



Analisis Spasial dan Temporal Tanaman Eceng Gondok Tahun 2021-2025

(Studi Kasus di Danau Rawa Pening)

Marchadha Santi Wilda^{1*}, Firman Emmanuel Declarantius Parulian²

¹Badan Pusat Statistik Kabupaten Halmahera Selatan, Indonesia

²Badan Pusat Statistik Kabupaten Kotawaringin Barat, Indonesia

*Penulis Korespondensi: marchadhasantiwilda@gmail.com

Abstract. Lake Rawa Pening is one of Indonesia's priority lakes facing serious ecological pressure due to the rapid proliferation of water hyacinth. This study aims to classify and map the distribution of water hyacinth in Rawa Pening Lake during the 2021–2025 period and to analyze the seasonal distribution patterns of water hyacinth. Sentinel-2 imagery processed on the Google Earth Engine platform was classified using the Random Forest algorithm combined with hybrid sampling and spectral indices (NDVI, NDWI, MNDWI, and SRI). Classification accuracy assessment showed high performance with an Overall Accuracy of 97.45% and a Kappa coefficient of 0.949. The results indicate significant spatial-temporal fluctuations, with the highest coverage recorded in March–April 2021 (855.75 ha) and the lowest in May–June 2022 (108.44 ha). Seasonal-Trend Decomposition using Loess (STL) revealed consistent seasonal patterns, with peak expansion occurring during the rainy season, particularly in January–February. Although initial implementation of lake management policies reduced coverage, subsequent increases suggest that control measures remain insufficiently sustainable. This study demonstrates the effectiveness of cloud-based satellite monitoring for evaluating lake management policies and supporting evidence-based environmental management strategies.

Keywords: Google Earth Engine; Random Forest; Remote Sensing; Spatial-Temporal Analysis; Water Hyacinth.

Abstrak. Danau Rawa Pening merupakan salah satu danau prioritas nasional yang menghadapi tekanan ekologis serius akibat pertumbuhan eceng gondok yang masif. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan klasifikasi dan pemetaan distribusi eceng gondok di Danau Rawa Pening selama periode 2021 hingga 2025 dan menganalisis pola musiman sebaran eceng gondok. Citra Sentinel-2 yang diolah melalui platform Google Earth Engine diklasifikasikan menggunakan algoritma Random Forest dengan strategi *hybrid* sampling dan indeks spektral (NDVI, NDWI, MNDWI, dan SRI). Hasil uji akurasi menunjukkan performa tinggi dengan *Overall Accuracy* sebesar 97,45% dan Kappa sebesar 0,949. Luasan eceng gondok menunjukkan fluktuasi signifikan dengan nilai tertinggi pada Maret–April 2021 (855,75 ha) dan terendah pada Mei–Juni 2022 (108,44 ha). Analisis dekomposisi STL mengidentifikasi pola musiman yang konsisten, dengan puncak pertumbuhan terjadi pada musim hujan, khususnya Januari–Februari. Meskipun kebijakan penyelamatan danau mampu menurunkan luasan pada tahap awal, peningkatan kembali pada periode berikutnya menunjukkan perlunya penguatan strategi pengendalian yang berkelanjutan. Penelitian ini membuktikan bahwa pemantauan berbasis citra satelit berbasis *cloud* efektif dalam mendukung evaluasi kebijakan dan pengelolaan danau berbasis data.

Kata Kunci: Analisis Spasial-Temporal; Eceng Gondok; Google Earth Engine; Penginderaan Jauh; Random Forest.

1. PENDAHULUAN

Latar Belakang

Eceng gondok merupakan spesies tumbuhan air invasif yang dikenal karena laju pertumbuhan agresifnya, yang secara signifikan mengubah struktur fisik dan kimiawi perairan. Keberadaan populasi yang masif di permukaan air menciptakan lapisan penutup yang menghambat penetrasi sinar matahari dan pertukaran gas atmosfer, sehingga memicu penurunan kadar oksigen terlarut (*dissolved oxygen*) secara drastis. Kondisi ini menciptakan siklus degradasi lingkungan; proses dekomposisi biomassa tanaman yang mati tidak hanya mengonsumsi sisa oksigen, tetapi juga menurunkan pH air dan mengancam kelangsungan

hidup biota akuatik (Lubembe et al., 2023). Selain mengganggu metabolisme ekosistem, akumulasi vegetasi ini menghambat aliran air, meningkatkan risiko banjir, serta menjadi indikator keberadaan sampah plastik yang memperparah pencemaran perairan (Emmerik et al., 2025; Srisawas et al., 2024).

Secara sosio-ekonomi, invasi eceng gondok menimbulkan kerugian besar melalui gangguan jalur navigasi, kerusakan sektor perikanan tangkap, serta penurunan nilai estetika perairan yang merusak layanan ekosistem pariwisata (Auchterlonie et al., 2021 dalam Tshikovhi et al., 2025). Masalah ini umumnya dipicu oleh tekanan antropogenik yang intensif, seperti pengayaan nutrisi (eutrofikasi) akibat limbah pertanian, budidaya perikanan, dan limbah domestik. Meskipun upaya pengendalian telah dilakukan di berbagai wilayah, efektivitasnya sering kali terkendala oleh tata kelola yang lemah, keterbatasan koordinasi antar pemangku kepentingan, serta pendanaan yang tidak berkelanjutan. Akibatnya, penyebaran spesies ini tetap menjadi ancaman serius bagi biodiversitas global dan stabilitas ekonomi kawasan perairan.

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 60 Tahun 2021 Tentang Penyelamatan Danau Prioritas Nasional (2021), Danau Rawa Pening ditetapkan sebagai salah satu dari 15 danau prioritas nasional yang memiliki peran krusial bagi ekosistem perairan, penyedia air PLTA, serta sumber ekonomi nelayan di Kabupaten Semarang. Danau Rawa Pening menerima masukan air dari beberapa sub-DAS yang membawa sedimen dan nutrisi dari kawasan pertanian, permukiman, serta aktivitas perikanan. Kondisi tersebut menyebabkan proses eutrofikasi yang mendukung pertumbuhan eceng gondok secara masif sehingga menjadi salah satu permasalahan utama pengelolaan danau. Tingginya produktivitas perairan dan akumulasi nutrisi menyebabkan eceng gondok mampu berkembang dengan cepat dan menutupi sebagian besar permukaan danau pada periode tertentu (Sulastris et al., 2016). Namun, fungsi strategis ini terus terancam oleh masalah eutrofikasi kronis yang memicu ledakan pertumbuhan eceng gondok. Fenomena penurunan kualitas air dan invasi vegetasi ini dipicu oleh tekanan antropogenik yang intensif, mencakup beban nutrisi berlebih dari sektor pertanian, budidaya perikanan, limbah domestik, hingga perubahan tata guna lahan. Meskipun upaya pengelolaan telah diupayakan sejak tahun 2011, langkah-langkah tersebut dinilai sebagian besar tidak efektif akibat tata kelola yang lemah, koordinasi antar pemangku kepentingan yang terbatas, serta dukungan pendanaan yang tidak mencukupi (Henny et al., 2026). Kondisi ini secara langsung mempercepat laju sedimentasi organik dan meningkatkan evapotranspirasi yang mengancam keberlangsungan ekosistem danau (Prasetyo, 2024).

Oleh karena itu, diperlukan sistem pemantauan yang komprehensif untuk memahami dinamika penyebaran vegetasi tersebut guna merumuskan strategi pengendalian yang lebih tepat sasaran.

