

Evaluasi Erosi dan Siltasi Danau Tondano Berdasarkan Sifat Hidrologi dan Tanah dari Daerah Aliran Sungainya

Evaluation of Erosion and Siltation of Lake Tondano Based on the Hydrological and Soil Characteristics of Its Catchment

HIKMATULLAH, SUBAGYO H., U. KURNIA, DAN L.I. AMIEN¹

ABSTRAK

Danau Tondano di Propinsi Sulawesi Utara mempunyai peran sangat penting sebagai sumber air bersih bagi Kota Manado, pembangkit listrik, perikanan, dan pariwisata. Danau tersebut diduga telah mengalami pendangkalan yang melampaui batas toleransi akibat erosi, sehingga dikhawatirkan dapat menurunkan kuantitas dan kualitas airnya. Untuk mengetahui kemungkinan terjadinya pendangkalan Danau Tondano yang disebabkan oleh proses erosi dilakukan penelitian melalui analisis data hidrologi dan tanah daerah aliran sungai (DAS). Analisis data hidrologi meliputi debit sungai dan debit sedimen terangkut yang masuk ke dalam danau, kedalaman danau, dan neraca air danau. Analisis data tanah meliputi sifat-sifat fisik dan kimia, laju infiltrasi dan pendugaan tingkat bahaya erosi DAS Tondano dengan metode *universal soil loss equation* (USLE). Hasil penelitian menunjukkan bahwa fluktuasi tinggi muka air danau dan debit air ke luar sangat bergantung pada besarnya curah hujan. Kandungan sedimen terangkut, yang dibawa aliran sungai masuk ke danau sebesar 7.540 t/tahun. Apabila kandungan sedimen tersebut dibandingkan dengan volume danau sebesar 680 juta m³, maka danau akan terisi penuh sedimen dalam jangka waktu ribuan tahun. Kedalaman danau terdalam saat ini adalah 22 m, dan selama satu abad terakhir diduga telah terjadi pengurangan kedalaman danau sebesar 6 m. Laju infiltrasi tanah-tanah utama termasuk sedang sampai sangat cepat (22-71 cm/jam) dan masih lebih besar dibandingkan dengan intensitas hujan maksimum absolut, sehingga aliran permukaan yang terjadi sangat kecil. Laju erosi yang menunjukkan 94% dari luas DAS, lebih rendah dari batas toleransi maksimum (< 12 t/ha/tahun). Hasil penelitian ini membuktikan bahwa kondisi hidrologis dan tanah DAS Tondano belum mengalami kerusakan yang parah akibat erosi, sehingga Danau Tondano tidak mengalami pendangkalan yang dipercepat oleh hasil erosi dari wilayah DAS di sekelilingnya.

ABSTRACT

The lake Tondano in North Sulawesi Province, has very important role, namely as the source of domestic water use for Manado town, electric power generator, fisheries, and tourism. It has been issued to serious siltation process over the tolerable limit due to soil erosion, so that the water quantity and quality are worried to be decrease. The objective of the research is to study the possibility occurring of lake siltation caused by soil erosion, by analyzing the hydrological and soil characteristics data from the Tondano catchment. The hydrological data analysis includes the river discharge and sediment discharge entering the lake, lake depth, and lake water balance. The soil data analysis consists of chemical and physical soil properties,

soil infiltration rate, and erosion hazard of the catchment predicted by universal soil loss equation (USLE) method. The results indicate that the water lake level fluctuation and the outlet discharge depend on the amount of rainfall. The discharge of sediment suspension entering the lake was 7,540 tons per year compared to the lake volume as much as 680 millions m³, the lake would be full-filled by the sediments in thousands of years. The measured deepest lake depth at present is about 22 m, and during the last century, the lake was decrease as much as 6 m. The infiltration rate of main soils varies from moderate to very rapid (22- 71 cm/hr), and are still higher than the maximum absolute rainfall intensity, so that overland flow occurs very little. The amount of soil loss by erosion indicates that 94% of the catchment area is lower than the maximum tolerable limits (< 12 t/ha/yr). This research has proved that the hydrological and soil condition of the Tondano catchment have not yet been serious degradation caused by erosion, so that the accelerated siltation due to erosion process was not occur in the lake catchment and its surrounding.

Keywords : Lake siltation, Soil erosion, soil infiltration, Catchment, North Sulawesi.

PENDAHULUAN

Danau Tondano seluas 4.800 ha dengan luas daerah aliran sungai (DAS) sekitar 31.400 ha di Kabupaten Minahasa, Propinsi Sulawesi Utara diisukan telah mengalami proses pendangkalan yang serius akibat erosi. Pendangkalan tersebut telah jauh melampaui ambang batas toleransi dari 12 m³/tahun menjadi 54 m³/tahun atau 4,5 kali lipat. Selama kurun waktu 1939-1992, luas danau menciut dari 5.600 ha menjadi 3.400 ha, dan kedalamannya berkurang dari 42 m menjadi 16 m (Amien dan Runtunuwu, 1995). Apabila tidak ada usaha pencegahan, maka diduga sekitar tahun 2020 danau tersebut akan menjadi daratan. Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah (BRLKT,, 1992) melaporkan bahwa kedalaman rata-rata

¹ Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor

Danau Tondano tahun 1934 tercatat 40 m, tahun 1983 kedalaman paling dalam 27 m, sedang tahun 1988 menjadi 20 m, dan terakhir tahun 1992 dilaporkan tinggal 16 m. Informasi ini telah menimbulkan kekhawatiran bagi pemerintah daerah dan masyarakat setempat, karena danau tersebut mempunyai banyak fungsi.

Danau Tondano saat ini dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik tenaga air (PLTA) di tiga stasiun, yaitu: Tonsea Lama, Tanggari I dan Tanggari II, sumber air bersih, perikanan, dan pariwisata (Bappeda Tk II Minahasa, 1994). Mengingat pentingnya fungsi danau tersebut, pihak pemerintah daerah telah meminta Proyek Evaluasi dan Perencanaan Sumber Daya Lahan II untuk meneliti sumber daya tanahnya (Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, 1995). Hasil pendugaan erosi dengan metode USLE menunjukkan bahwa, tingkat erosi tahunan yang terjadi cukup besar, sehingga jika tidak ada usaha-usaha pencegahan erosi dan siltasi, Danau Tondano diperkirakan akan menjadi daratan dalam jangkang waktu 25 tahun mendatang (BRLKT, 1992). Akan tetapi setelah dievaluasi, data yang digunakan BRLKT tersebut masih bersifat kasar, sehingga diduga terjadi hasil duga yang berlebihan (*overestimate*). Amien dan Runtuuwu (1995) melaporkan dari hasil penelitian pendahuluan, bahwa kondisi hidrologis Danau Tondano secara umum masih cukup baik. Proses erosi dan sedimentasi yang terjadi masih normal, artinya laju erosi tanah sama atau lebih rendah dari batas toleransi maksimum. Bergsma (1986) menyebutkan batas toleransi maksimum erosi sebesar 12 t/ha/tahun untuk tanah dalam.

