



OSEANOLOGI DAN LIMNOLOGI DI INDONESIA

Print ISSN: 0125-9830 Online ISSN: 2477-328X

Nomor Akreditasi: 712/AU3/P2MI – LIPI/10/2015

<http://jurnal-oldi.or.id>



Model Sebaran Spasial Berlapis 2-Dimensi pada Beban Tersuspensi di Danau Tempe

Model of 2-Dimensional Layered Spatial Distribution of Suspended Load in Lake Tempe

Eko Harsono

Pusat Penelitian Limnologi LIPI

Email : eko@limnologi.lipi.go.id

Submitted 9 November 2015. Reviewed 26 August 2016. Accepted 26 October 2016.

Abstract

Akumulasi sedimen di Danau Tempe yang berasal dari Sungai Bila, Sidenreng, dan Batu-batu di wilayah Sungai Walannae akan dikeruk pada saat operasi bendung gerak dilaksanakan, namun lokasi akumulasi sedimen di danau tersebut sampai sekarang masih belum diketahui. Penelitian ini mengembangkan model sebaran spasial berlapis 2-dimensi di Danau Tempe untuk mengetahui sejauh mana masukan material tersuspensi dari sungai yang mengendap di danau tersebut, sehingga lokasi pengerukan sedimen dapat ditentukan dengan tepat. Model dikalibrasi menggunakan data observasi konsentrasi TSS di 15 titik di Danau Tempe pada tinggi muka air 5 m yang dilaksanakan pada bulan Maret 2014. Hasil penghitungan menunjukkan bahwa model sesuai dengan data observasi. Berdasarkan simulasi pengaturan rentang debit efluen, diketahui bahwa jika pengaturan rentang debit efluen Danau Tempe dipersempit, maka pengendapan material tersuspensi di danau tersebut semakin tinggi, sehingga TSS yang keluar dari danau akan semakin sedikit. Berdasarkan simulasi model dan simulasi pengurangan beban tersuspensi dari influen di tiap zona, akumulasi sedimen di Danau Tempe terjadi di sekeliling area terdalam antara Zona I dan Zona III, dan faktor yang memengaruhi sebaran TSS di danau tersebut adalah beban tersuspensi dari influen Sungai Bila dan debit efluen.

Kata kunci: Danau Tempe, akumulasi sedimen, model sebaran spasial berlapis 2-dimensi, operasi bendung gerak.

Abstrak

Accumulation of sediment in Lake Tempe deriving from Bila, Sidenreng, and Batu-batu Rivers in the region of Walannae River will be dredged during barrage operation, but until now the location of sediment accumulation in the lake is still unknown. This study developed a model of 2-dimensional layered spatial distribution of suspended materials in Lake Tempe to determine the extent of sedimentation in the lake from suspended material inputs, so the location of sediment dredging can be determined appropriately. Model was calibrated using the observation data of TSS concentrations at 15 points in Lake Tempe at water level of 5 m which took place in March 2014. The result showed that the model was in accordance with the observed data. Based on the simulation of range setting of effluent discharge, it is known that if the range setting of effluent discharge is narrowed, the deposition of suspended loads in the lake becomes higher, so the TSS that

comes out of the lake will be less. Based on the model simulation and simulation of suspended load reduction of the influent for each zone, the accumulation of sediment in Lake Tempe happens around the deepest area between Zone I and Zone III, and the factor affecting the distribution of TSS in the lake is the suspended loads of the influent from Bila River and the effluent discharge.

Keywords: Lake Tempe, sediment accumulation, two-dimensional layered model, barrage operation.

Pendahuluan

Danau Tempe yang berada di Kabupaten Wajo, Sidrap, dan Soppeng, Provinsi Sulawesi Selatan, merupakan paparan banjir dari Sungai Bila, Sidenreng, dan Batu-batu di Wilayah Sungai Walannae (Suyono & Kusnama, 2010). Danau Tempe yang menghasilkan ikan tangkap 400 ton/tahun (Samuel et al., 2012) mempunyai satu outlet, yaitu Sungai Cenranae. Di sungai tersebut telah dibangun bendung gerak (*barrage*). Menurut Subandi et al. (2011), untuk mengantisipasi peningkatan akumulasi sedimen di Danau Tempe, pengerukan endapan sedimen di danau tersebut akan dilakukan pada saat pelaksanaan operasi bendung gerak. Namun, sampai saat ini lokasi akumulasi sedimen di Danau Tempe belum diketahui. Menurut Gang (2008), beban tersuspensi (*suspended load*) dari sungai yang berasal dari erosi lahan digolongkan ke dalam material konservatif. Dalam perjalanannya, konsentrasi beban tersuspensi tersebut akan menurun karena proses pengendapan (Gyr et al., 2006; Gang, 2008; Wilcock et al., 2009; Cao et al., 2015). Selain itu, menurut Yang (2003) dan Chou (2014), pengendapan beban tersuspensi terjadi jika kecepatan mengendapnya lebih besar daripada kecepatan aliran badan air pembawanya. Dengan demikian, beban tersuspensi dari sungai yang masuk ke dalam perairan Danau Tempe akan mengendap di area-area tertentu jika kecepatan mengendapnya lebih tinggi dibandingkan kecepatan arus air danau.

Penelitian ini mengembangkan model sebaran spasial berlapis 2-dimensi pada beban tersuspensi dari sungai di Danau Tempe. Dengan model tersebut dapat diketahui penyebaran dan pengendapan beban tersuspensi di Danau Tempe, baik sebelum maupun sesudah bendung gerak beroperasi, dan daerah aliran sungai (DAS) yang paling memengaruhi sebaran dan endapan beban tersuspensi di danau tersebut.

Metodologi

Model sebaran spasial berlapis 2-dimensi di perairan Danau Tempe diperoleh dari merakit model komputer hidrodinamika arus dan tinggi muka air berlapis 2-dimensi perairan (Harsono, 2011) dengan model komputer transportasi massa berlapis 2-dimensi (Harsono, 2015). Produksi bersih massa beban tersuspensi dari sungai di perairan Danau Tempe (P_r) dari model komputer transportasi massa tersebut, diformulasikan berdasarkan prinsip neraca massa (Gang, 2008; Liu, 2010) sebagai berikut:

Lapisan permukaan:

$$P_{r(1)} = WT_1 - v_s \cdot h_1 \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot C_1$$

Lapisan antara:

$$P_{r(k)} = WT_k - (v_s \cdot h_k \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot C_k - v_s \cdot h_{k-1} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot C_{k-1})$$

Lapisan dasar:

$$P_{r(dasar)} = WT_{dasar} + v_s \cdot h_{k-1} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \cdot C_{k-1}$$

Keterangan:

$P_{r(1)}$, $P_{r(k)}$, dan $P_{r(dasar)}$ =

Produksi bersih *total suspended solid* (TSS) air danau di lapisan ke-1, lapisan antara, dan lapisan dasar (kg/hari)

C_1 , C_k , dan C_{k-1} =

konsentrasi TSS air danau di lapisan ke-1, k, dan (k-1) (kg/m³ atau g/l);

WT_1 , dan WT_k =

beban TSS dari sungai (influen) yang masuk ke dalam lapisan air danau ke-1 dan k (kg/hari)

h_1 , h_k , h_{k-1} =

tebal lapisan air danau ke-1, k, dan (k-1) (m)

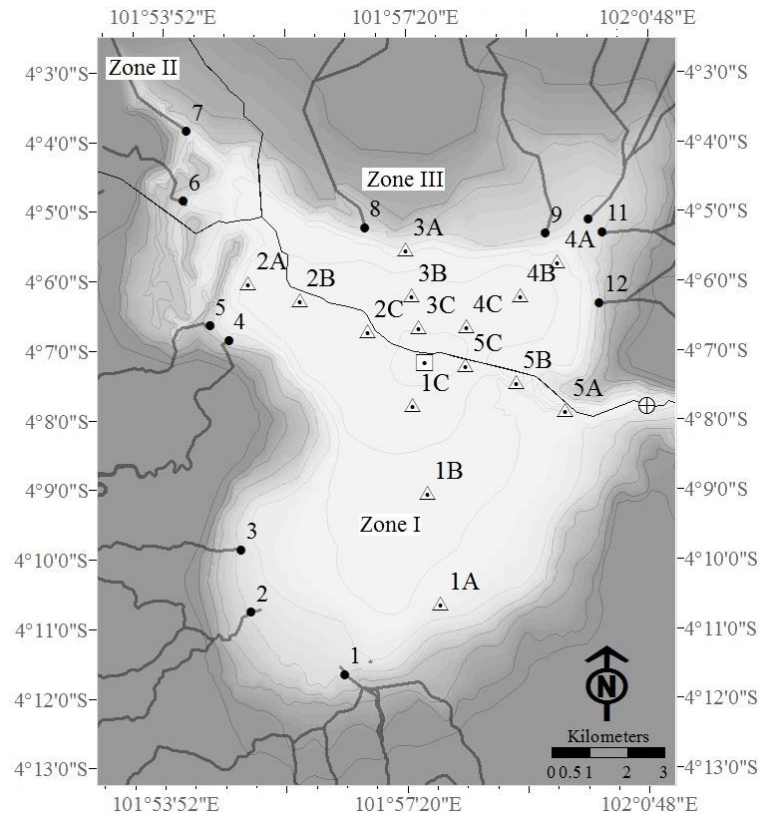
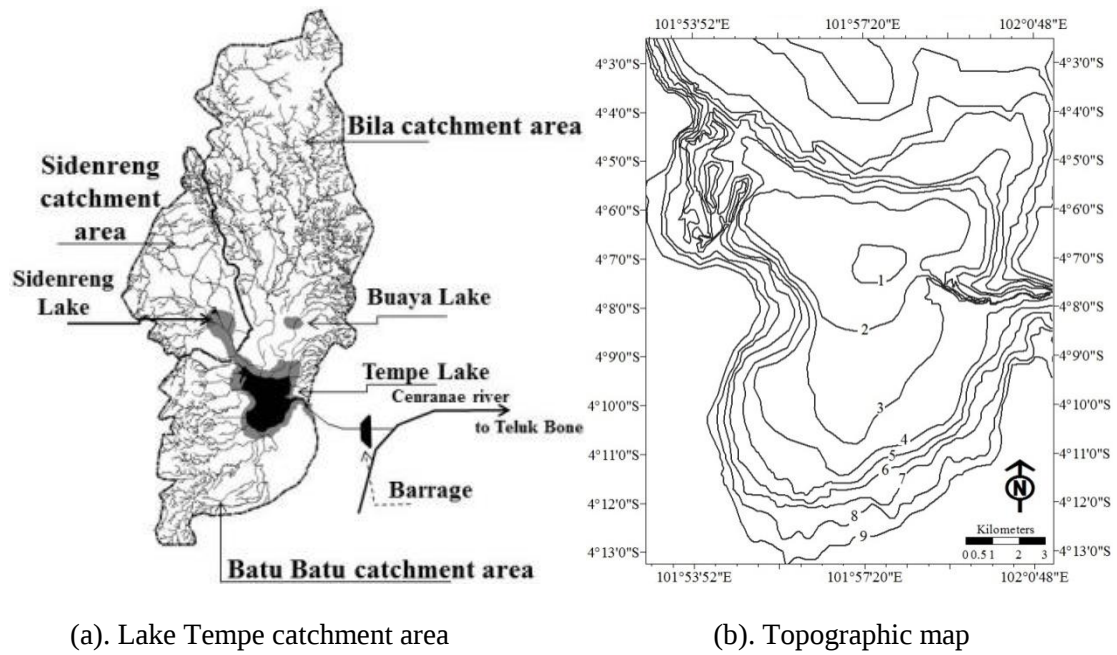
Δx dan Δy =

Panjang dan lebar segmen di badan air danau (m)

v_s =

kecepatan mengendap partikel sedimen di perairan danau (hari⁻¹), dalam penelitian ini menggunakan formula Stoke's (Gang, 2008).

