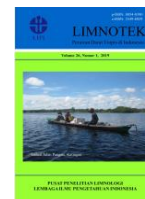




LIMNOTEK

Perairan Darat Tropis di Indonesia

p-ISSN: 0854-8390 e-ISSN: 2549-8029



Pengaruh *Wind Stress* terhadap Stratifikasi Suhu Harian Kolom Air Danau Maninjau

Taofik Jasalesmana, Fifia Zulti, Endra Triwisesa, Arianto B. Santoso, M. Fakhruddin

Pusat Penelitian Limnologi, Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI)

Email: t.jasalesmana@limnologi.lipi.go.id

Diajukan 10 September 2018. Ditelaah 23 April 2019. Disetujui 20 Juni 2019.

Abstrak

Stratifikasi suhu merupakan salah satu fenomena fisika yang terjadi di kolom air dan berperan penting dalam pengaturan proses kimia dan biologi di kolom air. Keadaan ini selanjutnya akan memengaruhi kondisi ekosistem danau. Kekuatan stratifikasi suhu sangat bergantung pada perubahan intensitas cahaya matahari dan kecepatan angin. Berkaitan dengan hal tersebut, maka tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perubahan stratifikasi suhu harian berdasarkan perubahan kecepatan angin spesifik yang dinyatakan oleh gaya tekan angin (*wind stress*) di Danau Maninjau, Sumatra Barat. Pengambilan data dilakukan selama tujuh hari (13–19 Februari 2017). Profil suhu kolom air diukur oleh rangkaian termistor yang dipasang pada alat e-most (*Environmental Monitoring and Warning Systems*) sampai kedalaman 60 m. Data kecepatan angin dan intensitas cahaya matahari diambil dari stasiun pengamatan cuaca Loka Alih Teknologi Penyehatan Danau (LATPD) Maninjau. Indeks stratifikasi, *wind stress*, dan energi kinetik turbulen (TKE) dihitung untuk mengetahui hubungan antara kekuatan stratifikasi dan *wind stress*. Indeks stratifikasi digunakan untuk mengarakterisasi kekuatan stratifikasi suhu, sedangkan *wind stress* digunakan untuk memprediksi energi kinetik turbulen yang secara teori akan menurunkan stratifikasi. Hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat gradien suhu kolom air yang ditandai oleh kemunculan lapisan-lapisan isothermal mulai dari siang hari sampai menjelang malam dengan periode harian. Gradien suhu mulai menurun dari malam sampai pagi hari, sehingga suhu kolom air menjadi lebih homogen dari permukaan sampai ke kedalaman 60 m. Penelitian ini memperlihatkan penurunan indeks stratifikasi suhu harian kolom air mencapai $325,070 \text{ Jm}^{-2}$ pada saat *wind stress* bernilai tinggi, yaitu sebesar $0,045 \text{ Nm}^{-2}$. Indeks stratifikasi meningkat menjadi $562,790 \text{ Jm}^{-2}$ saat *wind stress* mengalami penurunan sampai dengan $0,001 \text{ Nm}^{-2}$, sehingga terdapat hubungan terbalik antara *wind stress* dan indeks stratifikasi dengan koefisien korelasi sebesar $-0,96$. Hal ini menunjukkan bahwa *wind stress* berpengaruh besar terhadap proses pembentukan stratifikasi kolom air di Danau Maninjau.

Kata kunci: Danau Maninjau, stratifikasi suhu harian, indeks stratifikasi, energi kinetik turbulen

Abstract

Wind Stress Effect on the Daily Thermal Stratification of Lake Maninjau Water Column. Thermal stratification is one of physical events that occurs in the water column that highly contributes to regulate chemical and biological processes in the water. This event will further affect the condition of the lake ecosystem. The strength of thermal stratification is very dependent on changes in the

intensity of solar radiation and wind speed. In this regard, the purpose of this study was to determine the changes in daily thermal stratification based on changes in specific wind speeds expressed by wind stress in Lake Maninjau, West Sumatra. Data collection was conducted for seven days (February 13–19, 2017). The temperature profiles of the water column were measured by a thermistor chain mounted on an *e-most* (Environmental Monitoring and Warning Systems) device to a depth of 60 m. Wind speed and solar radiation data were collected from the weather observation station of Loka Alih Teknologi Penyehatan Danau (LATPD) Maninjau. The stratification index, wind stress, and turbulent kinetic energy (TKE) were calculated to determine the relationship between stratification strength and wind stress. The stratification index is used to characterize the strength of thermal stratification, while wind stress is used to predict turbulent kinetic energy which in theory will reduce stratification. The results of the analysis showed that there was a temperature gradient of the water column which was characterized by the appearance of isothermal layers from daytime to late evening with the daily period. The temperature gradient started to decline from night to morning, so the temperature of the water column became more homogeneous from the surface to the bottom. This study showed a decrease in the stratification index of the daily temperature of the water column to 325.070 Jm^{-2} during the peak of wind stress reaching 0.045 Nm^{-2} . The stratification index increased to 562.790 Jm^{-2} when wind stress decreased to 0.001 Nm^{-2} . So, there is an inverse relationship between wind stress and stratification index with a correlation coefficient of -0.96 . This shows that wind stress has a major effect on the process of forming water column stratification in Lake Maninjau.

