianalisis dengan Post-Classification Comparison (PCC), dan hubungan perubahan dengan genangan melalui overlay spasial. Hasil menunjukkan luas sawah menurun 384,26 ha, sedangkan permukiman meningkat 393,08 ha, dengan transisi dominan sawah menjadi permukiman sebesar 459,61 ha. Genangan terdeteksi seluas 450,92 ha, dengan 99,84% berada pada sawah. Proporsi genangan pada area berubah sebesar 1,18%, lebih rendah dibandingkan area tidak berubah sebesar 4,02%. Dengan demikian, tidak ditemukan indikasi peningkatan proporsi genangan akibat perubahan tutupan lahan.

Kata kunci: Batujaya, Tutupan lahan, Genangan banjir, Sentinel

ABSTRACT

The Batujaya Temple Complex is an important archaeological area requiring monitoring due to land-cover dynamics and inundation. This study aims to analyze land-cover changes from 2017 to 2025, map inundation distribution, and assess their spatial relationship. Sentinel-2 imagery was used for land-cover classification, Sentinel-1 SAR for inundation detection, and LiDAR data for topographic information. Classification was performed using Random Forest, changes were analyzed using Post-Classification Comparison (PCC), and their relationship with inundation was assessed through spatial overlay. The results show that paddy fields decreased by 384.26 ha, while settlements increased by 393.08 ha, with the dominant transition from paddy fields to settlements covering 459.61 ha. Inundation covered 450.92 ha, with 99.84% occurring on paddy fields. The inundation proportion in changed areas was 1.18%, lower than 4.02% in unchanged areas. Therefore, no indication was found that land-cover changes increased inundation proportion.

Keywords: Batujaya, Land cover, Flood inundation, Sentinel

1. PENDAHULUAN

Kompleks Percandian Batujaya di Kabupaten Karawang, Jawa Barat, merupakan salah satu situs arkeologi penting di pantai utara Pulau Jawa. Penelitian selama lebih dari dua dekade telah mengidentifikasi sekitar dua puluh struktur bata yang sebagian besar merupakan sisa bangunan candi, sementara lainnya diduga sebagai bangunan profan (Djafar, 2007). Secara kronologis, situs ini diperkirakan berkembang sejak abad ke-5 hingga ke-7 Masehi pada masa Kerajaan Tarumanagara dan berlanjut hingga abad ke-10 Masehi pada masa pengaruh Sriwijaya (Djafar dkk., 2000). Situs Batujaya pertama kali diidentifikasi sebagai situs arkeologi pada tahun 1984 oleh tim dari Universitas Indonesia saat melakukan penelitian di Situs Cibuaya (Djafar, 1992; Prasetyo, 1987).

Kelestarian Kompleks Percandian Batujaya menghadapi tantangan akibat dinamika tutupan lahan dan kondisi hidrologi di sekitarnya. Penggunaan lahan sebagai sawah menyebabkan genangan dan resapan air yang berpotensi merusak struktur candi, sementara aktivitas pertanian juga mengancam keberadaan gundukan tanah (unur) yang menyimpan sisa bangunan (Djafar dkk., 2000). Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan dan keberadaan genangan di sekitar kawasan perlu dipantau sebagai bagian dari upaya pelestarian Kompleks Percandian Batujaya.

Penelitian Yulianto dkk. (2020) menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan di bagian hulu Citarum berpengaruh terhadap peningkatan risiko banjir. Sementara itu, pada kawasan Batujaya, informasi mengenai perubahan tutupan lahan secara multitemporal dan distribusi spasial genangan masih perlu dikaji untuk memberikan gambaran mengenai dinamika lingkungan di sekitar kawasan percandian. Kajian hubungan Situs Batujaya dengan lingkungan fisiknya sebelumnya telah dilakukan oleh Prasetyo (1987) melalui analisis tumpang-susun berbagai peta dan foto udara untuk melihat keterkaitan sebaran situs dengan kondisi geologi dan topografi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa situs berada pada area yang relatif lebih tinggi sehingga berpotensi kecil mengalami genangan banjir (Prasetyo, 1987). Namun, kondisi lingkungan kawasan telah mengalami perubahan sejak penelitian tersebut dilakukan, termasuk perubahan tutupan lahan berupa perkembangan area persawahan dan permukiman. Oleh karena itu, kondisi tutupan lahan dan sebaran genangan di kawasan Batujaya perlu dievaluasi kembali menggunakan data yang lebih mutakhir dan multitemporal.

Teknologi penginderaan jauh memungkinkan pengamatan tutupan lahan secara luas dan multitemporal. Citra satelit seperti Landsat dan Sentinel-2 menyediakan arsip data yang dapat digunakan untuk menganalisis perubahan tutupan lahan (Ridwan & Sarjito, 2024). Selain citra optik, Sentinel-1 dengan sensor Synthetic Aperture Radar (SAR) dapat dimanfaatkan untuk mengidentifikasi sebaran genangan berdasarkan perubahan karakteristik hamburan balik permukaan. Dengan demikian, penggunaan Sentinel-2 dan Sentinel-1 memungkinkan perubahan tutupan lahan dan sebaran genangan dianalisis menggunakan dua jenis data penginderaan jauh yang saling melengkapi.

Dalam perkembangannya, Google Earth Engine (GEE) menjadi salah satu *platform* berbasis *cloud computing* yang mendukung pengolahan dan analisis data geospasial dalam skala besar. *Platform* ini menyediakan akses terhadap berbagai arsip citra satelit serta kemampuan komputasi untuk melakukan proses pengolahan, analisis multitemporal, dan pemantauan perubahan permukaan bumi secara efisien tanpa bergantung sepenuhnya pada kapasitas komputasi lokal (Gorelick dkk., 2017). Pemanfaatan GEE memungkinkan pengolahan citra Sentinel-2 dari beberapa periode pengamatan dilakukan secara konsisten sehingga perubahan tutupan lahan dapat dipetakan dan dibandingkan secara sistematis. Selain itu, pengolahan citra Sentinel-1 dapat digunakan untuk memperoleh informasi mengenai distribusi spasial genangan pada periode kejadian banjir.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan tutupan lahan secara multitemporal di Kompleks Percandian Batujaya menggunakan citra Sentinel-2 periode 2017–2025 serta memetakan sebaran genangan banjir menggunakan citra Sentinel-1 SAR. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi mengenai dinamika tutupan lahan dan distribusi spasial genangan sebagai informasi pendukung dalam pemantauan dan pelestarian Kompleks Percandian Batujaya.