Kondisi pembatas model sebaran spasial beban tersuspensi di Danau Tempe adalah segmen dan tebal lapisan badan air danau (h_k), debit efluen danau (Q_{eff}), dan beban tersuspensi (WT) yang masuk ke dalam danau (influen). Untuk mendapatkan kondisi pembatas yang mempresentasikan erosi di DAS Danau Tempe, maka



Legend

River
 Countur line
 Influent point
 Effluent point
 Zone boundary
 Observation point
 Water surface elevation monitoring station

Gambar 1. Topografi dan lokasi titik influen, efluen, dan observasi di Danau Tempe.

Figure 1. Topography and locations of points of influent, effluent, and observation in Lake Tempe.

identifikasi kondisi pembatas dilakukan pada musim penghujan saat terjadi erosi lahan di DAS yang melingkupi danau tersebut. Menurut Setiawan dan Wibowo (2013), musim hujan terjadi dari bulan November sampai Juli, sehingga identifikasi kondisi pembatas dilakukan pada bulan Maret 2014.

Untuk mendapatkan segmen dan tebal lapisan (h_k) badan air Danau Tempe digunakan peta topografi dari Dinas Pengairan Provinsi Sulawesi Selatan yang diregistrasi dengan Peta Rupa Bumi Indonesia skala 1:25.000 tahun 2001 dari BAKOSURTANAL (Gambar 1a). Berdasarkan peta topografi (Gambar 1b) dan tinggi muka air 5 m dari permukaan air laut (dpal) yang dibaca dari stasiun pemantau (Gambar 1c), segmen dan tebal lapisan badan air Danau Tempe diperoleh melalui *trial and error* dengan pendekatan nilai awal menggunakan formula waktu hitung, Δt (Harsono, 2015).

Untuk mendapatkan data Q_{eff} dan WT pada tinggi muka air Danau Tempe 5 m dpal dilakukan pengukuran di titik-titik yang ditunjukkan dalam Gambar 1c. Pengukuran dilakukan pada waktu yang sama dengan pembacaan tinggi muka air Danau Tempe. Debit efluen (Q_{eff}) diestimasi menggunakan metode *Velocity-Area* (Walkowiak, 2006). Kecepatan aliran air efluen diukur dengan

Digital Current-meter Model UC-304. Luas area penampang melintang saluran efluen diukur menggunakan pita meteran.

Beban tersuspensi dari influen (WT) diestimasi menggunakan metode *Rational* (Gang, 2008). Debit aliran air influen (Q_{inf}) diestimasi dengan cara yang sama dengan estimasi Q_{eff} . Konsentrasi beban tersuspensi di influen (C_{inf}) diperoleh dari sampel air sungai yang diambil dengan *sediment sampler* DH-48, kemudian disaring dengan kertas Millipore 0,45 μ m dan dianalisis di laboratorium secara gravimetri (APHA, 2005).

Model sebaran spasial berlapis 2-dimensi pada beban tersuspensi di Danau Tempe dikalibrasi menggunakan data observasi konsentrasi TSS danau. Parameter model yang dikalibrasi adalah diameter butir sedimen danau. Data observasi diperoleh dari pengambilan sampel air di 60% x kedalaman air Danau Tempe di 15 titik (Gambar 1c). Pengambilan sampel air dan analisis laboratorium untuk memperoleh konsentrasi TSS dilakukan pada waktu, menggunakan alat, dan cara yang sama dengan di titik influen. Proses kalibrasi dan validasi dianggap selesai jika nilai perbedaan (ϵ) kurang dari 10%. Nilai perbedaan (ϵ) diperoleh dari formula berikut:

$$\epsilon = \frac{\sum_{i=1}^{\text{jumlah observasi}} \left(\frac{\sqrt{(\text{konsentrasi TSS observasi} - \text{konsentrasi TSS terhitung})^2}}{\text{konsentrasi TSS observasi}} \right) \times 100}{\text{Jumlah observasi}}$$

Menurut Walkowiak (2006), tujuan operasi bendung gerak adalah untuk memperoleh tinggi muka air tergenang melalui pengaturan debit air dengan membuka dan menutup pintu bendung, sehingga kedalaman perairan tetap terjaga. Dengan demikian, untuk mengetahui sebaran dan pengendapan beban tersuspensi di Danau Tempe dilakukan simulasi menggunakan model terkalibrasi dengan percobaan skenario pengaturan rentang Q_{eff} simulasi terhadap Q_{eff} model pada luas hidrolik saluran efluen tetap. Percobaan skenario tersebut adalah sebagai berikut: (1) simulasi 0,2–1,6 dengan skenario

rentang Q_{eff} simulasi dari 0,2 x Q_{eff} model sampai 1,6 x Q_{eff} model, (2) simulasi 0,4–1,6 dengan skenario rentang Q_{eff} simulasi dari 0,4 x Q_{eff} model sampai 1,6 x Q_{eff} model, (3) simulasi 0,6–1,6 dengan skenario rentang Q_{eff} simulasi dari 0,6 x Q_{eff} model sampai 1,6 x Q_{eff} model. Untuk mengetahui besar pengaruh skenario pengaturan Q_{eff} simulasi terhadap sebaran dan endapan beban tersuspensi di Danau Tempe digunakan nilai perbandingan ΔC_k . Bila ΔC_k semakin kecil dari 100% maka skenario pengaturan rentang Q_{eff} simulasi semakin baik. Nilai perbandingan (ΔC_k) diperoleh dari formula:

$$\Delta C_k = \frac{\sum_{i=1}^{N_k} \left(\frac{C_{S(k,x,y)}}{C_{m(k,x,y)}} \times 100 \right)}{N_k}$$

Keterangan:

ΔC_k = Nilai perbandingan konsentrasi TSS air Danau Tempe di lapisan ke k (%)

$C_{S(k,x,y)}$ = konsentrasi TSS simulasi di titik dengan koordinat x, y di lapisan ke-k air Danau Tempe (mg/l),

$C_{m(k,x,y)}$ = konsentrasi TSS model di titik dengan koordinat x, y di lapisan ke-k air Danau Tempe (mg/l)

N_k = jumlah titik di lapisan ke-k air Danau Tempe.

Untuk mengetahui DAS yang paling berpengaruh terhadap sebaran dan pengendapan beban tersuspensi di Danau Tempe, dilakukan simulasi menggunakan model yang terkalibrasi dengan skenario sebagai berikut: (1) simulasi Zona II dengan skenario C_{inf} dari Zona I dan zona III = 0 mg/l, (2) simulasi Zona I–II dengan skenario C_{inf} dari Zona III = 0 mg/l, dan (3) simulasi zona III dengan C_{inf} dari Zona I dan zona II = 0 mg/l. Untuk mengetahui DAS yang paling berpengaruh terhadap sebaran TSS di Danau Tempe digunakan nilai perbandingan ΔC_k . Jika nilai perbandingan ΔC_k simulasi semakin mendekati 100%, berarti simulasi tersebut semakin berpengaruh terhadap sebaran TSS di perairan danau.

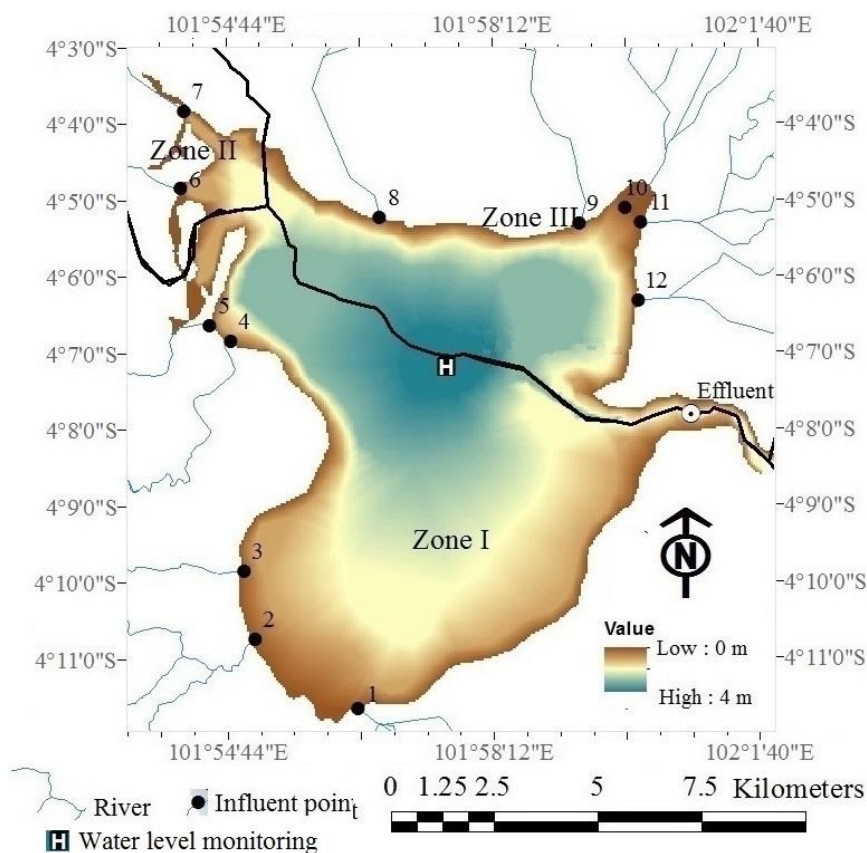
Hasil

Hasil identifikasi batimetri dan morfometri Danau Tempe pada tinggi muka air 5 m ditampilkan dalam Gambar 2 dan Gambar 3.