Keywords: Lake Maninjau, daily stratification, stratification index, turbulent kinetic energy

Pendahuluan

Danau Maninjau termasuk danau eutrofik dengan kandungan hara dan bahan organik yang tinggi. Tercatat pada tahun 2009 dan 2011 kandungan *total organic matter* (TOM) di Danau Maninjau berkisar $15,9\text{--}7,8 \text{ mg/L}$ (Lukman *et al.*, 2015). Kandungan hara dan bahan organik yang tinggi di Danau Maninjau lebih dominan disebabkan oleh aktivitas budi daya ikan dengan metode keramba jaring apung (KJA) yang sudah berlangsung sejak tahun 1991 (Nontji, 2016). Keadaan ini akan meningkatkan aktivitas organisme danau dan proses biogeokimia, baik di badan air maupun di dasar danau yang akan memengaruhi kondisi ekosistem danau secara keseluruhan. Proses-proses biogeokimia tersebut sangat dipengaruhi oleh proses fisika, terutama stratifikasi suhu yang dipengaruhi oleh kondisi cuaca. Faktor cuaca yang sangat memengaruhi kekuatan stratifikasi adalah energi panas cahaya matahari dan energi kinetik angin. Stratifikasi akan terbentuk pada saat energi panas lebih dominan dibandingkan dengan energi kinetik angin (Tuan *et al.*, 2009; Goldman & Horn, 1983).

Stratifikasi merupakan salah satu indikator kestabilan danau. Semakin kuat stratifikasi, maka semakin stabil kolom air suatu danau. Kestabilan dianggap penting karena bisa menjadi penggerak utama

dinamika biota air seperti fitoplankton (Yang *et al.*, 2016). Kekuatan stratifikasi akan melemah ketika transfer energi panas dari cahaya matahari ke badan air memiliki intensitas rendah (Magee & Wu, 2017). Jika kondisi ini berlanjut, maka badan air akan berada pada kondisi isotermis, sehingga memudahkan proses difusi vertikal molekul-molekul di badan air (Giles *et al.*, 2015). Selain variasi energi panas yang langsung diterima oleh permukaan air, stratifikasi juga dipengaruhi oleh suhu udara. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan suhu udara mengakibatkan peningkatan suhu lapisan epilimnion (Magee & Wu, 2017), peningkatan kekuatan stratifikasi (Rempfer *et al.*, 2010) dan periode stratifikasi (Robertson & Ragotzkie, 1990), serta mengubah kedalaman lapisan termoklin (Schindler *et al.*, 1990). Stratifikasi akan menghilang pada saat energi panas matahari tidak cukup besar untuk membentuk stratifikasi, sehingga energi kinetik turbulen di dalam air yang dihasilkan oleh energi kinetik angin akan menggerakkan air yang lebih hangat dari lapisan atas menuju ke lapisan bawah (Tuan *et al.*, 2009). Sebaliknya, jika energi kinetik angin menurun, kekuatan stratifikasi dan suhu lapisan epilimnion akan meningkat (Stefan *et al.*, 1996). Perubahan stratifikasi akibat perubahan energi panas dan kecepatan angin akan mengubah pembebanan nutrisi internal dan produktivitas danau

(Verburg & Antenucci, 2010). Karena pengaruh stratifikasi suhu terhadap kelangsungan ekosistem danau sangat besar, maka penelitian ini difokuskan untuk mengkaji pengaruh faktor meteorologi (intensitas cahaya matahari dan tekanan angin) terhadap stratifikasi suhu air danau di Danau Maninjau.

Bahan dan Metode

Lokasi dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Danau Maninjau, Kabupaten Agam, Provinsi Sumatera Barat, tepatnya di stasiun Koto Malintang (0°16,373'S, 100°9,849'E) dan stasiun pengamatan cuaca Loka Alih Teknologi Penyehatan Danau (LATPD) Maninjau (0°16'1,8"S, 100°12'57,8"E). Jarak kedua stasiun tersebut adalah 5,74 km. Suhu air dari setiap kedalaman direkam oleh rangkaian sensor sampai di kedalaman 62 m pada alat *environmental monitoring and warning system* (e-most) yang terpasang di stasiun Koto Malintang. Parameter cuaca (intensitas cahaya matahari dan kecepatan angin) diambil dari stasiun pengamatan cuaca LATPD Maninjau. Interval perekaman data dilakukan pada orde menit selama 7 hari dari tanggal 13 hingga 19 Februari 2017.

Pengukuran dan Analisis Data

Data suhu setiap lapisan air diukur dengan sensor suhu tipe DS18B20 yang dipasang di kedalaman 0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 18, 20, 22, 28, 30, 40, 42, 50, 60, 62 m. Sensor-sensor merekam suhu setiap 15 menit. Intensitas cahaya dan kecepatan angin masing-masing diukur dengan sensor HOBO u30 setiap 5 menit di ketinggian 10 m.