Isu adanya pendangkalan dan pencemaran danau diduga disebabkan oleh beberapa faktor yaitu: (a) aktivitas pembersihan vegetasi bawah pada perkebunan cengkih rakyat, terutama pada masa harga cengkih tinggi tahun 1970-1985, (b) pelumpuran tanah sawah di sekitar danau, yang menyebabkan tanah tersuspensi dan sebagian hanyut ke dalam danau, (c) sisa penggunaan pupuk atau bahan organik yang mengalir ke danau, dan

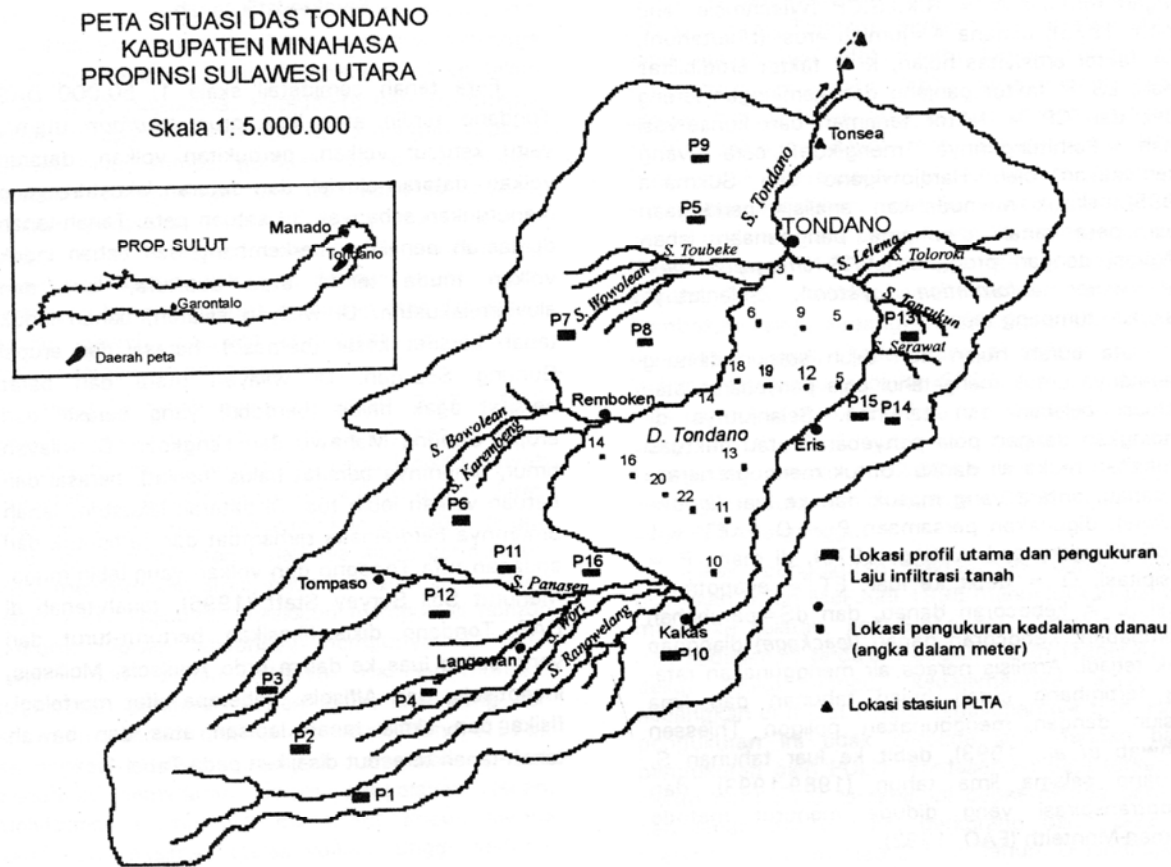
merangsang pertumbuhan gulma air (eutrofikasi), (d) pembuangan sampah rumah tangga, dan (e) perluasan daerah pemukiman yang menambah permukaan kedap.

Untuk menjawab isu pendangkalan tersebut, telah dilakukan suatu penelitian untuk menganalisis sifat-sifat hidrologi dan tanah DAS Tondano, dalam kaitannya dengan kemungkinan terjadinya erosi dan pendangkalan. Makalah ini membahas masalah erosi dan pendangkalan Danau Tondano berdasarkan analisis aspek neraca air, debit sungai dan kadar sedimen terangkut, laju infiltrasi tanah, serta pendugaan bahaya erosi.

BAHAN DAN METODE

Bahan-bahan penelitian terdiri atas foto udara hitam-putih wilayah DAS Tondano skala 1:25.000 tahun 1992, peta rupa bumi skala 1:50.000 tahun 1993, peta geologi skala 1:250.000 (Efendi, 1976) dan peta agroklimat Sulawesi (Oldeman and Darmiyati, 1977). Peta kontur dasar danau (*bathymetric*) tahun 1994, peta ketinggian muka air danau periode 1981-1994 (Perusahaan Umum Listrik Negara, 1994), dan data debit ke luar Danau Tondano periode 1989-1993 dari Dinas Pengairan PU. Data curah hujan selama periode 1986-1994 dari tujuh stasiun pengamat, serta data intensitas curah hujan maksimum absolut periode 1991-1994 yang diperoleh dari Badan Meteorologi dan Geofisika, Dinas Pengairan, dan Perusahaan Umum Listrik Negara (PULN).

Peta tanah semidetil skala 1:50.000 DAS Tondano disusun berdasarkan hasil interpretasi foto udara dan pengamatan lapangan menggunakan pendekatan *pedogeomorphic* atau *landform* (Zinck and Valenzuela, 1990), serta ditunjang oleh informasi peta rupa bumi, geologi, dan agroklimat. Selanjutnya peta tanah tersebut digunakan sebagai dasar penentuan laju infiltrasi dan pendugaan bahaya erosi. Sejumlah contoh tanah diambil untuk dianalisis tekstur, C-organik, berat isi (BD), dan permeabilitasnya.



Gambar 1. Peta situasi Danau Tondano dan daerah aliran sungainya
Figure 1. Situation map of lake Tondano and its Catchment

Pengukuran laju infiltrasi tanah dilakukan pada tanah-tanah utama menggunakan *double ring infiltrometer*, dengan dua ulangan. Pengukuran tersebut dilakukan sampai muka air menjadi konstan atau jenuh, dan selanjutnya laju infiltrasi tanah dihitung dengan persamaan: $I = aT^{-b}$, dimana I = laju infiltrasi, a = konstanta, T = waktu, dan b = pangkat eksponensial. Data laju infiltrasi digunakan untuk mengetahui kapasitas infiltrasi tanah, aliran permukaan, dan membandingkannya dengan data intensitas hujan maksimum absolut.

Pengukuran kecepatan arus (*velocity*) dan debit sungai dilakukan pada musim hujan (Mei-Juni 1995) pada lokasi dekat danau, yaitu pada Sungai

Panasen, Ranowelong, dan Bowolean, serta sembilan sungai pemasok air lainnya. Pengukuran dilakukan dengan *current meter*, dua kali ulangan. Di lokasi pengukuran, diambil contoh airnya untuk dianalisis kandungan sedimen yang masuk ke danau. Kecepatan arus dihitung dengan rumus $V = 0,1351 n + 0,023$, dimana V = kecepatan arus, n = jumlah rotasi pada alat *current meter*. Debit sungai dihitung dari hasil perkalian antara kecepatan arus dengan luas penampang sungai yang diukur. Untuk menduga jumlah sedimen yang masuk ke danau digunakan rumus: $Q_s = C \times Q_w$, (Shen and Jullien, 1992), di mana Q_s = debit sedimen terangkut (g/detik), C = konsentrasi sedimen (g/l), dan Q_w = debit sungai (l/detik).