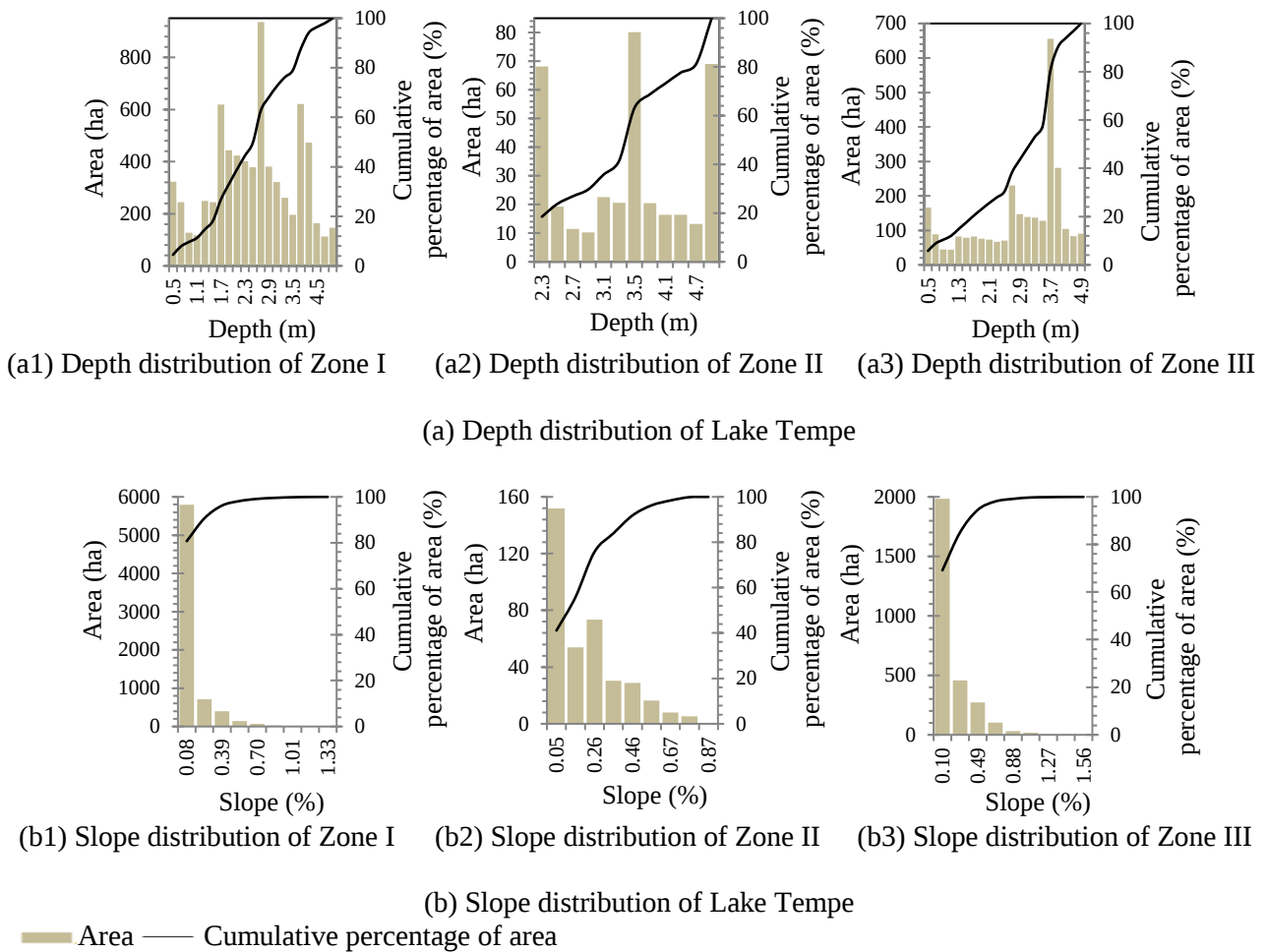
Dari Gambar 2 diketahui kedalaman air maksimum Danau Tempe, yaitu 4 m yang berada

di area berbentuk lingkaran antara Zona I dan zona III. Volume dan luas permukaan air danau adalah 219.922.325 m³ dan 10.566,86 ha. Dari Gambar 2, Danau Tempe dapat dibagi menjadi 3 zona berdasarkan DAS yang melingkupinya, yaitu Zona I (Zona Batu-batu) berbentuk teluk dengan luas 7230,94 ha, Zona II (Zona Sidenreng) berbentuk teluk dengan luas 416,06 ha, dan Zona III (Zona Bila) berbentuk teluk dengan luas 2919,86 ha. Selain itu, Gambar 2 juga memperlihatkan bahwa Danau Tempe mempunyai morfometri berbentuk mangkok dengan sebaran kedalaman air yang mengikuti lingkaran area terdalam yang secara gradual semakin dangkal ke tepi danau.

Dari Gambar 3a dan 3b diketahui kedalaman air rata-rata dan kemiringan dasar rata-rata di tiap zona Danau Tempe, yaitu 2,45 m dan 0,134% untuk Zona I, 3,54 m dan 0,214% untuk Zona II, dan 2,96 m dan 0,201% untuk Zona III. Hasil pembagian lapisan air beserta hasil identifikasi kondisi pembatas model sebaran spasial berlapis 2-dimensi pada beban tersuspensi di Danau Tempe pada tinggi muka air 5 m ditampilkan dalam Gambar 4.



Gambar 2. Batimetri Danau Tempe.
Figure 2. Bathymetry of Lake Tempe.



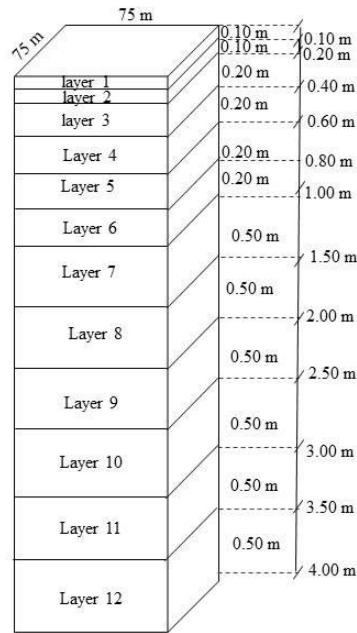
Gambar 3. Morfometri Danau Tempe pada tinggi muka air 5 m.
Figure 3. Morphometry of Lake Tempe at water level of 5 m.

Gambar 4a memperlihatkan hasil pembagian lapisan badan air, yaitu 12 lapisan air dengan panjang dan lebar segmen 75 m. Gambar 4b memperlihatkan bentuk permukaan air Danau Tempe hasil segmentasi berlapis yang mirip dengan hasil pengukuran batimetri. Hasil penghitungan volume dan luas permukaan air Danau Tempe berdasarkan segmentasi berlapis tersebut yaitu 209.450.700 m³ dan 10160,44 ha.

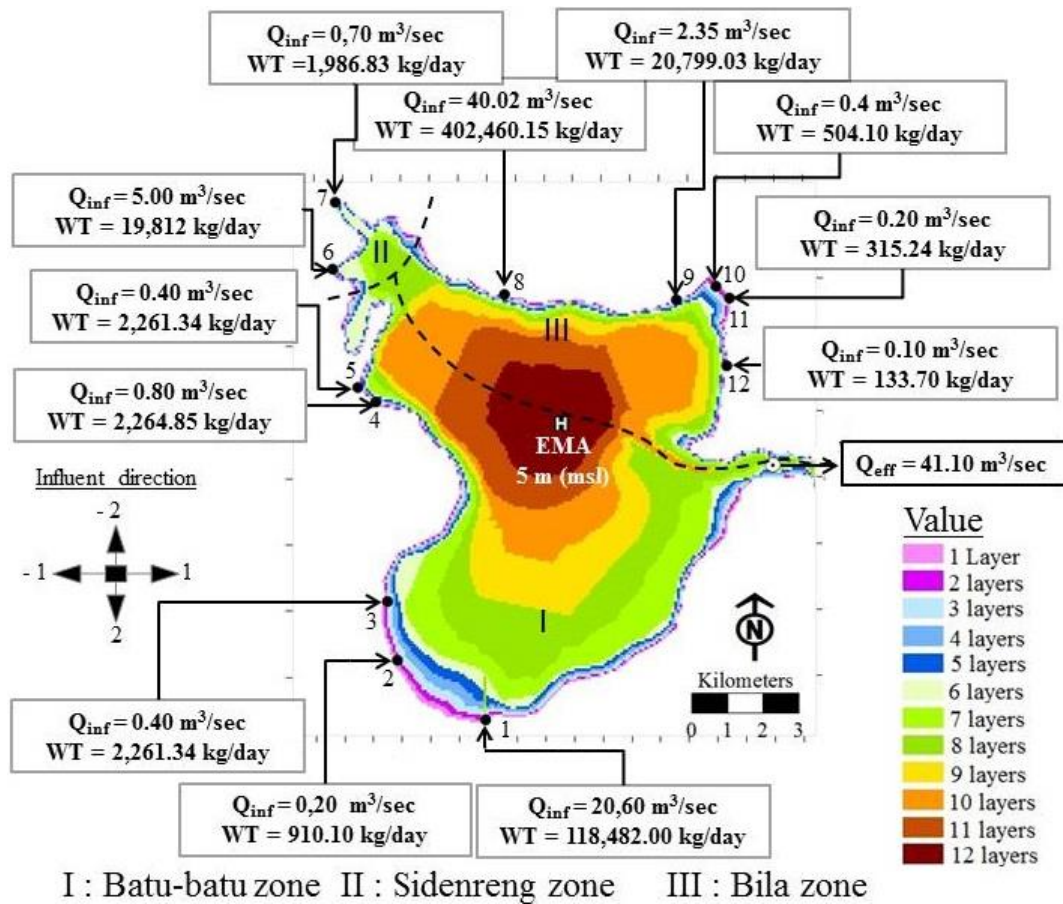
Gambar 4b juga memperlihatkan hasil pengukuran Q_{eff} dan WT Danau Tempe tinggi muka air 5 m dpal. Dari hasil pengukuran Q_{inf} dan WT diketahui Q_{inf} total dan WT total zona I, yaitu 22,4 m³/s dan 125.347,3 kg/hari, zona II sebesar 5,7 m³/s dan 21.799,21 kg/hari, dan zona III sebesar 40,72 m³/s dan 442.932,3 kg/hari. Dari

Gambar 3b juga dapat dilihat hasil estimasi Q_{eff} , yaitu 44 m³/s. Perbandingan antara Q_{eff} tersebut dan Q_{inf} total ($Q_{\text{eff}}/\sum_{i=1}^{12} Q_{\text{inf}}$) sebesar 0,64.

