

ESTIMASI POLA ARUS DANAU RANAU

Eko Harsono, Hendro Wibowo dan Iwan Ridwansyah

Puslitbang Limnologi LIPI

PENDAHULUAN

Danau Ranau yang sebagian besar berada di Propinsi Sumatera Selatan dan sebagian lainnya di Propinsi Lampung, mempunyai luas permukaan rata-rata $128,13 \text{ km}^2$, kedalaman maksimum 221 m dan volume air rata-rata $19,92 \times 10^9 \text{ m}^3$, saat ini dikembangkan untuk pengairan daerah irigasi Ogan-Komering.

Danau Ranau berada pada ketinggian 538,71 m msl, merupakan danau yang proses terbentuknya tidak terlepas dari sejarah tektonik sesar Sumatera yang membentang pada busur gunungapi Sumatra yang mempunyai panjang 1650 Km. Sesar tersebut menghubungkan daerah tektonik regangan selat Sunda di Selatan dengan daerah regangan belakang busur laut Andaman. Pergeseran sepanjang sesar ini akibat tumbukan menyerong dari lempeng Indo-australia di Selatan dengan lempeng Asia di Utara. Danau ini tepatnya berada pada pertemuan antara segmen Kepahiang-Makakau dengan segmen Ranau-Suoh yang mempunyai panjang 50 Km membentang dari sisi timur Danau Ranau sampai Suoh. Berdasarkan hal tersebut, Puslitbang Limnologi LIPI telah melakukan pengumpulan data untuk studi kelimnologian yang diharapkan dapat digunakan untuk data dasar dalam pengembangan dan pelestarian danau Ranau.

Arus dalam badan air danau merupakan parameter penting dalam proses limnologis. Transportasi massa kimiawi, distribusi nutrien, phytoplankton dan detritus di dalam badan air danau sangat dipengaruhi oleh arus dan air danau yang terjadi. Arus danau hingga saat ini masih sangat sulit diukur dengan alat pengukur, hal ini disebabkan oleh lemahnya dan variasi arah dari arus tersebut. Untuk itu dalam penelitian ini, telah dilakukan estimasi pola arus yang terjadi di badan air danau Ranau. Disamping itu, karena kepadatan massa air sangat dipengaruhi oleh suhu air maka dalam penelitian ini juga telah di estimasi pola distribusi suhu badan air danau tersebut.

BAHAN DAN METODE

Estimasi arus badan air danau Ranau, dilakukan dengan persamaan gerak dan kontinuitas cairan 2 dimensi berlapis yang diturunkan dari persamaan Navier-Stokes. Turunan persamaan tersebut adalah sebagai berikut,

- Persamaan gerak air arah sumbu x untuk lapisan permukaan,

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial u_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial u_1}{\partial y} - \frac{(u_{1/2} - u_1)w_{1/2}}{h_1 - \zeta} \\ = f \cdot v_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_1}{\partial y^2} - \frac{\gamma_i^2 (u_1 - u_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2}}{h_1 - \zeta} \end{aligned}$$

- Persamaan gerak air arah sumbu y untuk lapisan permukaan

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_1}{\partial t} + u_1 \frac{\partial v_1}{\partial x} + v_1 \frac{\partial v_1}{\partial y} - \frac{(v_{1/2} - v_1)w_{1/2}}{h_1 - \zeta} \\ = f \cdot u_1 - \frac{1}{\rho_1} \frac{\partial p_1}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_1}{\partial y^2} - \frac{\gamma_i^2 (v_1 - v_2) \sqrt{(u_1 - u_2)^2 + (v_1 - v_2)^2}}{h_1 - \zeta} \end{aligned}$$

Dimana $p_1 = g \cdot \rho_1 \cdot \zeta + 0,5 \cdot g \cdot \rho_1 \cdot h_1$

- Persamaan gerak air arah sumbu x untuk lapisan antara

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} + \frac{(u_{k-1/2} - u_k)w_{k-1/2} - (u_{k-1/2} + u_k)w_{k+1/2}}{h_k} \\ = f \cdot v_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_k}{\partial y^2} \\ + \frac{\gamma_i^2 (u_i - u_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k} - \frac{\gamma_i^2 (u_k - u_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2}}{h_k} \end{aligned}$$