Penelitian yang telah berupaya memetakan persebaran eceng gondok khususnya di Rawa Pening masih sedikit ditemukan. Penelitian yang dilakukan oleh Muna et al. (2025) menghasilkan pemetaan eceng gondok di Danau Rawa Pening dengan periode Mei-Agustus 2024 dengan memanfaatkan citra satelit Sentinel-2. Berdasarkan studi tersebut, periode Mei-Agustus 2024 menunjukkan luas area eceng gondok yang menurun sejalan dengan penurunan curah hujan. Muammal & Marsisno (2025) mengembangkan metode pemantauan eceng gondok dengan mengombinasikan indeks vegetasi dan data radar dengan metode *machine learning*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *machine learning* mampu menghasilkan pemetaan yang baik, tetapi penelitian ini masih memiliki keterbatasan pada validasi data lapangan dan cakupan waktu analisis. Studi oleh Muna et al. (2025) dan Muammal & Marsisno (2025) masih kurang mampu menangkap dinamika musiman pada luasan eceng gondok. Padahal, karakteristik pertumbuhan eceng gondok sangat dipengaruhi oleh perubahan iklim dan fluktuasi debit air yang terjadi dalam hitungan bulan. Salah satu penelitian yang telah berhasil mengombinasikan deteksi objek terapung dan analisis pola musiman berbasis citra satelit adalah studi oleh Wilda & Pasaribu (2025).

Penggunaan citra satelit multitemporal dan machine learning terbukti efektif dalam mengoptimalkan pemetaan tanaman air invasif seperti eceng gondok. Penelitian yang dilakukan oleh Bayable et al. (2023) membandingkan kinerja tiga algoritma, yaitu *Random Forest*, *Support Vector Machine*, dan *CART* di Danau Tana menggunakan citra Landsat 8 dan Sentinel-2. Hasil analisis menunjukkan bahwa *Random Forest* secara konsisten memberikan akurasi tertinggi, khususnya pada data Sentinel-2 selama musim gugur. Dalam konteks dinamika kawasan, Tolera et al. (2025) juga menggunakan citra Sentinel-2 dan teknik GIS untuk memantau perubahan musiman eceng gondok di Danau Koka dan Danau Ziway, Ethiopia. Studi tersebut mengindikasikan adanya perluasan area yang signifikan selama musim hujan yang mengancam stabilitas ekosistem setempat.

Selain untuk memetakan sebaran luasan, teknologi penginderaan jauh kini mulai diintegrasikan untuk menganalisis interaksi eceng gondok dengan polutan perairan. Emmerik et al. (2025) menerapkan machine learning untuk mengklasifikasikan serta memetakan akumulasi plastik dan eceng gondok di Sungai Saigon. Studi ini berhasil mengungkap bahwa eceng gondok berperan signifikan sebagai pembawa dan penampung limbah, dengan kemampuan mengonsentrasikan hingga 73% plastik yang mengambang di permukaan sungai.

Temuan ini menegaskan potensi vegetasi invasif tersebut sebagai indikator biologis dalam pemantauan pencemaran plastik di ekosistem perairan. Kebaruan dalam penelitian ini terletak pada penggunaan platform *cloud computing* Google Earth Engine (GEE) untuk melakukan analisis spasial-temporal secara *bimonthly* (dua bulanan) dalam rentang waktu panjang, yakni dari tahun 2021 hingga 2025. Pendekatan ini memungkinkan pemrosesan *big data* citra satelit secara efisien melalui algoritma *Random Forest* yang dikombinasikan dengan strategi *hybrid sampling*. Penggunaan metode ini memberikan solusi terhadap tantangan klasifikasi pada area transisi air dan vegetasi yang selama ini menjadi kelemahan dalam metode pemetaan tradisional. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis pola fluktuasi musiman luas eceng gondok yang belum banyak terungkap secara detail pada penelitian-penelitian sebelumnya.

Urgensi penelitian ini didasarkan pada kebutuhan mendesak akan data dasar yang akurat untuk mendukung pengambilan kebijakan manajemen danau oleh pemerintah daerah. Melalui pemetaan *bimonthly*, otoritas terkait dapat mengevaluasi efektivitas program pembersihan yang telah berjalan dan merencanakan alokasi sumber daya secara lebih tepat sasaran.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan klasifikasi dan pemetaan distribusi eceng gondok di Danau Rawa Pening selama periode 2021 hingga 2025 dan menganalisis pola musiman sebaran eceng gondok. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi nyata dalam upaya restorasi dan pelestarian lingkungan di Kabupaten Semarang.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Karakteristik Eceng Gondok

Menurut Poernama et al. (2023), eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) merupakan gulma air invasif dengan kemampuan reproduksi tinggi yang mampu menutupi permukaan air dengan cepat dan membentuk koloni luas (*blooming*). Tumbuhan ini termasuk salah satu gulma paling agresif di dunia karena dalam waktu enam bulan dapat bertambah hingga 1 hektar dengan bobot basah mencapai 125 ton (Hartanto, 2020). Meskipun adaptif terhadap kondisi ekstrem, tanaman ini tumbuh maksimal di perairan yang sedikit keruh (Prasetyo, 2024; Tobing & Hayati, 2024). Ledakan populasi eceng gondok dipicu oleh eutrofikasi akibat tingginya kandungan nitrogen dan fosfor dari limbah domestik, industri, serta *runoff* (Surya et al., 2024).

Pertumbuhan yang cepat tersebut membuat eceng gondok mudah mendominasi perairan dalam waktu singkat apabila tidak diimbangi dengan upaya pengendalian yang memadai.

Penginderaan Jauh (*Remote Sensing*)

Penginderaan jauh adalah teknik perolehan informasi permukaan bumi melalui sensor tanpa harus berinteraksi secara fisik (Campbell & Wynne, 2011; Lasmawati et al., 2025). Akurasi identifikasi objek dalam teknologi ini bergantung pada empat resolusi utama: spasial (detail ukuran objek), spektral (kemampuan membedakan objek berdasarkan *band*), temporal (frekuensi pengamatan ulang), dan radiometrik (kepekaan kontras) (Drusch et al., 2012; Gascon et al., 2017; Ustin & Middleton, 2021). Dalam pemantauan vegetasi, perbedaan kontras antara pantulan tinggi pada spektrum *Near-Infrared* (NIR) dan penyerapan energi oleh air menjadi dasar utama pemisahan luasan eceng gondok.

Pemanfaatan teknologi penginderaan jauh melalui satelit Sentinel-2 memberikan keunggulan signifikan dengan resolusi spasial 10 meter, yang memungkinkan deteksi hamparan vegetasi dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi dibandingkan sensor generasi sebelumnya (Emmerik et al., 2025). Meskipun demikian, pengolahan data deret waktu yang besar secara konvensional sering kali terkendala oleh keterbatasan perangkat keras dan gangguan tutupan awan yang tinggi di wilayah tropis.

Algoritma *Random Forest* (RF)

Random Forest (RF) adalah metode *ensemble machine learning* yang menggabungkan beberapa pohon keputusan (*Classification and Regression Trees*) untuk meningkatkan akurasi dan stabilitas prediksi (Breiman, 2001). Algoritma ini membangun banyak pohon dari subset data acak, sehingga memiliki ketahanan tinggi terhadap *noise* spektral dan mampu memproses data berdimensi tinggi tanpa seleksi fitur manual (Belgiu & Dragut, 2016). Secara teknis, penggunaan 50–500 pohon diketahui memberikan performa optimal, sehingga dalam penelitian ini, jumlah pohon ditetapkan sebanyak 100 untuk menjamin konsistensi hasil klasifikasi pada seluruh *dataset*. Implementasi dilakukan pada platform Google Earth Engine (GEE) menggunakan fungsi `ee.Classifier.smileRandomForest()` untuk pelatihan model dan `classify()` untuk pemetaan objek pada citra target (Bayable et al., 2023).