Dari hasil kalibrasi model sebaran spasial berlapis 2-dimensi pada beban tersuspensi di Danau Tempe, diperoleh waktu hitung Δt 4,15 detik dan diameter rata-rata partikel sedimen 8 μm . Kecenderungan konsentrasi TSS hasil penghitungan model dan observasi ditampilkan dalam Gambar 5. Hasil penghitungan pola sebaran spasial beban tersuspensi di Danau Tempe ditampilkan dalam Gambar 6. Hasil penghitungan pola arus air ditampilkan dalam Gambar 7 dan sebaran spasial endapan di lapisan dasar Danau Tempe ditampilkan dalam Gambar 8.

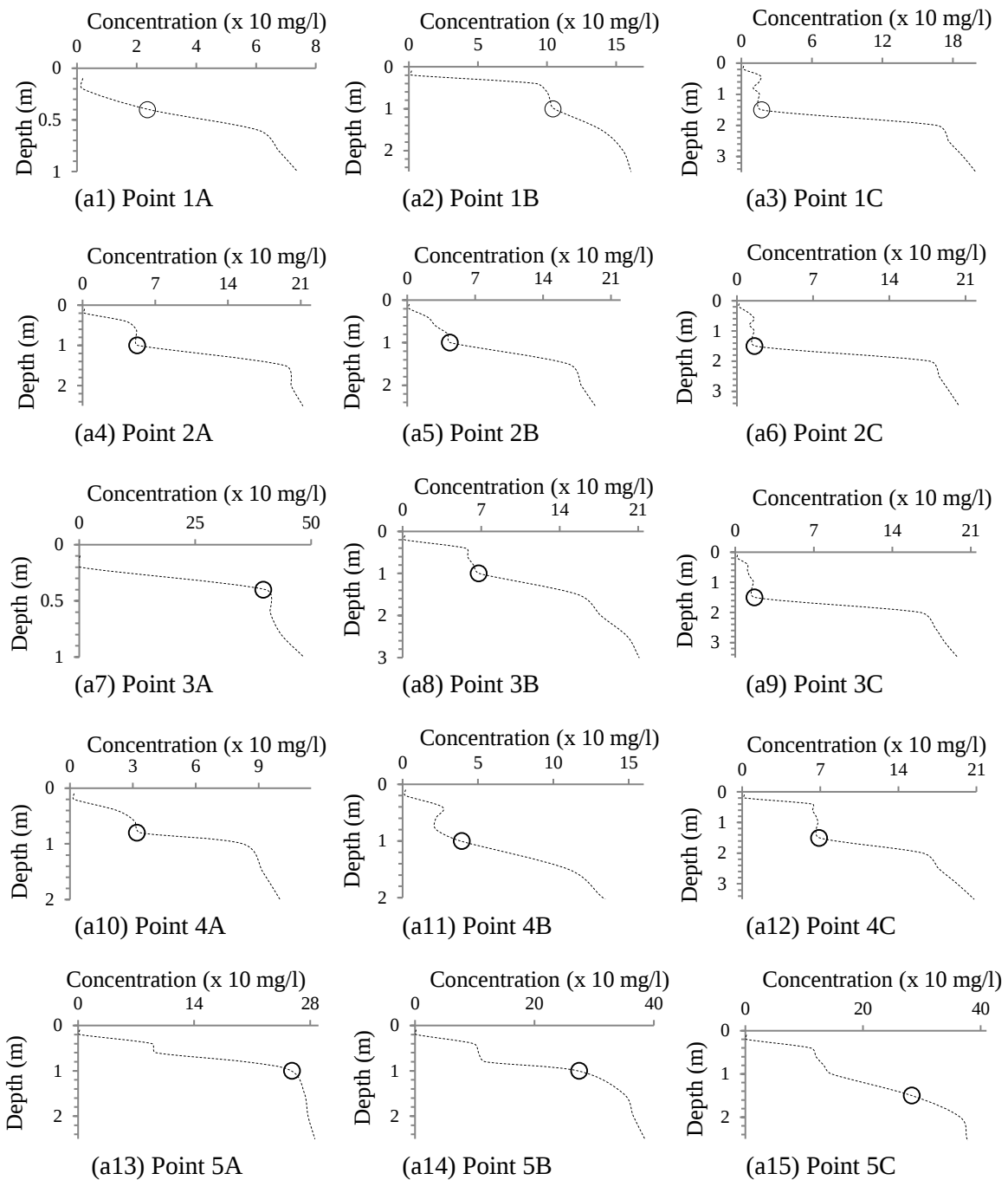


(a) Scheme of water body layers

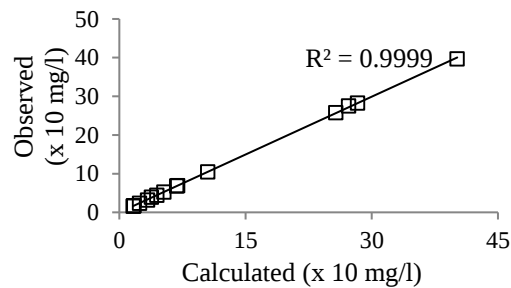


(b) Distribution of layers, Wt, Q_{inf}, and Q_{ef}

Gambar 4. Kondisi pembatas model sebaran spasial berlapis 2-dimensi pada sedimen di Danau Tempe.
Figure 4. Limiting conditions of 2-dimensional layered spatial distribution model of sediments in Lake Tempe.



Note: ○ observed ----- calculated

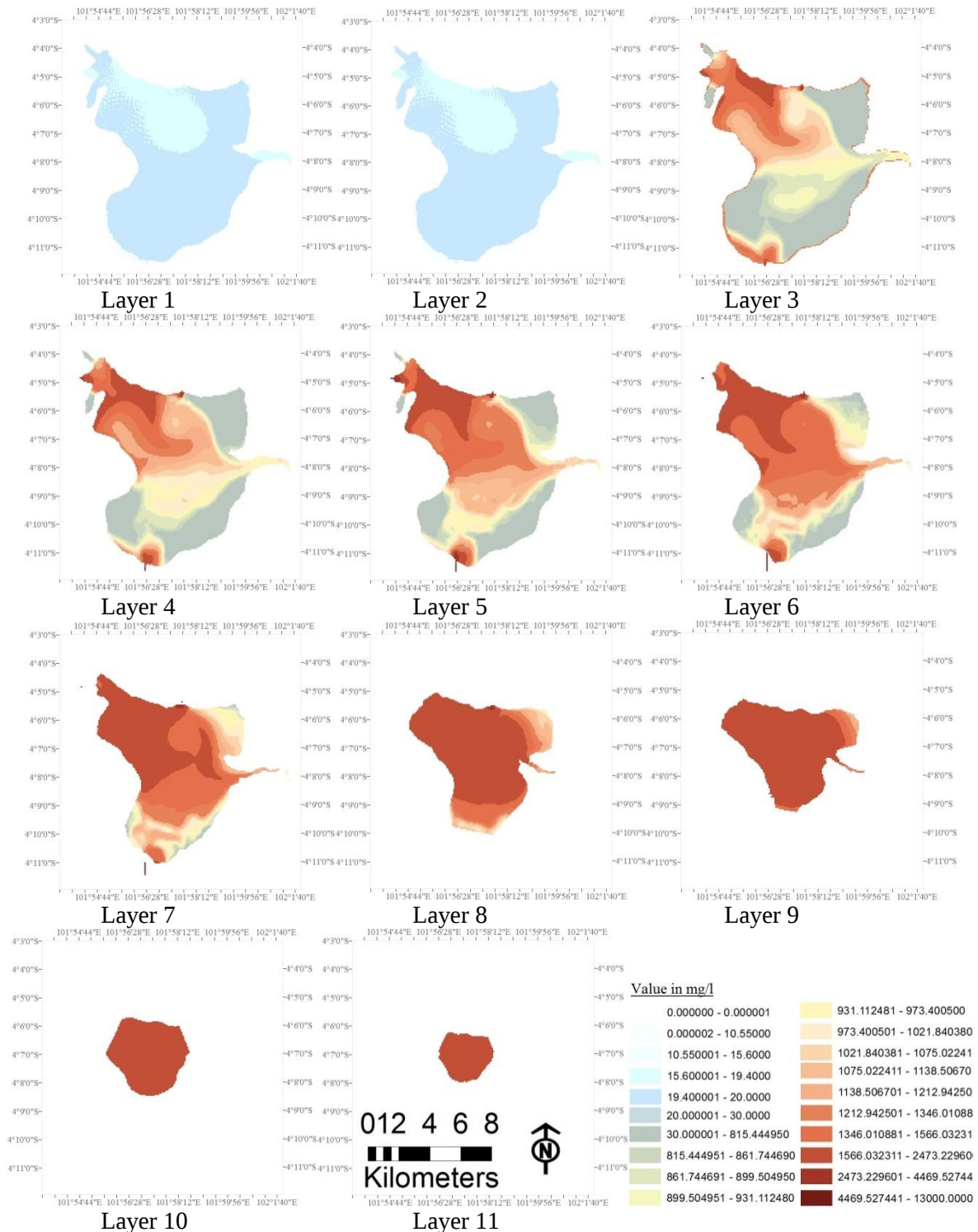


(b) correlation between calculated and observed

Gambar 5. Konsentrasi TSS hasil observasi dan penghitungan.
Figure 5. TSS concentration from observation and calculation.