Kerapatan air setiap lapisan air tidak diukur langsung, tetapi dihitung dari suhu lapisan air yang terekam oleh sensor. Kerapatan air dihitung dengan persamaan:

$$\rho_T = 999,842594 + 6,793952 \times 10^{-2} T - 9,095290 \times 10^{-3} T^2 + 1,001685 \times 10^{-4} T^3 - 1,120083 \times 10^{-6} T^4 + 6,536332 \times 10^{-9} T^5$$

Analisis Data

Profil struktur vertikal suhu diperoleh dengan melakukan interpolasi suhu untuk

mendapatkan data pada setiap rentang kedalaman 0,2 m dengan periode perekaman data satu menit selama waktu pengamatan. Suhu hasil interpolasi kemudian difilter untuk mengisolasi data pada rentang suhu rata-rata kolom air. *Sensible heat* (H) dihitung untuk melihat fluks energi permukaan danau yang akan menentukan kandungan energi panas di kolom air (Verburg & Antenucci, 2010; Lofgren & Zhu, 2000). Kekuatan stratifikasi badan air di suatu stasiun dihitung dengan persamaan indeks stratifikasi (SI) yang mengacu pada laporan Ladd & Stabeno (2012). Sebaliknya, besar tegangan angin terhadap permukaan air dihitung dari persamaan *wind stress* (τ) dan besar energi kinetik di dalam air yang dibangkitkan oleh tegangan angin dihitung dengan menggunakan persamaan *turbulent kinetic energy* atau TKE (Zhang, 2005). Masing-masing persamaan dituliskan sebagai berikut:

$$SI = - \int_{-h}^0 (\rho - \langle \rho \rangle) g z dz$$

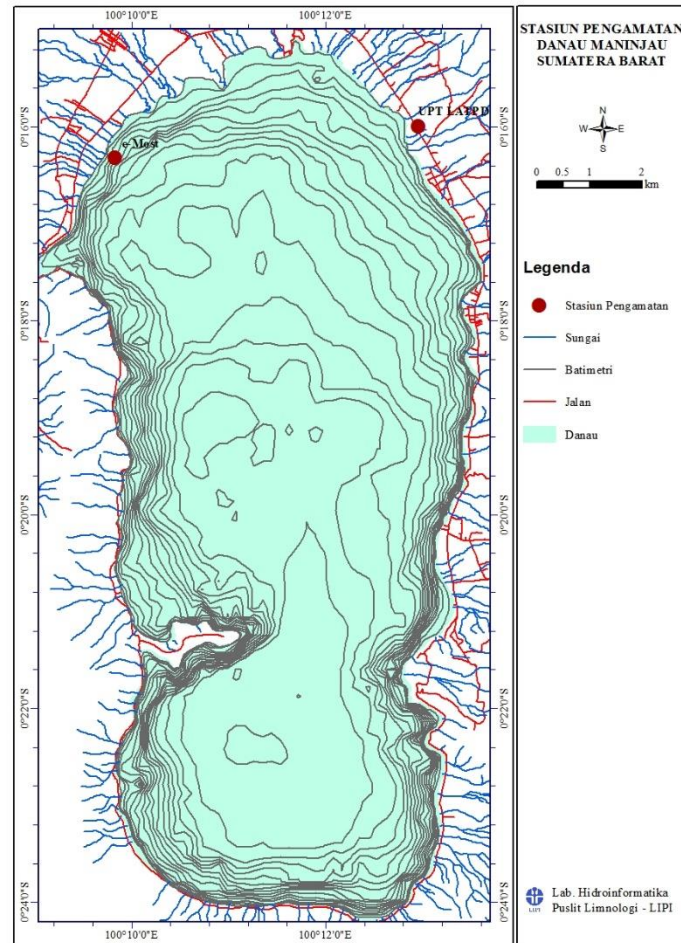
$$\tau = \rho_a C_{10} v_{10}$$

$$TKE = \frac{1.8(\tau/\rho)^2}{\kappa h}$$

$$H = C_p C_H \rho_a U_z (T_0 - T)$$

Keterangan:

- ρ : Massa jenis air setiap lapisan kedalaman (kg/m^3)
- $\langle \rho \rangle$: Massa jenis air rata-rata setiap lapisan kedalaman (kg/m^3)
- g : Percepatan gravitasi ($9,8 \text{ m/s}^2$)
- ρ_{air} : Massa jenis udara (kg/m^3)
- C_{10} : *drag coefficient*
- v_{10} : Kecepatan angin di ketinggian 10 m (m/s)
- κ : von Karman *constant* = 0,4 (Fairall et al., 1996)
- h : kedalaman (m)
- C_p : Kalor jenis udara ($1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$)
- C_H : Koefisien transfer
- U_z : Kecepatan angin
- $(T_0 - T)$: Selisih suhu permukaan air dengan suhu udara



Gambar 1. Lokasi pengambilan data suhu kolom air danau di Koto Malintang dan parameter cuaca di stasiun pengamatan cuaca Loka Alih Teknologi Penyehatan Danau (LATPD) Maninjau

Metode penghitungan koefisien transfer drag mengacu pada makalah Fairall *et al.*, 1996 dan dihitung dengan menggunakan bahasa pemrograman. Beberapa tampilan grafik dan gambar diolah dengan bahasa program R (*Package* 'rLakeAnalyzer'; Winslow *et al.*, 2018).

