

Analisis Karakteristik Hidrodinamika Perairan Danau Limboto Berdasarkan Fluks Momentum

Analysis of the Hydrodynamic Characteristics of Limboto Lake Waters Based on Momentum Fluxes

Mikail Gabriel Khan¹, Raghel Yunginger^{1*}, Dewa Gede Eka Setiawan¹, Mohamad Jahja¹, Icha Untari Meidji¹, Haerul Ahmadi¹, Cucu Kusmayancu², Merpati Teodoris Nalle³

¹Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Gorontalo, Gorontalo, Kampus IV, Jl. Prof. Dr. Ing. BJ. Habibie, Moutong Kab. Bone Bolango, Provinsi Gorontalo, Indonesia 96212

²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Stasiun Meteorologi Kelas I Djalaluddin Gorontalo, Kabupaten Gorontalo, Provinsi Gorontalo, Indonesia 96231

³Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Stasiun Klimatologi Kelas IV Bone Bolango, Kabupaten Bone Bolango, Provinsi Gorontalo, Indonesia 96119

Email: mikailgabrielkhan@gmail.com; *raghel@ung.ac.id; dewaeka@ung.ac.id; mj@ung.ac.id; ichauntarimeiji10@gmail.com; haerulahmadi@ung.ac.id; cucukusmayancu@gmail.com; merpati.teodoris.nalle@bmkgo.id

Received: 8th October 2025; Revised: 31th October 2025; Accepted: 10th November 2025

Abstrak – Perairan Danau Limboto menunjukkan penurunan kualitas air yang ditandai dengan menurunnya tingkat kejernihan. Faktor-faktor lingkungan, seperti kecepatan dan arah angin, berperan penting dalam memengaruhi dinamika dan kualitas perairan danau. Untuk memahami pengaruh angin terhadap kondisi perairan, diperlukan kajian hidrodinamika yang komprehensif. Penelitian ini difokuskan pada analisis karakteristik hidrodinamika perairan Danau Limboto berdasarkan fluks momentum serta implikasinya terhadap kondisi perairan danau. Pengukuran kecepatan dan arah angin dilakukan pada tujuh titik di perairan Danau Limboto selama periode 1-3 November 2024. Pengambilan data dilakukan pada pagi, siang, dan sore hari. Karakteristik hidrodinamika danau ditentukan menggunakan formula dari data yang telah diukur. Karakteristik hidrodinamika diinterpolasi menggunakan IDW cross validation leave one out dan dioptimalisasi dengan parameter pangkat dan titik tetangga. Arah angin diinterpolasi menggunakan IDW dan diubah menjadi medan vektor menggunakan Vector Field Layer Manager. Didapatkan bahwa fluks momentum oleh angin pada perairan Danau Limboto memiliki rentang nilai 0-0,05 N/m² dan validasi silang menghasilkan RMSE 0,003-0,01 N/m². Interaksi fluks momentum dari angin dan aliran sungai membuat sedimen terendap di wilayah pesisir Danau Limboto.

Kata kunci: Karakteristik hidrodinamika; perairan Danau Limboto; fluks momentum; kecepatan dan arah angin; IDW.

Abstract – The waters of Lake Limboto show a decline in water quality, characterized by a decrease in clarity. Environmental factors, such as wind speed and direction, play a significant role in influencing the dynamics and quality of lake waters. To understand the influence of wind on water conditions, a comprehensive hydrodynamic study is required. This study focuses on analyzing the hydrodynamic characteristics of Lake Limboto waters based on momentum flux and its implications for lake water conditions. Wind speed and direction measurements were conducted on seven ducks in Lake Limboto waters during the period of November 1-3, 2024. Data were collected in the morning, afternoon, and evening. The lake's hydrodynamic characteristics were determined using formulas from the measured data. Hydrodynamic characteristics were interpolated using IDW cross validation leave one out and optimized with rank and neighboring point parameters. Wind direction was interpolated using IDW and converted into a vector field using Vector Field Layer Manager. It was found that the momentum flux by

wind in Lake Limboto waters has a value range of 0-0.05 N/m², and cross validation produced an RMSE of 0.003-0.01 N/m². The interaction of momentum flux from wind and river flow causes sediment to be deposited in the coastal area of Lake Limboto.

Keywords: Hydrodynamic characteristics; Lake Limboto waters; momentum fluxes; wind speed and direction.

1. Pendahuluan

Danau Limboto merupakan danau terbesar di Provinsi Gorontalo dengan luas 26,09 km² [1][2]. Danau Limboto sendiri memiliki 23 sungai sebagai *inlet* dan satu sungai yang bertindak sebagai *outlet*. Sungai Alopohu, Sungai Bionga, Sungai Talubongo, Sungai Moluopo, Sungai Marisa, dan Sungai Rintenga merupakan beberapa sungai besar yang menjadi *inlet* Danau Limboto. Sementara Sungai Tapodu menjadi *outlet* Danau Limboto [3].