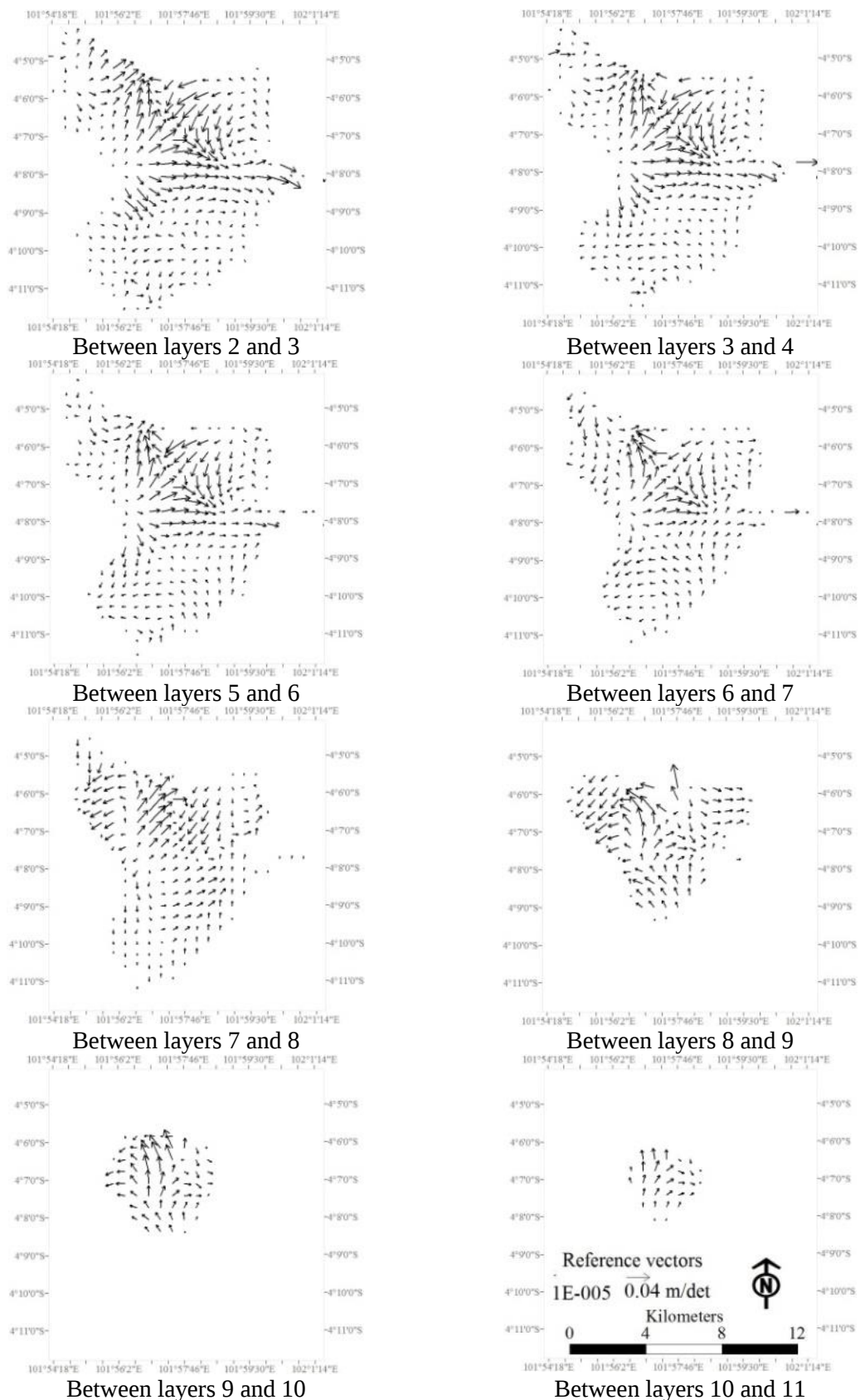
Gambar 5 menunjukkan perbedaan nilai antara konsentrasi TSS hasil observasi dan penghitungan model (ϵ) sebesar 1,28%, dapat

dilihat juga korelasi antara hasil penghitungan dan observasi tersebut linear dengan $R^2 = 0,99$.



Gambar 6. Model pola sebaran konsentrasi TSS di Danau Tempe.

Figure 6. Models of TSS concentration distribution pattern in Lake Tempe.



Gambar 7. Model pola arus air Danau Tempe.
Figure 7. Models of water current pattern of Lake Tempe.

Penggambaran pola sebaran konsentrasi TSS (Gambar 6 sampai Gambar 12) menggunakan rentang nilai dalam gradasi warna

yang sama. Gambar 6 dan Gambar 7 memperlihatkan model pola sebaran konsentrasi TSS yang cenderung mengikuti pola arus. Dari

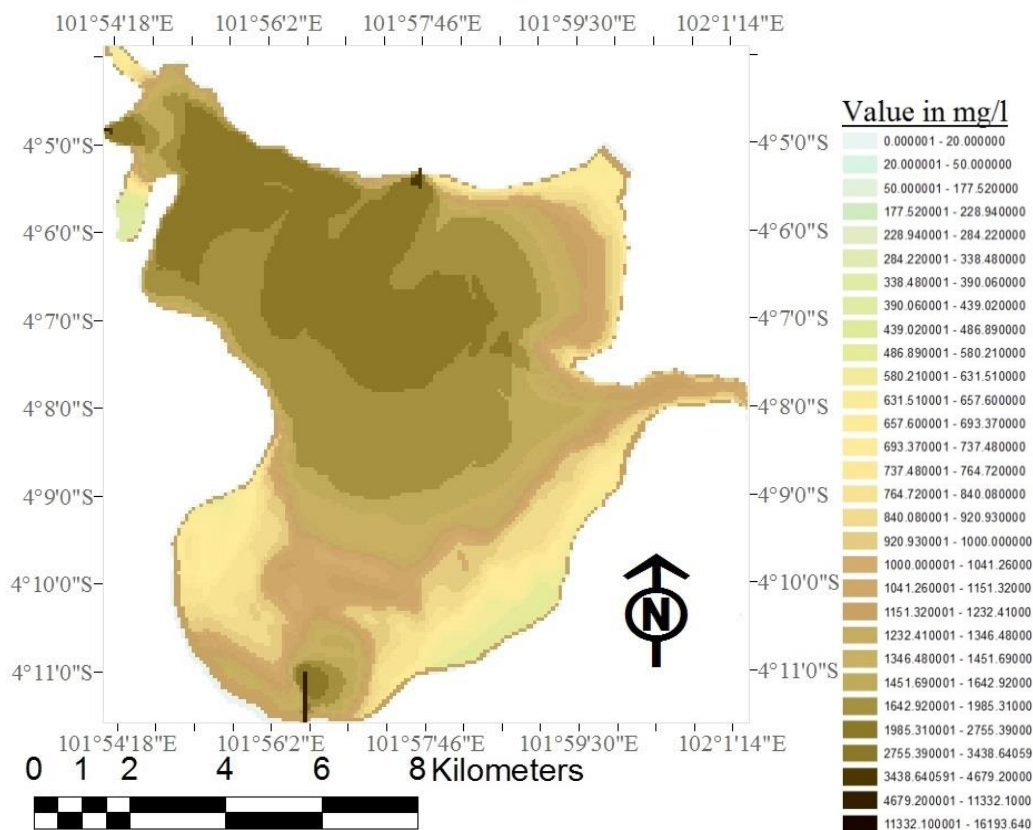
Gambar 6 diketahui massa TSS yang mengumpul di sekeliling lingkaran area terdalam antara Zona I dan Zona III dan mengalir menuju titik efluen. Konsentrasi TSS di dalam lingkaran putaran arus air di setiap lapisan lebih rendah dibandingkan konsentrasi sedimen yang berada di area sekeliling lingkaran tersebut. Dari Gambar 7 diketahui kecepatan vektor arus air yang semakin tinggi ke arah area terdalam antara Zona I dan Zona III, kemudian di area terdalam terjadi putaran arus air yang melingkar. Vektor arus air di lapisan 1 hingga lapisan 5 yang berada di area terdalam tersebut bergerak menuju titik efluen dengan kecepatan tinggi hingga membentuk tali arus.

Dari Gambar 8 diketahui bahwa akumulasi endapan TSS tertinggi di Danau Tempe terjadi di muara Sungai Batu-batu (area no. 1) dan di sekeliling area terdalam antara Zona I dan Zona III. Gambar 8 juga menunjukkan rute perjalanan massa TSS dari titik influen menuju area terdalam

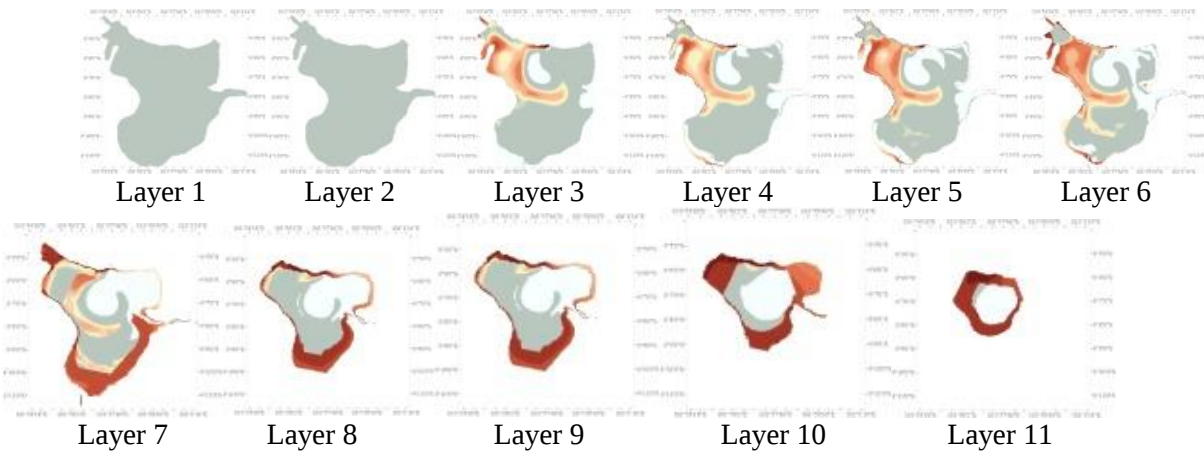
antara Zona I dan Zona III, kemudian mengikuti aliran air keluar dari Danau Tempe menuju titik efluennya.

Simulasi sebaran spasial konsentrasi TSS dari skenario pengaturan rentang Q_{eff} pada luas hidrolik saluran efluen konstan telah berhasil dilakukan. Pola sebaran spasial konsentrasi TSS simulasi tersebut ditampilkan dalam Gambar 9, sedangkan pola sebaran konsentrasi endapan TSS ditampilkan dalam Gambar 10, dan nilai perbandingannya ditampilkan dalam Gambar 11.

