

Vol. 7 No. 1 (2026), Halaman 96-111



GEOGRAPHIA
Jurnal Pendidikan dan Penelitian Geografi

ISSN: 2774-6968

**ANALISIS TEMPORAL POLA SEBARAN ECENG GONDOK DI
DANAU TONDANO MENGGUNAKAN INDEKS NDVI BERBASIS
CITRA SENTINEL 2A SEBAGAI UPAYA DALAM PENGELOLAAN
DANAU**

**Rifka Mokoagow^{1*}, Joyce Christian Kumaat², Cahyadi Nugroho³, Jolanda Esther Kaihatu
Xaverius Erick Lobja⁵, Maxi Tendean⁶**

¹Universitas Negeri Manado, Indonesia

Email: mokoagowrfka@gmail.com^{1*}, joycekumaat@unima.ac.id², cahyadinugroho@unima.ac.id³,
jolandakaihatu@unima.ac.id⁴, ericklobja@unima.ac.id⁵, maxitendean@unima.ac.id⁶

Website Jurnal: <http://ejurnal.unima.ac.id/index.php/geographia>



Akses dibawah lisensi CC BY-SA 4.0 <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>

DOI: <https://doi.org/10.53682/gppngs47>

(Diterima: 08-04-2026; Direvisi: 03-05-2026; Disetujui: 07-06-2026)

ABSTRACT

Lake Tondano has experienced uncontrolled water hyacinth growth, which has negatively affected water quality and aquatic ecosystems. This study aimed to analyze the distribution and density of water hyacinth and its relationship with environmental factors, particularly wind direction and nutrient availability. The study was conducted using a quantitative descriptive approach with the NDVI method based on multi-temporal Sentinel-2A satellite imagery from 2023 to 2025. The results show that the area of water hyacinth fluctuates over time, covering 324.58 ha in April 2023, decreasing in September, increasing again in October, and reaching the highest extent of 371.82 ha in April 2024, while the lowest area of 205.94 ha occurs in October 2024. Spatially, a distribution shift occurs in 2023, whereas a relatively stable pattern with dominance in the eastern part of Lake Tondano is observed during 2024–2025. These patterns indicate that dominant wind direction and nutrient availability play important roles in controlling the spatial dynamics of water hyacinth in Lake Tondano

Keywords: *Eichhornia crassipes, Lake Tondano, Sentinel 2A imagery, Spatial distribution, Temporal analysis.*

ABSTRAK

Danau Tondano mengalami pertumbuhan eceng gondok yang berdampak pada kualitas air dan ekosistem perairan. Penelitian ini bertujuan menganalisis sebaran dan kepadatan eceng gondok serta keterkaitannya dengan faktor lingkungan, khususnya arah angin dan ketersediaan nutrien. Metode yang digunakan adalah kuantitatif deskriptif dengan pendekatan NDVI berbasis citra satelit multi-temporal Sentinel-2A pada periode 2023–2025. Hasil penelitian menunjukkan bahwa luasan eceng gondok berfluktuasi dari waktu ke waktu, dengan nilai 324,58 ha pada April 2023, menurun pada September, meningkat kembali pada Oktober, serta mencapai luasan tertinggi sebesar 371,82 ha pada April 2024 dan terendah 205,94 ha pada Oktober 2024. Secara spasial, terjadi pergeseran sebaran pada 2023,

sedangkan pada 2024–2025 pola relatif stabil dengan dominasi di sisi timur Danau Tondano. Pola sebaran ini dipengaruhi oleh arah angin dominan serta ketersediaan nutrisi di perairan.

Kata Kunci: Analisis temporal, Citra Sentinel 2A, Danau Tondano, Eceng gondok, Sebaran Spasial.

PENDAHULUAN

Danau merupakan sumber daya alam yang berperan penting tidak hanya sebagai penyedia air, tetapi juga sebagai penopang kehidupan sosial, ekonomi, pariwisata, serta habitat bagi berbagai organisme. Keberadaannya penting bagi manusia sekaligus seluruh ekosistem yang bergantung padanya. Dalam siklus hidrologi, danau berfungsi sebagai reservoir alami yang menampung aliran permukaan dan curah hujan, sehingga berperan dalam penyimpanan dan pengaturan ketersediaan air, mirip dengan bendungan sebagai reservoir buatan (Susilo et al., 2016). Meskipun luasnya lebih kecil dibanding daratan dan lautan, ekosistem air tawar memiliki peran penting karena melibatkan interaksi kompleks antara unsur biotik dan abiotik yang menjaga keseimbangan lingkungan. Oleh karena itu, danau perlu dikelola secara berkelanjutan agar fungsinya tetap terjaga.

Danau Tondano merupakan danau terbesar di Sulawesi Utara yang berada di Kabupaten Minahasa dan dikelilingi beberapa kecamatan. Sumber airnya berasal dari sungai, irigasi, dan drainase permukiman, dengan sungai Tondano sebagai satu-satunya *outlet* menuju Teluk Manado. Danau ini berperan penting sebagai sumber air minum, penyedia air baku, pendukung PLTA, serta dimanfaatkan untuk irigasi, perikanan, dan pariwisata (Sittadewi et al., 2008). Dari aspek morfometri, volume danau Tondano meningkat dari 364,11 juta m³ pada 2006 menjadi 374,53 juta m³ pada 2016, atau bertambah sekitar 10,41 juta m³ dalam 10 tahun. Peningkatan terbesar terjadi pada kedalaman 0–5 meter sebesar 10,05 juta m³. Kenaikan ini menunjukkan adanya perubahan morfologi dasar danau akibat sedimentasi dengan kedalaman rata-rata sekitar 10,3 m (Sulistyaningsih et al., 2021). Pada penelitian lain tahun 2022, morfometri Danau Tondano menunjukkan bahwa pada 2015 kedalaman maksimum mencapai 31,81 m dengan rata-rata 12,88 m, sedangkan pada 2020 menurun menjadi 30,22 m untuk kedalaman maksimum dan 12,66 m untuk kedalaman rata-rata (Moningkey et al., 2022).

Danau sebagai bagian dari ekosistem yang dihuni berbagai makhluk hidup tentu

dipengaruhi oleh keberadaan organisme di dalamnya. Salah satunya adalah eceng gondok (*Eichhornia crassipes*), tumbuhan air tawar yang tumbuh sangat cepat dan sering tidak terkendali. Dengan laju pertumbuhan sekitar $\pm 3\%$ per hari, eceng gondok kerap dianggap sebagai gulma yang dapat merusak lingkungan perairan, baik melalui perkembangbiakan vegetatif maupun generatif (Dewantara et al., 2021). Pertumbuhan eceng gondok yang berlebihan dapat menghalangi masuknya sinar matahari, menurunkan kadar oksigen terlarut, serta membahayakan kehidupan akuatik. Kondisi ini juga berdampak negatif pada perikanan dan transportasi air, meningkatkan evapotranspirasi, mengurangi penetrasi cahaya, dan mempercepat proses pengendapan (A. T. Moningkey et al., 2020).

Gulma air dan eceng gondok saat ini menjadi masalah utama, danau Tondano menjadi salah satu danau prioritas nasional sekitar 500 hektar dari 4.616 hektar luas danau Tondano ditutupi oleh gulma air dan eceng gondok, sehingga volume tampungannya mencapai 668,6 juta m³ (Suawa et al., 2021). Menurut Sittadewi, (2008), peningkatan pertumbuhan eceng gondok dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti limbah rumah tangga (termasuk deterjen), aktivitas peternakan bebek, pemupukan pada lahan sawah, serta keberadaan sekitar 7.000 keramba tancap yang meningkatkan kandungan polutan organik di danau Tondano. Selain itu, keterbatasan fasilitas *septic tank* menyebabkan limbah domestik dibuang langsung ke danau, sehingga memperkaya nutrisi perairan dan mendorong peningkatan kesuburan air.

Penanganan eceng gondok di Danau Tondano memerlukan pemantauan spasial dan temporal yang efektif. Penginderaan jauh menjadi solusi karena mampu menyediakan data yang luas dan konsisten. Namun, penelitian sebelumnya umumnya belum memasukkan variabel angin dan belum fokus pada pola sebaran. Oleh karena itu, penelitian ini menawarkan kebaruan dengan mengintegrasikan data angin serta menganalisis pola sebaran eceng gondok secara lebih mendalam. Salah satu metode yang digunakan adalah NDVI, yang memanfaatkan perbedaan

pantulan cahaya merah dan inframerah dekat untuk menganalisis keberadaan serta kerapatan vegetasi, sehingga efektif dalam mengkaji dinamika sebaran eceng gondok (Andini et al., 2018). Penelitian ini menggunakan data primer dan sekunder.