Kualitas air Danau Limboto yang terus mengalami penurunan telah menjadi perhatian serius masyarakat maupun pemerintah. Beberapa indikator yang mencerminkan kondisi tersebut antara lain tingkat kekeruhan, kandungan logam berat, dan suhu perairan. Berdasarkan hasil pengamatan, tingkat kekeruhan Danau Limboto menunjukkan peningkatan signifikan selama periode 1994–2019 [4]. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh tingginya konsentrasi sedimen yang masuk melalui aliran sungai serta besarnya volume sedimen tersuspensi di badan danau [4–6].

Dinamika pergerakan sedimen yang memengaruhi tingkat kekeruhan juga berkontribusi terhadap proses pendangkalan danau yang semakin cepat. Fenomena ini erat kaitannya dengan proses hidrodinamika yang terjadi di perairan danau. Ilmu hidrodinamika menjelaskan pengaruh yang kuat dari kecepatan dan arah angin terhadap transpor dan akumulasi sedimen [7], serta peran aliran sungai yang masuk ke danau dalam menentukan distribusi dan deposisi material sedimen [8]. Dalam kajian ini, kedua faktor tersebut diwakili oleh fluks momentum yang menggambarkan besarnya energi gerak yang bekerja pada sistem perairan [9]. Kecepatan dan arah angin pada berbagai danau sangat dipengaruhi oleh kondisi iklim seperti intensitas curah hujan, suhu udara, dan pola angin musiman, sedangkan aliran sungai ke danau ditentukan oleh geometri dan topografi daerah tangkapan air. Variasi faktor-faktor tersebut menyebabkan karakteristik hidrodinamika tiap danau berbeda. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik hidrodinamika perairan Danau Limboto berdasarkan analisis fluks momentum, sebagai dasar untuk memahami mekanisme pendangkalan yang terjadi.

2. Landasan Teori

Hidrodinamika merupakan ilmu yang berfokus pada pergerakan air [10]. Hidrodinamika danau sering kali dinyatakan dalam parameter mekanis. Parameter mekanis dari hidrodinamika danau umumnya diberikan oleh fluks momentum dari angin [11]. Selain itu, aliran sungai yang masuk ke danau juga membawa fluks momentum [8].

Kecepatan angin merupakan sumber utama yang menggerakkan air danau [12]. Angin memberikan fluks momentum ketika bergerak di atas permukaan air danau dan menciptakan arus dan gelombang pada perairan danau [9, 13]. Nilai fluks momentum dari angin dihitung menggunakan Persamaan (1).

$$\tau = \rho C_D U^2 \quad (1)$$

Dengan τ adalah fluks momentum dari angin dalam satuan N/m², ρ adalah massa jenis udara sebesar 1,186 kg/m³ [11], C_D adalah koefisien transfer momentum, dan U adalah kecepatan angin terukur dalam satuan m/s. Nilai dari koefisien transfer momentum bergantung pada kecepatan angin dan telah ditentukan oleh data empiris. Untuk kecepatan angin 2-9 m/s didapatkan nilai koefisien hambatan angin sebesar $1,3 \times 10^{-3}$ [14]. Untuk kecepatan angin yang lebih rendah, koefisien hambatan angin menunjukkan peningkatan contohnya pada kecepatan angin 0,5 m/s menghasilkan koefisien hambatan angin sebesar $1,1 \times 10^{-2}$ dan mendekati $5,0 \times 10^{-3}$ untuk kecepatan angin 1 m/s [15].

Fluks momentum dari angin tidak hanya bekerja pada permukaan air, tetapi juga diteruskan ke badan air danau melalui proses adveksi dan difusi [16]. Ketika mencapai dasar, sisa dari fluks momentum ditransfer ke sedimen sehingga sedimen terangkat ke badan air danau [13, 14]. Ketika sedimen yang terangkat ke badan air makin banyak, maka air danau akan keruh.