Analisis Pola Musiman Spasial-Temporal

Analisis spasial-temporal digunakan untuk memahami perubahan pola suatu fenomena dalam dimensi ruang dan waktu secara simultan (Cózar et al., 2024). Salah satu karakteristik utama data ini adalah adanya pola musiman (*seasonal pattern*) yang menunjukkan perilaku berulang dalam kurun waktu tertentu.

Untuk memisahkan pola tersebut, digunakan metode dekomposisi *Seasonal-Trend Decomposition using Loess* (STL) (Juanda & Junaidi, 2012). Metode ini memecah data deret waktu menjadi tiga komponen utama: 1) Tren (*Trend*), yang menggambarkan arah perubahan populasi jangka panjang setelah menghilangkan variasi musiman; 2) Musiman (*Seasonal*), yang menangkap pola berulang tahunan yang dipicu oleh siklus alam atau iklim; 3) Residu (*Remainder*): Merupakan variasi acak atau anomali yang tidak berpola, seperti akibat intervensi manusia mendadak atau cuaca ekstrem.

Penelitian ini menerapkan skema aditif, di mana data asli dianggap sebagai hasil penjumlahan dari ketiga komponen tersebut. Model aditif dipilih karena magnitudo fluktuasi musiman eceng gondok di Rawa Pening cenderung konstan terhadap tren, sehingga memudahkan interpretasi perubahan dalam satuan luas hektar yang nyata.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan teknik penginderaan jauh untuk memetakan dinamika spasial-temporal eceng gondok di Danau Rawa Pening. Data utama yang digunakan adalah citra satelit Sentinel-2 MSI (*Multi-Spectral Instrument*) Level-2A yang telah terkoreksi secara atmosferik (*Surface Reflectance*). Data diakses melalui platform *cloud computing* Google Earth Engine untuk mencakup rentang waktu pengamatan *bimonthly* dari tahun 2021 hingga 2025.

Tahap awal penelitian melibatkan pembersihan data menggunakan teknik *cloud masking* melalui *band* QA60 untuk meminimalisir gangguan awan dan sirus yang sering terjadi di wilayah tropis. Citra diproses menggunakan nilai median setiap dua bulan guna menghasilkan komposit tunggal yang representatif. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Bayable et al. (2023), untuk memperkuat pemisahan objek antara vegetasi akuatik dan badan air, dilakukan ekstraksi fitur berbasis indeks spektral yang ditunjukkan pada Tabel 1, yaitu: 1) NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) yang digunakan untuk mengukur kerapatan klorofil pada eceng gondok. 2) NDWI (*Normalized Difference Water Index*) yang digunakan untuk mengidentifikasi keberadaan air terbuka guna meminimalkan kesalahan klasifikasi pada area tepian danau; 3) Indeks tambahan yang meliputi MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) dan SRI (*Simple Ratio Index*) yang digunakan sebagai fitur pendukung untuk membedakan air keruh dari vegetasi yang jarang. Penelitian ini menerapkan strategi *hybrid sampling* untuk memastikan model memiliki generalisasi yang baik. Sampel otomatis sebanyak 1.000 titik (500 titik per kelas) dihasilkan melalui metode *stratified random sampling* berdasarkan ambang batas (*threshold*) indeks NDVI dan NDWI.

Klasifikasi selanjutnya menggunakan algoritma *Random Forest* (RF). Pemilihan algoritma ini didasarkan pada kemampuannya sebagai pengklasifikasi *ensemble* yang sangat handal dalam menangani kompleksitas spektral di kawasan Rawa Pening. Model klasifikasi yang dipilih adalah algoritma *Random Forest* (RF) dengan parameter 100 *decision trees*. Penentuan jumlah pohon ini bertujuan untuk mencapai akurasi optimal tanpa membebani daya komputasi secara berlebihan.

Tabel 1. Persamaan Indeks Spektral.

Indeks	Persamaan
NDVI	$((NIR - Red))/((NIR + Red))$
NDWI	$((Green - NIR))/((Green + NIR))$
SRI	NIR/Red
MNDWI	$((Green - SWIR))/((Green + SWIR))$

Sumber: Bayable et al. (2023).

Data sampel dibagi menjadi dua set independen, yaitu 70% sebagai data latih (*training set*) untuk membangun model dan 30% sebagai data uji (*testing set*) untuk memverifikasi performa klasifikasi. Validitas instrumen diuji menggunakan *Confusion Matrix* untuk mengekstrak metrik performa utama (Bayable et al., 2023), yaitu:

Overall Accuracy (OA) untuk mengukur persentase total piksel yang terklasifikasi dengan benar yang didapatkan dari persamaan berikut:

$$OA = \frac{\text{Jumlah Diagonal Utama}}{\text{Total Sampel}} \times 100\%$$

Kappa Coefficient untuk mengukur tingkat kesepakatan antara hasil klasifikasi dengan data referensi aktual di lapangan yang didapatkan dengan persamaan berikut:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \times n_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^k (n_{i+} \times n_{+i})}$$

Dimana:

N : Total sampel

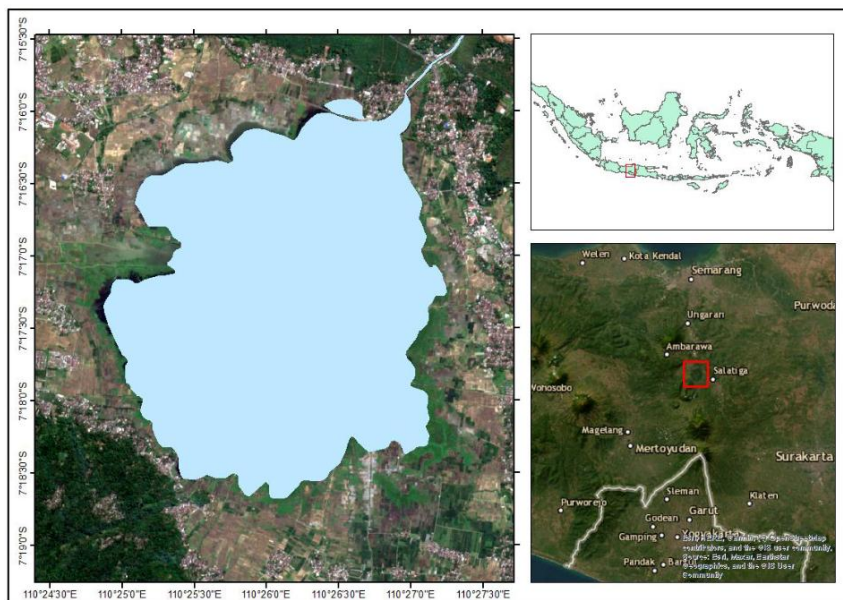
$\sum_{i=1}^k n_{ii}$: Jumlah diagonal utama

$\sum_{i=1}^k (n_{i+} \times n_{+i})$: Jumlah hasil perkalian antara total baris dan total kolom untuk setiap kelas

Selanjutnya, model diterapkan untuk melakukan klasifikasi eceng gondok dan air mulai tahun 2021-2025. Klasifikasi yang didapatkan menghasilkan distribusi luasan eceng gondok yang kemudian dilakukan metode dekomposisi untuk mengetahui sebaran pola musiman tanaman eceng gondok.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Fokus utama penelitian ini diarahkan pada badan air danau yang secara geografis terletak di Kabupaten Semarang, Jawa Tengah seperti yang terlihat pada Gambar 1. Danau Rawa Pening terletak pada titik koordinat $7^{\circ}04'-7^{\circ}30'$ LS serta $110^{\circ}24'46''-110^{\circ}49'06''$ BT (Prasetyo, 2024). Kawasan ini dipilih mengingat karakteristik hidrologinya yang sangat rentan terhadap invasi vegetasi air, khususnya eceng gondok, yang tumbuh secara agresif dan kerap mendominasi ekosistem danau.