2. METODOLOGI

2.1 Data Penelitian

Terdapat dua sumber utama data primer yang digunakan dalam penelitian ini. Pertama, data citra *multispectral* Sentinel-2 MSI Level-2A (*Surface Reflectance*) yang diperoleh melalui *platform Google Earth Engine*. Citra diakuisisi pada rentang empat periode waktu, yaitu 2017, 2020, 2023, dan 2025, dengan interval tiga tahun untuk menangkap dinamika perubahan tutupan lahan. Kedua, data citra Sentinel-1 SAR (*Ground Range Detection*) dengan polarisasi VV dan VH pada mode akuisisi *Interferometric Wide* tahun 2023 dan 2024, yang digunakan untuk mendeteksi genangan banjir. Adapun data penelitian ini dapat di lihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Data Penelitian

No	Jenis Data	Sumber	Peruntukan
1.	Citra Sentinel-2 MSI Level-2A (SR)	<i>Google Earth Engine</i>	Untuk melihat pola perubahan tutupan lahan
2.	Citra Sentinel-1 SAR	<i>Google Earth Engine</i>	Untuk melihat persebaran potensi genangan banjir

2.2 Preprocessing Citra

2.2.1 Sentinel-2

Preprocessing citra Sentinel-2 dilakukan sepenuhnya pada *platform GEE*. Pemfilteran koleksi citra dilakukan berdasarkan kesesuaian spasial dengan batas penelitian, periode musim kemarau pada bulan Juni–Oktober untuk meminimalkan pengaruh tutupan awan, serta persentase tutupan awan di bawah 20%. Pemilihan citra bebas awan dan penerapan *cloud masking* merupakan tahap penting dalam analisis multitemporal Sentinel-2 karena keberadaan awan dapat memengaruhi konsistensi informasi reflektansi antarwaktu (Claverie dkk., 2018). Masking awan dan cirrus dilakukan menggunakan band QA60 melalui operasi *bitwise* pada bit 10 dan bit 11 sehingga piksel yang terindikasi awan dan cirrus tidak digunakan dalam analisis selanjutnya.

Nilai reflektansi permukaan hasil masking kemudian diskalakan menggunakan faktor pembagi 10.000 untuk memperoleh nilai reflektansi dalam rentang 0–1. Selanjutnya, dibentuk komposit median dari seluruh citra yang memenuhi kriteria pada setiap periode pengamatan untuk menghasilkan satu citra representatif bagi tahun 2017, 2020, 2023, dan 2025. Pendekatan komposit median umum digunakan untuk memperoleh representasi temporal yang lebih stabil dan mengurangi pengaruh piksel pencilan pada rangkaian citra multitemporal. Sebagai fitur tambahan untuk klasifikasi, dihitung empat indeks spektral, yaitu *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) menggunakan band B8 dan B4, *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) menggunakan B3 dan B11, *Normalized Difference Water Index* (NDWI) menggunakan B8 dan B11, serta *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) menggunakan B11 dan B8. Penggunaan indeks tersebut memberikan informasi tambahan mengenai karakteristik vegetasi, badan air, dan lahan terbangun yang dapat membantu proses pemisahan kelas tutupan lahan (Zha dkk., 2003).

2.2.2 Sentinel-1 SAR

Preprocessing data Sentinel-1 dilakukan terhadap citra *Ground Range Detected* (GRD) pada mode *Interferometric Wide* (IW) dengan polarisasi VV dan VH. Pada koleksi Sentinel-1 GRD di GEE, data telah melalui tahapan *preprocessing* dasar dan disajikan sebagai koefisien hamburan balik (σ°) dalam satuan desibel (dB), sehingga analisis dilakukan langsung pada nilai *backscatter* tersebut. Selanjutnya, diterapkan *speckle filtering* menggunakan metode *focal mean* dengan kernel 3×3 piksel untuk mengurangi variasi *speckle* pada citra SAR. Komposit median kemudian dibentuk untuk merepresentasikan dua kondisi pengamatan, yaitu kondisi normal pada Agustus–September 2023 dan kondisi banjir yang disesuaikan dengan periode kejadian banjir aktual di wilayah penelitian. Pendekatan multitemporal Sentinel-1 melalui perbandingan kondisi sebelum dan saat banjir telah digunakan untuk

mendeteksi perubahan permukaan air dan memperkirakan luasan genangan (Clement dkk., 2018; Tran dkk., 2022).

2.3 Klasifikasi Tutupan Lahan

Klasifikasi tutupan lahan dilakukan menggunakan algoritma *Random Forest* pada komposit Sentinel-2 beserta indeks spektral turunannya. *Random Forest* dipilih karena bersifat non-parametrik, mampu menangani jumlah variabel yang relatif besar, serta memiliki ketahanan terhadap *noise* dan *overfitting* pada klasifikasi data penginderaan jauh (Belgiu & Drăgu, 2016; Rodriguez-Galiano dkk., 2012). Tiga kelas tutupan lahan yang diklasifikasikan meliputi sawah, permukiman/lahan terbangun, dan badan air. Sampel latih dikumpulkan secara manual melalui digitasi titik pada *platform* GEE dengan minimal 30 titik per kelas yang didistribusikan pada area penelitian. Fitur input terdiri atas enam band spektral, yaitu B2, B3, B4, B8, B11, dan B12, serta empat indeks turunan berupa NDVI, MNDWI, NDWI, dan NDBI, sehingga total terdapat 10 fitur prediktor. Model dikonfigurasi menggunakan 100 pohon keputusan (*numberOfTrees* = 100) dan empat variabel pada setiap percabangan (*variablesPerSplit* = 4). Sampel dibagi menjadi secara acak menjadi 80% untuk pelatihan model dan 20% sebagai sampel independent untuk validasi. Evaluasi akurasi dilakukan menggunakan *confusion matrix* dengan parameter *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Coefficient*. Klasifikasi kemudian diterapkan secara konsisten pada komposit tahun 2017, 2020, 2023, dan 2025. Penggunaan *Random Forest* untuk klasifikasi tutupan lahan berbasis citra multispektral telah menunjukkan kemampuan menghasilkan akurasi yang tinggi pada berbagai kondisi dan skala wilayah, meskipun kualitas serta desain sampel pelatihan tetap menjadi faktor penting dalam menentukan hasil klasifikasi (Belgiu & Drăgu, 2016; Rodriguez-Galiano dkk., 2012).

2.4 Deteksi Perubahan Tutupan Lahan

Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan menggunakan metode *post-classification comparison* (PCC), yaitu membandingkan hasil klasifikasi dari dua periode secara piksel per piksel untuk mengidentifikasi perubahan kelas tutupan lahan. Metode PCC memungkinkan identifikasi arah transisi dari suatu kelas menuju kelas lainnya sehingga perubahan tidak hanya diketahui berdasarkan besar perbedaan luas, tetapi juga berdasarkan bentuk perubahan antar kelas (Thonfeld dkk., 2020). Dalam penelitian ini, perubahan dikodekan menggunakan formula $\text{kelas_awal} \times 10 + \text{kelas_akhir}$ sehingga setiap kombinasi transisi memiliki kode yang berbeda. Analisis dilakukan terhadap seluruh kemungkinan transisi pada tiga kelas tutupan lahan, yaitu sawah, permukiman/lahan terbangun, dan badan air. Matriks transisi digunakan untuk menghitung luas perubahan secara keseluruhan pada periode 2017–2025.

