

REKAMAN PERISTIWA GEOLOGI KUARTER PADA SEDIMENTASI DAN FLUKTUASI PERMUKAAN AIR DANAU TONDANO PURBA DIDASARI KORELASI UNIT FASIES KUARTER DI TENGGARA DANAU, SULAWESI UTARA

Herman Moechtar

Pusat Survei Geologi
Jalan Diponegoro 57, Bandung 40122

SARI

Tuf Tondano yang berumur Kuartar terdiri atas tuf, pada bagian atasnya ditutupi oleh satuan gunung api muda dan sedimen Kuartar. Sedimen Kuartar tersebut dapat menjadi endapan-endapan danau, pasir danau, pasang-surut, alur sungai, dataran banjir, rawa, dan cekungan banjir. Secara umum, proses-proses sedimentasi dan turun-naiknya permukaan air danau berlangsung di bawah pengaruh tektonik aktif, dan aktifitas tektonik tersebut menjadi faktor kontrol utama kelangsungan peristiwa tersebut. Jumlah pasokan material yang berasal dari erupsi gunung api, daerah sumber, dan kemiringan lereng adalah faktor penting pula yang berpengaruh terhadap perkembangan rangkaian proses sedimentasi di danau Tondano purba.

Perbedaan akumulasi sedimen secara lateral dan vertikal selama proses pengendapan di cekungan, berhubungan dengan tektonik regional dan vulkanotektonik lokal di cekungan. Kemungkinan, perubahan kondisi iklim antara lebih basah menuju lebih kering berlangsung dari unit fasies pengendapan II (Ufp. II) ke unit fasies pengendapan III (Ufp. III).

Kata kunci: Fasies, sedimentasi, fluktuasi permukaan air danau, tektonik

ABSTRACT

The Quaternary deposits of lake Tondano consist of Tondano tuff covered by young volcanic rock and the Quaternary sediments. The Quaternary sediments are divided by lake, sand-lake, tidal-lake, river channel, floodplain, swamp, and floodbasin deposits. In general, the sedimentary and fluctuation of lake level processes occurred in active tectonic and tectonism is the main factor controlling their occurrence. The amount of material from eruption, source area and slope gradients were important factors influencing the development of the sedimentary succession in the paleo-lake Tondano.

The vertically and laterally different accumulation of sediments during the deposition into the basin, is obviously related to the regional tectonic and local vulcanotectonic of the basin. Probably, changes in climatological between more humid to drier conditions occurred from unit of deposition facies II (Ufp. II) to unit of deposition facies III (Ufp. III).

Keywords: Facies, sedimentation, lake water level fluctuation, tectonic

PENDAHULUAN

Salah satu daya tarik dalam studi fasies danau, adalah karena danau dikategorikan sebagai sistem lingkungan purba dalam skala regional. Lingkungan ini juga berintegrasi dengan berbagai elemen lainnya seperti: kehidupan (*biospheric*), bumi (*geospheric*), air (*hydrospheric*), dan angkasa (*atmospheric*) (Anadón dkk., 1991). Lingkungan danau tidak jauh berbeda dengan lingkungan sungai (*fluvial*), yang merupakan sebuah kompleks suatu aktifitas sedimentasi yang dikontrol oleh berbagai mekanisme proses, seperti kejadian pembentukan sungai

berkelok, pergeseran alur, dan sebagainya (*autogenic*); selain akibat pengaruh proses yang berasal dari luar cekungan, di antaranya efek perubahan iklim, tektonik, dan turun-naiknya permukaan laut (*allogenic*) (Allen dan Allen, 1990). Perubahan lingkungan selama Kuartar termasuk fasies danau di akhir puncak glasiasi (20.000 - 18.000 tahun yang lalu), transisi Plistosen-Holosen, dan pertengahan Holosen sangat menarik perhatian berbagai pakar kebumihian (Dury, 1977; Leopold dan Miller, 1954; Pandarinath dkk., 2001; Kutzbach dan Street-Perrot, 1985; Overpeck dkk., 1996; Jordan,

1999; Perlmutter dan Matthews, 1989). Pandarinath dkk. (2001) mempelajari perubahan permukaan laut dan sedimentasi pada data bor periode Kuartar Akhir. Dia menyatakan bahwa karbon kayu dan gambut berumur antara 10.760 ± 130 sampai 9.280 ± 150 th., termasuk akhir Plistosen hingga permulaan Holosen. Selanjutnya mereka menyatakan bahwa kondisi permukaan laut jauh lebih rendah (>50 m) dibanding kondisi sekarang, dan genang laut berlangsung selama permulaan Holosen.

Di daerah tropis bagian utara, turun-naiknya permukaan danau dan perubahan kelembaban pada akhir Plistosen dan Holosen umumnya dipengaruhi oleh aktifitas *monsoon* purba, yang akhirnya berkaitan dengan gaya siklus Milankovitch (Kutzbach dan Street-Perrot, 1985; Overpeck dkk., 1996). Jordan (1999) melakukan determinasi turun-naiknya permukaan laut di selatan paparan Beringia pada Plistosen akhir. Ia berasumsi bahwa pada Holosen gejala permukaan laut dalam konteks kontrol isostasi, tektonik, dan iklim memiliki masa yang panjang. Penelitian ini didasari pada pemahaman efek implikasi geomorfik dan ekologi permukaan laut. Secara regional di daerah pasang-surut, perubahannya berubah secara samar-samar dan tidak tegas, yang memperlihatkan muncul dan tenggelam selama 35 tahun terakhir (Jordan, 1999).