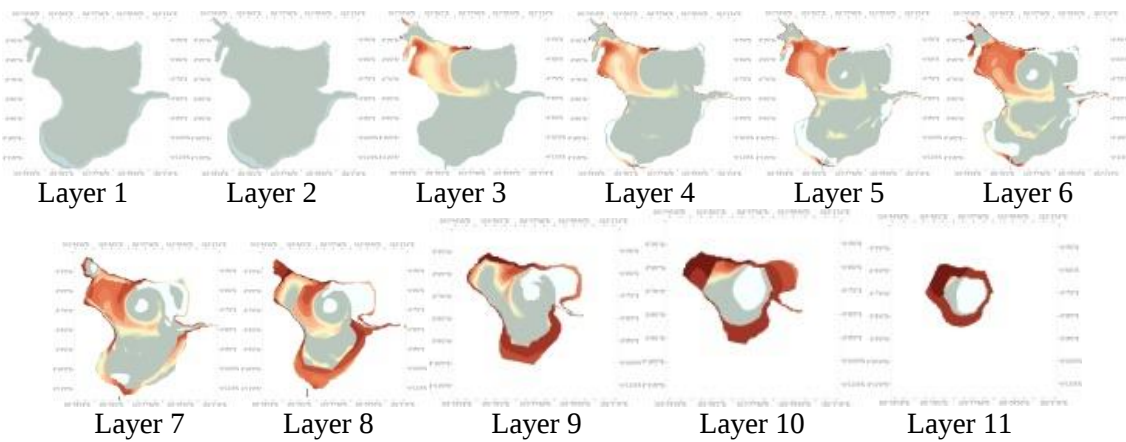
Gambar 9 menunjukkan hasil simulasi distribusi spasial konsentrasi TSS di Danau Tempe dengan skenario pengaturan rentang Q_{eff} pada luas hidrolik saluran efluen konstan. Hasil simulasi tersebut mirip dengan model pola sebaran spasial konsentrasi TSS (Gambar 6). Gambar 9 juga menunjukkan konsentrasi TSS di sekeliling lingkaran area terdalam antara Zona I dan Zona III yang lebih tinggi dibandingkan dengan simulasi model.



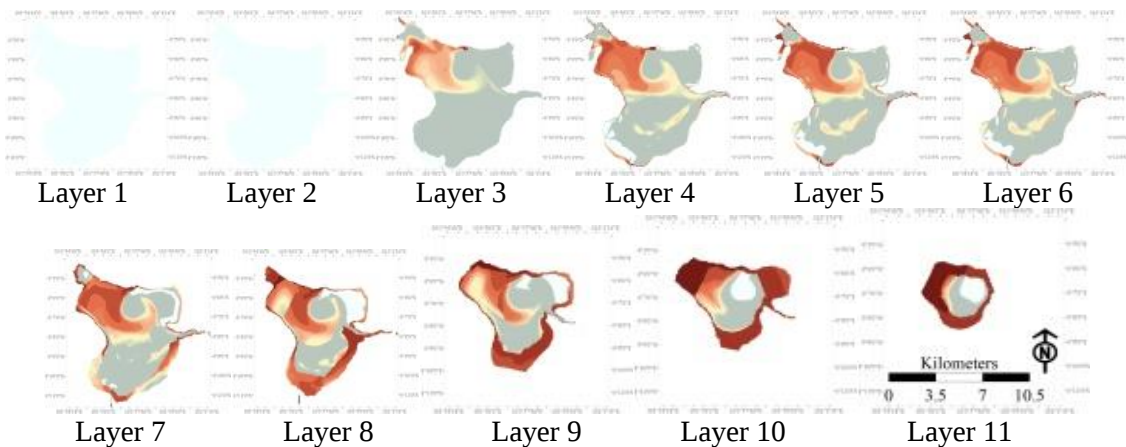
Gambar 8. Sebaran endapan TSS di lapisan dasar Danau Tempe.
Figure 8. Distribution of TSS deposition in Lake Tempe.



(a) Pattern of sedimen concentration distribution for 0.2–1.6 simulation



(b) Pattern of sedimen concentration distribution for 0.4–1.6 simulation

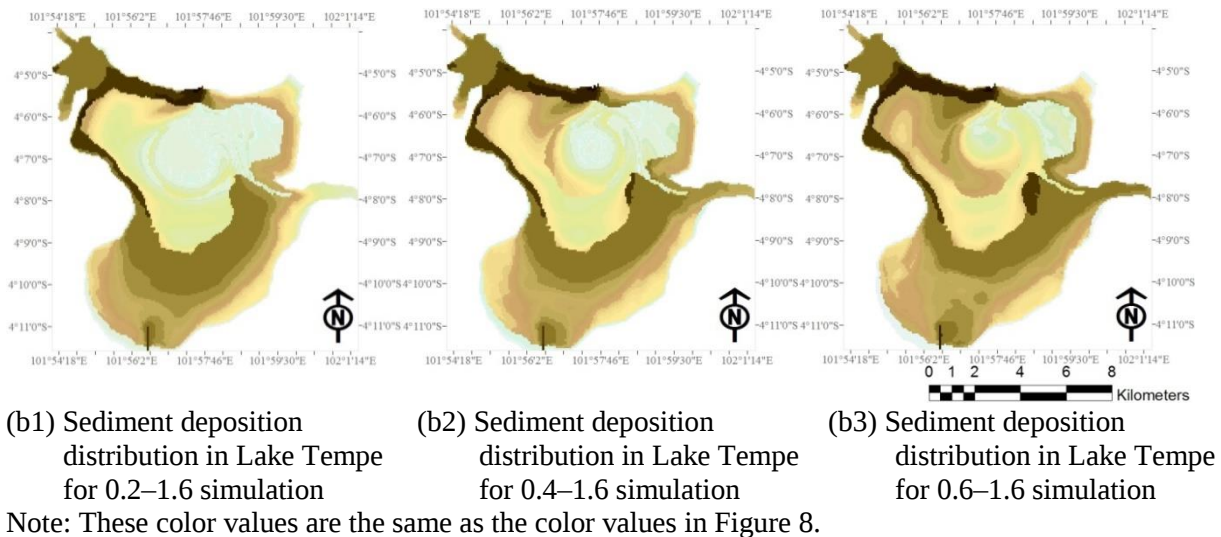


(c) Pattern of sedimen concentration distribution for 0.6–1.6 simulation

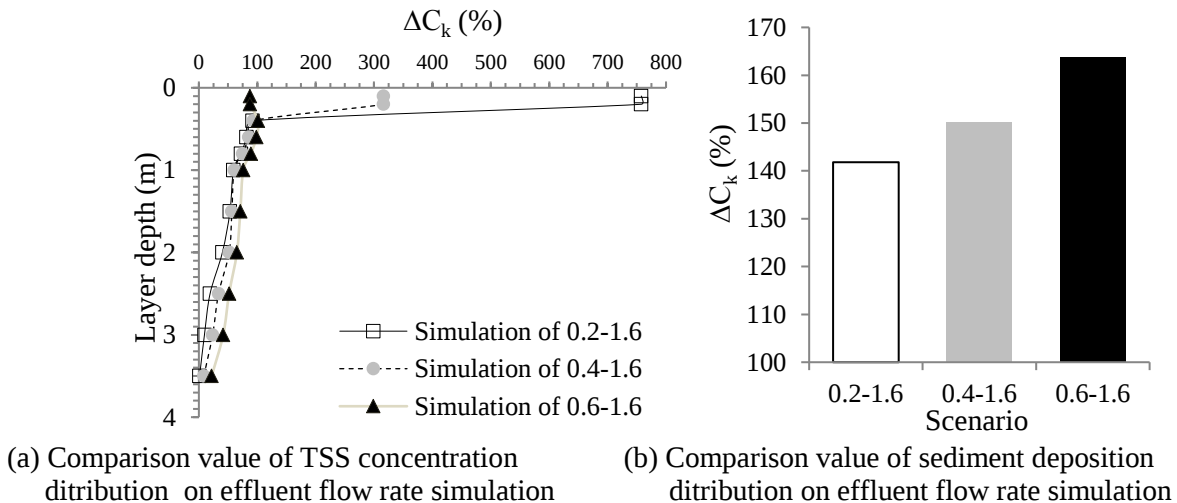
Note: These color values are the same as the color values in Figure 6.

Gambar 9. Simulasi pola sebaran sedimen dari skenario pengaturan rentang Q_{eff} di Danau Tempe.

Figure 9. Simulation of sediment distribution pattern from the Q_{eff} range setting scenario in Lake Tempe.



Gambar 10. Simulasi pola sebaran sedimen dari skenario pengaturan rentang Q_{eff} di Danau Tempe.
Figure 10. Simulation of sediment distribution pattern from the Q_{eff} range setting scenario in Lake Tempe.

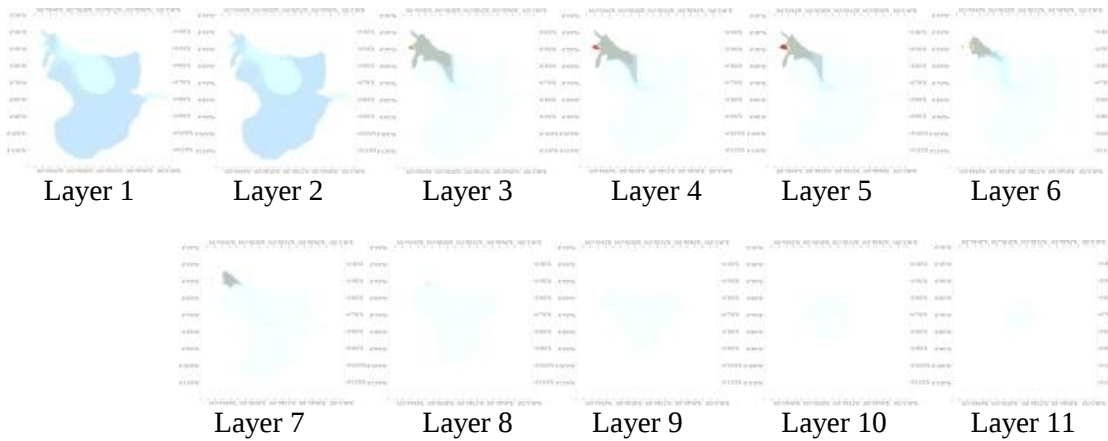


Gambar 11. Nilai perbandingan ΔC_k simulasi pengaturan debit efluen Danau Tempe.
Figure 11. Comparison value ΔC_k of Lake Tempe effluent flow rate simulation.