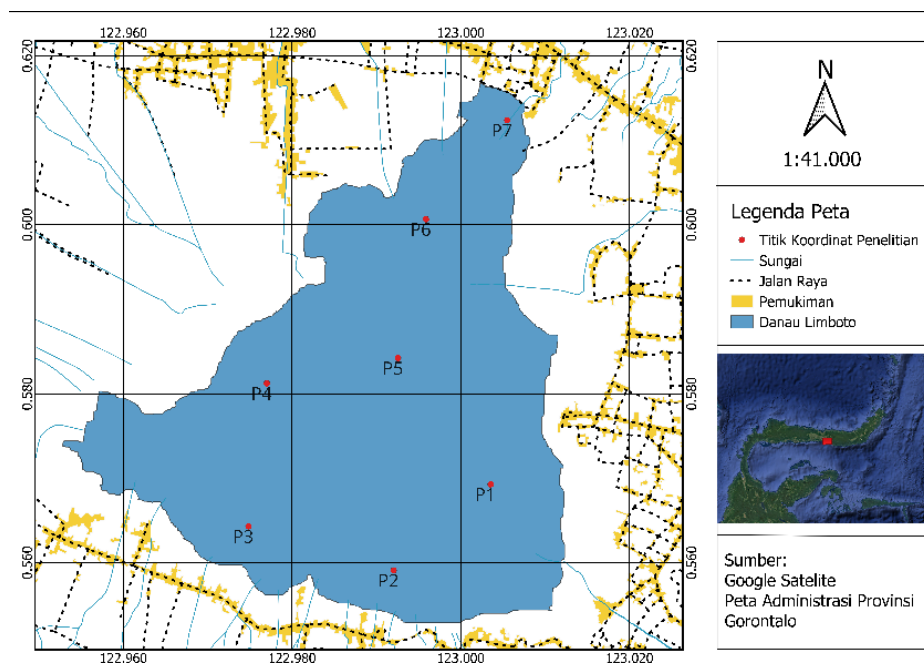
Aliran sungai yang masuk ke danau akan membawa fluks momentumnya menuju badan air danau [9]. Hilir sungai merupakan posisi dengan fluks momentum tertinggi dari aliran sungai yang masuk ke danau [17]. Ketika aliran sungai telah masuk ke badan air danau, kecepatannya akan dihambat oleh gesekan dengan air danau [8]. Selain itu, fluks momentum dari angin juga bisa membelokkan arah dari aliran sungai tersebut pada badan air danau [17].

2. Alat dan Metode

Penelitian ini dilaksanakan pada tujuh titik di perairan Danau Limboto seperti yang ditunjukkan Gambar 1. Adapun data yang diukur adalah kecepatan angin dan arah angin. Pengambilan data dilakukan selama 3 hari (1-3 November 2024) dengan waktu pengambilan data yaitu pagi (07:00-08:00 WITA), siang (13:00-14:00 WITA), dan sore (16:00-17:00 WITA). 7 titik pengukuran dipilih secara acak untuk mewakili wilayah utara, selatan, timur, barat, dan pertengahan Danau Limboto. Adapun alat ukur yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1. Besaran yang diukur dan alat ukurnya.

No	Alat Ukur yang Digunakan	Besaran yang Diukur
1	HT605 Digital Anemometer	Kecepatan Angin
2	Mini 8 in 1 LCD Digital Altimeter Barometer Thermo OMSE1PBK Compass Weather	Arah Angin



Gambar 1. Titik pengambilan data.

Data yang telah diukur dianalisis menggunakan Persamaan (1) untuk mendapatkan karakteristik hidrodinamika perairan Danau Limboto. Karakteristik hidrodinamika diinterpolasi untuk mendapatkan sebaran spasial dari besaran tersebut di perairan Danau Limboto. Interpolasi yang digunakan yaitu *Inverse Distance Weighted* (IDW) *Leave One Out Cross Validation* dengan optimalisasi parameter pangkat P dan jumlah titik tetangga. Jumlah titik tetangga yang digunakan dalam IDW adalah 2 sementara pangkat P yang diuji memiliki rentang 0,9-3,5. Nilai parameter ini dipilih untuk menghasilkan model yang paling akurat. Arah angin diinterpolasikan menggunakan IDW dengan nilai pangkat 2 dan resolusi nilai piksel 14 kolom dan 14 baris untuk Danau Limboto. Raster interpolasi arah angin kemudian diubah menjadi medan vektor menggunakan *plugins QGIS vector field layer manager*.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil penelitian

Data pengukuran kecepatan angin selama 3 hari di Danau Limboto ditunjukkan oleh Tabel 2. Nilai rata-rata kecepatan angin tertinggi terjadi pada siang dan sore hari tanggal 02 November 2024 dengan nilai 3,80 dan 4,33 m/s. Sementara untuk rata-rata harian, kecepatan angin pada tanggal 02 November 2024 lebih tinggi dibandingkan pada tanggal 01 dan 03 November 2024. Selama 3 hari pengukuran menunjukkan bahwa kecepatan angin tertinggi terjadi pada siang dan sore hari.

Tabel 2. Data hasil pengukuran kecepatan angin di Danau Limboto (m/s).