Umur suatu perkembangan fasies danau yang dipengaruhi tektonik, merupakan rekaman yang baik dalam merekonstruksi perubahan iklim dan tektonik (Anadón dkk., 1991). Perubahan iklim selama Kuartar dalam fasies danau terekonstruksi secara baik dan menerus, seperti yang dibuktikan oleh rangkaian endapannya yang dipengaruhi oleh efek iklim, termasuk flora dan geokimianya (Baltzer, 1991). Perlmutter dan Matthews (1989) menjelaskan betapa pentingnya fasies danau dan rawa dalam mengontrol perubahan iklim mengikuti siklus Milankovitch, karena salah satu penyebab meluas dan menyusutnya lingkungan tersebut identik dengan sirkulasi perubahan iklim. Pernyataan ini, membawakan suatu pemikiran bahwa perlu kiranya ditelusuri, apakah endapan Kuartar bawah permukaan dari data penelitian ini termasuk endapan danau. Sejauh mana hubungan fasies tersebut dengan danau Tondano kini, termasuk faktor

kontrol pembentuk fasies endapannya. Kiranya, rekaman-rekaman peristiwa tersebut dapat diungkapkan dari proses sedimentasi dan fluktuasi permukaan air danau Tondano purba.

Setiawan dkk. (2002) dalam peta Neo-seismotektonik daerah Manado dan sekitarnya, Sulawesi Utara berskala 1:250.000 secara tegas membedakan sesar-sesar utama dan penyerta yang aktif selama kurun waktu Kuartar. Mereka membedakan tektonik daerah Sulawesi Utara ini menjadi enam blok tektonik, yaitu: blok-blok tektonik Amurang (A), Sopotan (S), Tondano (T), Manado (M), Likupang (L), dan Batuangus (BA). Sesar-sesar tersebut umumnya sulit dijumpai di permukaan karena tertutupi oleh susunan batuan muda yang penyebarannya luas, yaitu batuan gunung api muda. Danau Tondano dikontrol oleh struktur dari keberadaan cekungan busur gunung api akhir Tersier-Kuartar Sulawesi Utara dan Sangihe. Gejala penurunan (depresi) dengan ciri jatuhnya sebuah kaldera yang membentuk sebuah *pull-apart basin*, kemungkinan menempati kedua fase riodasit ignimbrit berwarna putih *domato tuffs* berumur Pliosen dan di dalam Plistosen berupa tufa teras dasit abu-abu diendapkan (Lécuyer dkk., 1997). Kejadian ini membuktikan bahwa daerah ini memiliki perulangan fase erupsi dan tektonik yang aktif. Selain itu, pola atau susunan cekungan yang dipengaruhi oleh sistem pola regional sesar mendarat yang membentuk danau Tondano, berarah hampir timur laut - tenggara *pull-apart basin* (Lécuyer dkk., 1997). Sedangkan kegiatan gunung api akhir Kuartar umumnya berkembang di bagian barat cekungan. Dam dkk. (2001) menyebutkan alas sedimen Kuartar danau Tondano kipas aluvium Sopotan berupa kerakal dan pasir yang menerus ke arah danau berupa kipas aluvium berukuran pasir. Batuan piroklastika lainnya yang berintegrasi dengan fasies sedimen bercirikan relatif lebih lunak dan berlapis, ditafsirkan sebagai hasil erupsi gunung api muda yang masuk ke danau. Mereka juga membedakan susunan geomorfologi dan geologi cekungan danau Tondano menjadi: (a) batuan gunung api tua, torehan lembah berbentuk V, punggung curam yang tersebar di timur danau; (b) *smooth*, morfologi membulat, tanpa torehan lembah (aliran lava), tersebar di barat dan barat laut danau; (c) kompleks

kipas aluvium Sopotan terdiri atas kerakal dan pasir; kipas aluvium di danau terdiri atas endapan pasir; dan (d) endapan lakustrin dan pesisir danau berupa gambut dan lempung organik. Perbedaan mendasar penafsiran tersebut, antara lain adalah endapan danau dan sungai yang terletak di utara danau disebut oleh mereka sebagai endapan lakustrin dan pesisir danau. Fasies danau dan lakustrin dalam beberapa terminologi umumnya mengandung arti yang sama. Selanjutnya, endapan danau dan sungai yang terletak di selatan danau dinyatakan oleh Dam dkk. (2001) sebagai endapan kipas aluvium danau. Mulyana dan Santoso (2006) telah mempelajari sedimentologi dan stratigrafi fasies endapan danau purba Tondano di utara danau, berdasarkan pada analisis geologi bawah permukaan sehubungan dengan studi *deformasi landform*.

Maksud penelitian ini adalah dalam rangka meng-upayakan suatu usaha guna mengetahui proses sedimentasi dan hubungannya dengan fluktuasi permukaan air danau Tondano purba. Guna mencapai maksud tersebut maka tujuan penelitian ini, antara lain untuk: (a) mendeskripsi fasies endapan Kuarter, menafsirkan lingkungan pengendapannya, dan memahami perkembangan lingkungan purbanya; (b) mempelajari perubahan fasies lingkungan pengendapannya secara lateral dan vertikal, yang selanjutnya dikelompokkan menjadi urutan stratigrafi; (c) merekonstruksi rangkaian dan urutan fasiesnya, yang kemudian ditafsirkan faktor yang mempengaruhi pembentukannya, khususnya perubahan lingkungan; dan (d) mendiskusikan proses sedimentasi dan fluktuasi turun-naiknya muka air danau purba.

Daerah penelitian merupakan bagian dari wilayah administratif Kota Tondano yang sebelumnya sebagai ibukota Kabupaten Minahasa. Seiring dengan pemekaran wilayah tersebut, maka sebagian danau Tondano ini masuk ke dalam Kabupaten Tomohon yang beribu kota di Tomohon terletak ± 10 km dari lokasi penelitian. Secara geografis daerah penelitian terletak pada koordinat $1^{\circ}15' - 1^{\circ}20'$ LU dan $124^{\circ}50' - 124^{\circ}56'$ BT, termasuk bagian dari lembar Manado berskala 1:50.000 (Gambar 1).

Lokasi penelitian dan sekitarnya merupakan dataran rendah, terletak di bagian selatan danau Tondano, yang menurut Effendi dan Bawono (1997) disusun

oleh endapan Kuarter yang terdiri atas fasies danau dan sungai. Bentang alam ini dikelilingi oleh perbukitan yang berketinggian antara 700 sampai 1000 meter yang ditutupi oleh Batuan Gunung Api, Tuf Tondano, Batuan Gunung Api Muda, dan Endapan Danau dan Sungai (Effendi dan Bawono, 1997).