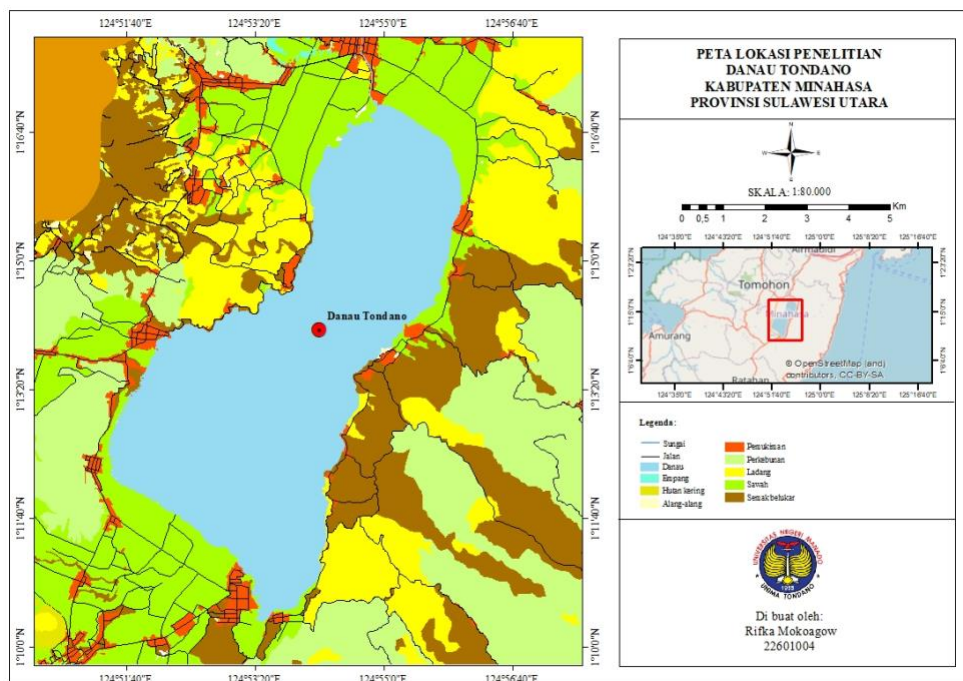
Data sekunder merupakan informasi yang telah dikumpulkan oleh peneliti sebelumnya dan dapat dimanfaatkan kembali, umumnya berupa data historis yang relevan dengan kebutuhan penelitian (Rahman, et al., 2022). Data sekunder dalam penelitian ini berupa citra satelit Sentinel-2 dan data angin dari ERA5 yang diakses melalui situs resmi Badan Antariksa Eropa (ESA). Citra multispektral Sentinel-2 banyak dimanfaatkan untuk analisis perubahan permukaan, pemetaan lahan, dan pemantauan lingkungan. Khususnya Sentinel-2A, satelit ini memiliki 13 kanal multispektral dengan resolusi spasial 10 m, 20 m, dan 60 m, sehingga memungkinkan analisis yang cukup detail sesuai kebutuhan penelitian (Rahmadi, et al., 2022). Selain itu, data sekunder yang digunakan berupa peta RBI (Rupa Bumi Indonesia) administrasi Minahasa yang memuat informasi spasial wilayah Danau Tondano dan diakses melalui Badan Informasi Geospasial. Sementara itu, data primer diperoleh melalui

kegiatan peninjauan lapangan (ground check) di sekitar danau untuk memverifikasi hasil interpretasi citra, meliputi dokumentasi foto dan pengamatan kondisi fisik perairan.

Penelitian ini bertujuan menganalisis perubahan luas dan kerapatan eceng gondok di Danau Tondano periode 2023–2025 menggunakan citra Sentinel-2A dan metode NDVI. Pendekatan ini digunakan untuk melihat pola sebaran dan perkembangan eceng gondok secara temporal, sehingga diharapkan dapat menjadi dasar dalam upaya pengelolaan dan pengendaliannya.

METODE PENELITIAN

Danau Tondano merupakan danau purba yang berasal dari aktivitas vulkanik. Danau Tondano terletak pada titik koordinat $1^{\circ} 07' - 1^{\circ} 20'$ LU dan $124^{\circ} 47' - 124^{\circ} 57'$ BT berlokasi pada wilayah administrasi Kabupaten. Minahasa, Provinsi Sulawesi Utara. Letak geografis Danau Tondano berbatasan langsung dengan tujuh kecamatan di antaranya kecamatan Tondano Selatan, kecamatan Tondano Barat, Kecamatan Tondano Timur, kecamatan Eris, kecamatan Kakas, kecamatan Kakas Barat dan kecamatan Remboken. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



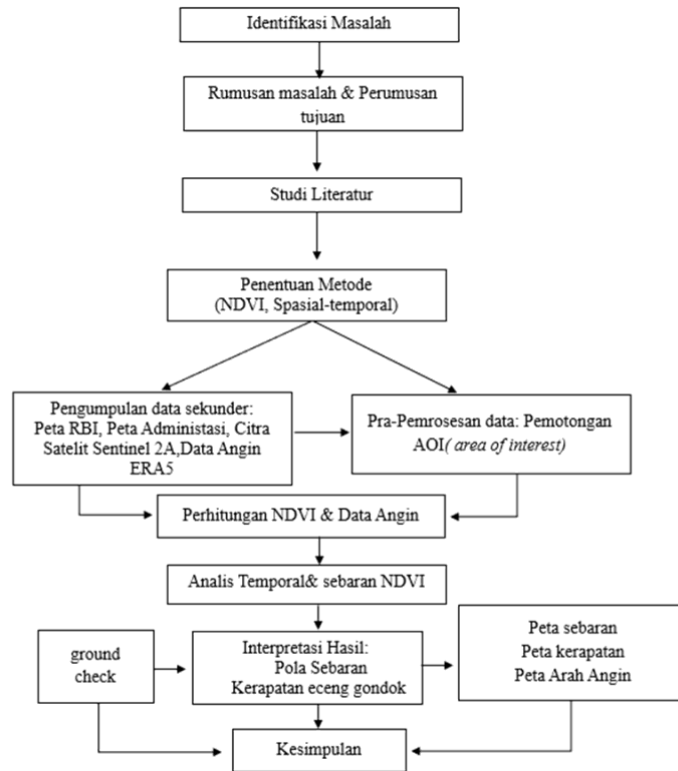
Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian 2025

Penelitian menggunakan jenis metode kuantitatif deskriptif dengan cara menganalisis

citra satelit menggunakan citra Sentinel-2A periode April, September, dan Oktober 2023–

2024 serta Juli 2025 karena memiliki resolusi spasial 10 m dan interval perekaman sekitar lima hari, sehingga efektif untuk pemantauan vegetasi perairan. Data berasal dari koleksi COPERNICUS/S2_SR (Level-2A) yang diakses melalui situs resmi ESA dan Google Earth Engine, dengan fokus pada wilayah Danau Tondano dan batas tutupan awan $\leq 20\%$

agar objek teridentifikasi jelas. Sebagai data pendukung, digunakan data angin permukaan ERA5 dari ECMWF melalui *Copernicus Climate Change Service*, beresolusi spasial $\pm 0,25^\circ$ dan temporal satu jam, untuk menganalisis pola sebaran eceng gondok di permukaan danau, dengan alur penelitian disajikan pada [Gambar 2](#).



Gambar 2. Alur Penelitian

Perbedaan pantulan kanal NIR dan Red dimanfaatkan untuk menilai tingkat kehijauan vegetasi, karena vegetasi memantulkan NIR lebih tinggi dan menyerap cahaya merah

sehingga menghasilkan nilai NDVI yang tinggi. Adapun data citra yang digunakan disajikan pada [Tabel 1](#).

Tabel 1. Data Citra Satelit yang digunakan dalam Penelitian

Band	Nama Band	Panjang Gelombang	Resolusi	Fungsi
B4	Red	665	10 m	Diserap vegetasi
B8	NIR (Near Infrared)	824	10 m	Dipantulkan oleh vegetasi

Perhitungan dua kanal tersebut dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

Keterangan:

NIR Merupakan pantulan cahaya inframerah dekat yang dipantulkan tinggi oleh vegetasi sehat. RED Merupakan cahaya merah yang diserap oleh klorofil saat fotosintesis.