Gambar 1. Peta Lokasi Danau Rawa Pening.

Sumber: Muna et al. (2025).

Data yang menjadi basis analisis mencakup rentang waktu lima tahun, terhitung sejak Januari 2021 hingga Desember 2025. Guna menangkap fluktuasi perubahan yang terjadi, pengamatan dilakukan dengan interval dua bulanan (*bimonthly*). Pemilihan resolusi temporal ini dianggap ideal untuk mengidentifikasi pergeseran luasan eceng gondok secara mendetail, baik yang dipicu oleh siklus pergantian musim alami maupun akibat adanya intervensi manusia dalam upaya pengendalian gulma air tersebut.

Deteksi dan Klasifikasi Eceng Gondok di Danau Rawa Pening

Melalui optimalisasi platform Google Earth Engine (GEE), proses identifikasi vegetasi dilakukan untuk memberikan pemisahan spektral yang tegas antara badan air terbuka dan area yang terinvasi oleh eceng gondok. Indeks yang digunakan dalam identifikasi adalah NDVI, NDWI, MNDWI, dan SRI. Proses analisis dilakukan dengan menyusun komposit median dari citra *bimonthly* untuk mengurangi pengaruh anomali dan gangguan atmosfer seperti awan atau *noise* dalam data. Klasifikasi eceng gondok pada penelitian ini menggunakan algoritma *Random Forest* (RF) pada platform Google Earth Engine.

Untuk menghasilkan klasifikasi yang akurat, model *Random Forest* dilatih dan diuji menggunakan *dataset* sampel periode Mei-Juni 2024 yang mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Muna et al. (2025). Data dibagi secara acak menjadi 70% sebagai data pelatihan dan 30% sebagai data pengujian untuk mengevaluasi kinerja model, yang selanjutnya dianalisis menggunakan *confusion matrix* pada Tabel 2.

Tabel 2. *Confusion Matrix Algoritma Random Forest.*

		Referensi	
		Air	Eceng Gondok
Klasifikasi	Air	147	2
	Eceng Gondok	6	159

Sumber: Google Earth Engine, diolah.

Melalui proses pelatihan pada data periode bulan Mei-Juni 2024 tersebut, model mampu mengenali pola pantulan spektral yang unik dari eceng gondok, terutama pada saluran *Near-Infrared* (NIR). Berdasarkan Tabel 2, ketajaman model ini dibuktikan dengan hasil uji akurasi yang menunjukkan nilai *Overall Accuracy* sebesar 97,45% dan *Kappa coefficient* sebesar 0,949. Hasil tersebut menunjukkan bahwa peta klasifikasi atau model yang dibuat memiliki tingkat presisi yang sangat tinggi dan dapat dipercaya. Akurasi yang tinggi pada data pengujian tahun 2024 memberikan dasar yang kuat bagi model untuk melakukan klasifikasi secara otomatis pada periode tahun-tahun sebelumnya (2021-2023) maupun periode setelahnya, sehingga data deret waktu yang dihasilkan memiliki konsistensi metodologis yang tinggi. Hasil klasifikasi untuk periode 2021-2024 dapat dilihat pada Gambar 2 yang ditunjukkan dengan area yang berwarna hijau. Menurut Putri et al. (2024), Danau Rawa Pening sebagian besar ditumbuhi oleh tanaman eceng gondok, sehingga area yang teridentifikasi sebagai vegetasi, dianggap eceng gondok seluruhnya pada penelitian ini.

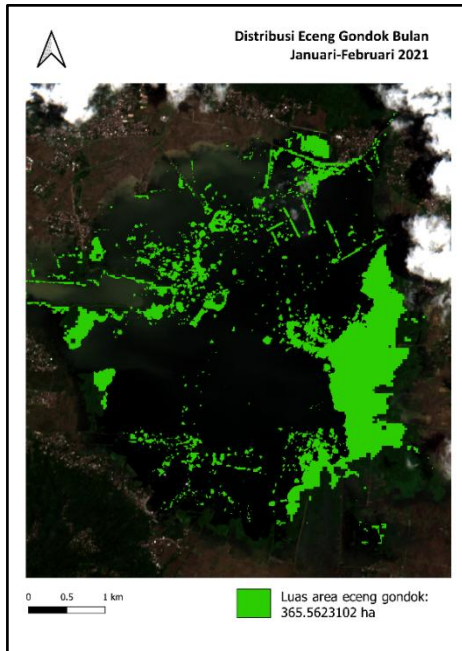
Meskipun demikian, keberadaan jenis tumbuhan air lain seperti hydrilla, kangkung air, atau vegetasi akuatik lainnya tidak dapat sepenuhnya diabaikan. Kemiripan karakteristik spektral antar vegetasi hijau berpotensi menyebabkan sebagian kecil piksel terklasifikasi sebagai eceng gondok. Untuk meminimalkan kesalahan tersebut, penelitian ini menggunakan kombinasi beberapa indeks spektral (NDVI, NDWI, MNDWI, dan SRI) serta algoritma *Random Forest* yang mampu memisahkan kelas vegetasi dan badan air dengan tingkat akurasi yang tinggi. Nilai *Overall Accuracy* sebesar 97,45% dan *Kappa* sebesar 0,949 menunjukkan bahwa pengaruh potensi kesalahan klasifikasi relatif kecil terhadap hasil akhir penelitian. Namun demikian, validasi lapangan yang lebih rinci mengenai komposisi spesies vegetasi perairan masih diperlukan pada penelitian selanjutnya guna meningkatkan ketelitian identifikasi jenis vegetasi secara spesifik.

Hasil klasifikasi eceng gondok di Rawa Pening pada empat periode *bimonthly* terpilih, yaitu kondisi awal periode (365,56 ha) yang ditunjukkan pada Gambar 2a, periode luasan tertinggi pada Maret-April 2021 (855,75 ha) yang ditunjukkan pada Gambar 2b, periode luasan terendah pada Mei-Juni 2022 (108,44 ha) yang ditunjukkan pada Gambar 2c, dan kondisi akhir periode tahun 2025 (522,04 ha) yang ditunjukkan pada Gambar 2d, menunjukkan adanya dinamika spasial dan temporal yang sangat fluktuatif selama periode 2021–2025. Hasil penelitian ini sejalan dengan Ralita et al. (2024) yang menunjukkan bahwa eceng gondok di Danau Rawa Pening memiliki variasi sebaran spasial yang cukup tinggi dengan nilai NDVI dan biomassa yang berbeda antar lokasi. Hal tersebut mengindikasikan adanya heterogenitas kondisi lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan dan kepadatan eceng gondok pada berbagai bagian danau. Perubahan ini mencerminkan respons vegetasi air terhadap faktor lingkungan, aktivitas manusia, serta dinamika kebijakan pengelolaan danau.