METODE

Data dan informasi geologi khususnya struktur geologi telah dilakukan pengamatannya secara langsung di lapangan dengan berpedoman pada peta geologi lembar Manado, Sulawesi Utara (Effendi dan Bawono, 1997) dan Setiawan dkk. (2002).

Guna memperoleh data bawah permukaan telah dilakukan pemboran dangkal di paparan danau Tondano pada endapan danau dan sungai dengan menggunakan skala penampang tegak 1:100 (Gambar 1). Enam titik lokasi pemboran dengan kedalaman antara 1,8 m hingga mencapai hampir 11,8 meter telah dilakukan pemborannya (Gambar 2). Korelasi rangkaian stratigrafi, dan hubungan fasies baik secara vertikal ataupun lateral, menjadi target untuk ditelaah di dalam menelusuri karakternya. Perubahan dari kompleks fasies endapan klastika kasar hingga halus, dan pencampurannya, menjadi perhatian utama guna memahami proses pengendapannya dari waktu ke waktu. Korelasi didasari atas akumulasi penyebaran fasies secara vertikal dan lateral, perubahan warna fasies termasuk butiran secara spesifik, serta susunan fasies endapannya. Pengambilan percontoh analisis pentarikhan karbon (C.14) dilakukan guna mengetahui umur lapisan yang mewakili selang pengendapan. Berdasarkan karakter rangkaian fasies tersebut, selanjutnya dikelompokkan menjadi Unit Fasies Pengendapan (Uft). Setiap Unit Fasies Pengendapan tersebut akan dipengaruhi oleh proses eksternal seperti turun-naiknya permukaan air danau, efek tektonik, dan kegiatan erupsi gunung api yang mempunyai perbedaan satu sama lain dalam setiap unitnya. Dengan demikian Uft dalam penelitian disini diartikan sebagai suatu kelompok dari beberapa lingkungan pengendapan, yang dicirikan oleh faktor kontrol proses internal pembentukannya.



Gambar 1. Peta lokasi penelitian dan lokasi titik bor di tenggara Danau Tondano.

GEOLOGI

Danau Tondano memiliki luas sekitar 4800 - 5000 ha ($\pm 48 \text{ km}^2$), dengan permukaan air pada tahun 1994 mencapai 683 m dpl. (+5 - 1,0 m) (PLN, 1994). Daerah ini merupakan bagian dari lajur gunung api muda dengan panorama yang mengelilinginya di sebelah timur wilayah pegunungan Tersier dan pantainya menjadi dataran tinggi hingga bergelombang yang diisi oleh produk hasil erupsi gunung api muda. Sedangkan di bagian utara, barat, dan selatannya dicirikan oleh bentang alam kompleks gunung api aktif (Gambar 1).

Daerah Tondano dan sekitarnya disusun oleh batuan gunung api berumur Tersier hingga Kuartar, yang terdiri atas batuan gunung api berumur Miosen, Tuf Tondano (Plio-Plistosen), batuan gunung api muda berumur Plistosen hingga Holosen, dan endapan danau dan sungai berumur Plistosen (?), serta aluvium. Batuan gunung api terutama terdiri atas breksi, lava dan tuf yang tersebar di timur danau Tondano, tepatnya pada deretan pegunungan Lembean. Breksi berukuran sangat kasar, berkomposisi andesit, sebagian bersifat konglomerat, mengandung sisipan tuf, batupasir, batulempung, dan lensa batugamping. Umur formasi batuan ini berkisar antara Miosen Awal sampai Tengah. Batuan gunung api yang berumur Miosen tersebut selanjutnya ditutupi oleh tufa Tondano yang menempati daerah perbukitan yang lebih rendah yang tidak dipengaruhi oleh deretan kompleks gunung api dan pegunungan. Batuan terdiri atas klastika kasar gunung api, terutama berkomposisi andesit, yang tersusun oleh komponen menyudut hingga menyudut tanggung, ditandai oleh banyak pecahan batuapung, batuapung lapili, breksi, ignimbrit sangat padat, berstruktur aliran. Tuf Tondano tersebut ditutupi oleh batuan gunung api muda yang menempati kompleks gunung api aktif, yang terdiri atas lava, bom, lapili, dan abu, dan membentuk gunung api strato muda yang tersebar di utara, barat, dan selatan danau. Seumur dengan formasi batuan gunung api muda tersebut terdapat endapan danau dan sungai yang menempati paparan utara dan selatan danau Tondano. Akhirnya, aluvium yang merupakan satuan batuan yang termuda di daerah ini tersebar jauh dari danau Tondano yang menempati daerah-daerah sekitar pantai.

SEDIMENTOLOGI DAN STRATIGRAFI

Litologi, Fasies, dan Lingkungan Pengendapan

Secara umum, litologi fasies Kuartar daerah penelitian terdiri atas lempung bergambut, lempung organik/ humus, pasir, lanau, dan lempung (Gambar 2 dan 3).

1. Fasies erupsi gunung api (tuf Tondano)

Fasies ini terdiri atas material erupsi gunung api dengan komposisi utama andesit berukuran pasir yang menyudut hingga menyudut tanggung dengan kandungan pecahan batuapung, warna pelapukan coklat kekuningan sampai coklat kemerahan. Fasies ini ditutupi oleh *soil* atau endapan rawa kini dengan ketebalan antara 20 - 40 cm. Pemboran mencapai dua meter lebih, yang semakin ke bawah litologinya semakin segar.

2. Fasies erupsi gunung api muda

Fasies ini dijumpai pada lokasi pemboran 4 pada kedalaman 11,2 m setebal 15 cm berupa lapisan tipis yang dicirikan oleh lempung tufan dengan tingkat konsistensi keras sampai sangat keras. Warnanya abu-abu muda hingga abu-abu kekuningan, banyak mengandung material vulkanik, pecahan batuan, dan gelas vulkanik. Lapisan tipis ini diinterpretasikan sebagai batuan piroklastika yang diendapkan di bawah pengaruh medium air. Jenis litologi ini diinterpretasikan termasuk batuan gunung api muda.