- Persamaan gerak air arah sumbu y untuk lapisan antara

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} + v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} + \frac{(v_{k-1/2} - v_k)w_{k-1/2} - (v_{k-1/2} + v_k)w_{k+1/2}}{h_k} \\ = f \cdot u_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial p_k}{\partial y} + A_x \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} \end{aligned}$$

$$+ \frac{\gamma_i^2 (v_{k-1} - v_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k} - \frac{\gamma_i^2 (v_k - v_{k+1}) \sqrt{(u_k - u_{k+1})^2 + (v_k - v_{k+1})^2}}{h_k}$$

Dimana $\rho_k = g \cdot \rho_1 \cdot \zeta + \sum_{i=1}^{k-1} g \cdot \rho_i \cdot h_i + 0,5 g \cdot \rho_k \cdot h_k$

- Persamaan gerak air arah sumbu y untuk lapisan dasar

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial u_k}{\partial x} - v_k \frac{\partial u_k}{\partial y} + \frac{(u_{k-1/2} - u_k) w_{k-1/2}}{h_k} \\ & = f \cdot v_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 u_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 u_k}{\partial y^2} \\ & + \frac{\gamma_i^2 (u_{k-1} - u_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k} - \frac{\gamma_i^2 u_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{h_k} \end{aligned}$$

- Persamaan gerak air arah sumbu y untuk lapisan dasar

$$\begin{aligned} & \frac{\partial v_k}{\partial t} + u_k \frac{\partial v_k}{\partial x} - v_k \frac{\partial v_k}{\partial y} + \frac{(v_{k-1/2} - v_k) w_{k-1/2}}{h_k} \\ & = f \cdot u_k - \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial x} + A_x \frac{\partial^2 v_k}{\partial x^2} + A_y \frac{\partial^2 v_k}{\partial y^2} \\ & + \frac{\gamma_i^2 (v_{k-1} - v_k) \sqrt{(u_{k-1} - u_k)^2 + (v_{k-1} - v_k)^2}}{h_k} - \frac{\gamma_i^2 v_k \sqrt{u_k^2 + v_k^2}}{h_k} \end{aligned}$$

Dimana, $\rho_k = g \cdot \rho_1 \cdot \zeta + \sum_{i=1}^{k-1} g \cdot \rho_i \cdot h_i + 0,5 g \cdot \rho_k \cdot h_k$

- Persamaan kontinuitas lapisan permukaan

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial \{u_1 (h_1 + \zeta)\}}{\partial y} + \frac{\partial \{v_1 (h_1 + \zeta)\}}{\partial y} - w_{1/2} = R_{in} - R_e$$

- Persamaan kontinuitas lapisan antara

$$\frac{\partial (u_k h_k)}{\partial x} + \frac{\partial (v_k h_k)}{\partial y} + w_{k+1/2} - w_{k-1/2} = 0$$

– Persamaan kontinuitas lapisan dasar

$$\frac{\partial(u_k h_k)}{\partial x} + \frac{\partial(v_k h_k)}{\partial y} + w_{k-\frac{1}{2}} = 0$$

t = waktu (det) ; h_k = tinggi lapisan ke k (m); ζ = muka air dari muka air rata-rata (m) ; u_k dan v_k = kecepatan rata-rata arus air untuk arah sumbu x dan y (m/det) ; $u_{k+\frac{1}{2}}$ = kecepatan arus air antara lapisan ke k dengan $k+1$ untuk arah sumbu x (m/det) ; $v_{k+\frac{1}{2}}$ = kecepatan arus air antara lapisan ke k dengan $k+1$ untuk arah sumbu y (m/det); $w_{k+\frac{1}{2}}$ = kecepatan arus air vertikal antara lapisan ke k dengan $k+1$ (m/det) ; ρ_k = kepadatan air pada lapisan air ke k (kg/m^3); p_k = tekanan air pada lapisan ke k (kg/m-det^2); A_x dan A_y = difusi vitas momentum Eddy dalam arah sumbu x dan y (m^2/det); γ_i = koefisien gesekan antar lapisan air ; γ_b = koefisien gesekan di dasar danau ; f = faktor coriolis (1/det) ; R_{in} = laju kenaikan permukaan air danau karena masukan air dan hujan (m/det) ; R_e = laju penurunan permukaan air danau karena evaporasi (m/det).