2.5 Deteksi Banjir Aktual

Deteksi genangan banjir aktual dilakukan menggunakan citra Sentinel-1 SAR dengan memanfaatkan karakteristik rendahnya nilai *backscatter* pada permukaan air. Dua pendekatan diterapkan secara paralel, yaitu *thresholding* dan *change detection*. Pada pendekatan *thresholding*, piksel dengan nilai *backscatter* VH < -20 dB diklasifikasikan sebagai area yang berpotensi tergenang. Selanjutnya, pada pendekatan *change detection*, perubahan *backscatter* antara kondisi normal dan kondisi banjir dihitung untuk mengidentifikasi penurunan nilai hamburan balik yang menunjukkan perubahan permukaan menjadi genangan. Hasil kedua pendekatan kemudian diintegrasikan menggunakan operasi logika AND sehingga area genangan yang teridentifikasi memenuhi kriteria *thresholding* dan *change detection*. Pendekatan *thresholding* dan *change detection* pada Sentinel-1 telah banyak digunakan untuk pemetaan genangan, termasuk dengan memanfaatkan polarisasi VH dan perbandingan kondisi sebelum dan selama kejadian banjir (Clement dkk., 2018; Tazmul Islam & Meng, 2022; Tran dkk., 2022).

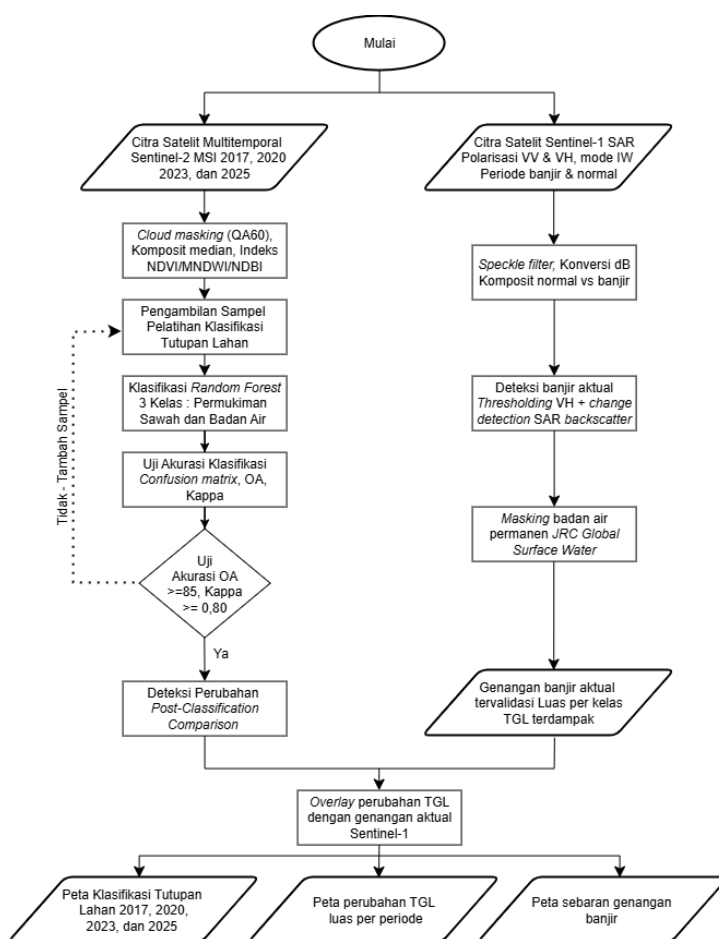
Untuk mengurangi kemungkinan terjadinya kesalahan klasifikasi akibat keberadaan badan air permanen, area yang teridentifikasi sebagai badan air dengan persistensi tinggi berdasarkan JRC *Global Surface Water* dieliminasi dari hasil akhir. Dataset tersebut dikembangkan dari analisis multitemporal citra Landsat dan menyediakan informasi mengenai lokasi, frekuensi, serta persistensi keberadaan air pada permukaan bumi (Pekel dkk., 2016). Dalam penelitian ini, piksel dengan nilai *seasonality* ≥ 10 bulan per tahun dikeluarkan sehingga peta akhir merepresentasikan genangan temporer yang teridentifikasi selama periode pengamatan.

2.6 Analisis Spasial Tutupan Lahan dan Sebaran Genangan

Analisis spasial dilakukan melalui *overlay* antara hasil perubahan tutupan lahan dan peta genangan Sentinel-1. Analisis pertama dilakukan dengan mengidentifikasi distribusi genangan pada area yang mengalami perubahan tutupan lahan selama periode 2017–2025. Analisis kedua dilakukan dengan menghitung luas genangan berdasarkan kelas tutupan lahan tahun 2025, yaitu sawah, permukiman/lahan terbangun, dan badan air. Analisis ini digunakan untuk menggambarkan distribusi spasial genangan terhadap kondisi tutupan lahan di kawasan penelitian. Selanjutnya, lokasi komponen Kompleks Percandian Batujaya dioverlay dengan peta genangan untuk mengidentifikasi posisi situs terhadap area genangan selama periode pengamatan. Seluruh tahapan analisis dilakukan pada platform GEE menggunakan bahasa pemrograman JavaScript, sedangkan hasil akhir diekspor dalam sistem koordinat UTM Zona 48S (EPSG:32748). Pemanfaatan GEE memungkinkan pengolahan data penginderaan jauh dalam jumlah besar secara efisien melalui infrastruktur komputasi berbasis cloud (Gorelick dkk., 2017).

2.7 Alur Penelitian

Alur penelitian terdiri atas 2 tahapan utama, yaitu analisis perubahan tutupan lahan menggunakan citra Sentinel-2, dan deteksi genangan banjir menggunakan citra Sentinel-1 SAR. Pengolahan Sentinel-2 meliputi *cloud masking*, pembentukan komposit median, perhitungan indeks spektral, klasifikasi tutupan lahan menggunakan *Random Forest*, evaluasi akurasi, dan deteksi perubahan menggunakan *Post-Classification Comparison* (PCC). Sementara itu, pengolahan Sentinel-1 meliputi *speckle filtering*, pembentukan komposit kondisi normal dan banjir, deteksi genangan menggunakan *thresholding* dan *change detection*, serta eliminasi badan air permanen. Hasil kedua pengolahan kemudian dianalisis secara spasial untuk menggambarkan perubahan tutupan lahan, sebaran genangan, dan posisi kawasan percandian terhadap area genangan. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.