3. Endapan danau

Fasies ini terdiri atas lanau berwarna gelap sampai agak terang, setempat berwarna abu-abu kehijauan, mengandung flora atau tumbuhan, berhumus dan mengandung pecahan cangkang moluska air tawar. Kadang-kadang memiliki lapisan tipis lempung antara 20-30 cm, lunak, berwarna coklat kehitaman, banyak mengandung sisa tumbuhan dan humus. Diinterpretasikan sebagai endapan danau. Fasies ini berbutir lebih kasar, yang terdiri atas pasir yang semakin ke arah bawah menjadi lempung pasiran dan padat; berwarna abu-abu, kehijauan sampai hijau; mengandung humus dan sisa-sisa tumbuhan; berisisipan tipis pasir dan lempung setebal 5-10 cm. Semakin ke arah bawah fasies ini didominasi oleh lempung pasiran dengan sisipan pasir yang semakin tebal antara 10-15 cm, berwarna hijau keabu-abuan dengan kandungan sisa-sisa tumbuhan yang berlimpah.

4. Endapan pasir danau (fasies paparan danau)

Interval bawah terdiri atas lapisan pasir halus-kasar, kerakal, kerikil, perselingan pasir halus, lempung dan lanau dengan ketebalan berkisar antara 1-2 m. Terpilah sedang sampai buruk dengan susunan butir yang tidak seragam, menyudut tanggung-membulat tanggung. Selanjutnya interval atasnya diendapkan lapisan lanau berwarna abu-abu kehijauan, mengandung sisa tumbuhan dengan ketebalan ± 2 m. Fasies tersebut termasuk endapan pasir danau. Yang dimaksud dengan endapan pasir danau ini adalah fasies yang diendapkan di bagian pinggir atau paparan danau, yang pada umumnya sangat dipengaruhi oleh naik-turunnya muka air danau.

5. Endapan pasang-surut (perulangan fasies rawa dan danau)

Endapan ini terdiri atas lanau lempungan, berwarna coklat, mengandung humus, pecahan cangkang moluska air tawar dan lapisan tipis tuf yang ditafsirkan sebagai hasil endapan danau. Lapisan ini berselang-seling dengan lempung berhumus, berwarna coklat sampai hitam dengan ketebalan masing-masing lapisan antara 5-15 cm yang ditafsirkan sebagai fasies rawa (Gambar 2 dan 3). Pada interval bagian tengah komposisi litologinya relatif sama, hanya saja lempung yang berasal dari fasies rawa memiliki warna yang lebih gelap. Kemudian, lapisan endapan pasang-surut tersebut yang terletak pada interval atas memiliki ciri-ciri litologi fasies danau berbutir lebih kasar, sedangkan lempung rawa berwarna lebih terang dibanding dengan fasies yang sama di bawahnya, yaitu coklat kekuningan dengan kandungan sisa tumbuhan yang semakin berkurang pula. Jadi endapan pasang-surut ini merupakan perselingan fasies danau dan rawa yang tidak dapat dipisahkan satu sama lainnya.

6. Endapan alur sungai

Fasies ini dijumpai di sekitar kampung Kakas dekat paparan danau tepatnya pada lokasi 6. Litologinya berupa pasir berbutir halus sampai menengah dengan ketebalan lebih dari 1 m, abu-abu kecoklatan yang menghalus ke arah atasnya, mengandung kuarsa dan pecahan batuan vulkanik berupa kerakal berukuran 1-2 cm. Ke arah atasnya ditandai oleh butiran yang semakin menghalus, dan mengecilnya dimensi ukuran komponen vulkanik berukuran rata-rata 3 mm.

Perubahan tersebut membuktikan bahwa energi aliran ketika itu semakin besar, sehingga memungkinkan untuk ditranspornya material organik seperti daun-daunan. Bagian bawah ditempati oleh pasir halus yang kaya akan sisa-sisa tumbuhan. Kondisi ini diduga sebagai puncak atau maksimum perubahan tingkat energi aliran dalam suatu proses pembentukan fasies alur sungai. Jenis litologi demikian ditafsirkan sebagai endapan alur sungai (*channel deposits*). Ke arah barat ± 50 m dari lokasi ini dijumpai sungai utama sekarang yang masuk ke danau Tondano.

7. Endapan dataran banjir

Terdiri atas lempung pasiran, abu-abu mengandung sisa-sisa tumbuhan, bersipaan pasir halus berwarna putih dengan kandungan dominan mineral kuarsa. Kadang-kadang mengandung lapisan lempung lanauan berwarna abu-abu kehijauan dengan sisa-sisa tumbuhan. Fasies ini diinterpretasikan sebagai fasies dataran banjir (*floodplain deposits*) yang dipengaruhi oleh turun-naiknya permukaan danau. Percampuran lempung, lanau dengan pasir yang terkonsolidasikan secara baik diduga berasal dari suplai alur sungai sekarang yang diendapkan di bagian dataran banjir. Sedangkan lempung dan lanau yang kadang kala pemisahan butirnya sempurna dan berwarna hijau, kemungkinan berasal dari material yang dibawa oleh energi aliran danau disaat permukaan air danau naik. Fasies ini juga memiliki variasi butiran berupa lempung lanauan, lanau pasiran, berwarna abu-abu kecoklatan hingga abu-abu gelap yang kaya dengan kandungan sisa-sisa tumbuhan.