Nilai NDVI tersebut kemudian diklasifikasikan untuk mengidentifikasi vegetasi terapung (eceng gondok) di permukaan Danau Tondano, dengan rentang -

1-0,32 sebagai vegetasi dengan kerapatan rendah, 0,33-0,42 kerapatan sedang dan 0,42-1 sebagai vegetasi dengan kerapatan tinggi. Analisis dilakukan pada *Area of Interest* (AOI), selanjutnya pemisahan antara badan air dan vegetasi eceng gondok dilakukan dengan menghitung nilai minimum dan maksimum raster melalui menu *Calculate Raster* di *ArcGIS*. Hasilnya kemudian dikonversi dari raster ke poligon untuk memperoleh luasan

vegetasi dan dianalisis lebih lanjut guna melihat pola sebaran eceng gondok secara temporal. Untuk memastikan keakuratan hasil, dilakukan *ground check* pada beberapa titik sampel yang dipilih secara *purposif sampling* berdasarkan variasi nilai NDVI dan sebaran lokasi, sehingga interpretasi citra satelit sesuai dengan kondisi nyata di lapangan.

Adapun klasifikasi tingkat kerapatan yang digunakan disajikan pada [Tabel 2](#).

Tabel 2. Klasifikasi Tingkat Kerapatan

Nilai NDVI	Tingkat Kerapatan
-1 s/d 0,32	Rendah
0,33 s/d 0,42	Sedang
0,42 s/d 1	Tinggi

Sumber: ([Bianco, 2025](#)).

Selain data Sentinel 2A yang digunakan untuk NDVI penelitian ini juga menggunakan data arah angin dari ERA5 yang diakses melalui *Google Earth Engine*. Data tersebut menunjukkan dari mana angin bertiup di sekitar danau Tondano. Setelah diunduh, data kemudian diolah di *wrplot* untuk ditampilkan dalam bentuk mawar arah angin. Informasi ini digunakan untuk memahami bagaimana angin berperan dalam menggerakkan dan menyebarkan eceng gondok di permukaan danau.

HASIL PENELITIAN

Sebaran Eceng Gondok Tahun 2023-2025

Sebaran eceng gondok di danau Tondano menunjukkan pola distribusi yang bervariasi pada setiap waktu pengamatan. Berdasarkan hasil interpretasi peta, area persebaran gulma air ini tidak terjadi secara merata di seluruh wilayah danau, melainkan terkonsentrasi pada bagian-bagian tertentu yang cenderung berubah dari waktu ke waktu. Perubahan ini terlihat jelas melalui perbandingan visual antarperiode pengamatan yang memperlihatkan pergeseran dominasi sebaran dari satu sisi danau ke sisi lainnya.

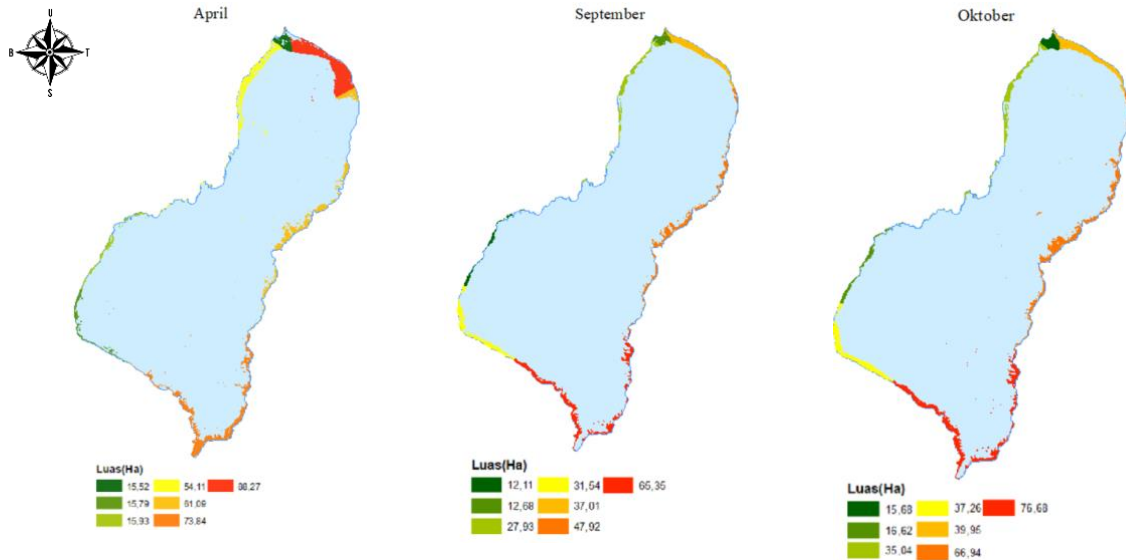
Peta hasil analisis memberikan gambaran mengenai arah dan lokasi penyebaran eceng gondok di sekitar danau, yang meliputi wilayah administrasi Kecamatan Tondano Barat, Tondano Timur, Tondano Selatan, Remboken, Kakas, Kakas Barat, dan Eris. Melalui peta pada [Gambar 3](#), dapat diamati bahwa penyebaran eceng gondok memiliki dinamika spasial yang

dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan karakteristik perairan danau. Dengan demikian, hasil pemetaan ini menjadi dasar penting untuk memahami pola persebaran gulma air dari waktu ke waktu di kawasan Danau Tondano.

Peta hasil analisis menunjukkan dinamika perubahan luas dan sebaran eceng gondok di Danau Tondano selama tahun 2023. Pada April 2023, sebaran terluas terdapat di sisi utara dan timur, khususnya di sekitar Tondano Timur dan Kakas, sementara bagian barat dan selatan masih relatif kecil dan tersebar.

Memasuki September 2023, terjadi pergeseran dengan peningkatan konsentrasi di sisi timur dan tenggara, sedangkan bagian barat tetap rendah. Pada Oktober 2023, sebaran semakin meluas ke wilayah selatan dan tenggara, terutama di Kakas dan Kakas Barat, dengan tutupan yang lebih dominan dibandingkan sisi utara dan barat.

Pada [Tabel 3](#) hasil analisis numerik berikutnya menyajikan data kuantitatif mengenai perubahan luasan eceng gondok di danau Tondano selama periode pengamatan tahun 2023. Data dalam [Tabel 3](#) menggambarkan variasi luasan tutupan vegetasi terapan pada setiap waktu pengamatan yang mencerminkan dinamika penyebaran eceng gondok di berbagai bagian danau. Melalui penyajian data ini, perubahan luasan dapat diamati secara lebih terukur sehingga memberikan gambaran yang lebih jelas mengenai tingkat fluktuasi dan perbedaan distribusi antarperiode pengamatan.



Gambar 3. Sebaran Eceng Gondok 2023

Tabel 3. Luasan Eceng Gondok 2023

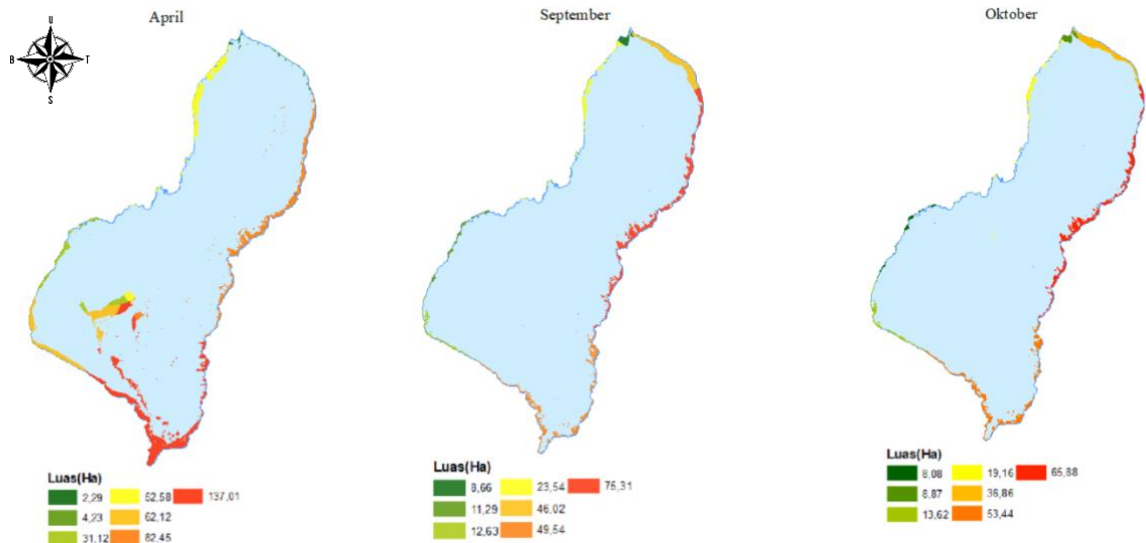
Kecamatan	Luasan Eceng Gondok (Ha) 2023		
	23 April 2023	25 September 2024	05 Oktober 2023
Tondano selatan	54.11	27.93	35.05
Remboken	15.93	12.12	16.63
Kakas barat	15.80	31.54	37.26
Kakas	73.85	65.35	76.69
Eris	61.10	47.92	66.95
Tondano Timur	88.28	37.01	39.95
Tondano Barat	15.52	12.69	15.69
Total luas	324.59	234.57	288.21