Kepadatan air danau dalam penelitian ini dikoreksi oleh suhu airnya. Koreksi tersebut adalah sebagai berikut,

$$\rho_k = a_0 + a_1(T_k - 273) + a_2(T_k - 273)^2 + a_3(T_k - 273)^3 + a_4(T_k - 273)^4 + a_5(T_k - 273)^5$$

Dimana a_0 hingga a_5 = konstanta , sedangkan T adalah temperatur air pada lapisan ke k ($^{\circ}\text{K}$) yang di estimasi dengan persamaan neraca panas sebagai berikut,

– lapisan permukaan

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_1(h_1 + \zeta)}{\partial t} = & \frac{\partial(M_{x1}T_1)}{\partial x} - \frac{\partial(M_{y1}T_1)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_{x1}(h_1 + \zeta) \frac{\partial T_1}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_{y1}(h_1 + \zeta) \frac{\partial T_1}{\partial y} \right\} \\ & - K_z(T_1 - T_2) + w_{\frac{1}{2}} T^* + \frac{1}{\rho_w c_p} (q_o - q_{\frac{1}{2}}) - \frac{1}{\rho_w c_p} (q_e + q_c + q_r) + R_{in} T_{in} \end{aligned}$$

– lapisan antara

$$\frac{\partial T_k h_k}{\partial t} = \frac{\partial(M_{xk}T_k)}{\partial x} - \frac{\partial(M_{yk}T_k)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_{xk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K_{yk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial y} \right\}$$

$$-K_z(T_{k-1} - T_k) - K_z(T_k - T_{k+1}) - w_{k-\frac{1}{2}}T^* + w_{k-\frac{1}{2}}T^* + \frac{1}{\rho_w c_p} (q_{k-\frac{1}{2}} - q_{k+\frac{1}{2}})$$

- lapisan dasar

$$\frac{\partial T_k h_k}{\partial t} = \frac{\partial (M_{xk} T_k)}{\partial x} - \frac{\partial (M_{yk} T_k)}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ K_{xk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yk} h_k \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) - K_z(T_{k-1} - T_k) - w_{k-\frac{1}{2}}T^* - \frac{1}{\rho_w c_p} (q_{k-\frac{1}{2}} - q_{k+\frac{1}{2}})$$

M_{xk} dan M_{yk} = kecepatan arus air vertikal terintegrasi pada arah x dan y (m^2/det); K_x dan K_y = difusivitas panas Eddy (m^2/det); K_z = koefisien pengadukan panas vertikal (m/det); q_0 = kuantitas isolasi pada permukaan air tanpa pemantulan permukaan ($J/m^2 \cdot det$); $q_{k+\frac{1}{2}}$ = kuantitas isolasi pada lapisan antara ke k dan ke k+1 ($J/m^2 \cdot det$); q_e = kehilangan panas di permukaan air danau karena evaporasi ($J/m^2 \cdot det$); q_c = kehilangan panas permukaan air danau karena konduksi thermal ($J/m^2 \cdot det$); q_x = kehilangan panas permukaan air danau karena radiasi panas ($J/m^2 \cdot det$); T_{in} = suhu air masuk ke danau ($^{\circ}K$); ρ_w = kepadatan air (kg/m^3); c_p = panas spesifik air

($J/kg \cdot ^{\circ}K$); $w_{k+\frac{1}{2}} > 0$ maka $T^* = T_{k+1}$ dan $w_{k+\frac{1}{2}} < 0$ maka $T^* = T_k$

Penyelesaian persamaan-persamaan tersebut di atas dilakukan dengan metode beda hingga (finite difference), dimana skema numeriknya digunakan metode 'Alternating Direction Implicit (ADI). Untuk mendapatkan penyelesaian mantap dan menghindari 'floating error', maka tahapan waktu (time step) perhitungan diperkirakan dengan rumus $\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{2gh_{max}}}$,

dimana Δt = tahap waktu perhitungan (detik), Δx = panjang interval segmen (m), g = percepatan gravitasi (m/det^2), h_{max} = kedalaman maksimum danau (m). Kondisi pembatas (boundary condition) untuk penyelesaian persamaan-persamaan diatas adalah segmen-segmen badan air danau yang diperoleh dari peta batimetri danau, dan debit suhu air masuk dan keluar danau yang diestimasi dengan metode pelampung, sedang suhu diukur dengan termometer logger.