Hasil

Intensitas Cahaya Matahari dan Kecepatan Angin

Intensitas cahaya matahari dan kecepatan angin harian diperlihatkan dalam Gambar 2. Intensitas cahaya matahari mencapai nilai maksimum antara pukul 12.00 – dan 13.00 WIB yang konsisten selama pengamatan, sedangkan kecepatan angin pada awal pengamatan sudah mulai tinggi dari pagi hari sekitar pukul 9.00 WIB, namun pada akhir pengamatan kecepatan angin mulai tinggi pada

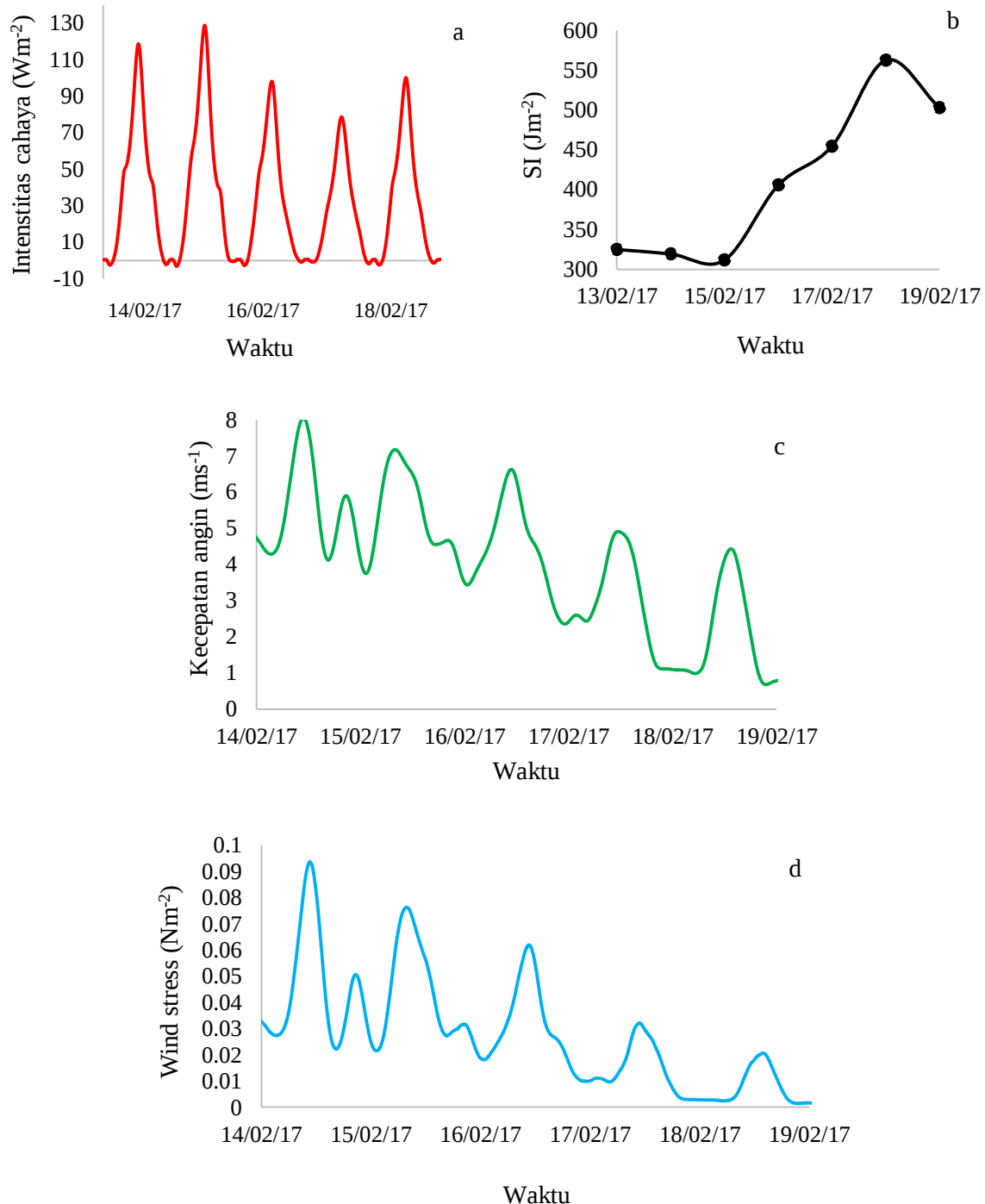
siang hari sekitar pukul 13.00 dengan intensitas maksimum lebih rendah dibandingkan pada awal pengamatan. Intensitas cahaya matahari rata-rata harian dan kecepatan angin masing-masing sebesar $28,4 \text{ Watt.m}^{-2}$ dan $3,5 \text{ ms}^{-1}$. Hembusan angin di daerah ini lebih kencang dibandingkan dengan daerah terdekatnya yaitu Padang Pariaman. Stasiun Klimatologi Padang Pariaman mengukur kecepatan angin pada saat yang sama sebesar $1,9 \text{ ms}^{-1}$. Gambar 2a dan 2c juga menunjukkan bahwa baik intensitas cahaya matahari maupun kecepatan angin mengalami penurunan selama pengamatan yang masing-masing sebesar $1,01 \text{ Watt.m}^{-2}.\text{hari}^{-1}$ dan $6.16 \text{ ms}^{-1}.\text{hari}^{-1}$.