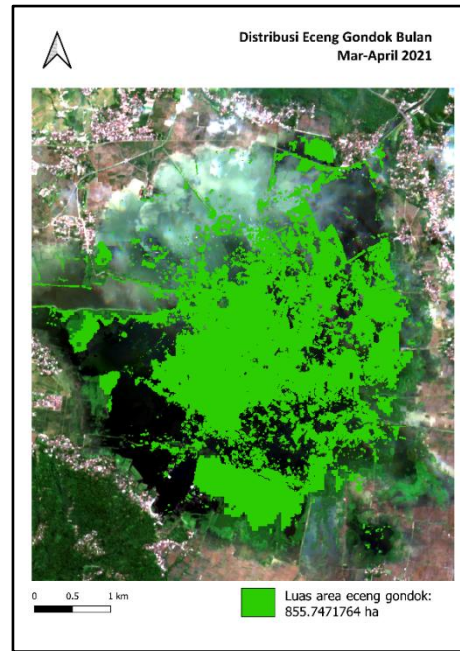
Pada awal periode pengamatan, yaitu Januari-Februari 2021, eceng gondok masih terkonsentrasi di wilayah tepi danau dengan luasan sekitar 365,56 ha. Pada periode berikutnya yang ditunjukkan pada Gambar 2b, yaitu Maret-April 2021, terjadi peningkatan yang sangat signifikan hingga mencapai luasan maksimum sebesar 855,75 ha. Lonjakan ini terjadi sebelum diberlakukannya Peraturan Presiden Nomor 60 Tahun 2021 tentang Penyelamatan Danau Prioritas Nasional pada 30 Juni 2021. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa sebelum adanya kebijakan nasional yang terintegrasi, pertumbuhan eceng gondok di Rawa Pening cenderung tidak terkendali dan dipengaruhi oleh tingginya beban nutrisi serta kondisi lingkungan yang mendukung.

Setelah Perpres No. 60 Tahun 2021 mulai berlaku, berbagai program pengendalian dan rehabilitasi danau mulai diintensifkan. Sebagai contoh, Pemprov Jateng (Pemerintah Provinsi Jawa Tengah) membentuk tim untuk menangani Rawa Pening sejak 2018 dan lebih diintensifkan setelah adanya Perpres tersebut sehingga pada tahun 2022 terjadi penurunan eceng gondok di Danau Rawa Pening sebesar 70-80% dibandingkan tahun-tahun sebelumnya (Humas Pemerintah Provinsi Jawa Tengah, 2022).

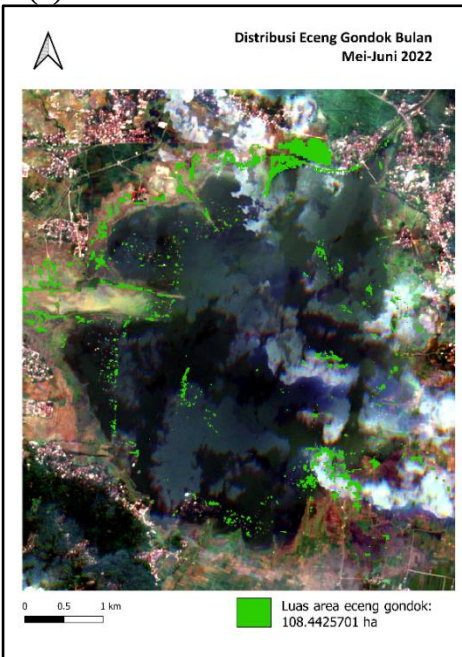
Hal ini tercermin pada periode ketika luasan eceng gondok mengalami penurunan yang cukup signifikan hingga mencapai kondisi terendah sebesar 108,44 ha pada periode bulan Mei-Juni 2022 atau Gambar 2c. Penurunan ini mengindikasikan bahwa implementasi awal kebijakan penyelamatan danau memberikan dampak positif dalam menekan pertumbuhan vegetasi air.



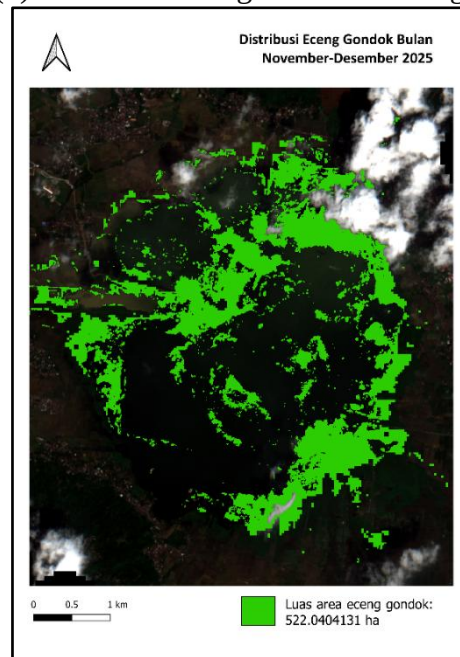
(a) Peta Awal Periode Penelitian



(b) Peta Luas Eceng Gondok Tertinggi



(c) Peta Luas Eceng Gondok Terendah



(d) Peta Akhir Periode Penelitian

Gambar 2. Peta Distribusi Eceng Gondok Danau Rawa Pening Tahun 2021-2025.

Sumber: Google Earth Engine, diolah.

Meskipun implementasi awal kebijakan memberikan hasil positif, keberlanjutan program pengendalian ini masih menghadapi tantangan besar. Pada fase selanjutnya, populasi eceng gondok kembali mengalami peningkatan, walaupun tidak sampai mencapai luasan tertinggi seperti pada tahun 2021. Fluktuasi tersebut menunjukkan bahwa efektivitas intervensi pada tahap awal belum sepenuhnya konsisten.

Faktor-faktor seperti tingginya masukan nutrisi dari daerah tangkapan air, laju pertumbuhan alami eceng gondok yang cepat, serta keterbatasan kesinambungan program pengelolaan diduga menjadi kendala utama dalam menjaga stabilitas kondisi danau.

Pada Gambar 2d menunjukkan akhir periode pengamatan tahun 2025, luas eceng gondok tercatat sebesar 522,04 ha, yang masih lebih tinggi dibandingkan kondisi awal penelitian. Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun kebijakan penyelamatan danau telah berjalan selama beberapa tahun, permasalahan eceng gondok di Rawa Pening belum sepenuhnya teratasi secara optimal.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Perpres No. 60 Tahun 2021 dan program penanganan Danau Rawa Pening yang dilakukan Pemprov Jateng memiliki peran penting dalam merespons kondisi kritis eceng gondok. Implementasi kebijakan tersebut terbukti mampu menekan luasan vegetasi air pada fase awal, namun masih memerlukan penguatan dari sisi keberlanjutan program, pengendalian sumber pencemar dari daerah hulu, serta integrasi lintas sektor. Dengan demikian, pemantauan berbasis penginderaan jauh dalam penelitian ini dapat menjadi alat evaluasi kebijakan yang objektif dan berkelanjutan sesuai dengan amanat Perpres No. 60 Tahun 2021.

Analisis Pola Musiman Distribusi Eceng Gondok

Klasifikasi eceng gondok dengan algoritma *Random Forest* juga dapat menunjukkan seberapa prediksi luasan eceng gondok. Luasan tersebut dapat menjadi acuan untuk melihat bagaimana distribusi temporal eceng gondok dari waktu ke waktu. Hasil luasan eceng gondok tersaji pada Tabel 3 dan Gambar 6 berikut.

Gambar 3 menunjukkan bahwa luasan eceng gondok di Rawa Pening mengalami fluktuasi yang cukup besar selama periode 2021-2025. Pada awal tahun 2021, luasan eceng gondok meningkat tajam dan mencapai puncak pada Maret-April 2021, sebelum diberlakukannya Perpres No. 60 Tahun 2021. Kondisi ini menunjukkan bahwa pertumbuhan eceng gondok pada fase awal penelitian masih belum terkendali. Setelah implementasi Perpres pada pertengahan tahun 2021, luasan eceng gondok mengalami penurunan yang signifikan hingga mencapai nilai terendah pada tahun 2022.