Debit sedimen adalah jumlah sedimen terangkut dalam air pada saat pengukuran debit sungai.

Pengukuran kedalaman danau dan pengambilan contoh sedimen permukaan dasar danau menggunakan alat jangkar dengan motor boat pada beberapa transek arah timur-barat, untuk mengetahui kedalaman danau saat ini (Mei-Juni 1995), dan untuk menganalisis sifat-sifat fisik-kimia sedimen di laboratorium.

Pendugaan jumlah erosi total tahunan dilakukan untuk setiap satuan tanah dari setiap satuan peta tanah menggunakan pendekatan metode USLE dengan formula $A = R.K.LS.CP$ (Wischmeier and Smith, 1978), dimana A = jumlah erosi (t/ha/tahun), R = faktor erosivitas hujan, K = faktor erodibilitas tanah, LS = faktor panjang dan kemiringan lereng erosi, dan CP = faktor tanaman dan konservasi tanah. Perhitungannya mengikuti cara yang dikemukakan oleh Hardjowigeno dan Sukmana (1995). Untuk memudahkan analisis pendugaan erosi, peta tanah dan peta penggunaan lahan didigitasi dengan program ILWIS (*integrated land and water information system*), selanjutnya dilakukan tumpang tepat.

Data curah hujan dari tujuh stasiun dihitung rata-ratanya untuk mengetahui pola penyebaran atau fluktuasi bulanan dan tahunan. Selanjutnya dibandingkan dengan pola penyebaran atau fluktuasi perubahan muka air danau. Untuk menduga neraca air danau, antara yang masuk dan ke luar (*inflow-outflow*), digunakan persamaan $P = Q + ET + L + dS$ (Gregory and Walling, 1979), di mana P = presipitasi, Q = debit ke luar, ET = evapotranspirasi, L = kebocoran danau, dan dS = perubahan kelembaban. Kebocoran danau (*leakage*) dianggap tidak terjadi. Analisis neraca air menggunakan rata-rata tertimbang curah hujan tahunan dari lima stasiun dengan menggunakan poligon Thiessen (Schwab *et al.*, 1993), debit ke luar tahunan S. Tondano selama lima tahun (1989-1993), dan evapotranspirasi yang diduga menurut metode Penman-Monteith (FAO, 1992).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik tanah

Peta tanah semidetil skala 1:50.000 DAS Tondano terdiri atas lima grup *landform* utama, yaitu kerucut vulkan, perbukitan vulkan, dataran vulkan, dataran aluvial, dan dataran lakustrin, yang menurunkan sebanyak 39 satuan peta. Tanah-tanah di daerah penelitian berkembang dari bahan induk vulkan muda terdiri atas abu/tufa, lava dan aluvium/lakustrin. Di wilayah selatan, bahan induk tanah bersifat kasar (berpasir), berasal dari erupsi Gunung Soputan. Di wilayah utara dan barat bersifat agak halus (berdebu) yang berasal dari erupsi Gunung Mahawu dan Lengkoan. Di wilayah timur, umumnya bersifat halus (berliat), berasal dari batuan vulkan lebih tua. Di dataran lakustrin, tanah umumnya berdrainase terhambat dan terbentuk dari endapan tufa Tondano dan vulkan yang lebih muda. Menurut Soil Survey Staff (1996), tanah-tanah di DAS Tondano diklasifikasikan berturut-turut dari yang paling luas ke dalam ordo Andisols, Mollisols, Inceptisols, dan Alfisols. Beberapa sifat morfologi, fisika dan kimia tanah lapisan atas dan bawah tanah-tanah tersebut disajikan pada Tabel 1.

Grup Udivitrands dan Hapludands adalah tanah-tanah bertekstur lebih kasar, struktur berbutir halus, permeabilitas cepat dan porositas lebih tinggi dibandingkan dengan tanah-tanah lainnya, sehingga dapat meningkatkan aliran air lebih banyak ke dalam tanah. Grup Argiudolls, Hapludalfs dan Eutropepts bertekstur agak halus sampai halus dengan struktur berbutir halus sampai gumpal sedang, kandungan C-organik cukup tinggi dan permeabilitas sedang, dengan porositas tanahnya yang masih cukup tinggi. Grup Endoaquolls dan Endoaquands yang menempati dataran lakustrin dengan lereng datar, bertekstur lempung berliat di lapisan atas dan liat di lapisan bawah, drainase terhambat dan kadang-kadang tergenang pada musim hujan.

Berat isi tanah bervariasi antara 0,65-1,29 g/cm³, tetapi umumnya > 1,0 g/cm³, kecuali pada

Tabel 1. Sifat-sifat morfologi, fisika dan kimia tanah-tanah utama terpilih di DAS Tondano

Table 1. Selected morphological, physical and chemical properties of main soils in the Tondano catchment

Grup tanah	Kedalaman cm	Pasir %	Liat	Tekstur	Struktur	C-organik %	Berat isi g/cm	Permeabilitas
Udivitrands	0 – 20	84	4	LS	Berbutir halus	1,24	1,29	Cepat
	30 – 60	85	2	LS	Berbutir halus	1,41	1,05	
Hapludands	0 – 20	49	16	L	Berbutir halus	4,28	0,65	Cepat
	30 – 60	51	12	L	Berbutir halus	2,26	0,73	
Argiudolls	0 – 20	38	32	CL	Berbutir halus	1,58	1,04	Sedang
	30 – 60	14	62	C	Sedang bergumpal	0,90	0,86	
Hapludalfs	0 – 20	12	68	C	Berbutir halus	2,43	1,02	Sedang
	30 – 60	3	65	C	Sedang bergumpal	0,60	1,05	
Eutropepts	0 – 20	38	40	C	Berbutir halus	5,49	1,02	Sedang
	30 – 60	22	39	CL	Sedang bergumpal	2,43	1,05	
Endoaquolls/	0 – 20	39	35	CL	Sedang bergumpal	3,15	0,81	Lambat
Endoaquands	30 – 60	17	50	C	Sedang bergumpal	6,25	0,89	

Keterangan: LS= loamy sand; L = loam; CL = clay loam

Hapludands dan Endoaquands serta lapisan bawah Argiudolls yang mempunyai $BD < 0,90 \text{ g/cm}^3$. Sifat-sifat tanah tersebut mencerminkan porositas tinggi, sehingga kemungkinan terjadinya aliran permukaan, yang menimbulkan erosi, pada tanah-tanah tersebut relatif kecil. Argiudolls, meskipun mempunyai horizon B-argilik, lapisan bawahnya mempunyai BD lebih rendah dari lapisan atasnya. Hal ini mungkin disebabkan pengaruh bahan induk lava yang bersifat porus seperti dikemukakan oleh Efendi (1976), sedangkan lapisan atasnya disebabkan oleh pengaruh pemadatan dalam pengolahan tanah. Udivitrands mempunyai BD relatif tinggi, karena kandungan pasirnya (gelas vulkan) tinggi, sedangkan BD Hapludalfs tinggi di lapisan bawah karena kandungan liat meningkat pada horizon B-argilik dan terbentuk dari batuan vulkan lebih tua.