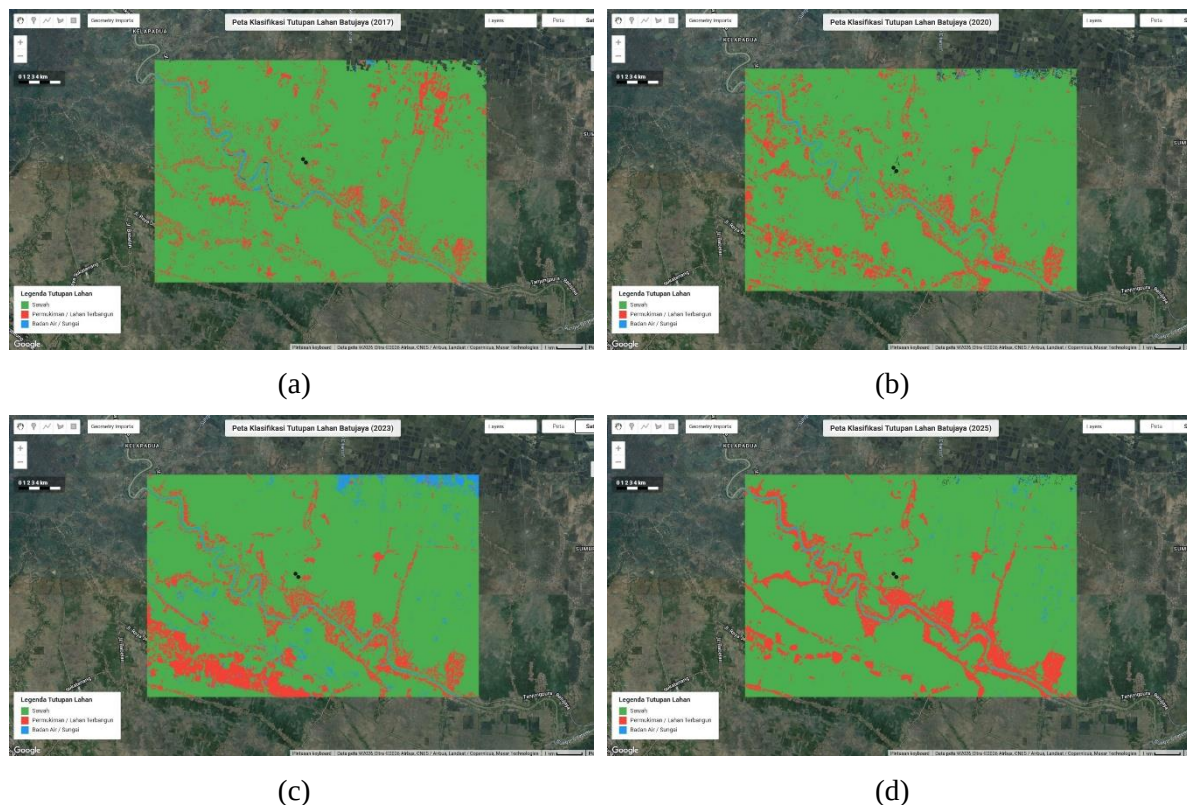


Gambar 1. Diagram alir penelitian analisis perubahan tutupan lahan dan sebaran genangan banjir menggunakan Citra Sentinel

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Klasifikasi Tutupan Lahan

Hasil klasifikasi tutupan lahan multitemporal tahun 2017, 2020, 2023, dan 2025 menunjukkan tiga kelas utama, yaitu sawah, permukiman/lahan terbangun, dan badan air/sungai. Secara visual, kelas sawah mendominasi wilayah penelitian pada seluruh periode pengamatan. Namun, proporsi kelas sawah menunjukkan kecenderungan menurun, sedangkan kelas permukiman/lahan terbangun mengalami peningkatan secara konsisten. Distribusi spasial ketiga kelas tutupan lahan pada masing-masing periode ditunjukkan pada Gambar 2. Sedangkan luasan serta presentase tutupan lahan tahun 2017, 2020, 2023, dan 2025 bisa terlihat pada Tabel 2 dan Gambar 3 merupakan grafik tutupan lahan yang terjadi selama rentang waktu 2017-2025.



Gambar 2. Hasil klasifikasi tutupan lahan tahun (a) 2017, (b) 2020, (c) 2023, dan (d) 2025.

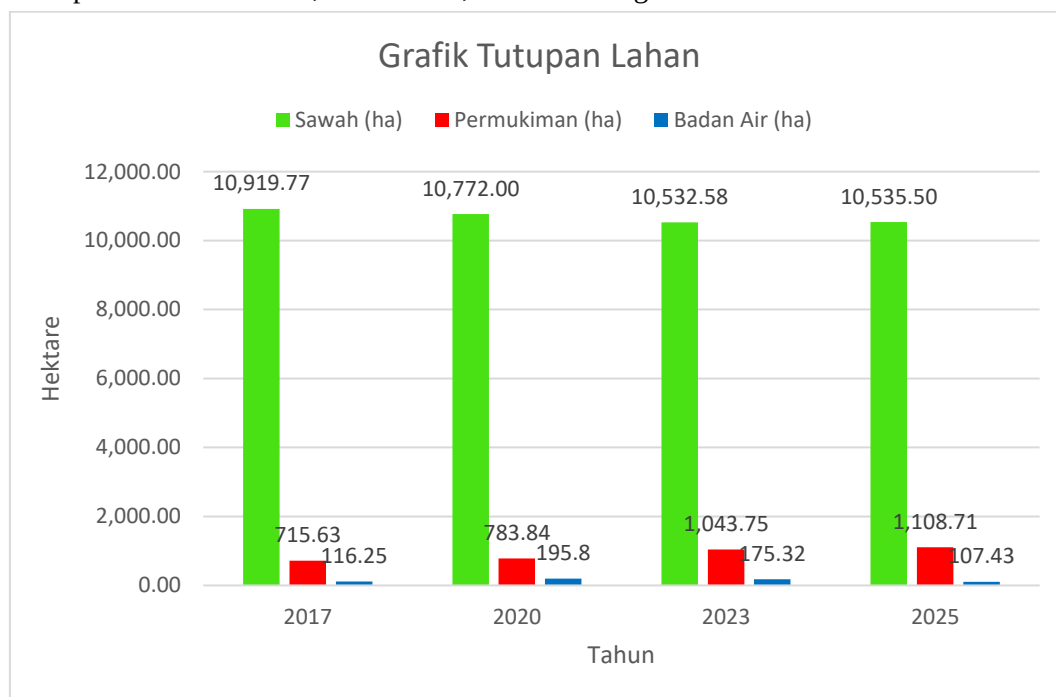
Pada tahun 2017, luas sawah mencapai 10.919,77 ha atau 92,92% dari total wilayah penelitian. Luas tersebut kemudian menurun menjadi 10.772,00 ha (91,66%) pada 2020, 10.532,58 ha (89,63%) pada 2023, dan 10.535,50 ha (89,65%) pada 2025. Dengan demikian, selama periode 2017–2025 terjadi penurunan luas sawah sebesar 384,26 ha atau sekitar 3,52% dari luas sawah pada tahun 2017. Sebaliknya, kelas permukiman/lahan terbangun menunjukkan kecenderungan peningkatan. Pada tahun 2017, luas kelas ini tercatat sebesar 715,63 ha atau 6,09%, kemudian meningkat menjadi 783,84 ha (6,67%) pada 2020, 1.043,75 ha (8,88%) pada 2023, dan mencapai 1.108,71 ha (9,43%) pada 2025.