8. Endapan rawa

Bagian bawah ditempati oleh lempung berwarna coklat tua - coklat kehitaman, banyak mengandung humus dengan ketebalan 0,5 - 5 m. Ke arah atasnya ditutupi oleh lapisan lempung, lanau lempungan dan lanau, berwarna abu-abu gelap sampai coklat, mengandung gelas vulkanik, dan lapisan tipis tuf. Jenis litologi tersebut diinterpretasikan sebagai endapan rawa. Kadang-kadang fasies ini dicirikan juga oleh lempung lanauan hingga berpasir berwarna coklat tua-coklat kehitaman yang berselang seling dengan fasies vulkanik, banyak mengandung sisa-sisa tumbuhan dan humus yang berwarna coklat tua.

9. Endapan cekungan banjir

Endapan ini terdiri atas lempung lanauan, berwarna abu-abu kecoklatan, mengandung sisa tumbuhan berupa daun-daunan dan potongan kayu. Umumnya, di bagian bawahnya ditemukan lapisan pasir halus yang diinterpretasikan sebagai fasies cekungan banjir. Ciri litologi lainnya endapan ini terdiri atas lempung lanauan, berwarna coklat tua, banyak mengandung sisa tumbuhan dan humus berwarna coklat tua, dan agak lunak. Endapan cekungan banjir ini sulit ditafsirkan secara pasti apakah sebagai endapan rawa, pelimpahan alur sungai, atau pengaruh pasang-surut. Namun ketiga proses dan suplai material lingkungan tersebut sangat mempengaruhi, sehingga disebut sebagai endapan cekungan banjir atau sebagai terminal berbagai proses pengendapan. Fasies ini muncul pada kedalaman 8,5 m (Gambar 3) dengan ketebalan 2,9 meter, sedangkan fasies bagian atas yang dekat ke permukaan memiliki ketebalan antara 0,3 - 0,7 m (Gambar 2 dan 3).

10. Soil/ Tanah penutup

Merupakan endapan permukaan yang terdiri atas lempung dan lanau pasirin, berwarna coklat kekuningan, coklat dan kuning; terpilah buruk, mengandung sisa-sisa tumbuhan dan diinterpretasikan sebagai tanah pelapukan yang berasal dari fasies tuf Tondano.

Karakter sedimen dan ciri fasies pengendapan di atas diantaranya, adalah (Gambar 3):

1. Perbedaan yang mencolok antara fasies piroklastika tuf Tondano dengan fasies sedimen antara lain: kekerasan, komposisi, warna dan sebagainya. Fasies piroklastika ini muncul dan menerus ke permukaan hingga ke bentang alam perbukitan bergelombang, dan oleh sebab itu fasies ini ditafsirkan sebagai alas fasies sedimen Kuartar tersebut. Dam dkk. (2001) menyebutnya sebagai kipas aluvium Sopotan berupa kerakal dan pasir yang menerus ke arah danau sebagai kipas aluvium berukuran pasir. Fasies piroklastika lainnya yang berintegrasi dengan fasies sedimen adalah lapisan tipis yang relatif lebih lunak dan berlapis, ditafsirkan sebagai hasil erupsi gunung api muda yang materialnya masuk ke danau.

2. Proses dan pola pengendapan fasies danau memiliki variasi dari satu tempat ke tempat lainnya, dan dijumpai pada Ufp II (Gambar 3). Berdasarkan analisis pentarikhan karbon (C.14), bagian bawahnya berumur 8.460 ± 270 tahun (Gambar 3). Endapan pasir danau cenderung dihasilkan oleh proses danau, yang selanjutnya diendapkan di bagian paparan. Fasies ini memiliki pola sebaran yang tertentu, serta terbentuk pada Ufp II dan III (Gambar 3).

3. Endapan pasang-surut umumnya terbentuk akibat fluktuasi muka air danau yang sangat cepat (Gambar 3), berulang, dan teratur. Penyebab terjadinya perulangan fasies tersebut secara vertikal, bukan saja kecepatan turun-naiknya permukaan air akibat bertambah dan berkurangnya volume air, tapi dapat pula berhubungan dengan turun-naiknya dasar cekungan (?). Berdasarkan pentarikhan karbon (C.14), bagian atas endapan pasang surut ini berada pada lapisan atas dari Ufp II dan berumur 4.400 ± 250 tahun (Gambar 3). Selain itu perkembangan lingkungan rawa terjadi ketika lingkungan danau menyusut atau menurun dan berasosiasi dengan fasies paparan danau (Gambar 3).

4. Fasies *fluvial* yang hanya dijumpai pada interval atas saja, kemungkinan berhubungan dengan proses berpindahnya suatu alur sungai. Hal tersebut terbukti dari posisi alur sungai sekarang yaitu Sungai Rayongan yang mengalami pergeseran dari posisi sebelumnya, yang merupakan alur sungai purba sebelumnya yang terletak di sebelah baratnya (Gambar 3).