Posisi	Waktu Pengukuran (2024)								
	01 November			02 November			03 November		
	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)
1	1,39	3,44	2,38	2,31	4,06	3,96	0,92	2,04	2,75
2	2,16	3,77	2,79	2,19	3,44	3,70	0,28	2,98	2,14
3	2,88	4,04	3,48	2,81	4,04	3,48	0,50	3,65	2,04
4	1,67	2,76	2,88	1,78	4,06	5,22	1,35	2,79	2,65
5	1,00	1,96	2,50	0,00	3,87	5,88	0,00	0,35	2,74
6	0,42	3,29	2,72	0,78	4,42	4,06	0,00	4,06	1,67
7	0,00	1,89	1,35	1,39	2,72	4,01	0,00	3,92	2,52
Rerata	1,36	3,02	2,58	1,61	3,80	4,33	0,44	2,83	2,36
Rerata Harian		2,32			3,25			1,88	

Data pengukuran arah angin selama 3 hari di Danau Limboto ditunjukkan oleh Tabel 3. Berdasarkan nilai rata-rata, arah angin dominan ke tenggara (antara 90-180°) dibandingkan arah barat daya (antara 180-270°) dan barat laut (antara 270-360°). Sementara untuk rata-rata harian, masing-masing hari pengukuran memiliki arah angin yang berbeda-beda. Selama 3 hari pengukuran menunjukkan bahwa arah angin memiliki pola sirkular yang searah jarum jam.

Tabel 3. Data hasil pengukuran arah angin di Danau Limboto (derajat dari utara).

Posisi	Waktu Pengukuran (2024)								
	01 November			02 November			03 November		
	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)
1	291	138	154	151	81	191	323	5	236
2	299	138	132	111	152	190	321	348	267
3	291	146	104	105	99	173	301	326	283
4	274	115	147	130	127	140	2	312	341
5	330	126	162	-	159	125	-	128	339
6	257	113	156	156	143	300	-	18	352
7	-	108	141	166	133	157	-	2	353
Rerata	290	126	142	136	128	182	237	163	310
Rerata Harian		186			149			237	

Keterangan: tidak ada data (-)

Fluks momentum dari angin pada perairan Danau Limboto yang ditunjukkan oleh Tabel 4 merupakan hasil kalkulasi Persamaan 1. Hasil kalkulasi fluks momentum menunjukkan rentang nilai 0-0,053 N/m². Fluks momentum dari angin pada perairan Danau Limboto menunjukkan pola yang tidak stabil dalam artian besar yang tidak konstan dan tidak berlangsung kontinu. Hal ini disebabkan oleh kecepatan angin yang bervariasi dan tidak berlangsung lama.

Tabel 4. Hasil analisis fluks momentum dari angin di Danau Limboto (N/m^2).

Posisi	Waktu (2024)								
	01 November			02 November			03 November		
	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)
1	0,011	0,018	0,009	0,008	0,025	0,024	0,005	0,006	0,012
2	0,007	0,022	0,012	0,007	0,018	0,021	0,001	0,014	0,007
3	0,013	0,025	0,019	0,012	0,025	0,019	0,003	0,020	0,006
4	0,016	0,012	0,013	0,019	0,025	0,042	0,011	0,012	0,011
5	0,006	0,006	0,010	0,000	0,023	0,053	0,000	0,002	0,012
6	0,002	0,017	0,011	0,008	0,030	0,025	0,000	0,025	0,016
7	0,000	0,006	0,011	0,011	0,011	0,025	0,000	0,024	0,010
Rerata	0,008	0,015	0,012	0,009	0,022	0,030	0,003	0,015	0,010
Rerata Harian		0,012			0,020			0,009	

Validasi silang *leave one out* dari interpolasi *Inverse Distance Weighted* (IDW) menghasilkan data prediksi dari fluks momentum oleh angin. Selisih data prediksi dan hasil kalkulasi Persamaan 1 ditunjukkan oleh Tabel 5. Nilai positif menunjukkan bahwa prediksi yang dihasilkan lebih rendah dari nilai sebenarnya, sementara nilai negatif menunjukkan sebaliknya. Nilai yang ditebalkan merupakan nilai penyimpangan yang dapat ditolerir dalam penelitian ini. Hasil validasi silang interpolasi fluks momentum dari angin menunjukkan nilai RMSE sebesar 0,003-0,01 N/m^2 . Jika dibandingkan dengan data hasil kalkulasi pada Tabel 4, maka nilai RMSE menunjukkan 19% dari rentang data yang berarti model interpolasi belum akurat. Hal ini disebabkan karena jumlah titik pengukuran yang sedikit.

Tabel 5. Selisih data prediksi IDW dan data hasil kalkulasi fluks momentum dari angin (N/m^2).