Wind Stress

Angin yang bertiup di atas permukaan danau akan membangkitkan tekanan terhadap permukaan air tersebut (*wind stress*, τ) yang selanjutnya akan membangkitkan energi kine-

tik turbulen di bawah permukaan air. Gambar 2.d menunjukkan bahwa pada awal pengamatan *wind stress* mencapai $0,454 \text{ Nm}^{-2}$, kemudian pada akhir pengamatan menurun

drastis mencapai $0,0014 \text{ Nm}^{-2}$. Penurunan nilai *wind stress* bersesuaian dengan penurunan kecepatan angin sebagai sumber energi pembangkit *wind stress* di permukaan danau.



Gambar 2. a. Intensitas cahaya matahari rata-rata lebih tinggi pada awal pengamatan; b. Indeks stratifikasi meningkat seiring dengan peningkatan periode pengamatan dan sedikit mengalami penurunan pada akhir periode pengamatan; c. Kecepatan angin pada awal pengamatan tinggi, kemudian mengalami penurunan secara drastis sepanjang pengamatan; d. Fluktuasi *wind stress* setiap menit di Danau Maninjau pada tanggal 13–19 Februari 2017

Indeks Stratifikasi (SI)

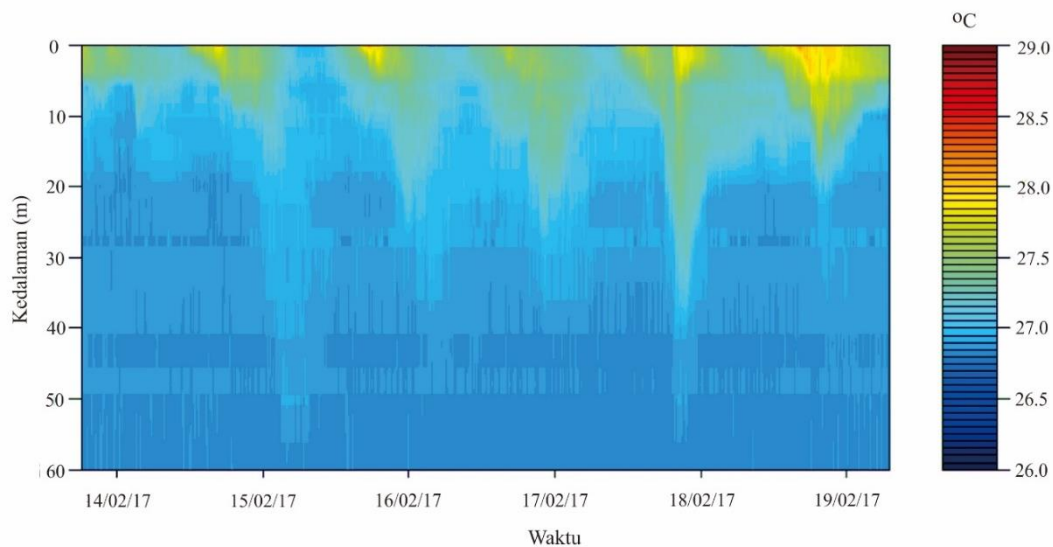
Indeks stratifikasi merupakan energi potensial yang dimiliki kolom air untuk menghambat proses pencampuran. Besaran ini juga digunakan untuk menunjukkan kekuatan stratifikasi. Pada hari pertama, kolom air memiliki nilai SI sebesar $325,07 \text{ J.m}^{-2}$ dan meningkat dengan kenaikan rata-rata sebesar $41 \text{ J.m}^{-2}.\text{hari}^{-1}$, sampai pada tanggal 18 Feb mencapai $562,79 \text{ J.m}^{-2}$ dan pada hari terakhir turun sedikit menjadi $503,07 \text{ J.m}^{-2}$.

Profil Vertikal Suhu Kolom Air

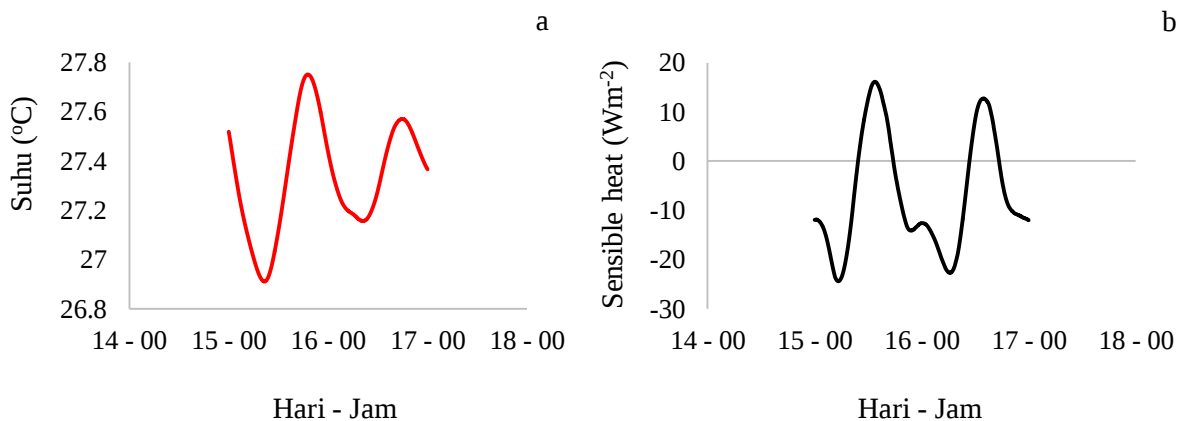
Gambar 3 menunjukkan perubahan profil vertikal suhu kolom air Danau Maninjau selama tujuh hari pengamatan. Perbedaan warna pada gambar menunjukkan pembentukan lapisan-lapisan air dengan suhu