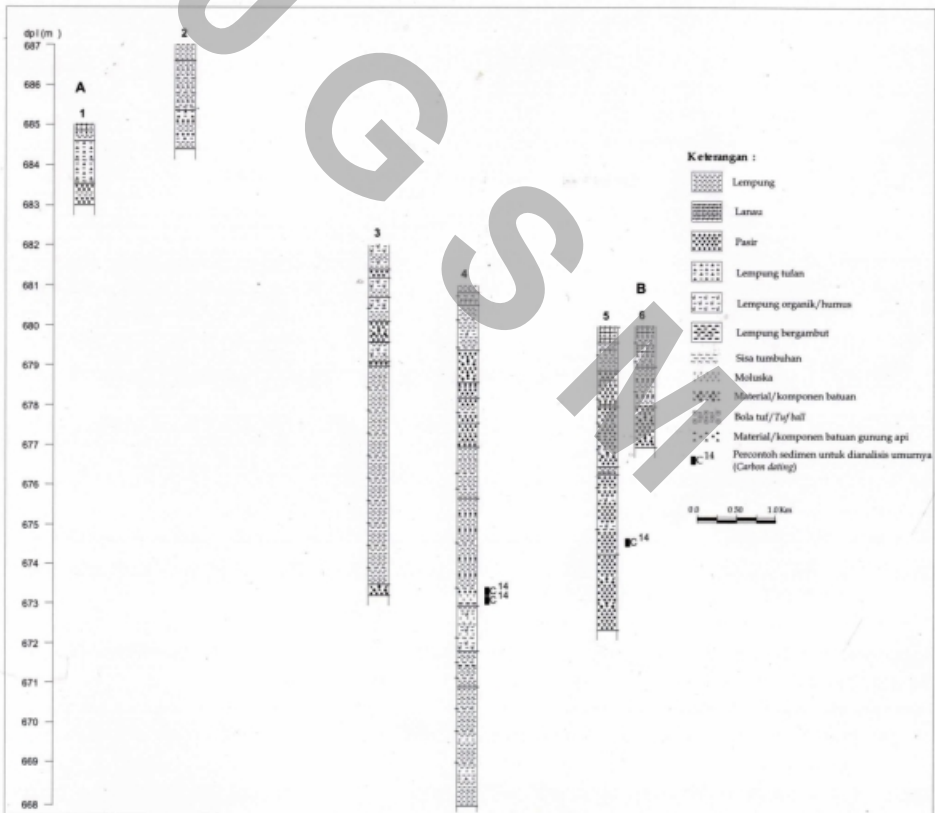
Ciri dan hubungan fasies pengendapan di atas, memperlihatkan (Gambar 3): (a) adanya perbedaan posisi atau umur lapisan (perulangan suatu proses/fasies), (b) memiliki bentuk atau pola lapisan (proses-proses yang menerus, membaji, berjari-jemari dan sebagainya), (c) komposisi/variasi litologinya (proses-proses pengasaran/penghalusan butiran, perubahan warna termasuk kandungan organik, pelapukan dan sebagainya), dan (d) perkembangan lingkungan pada fasies endapan (proses dominannya pembentukan fasies).

Pola dan Sebaran Fasies Endapan

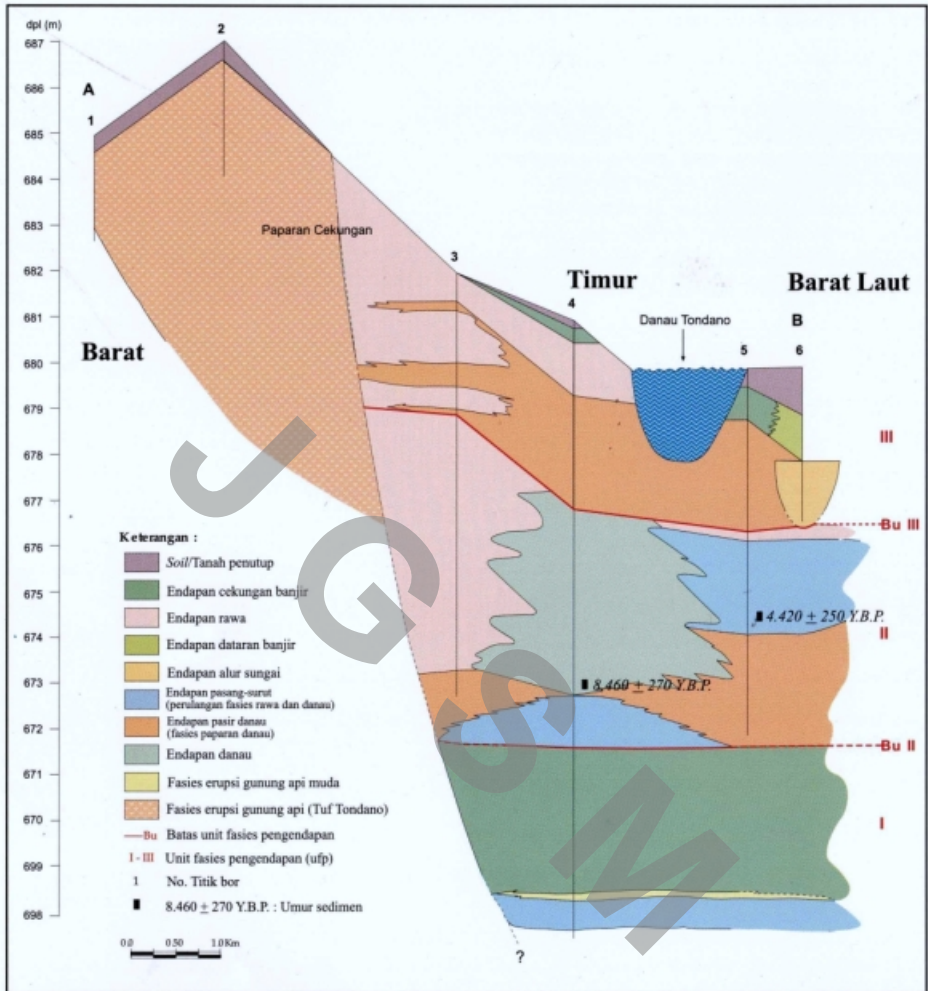
Pola dan sebaran fasies endapan danau Tondano, pada dasarnya memperlihatkan suatu susunan yang sifatnya spesifik (Gambar 3). Kondisi demikian membuktikan bahwa perubahan lingkungan di tempat tersebut sangat sensitif terhadap pengaruh proses eksternal yang terbukti dari intensitas proses pengendapannya yang kurang atau tidak homogen. Suatu proses sedimentasi dalam suatu cekungan akan bersifat homogen apabila proses internal di dalam suatu cekungan tersebut lebih dominan.

Proses sedimentasi diawali oleh endapan pasang surut yang ditutupi secara tipis oleh fasies erupsi gunung api muda. Selanjutnya, berkembang endapan cekungan banjir yang materialnya berupa

lempung dan lanau. Kadang-kadang pasir berwarna abu-abu kecoklatan, yang sebagian besar diduga berasal dari longsoran atau rayapan di sekitarnya. Kondisi demikian membuktikan bahwa ketika itu permukaan air danau pernah naik yang diikuti oleh kegiatan erupsi gunung api, dan selanjutnya permukaan air kembali turun yang termasuk dalam Ufp I (Gambar 3). Permukaan air danau kembali naik dan menghasilkan endapan pasang surut, yang diikuti oleh terbentuknya endapan pasir danau. Permukaan air danau kembali menuju ke posisi tinggi, dan sebagian daerah tergenangi, sedangkan proses pasang-surut dan lingkungan rawa masih terus berlangsung sebelum permukaan air danau kembali turun yang dicirikan oleh Ufp II (Gambar 3).