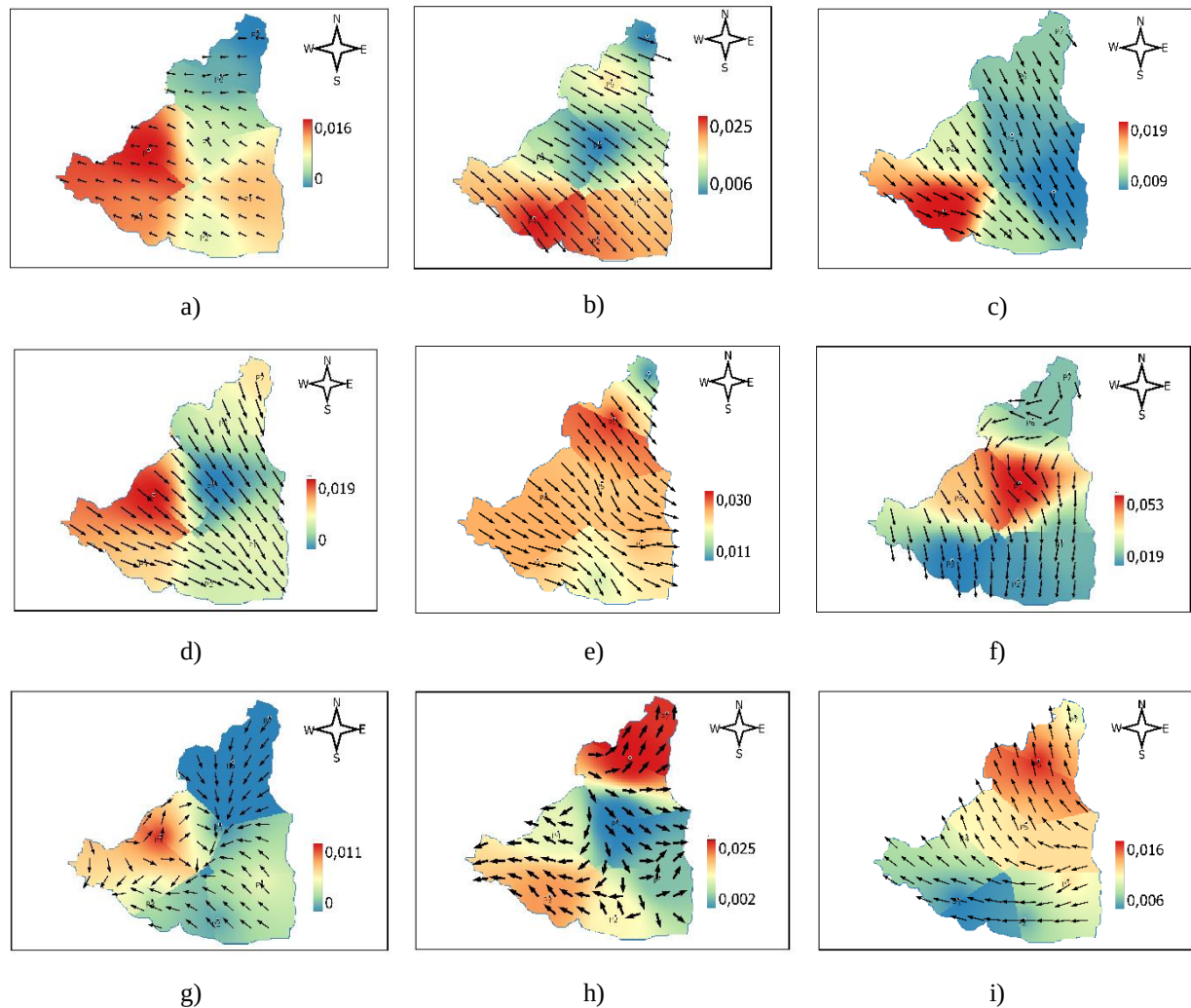
Posisi	Waktu (2024)								
	01 November			02 November			03 November		
	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)	Pagi (07:00- 08:00)	Siang (13:00- 14:00)	Sore (16:00- 17:00)
1	0,004	0,003	-0,002	0,004	0,005	-0,009	0,004	-0,004	0,003
2	-0,005	0,001	-0,001	-0,003	-0,007	-0,001	-0,003	0,003	-0,002
3	0,001	0,008	0,006	-0,001	0,003	-0,013	-0,003	0,007	-0,003
4	0,007	-0,003	-0,001	0,014	0,001	0,004	0,010	0,002	0,002
5	-0,004	-0,008	-0,002	-0,014	-0,004	0,019	-0,006	-0,016	-0,001
6	-0,001	0,011	0,000	0,002	0,013	-0,012	0,000	0,010	0,005
7	-0,003	-0,008	0,000	0,004	-0,016	-0,004	0,000	0,001	-0,005

Distribusi fluks momentum dari angin selama 3 hari ditunjukkan oleh Gambar 2. Fluks momentum tertinggi yang muncul pada Gambar 2f menunjukkan bahwa kecepatan angin terukur pada waktu tersebut lebih tinggi dibandingkan waktu yang lain. Hal ini disebabkan karena nilai dari fluks momentum yang semakin besar seiring dengan makin cepatnya angin. Sementara itu, pola arah angin terukur menunjukkan bahwa angin permukaan terjadi pada wilayah Danau Limboto, dimana angin permukaan adalah angin horizontal yang bergerak dari dataran ke dataran lainnya [18].