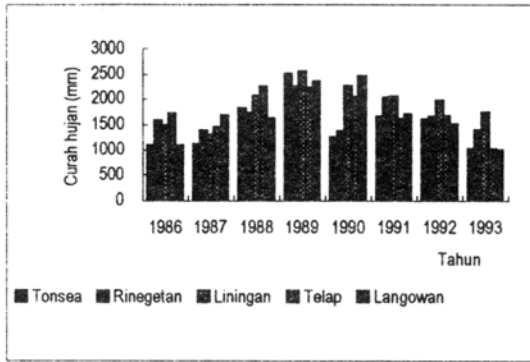
Karakteristik danau

Danau Tondano merupakan kaldera tua, hasil erupsi paroksismal G. Tondano purba selama periode tersier-akhir sampai awal-kuarter (Efendi, 1976). Hasil pengukuran pada peta rupa bumi skala 1:50.000 tahun 1993 dan foto udara skala 1:25.000 tahun 1992 menunjukkan panjang danau sekitar 14 km dan lebar danau 3,5-5,5 km, sedangkan luasnya sekitar 4.800 ha. Air danau dipasok oleh tiga sungai utama yang mengalir

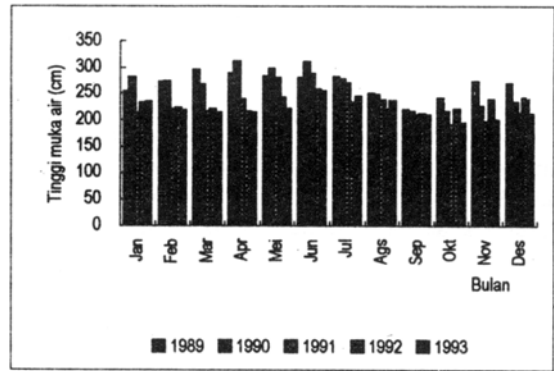
sepanjang tahun yaitu, S. Ranowelang, Panasen, dan Bowolean, dan sembilan sungai-sungai musiman lainnya. Danau ini hanya mempunyai satu *outlet* yaitu S. Tondano.

Kedalaman danau terdalam hasil pengukuran yang dilakukan Belanda tahun 1898 adalah 28 m, yang dijumpai di bagian selatan di antara Remboken-Telap. Di bagian utara, 3,5 km selatan mulut danau, kedalamannya 15 m (Koperberg, 1928). Danau Tondano berbentuk oval atau elips, yang mempunyai sifat waktu tempuh (*time lag*) konsentrasi air relatif lebih lama dibandingkan dengan bentuk bulat, atau bentuk lainnya (Hudson, 1986), sehingga dapat memberikan waktu lebih lama untuk meresapkan air ke dalam tanah di sepanjang perjalanan menuju danau. Kedalaman danau terdalam hasil pengukuran Perusahaan Umum Listrik Negara (1994) dengan alat *Echosounder* adalah 21,5 m di bagian selatan di antara Remboken-Telap, sedangkan di dekat mulut danau di bagian utara, kedalamannya sekitar 12 m. Volume air danau sebesar 682,2 juta m^3 dengan luas permukaannya 53,4 juta m^2 . Volume air danau yang efektif 76,5 juta m^3 berada di antara ketinggian tempat 682-683,5 m dpl. Apabila ketinggian muka air di bawah 682 m dpl, maka kerja PLTA terganggu.

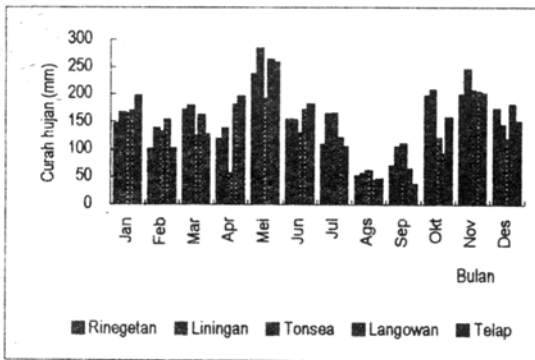
Hasil pengukuran kedalaman danau yang dilakukan bulan Mei-Juni 1995 menunjukkan



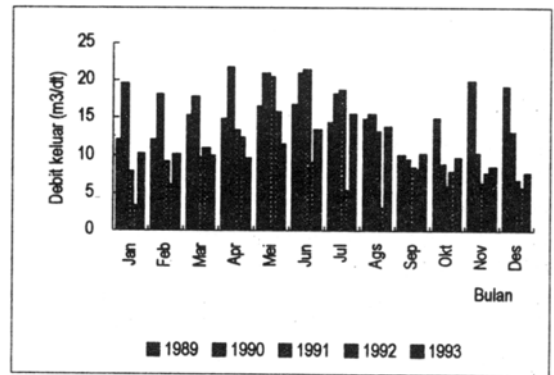
Gambar 2a. Fluktuasi curah hujan tahunan di lima stasiun hujan di DAS Tondano
 Figure Annual rainfall fluctuation in five stations to Tondano catchments



Gambar 3a. Fluktuasi tinggi muka air bulanan Danau Tondano
 Figure Monthly water level fluctuation of lake Tondano



Gambar 2b. Fluktuasi curah hujan bulanan di lima stasiun hujan di DAS Tondano
 Figure Monthly rainfall fluctuation in five stations to Tondano catchments



Gambar 3b. Fluktuasi debit bulanan sungai Tondano
 Figure Monthly outlet discharge fluctuation of river Tondano

bahwa makin ke selatan, kedalaman danau makin dalam, dan kedalaman terdalam adalah 22 m (Tabel 4). Di dekat mulut danau, kedalamannya 9-12 m, sedangkan di mulut danau kedalamannya 6 m. Hasil pengukuran ini tidak berbeda jauh dengan hasil pengukuran oleh PULN. Berdasarkan data tersebut, dalam satu abad terakhir ini dapat diduga bahwa, kedalaman danau telah berkurang dari 15-28 m menjadi 12-22 m, atau 3-6 cm/tahun. Dibandingkan laporan BRLKT (1992), pengurangan kedalaman tersebut jauh lebih kecil.

Fluktuasi curah hujan dan permukaan air danau

Jumlah curah hujan tahunan di lima stasiun pengamat hujan perwakilan (Rinegetan, Liningan,

Tonsea, Telap dan Langowan) selama periode 1986-1994 berkisar antara 1.564-1.762 mm dengan distribusi hampir merata (Gambar 2a). Jumlah curah hujan tahunan tahun 1986-1989 cenderung meningkat dan 1989-1994 menurun kembali. Berdasarkan pola distribusi curah hujan, tampaknya terjadi siklus kenaikan dan penurunan jumlah curah hujan selama lima tahunan. Curah hujan bulanan rata-rata di lima stasiun pengamat mempunyai pola distribusi *bimodal* (Oldeman and Darmiyati, 1977), yaitu mempunyai dua puncak musim hujan (Mei dan November), karena posisinya dekat dengan garis khatulistiwa (Gambar 2b).