Sumber: hasil lapangan, 2025

Berdasarkan hasil analisis spasial, total luasan eceng gondok di Danau Tondano pada April 2023 tercatat sebesar 324.59 hektar. Pada periode ini, Kecamatan Tondano Timur menjadi wilayah dengan luasan eceng gondok terbesar yaitu 88.28 hektar. Posisi berikutnya ditempati oleh kecamatan Kakas dengan luas 73.85 hektar, sedangkan kecamatan Tondano Barat memiliki luasan terkecil yaitu 15.52 hektar. Kondisi ini menunjukkan bahwa bagian utara dan tenggara danau memiliki tingkat pertumbuhan eceng gondok yang relatif lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Pada September 2023, total luasan eceng gondok menurun menjadi 234.57 hektar. Pada periode ini, kecamatan Kakas menjadi area dengan sebaran terluas, mencapai 65.35 hektar, sementara kecamatan Tondano Barat tetap menjadi wilayah dengan luasan terkecil sebesar 12.69 hektar. Selanjutnya, pada Oktober 2023, total luasan eceng gondok meningkat menjadi

288.21 hektar. Kecamatan Kakas masih menjadi wilayah dengan luasan terbesar mencapai 76.69 hektar, sedangkan kecamatan Tondano Barat tetap mencatatkan luasan terkecil yaitu 15.69 hektar.

Selanjutnya, pada tahun 2024, hasil analisis spasial ([Gambar 4](#)) memperlihatkan peningkatan sebaran eceng gondok yang cukup jelas di wilayah timur dan selatan danau Tondano pada bulan April, mencakup sebagian besar area di Kecamatan Kakas. Tutupan vegetasi terapung di sisi ini tampak lebih meluas dibandingkan periode sebelumnya, menunjukkan perubahan distribusi yang signifikan dari arah barat menuju ke wilayah timur dan selatan. Sebaliknya, bagian barat dan utara danau, seperti kecamatan Tondano Barat dan sebagian Tondano Utara, menampilkan luasan yang lebih sempit, menandakan adanya perbedaan tingkat tutupan antarbagian danau pada waktu tersebut.



Gambar 4. Sebaran Eceng Gondok 2024

Pada periode berikutnya, yaitu September dan Oktober 2024, pola penyebaran eceng gondok kembali menunjukkan dominasi yang kuat di sisi timur danau Tondano, terutama di sekitar wilayah kecamatan Eris. Tutupan di sisi ini tampak lebih padat dan menyebar dibandingkan wilayah lainnya. Di sisi barat danau, seperti kecamatan Remboken dan Tondano Barat, luasannya terlihat menurun dengan cakupan yang relatif kecil dibandingkan dengan sisi timur. Berdasarkan pola tersebut, bagian timur danau tampak menjadi area yang paling banyak tertutupi vegetasi terapung

selama dua periode pengamatan ini, sementara bagian barat memperlihatkan tingkat tutupan yang lebih rendah.

Pada Tabel 4 hasil analisis ini menyajikan perubahan luasan eceng gondok di danau Tondano pada setiap periode pengamatan tahun 2024. Data tersebut memberikan gambaran kuantitatif mengenai variasi luas tutupan vegetasi terapung, baik peningkatan maupun penurunan, yang mencerminkan dinamika sebarannya di seluruh wilayah danau selama penelitian.

Tabel 4. Luasan Eceng Gondok 2024

Kecamatan	Luasan Eceng Gondok (Ha) 2024		
	17 April 2024	04 September 2024	24 Oktober 2024
Tondano selatan	52.58	23.55	19.17
Remboken	31.12	11.30	8.08
Kakas barat	62.12	12.63	13.62
Kakas	137.01	49.54	53.44
Eris	82.46	75.31	65.88
Tondano Timur	4.24	46.03	36.87
Tondano Barat	2.29	8.66	8.88
Total luas	371.82	227.03	205.94

Sumber: hasil lapangan, 2025.

Pada April 2024, luasan eceng gondok di Danau Tondano mencapai 371,82 hektar, dengan sebaran terluas di Kecamatan Kakas (137,01 ha) dan terendah di Tondano Barat (2,29 ha). Pada September 2024, luasannya menurun menjadi 227,03 hektar, dengan dominasi berpindah ke kecamatan Eris (75,31 ha), sementara Tondano Barat tetap menjadi yang terkecil (8,66 ha). Selanjutnya, pada Oktober 2024, luasan kembali menurun menjadi 205,94 hektar, dengan kecamatan Eris

masih mendominasi (65,88 ha) dan Tondano Barat terendah (8,87 ha). Secara umum, meskipun terjadi penurunan luasan, pola sebaran menunjukkan konsistensi di mana wilayah timur danau cenderung memiliki konsentrasi eceng gondok yang lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya.

Selanjutnya adalah peta sebaran pada tahun 2025 di ambil pada bulan Juli dikarenakan ketersediaan data yang ada pada tahun terbaru. Data tersebut di ambil sebagai data untuk

menjadi data pembandingan dari tahun sebelumnya dan tahun terbaru yang sajikan pada [Gambar 5](#).



Gambar 5. Sebaran Eceng Gondok Juli 2025

Memasuki Juli 2025, hasil analisis menunjukkan bahwa pola sebaran eceng gondok masih mempertahankan kecenderungan yang sama seperti periode sebelumnya. Konsentrasi utama vegetasi terapung tetap berada di sisi timur danau Tondano dengan luasan yang lebih besar dibandingkan wilayah lainnya. Bagian selatan danau memperlihatkan tingkat tutupan sedang, sedangkan wilayah barat dan utara menampilkan cakupan paling

kecil di antara seluruh area pengamatan. Kondisi ini menggambarkan bahwa distribusi eceng gondok pada tahun 2025 masih menunjukkan pola yang relatif stabil, dengan dominasi sebaran di kawasan timur dan penurunan luasan di sisi barat dan utara. Data numerik pada [Tabel 5](#) memperlihatkan rincian perubahan luasan pada setiap kecamatan di sekitar danau Tondano selama periode pengamatan tersebut.

Tabel 5. Luasan Eceng Gondok 2025

Kecamatan	Luasan Eceng Gondok (Ha) 2024
	21 Juli 2025
Tondano selatan	29.87
Remboken	19.52
Kakas barat	25.10
Kakas	54.53
Eris	85.79
Tondano Timur	3.45
Tondano Barat	1.29
Total luas	219.56

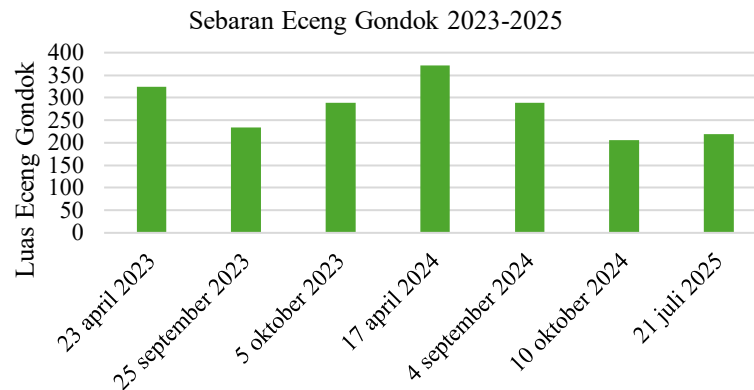
Pada Juli 2025, luasan eceng gondok di danau Tondano mencapai 219,56 hektar, dengan kecamatan Eris sebagai wilayah terluas (85,79 ha) dan Tondano Barat sebagai yang terkecil (1,29 ha). Kondisi ini menunjukkan bahwa konsentrasi eceng gondok masih terfokus di bagian timur danau, sementara wilayah barat relatif lebih terbuka. Pola ini konsisten dengan pengamatan sebelumnya yang menunjukkan dominasi sebaran di sisi timur.

Untuk memperjelas dinamika perubahan, hasil analisis juga disajikan dalam bentuk grafik pada [Gambar 6](#) yang menampilkan variasi luasan eceng gondok pada setiap periode pengamatan dari tahun 2023 hingga 2025 secara lebih sistematis.