Gambar 2. Penampang sedimen kuartar A-B di Tenggara Danau Tondano.



Gambar 3. Penampang sedimentologi memperlihatkan korelasi Unit Fasies Kuarter di tenggara Danau Tondano. Fluktuasi permukaan air danau secara tegak dan mendatar ditunjukkan oleh setiap Runtunan Unit Fasies.

Kelompok Ufp III ditandai oleh munculnya alur sungai dan terbentuknya fasies paparan danau, sehingga permukaan air danau saat itu relatif lebih tinggi dibanding posisi sekarang. Selanjutnya sebagian besar daerah ini menjadi lingkungan rawa, dengan alur sungai purba mengalami pergeseran dan berasosiasi dengan lingkungan cekungan banjir dan dataran banjir. Ke arah selatannya tidak dijumpai

fasies sedimen, dan selanjutnya didominasi oleh fasies tuf Tondano.

Rangkaian Fasies Endapan

Berdasarkan rangkaian atau susunan stratigrafi di atas, maka karakter cekungan Kuarter di daerah penelitian lebih lanjut dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Setiap kelompok unit fasies pengendapan ditandai oleh proses naiknya permukaan air danau. Pada umumnya, naik-turunnya permukaan air dipengaruhi oleh dua faktor, yaitu akibat bertambah atau berkurangnya volume air, atau karena oleh turun-naiknya dasar cekungan. Jumlah volume air sangat tergantung pada tingkat kebasahan/kelembaban (*humidity*), sedangkan naik-turunnya dasar cekungan berkaitan dengan tektonik.
2. Proses pembentukan endapan pasang surut, dapat disebut sebagai suatu perulangan yang cepat dari perubahan lingkungan rawa ke lingkungan danau. Situasi demikian dominan dijumpai dalam interval-interval tertentu. Atau dapat dikatakan bahwa kejadian tersebut cenderung terjadi pada lingkungan rawa yang dipengaruhi oleh naik-turunnya permukaan air danau. Faktor pertambahan volume air yang berhubungan dengan tingkat kelembaban, pada dasarnya dapat saja membuat proses tersebut berlangsung, akan tetapi apabila dilihat dari rangkaian stratigrafinya maka perubahan lingkungan tersebut dari satu tempat ke tempat lainnya berbeda.
3. Endapan pasir danau yang ditafsirkan sebagai fasies paparan danau umumnya terbentuk pada interval bawah dan atas dalam setiap periode unit fasies pengendapan. Terbentuknya fasies tersebut cenderung terjadi di saat permukaan air danau naik dan kembali turun, yang umumnya mengendapkan material kasar. Kejadian proses pengendapan demikian, mungkin disebabkan oleh arus gelombang danau yang membawa material kasar ke bagian paparan danau. Hal tersebut lumrah terjadi apabila paparan cekungan landai dengan jumlah pasokan material yang tinggi seperti halnya pembentukan fasies pantai.
4. Kombinasi interaksi yang spesifik pada lingkungan rawa, paparan danau, cekungan banjir, dan pasang surut berlangsung pada interval atau periode-periode tertentu. Ini menandakan bahwa pasokan material ketika itu tinggi, yang kemudian diikuti oleh turun-naiknya permukaan air. Salah satu kemungkinan penyebab peristiwa demikian adalah alas cekungannya naik-turun. Turun-naiknya suatu

dasar cekungan akibat perubahan yang cepat dan tidak semestinya, akan diikuti oleh perubahan tinggi permukaan air yang kemudian diikuti oleh perombakan material di bagian paparan.

5. Lingkungan cekungan banjir yang terbentuk, memberikan kesan bahwa di tempat tersebut lingkungan rawa tidak berkembang secara baik, akan tetapi pasokan material masih tinggi. Salah satu penyebab utama tidak berkembangnya lingkungan rawa di tempat tersebut adalah tingginya pasokan material yang mungkin berasal dari rombakan sekitarnya. Peristiwa tersebut umumnya berhubungan dengan turunnya dasar cekungan, sehingga daerah yang tadinya ditutupi oleh permukaan air danau menjadi turun, dan selanjutnya lingkungan rawa dapat berkembang.

DISKUSI

Beberapa catatan sehubungan dengan sejarah pengisian cekungan, lebih lanjut dapat didiskusikan sebagai berikut:

- Tufa Tondano yang berumur Plio-Plistosen merupakan alas cekungan danau Tondano. Cekungan tersebut telah mengalami evolusi hingga sekarang, yang sebelumnya merupakan sebuah kaldera tua di bawah pengaruh struktur-struktur utama (Lécuyer dkk., 1997 dan Setiawan dkk., 2002). Dengan demikian, evolusi danau Tondano dari waktu ke waktu, berkaitan dengan aktifitas kegiatan tektonika naik-turunnya permukaan danau dan vulkanisme. Proses-proses eksternal yang dimaksud sangat mempengaruhi proses internal yang terjadi di danau, seperti meluas dan menyusutnya lingkungan akibat bergeser dan berpindahnya elevasi topografi. Diduga sesar utama Sonder aktif, sehingga mempengaruhi perkembangan sedimentasi cekungan, yang bergerak mendarat manganan dan naik (Gambar 4) tercermin pada lokasi bor 2 hingga 6 (Gambar 3).
- Material yang mengisi cekungan sebagian besar berasal dari tufa Tondano dan batuan gunung api berumur Tersier. Karena daerah ini sangat dipengaruhi oleh tektonik, maka perombakan formasi batuan tersebut menjadi lebih sempurna

dan menyebabkan pasokan material menjadi tinggi ke arah cekungan. Pada bagian paparan, yaitu di ujung rombakan yang berbatasan dengan garis permukaan air danau, terjadi proses akumulasi sedimen sebagai terminal atau tempat berlangsungnya proses pengendapan. Di tempat tersebut akumulasi berbagai proses sedimentasi terjadi di bawah pengaruh sistem alur sungai, lingkungan rawa, pasang-surut, dan longoran. Scott dkk. (1991) melakukan studi proses sedimentasi danau Malawi Kuarter yang juga dipengaruhi oleh struktur geologi. Mereka menyatakan bahwa pengaruh dominan pada danau tersebut antara lain oleh proses aliran gravitasi (*gravity flow*) dan rayapan (*creep*). Di danau Tondano sebagian besar suplai sedimen ke arah cekungan diperkirakan berasal dari proses tersebut, yaitu material rombakan yang berhubungan dengan gerak-gerak struktur geologi.