Fluktuasi bulanan permukaan air danau (Gambar 3a) dan debit bulanan S. Tondano sebagai

outlet (Gambar 3b) mempunyai pola distribusi yang mirip dengan pola distribusi curah hujan rata-rata bulanan (Gambar 2b) dengan waktu tempuh {time lag} sekitar satu bulan kemudian. Keadaan ini menunjukkan bahwa pasokan air danau sangat bergantung pada fluktuasi curah hujan. Pada saat musim kemarau sekitar Agustus-September, air danau menyusut secara maksimal, sehingga dapat mengganggu kinerja PLTA karena harus mengurangi kerja turbin air. Dengan demikian informasi curah hujan atau peramalan iklim, sangat penting dalam membuat perencanaan antisipasi penurunan debit S. Tondano,

Neraca air danau

Nilai curah hujan tahunan (P) lebih besar dari debit keluar tahunan (Q) S. Tondano. Demikian juga nilai (P-Q) lebih besar dari evapotranspirasi (ET), sehingga terjadi penyimpanan (storage) air. Sedangkan untuk tahun 1990 dan 1993, nilai (P-Q) lebih kecil dari ET (Tabel 2), sehingga terjadi penurunan permukaan air danau yang menyebabkan suplai air ke PLTA terganggu.

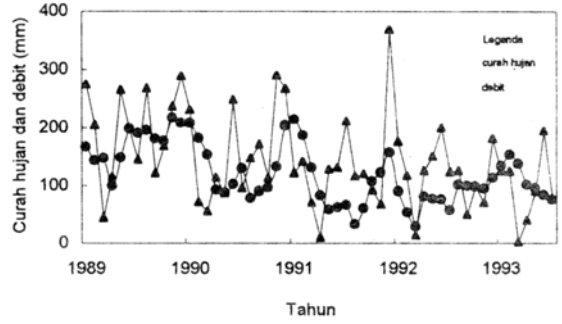
Tabel 2. Neraca air tahunan (aliran masuk-ke luar) Danau Tondano tahun 1989-1993

Table 2. Annual water balance (inflow-outflow) of lake Tondano in 1989-1993

Unsur	1989	1990	1991	1992	1993
P (mm)*	2.344	1.980	1.802	1.669	1.175
Q (mm)	2.497	1.612	1.162	789	1.075
P-Q (mm)	847	386	640	880	100
ET (mm)	655	613	593	622	621
Q/P	0,64	0,81	0,65	0,47	0,92

* F = curah hujan/rainfall, Q = debit ke luar/outlet discharge, ET = evapotranspirasi/evapotranspiration.

Curah hujan tahunan rata-rata tertimbang selama lima tahun (1989-1993) cenderung menurun, sedangkan debit ke luar berfluktuasi. Hal ini dapat diamati pada koefisien korelasi (Q/P) yang bervariasi antara 0,47 -0,92. Pada saat nilai (Q/P) rendah, berarti lebih banyak air yang masuk atau meresap ke dalam tanah. Sebaliknya, jika nilai (Q/P)



Gambar 4. Hubungan antara curah hujan rata-rata bulanan DAS Tondano dan debit ke luar bulanan Sungai Tondano

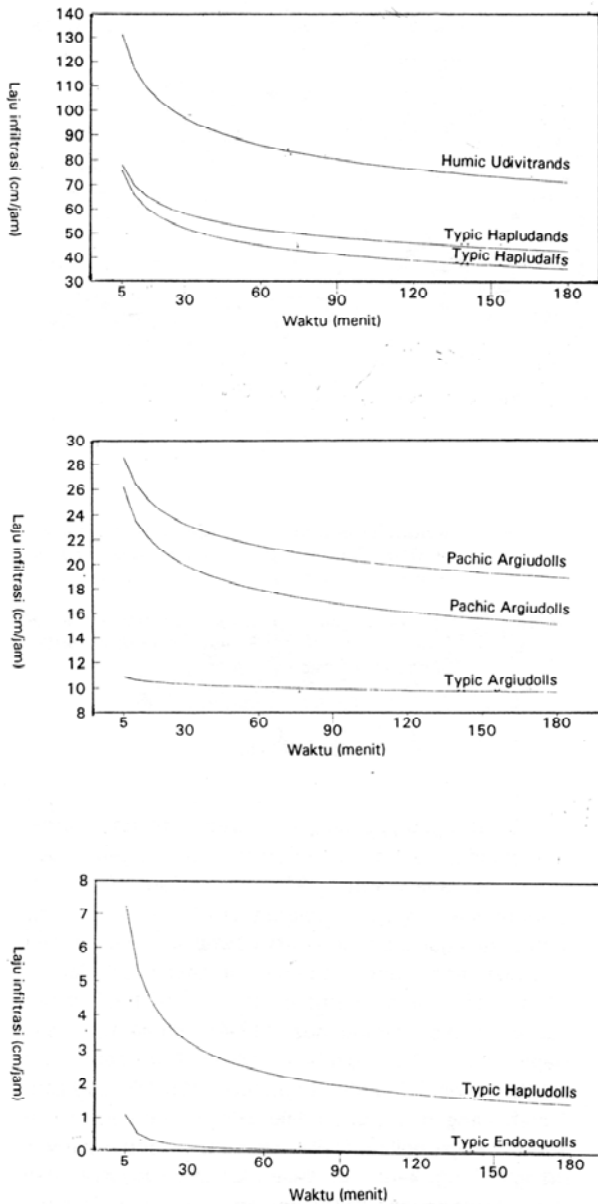
Figure 4. Relation between average monthly rainfall of Tondano catchment and monthly outlet discharge of river Tondano

tinggi, lebih banyak terjadi aliran permukaan, seperti yang terjadi tahun 1993. Tetapi dari hasil uji *ranking rho* Spearman (Siegel, 1956) terhadap nilai (Q/P) tersebut, ternyata hasilnya tidak berbeda nyata, karena nilainya lebih rendah dari 0,90 sebagai nilai kritis untuk n=5. Keadaan ini menunjukkan, bahwa kondisi hidrologi Danau Tondano relatif stabil selama periode 5 tahun tersebut.

Analisis neraca air bulanan selama 5 tahun (1989-1993) dan fluktuasi perubahan air danau berdasarkan hasil analisis bulanan rata-rata tertimbang (*area-weighted*), memperlihatkan bahwa umumnya nilai P lebih besar dari Q (Gambar 4), kecuali pada periode musim kemarau sekitar Juli-September yang mempunyai nilai dS negatif. Penurunan permukaan air danau terjadi selama bulan Januari-Maret 1992 dan 1993 sejalan dengan penurunan jumlah curah hujannya.

Infiltrasi mempengaruhi aspek siklus hidrologi, seperti aliran permukaan, aliran sungai, dan kandungan kelembaban tanah. Tanah-tanah daerah penelitian terbentuk dari bahan vulkan yang terdiri atas abu dan tufa yang bersifat porus, sehingga kapasitas infiltrasi tanahnya umumnya tinggi.

Hasil pengukuran infiltrasi pada beberapa jenis tanah utama, menunjukkan bahwa umumnya



Gambar 5. Laju infiltrasi tanah-tanah utama di DAS Tondano

Figure 5. Infiltration rate of main soils in Tondano catchment

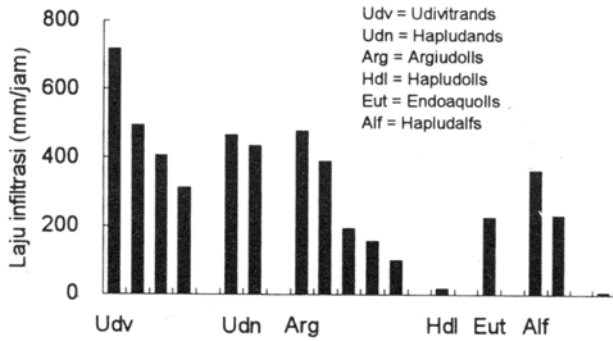
laju infiltrasi termasuk sedang sampai sangat cepat, kecuali tanah di dataran lakustrin yang bertekstur liat pan disawahkan, laju infiltrasinya sangat lambat. Laju infiltrasi cepat, karena sebagian besar tanah terbentuk dari bahan vulkan muda, yang bersifat porus. Tanah yang terbentuk dari lava, seperti Argiudolls, ternyata juga mempunyai laju infiltrasi cepat dan BD relatif rendah, karena lava

tersebut banyak berongga, yang menurut Efendi (1976) diperkirakan mengandung banyak gas pada waktu terjadi erupsi.