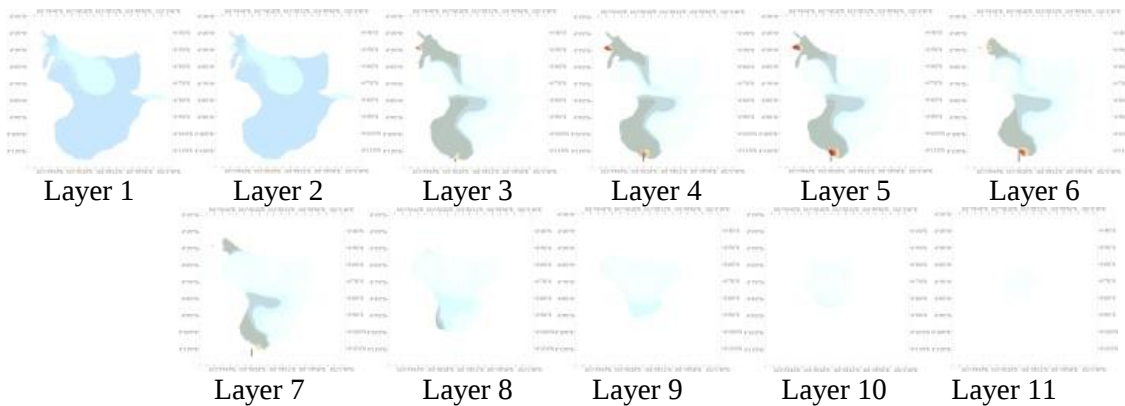
Dari Gambar 11a diketahui nilai ΔC_k simulasi 0,6–1,6 di kedalaman 0 m sampai 0,2 m (lapisan 1 dan 2) sebesar 80%. Nilai ΔC_k di lapisan 3 dan 4 meningkat menjadi 120% dan di lapisan berikutnya menurun hingga di lapisan dasar menjadi 22,2%. Nilai ΔC_k simulasi 0,2–1,6 dan 0,4–1,6 di kedalaman lapisan 0 sampai 0,2 m (lapisan 1 dan 2) sebesar 860% untuk simulasi 0,2–1,6 dan sebesar 320% untuk simulasi 0,4–1,6, kemudian di kedalaman lapisan berikutnya menurun hingga di lapisan dasar menjadi 1,22% untuk simulasi 0,2–1,6 dan 8,55% untuk simulasi 0,4–1,6. Dengan demikian, nilai ΔC_k di kedalaman lapisan 0 sampai 0,2 m paling tinggi adalah simulasi 0,6–1,6, kemudian simulasi 0,4–1,6 dan 0,2–0,6, sedangkan nilai ΔC_k paling tinggi

di kedalaman 0,2 m sampai dasar danau ditunjukkan oleh simulasi 0,2–0,6, kemudian oleh simulasi 0,4–0,6 dan 0,6–1,6. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengendapan tertinggi diperlihatkan oleh simulasi 0,2–0,6 yang diikuti oleh simulasi 0,4–0,6 dan 0,6–1,6. Kecenderungan ini sesuai dengan ΔC_k endapan TSS (Gambar 11b), yaitu paling tinggi adalah simulasi 0,6–1,6 (165%), kemudian simulasi 0,4–1,6 (150%) dan 0,2–1,6 (142%).

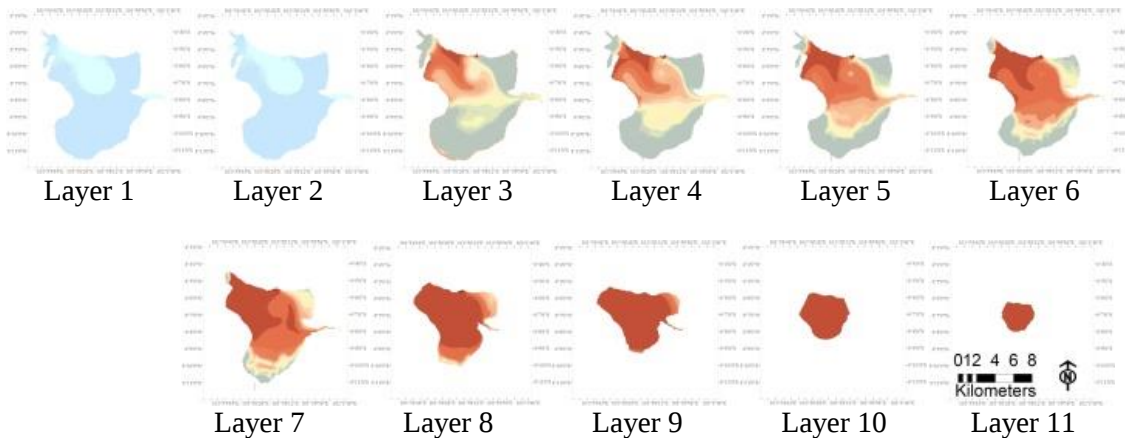
Hasil simulasi sebaran konsentrasi sedimen dengan skenario pengurangan C_{inf} di tiap zona ditampilkan dalam Gambar 12, sedangkan nilai perbandingan (ΔC_k) simulasi tersebut ditampilkan dalam Gambar 13.



(a) Pattern of sediment concentration distribution of Zone II simulation



(b) Pattern of sediment concentration distribution of Zone I-II simulation



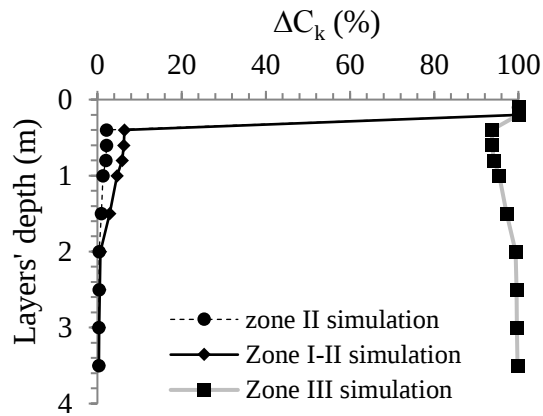
(c) Pattern of sediment concentration distribution of Zone III simulation

Note: These color values are the same as the color values in Figure 6.

Gambar 12. Simulasi pola sebaran konsentrasi sedimen di tiap zona Danau Tempe dari skenario WT.
Figure 12. Simulation of sediment concentration distribution pattern in each zone of Lake Tempe from WT scenario.

Dari Gambar 12 dapat diketahui kecenderungan pola sebaran TSS Danau Tempe hasil simulasi Zona II (hanya dari influen no. 6 dan 7), Zona I-II (hanya dari influen no. 1, 2, 3, 4,

5, 6, dan 7), dan Zona III (hanya dari influen no. 8, 9, 10, 11, dan 12). Kecenderungan simulasi tersebut tidak berubah apabila dibandingkan dengan model pola sebaran sedimen (Gambar 13).



Gambar 13. Nilai perbandingan (ΔC_k) simulasi sebaran konsentrasi sedimen di Danau Tempe dari skenario beban tersuspensi di tiap zona.
 Figure 13. Comparison value (ΔC_k) of ditribution simulation of sediment concentration in Lake Tempe from scenario of suspended load in each zone.

Gambar 13 memperlihatkan bahwa simulasi Zona III paling mendekati 100%, yang diikuti oleh simulasi Zona I-II dan Zona II.

Pembahasan

Peta batimetri yang menggambarkan fisik badan air Danau Tempe pada tinggi muka air 5 m dpal diperagakan dengan model segmentasi dan pelapisan badan air. Perbandingan volume dan luas permukaan air Danau Tempe hasil penghitungan segmentasi dan pelapisan (Gambar 4b) dengan hasil penghitungan dari peta batimetri (Gambar 2) menghasilkan nilai 4,76% untuk volume dan 3,84% untuk luas. Dengan demikian, segmen berlapis badan air Danau Tempe (Gambar 4a) dapat digunakan sebagai model badan air pada tinggi muka air 5 m.

Menurut Fajar (2015), luas DAS Bila 1.667 km², DAS Batu-batu 738 km², dan DAS Sidenreng 739 km². Persentase curah hujan rata-rata DAS Bila pada bulan Maret adalah 63%, DAS Sidenreng 17%, dan DAS Batu-batu 20%. Berdasarkan luas DAS dan persentase curah hujan tersebut (Gambar 4b), debit dan beban influen dari Sungai Bila adalah yang paling besar di antara titik-titik influen. Perbandingan $Q_{eff}/\sum_1^{12} Q_{inf}$ menghasilkan nilai yang kurang dari satu, yang berarti bahwa telah terjadi akumulasi air di Danau Tempe pada saat survei. Ketimpangan antara kemampuan pengaliran saluran efluen dan aliran air influen pada saat musim penghujan merupakan ciri-ciri danau rawa banjir seperti Danau Tempe. Berdasarkan Gambar 2 dan Gambar 3, Zona I dan Zona II Danau Tempe relatif dangkal dan landai serta

berteluk, maka Q_{inf} lebih banyak dipakai untuk memperluas genangan ke arah teluk daripada untuk meningkatkan tinggi muka air danau. Menurut Walkowiak (2006), besar debit aliran saluran berbanding lurus dengan tinggi muka air, sehingga pada saat Q_{inf} total besar maka debit Q_{eff} Danau Tempe akan lebih kecil dibandingkan Q_{inf} total. Nilai perbandingan antara Q_{inf} total dengan Q_{eff} yang demikian itu menunjukkan pemilihan waktu survei pada saat debit aliran sungai-sungai influen sedang tinggi yang mengangkut sedimen erosi dari DAS yang melingkupi Danau Tempe. Dengan demikian, identifikasi kondisi pembatas model yang dilakukan dapat mewakili kondisi musim penghujan di DAS Danau Tempe.

Dari kalibrasi parameter model diperoleh diameter rata-rata partikel sedimen Danau Tempe sebesar 8 μ m. Menurut Chou (2014) dan Cao (2015), beban tersuspensi sungai terdiri dari lempung dengan diameter berkisar 0,24–4 μ m dan lanau dengan diameter 4–31 μ m. Menurut Dina (2014), 80% sedimen Danau Tempe di dasar titik observasi 1A hingga 5C adalah liat hingga lanau. Dengan demikian, diameter partikel sedimen hasil kalibrasi model masuk ke dalam kategori lanau yang sesuai dengan hasil penelitian ini.