Tabel 2. Luasan dan Presentase Tutupan Lahan

Kelas Tutupan Lahan	2017 (ha)	2017 (%)	2020 (ha)	2020 (%)	2023 (ha)	2023 (%)	2025 (ha)	2025 (%)
Sawah	10.919,77	92,92	10.772,00	91,66	10.532,58	89,63	10.535,50	89,65
Permukiman	715,63	6,09	783,84	6,67	1.043,75	8,88	1.108,71	9,43
Badan Air	116,25	0,99	195,80	1,67	175,32	1,49	107,43	0,91
Total	11.751,64	100,00	11.751,64	100,00	11.751,64	100,00	11.751,64	100,00

Sementara itu, kelas badan air menunjukkan pola yang relatif berbeda serta memiliki luasan paling kecil dibandingkan sawah dan permukiman. Tercatat memiliki luas sebesar 116,25 ha (0,99%) dari total wilayah penelitian pada tahun 2017, 195,80 ha (1,67%) pada 2020, 175,32 ha (1,49%) pada 2023, dan 107,43 ha (0,91%) pada 2025. Secara keseluruhan, luas permukiman atau lahan terbangun mengalami peningkatan sebesar 393,08 ha selama periode 2017–2025. Hasil klasifikasi pada tahun 2017, 2020, 2023, dan 2025 memberikan informasi dasar mengenai dinamika perubahan struktur ruang di Kawasan Batujaya.

Penurunan luas lahan sawah sebesar 384,26 ha yang terjadi secara bersamaan dengan peningkatan luas lahan terbangun menjadi temuan yang memerlukan kajian lanjutan. Sementara itu, luas badan air mengalami perubahan yang fluktuatif, yaitu meningkat sebesar 79,55 ha pada periode 2017–2020, kemudian menurun hingga 107,43 ha pada 2025. Secara keseluruhan, luas badan air pada tahun 2025 mengalami penurunan sebesar 8,82 ha atau 7,59% dibandingkan kondisi tahun 2017.



Gambar 2. Grafik Tutupan Lahan yang terjadi selama rentang waktu 2017 sampai 2025

3.2 Evaluasi Akurasi Klasifikasi Tutupan Lahan

Evaluasi akurasi klasifikasi tutupan lahan dilakukan menggunakan *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Coefficient*. Hasil evaluasi menunjukkan bahwa nilai OA pada seluruh periode pengamatan berada pada rentang 98,85–99,68%, sedangkan nilai Kappa berkisar antara 0,8316–0,9441. Nilai tersebut menunjukkan bahwa hasil klasifikasi memiliki tingkat kesesuaian yang tinggi terhadap data referensi. Hasil evaluasi akurasi setiap periode pengamatan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Evaluasi Akurasi Klasifikasi Tutupan Lahan

Tahun	Overall Accuracy (OA)	Kappa Coefficient
2017	98,85%	0,8316
2020	99,19%	0,8732
2023	98,97%	0,8445
2025	99,68%	0,9441

Nilai Kappa tertinggi diperoleh pada klasifikasi tahun 2025 sebesar 0,9441, sedangkan nilai terendah terdapat pada tahun 2017 sebesar 0,8316. Meskipun terdapat variasi nilai Kappa antar tahun, seluruh nilai Kappa telah memenuhi kriteria minimum 0,80 yang ditetapkan dalam penelitian, sedangkan nilai OA pada seluruh periode berada di atas 98%. Hasil evaluasi tersebut menunjukkan bahwa hasil

klasifikasi pada tahun 2017, 2020, 2023, dan 2025 memenuhi kriteria akurasi yang ditetapkan dan dapat digunakan sebagai dasar untuk analisis perubahan tutupan lahan pada tahap selanjutnya.

3.3 Perubahan Tutupan Lahan 2017-2025

Analisis perubahan tutupan lahan periode 2017–2025 dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi tutupan lahan pada kedua tahun menggunakan pendekatan *Post-Classification Comparison* (PCC). Pendekatan ini memungkinkan identifikasi arah perubahan antarkelas, sehingga tidak hanya menunjukkan besarnya perubahan luas, tetapi juga jenis transisi tutupan lahan yang terjadi. Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4 dan Gambar 3 terdapat enam jenis transisi tutupan lahan yang teridentifikasi, yaitu sawah menjadi permukiman, sawah menjadi badan air, permukiman menjadi sawah, permukiman menjadi badan air, badan air menjadi sawah, dan badan air menjadi permukiman. Sementara itu, kelas-kelas yang tidak mengalami perubahan tutupan lahan tidak termasuk dalam pembahasan transisi.

Tabel 4. Transisi Tutupan Lahan yang teridentifikasi Tahun 2017-2025

No	Overall Accuracy (OA)	Luas Perubahan (ha)	Proporsi dari Total Transisi Teridentifikasi (%)
1.	Sawah → Permukiman/Lahan Terbangun	459,61	73,96
2.	Sawah → Badan Air	42,18	6,79
3.	Permukiman/Lahan Terbangun → Sawah	64,52	10,38
4.	Permukiman → Badan Air	2,07	0,33
5.	Badan Air → Sawah	53,00	8,53
6.	Badan Air → Permukiman	0,07	0,01
Total		621,44	100,00