3.2 Pembahasan

Secara hidrodinamika, danau dapat dibagi menjadi dua yaitu danau dengan angin sebagai pendorong utama dan danau dengan sungai sebagai pendorong utama [19]. Dalam penelitian ini telah diketahui seberapa besar pengaruh angin pada perairan Danau Limboto yang dinyatakan dalam fluks momentum. Di Danau Taihu, kecepatan angin rata-rata 2,0-2,4 m/s merupakan penggerak utama air danau meskipun danau tersebut memiliki 22 aliran sungai utama yang masuk [20]. Kecepatan angin pada Danau Taihu tersebut akan memberikan fluks momentum sebesar 0,006-0,009 N/m^2 . Penelitian lain menunjukkan bahwa sungai

yang masuk pada Danau Limboto memiliki hilir yang rata dan kecepatan air 10,7 cm/s yang tergolong lambat [21]. Hal ini menunjukkan bahwa angin merupakan sumber utama yang menggerakkan air Danau Limboto. Adapun kecepatan arus dan tinggi gelombang yang disebabkan oleh angin pada perairan Danau Limboto tidak diukur pada penelitian ini.



Gambar 2. Distribusi fluks momentum dari angin pada perairan Danau Limboto selama: (a-c) Pagi, siang, dan sore tanggal 1 November 2024; (d-f) Pagi, siang, dan sore tanggal 02 November 2024; (g-i) Pagi, siang, dan sore tanggal 3 November 2024.

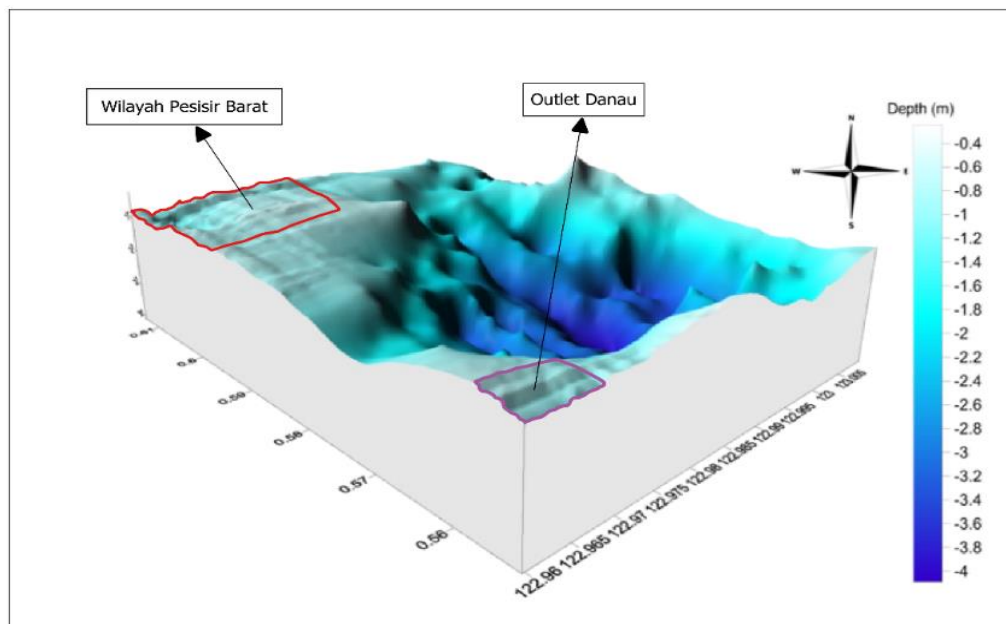
Analisis fluks momentum dari angin dapat menentukan zona erosi dan endapan di danau. Perubahan dari parameter tersebut dapat mengubah laju aliran air dan pola transpor sedimen [7]. Fluks momentum yang ditransfer oleh angin akan membentuk arus dan gelombang, dimana arus bergerak searah dengan arah angin. Arus dan gelombang ini akan meneruskan transfer momentum ke sedimen sehingga sedimen bergerak. Gerakan dari sedimen tersebut akan lebih besar seiring gerak air yang terakumulasi ke arah angin bergerak [22]. Sehingga wilayah dimana gerak sedimen menjadi intensif menjadi zona erosi atau zona tergerusnya sedimen dan sebaliknya menjadi zona endapan yang akan membuat pendangkalan.