Menurut Gang (2008), transportasi massa yang berdiameter lebih besar daripada koloid terjadi di dalam air karena arus air (adveksi) dan perbedaan konsentrasi massa (dispersi). Berdasarkan kategori diameter, butir sedimen yang diperoleh dari hasil kalibrasi model adalah lanau (*silt*). Oleh karena itu, transportasi massa lebih banyak dipengaruhi oleh adveksi, sehingga pola sebaran beban tersuspensi di perairan danau (Gambar 6) cenderung mengikuti pola arus air yang terjadi di danau tersebut (Gambar 7).

Menurut Gyr et al. (2006), faktor dominan yang memengaruhi arah dan kecepatan arus air danau adalah gaya yang disebabkan oleh faktor batimetri, morfologi, lapisan air danau, debit aliran influen dan efluen, angin, dan perbedaan kepadatan air. Seperti telah diuraikan dalam faktor pembatas (Gambar 4b), batimetri Danau Tempe memiliki lingkaran area terdalam di antara Zona I dan Zona III dengan lapisan terbanyak (12 lapisan) dan terhubung langsung dengan titik efluen melalui batimetri saluran dengan jumlah lapisan 10, kemudian 8, dan 4 di dekat titik efluen. Dengan batimetri yang demikian, maka penurunan tinggi muka air di titik efluen karena aliran air keluar akan membangkitkan arus air yang cenderung membentuk tali arus dari area terdalam menuju titik efluen, sehingga sedimen yang terakumulasi di sekeliling lingkaran area terdalam tersebut juga akan mengalir menuju titik efluen.

Aliran air dari area terdalam antara Zona I dan Zona III menuju titik efluen menyebabkan tinggi muka air di area terdalam tersebut menurun, sehingga air dari teluk Zona I, II, dan III akan mengalir, menimbulkan arus air menuju area terdalam, bertemu di satu titik, dan menyebabkan putaran arus air di area terdalam antara Zona I dan Zona III (Gambar 7). Pergerakan arus air tersebut menyebabkan beban tersuspensi dari influen Zona I, II, dan III yang masuk ke dalam Danau Tempe mengumpul di area terdalam antara Zona I dan Zona III, kemudian tersebar keluar karena pengaruh gaya sentrifugal yang ditimbulkan oleh putaran arus air di zona tersebut. Dengan arus yang demikian itu, maka konsentrasi sedimen di dalam putaran arus air menjadi lebih rendah daripada di luar lingkaran putaran arus air tersebut (Gambar 6).

Bagian terluar tali arus air yang menuju titik efluen membentur tebing kiri dan kanan danau di titik efluen, sehingga arah arus akan berubah ke kanan dan ke kiri menyusuri tepi danau. Arus yang bergerak ke kanan dari titik efluen menuju teluk di Zona I, dan yang ke kiri menuju teluk di Zona III. Di teluk Zona I dan Zona III, arus air yang berubah arah tersebut bertemu dengan arus air yang menuju area terdalam di zona tersebut, sehingga menyebabkan putaran arus air di teluk Zona I dan Zona III. Arus yang berubah arah tersebut menyebarkan kembali akumulasi sedimen di sekeliling lingkaran area terdalam antara Zona I dan Zona III ke teluk Zona I dan Zona III, sehingga konsentrasi sedimen di lapisan terbawah setiap segmen di Danau Tempe menurun (Gambar 8).

Menurut Walkowiak (2006), debit aliran air adalah perkalian antara kecepatan aliran air

dengan luas hidrolik penampang melintang saluran air tersebut. Skenario pengurangan dan penambahan Q_{eff} pada luas hidrolik penampang melintang efluen yang konstan, akan menurunkan dan meningkatkan kecepatan aliran air di saluran efluen tersebut. Gambar 9 memperlihatkan hasil simulasi distribusi spasial konsentrasi sedimen Danau Tempe dengan skenario pengaturan rentang Q_{eff} pada luas hidrolik saluran efluen konstan. Pada saat kecepatan aliran air efluen rendah, maka kecepatan arus air menuju titik efluen menjadi rendah, sehingga gaya sentrifugal yang dibangkitkan oleh putaran arus di area terdalam dan akumulasi massa sedimen dari setiap influen ke area terdalam juga akan menurun. Pada saat kecepatan aliran air efluen tinggi, maka kecepatan arus air menuju titik efluen meningkat, sehingga gaya sentrifugal yang dibangkitkan oleh putaran arus di area terdalam dan akumulasi massa sedimen ke sekeliling area terdalam juga akan bertambah. Rangkaian mekanisme penyebaran dan pengendapan massa sedimen Danau Tempe dari simulasi dengan skenario perubahan Q_{eff} dengan rentang dari kecil ke besar pada luas hidrolik saluran efluen konstan tersebut juga telah menyebabkan perubahan aliran keluar massa sedimen dari Danau Tempe. Jika rentang pengaturan Q_{eff} semakin sempit, maka pengendapan sedimen semakin tinggi, sehingga konsentrasi beban tersuspensi di kedalaman 0 sampai 0,2 m (lapisan 1 dan 2) semakin rendah dan pengeluaran massa sedimen dari danau juga semakin rendah.

Berdasarkan nilai perbandingan antara hasil simulasi pengurangan beban tersuspensi di tiap zona dan model (Gambar 12 dan Gambar 13), diketahui bahwa sebaran konsentrasi sedimen yang terjadi di Danau Tempe lebih banyak dipengaruhi oleh masukan beban tersuspensi di Zona III (Sungai Bila) dibandingkan dengan masukan beban tersuspensi di Zona I dan Zona II.

Kesimpulan

Sebaran spasial beban tersuspensi di Danau Tempe telah diperagakan dengan model berlapis 2-dimensi. Kalibrasi parameter model tersebut menghasilkan diameter butir dengan kategori lanau. Beban tersuspensi cenderung terakumulasi di sekeliling lingkaran area terdalam antara Zona I dan Zona III Danau Tempe. Semakin sempit rentang debit aliran efluen danau, maka pengendapan beban tersuspensi semakin tinggi, sehingga aliran keluar beban tersuspensi dari perairan danau semakin rendah. Berdasarkan simulasi model dan pengurangan beban

tersuspensi di tiap zona Danau Tempe, akumulasi sedimen terjadi di sekeliling area terdalam antara Zona I dan Zona III, dan faktor yang memengaruhi sebaran TSS di danau tersebut adalah beban tersuspensi dari Sungai Bila dan debit efluen.

Persantunan

Penelitian ini dibiayai oleh kegiatan penelitian Model Rehabilitasi untuk Meningkatkan Produktivitas Ikan Berkelanjutan dan Lestari di Rawa Banjiran Danau Tempe dari sub kegiatan Eksplorasi dan Pemanfaatan Terukur Sumber Daya Hayati Kegiatan Kompetitif LIPI Tahun Anggaran 2014. Ucapan terima kasih ditujukan kepada Peneliti Kepala Sulung Nomosatrio, M.Si dan Rahmi Dina, M.Si, dari Puslit Limnologi LIPI, ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Taufik Lesmana, M.Si yang telah membantu menganalisis sampel sedimen di laboratorium Puslit Limnologi LIPI.

Daftar Pustaka

- APHA. 2005. *Standard methods for the examination of water and wastewater 21st ed.* American Public Health Association Inc. New York. 4175 pp.
- Cao M & A Roberts. 2015. Modelling suspended sedimen in environmental turbulent fluids. *Journal of Engineering Mathematics*, 10.1007/s10665-015-9817-7.
- Chou YJ, FC Wu & WR Shih. 2014. Toward numerical modeling of fine particle suspension using a two-way coupled Euler–Euler model. Part 1: Theoretical formulation and implications. *International Journal of Multiphase Flow*, 64: 35–43.
- Dina R. 2014. *Laporan akhir tahunan kegiatan kompetitif LIPI tahun anggaran 2014*. Pusat Penelitian Biologi. Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia. Cibinong. 119 pp.
- Gang JZ. 2008. *Hydrodynamics and Water Quality, Modelling River, Lakes, and Estuaries*. John Wiley & Sons. Inc. New Jersey. 676 pp.
- Gyr A & H Klaus. 2006. *Sediment Transport: fluid mechanics and its applications*. Vol. 82. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg. 365 pp.
- Harsono E. 2011. Kajian hubungan antara fitoplankton dengan kecepatan arus air akibat operasi Waduk Jatiluhur. *Jurnal Biologi Indonesia*, 7(1): 99–120.
- Harsono E. 2015. Model eutrofikasi 2-dimensi berlapis Waduk Cirata. *Jurnal Sumber Daya Air*, 11(1): 75–90.
- Liu C & M Shen. 2010. A three dimensional k- ϵ -Ap model for water-sediment movement. *International Journal of Sediment Research*, 25(1): 17–27.
- Samuel SM & PRP Masak. 2012. Status trofik dan estimasi potensi produksi ikan di perairan Danau Tempe Sulawesi Selatan. *Bawal Widya Riset Perikanan Tangkap*, 4(2): 121–129
- Setiawan F & H Wibowo. 2013. Karakteristik fisik Danau Tempe sebagai danau paparan banjir. In: GS Haryani (eds). *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan MLI I*. Cibinong, 3 Desember 2013: 306–322.
- Subandi TR, Tandison, MKN Lembah & A Hasanie. 2011. Peningkatan pengelolaan sumber daya air di wilayah pantai dan pesisir Teluk Bone dengan keberadaan bendung gerak Tempe dan Jetis Ala Marunda. *Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) HATHI*, Ambon, Maluku 28–30 Oktober 2011.
- Suyono & Kusnama. 2010. Stratigraphy and Tectonics of the Sengkang Basin, South Sulawesi. *Jurnal Geologi Indonesia*, 5(1): 1–11.
- Walkowiak DK. 2006. *ISCO Open Channel Flow Measurement Handbook*. Teledyne Isco. Lincoln. NE. 482 pp
- Wilcock P, J Pitlick & Y Cui. 2009. *Sediment Transport Primer: Estimating Bed-material Transport in Gravel-bed River*. U.S. Department of Agriculture. 64 pp.
- Yang CT. 2003. *Sediment Transport*. Krieger Publishing Company. Florida. 523 pp.