Berdasarkan grafik analisis [Gambar 6](#), luasan eceng gondok di danau Tondano periode 2023–2025 menunjukkan pola fluktuatif, dengan kecenderungan meningkat di awal tahun, menurun di akhir tahun, lalu kembali

naik pada periode berikutnya. Pola ini mencerminkan dinamika pertumbuhan yang berlangsung secara periodik, dengan area

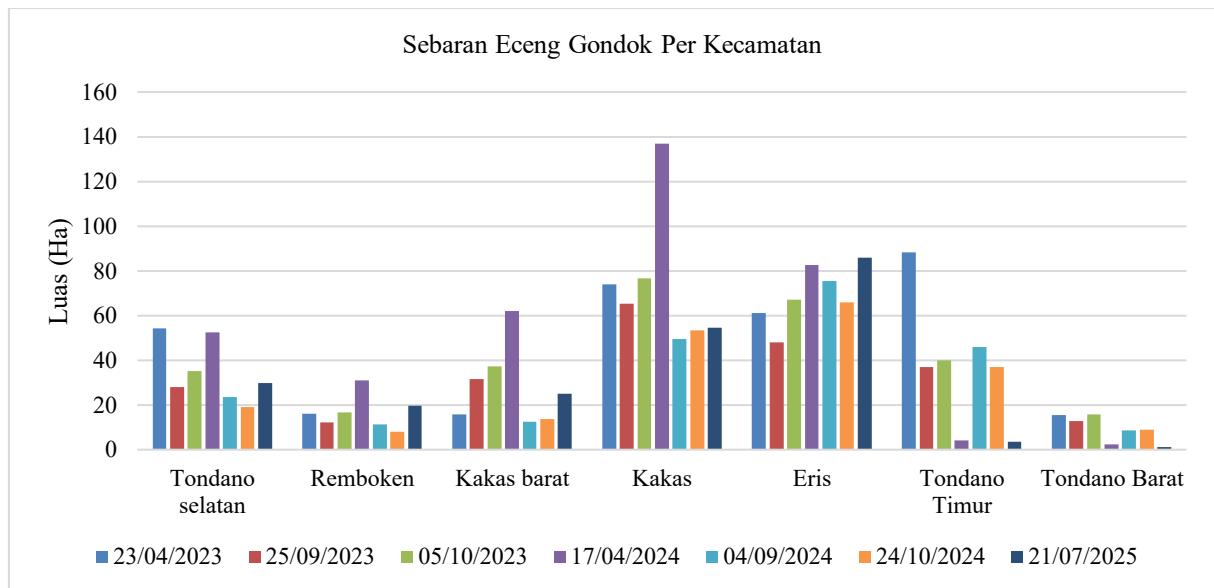
tertentu yang tetap menjadi pusat sebaran utama.



Gambar 6. Grafik Pola Sebaran Eceng Gondok

Untuk melihat variasi lebih rinci, data juga disajikan dalam grafik per kecamatan ([Gambar 7](#)). Penyajian ini menunjukkan perbedaan

dinamika luasan eceng gondok di tiap wilayah, sehingga pola perubahan pada tingkat lokal dapat diamati dengan lebih jelas.



Gambar 7. Grafik Sebaran Eceng Gondok Per Kecamatan

Berdasarkan hasil analisis spasial, grafik perubahan luasan eceng gondok di danau Tondano selama periode 2023 hingga 2025 memperlihatkan variasi yang cukup jelas antar kecamatan ([Gambar 7](#)). Secara umum, sebaran vegetasi terapung ini menunjukkan pola yang fluktuatif dari tahun ke tahun, dengan pergeseran dominasi wilayah yang relatif konsisten. Pada awal pengamatan, kecamatan Tondano Timur dan Kakas menjadi area dengan tutupan eceng gondok terbesar, sementara kecamatan Tondano Barat terus menunjukkan luasan yang paling kecil. Memasuki tahun

berikutnya, dominasi perairan beralih ke wilayah timur, terutama kecamatan Eris dan Kakas, yang secara berulang mencatat luasan tertinggi dalam beberapa periode. Di sisi lain, kecamatan Tondano Barat tetap menjadi wilayah dengan tutupan paling sedikit sepanjang masa pengamatan. Secara keseluruhan, grafik memperlihatkan bahwa pertumbuhan eceng gondok lebih terkonsentrasi di bagian timur dan tenggara danau, sedangkan bagian barat dan utara cenderung memiliki luasan yang lebih rendah, menggambarkan

perbedaan karakteristik perairan di masing-masing wilayah.

Berdasarkan hasil interpretasi spasial ([Gambar 3](#)), distribusi kerapatan eceng gondok di danau Tondano selama periode 2023–2025 menunjukkan dinamika yang tidak acak, melainkan membentuk pola pergeseran yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan perairan dan arah dominan pergerakan massa air. Pada April 2023, konsentrasi kerapatan tertinggi masih terfokus di bagian utara danau, khususnya kecamatan Tondano Timur. Kondisi ini mengindikasikan bahwa fase awal pertumbuhan vegetasi terapung berkembang pada area yang memiliki akumulasi *nutrien* dan kondisi perairan yang relatif mendukung. Sebaliknya, wilayah barat seperti Tondano Selatan dan Remboken menunjukkan kerapatan rendah, menandakan distribusi eceng gondok belum menyebar secara merata di seluruh badan danau.

Memasuki September 2023, pusat kerapatan mulai bergeser ke sisi timur, terutama di kecamatan Kakas. Pergeseran ini menunjukkan adanya mobilitas vegetasi terapung yang dipengaruhi oleh arah angin dominan dan dinamika arus permukaan danau. Pada Oktober 2023, konsentrasi eceng gondok semakin meluas ke bagian selatan dengan dominasi tetap berada di kecamatan Kakas, sementara wilayah utara mengalami penurunan kerapatan. Pola tersebut memperlihatkan bahwa distribusi eceng gondok bersifat dinamis dan cenderung bergerak mengikuti mekanisme transportasi alami di permukaan perairan. Dengan demikian, sepanjang tahun 2023 terjadi transisi pola kerapatan dari utara menuju timur dan selatan danau.

Pada tahun 2024 ([Gambar 4](#)), pola distribusi kerapatan menunjukkan kecenderungan yang lebih stabil dibandingkan tahun sebelumnya. Wilayah timur danau secara konsisten mempertahankan tingkat kerapatan tinggi, sedangkan bagian barat tetap didominasi kerapatan rendah. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa sisi timur danau berfungsi sebagai zona akumulasi vegetasi terapung yang didukung oleh kombinasi faktor ekologis dan klimatologis. Pada April 2024, kecamatan Kakas menjadi area dengan kerapatan tertinggi, sedangkan Tondano Barat masih menunjukkan tutupan yang rendah. Selanjutnya, pada September hingga Oktober

2024, dominasi kerapatan bergeser ke Kecamatan Eris dan bertahan hingga akhir periode pengamatan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa wilayah timur memiliki karakteristik lingkungan yang lebih mendukung perkembangan eceng gondok dibandingkan wilayah lainnya.

Pola yang sama masih terlihat pada Juli 2025 ([Gambar 5](#)). Kerapatan eceng gondok tetap terkonsentrasi di sisi timur danau, terutama di kecamatan Eris, sementara wilayah barat dan utara seperti Tondano Barat dan Tondano Timur menunjukkan perairan yang relatif lebih terbuka. Konsistensi pola ini menegaskan bahwa distribusi eceng gondok di danau Tondano tidak hanya dipengaruhi oleh pertumbuhan vegetasi itu sendiri, tetapi juga oleh faktor eksternal seperti arah angin, arus permukaan, dan akumulasi *nutrien*. Secara keseluruhan, hasil interpretasi menunjukkan bahwa bagian timur danau merupakan area paling stabil sebagai pusat konsentrasi eceng gondok, sedangkan wilayah barat cenderung menjadi area dengan tingkat kerapatan rendah sepanjang periode pengamatan.

Analisis kerapatan eceng gondok di danau Tondano bertujuan untuk menggambarkan tingkat penutupan vegetasi terapung pada setiap periode pengamatan. Nilai ini menunjukkan seberapa besar permukaan perairan yang tertutupi, sehingga menjadi indikator penting dalam melihat dominasi dan sebaran vegetasi di berbagai zona danau. Variasi kerapatan antarperiode juga mencerminkan dinamika pertumbuhan di tiap wilayah, yang divisualisasikan melalui peta kerapatan pada masing-masing kecamatan seperti disajikan pada [Tabel 6](#).

Hasil observasi ([Tabel 6](#)), menunjukkan bahwa distribusi kerapatan eceng gondok di danau Tondano membentuk pola spasial yang konsisten dan terpusat pada wilayah tertentu. Kecamatan Kakas dan Eris secara dominan berada pada kategori kerapatan tinggi selama periode 2023–2025, sehingga dapat diidentifikasi sebagai area utama akumulasi vegetasi terapung. Konsentrasi tersebut mengindikasikan bahwa bagian timur dan tenggara danau memiliki kondisi ekologis yang lebih mendukung pertumbuhan eceng gondok, terutama terkait tingginya ketersediaan *nutrien* dan pengaruh dinamika massa air.