yang berbeda. Terdapat siklus kenaikan dan penurunan suhu lapisan air bagian atas dalam satu hari dan keadaan ini berulang untuk hari berikutnya. Siklus kenaikan dan penurunan suhu air terlihat jelas pada tanggal 15–16 Februari 2017 dalam Gambar 4.a. Memasuki pukul 01.00 WIB, suhu menurun drastis dan bertahan sampai mendekati pukul 08.00 WIB, kemudian seiring dengan kemunculan matahari, suhu air mulai naik kembali.

Rata-rata suhu permukaan air mencapai maksimum pada sore hari sampai memasuki malam sekitar pukul 20.00 WIB, kemudian secara bertahap mulai menurun sampai menjelang tengah malam, dan mulai turun drastis sekitar pukul 01.00 WIB seperti pada hari sebelumnya.



Gambar 3. Profil struktur vertikal suhu kolom air Danau Maninjau tanggal 14–19 Februari 2017



Gambar 4. a. Fluktuasi suhu permukaan air. b. Fluktuasi *sensible heat* selama 48 jam pada tanggal 15–16 Februari 2017

Pembahasan

Kenaikan dan penurunan suhu kolom air danau tidak lepas dari proses transfer panas antara permukaan danau dan udara yang sangat berpengaruh pada distribusi vertikal suhu di kolom air. Penurunan suhu di kolom air disebabkan oleh pelepasan energi panas dari permukaan air ke udara. Pelepasan energi panas tersebut ditandai oleh *sensible heat* yang bernilai negatif pada waktu yang sama (Gambar 4b). Sebaliknya, kenaikan suhu permukaan air disebabkan penyerapan energi panas oleh permukaan air yang ditandai dengan *sensible heat* bernilai positif.

Pelepasan energi panas ini menyebabkan suhu lapisan air bagian atas turun sampai menjelang pagi. Nilai suhu air permukaan pada waktu siang dan malam tidak selalu sama pada setiap hari pengamatan. Hal ini terlihat dari suhu maksimum pada tanggal 15 Feb yang lebih tinggi dibandingkan tanggal 16 Feb (Gambar 4a). Keadaan ini tergantung pada besar intensitas cahaya matahari dan kecepatan angin saat pengukuran.

Penetrasi energi panas dari permukaan air pada dua hari terakhir pengamatan terlihat lebih dalam dibandingkan dengan awal-pengamatan (Gambar 3). Kondisi ini disertai dengan pembentukan gradien suhu terhadap kedalaman. Hal ini menunjukkan bahwa di kolom air sudah terbentuk stratifikasi. Gambar 3 juga menunjukkan bahwa pada hari ke-5 pengamatan (18 Februari), selama siang hari banyak terjadi perubahan lapisan isothermis yang juga akan menggeser kedalaman lapisan termoklin menjauhi permukaan. Kondisi ini menjadi bukti bahwa kolom air mengalami stratifikasi suhu pada akhir-akhir periode pengamatan.

Stratifikasi yang terbentuk di kolom air berfluktuasi dalam orde satu hari. Puncak stratifikasi harian terjadi dari menjelang siang sampai sore hari, kemudian menurun pada malam hingga pagi hari. Kondisi yang sama terjadi pada hari berikutnya. Saat kondisi kolom air terstratifikasi, perbedaan suhu antara permukaan dan dasar bisa mencapai $1,439^{\circ}\text{C}$ (Tanggal 18 sore), sedangkan pada saat stratifikasi melemah, perbedaan suhu mencapai $0,195^{\circ}\text{C}$. Kondisi terlemah terjadi pada tanggal 15 Feb pagi hari yang mencapai $0,047^{\circ}\text{C}$, sehingga dapat dikatakan bahwa kolom air berada dalam keadaan isothermis. Selama pengamatan terlihat juga bahwa jumlah lapisan