Laju infiltrasi

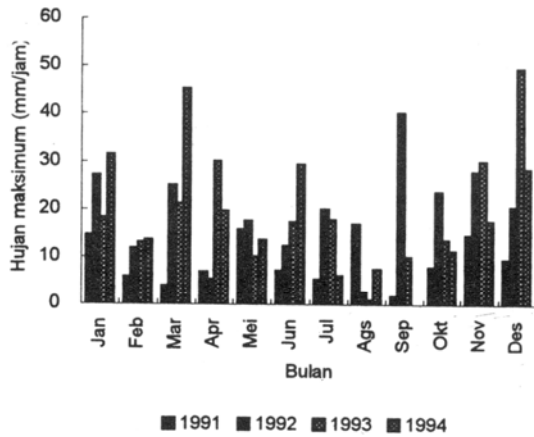
Laju infiltrasi tertinggi pada tanah Humic Udivitrands, yang mempunyai kandungan pasir tinggi, bervariasi antara 31-71 cm/jam. Tanah ini mendominasi wilayah selatan DAS Tondano yang justru sebagai sumber aliran utama (*inlets*), dimana terdapat tiga sungai utama memasok air danau. Tanah lain yang mempunyai laju infiltrasi cepat adalah Typic Hapludands (43-46 cm/jam), Typic Hapludalfs (23-36 cm/jam), Mollic Eutropepts (22 cm/jam), dan Pachic Argiudolls (15-19 cm/jam). Tanah yang mempunyai laju infiltrasi lambat adalah Typic Hapludolls (1,5 cm/jam) yang banyak mengandung kerikil di dalam penampangnya, dan Typic Endoaquolls (0,03 cm/jam) yang berada pada wilayah dataran lakustrin dengan relief datar. Hapludolls mempunyai laju infiltrasi lambat karena mengandung kerikil yang membentuk lapisan agak padat dan berada pada wilayah agak landai. Meskipun mempunyai horizon B-argilik, Argiudolls mempunyai laju infiltrasi cepat, karena strukturnya granular di lapisan atas dan gumpal agak gembur di lapisan bawahnya. Menurut Buol *et al.* (1980), struktur granular dan gumpal umumnya mempunyai permeabilitas relatif cepat.

Laju infiltrasi tanah-tanah tersebut umumnya masih jauh lebih tinggi dibanding intensitas curah hujan maksimum absolut selama periode 1991-1994 (Gambar 6a dan 6b). Berarti, air hujan lebih banyak meresap ke dalam tanah, sehingga aliran permukaan (*overland flow*) yang terjadi kecil atau bahkan tidak terjadi. Sehingga erosi dipercepat diduga juga kecil. Meskipun demikian, ada faktor lainnya yang mempengaruhi aliran permukaan tersebut, seperti penutupan lahan dengan vegetasi dan lapisan kedap di dalam tanah. Penutupan lahan yang baik menyebabkan air lebih banyak tertahan.



Gambar 6a. Laju infiltrasi tanah-tanah utama di DAS Tondano setelah tiga jam

Figure 6a. Infiltration rate of main soils in Tondano catchment after three hours



Gambar 6b. Intensitas hujan maksimum absolut di stasiun Langowan

Figure 6b. Absolute maximum rainfall intensity in Langowan station

Debit sungai dan kadar sedimen

Hasil perhitungan kandungan sedimen dari beberapa contoh air sungai yang masuk ke dalam danau menunjukkan bahwa jumlah sedimen terangkut yang masuk ke dalam danau 309,58 g/detik atau 26,75 t/hari pada musim hujan, dan 175,19 g/detik atau 15,14 t/hari pada musim kemarau (Tabel 3). Jika diasumsikan DAS Tondano mempunyai 6 bulan basah (musim hujan) dan 6 bulan lembab dan kering (musim kemarau), maka total sedimen terangkut yang masuk ke dalam

danau sebesar 7.540 t/tahun, belum termasuk kemungkinan adanya longoran, pengendapan bahan-bahan buangan atau vegetasi air yang mati.

Apabila jumlah sedimen tersebut dibandingkan dengan total volume danau (sekitar 680 juta m³), diduga danau akan terisi penuh dengan endapan selama 90 ribu tahun mendatang. Tampaknya Danau Tondano tidak akan menjadi daratan dalam jangka waktu singkat (25 tahun mendatang), seperti yang dilaporkan oleh BRLKT (1992), dengan asumsi kondisinya relatif tetap seperti pada saat penelitian dilakukan. Proses pendangkalan danau yang terjadi masih tergolong rendah.

Endapan permukaan dasar danau

Danau Tondano bersifat *eutrophic*, relatif kaya nutrisi, phytoplankton dan produk organik (Whitten *et al.*, 1987). Tanaman air danau terdiri atas tanaman mengapung dan tanaman melayang (Surjani, 1989). Kerapatan tanaman air tersebut sangat tinggi, terutama di sepanjang tepi danau (Soer:oto,1989).

Kandungan C-organik sedimen permukaan danau termasuk tinggi sampai sangat tinggi, berkisar antara 2,72-9,76 %, atau setara dengan 4,7-16,8% bahan organik (Tabel 4). Kadar bahan organik tinggi diperkirakan berasal dari hasil dekomposisi tanaman air yang mati. Tanaman air yang mati, sebagian akan terdekomposisi, dan sebagian lagi digunakan oleh tanaman dan binatang air, sehingga meningkatkan siklus nutrisi. Menurut Whitten *et al.* (1987), akumulasi bahan organik yang terlalu tinggi, akibat jumlah tanaman air yang mati cukup banyak, dapat menurunkan kejernihan air dan konsentrasi oksigen terlarut, sehingga meningkatkan *biological oxygen demand* (BOD). Tingginya bahan organik tersebut merupakan salah satu indikasi bahwa Danau Tondano telah mengalami eutrofikasi biologis dan siltasi. Tingkat eutrofikasi tampaknya masih tergolong rendah-sedang, karena komposisi fisik-kimia air dan sedimen suspensi masih tergolong rendah.

Tabel 3. Debit sungai dan kadar sedimen terangkut di DAS Tondano

Table 3. River discharge and transported sediment of the Tondano catchment

Sungai	Debit sungai	Kadar sedimen	Debit sedimen ¹	
	l/detik	g/l	g/detik	
Ranowelang	854,4	0,076	64,93	64,93
Wori	625,8	0,116	72,59	*
Panasen	451,4	0,119	53,72	53,72
Bowolean	384,6	0,147	56,54	56,54
Toubeke	319,5	0,093	29,71	*
Lelema	110,2	0,079	8,71	*
Karembeng	92,8	0,093	8,63	*
Tolouki	77,3	0,100	7,73	*
Wowolen	63,7	0,100	6,37	*
Sarawet	28,7	0,012	0,34	*
Tounsukun	26,2	0,012	0,31	*
	3.034,6	0,947	309,58	175,19

¹ musim hujan/rainy season; ² musim kemarau/dry season, * = tidak mengalir/no flow.