Berdasarkan analisis fluks momentum dari angin dan arah angin, wilayah pesisir Danau Limboto menjadi zona erosi dan pengendapan pada penelitian ini. Zona erosi dan pengendapan merupakan konsekuensi dari distribusi spasial fluks momentum angin dan arahnya. Wilayah dengan fluks momentum yang tinggi ataupun akumulasi arus akibat arah angin menjadi zona erosi, dan pada kondisi sebaliknya menjadi zona pengendapan. Hal unik ditunjukkan oleh Gambar 2f dimana zona erosi muncul di wilayah pertengahan Danau Limboto. Peristiwa tersebut disebabkan oleh nilai fluks momentum yang tinggi dan

arah angin yang masuk ke wilayah tersebut. Meskipun demikian, masih diperlukan data lain yang mendukung temuan pada penelitian ini.

Aliran sungai yang masuk ke perairan Danau Limboto membawa sedimen dalam jumlah besar. Contohnya Sungai Alo, Rambongan, Puhu, Marisa, Alopohu, dan Biyonga membawa sedimen ke pesisir barat perairan Danau Limboto [23]. Ketika aliran sungai masuk ke perairan danau, aliran tersebut membawa sedimen dan fluks momentum. Jika fluks momentum dari aliran air sungai berlawanan arah dengan fluks momentum oleh angin, maka sedimen yang dibawa akan tertahan dan diendapkan ke dasar danau [8, 17, 24]. Sebaliknya jika fluks momentum dari aliran sungai searah dengan fluks momentum dari angin, maka sedimen yang dibawa akan disebarakan ke badan air danau.

Berdasarkan hasil analisis batimetri pada penelitian sebelumnya [2] yang disajikan pada Gambar 3, dapat diketahui bahwa aliran sungai yang masuk ke Danau Limboto dari wilayah barat cenderung berlawanan dengan fluks momentum dari angin sehingga muncul akumulasi sedimen di pesisir barat perairan danau. Kondisi ini menyebabkan akumulasi sedimen yang signifikan di wilayah bagian Barat Danau Limboto. Fluks momentum dari angin yang mengarah ke barat akan menciptakan zona pengendapan di pesisir timur, hal ini disebabkan karena wilayah pesisir timur akan memiliki fluks momentum yang minimum sehingga gerak air juga minimum. Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan [2] yang menunjukkan adanya pengendapan sedimen yang tinggi di wilayah barat sebagai muara Sungai Alopohu, dan juga di sekitar *outlet* danau yaitu Sungai Tapodu. Hal tersebut mengindikasikan bahwa proses interaksi antara fluks momentum angin dan aliran sungai berperan penting dalam membentuk pola pengendapan dan mempercepat proses pendangkalan di kedua zona tersebut.



Gambar 3. Peta Batimetri Danau Limboto (dimodifikasi dari [2]).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, secara hidrodinamika Danau Limboto dikategorikan sebagai danau dengan angin sebagai penggerak utama perairannya. Fluks momentum di Danau Limboto, yaitu besaran gaya per satuan luas yang ditransfer angin ke permukaan air danau sehingga menggerakkan massa air, memiliki rentang nilai 0-0,05 N/m². Distribusi fluks momentum menunjukkan pola spasial yang tidak merata, dengan intensitas tertinggi terjadi pada siang dan sore hari ketika kecepatan angin meningkat hingga lebih dari 4 m/s. Kondisi ini menghasilkan energi gerak maksimum yang mendorong terbentuknya arus dan gelombang di perairan danau. Pola tersebut menciptakan zona erosi pada wilayah dengan energi gerak tinggi dan zona pengendapan pada wilayah dengan energi minimum, terutama di pesisir danau. Interaksi antara fluks momentum angin dan aliran sungai yang masuk menyebabkan akumulasi sedimen di pesisir barat serta di sekitar outlet, yang berkontribusi terhadap percepatan proses pendangkalan Danau Limboto.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada nelayan Danau Limboto serta staf BMKG Stasiun Meteorologi dan Stasiun Klimatologi Provinsi Gorontalo yang telah membantu dan berkontribusi dalam penelitian ini.