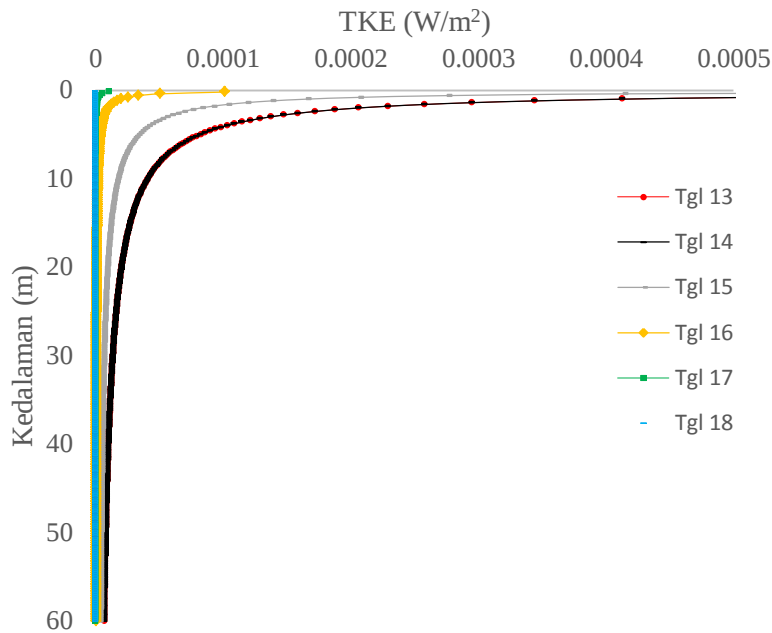
isothermal pada siang hari semakin meningkat seiring dengan peningkatan waktu pengamatan. Keadaan ini menunjukkan bahwa stratifikasi harian kolom air di stasiun tersebut mengalami peningkatan. Peningkatan stratifikasi dikonfirmasi secara kuantitatif oleh persamaan indeks stratifikasi (*SI*) yang ditampilkan dalam Gambar 2b.

Profil struktur vertikal suhu dalam Gambar 3 sesuai dengan kurva indeks stratifikasi selama pengamatan (Gambar 2b). Indeks stratifikasi pada awal pengamatan jauh lebih kecil dibandingkan akhir pengamatan, padahal intensitas cahaya matahari lebih tinggi pada akhir pengamatan yang seharusnya meningkatkan indeks stratifikasi. Namun, kecepatan angin yang besar pada awal pengamatan yang ditransfer ke permukaan air dalam bentuk *wind stress* menyebabkan stratifikasi kolom air tidak dapat bertahan. Dengan demikian, pada kondisi ini kecepatan angin lebih dominan memengaruhi kekuatan stratifikasi dibanding intensitas cahaya. Kecepatan angin dan intensitas cahaya bersama-sama secara statistik signifikan memengaruhi stratifikasi dengan nilai signifikansi 0,015 ($<0,05$). Namun, di antara keduanya yang paling dominan adalah kecepatan angin dengan nilai $\beta = -0,99$, sedangkan intensitas cahaya matahari dengan nilai $\beta = 0,22$.

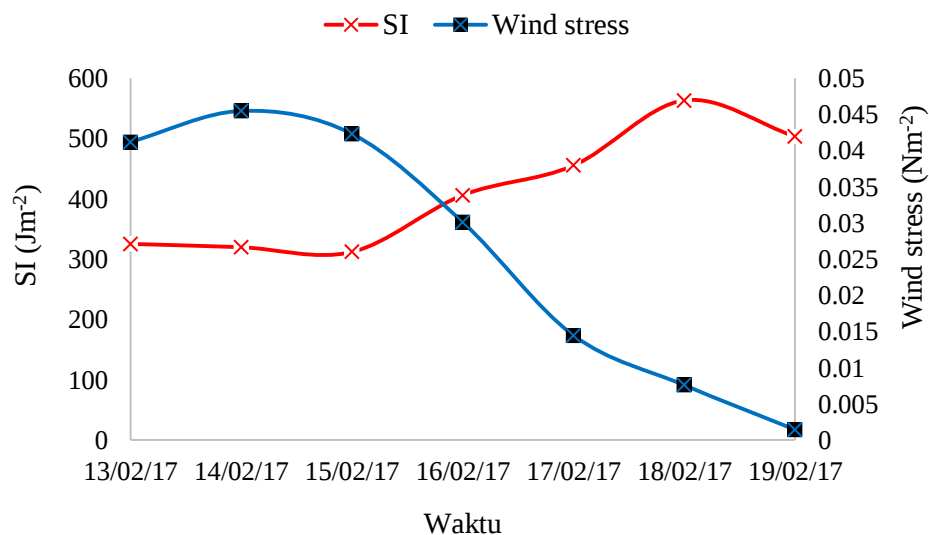
Kerusakan stratifikasi atau kestabilan kolom air disebabkan oleh energi kinetik turbulen yang dibangkitkan oleh *wind stress*. Energi kinetik turbulen menyebabkan air bergerak dan berputar menembus lapisan-lapisan air. Perubahan *wind stress* permukaan berbanding lurus dengan perubahan energi kinetik turbulen. Energi kinetik turbulen paling besar terbentuk pada hari pertama pengamatan, kemudian menurun sesuai dengan penurunan *wind stress* (Gambar 5). Energi kinetik turbulen yang rendah pada akhir pengamatan berimplikasi pada energi potensial air yang tetap terjaga untuk menghambat proses pencampuran air di lapisan epilimnion. Gambar 5 juga menunjukkan bahwa energi kinetik turbulen menurun secara eksponensial terhadap kedalaman. Hasil penghitungan menunjukkan bahwa pada hari pertama pengamatan, energi kinetik turbulen bisa mencapai kedalaman sekitar 10 m. Dengan kata lain, energi angin dapat membangkitkan proses pencampuran air sampai kedalaman 10 m. sehingga kestabilan kolom air danau akan

terganggu. Berdasarkan nilai indeks stratifikasi, *wind stress*, dan intensitas cahaya matahari dapat dikatakan bahwa kekuatan stratifikasi sangat dipengaruhi oleh *wind stress*. Semakin besar *wind stress*, semakin

kecil stratifikasi (Gambar 6). Hubungan terbalik *wind stress* dengan stratifikasi ditandai dengan koefisien korelasi sebesar $-0,96$ dengan taraf signifikan $P = 0,0023$.