Tabel 6. Kerapatan Eceng Gondok Per Kecamatan

Hasil observasi		Kerapatan Eceng gondok di Danau Tondano						
		Tondano Selatan	Remboken	Kakas Barat	Kakas	Eris	Tondano Timur	Tondano Barat
2023	April	Sedang	Rendah	Rendah	Tinggi	Sedang	Tinggi	Rendah
	September	Sedang	Rendah	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah
	Oktober	Sedang	Rendah	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah
2024	April	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Rendah	Rendah
	September	Sedang	Rendah	Sedang	Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah
	Oktober	Sedang	Rendah	Rendah	Tinggi	Tinggi	Sedang	Rendah
2025	Juli	Sedang	Sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi	Rendah	Rendah

Sumber: hasil penelitian, 2025.

Pada tahun 2023 terjadi pergeseran pusat kerapatan dari utara menuju timur dan selatan danau. Pada April, kategori kerapatan tinggi masih ditemukan di Tondano Timur dan Kakas, namun pada September hingga Oktober dominasi berpindah dan terkonsentrasi di Kakas serta Eris. Pergeseran ini menunjukkan bahwa distribusi eceng gondok tidak hanya ditentukan oleh lokasi pertumbuhan awal, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor hidrodinamika seperti arah angin dan arus permukaan yang mendorong perpindahan vegetasi terapung menuju sisi timur danau. Sebaliknya, wilayah barat seperti Remboken dan Tondano Barat secara konsisten berada pada kategori rendah, menunjukkan rendahnya akumulasi vegetasi pada area tersebut.

Pada tahun 2024 pola distribusi menjadi lebih stabil. Kakas dan Eris tetap mempertahankan kategori kerapatan tinggi pada seluruh periode pengamatan, sedangkan Tondano Barat tetap berada pada kategori rendah. Stabilitas ini mengindikasikan bahwa sisi timur danau berfungsi sebagai zona retensi eceng gondok, yaitu area tempat vegetasi terapung cenderung terkumpul dan bertahan dalam jangka waktu lebih lama. Kondisi tersebut memperlihatkan adanya keterkaitan antara arah dominan angin, karakter perairan yang lebih tenang, dan tingginya suplai nutrisi dari aktivitas budidaya perikanan di wilayah sekitar.

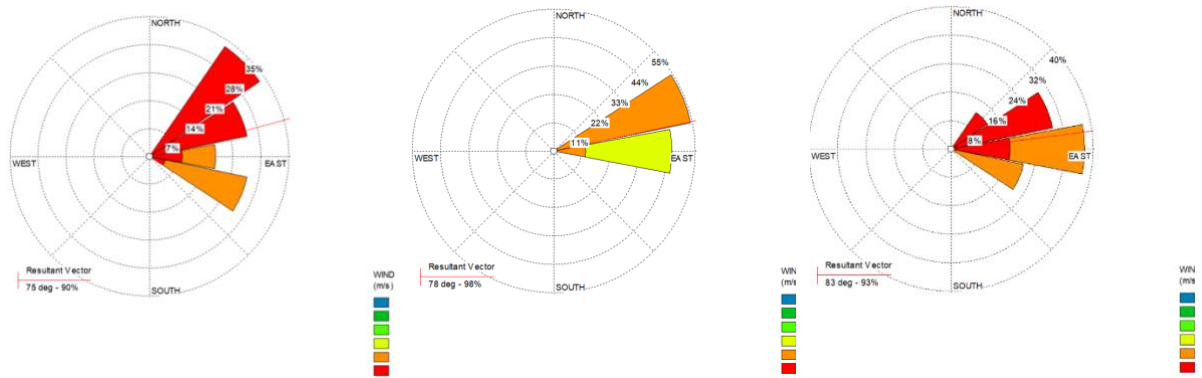
Pola yang sama masih terlihat pada Juli 2025. Kecamatan Kakas dan Eris tetap menjadi wilayah dengan kerapatan tinggi, sedangkan Tondano Barat dan Tondano Timur menunjukkan kerapatan rendah. Konsistensi pola ini memperkuat indikasi bahwa distribusi eceng gondok di Danau Tondano dikendalikan oleh kombinasi faktor ekologis dan klimatologis. Dengan demikian, bagian timur dan tenggara danau dapat dipahami sebagai

pusat akumulasi utama eceng gondok, sementara wilayah barat cenderung berfungsi sebagai area dengan tingkat pertumbuhan dan penumpukan vegetasi yang lebih rendah.

Pola Angin Permukaan di Danau Tondano

Perubahan sebaran dan kerapatan eceng gondok di danau Tondano menunjukkan variasi antar kecamatan. Pola kerapatan yang relatif konsisten di beberapa wilayah dipengaruhi oleh faktor fisik, terutama arah angin. Wilayah yang berada searah dengan hembusan angin cenderung memiliki kerapatan lebih tinggi, sedangkan area yang terlindung menunjukkan kerapatan lebih rendah. Hal ini menegaskan bahwa angin berperan penting dalam memengaruhi distribusi spasial eceng gondok di permukaan danau, yang divisualisasikan melalui mawar arah angin. Berikut ini arah angin periode pengamatan tahun 2023 yang disajikan pada [Gambar 8](#).

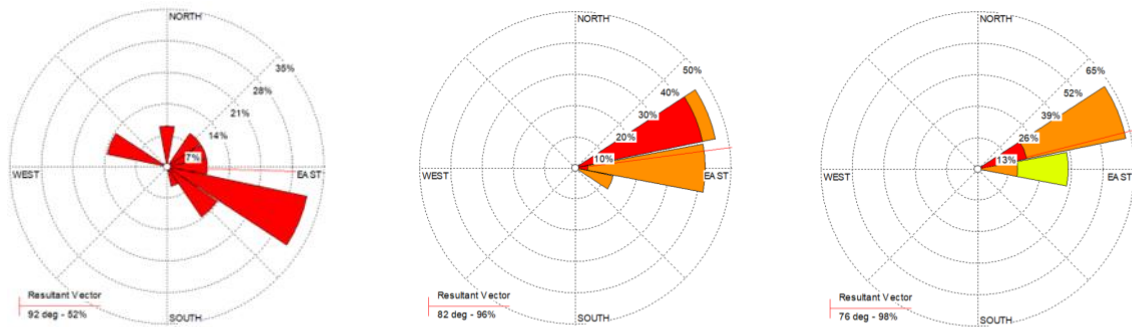
Mawar angin menunjukkan bahwa pada April angin dominan bertiup ke timur laut (NE) dengan frekuensi tertinggi 35% dan kecepatan 0,5–2,1 m/s, diikuti arah timur-timur laut (ENE). Nilai *resultant vector* 75° dengan konsistensi 90% menunjukkan arah angin yang relatif stabil menuju timur-timur laut. Pada September, angin didominasi arah timur-timur laut (ENE) dengan frekuensi hingga 55% dan kecepatan 2,1–3,6 m/s, bahkan meningkat hingga 3,6–5,7 m/s. Nilai *resultant vector* 78° dan konsistensi 98% menunjukkan arah angin yang sangat stabil ke timur-timur laut hingga timur. Sementara itu, pada Oktober arah angin masih didominasi antara timur-timur laut (ENE) dan timur (E), dengan *resultant vector* 83° dan konsistensi 93%. Kecepatan angin berkisar 0,5–3,6 m/s, tergolong rendah hingga sedang, dengan kecenderungan hembusan tetap menuju timur laut.



Gambar 8. Mawar Arah Angin April, September, Oktober 2023

Pada tahun 2024 ([Gambar 9](#)), pola arah dan intensitas angin relatif sama dengan tahun 2023, meskipun terdapat sedikit variasi. Secara umum, angin tetap berperan penting dalam

memengaruhi pergerakan massa air dan distribusi eceng gondok, terutama menuju wilayah timur dan selatan Danau Tondano.