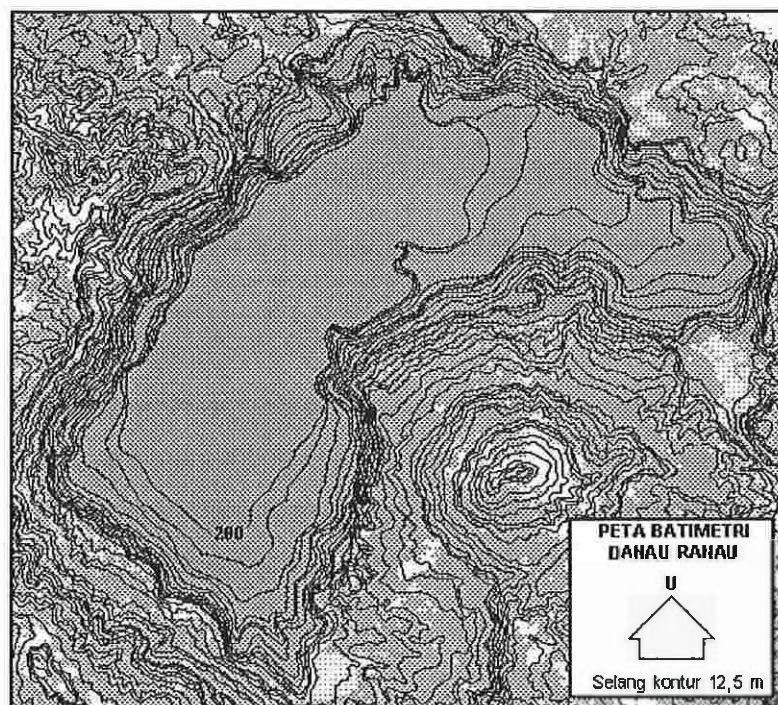
Sedangkan penyelesaian perhitungan dilakukan dengan pemrogram komputer bahasa Fortran pada komputer PC merk Hawlett Packard Kayax-1000, dengan spesifikasi Pentium III/550 MHz, 128 MB RAM, dan 10,1 GB Harddisk.

HASIL DAN PEMBAHASAN

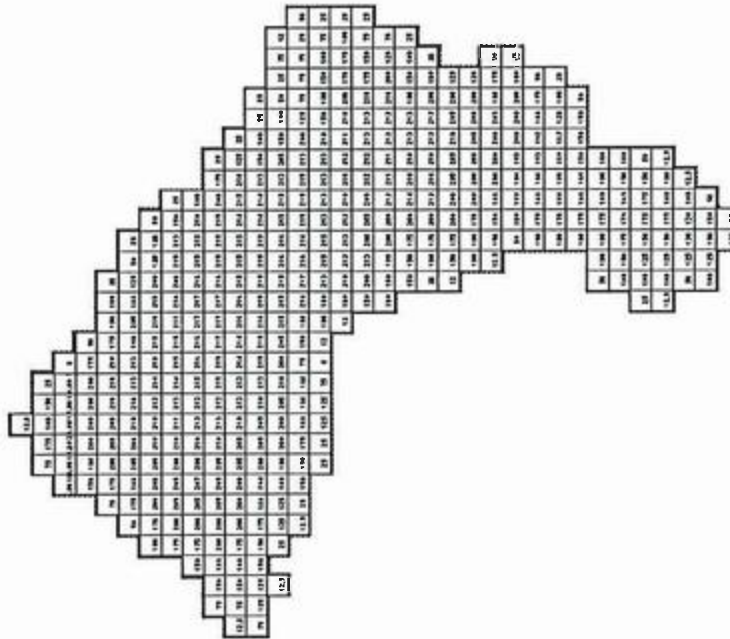
Batimetri danau Ranau di sajikan dalam Gambar 1. Muka air danau rata-rata berdasarkan pemantauan yang telah dilakukan terletak pada ketinggian 538,71 msl. Dari muka air danau tersebut dapat diperoleh kedalaman maksimum 221 m. Dengan demikian berdasarkan kedalaman maksimum dan gravitasi sebesar $9,8 \text{ m/det}^2$, koefisien gesekan dasar 0,0026 serta percobaan running program diperoleh waktu perhitungan $(\Delta t) = 7$ detik dan interval segmen $x, y = 500 \text{ m}$.