Tabel 4. Hasil pengukuran kedalaman dan analisis sedimen permukaan dasar Danau Tondano

Table 4. Result of measurement of depth and surface lake basement sediment analysis of the lake Tondano

Lokasi	Kedalaman danau	C-organik	Pasir	Debu	Liat	pH	Daya hantar listrik
	m						
Outlet/AWLR ¹	2,5	9,76	16	27	57	7,0	0,37
Tolour	3	4,93	12	21	67	7,3	0,34
Tandangan	5	7,62	5	34	61	4,7	1,55
Tonsaru 1	6	5,70	7	20	73	6,4	1,18
Tonsaru 2	9	3,24	33	25	42	5,7	0,56
Kaweng 1	10	3,89	40	31	29	5,1	1,14
Kaweng	11	3,72	40	25	35	5,8	0,35
Tolimembet 2	12	4,22	27	38	35	5,7	0,94
Watumea	13	7,25	4	30	66	5,8	-
Urongo	14	7,31	5	31	64	5,0	1,45
Kakas	14	6,90	6	29	69	3,6	1,99
Tolimembet 1	19	6,02	2	23	75	3,1	2,09
Kaweng 2	20	5,51	-	-	-	-	-
Kaweng 3	22	-	-	-	-	-	-

¹ AWLR = pencatat permukaan air otomatis/automated water level recorder.

Kandungan liat umumnya tinggi, kecuali di daerah Kaweng yang kandungan pasirnya relatif tinggi karena posisinya menghadap muara sungai-sungai utama yang banyak mengangkut bahan berpasir hasil erupsi volkan dari wilayah selatan. Reaksi tanah (pH) umumnya sangat masam sampai netral (4,7-7,3). Tingginya reaksi tanah disebabkan oleh pengaruh kandungan kalsium tinggi, yang berasal dari fragmen rumah binatang air di bagian

outlet S. Tondano. Daya hantar listrik umumnya rendah (0,34-2,09 dS/m), yang mencerminkan rendahnya kadar garam-garam.

Pendugaan bahaya erosi

Hasil pendugaan nilai erosititas hujan rata-rata tahunan dari lima stasiun menunjukkan variasi kecil 895-1.226 dengan rata-rata tertimbang 1.103 mt.cm/ha.jam. Nilai indeks erodibilitas tanah (nilai

Tabel 5. Nilai erodibilitas tanah (nilai K) di DAS Tondano

Table 5. Soil erodibility value (K value) of the Tondano catchment

Subgrup tanah	Tekstur	Lereng	Nilai K	Kelas ¹
		%	t.h/MJ.mm	
Humic Udivitrands	Pasir berlempung	3 – 18	0,059-0,092	Sangat rendah
Typic Hapludands	Lempung, lempung berpasir	10 – 50	0,097-0,180	Sangat rendah-rendah
Pachic Argiudolls	Lempung berliat	5 – 15	0,114-0,208	Rendah
Typic Argiudolls	Lempung berliat	5 – 30	0,041-0,171	Sangat rendah-rendah
Typic Hapludolls	Lempung	15 – 30	0,178-0,304	Rendah-sedang
Typic Hapludolls	Liat	9 – 50	0,137-0,147	Rendah
Typic Endoaquands	Lempung berpasir	1	0,186	Rendah
Typic Endoaquolls	Lempung berpasir	1	0,185-0,243	Rendah-sedang
Typic Tropaquepts	Lempung berliat	1	0,193-0,260	Rendah-sedang

¹ Menurut Dangler dan El-Swaify (1976)

K) bervariasi (0,059-0,304), yang termasuk kelas sangat rendah sampai sedang (Tabel 5). Kurnia dan Suwardjo (1984) melaporkan hasil penelitian erodibilitas beberapa jenis tanah dari bahan vulkan di Jawa menunjukkan nilai rendah. Rendahnya faktor K tersebut diduga disebabkan oleh pengaruh kandungan bahan organik tanah yang cukup tinggi, struktur tanah granular sampai agak gumpal, tekstur agak kasar sampai sedang. Nilai faktor panjang dan kemiringan lahan (LS) bervariasi dari 0,043 pada wilayah datar sampai 7,219 pada wilayah berlereng sangat curam.

Hasil pendugaan besarnya erosi aktual dengan metode USLE menunjukkan bahwa sebagian besar DAS Tondano (94,2% dari luas total) mempunyai erosi sangat rendah (< 5 t/ha/tahun) sampai rendah (5-12 t/ha/tahun) (Tabel 6). Bergsma (1986) menggolongkan erosi sebesar 12 t/ha/tahun merupakan batas maksimum erosi tanah yang masih diperbolehkan untuk tanah dalam, dan 5 t/ha/tahun untuk tanah dangkal. Peneliti lain bahkan menyebutkan angka 20 t/ha/tahun sebagai batas toleransi maksimum erosi tanah (Chisci and Morgan, 1986; Rubio, 1986 dalam Kok et al., 1995). Rendahnya erosi aktual tersebut didukung oleh erodibilitas tanah yang rendah sampai sedang, meskipun erosivitas hujannya relatif tinggi. Keadaan tersebut didukung pula oleh kondisi penutupan lahan yang terdiri atas tanaman

tahunan, seperti cengkih, tanaman pangan, dan sayuran. Hutan dan semak belukar umumnya masih cukup baik dan tidak dijumpai tanah-tanah terbuka atau gundul (terdegradasi). Pengolahan tanah dilakukan dengan pembuatan petakan-petakan (*parcelling*) yang dibatasi dengan tanaman pagar atau tahunan, sehingga jika erosi terjadi masih dapat tertahan oleh tanaman pagar. Penerapan teknik konservasi tanah oleh petani setempat umumnya relatif cukup baik, seperti penterasan, membuat guludan dan menempatkan batang atau ranting kayu melintang sejajar kontur. Gejala longoran (*slump*) di sepanjang tepi danau tidak dijumpai.

Tabel 6. Distribusi erosi aktual di DAS Tondano

Table 6. Distribution of actual erosion in the Tondano catchment

Kelas ¹	Erosi	Luas
	t/ha/tahun	ha
Sangat rendah	<5	20.609 (78,7%)
Rendah	5 - 12	4.060 (15,5%)
Sedang	12 - 25	1.360 (5,2%)
Tinggi	25 - 60	134 (0,5%)
Sangat tinggi	>60	37 (0,1%)

¹ Menurut Bergsma (1986)