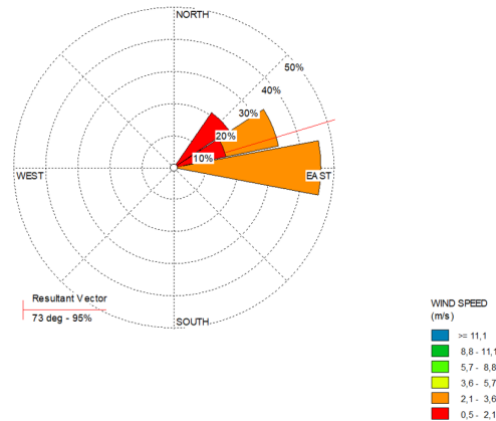
Gambar 9. Mawar Arah Angin April, September, Oktober 2024

Pada April, arah angin bergeser ke timur-tenggara (ESE) dengan sudut rata-rata 92° dan konsistensi 52%. Frekuensi tertinggi mencapai 30% dengan kecepatan 0,5–2,1 m/s, diikuti arah barat-barat laut, utara, hingga timur laut dengan frekuensi lebih kecil. Kecepatan angin relatif seragam dan tergolong rendah–sedang, sehingga cenderung mendorong massa air dan eceng gondok ke arah timur–tenggara.

Pada September, angin didominasi ke arah timur laut hingga timur-timur laut dengan vektor 82° dan konsistensi tinggi (96%). Sekitar 45% angin mengarah ke ENE dengan kecepatan 0,5–3,6 m/s, serta 41% ke arah timur dengan kecepatan 2,1–3,6 m/s, menunjukkan arah yang stabil dan terarah ke timur.

Sementara itu, pada Oktober arah angin tetap didominasi ke timur-timur laut (76°) dengan konsistensi sangat tinggi (98%). Frekuensi tertinggi mencapai 64% dengan kecepatan 0,5–3,6 m/s, bahkan meningkat hingga 5,7 m/s ke arah timur. Pola ini menunjukkan hembusan angin yang kuat dan stabil menuju timur laut, sehingga berpotensi mendorong pergerakan eceng gondok ke wilayah timur danau.

Pada tahun 2025, ([Gambar 10](#)), pola arah dan intensitas angin masih relatif sama dengan tahun 2024, dengan kecenderungan bergerak ke arah timur. Hal ini menunjukkan konsistensi sirkulasi angin yang berpengaruh terhadap distribusi eceng gondok, terutama pada periode pertengahan tahun.



Gambar 10. Mawar Angin Juli 2025

Berdasarkan mawar angin Juli, arah angin pada Juli tetap didominasi ke timur-timur laut (ENE) dengan *resultant vector* 73° dan konsistensi 95%. Frekuensi tertinggi mencapai 50% ke arah timur dengan kecepatan 2,1–3,6 m/s, diikuti ENE dan timur laut dengan kecepatan 0,5–3,6 m/s. Secara umum, kecepatan angin tergolong rendah hingga sedang dan berpotensi mendorong pergerakan eceng gondok ke arah timur laut.

Secara keseluruhan, pola angin menunjukkan arah dominan menuju timur hingga timur laut dengan konsistensi tinggi (52–98%) dan *resultant vector* antara 73° – 98° .

Kecepatan angin berkisar 0,5–3,1 m/s, dengan dominasi pada 2,1–3,1 m/s, sehingga menunjukkan pergerakan angin yang stabil dan berperan dalam mengarahkan massa air serta vegetasi terapung ke sisi timur laut danau.

Untuk memperjelas analisis, data arah angin ini dilengkapi dengan tabel kecepatan angin pada setiap periode pengamatan. Tabel 7 menyajikan nilai rata-rata kecepatan angin secara terukur, sehingga memudahkan dalam memahami variasi intensitas angin serta hubungannya dengan dinamika sebaran eceng gondok di Danau Tondano.

Tabel 7. Kecepatan Angin rata-rata dalam Periode Pengamatan

Bulan/Tahun	Kecepatan angin rata-rata(m/s)
23 april 2023	2.05
25 september 2023	3.15
5 oktober 2023	1.88
17 april 2024	0.32
4 september 2024	2.22
24 oktober 2024	2.62
21 juli 2025	2.05

Berdasarkan analisis, kecepatan angin di Danau Tondano selama 2023–2025 berfluktuasi antara 0,32–3,14 m/s. Nilai tertinggi terjadi pada 25 September 2023 (3,14 m/s), sedangkan terendah pada 17 April 2024 (0,32 m/s). Pada periode lainnya, kecepatan angin berkisar antara 1,88–2,62 m/s, dengan nilai 2,04 m/s kembali tercatat pada Juli 2025, serupa dengan April 2023.

Secara umum, pola ini menunjukkan dinamika angin yang berubah secara periodik. Fluktuasi tersebut mencerminkan kondisi atmosfer yang tidak tetap dan menjadi salah satu faktor yang memengaruhi pergerakan serta sebaran eceng gondok di Danau Tondano.

PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis luasan pada masing-masing kecamatan, pola sebaran eceng gondok di Danau Tondano menunjukkan puncak pertumbuhan yang umumnya terjadi pada bulan April. Kondisi ini berkaitan dengan tingkat kesuburan perairan (eutrofik) yang tinggi serta faktor lingkungan yang mendukung pada masa peralihan musim. Danau Tondano telah lama dikategorikan sebagai danau eutrofik akibat tingginya kandungan nitrogen (N) dan fosfor (P) yang bersumber dari limpasan pertanian dan aktivitas budidaya ikan. Limbah organik dari karamba jaring tancap, khususnya di wilayah Eris dan Talikuran, terakumulasi di dasar danau dan memperkaya perairan dengan unsur hara (Zai et al., 2023). Akumulasi *nutrien*

ini mempercepat proses eutrofikasi dan mendorong pertumbuhan vegetasi terapung, termasuk eceng gondok. Seperti yang di tunjukan oleh visual, sebaran eceng gondok dapat dilihat pertumbuhannya hanya terdapat pada pinggiran danau dan tidak pernah sampai menutupi danau secara keseluruhan fenomena ini pernah di teliti oleh [Dersseh et al., \(2010\)](#). Eceng gondok tumbuh paling optimal pada perairan yang relatif tenang dengan kedalaman dangkal (kurang dari 6 meter). Pertumbuhannya semakin pesat apabila dasar perairan tertutup sedimen yang kaya bahan organik serta didukung oleh ketersediaan unsur hara penting, terutama nitrogen dan fosfor dalam jumlah yang cukup.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa Kecamatan Eris, di bagian timur danau, menjadi area dengan pertumbuhan eceng gondok tertinggi pada bulan awal periode pengamatan yaitu April secara konsisten menjadi bulan dimana eceng gondok berkembang pesat. Selain bulan April, bulan-bulan selanjutnya menunjukkan konsistensi yang relatif sama karena eceng gondok cenderung banyak terdapat di sisi timur danau dikarenakan pergantian musim. Hal ini sejalan dengan sifat eceng gondok yang mampu menyerap nitrogen dan fosfor secara efektif sehingga tumbuh cepat pada perairan kaya nutrisi ([A. T. Moningkey et al., 2020](#)). Setelah musim hujan (Desember–Maret), peningkatan limpasan membawa *nutrien* dalam jumlah besar ke danau, sehingga pada bulan April unsur hara berada pada kondisi optimal untuk dimanfaatkan vegetasi air. Ditambah dengan suhu perairan yang berkisar antara 26,5–30,3°C rentang yang mendukung pertumbuhan optimal eceng gondok pertumbuhan menjadi semakin masif ([G. S. Moningkey et al., 2021](#)).

Pada periode pengamatan terakhir, terjadi penurunan sebaran eceng gondok terutama di sisi utara danau, yang diduga berkaitan dengan program pembersihan oleh TNI dan instansi terkait melalui program Pemerintah Provinsi Sulawesi Utara sejak Maret 2025 hingga waktu penelitian ini dilakukan. Selain ketersediaan *nutrien* dan kondisi iklim, pola sebaran eceng gondok di Danau Tondano secara signifikan dipengaruhi oleh arah dan kecepatan angin. Analisis data angin menunjukkan bahwa dominasi hembusan angin bergerak dari barat menuju timur, sehingga eceng gondok cenderung terdorong ke sisi timur danau yaitu kecamatan Eris, dan Kakas. Hal ini terlihat

konsisten pada hasil pengamatan selama periode 2023 hingga 2025, di mana grafik luasan eceng gondok memperlihatkan fluktuasi total luasan, namun kecenderungan dominasi tetap berada di sisi timur. Peta hasil analisis spasial juga menunjukkan konsentrasi kerapatan tertinggi eceng gondok di wilayah timur danau pada hampir seluruh periode pengamatan.