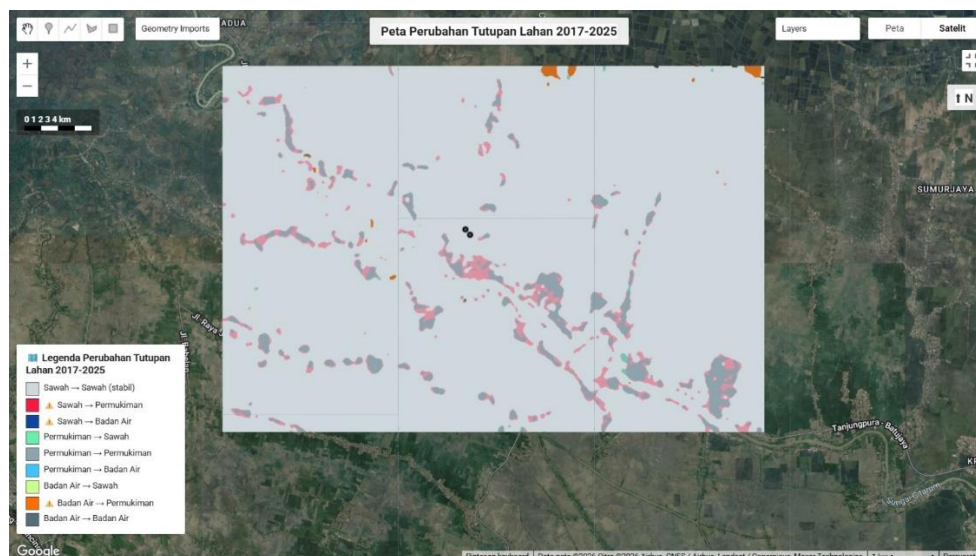
Hasil pada Tabel 4 menunjukkan bahwa transisi sawah menjadi permukiman merupakan perubahan yang paling dominan, dengan luas mencapai 459,61 ha atau 73,96% dari total luas transisi yang teridentifikasi. Secara spasial, perubahan tersebut tersebar pada berbagai bagian wilayah penelitian dan cenderung mengikuti area permukiman atau lahan terbangun yang telah berkembang. Dominannya transisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan selama periode 2017–2025 terutama dicirikan oleh adanya konversi lahan sawah menjadi permukiman atau lahan terbangun.

Temuan tersebut konsisten dengan hasil analisis luasan tutupan lahan, yang menunjukkan bahwa luas sawah mengalami penurunan dari 10.919,77 ha pada tahun 2017 menjadi 10.535,50 ha pada tahun 2025, atau mengalami penurunan sebesar 384,26 ha. Sebaliknya, luas permukiman mengalami peningkatan dari 715,63 ha pada tahun 2017 menjadi 1.108,71 ha pada tahun 2025, atau meningkat sebesar 393,08 ha. Sementara itu, luas badan air mengalami perubahan yang relatif fluktuatif dan pada akhir periode mengalami penurunan dari 116,25 ha pada tahun 2017 menjadi 107,43 ha pada tahun 2025, atau berkurang sebesar 8,82 ha. Dengan demikian, hasil analisis luasan dan PCC memberikan indikasi yang konsisten mengenai adanya perubahan struktur tutupan lahan yang ditandai dengan berkurangnya tutupan sawah dan meningkatnya tutupan permukiman.

Transisi sawah menjadi badan air teridentifikasi dengan luas 42,18 ha atau 6,79% dari total transisi. Perubahan ini menunjukkan adanya lokasi yang pada tahun 2017 diklasifikasikan sebagai sawah, tetapi pada tahun 2025 teridentifikasi sebagai badan air. Sebaliknya, transisi permukiman menjadi sawah memiliki luas 64,52 ha atau 10,38%. Keberadaan perubahan dua arah tersebut menunjukkan bahwa dinamika tutupan lahan di wilayah penelitian tidak sepenuhnya berlangsung satu arah dari sawah menuju permukiman, tetapi juga terdapat perubahan dari permukiman menjadi sawah. Selain itu, teridentifikasi transisi permukiman menjadi badan air sebesar 2,07 ha atau 0,33%, serta badan air menjadi permukiman sebesar 0,07 ha atau 0,01%. Kedua transisi tersebut memiliki proporsi yang relatif kecil dibandingkan jenis perubahan lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan antara kelas permukiman dan badan air bukan merupakan karakteristik utama perubahan tutupan lahan selama periode 2017–2025.

Transisi badan air menjadi sawah merupakan salah satu perubahan yang cukup besar setelah transisi sawah menjadi permukiman, dengan luas mencapai 53,00 ha atau 8,53% dari total transisi. Pola ini menunjukkan adanya area yang pada tahun 2017 teridentifikasi sebagai badan air, tetapi pada tahun 2025 diklasifikasikan sebagai sawah. Dalam konteks wilayah pertanian yang memiliki sistem irigasi dan

mengalami perubahan kondisi permukaan secara musiman, perubahan tersebut dapat berkaitan dengan perubahan kondisi badan air atau perubahan pemanfaatan lahan selama periode pengamatan. Namun, hasil klasifikasi tidak secara langsung dapat menentukan penyebab perubahan tersebut tanpa adanya data pendukung tambahan.



Gambar 3. Hasil Peta Perubahan Tutupan Lahan 2017-2025

Secara keseluruhan, hasil PCC menunjukkan bahwa perubahan paling menonjol pada periode 2017–2025 adalah konversi sawah menjadi permukiman/lahan terbangun sebesar 459,61 ha. Nilai tersebut merupakan proporsi terbesar dari total perubahan yang teridentifikasi, sehingga menjadi indikasi utama perubahan struktur spasial kawasan penelitian. Hasil PCC juga menunjukkan adanya perubahan dua arah antarkelas, meskipun dengan luasan yang lebih kecil. Dengan demikian, perubahan tutupan lahan di wilayah penelitian selama periode 2017–2025 terutama ditandai oleh penurunan luas sawah yang diikuti peningkatan luas permukiman.