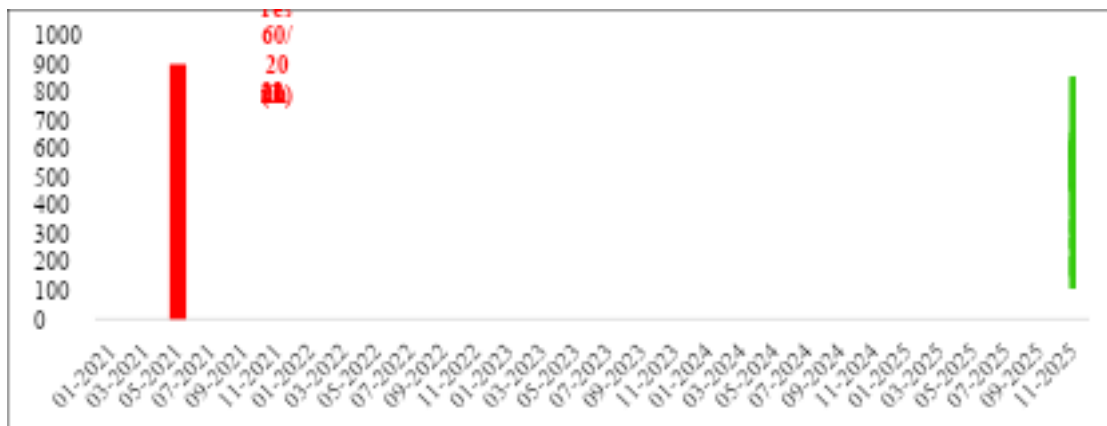
Hal ini mengindikasikan bahwa upaya pengendalian pada tahap awal kebijakan cukup efektif. Kemudian, pada bulan Mei-Agustus 2024 terjadi sedikit penurunan luas eceng gondok yang sejalan dengan studi oleh Muna et al. (2025).

Tabel 3. Hasil Luasan Eceng Gondok.

Periode	Luas (Ha)	Periode	Luas (Ha)
Januari-Februari 2021	365,56	Juli-Agustus 2023	486,70
Maret-April 2021	855,75	September-Oktober 2023	552,63
Mei-Juni 2021	728,48	November-Desember 2023	659,42
Juli-Agustus 2021	352,40	Januari-Februari 2024	528,56
September-Oktober 2021	151,26	Maret-April 2024	448,49
November-Desember 2021	151,51	Mei-Juni 2024	609,48
Januari-Februari 2022	222,11	Juli-Agustus 2024	568,17
Maret-April 2022	141,34	September-Oktober 2024	589,03
Mei-Juni 2022	108,44	November-Desember 2024	627,33
Juli-Agustus 2022	233,06	Januari-Februari 2025	589,64
September-Oktober 2022	263,93	Maret-April 2025	462,66
November-Desember 2022	289,28	Mei-Juni 2025	477,70
Januari-Februari 2023	248,02	Juli-Agustus 2025	472,42
Maret-April 2023	352,43	September-Oktober 2025	632,25
Mei-Juni 2023	301,50	November-Desember 2025	522,04

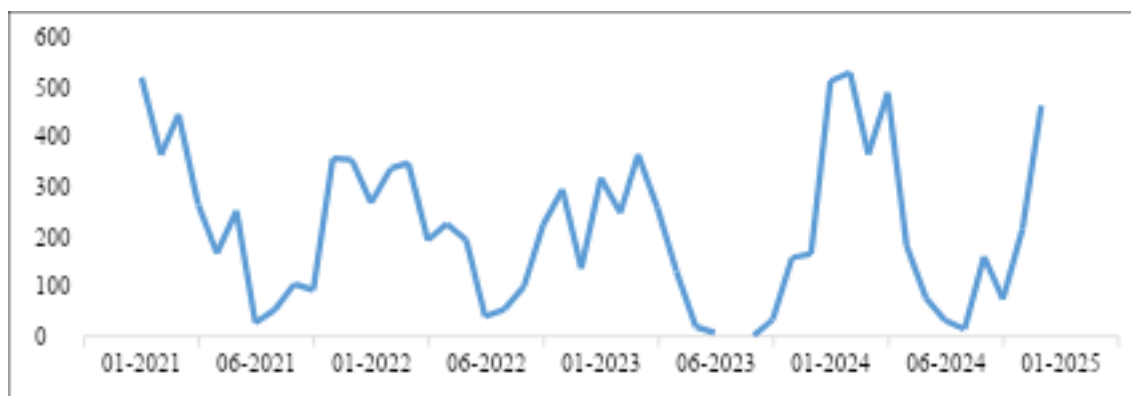
Sumber: Google Earth Engine, diolah.

Secara umum, luasan eceng gondok pada tahun 2023-2024 kembali meningkat dan pada tahun 2025 cenderung stabil pada kisaran menengah hingga tinggi. Peningkatan luasan eceng gondok dapat dipengaruhi oleh musim. Hasil penelitian di Ethiopia menunjukkan bahwa luasan eceng gondok meningkat pada musim hujan dibandingkan musim kemarau, yang mengindikasikan adanya pengaruh kondisi hidrologis dan curah hujan terhadap pertumbuhan eceng gondok (Tolera et al., 2025). Meningkatnya luasan eceng gondok pada tahun 2023-2024 sejalan dengan adanya peningkatan curah hujan di Kabupaten Semarang pada tahun yang sama seperti yang terlihat pada Gambar 4 berikut (Badan Pusat Statistik, 2026).



Gambar 3. Grafik Runtun Waktu Luasan Eceng Gondok di Danau Rawa Pening Tahun 2021-2025 (ha).

Sumber: Google Earth Engine, diolah.

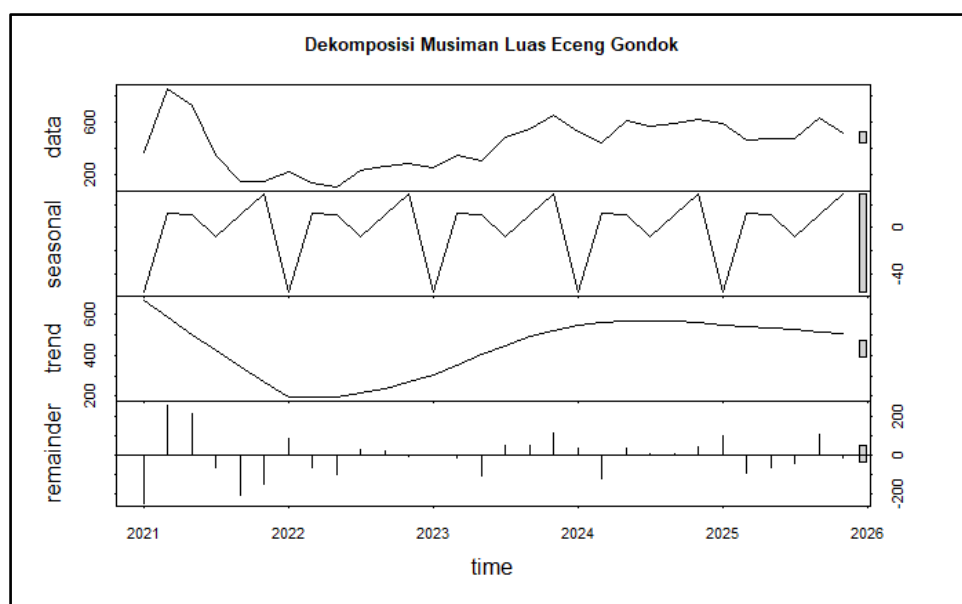


Gambar 4. Grafik Rata-Rata Curah Hujan Kabupaten Semarang Tahun 2021-2024 (Mm)

Sumber: Badan Pusat Statistik (2026).