Temuan ini sejalan dengan pendapat [Muhimmatul et al., \(2025\)](#), yang menyatakan bahwa pergerakan eceng gondok bersifat dinamis dan berubah seiring waktu, dipengaruhi oleh variasi angin. Seperti yang di tunjukan oleh visual peta sebaran dan kerapatan di dapatkan hasil eceng gondok cenderung bergerak ke sisi timur danau berkorelasi dengan arah angin yang dilihat dari *windrose* pada bulan-bulan pengamatan yang dominan mengarah ke arah timur danau. Dengan kata lain, selain faktor internal seperti pertumbuhan dan kebutuhan *nutrien*, faktor eksternal berupa arah dan intensitas angin turut mengatur distribusi spasial eceng gondok. Kondisi ini menjelaskan mengapa sisi timur Danau Tondano menjadi wilayah dengan akumulasi vegetasi terapung yang konsisten, sementara sisi lain, terutama bagian barat, menunjukkan kerapatan yang lebih rendah. Secara keseluruhan, arah dominan angin berperan sebagai mekanisme penggerak utama distribusi eceng gondok di danau, bekerja bersama dengan ketersediaan *nutrien* dan karakteristik lingkungan perairan untuk membentuk pola sebaran yang diamati.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis spasial dan temporal pada periode April, September, Oktober 2023–2024 serta Juli 2025, dapat disimpulkan bahwa bulan April merupakan periode puncak perkembangan eceng gondok (*Eichhornia crassipes*) di Danau Tondano. Pada periode tersebut, sebaran eceng gondok meningkat signifikan hingga menjangkau hampir seluruh perairan danau, dengan distribusi yang relatif merata di wilayah sekitar seperti Remboken, Eris, Kakas, Kakas Barat, Tondano Barat, dan Tondano Timur. Temuan ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan pada periode tersebut sangat mendukung pertumbuhan, terutama akibat meningkatnya ketersediaan unsur hara dan kondisi cuaca yang relatif stabil.

Selain itu, kerapatan eceng gondok cenderung terkonsentrasi di sisi timur danau,

yang dipengaruhi oleh kesuburan perairan akibat akumulasi *nutrien* dari aktivitas keramba tancap, sehingga wilayah tersebut berperan sebagai perangkap alami. Faktor angin juga berkontribusi dalam membentuk pola ini, di mana arah angin dominan menuju timur mendorong pergerakan dan akumulasi eceng gondok. Dengan demikian, hasil penelitian ini menegaskan bahwa dinamika sebaran dan kerapatan eceng gondok tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi limnologis, tetapi juga oleh faktor klimatologis, sehingga memperkuat pemahaman teoritis tentang aspek limnologi dan klimatologi dalam distribusi vegetasi perairan.

SARAN

Upaya pengelolaan eceng gondok di Danau Tondano dapat dioptimalkan melalui penerapan pemantauan berbasis penginderaan jauh dan analisis spasial secara berkala untuk mengidentifikasi perubahan luas serta arah pergerakan eceng gondok mengingat laju perkembangan eceng gondok yang pesat. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian lebih efektif difokuskan di sisi timur danau sebagai zona akumulasi utama akibat pengaruh angin, dengan pencegahan di sisi barat sebagai area awal pergerakan bisa dilakukan dengan memasang jaring di area yang berpotensi menjadi awal dari distribusi di bagian timur. Selain itu, pengurangan beban *nutrien* dari aktivitas domestik, pertanian, dan peternakan dapat dioperasionalkan melalui penyusunan dan penerapan peraturan daerah yang secara spesifik mengatur pengendalian limbah berbasis sumber pencemar danau. Regulasi ini perlu memuat batas baku mutu, mekanisme pengawasan, serta sanksi yang jelas, sehingga memiliki dasar hukum yang kuat dan terukur dalam menekan pertumbuhan eceng gondok.

Temuan ini menegaskan pentingnya integrasi data klimatologis, khususnya angin dan arus permukaan, bisa melalui pemasangan sensor pemantauan sebagai bagian dari sistem pengelolaan perairan mengingat terbatasnya data *open source* yang mendukung sehingga hadirnya solusi teknologi menjadi harapan bagi kelanjutan penelitian. Untuk pengembangan ilmu, penelitian selanjutnya dapat mengintegrasikan parameter hidrodinamika, arus air, dan variabilitas musim guna membangun pemodelan prediksi pola pergerakan eceng gondok.

DAFTAR PUSTAKA

- Andini, S., Prasetyo, Y., & Sukmono, A. 2018. Analisis Sebaran Vegetasi dengan Citra Satelit Sentinel menggunakan Metode NDVI dan Segmentasi (Studi Kasus: Kabupaten Demak). *Jurnal Geodesi Undip*, 7(1), 14–24. <https://doi.org/10.14710/jgundip.2017.19295>
- Bianco, F. 2025. *Pemetaan Perubahan Kerapatan Vegetasi Pada Kawasan Hutan Dengan Tujuan Khusus Sisimeni Sanam Dengan Memanfaatkan Data Citra Sentinel-2a*. <https://doi.org/10.35726/jw.v1i1.453>
- Dersseh, M. G., Melesse, A. M., Tilahun, S. A., Abate, M., & Dagne, D. C. 2010. *Water hyacinth : review of its impacts on hydrology and ecosystem services — Lessons for management of Lake Tana*. 1824, 237–252. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00019-1> ©
- Dewantara, E. F., Purwanto, Y. J., & Setiawan, Y. 2021. Management Strategy of Water Hyacinth (*Eichornia crassipes*) Injatiluhur Reservoir, West Java. *Jurnal Penelitian Sosial Dan Ekonomi Kehutanan*, 18(1), 63–74. <https://doi.org/10.20886/jpsek.2021.18.1.63-74>
- Rahmadi, M. T., Yuniastuti, E., Hakim, M. A., & Suciani, A. 2022. Pemetaan Distribusi Mangrove Menggunakan Citra Sentinel-2A: Studi Kasus Kota Langsa. *Jambura Geoscience Review*, 4(1), 1–10. <https://doi.org/10.34312/jgeosrev.v4i1.11380>
- Moningkey, A. T., Lihang, A., & Rampengan, M. M. F. 2020. Sebaran Spasial Eceng Gondok (*Eichornia crassipes*) di Danau Tondano. *Jurnal Episentrum*, 1(3), 32. <https://doi.org/10.36412/jepst.v1i3.2383>
- Moningkey, A. T., Rampengan, M. M. F., Tumengkol, A. A., & Kumaat, J. C. 2022. Study of bathymetry and sedimentation in Tondano Lake. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 986(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/986/1/012038>

- Moningkey, G. S., Andaki, J. A., Dien, C. R., Jusuf, N., Rarung, L. K., & Moningkey, R. D. 2021. Evaluasi Pengendalian Eceng Gondok (*Eichornia Crassipes*) Di Danau Tondano Kabupaten Minahasa Dalam Masa Pandemi Covid-19. *AKULTURASI jurnal Ilmiah Agrobisnis Perikanan*, 9(1), 65–77. <https://doi.org/10.35800/akulturasi.9.1.2021.34615>
- Muhimmatul, M. A., Rahman, A., Ihsan Jundullah, N., Nur Hayati, M., Marsa Aulia, N., & Bayu Senno, S. 2025. Distribusi Spasial dan Temporal Eceng Gondok di Danau Rawa Pening. *Jurnal Akuatiklestari*, 8(2), 169–175. <https://doi.org/10.31629/akuatiklestari.v8i2.7120>
- Murnisulistyaningsih, Sulastriningsih, H. S., & Kumaat, J. C. 2021. Analysis of Morphometric Changes in Tondano Lake Based on Bathymetric Maps. *E3S Web of Conferences*, 328, 0–4. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202132808018>
- Rahman. 2022. Metode Pengumpulan Data Sekunder. In *Asik Belajar* (Issue 10).
- Sittadewi, E. H. 2008. *156002-ID-fungsi-strategis-danau-tondano-perubahan*. 9(1), 59–66.
- Suawa, P. J., Pioh, N. R., & Waworundeng, W. 2021. Manajemen Pengelolaan Dana Revitalisasi Danau Tondano Oleh Pemerintah Kabupaten Minahasa (Studi Kasus Di Balai Wilayah Sungai Sulawesi). *Jurnal Governance*, 1(2), 1–10. <https://ejournal.unsrat.ac.id/index.php/governance/article/viewFile/36214/33721>
- Susilo, A., Qomariah, S., & Hari Wahyudi, A. 2016. *Analisis Routing Aliran Melalui Reservoir (Studi Kasus Waduk Diponegoro)*. 313. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v4i2.36982>
- Zai, A., Kusen, D. J., Undap, S. L., & Pangemanan, N. P. L. 2023. Limbah hasil produksi budidaya ikan sistem karamba jaring tancap di Desa Eris, Talikuran dan Kaima Kabupaten Minahasa. *Budidaya Perairan*, 11(1), 17–27. <https://doi.org/10.35800/bdp.11.1.2023.43451>