3.4 Sebaran Genangan Banjir

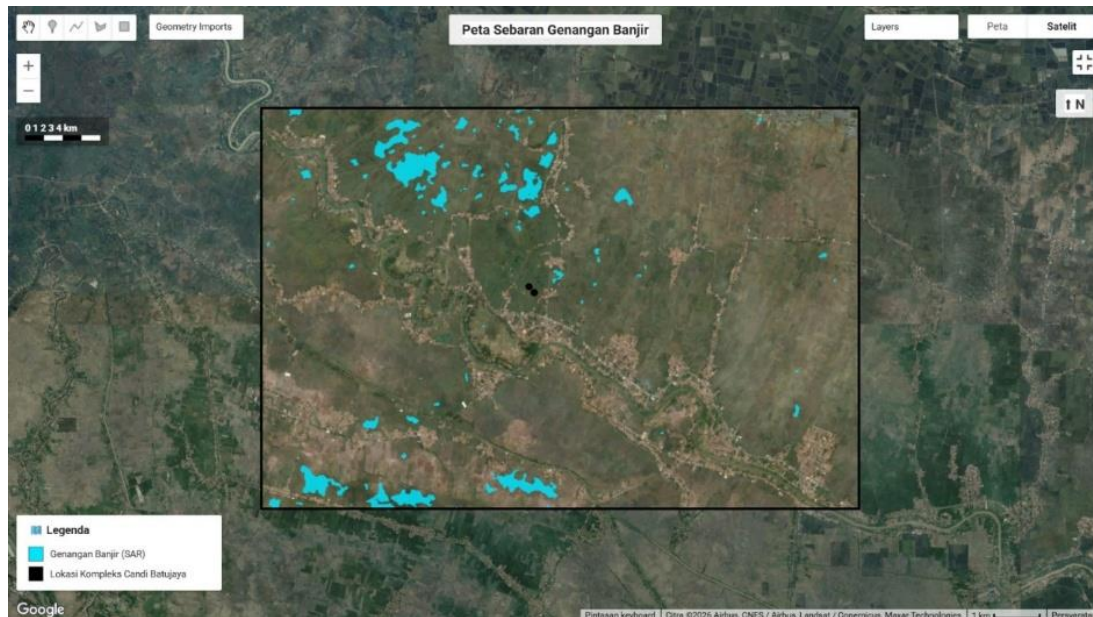
Hasil deteksi menggunakan citra Sentinel-1 SAR menunjukkan adanya genangan pada periode Januari–Februari 2024 dengan luas sebesar 450,92 ha. Sebaran genangan tidak terdistribusi secara merata pada wilayah penelitian, tetapi membentuk beberapa konsentrasi pada bagian utara, tengah, dan barat daya kawasan. Distribusi spasial genangan ditunjukkan pada Gambar 4.

Peta sebaran genangan banjir yang disajikan pada Gambar 3. Memperlihatkan distribusi spasial yang tidak merata, dengan pola konsentrasi yang mencerminkan karakteristik topografi dan hidrologi wilayah penelitian. Tiga zona genangan yang dapat dibedakan secara spasial, sebagai berikut.

Zona utara AOI menunjukkan konsentrasi genangan terbesar dengan pola yang relatif saling terhubung. Secara spasial, zona ini berada lebih dekat dengan sistem Sungai Citarum dan kawasan pantai utara Karawang. Pola tersebut menunjukkan adanya konsentrasi genangan yang lebih luas dibandingkan bagian lain wilayah penelitian. Namun, faktor yang mengontrol terbentuknya genangan memerlukan analisis hidrologi dan topografi lebih lanjut.

Zona tengah menunjukkan pola genangan yang lebih tersebar dalam bentuk spot-spot diskrit. Sebagian genangan terlihat berada di sekitar jaringan irigasi dan area persawahan. Berbeda dengan zona utara yang membentuk konsentrasi relatif luas, genangan pada zona tengah memiliki pola yang lebih terfragmentasi. Kompleks Percandian Batujaya berada pada zona ini dan tidak teridentifikasi mengalami genangan secara langsung selama periode pengamatan.

Zona barat daya menunjukkan peningkatan konsentrasi genangan dengan pola yang relatif lebih terhubung dibandingkan zona tengah. Pola tersebut terutama terlihat pada bagian selatan hingga barat daya wilayah penelitian.



Gambar 4. Sebaran genangan banjir periode Januari-Februari 2024

Hasil *overlay* antara peta sebaran genangan dan lokasi Kompleks Percandian Batujaya menunjukkan bahwa Candi Jiwa dan Candi Blandongan tidak teridentifikasi mengalami genangan secara langsung pada periode Januari–Februari 2024. Meskipun demikian, beberapa area genangan teridentifikasi di sekitar kawasan percandian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pemantauan distribusi genangan secara berkala tetap diperlukan sebagai informasi pendukung dalam pengelolaan dan pelestarian Kompleks Percandian Batujaya.

3.5 Distribusi Genangan Terhadap Tutupan Lahan dan Kompleks Percandian Batujaya

Pada Tabel 5. menunjukkan bahwa genangan paling dominan terjadi pada kelas sawah. Dari total genangan sebesar 450,92 ha, sekitar 450,21 ha (99,84%) berada pada area yang diklasifikasikan sebagai sawah. Sementara itu, genangan pada kelas permukiman/lahan terbangun hanya mencapai sekitar 0,21 ha (0,05%), sedangkan kelas badan air memiliki luas sekitar 0,51 ha (0,11%). Dominasi genangan pada lahan sawah menunjukkan bahwa karakteristik penggunaan lahan di kawasan penelitian yang masih didominasi oleh lahan pertanian sangat berpengaruh terhadap luasan area yang teridentifikasi tergenang pada saat kejadian banjir.

Tabel 5. Distribusi Genangan Berdasarkan Kelas Tutupan Lahan

Tutupan Lahan	Luas Genangan (ha)	Presentase (%)
Sawah	450,2080	73,96
Permukiman/Lahan Terbangun	0,2075	6,79
Badan Air	0,5137	10,38
Total	450,9240	100,00

Kondisi Kompleks Percandian Batujaya menjadi perhatian khusus dalam interpretasi tersebut. Hasil ini menunjukkan bahwa Candi Jiwa dan Candi Blandongan tidak teridentifikasi sebagai area yang tergenang secara langsung, tetapi keduanya berada di sekitar area yang mengalami genangan. Hasil distribusi genangan terhadap tutupan lahan ini memperkuat temuan bahwa kawasan situs relatif tidak mengalami genangan langsung pada kejadian yang diamati, tetapi tetap berada dalam lingkungan yang memiliki tekanan hidrologis akibat genangan di sekitarnya.

3.6 Analisis Hubungan Perubahan Tutupan Lahan dengan Genangan Banjir

Analisis hubungan perubahan tutupan lahan dengan genangan banjir dilakukan melalui *overlay* spasial antara perubahan tutupan lahan periode 2017–2023 dan hasil deteksi genangan pada periode Januari–Februari 2024. Periode perubahan 2017–2023 digunakan karena seluruh perubahan tutupan lahan yang dibandingkan terjadi sebelum periode genangan yang dianalisis, sehingga kondisi perubahan yang digunakan dalam *overlay* merepresentasikan dinamika tutupan lahan sebelum kejadian genangan tahun 2024. Analisis ini digunakan untuk melihat apakah area yang mengalami perubahan tutupan lahan memiliki proporsi genangan yang berbeda dibandingkan dengan area yang tidak mengalami perubahan.

Hasil *overlay* menunjukkan bahwa dari total wilayah penelitian 11.751,64 ha, terdapat 11.002,76 ha area yang tidak berubah dan 748,88 ha area yang berubah. Genangan pada area tidak berubah mencapai 442,11 ha atau 4,02%, sedangkan pada area berubah sebesar 8,82 ha atau 1,18%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proporsi genangan pada area berubah lebih rendah dibandingkan area yang tidak berubah, sehingga tidak ditemukan indikasi peningkatan proporsi genangan pada area yang mengalami perubahan tutupan lahan.