KESIMPULAN DAN SARAN

1. Fluktuasi muka air danau, debit air keluar dari S. Tondano dan volume air danau sangat bergantung pada fluktuasi curah hujan.
2. Kondisi hidrologi Danau Tondano selama 5 tahun (1989-1993) masih cukup baik yang dicerminkan oleh kemantapan debit danau, dan hal ini didukung oleh kondisi tanah dan penutupan lahan yang masih cukup baik selama periode tersebut.
3. Kandungan sedimen terangkut yang masuk ke dalam danau melalui aliran permukaan, termasuk rendah, meskipun pengukuran dilakukan pada musim hujan. Pendangkalan yang terjadi masih di bawah ambang batas normal ($12 \text{ m}^3/\text{tahun}$), sehingga Danau Tondano diperkirakan tidak akan menjadi daratan dalam jangka waktu 25 tahun mendatang.
4. Kedalaman danau terdalam saat ini adalah 22 m sesuai dengan hasil pengukuran yang dilakukan oleh PULN. Pengurangan kedalaman danau yang drastis akibat pendangkalan yang serius ternyata tidak terbukti dan terlalu berlebihan.
5. Sebagian besar wilayah DAS Tondano mempunyai tingkat erosi aktual rendah ($< 12 \text{ t/ha/tahun}$) yang mencerminkan pendangkalan danau masih di bawah batas toleransi maksimum.
6. Sedimen permukaan dasar danau yang kaya bahan organik merupakan indikasi terjadinya eutrofikasi biologis yang berasal dari bahan organik tanaman air yang mati dan mengendap.
7. Untuk memantau dan menduga aliran sedimen masuk ke dalam danau, disarankan untuk membangun beberapa *chek dam* terutama pada sungai-sungai utama, dan pengambilan contoh sedimen permukaan dasar danau pada waktu dan tempat tertentu secara berkala.
8. Untuk menjaga kemungkinan terjadinya pendangkalan yang tinggi dan untuk

meningkatkan kapasitas simpan air, terutama pada musim kemarau, perlu diambil langkah-langkah antara lain, pembersihan tanaman air, pelurusan dan pembersihan lumpur di sepanjang Sungai Tondano sampai PLTA, pengaturan usaha perikanan penduduk untuk mengurangi eutrofikasi air, penambahan tinggi bendungan PLTA untuk menambah daya tampung air, dan pengaturan pembuangan sampah rumah tangga.

DAFTAR PUSTAKA

- Amien, L.I. dan E. Runtuuwu. 1995.** Kondisi hidrologis Danau Tondano. hlm. 59-70 *dalam* Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah dan Agroklimat. Bidang Konservasi Tanah dan Air, dan Agroklimat. Cisarua, Bogor 10-12 Januari 1995. Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor.
- Bappeda Tk. II Minahasa. 1994.** Kerangka Pembangunan Strategis. Pemerintah Daerah Tk. II Kabupaten Minahasa, Tondano, Sulawesi Utara.
- Bergsma, E. 1986.** Aspects of mapping units in the rain erosion hazard catchment survey. *In* W. Siderius (*Eds*): Land evaluation for land use planning and conservation in sloping areas. International Workshop, ITC, Dec. 1984. ILRI Publ. 40:84-105.
- BRLKT (Balai Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah). 1992.** Petunjuk Teknik Lapang Rencana Rehabilitasi Lahan dan Konservasi Tanah. Departemen Kehutanan. Ditjen RRL, Jakarta.
- Buol, S.W., Hole, F.D., and McCracken, R.J. 1980.** Soil Genesis and Classification. Iowa State Univ. Press, Ames. 404 p.
- Chisci, G., and R.P.C. Morgan. 1986.** Modelling soil erosion by water, why and how. p.121-773 *In* R.P.C Morgan and R.J. Rickson (*Eds.*). Agriculture: Erosion Assessment and Modelling. Comm. of Europeans Communities. Luxembourg.
- Efendi, A. 1976.** Peta geologi lembar Manado, Sulawesi Utara, skala 1:250.000. Puslitbang Geologi, Bandung.

- Dangler, E.W., and S.S. El-Swaifi. 1976.** Erosion of selected Hawaii soils by simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 40:769-773.
- FAO. 1992.** Provisional methodology for soil degradation assessment. FAO/UNESCO Rome.
- Gregory, K.J., and D.E. Walling. 1979.** Drainage Basin Form and Process. A Geomorphological Approach. Edward Arnold Publ. Ltd. London.
- Hardjowigeno, S. dan S. Sukmana. 1995.** Menentukan tingkat bahaya erosi. Laporan Teknis No.16 versi 1.0. Proyek LREP II, Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat, Bogor. (Tidak dipublikasikan).
- Hudson, N. 1986.** Soil Conservation. Batsford Publication Limited, London. 324 p.
- Koperberg, M. 1928.** Douwstoffen voor de geologie van de residentie Manado. Deel I. Publ. Jaarbook van het Mijnwezen.
- Kok, K., M.B.W. Clavaux, W.M. Heerebout, and K. Bronsveld. 1995.** Land degradation and land cover change detection using low-resolution satellite images and the CORINE database: a case study in Spain, *ITC Journal* 3:217-228.
- Kurnia, U., dan H. Suwardjo. 1984.** Kepekaan erosi beberapa jenis tanah di Jawa menurut metode USLE. *Pembr. Penel. Tanah dan Pupuk* 3:17-20.
- Oldeman, L.R., and S. Darmiyati. 1977.** The Agroclimatic Map of Sulawesi, Scale 1: 2,500,000. Centr. Res. Inst. for Agric. Bogo.
- Perusahaan Umum Listrik Negara. 1994.** Laporan Pengukuran Kedalaman (Pemeruman) Danau dan Sungai Tondano. PULN Wilayah VII Sektor Minahasa. Tondano, Sulawesi Utara. (Tidak dipublikasikan).
- Pusat Penelitian Tanah dan Agroklimat. 1995.** Survei dan Pemetaan Tanah Semi Detail Daerah Tondano, Sulawesi Utara untuk Mendukung Penyediaan Air dan Hydropower. Publ. No. 03c/P2SLA/19. 04/95. Badan Litbang Pertanian, Bogor. 167 hlm.
- Schwab, G.O., D.D. Fangmier, W.J. Elliot, and R.K. Frevert. 1993.** Soil and Water Conservation Engineering. 4th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Shen, D. and M. Jullien. 1992.** Erosion and sediment transport. *In Handbook of Hydrology.* Maidment, D.R. (Ed.). McGraw Hill Co. Ltd. New York.
- Siegel, S. 1956.** Nonparametric Statistics for the Behavioural Sciences. Mc Graw Hill, New York.
- Soil Survey Staff. 1996.** Keys to Soil Taxonomy. 7th edition. Soil Conservation Service, U.S Department of Agriculture, Washington DC.
- Surjani, A. 1989.** Dampak penggunaan pestisida terhadap mutu air dan struktur biota pada daerah aliran sungai. Makalah Seminar Pencemaran DAS Tondano, Permasalahan dan Penanggulangannya. Manado, 24-26 Agustus 1989. (Tidak dipublikasi kan).
- Soeroto, B. 1989.** Pencemaran bahan organis, ikan eksotis, dan beberapa masalah yang terjadi di Danau Tondano serta usaha-usaha penanggulangannya. Makalah Seminar Pencemaran DAS Tondano, Permasalahan dan Penanggulangannya. Manado, 24-26 Agustus 1989. (Tidak dipublikasikan).
- Whitten, A.J., M. Mustafa, and G.S. Henderson. 1987.** Ecology of Sulawesi. Gajah Mada University Press, Yogyakarta, Indonesia.
- Wischmeier, W.H. and D.D. Smith. 1978.** Predicting Rainfall Erosion Losses: A guide to conservation planning. USDA Agric. Handbook 537. Agric. Res. Service, Wahington DC.
- Zinck J.A. and C. Valenzuela. 1990.** Soil geographic database: structure and application examples. *ITC Journal* 3:270-291.