Kondisi ini menunjukkan bahwa meskipun kebijakan penyelamatan danau memberikan dampak positif pada awal pelaksanaannya. Akan tetapi, pengendalian eceng gondok belum sepenuhnya berkelanjutan dan masih memerlukan penguatan dalam jangka panjang.

Transisi dari pengamatan visual menuju analisis statistik dilakukan untuk membedakan antara fluktuasi jangka pendek yang bersifat musiman dengan kecenderungan perubahan populasi dalam jangka panjang melalui metode dekomposisi STL. Hasil dekomposisi luasan eceng gondok tahun 2021-2025 ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 5. Dekomposisi Luasan Eceng Gondok Tahun 2021-2025.

Sumber: Google Earth Engine, diolah.

Berdasarkan Gambar 5, dekomposisi deret waktu luas eceng gondok periode 2021-2025 dengan interval dua bulanan menunjukkan adanya pola musiman yang konsisten setiap tahun, yang tercermin dari fluktuasi yang berulang setiap enam periode. Hal ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan eceng gondok sangat dipengaruhi oleh faktor musiman, terutama curah hujan dan kondisi hidrologi.

Hasil analisis dekomposisi menunjukkan bahwa puncak pola musiman luasan eceng gondok terjadi pada periode Januari–Februari. Temuan ini sejalan dengan pola iklim di Indonesia yang memiliki dua musim utama, yaitu musim kemarau pada periode April–Oktober dan musim penghujan pada periode Oktober–April (BMKG, 2025). Pada awal tahun, wilayah Danau Rawa Pening masih berada dalam puncak musim hujan, yang ditandai dengan curah hujan tinggi sehingga menyebabkan peningkatan luasan eceng gondok pada periode awal tahun.

Selain faktor curah hujan dan masukan nutrien, distribusi spasial eceng gondok di Danau Rawa Pening juga berpotensi dipengaruhi oleh kondisi angin. Sebagai tumbuhan terapung, hamparan eceng gondok dapat mengalami perpindahan posisi akibat dorongan angin dan arus permukaan sehingga konsentrasi vegetasi pada suatu bagian danau dapat berubah dari waktu ke waktu. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa angin merupakan salah satu faktor utama yang mengendalikan sirkulasi perairan dan distribusi organisme maupun vegetasi yang mengapung di permukaan danau (Cyr, 2017; Wu et al., 2022).

Selain itu, pergerakan hamparan eceng gondok telah terbukti dipengaruhi oleh kombinasi angin dan dinamika perairan sehingga lokasi akumulasi vegetasi dapat berubah secara temporal. Namun demikian, penelitian ini berfokus pada estimasi luasan total eceng gondok pada skala danau menggunakan komposit citra dua bulanan (*bimonthly*). Dengan pendekatan tersebut, pengaruh perpindahan jangka pendek akibat angin cenderung tereduksi karena analisis dilakukan pada rentang waktu yang relatif panjang dan tidak berfokus pada posisi harian hamparan eceng gondok. Oleh karena itu, faktor angin diperkirakan lebih memengaruhi pola distribusi spasial lokal dibandingkan estimasi luasan total eceng gondok yang menjadi fokus penelitian ini. Meskipun demikian, integrasi data kecepatan dan arah angin pada penelitian selanjutnya berpotensi meningkatkan pemahaman mengenai dinamika pergerakan spasial eceng gondok di Danau Rawa Pening.

Komponen tren memperlihatkan penurunan pada periode awal pengamatan, yang kemudian diikuti oleh peningkatan hingga tahun 2024 dan cenderung stabil pada tahun 2025. Kondisi ini menunjukkan bahwa upaya pengendalian yang dilakukan belum mampu menekan pertumbuhan eceng gondok secara berkelanjutan.

Sementara itu, komponen residual relatif kecil, yang menandakan bahwa hasil klasifikasi berbasis citra satelit memiliki tingkat kestabilan yang baik. Artinya, hasil klasifikasi dapat merepresentasikan kondisi lapangan secara memadai.

5. SIMPULAN DAN SARAN

Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian, distribusi eceng gondok di Danau Rawa Pening selama periode 2021–2025 menunjukkan perubahan yang dinamis. Luasan eceng gondok tertinggi terjadi pada awal tahun 2021 sebelum diterapkannya Peraturan Presiden Nomor 60 Tahun 2021 dan program penanganan Danau Rawa Pening oleh Pemerintah Provinsi Jawa Tengah. Pada tahap awal pelaksanaan kebijakan, luasan eceng gondok mengalami penurunan, namun kembali meningkat pada tahun-tahun berikutnya. Hasil klasifikasi menggunakan metode Random Forest mampu menghasilkan peta distribusi eceng gondok dengan tingkat ketelitian yang baik sehingga dapat digunakan untuk memantau perubahan kondisi danau secara spasial dan temporal. Analisis pola musiman menunjukkan bahwa pertumbuhan eceng gondok cenderung meningkat pada awal tahun, terutama pada periode Januari–Februari. Kondisi tersebut berkaitan dengan musim hujan yang meningkatkan pasokan nutrisi ke perairan dan mendukung pertumbuhan eceng gondok. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa upaya pengendalian yang dilakukan memberikan dampak positif pada tahap awal, namun belum sepenuhnya mampu menekan pertumbuhan eceng gondok secara berkelanjutan.

Berdasarkan hasil pemetaan dan analisis pola musiman tersebut, pemerintah daerah perlu mengembangkan strategi pengendalian yang lebih terukur melalui pemanfaatan data citra satelit secara berkala. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi area dengan kepadatan eceng gondok yang tinggi sehingga kegiatan pengendalian dapat dilakukan secara lebih efektif sesuai lokasi dan waktu yang paling membutuhkan penanganan. Selain itu, pengawasan terhadap masuknya limbah nutrisi dari sektor pertanian dan rumah tangga perlu ditingkatkan guna mengurangi faktor yang mendukung pertumbuhan eceng gondok di Danau Rawa Pening.

Saran

Penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan, terutama terkait ketersediaan data lapangan pada periode tertentu serta pengaruh kondisi cuaca dan tutupan awan terhadap kualitas citra satelit yang digunakan dalam proses klasifikasi. Selain itu, penelitian ini masih berfokus pada klasifikasi, pemetaan distribusi, dan analisis pola musiman eceng gondok sehingga faktor-faktor lingkungan yang memengaruhi pertumbuhan eceng gondok belum dianalisis secara mendalam. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk menggunakan data lapangan yang lebih lengkap dan konsisten pada setiap periode pengamatan guna meningkatkan akurasi hasil klasifikasi.