Gambar 5. Perubahan energi kinetik turbulen (TKE) terhadap waktu dan kedalaman di Danau Maninjau pada tanggal 13–18 Februari 2017



Gambar 6. Indeks stratifikasi berbanding terbalik dengan *wind stress*

Kesimpulan

Distribusi vertikal suhu kolom air Danau Maninjau berubah dalam interval harian sesuai dengan periode kemunculan matahari terhadap bumi. Peningkatan suhu kolom air mulai terjadi pada siang sampai sore hari, kemudian menurun pada waktu malam sampai menjelang pagi hari. Terdapat perbedaan kandungan energi panas pada lapisan kolom air yang ditandai oleh pembentukan lapisan-lapisan isothermal. Selama pengamatan, *wind stress* lebih dominan dibandingkan intensitas cahaya matahari dalam memengaruhi kekuatan stratifikasi harian. Semakin tinggi *wind stress*, semakin tinggi pula energi kinetik turbulen di dalam air, sehingga stratifikasi harian kolom air semakin menurun.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini merupakan bagian dari kegiatan DIPA tahun 2017 Pusat Penelitian Limnologi, LIPI. Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian Limnologi, LIPI atas pemberian kepercayaan kepada kami untuk melakukan penelitian ini. Kami juga mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Hidroinformatika atas penyediaan peta pengamatan di Danau Maninjau.

Referensi

- Fairall CW, Bradley EF, Rogers DP, Edson JB, Young GS. 1996. Bulk parameterization of air-sea fluxes for the Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment (TOGA- Bulk parameterization of air-sea fluxes for Tropical Ocean- Global Atmosphere Coupled-Ocean Atmosphere Response Experiment. *Geophysical Research Letters* 101: 3747–3764. DOI: 10.1029/95JC03205
- Giles CD, Isles PDF, Manley T. 2015. The mobility of phosphorus, iron, and manganese through the sediment – water continuum of a shallow eutrophic freshwater lake under stratified and mixed water-column conditions *Biogeochemistry*. DOI: 10.1007/s10533-015-0144-x
- Ladd C, Stabeno PJ. 2012. Stratification on the Eastern Bering Sea shelf revisited. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography* 65–70: 72–83. DOI: 10.1016/j.dsr2.2012.02.009
- Lofgren BM, Zhu Y. 2000. Surface Energy Fluxes on the Great Lakes Based on Satellite-Observed Surface Temperatures 1992 to 1995. *Journal of Great Lakes Research* 26: 305–314. DOI: 10.1016/S0380-1330(00)70694-0
- Magee MR, Wu CH. 2017. Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry. *Hydrology and Earth System Sciences* 21: 6253–6274. DOI: 10.5194/hess-21-6253-2017
- Rempfer J, Livingstone DM, Blodau C, Forster R, Niederhauser P, Kipfer R. 2010. The effect of the exceptionally mild European winter of 2006-2007 on temperature and oxygen profiles in lakes in Switzerland: A foretaste of the future? *Limnology and Oceanography* 55: 2170–2180. DOI: 10.4319/lo.2010.55.5.2170
- Schindler DW, Beaty KG, Fee EJ, Cruikshank ER, DeBruyn ER, Findlay DL, Linsey GA, Shearer JA, Stainton MP, Turner MA. 1990. Effects of climatic warming on lakes of the central boreal forest. *Science* 250: 967–970
- Stefan HG, Hondzo M, Fang X, Eaton JG, McCormick JH. 1996. Simulated long term temperature and dissolved oxygen characteristics of lakes in the north-central United States and associated fish habitat limits. *Limnology and Oceanography*, 1124–1135. DOI: 10.4319/lo.1996.41.5.1124
- Tuan N V., Hamagami K, Mori K, Hirai Y. 2009. Mixing by wind-induced flow and thermal convection in a small, shallow and stratified lake. *Paddy and Water Environment* 7: 83–93. DOI: 10.1007/s10333-009-0158-x
- Verburg P, Antenucci JP. 2010. Persistent unstable atmospheric boundary layer enhances sensible and latent heat loss in a tropical great lake: Lake Tanganyika. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 115: 1–13. DOI: 10.1029/2009JD012839
- Winslow L, Read J, Woolway R, Brenttrup J, Leach T, Zwart J, Albers S, Collinge D. 2018. Package ‘ rLakeAnalyzer .’ *CRAN* 1.11.4: 41
- Yang Y, Colom W, Pierson D, Pettersson K.

2016. Water column stability and summer phytoplankton dynamics in a temperate lake (Lake Erken, Sweden). *Inland Waters* 6: 499–508. DOI: 10.5268/IW-6.4.874