Dengan telah diperolehnya interval segmen dan ketebalan lapisan ditentukan 1, 1, 2, 2, 2, 2, 2, 5, 5, 5, 5, 5, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 10, 25, 25, 25, 25, 25 dengan koefisien gesekan antar lapis 0,001 serta iterasi 5 kali maka dapat dibuat segmentasi dari danau Ranau, yaitu seperti dalam Gambar 3.

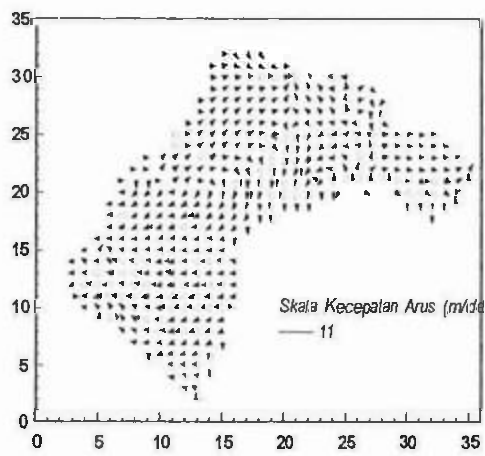
Hasil pengukuran debit dan suhu air yang masuk dan keluar danau Ranau di sajikan dalam Gambar 4.



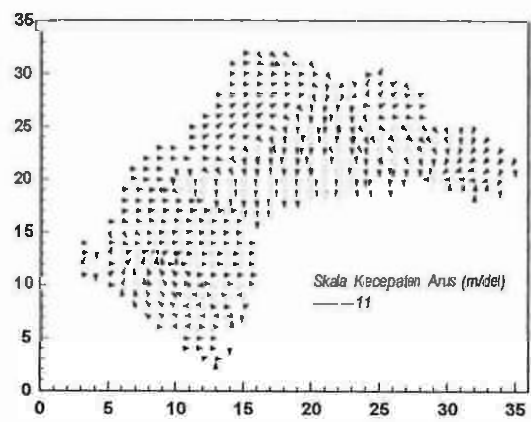
Gambar 1. Peta Batimetri Danau Ranau Hasil Pengukuran