- [illegible]

- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 5–32.
- Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). History and Scope of Remote Sensing. *Introduction to Remote Sensing*, 1–28.
- Cózar, A., Arias, M., Suaria, G., Viejo, J., Aliani, S., Koutroulis, A., Delaney, J., Bonnery, G., Macías, D., de Vries, R., Sumerot, R., Morales-Caselles, C., Turiel, A., González-Fernández, D., & Corradi, P. (2024). Proof of concept for a new sensor to monitor marine litter from space. *Nature Communications*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48674-7>
- Cyr, H. (2017). Winds and the Distribution of Nearshore Phytoplankton in a Stratified Lake. *Water Research*, 122, 114–127. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.05.066>
- Drusch, M., Bello, U. Del, Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., Hoersch, B., Isola, C., Laberinti, P., Martimort, P., Meygret, A., Spoto, F., Sy, O., Marchese, F., & Bargellini, P. (2012). Sentinel-2 : ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- Emmerik, T. H. M. Van, Janssen, T. W., Jia, T., Bui, T. L., Taormin, R., Nguyen, H.-Q., & Schreyers, L. J. (2025). Plastic Pollution and Water Hyacinths Consistently co-Occur in the Lower Saigon River. *Environmental Research Water*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/3033-4942/ae10d7>
- Gascon, F., Bouzinac, C., Thépaut, O., Jung, M., Francesconi, B., Louis, J., Lonjou, V., Lafrance, B., Massera, S., Languille, A. G.-V. F., Alhammoud, B., Viallefont, F., Pflug, B., Bieniarz, J., Clerc, S., Pessiot, L., Trémas, T., Cadau, E., Bonis, R. De, ... Fernandez, V. (2017). Copernicus Sentinel-2A Calibration and Products Validation Status. *Remote Sensing*. <https://doi.org/10.3390/rs9060584>
- Hartanto, M. O. (2020). Pemanfaatan Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*) Untuk Kemajuan Desa Ekowisata Di Sekitar Danau Rawa Pening. *G-SMART Jurnal Teknik Sipil Unika Soegijapranata Semarang*, 4, 128–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.24167/gsmart.v4i2.3102>
- Henny, C., Julzarika, A., Prasetyo, S., Utami, R. R., Setiadewi, N., Muhammad, A., & Hakim, Y. (2026). Recurring struggle in managing water hyacinth invasion and water quality in a tropical lake : Case study of Lake Rawa Pening , Indonesia. *Journal of Environmental Management*, 397(December 2025).
- Humas Pemerintah Provinsi Jawa Tengah. (2022). *Penanganan Rawa Pening Butuh Kolaborasi Banyak Pihak*. https://humas.jatengprov.go.id/detail_berita_gubernur?id=7298
- Juanda, B., & Junaidi. (2012). *Ekonometrika Deret Waktu* (L. Utari & P. Komalasari (eds.); Cetakan Pe). PT Penerbit IPB Press.
- Lasmawati, M., Wajdi, A. F., & Waluyo, D. (2025). *Evaluasi Kinerja Sensor Penginderaan Jauh dalam Pemantauan Perubahan Iklim dan Dampaknya terhadap Keamanan Nasional*. 07(02), 10059–10066.
- Lubembe, S. I., Okoth, S., Turyasingura, B., Oyugi, T., Moenga, K., Chavula, P., & Tumushabe, J. T. (2023). East African Journal of Environment and Natural Resources Water Hyacinth , an Invasive Species in Africa : A Literature Review. *East African Journal of Environment and Natural Resources*, 6(1), 243–261. <https://doi.org/10.37284/eajenr.6.1.1293.IEEE>

- Muammal, A. S., & Marsisno, W. (2025). Detection and Mapping of Invasive Alien Plant Water Hyacinth using Satellite Imagery and Machine Learning (Case Study : Rawa Pening Lake, Indonesia). *Proceedings of The International Conference on Data Science and Official Statistics*, 266–280. <https://doi.org/https://doi.org/10.34123/icdsos.v2025i1.580>
- Muna, A. M., Rahman, A., Jundullah, N. I., Hayati, M. N., Aulia, N. M., & Senno, S. B. (2025). Distribusi Spasial dan Temporal Eceng Gondok di Danau Rawa Pening. *Jurnal Akuatiklestari*, 8(2), 169–175. <https://doi.org/https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v8i2.7120>
- Peraturan Presiden Nomor 60 Tahun 2021 tentang Penyelamatan Danau Prioritas Nasional, (2021). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/171165/perpres-no-60-tahun-2021>
- Poernama, T., Pebriansyah, E., Arifin, A. L., & Yusuf, R. (2023). Ubah Gulma Menjadi Emas: Studi Kasus Pengolahan Eceng Gondok Menjadi Humus Aktif & Enzimatik di Waduk Jatiluhur Purwakarta. *Entrepreneurship Bisnis Manajemen Akuntansi (E-BISMA)*, 4(1), 43–66. <https://doi.org/https://doi.org/10.37631/ebisma.v4i1.869>
- Prasetyo, S. (2024). Ragam Metode Pengendalian Gulma Eceng Gondok (*Eichhornia crassipes* (Mart .) Solm) Di Danau Rawapening Jawa Tengah, Indonesia. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 26(1).
- Putri, A. K., Arianti, A., Negara, K. D. A., Sulistiyono, P. A., Hajar, D., & Tjahyoko, K. N. K. D. (2024). Tingkat Keanekaragaman Hayati dan Pemanfaatannya di Rawa Pening Ambarawa. *Jurnal Analisis*, 3(1), 123–133.
- Ralita, T. F., Hartoko, A., & Rahman, A. (2024). Analisis Sebaran Kandungan Klorofil Eceng Gondok di Danau Rawa Pening. *Jurnal Pasir Laut*, 8(2), 79–86. <https://doi.org/https://doi.org/10.14710/jpl.2024.65359>
- Srisawas, M., Kerdkaew, T., & Chanlert, P. (2024). Industrial Crops & Products From invasive species to bio-based composites : Utilizing water hyacinth for sound absorption and insulation. *Industrial Crops & Products*, 220(July).
- Sulastri, Henny, C., & Handoko, U. (2016). Environmental Condition and Trophic Status of Lake Rawa Pening in Central Java. *Oseanologi Dan Limnologi Di Indonesia*, d(3), 23–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.14203/oldi.2016.v1i3.20>
- Surya, A. T. J., Sasongko, A. S., & Cahyadi, F. D. (2024). Kandungan Amonia, Fosfat, Nitrat dan Nitrit Air Laut di Perairan Pesisir Desa Lontar. *Jurnal Ilmiah Kelautan Dan Perikanan (JUVENIL)*, 5(3), 238–245. <https://doi.org/http://doi.org/10.21107/juvenil.v5i3.23089>
- Tobing, N. S. L., & Hayati, R. (2024). Dampak Adanya Pertumbuhan Eceng Gondok dalam Skala Besar Terhadap Ekosistem di Kawasan Danau Toba. *Jurnal Ilmu Sosial Dan Ilmu Politik*, 5, 225–234. <https://doi.org/225> | Jurnal Ilmu Sosial dan Ilmu Politik | Volume 5 | Nomor 2 | Februari 2024 | (Hal. 225-234) <https://doi.org/10.56552/jisipol.v5i2.133>
- Tolera, G., Getahun, A., Geremew, A., & Mengistou, S. (2025). Assessment of Water Hyacinth (*Pontederia crassipes*) Distribution and Changes in Lake Koka and Lake Ziway Through Remote Sensing Techniques. *Scientific Reports*, 1–13. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-025-94028-8>
- Tshikovhi, N. A., Mudzanani, K., Phadi, T., Masindi, V., & Foteinis, S. (2025). Valorization of invasive water hyacinth for nutrients removal from eutrophic waterbodies and biochar production. *Desalination and Water Treatment*, 324(October).

- Ustin, S. L., & Middleton, E. M. (2021). *Current and near-term advances in Earth observation for ecological applications*. 4, 1–57. <https://doi.org/https://doi.org/10.1186/s13717-020-00255-4>
- Wilda, M. S., & Pasaribu, E. (2025). Satellite-Based Detection of Floating Plastic Debris in Jakarta. *Proceedings of The International Conference on Data Science and Official Statistics*, 64, 232–248. <https://doi.org/https://doi.org/10.34123/icdsos.v2025i1.573>
- Wu, C., Wu, S., Wu, X., Dai, J., Gao, A., & Yang, F. (2022). Numerical Investigation of the Effects of Aquatic Vegetation on Wind-Induced Wave and Current Characteristics in Shallow Lakes. *Frontiers in Environmental Science*, 9(January), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.8293763>. Retrieved from <https://doi.org/DOI:https://doi.org/10.62383/quwell.v2i1.2280>.