Analisis kemudian difokuskan pada perubahan dominan Sawah menjadi Permukiman, yang berdasarkan PCC 2017–2025 mencapai 459,61 ha atau 73,96% dari total transisi. Pada periode 2017–2023, area Sawah menjadi Sawah memiliki luas 10.274,62 ha dengan genangan 441,38 ha (4,29%), sedangkan Sawah menjadi Permukiman seluas 535,19 ha dengan genangan 8,15 ha (1,52%). Dengan demikian, proporsi genangan pada Sawah menjadi Permukiman hanya sekitar 0,36 kali dibandingkan Sawah menjadi Sawah.

Secara keseluruhan, hasil *overlay* menunjukkan adanya hubungan spasial, tetapi tidak menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan meningkatkan proporsi genangan. Dominasi genangan pada sawah juga perlu mempertimbangkan bahwa sawah merupakan tutupan lahan yang dominan di wilayah penelitian. Kondisi genangan dapat dipengaruhi oleh faktor lain seperti topografi, jaringan irigasi, kedekatan dengan badan air, dan kondisi hidrologi, sehingga hasil ini tidak dapat digunakan untuk menyatakan hubungan sebab-akibat secara langsung.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, perubahan tutupan lahan di Kompleks Percandian Batujaya periode 2017–2025 menunjukkan adanya penurunan luas sawah sebesar 384,26 ha, dari 10.919,77 ha menjadi 10.535,50 ha, sedangkan luas permukiman/lahan terbangun meningkat sebesar 393,08 ha, dari 715,63 ha menjadi 1.108,71 ha. Hasil Post-Classification Comparison (PCC) menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan paling dominan adalah sawah menjadi permukiman/lahan terbangun sebesar 459,61 ha atau 73,96% dari total transisi. Sementara itu, genangan yang terdeteksi menggunakan Sentinel-1 pada periode Januari–Februari 2024 memiliki luas 450,92 ha, dengan 99,84% berada pada area sawah. Candi Jiwa dan Candi Blandongan tidak teridentifikasi mengalami genangan secara langsung, meskipun terdapat genangan pada area di sekitar kawasan percandian. Hasil *overlay* perubahan tutupan lahan dan genangan menunjukkan bahwa area yang mengalami perubahan memiliki proporsi genangan sebesar 1,18%, sedangkan area yang tidak mengalami perubahan sebesar 4,02%. Pada perubahan dominan, area Sawah → Permukiman memiliki proporsi genangan sebesar 1,52%, lebih rendah dibandingkan area Sawah → Sawah sebesar 4,29%. Dengan demikian, berdasarkan hasil analisis spasial, tidak ditemukan indikasi bahwa perubahan tutupan lahan meningkatkan proporsi genangan pada wilayah penelitian. Hubungan yang diperoleh merupakan hubungan spasial dan belum menunjukkan hubungan sebab-akibat, karena kondisi genangan juga dapat dipengaruhi oleh faktor topografi, jaringan irigasi, kedekatan dengan badan air, dan kondisi hidrologi wilayah.

DAFTAR RUJUKAN

Belgiu, M., & Drăgu, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. In *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Vol. 114, pp. 24–31). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>

- Claverie, M., Ju, J., Masek, J. G., Dungan, J. L., Vermote, E. F., Roger, J. C., Skakun, S. V., & Justice, C. (2018). The Harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set. *Remote Sensing of Environment*, 219, 145–161. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.002>
- Clement, M. A., Kilsby, C. G., & Moore, P. (2018). Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2), 152–168.
- Djafar, H. (1992). *Kompleks percandian di daerah pantai utara Karawang, Jawa Barat* (Laporan Penelitian, DIP OPF Universitas Indonesia Tahun Anggaran 1992/1992). Fakultas Sastra, Universitas Indonesia.
- Djafar, H. (2007). *Kompleks percandian di kawasan Situs Batujaya, Karawang, Jawa Barat: Kajian sejarah kebudayaan* [Disertasi doktor tidak diterbitkan]. Program Pascasarjana, Fakultas Ilmu Pengetahuan Budaya, Universitas Indonesia.
- Djafar, H. (2010). *Kompleks percandian Batujaya: Kebudayaan Kerajaan Tarumanagara*. Yayasan Obor Indonesia.
- Djafar, H., Wurjantoro, E., Permana, R. C. E., Nasution, I. P., & Utomo, B. B. (2000). *Percandian di Situs Batujaya, Karawang: Kajian arsitektur, kronologi, dan sistemnya* (Laporan Penelitian Hibah Bersaing VII/2 Perguruan Tinggi Tahun Anggaran 1999/2000). Pusat Penelitian Kemasyarakatan dan Budaya, Lembaga Penelitian Universitas Indonesia.
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Pekel, J. F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A. S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418–422. <https://doi.org/10.1038/nature20584>
- Prasetyo, B. T. (1987). *Situs-situs arkeologi Batujaya dan lingkungannya* [Skripsi sarjana tidak diterbitkan]. Jurusan Arkeologi, Fakultas Sastra, Universitas Indonesia.
- Ridwan, M., & Sarjito, J. (2024). Studi Kajian Dampak Perubahan Tutupan Lahan terhadap Kejadian Banjir di Daerah Aliran Sungai. *ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research*, 26, 38. <https://doi.org/10.20961/enviro.v26i1.93145>
- Rodriguez-Galiano, V. F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., & Rigol-Sanchez, J. P. (2012). An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67, 93–104. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>
- Tazmul Islam, M., & Meng, Q. (2022). An exploratory study of Sentinel-1 SAR for rapid urban flood mapping on Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 113. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103002>
- Thonfeld, F., Steinbach, S., Muro, J., & Kirimi, F. (2020). Long-term land use/land cover change assessment of the Kilombero catchment in Tanzania using random forest classification and robust change vector analysis. *Remote Sensing*, 12. <https://doi.org/10.3390/rs12071057>
- Tran, K. H., Menenti, M., & Jia, L. (2022). Surface Water Mapping and Flood Monitoring in the Mekong Delta Using Sentinel-1 SAR Time Series and Otsu Threshold. *Remote Sensing*, 14. <https://doi.org/10.3390/rs14225721>
- Yulianto, F., Suwarsono, Nugroho, U. C., Nugroho, N. P., Sunarmodo, W., & Khomarudin, M. R. (2020). Spatial-Temporal Dynamics Land Use/Land Cover Change and Flood Hazard Mapping in the Upstream Citarum Watershed, West Java, Indonesia. *Quaestiones Geographicae*, 39(1), 125–146. <https://doi.org/10.2478/quageo-2020-0010>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 583–594. <https://doi.org/10.1080/01431160304987>