Pustaka

- [1] Hasim H, 2018 Perspektif ekologi politik kebijakan pengelolaan Danau Limboto *Publik (Jurnal Ilmu Adm.* **7**, 1 p. 44-52.
- [2] Yunginger R *et al.*, 2024 Morphometric characteristics of Lake Limboto as critical lake in Gorontalo Province, Indonesia *J. Nat.* **24**, 2 p. 99–106.
- [3] Yunginger R *et al.*, 2018 Lithogenic and anthropogenic components in surface sediments from lake limboto as shown by magnetic mineral characteristics, trace metals, and REE geochemistry *Geosci.* **8**, 4 p. 1–11.
- [4] Setiawan F Subehi L and Matsushita B, 2021 Long-term change of water clarity in Lake Limboto derived from Landsat data *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **789**, 1 p. 1-9.
- [5] Julzarika A and Dewi E K, 2019 Perubahan kondisi Danau Limboto yang terdeteksi dengan teknologi penginderaan jauh *J. Segara* **14**, 3 p. 179-187.
- [6] Kebedew M G Tilahun S A Zimale F A Belete M A Wosenie M D and Steenhuis T S, 2023 Relating lake circulation patterns to sediment, nutrient, and water Hyacinth distribution in a shallow tropical highland lake *Hydrology* **10**, 9 p. 181-196.
- [7] Colosimo I de Vet P L M van Maren D S Reniers A J H M Winterwerp J C and van Prooijen B C, 2020 The impact of wind on flow and sediment transport over intertidal flats *J. Mar. Sci. Eng.* **8**, 11 p. 1–26.
- [8] Piton V *et al.*, 2022 Tracing unconfined nearfield spreading of a river plume interflow in a large lake (Lake Geneva): hydrodynamics, suspended particulate matter, and associated fluxes *Front. Water* **4**, 943242 p. 1–19.
- [9] Liu S Ye Q Wu S and Stive M J F, 2018 Horizontal circulation patterns in a large shallow lake: Taihu Lake, China *Water (Switzerland)* **10**, 6 p. 792-818.
- [10] Putra hatta M Thaha A and Dharmawan A, 2018 Pengaruh kondisi hidrodinamika Pantai Tarawang terhadap penentu tipe pengaman pantai *J. Keteknikan dan Sains (JUTEKS)–LPPM UNHAS* **1**, 2 p. 17–21.
- [11] Abbasi A Ohene Annor F and van de Giesen N, 2017 A framework to simulate small shallow inland water bodies in semi-arid regions *Adv. Water Resour.* **110**, 6 p. 77–96.
- [12] Mao M and Xia M, 2020 Monthly and episodic dynamics of summer circulation in Lake Michigan *J. Geophys. Res. Ocean.* **125**, 6 p. 1–28.
- [13] Woodward B L Marti C L Imberger J Hipsey M R and Oldham C E, 2017 Wind and buoyancy driven horizontal exchange in shallow embayments of a tropical reservoir: Lake Argyle, Western Australia *Limnol. Oceanogr.* **62**, 4 p. 1636–1657.
- [14] Lükő G Torma P Weidinger T and Krámer T, 2022 Air-lake momentum and heat exchange in very young waves using energy and water budget closure *J. Geophys. Res. Atmos.* **127**, 12 p. 1-18.
- [15] Guseva S *et al.*, 2023 Bulk transfer coefficients estimated from eddy-covariance measurements over lakes and reservoirs *J. Geophys. Res. Atmos.* **128**, 2 p. 1-20.
- [16] Hondzo M You J Taylor J Bartlet G and Voller V R, 2022 Measurement and scaling of lake surface skin temperatures *Geophys. Res. Lett.* **49**, 6 p. 1–8.
- [17] Zăinescu F Anthony E and Vespremeanu-Stroe A, 2021 River jets versus wave-driven longshore currents at river mouths *Front. Mar. Sci.* **8**, 708258 p. 1–19.
- [18] Mortarini L Stefanello M Degrazia G Roberti D Trini Castelli S and Anfossi D, 2016 Characterization of wind meandering in low-wind-speed conditions *Boundary-Layer Meteorol.* **161**, 1 p. 165–182.
- [19] Nutz A Schuster M Ghienne J F Roquin C and Bouchette F, 2018 Wind-driven waterbodies: a new category of lake within an alternative sedimentologically-based lake classification *J. Paleolimnol.* **59**, 2 p. 189–199.
- [20] Xue Z Zhu W Cheng L Lv Y and Feng G, 2024 Wind-driven hydrodynamic characteristics of Lake Taihu, a large shallow lake in China *Environ. Sci. Pollut. Res.* **31**, 17 p. 26123–26140.

- [21] Putra S S Hassan C Djudi and Suryatmojo H, 2013 Reservoir saboworks solutions in Limboto Lake sedimentations, Northern Sulawesi, Indonesia *Procedia Environ. Sci.* **17** p. 230–239.
- [22] Swanson T Mohrig D and Kocurek G, 2016 Aeolian dune sediment flux variability over an annual cycle of wind *Sedimentology* **63**, 6 p. 1753–1764.
- [23] Kimijima S Sakakibara M Amin A K M A Nagai M and Arifin Y I, 2020 Mechanism of the rapid shrinkage of limboto lake in Gorontalo, Indonesia *Sustain.* **12**, 22 p. 1–14.
- [24] Zăinescu F *et al.*, 2023 The role of wind-wave related processes in redistributing river-derived terrigenous sediments in Lake Turkana: A modelling study *J. Great Lakes Res.* **49**, 2 p. 368–386.