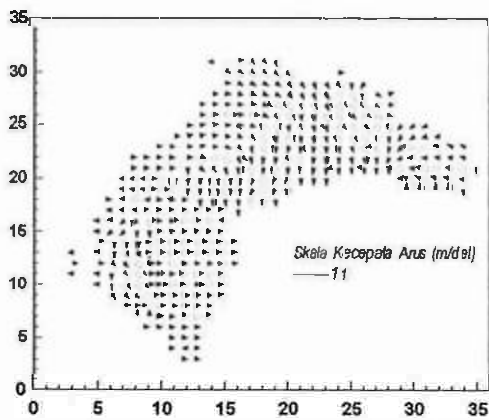
Gambar 1. Peta Batimetri Danau Ranau



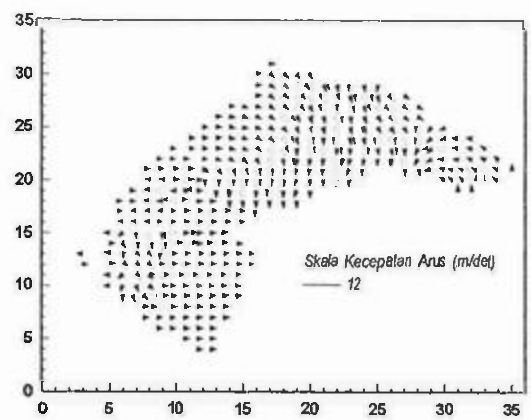
Pola Arus Lapisan 1



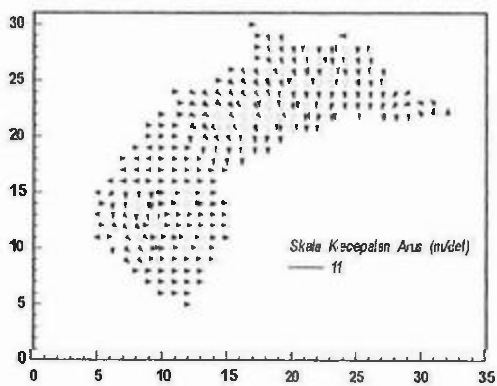
Pola Arus Lapisan 4



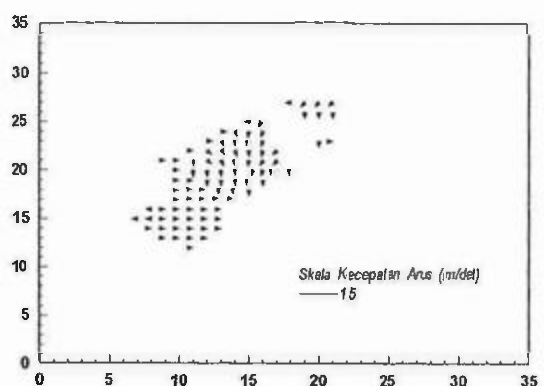
Pola Arus Lapisan 13



Pola Arus Lapisan 18



Pola Arus Lapisan 21



Pola Arus Lapisan 23

Gambar 3. Pola Arus Pada Beberapa Lapisan di Danau Ranau



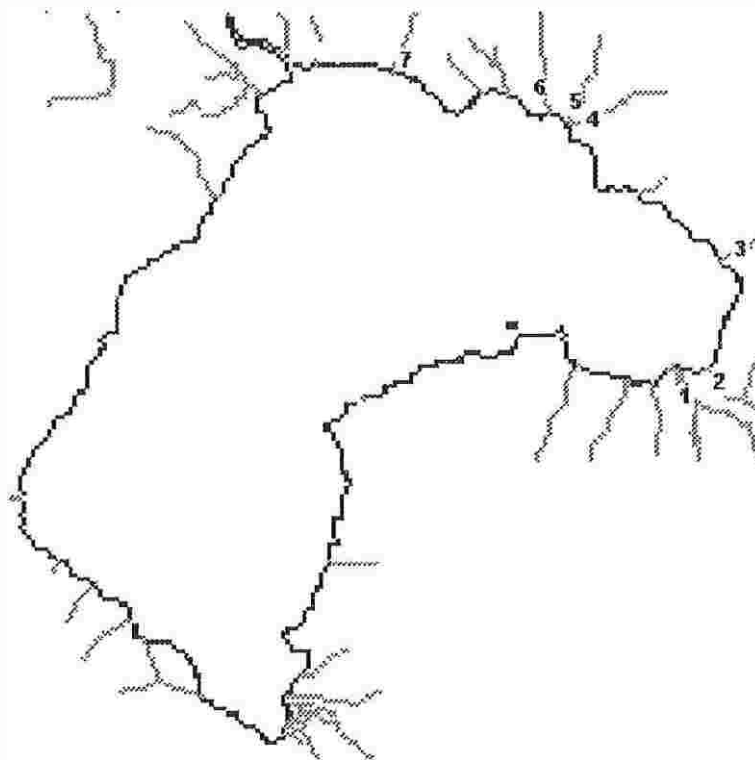
Gambar 4. Suhu Air Permukaan Danau Ranau

Debit Masukan

Pengukuran debit masuk dilakukan Agustus 2000 pada tujuh inlet yang ada aliran dasarnya (Gambar 5). Total debit yang masuk adalah 23,6764 m³/detik dengan kontribusi masing-masing inlet seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Nama sungai dan debit aliran yang masuk ke Danau Ranau

No	Nama Sungai	Debit (m ³ /detik)
1	WayWarkuk	20,1249
2	Way Pilla	1,1678
3	Way Meijin	0,9154
4	Way Sepuyuh	0,1707
5	WayKedok	0,2219
6	Way Senangkal	0,8749
7	Way Sebarak	0,1958



Gambar 5. Inlet Danau Ranau

Dari Gambar 3 dan Gambar 5 dapat diketahui bahwa debit inlet tidak mempengaruhi pola arus di Danau Ranau. Pola arus permukaan lebih dipengaruhi oleh faktor *colioris*, sedang pola arus pada lapisan-lapisan di bawahnya dipengaruhi oleh perbedaan kepadatan air danau itu sendiri. Hasil perhitungan model distribusi panas menunjukkan bahwa pada interval $0,1^{\circ}$ C suhu permukaan tidak menunjukkan perbedaan yang berarti. Perbedaan suhu terlihat di dekat mata air panas karena pengaruh rembesan air panas di kaki Seminung (Gambar 4)