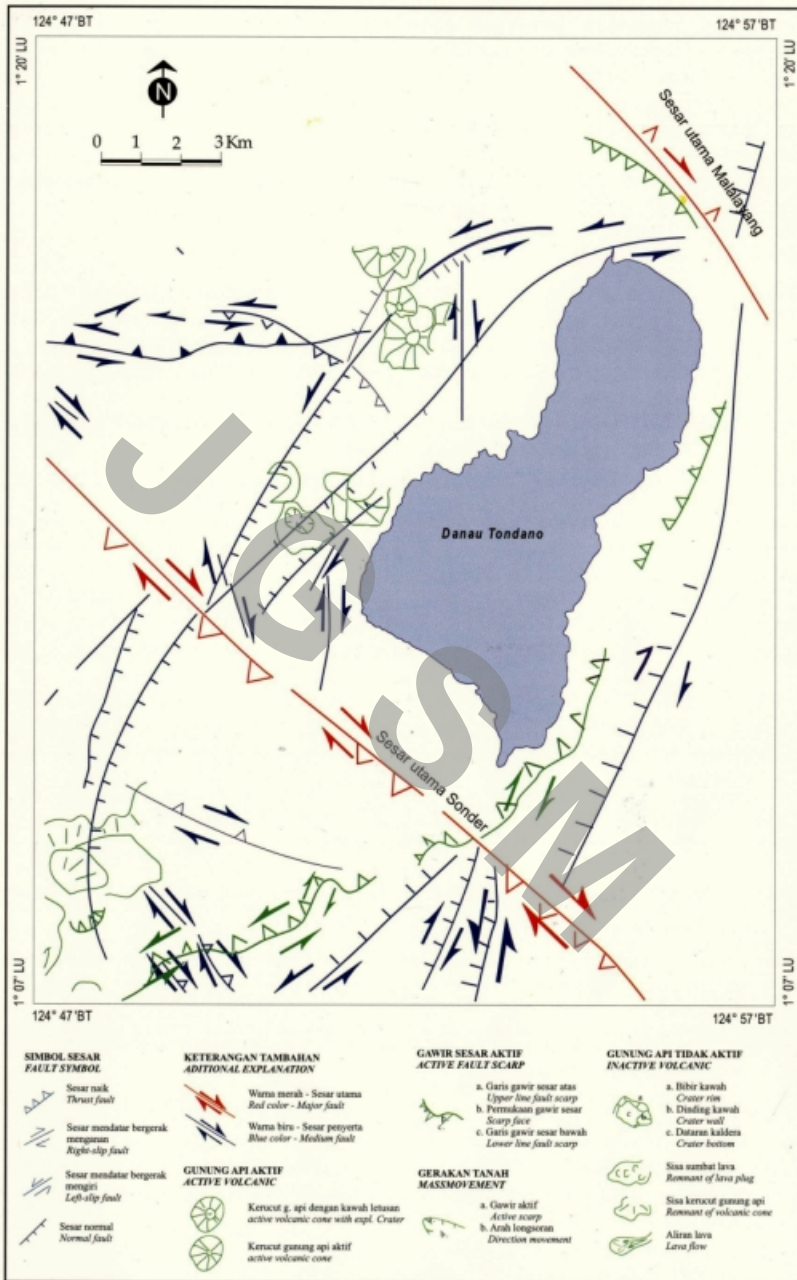
- Lingkungan cekungan banjir yang berkembang di bagian paparan cekungan relatif rendah dan landai. Pasokan material ke arah cekungan relatif tinggi di saat permukaan air danau masih rendah. Oleh karena itu, sumber material tersebut kemungkinan dapat berasal dari hasil longoran yang dikendalikan secara baik oleh energi angin ataupun gravitasi. Hal ini didasari oleh tidak dijumpai perkembangan interval gambut yang baik dan teratur, akan tetapi perkembangan material organik dan gambut tersebut umumnya dikelilingi oleh sedimen klastika. Demikian pula halnya dengan proses-proses pengisian cekungan pada sistem lingkungan pasang-surut dan paparan danau. Proses pengendapan yang berlangsung di tempat tersebut akan dipengaruhi pula oleh material rombakan. Oleh karena itu, diperkirakan sepanjang proses pengisian cekungan gerak-gerak tektonik di daerah ini cukup dominan.
- Alur sungai yang berkembang bersamaan waktunya dengan proses pembentukan fasies paparan. Alur purba tersebut selanjutnya ditutupi oleh fasies dataran banjir yang diduga berasal dari sungai yang aktif kini. Bersamaan

dengan itu permukaan air danau turun ke posisi sekarang. Indikator perubahan lingkungan tersebut merupakan ciri pembentukan Ufp III. Diperkirakan sepanjang pembentukan interval tersebut pengaruh gerak-gerak struktur masih terasa, terbukti dari berpindahannya alur sungai dan tingginya material rombakan di tempat tersebut. Pola atau susunan cekungan yang dipengaruhi oleh sistem pola regional sesar mendatar yang membentuk danau Tondano, berarah hampir timur laut - tenggara *pull-apart basin* (Lécuyer dkk., 1997). Sementara kegiatan gunung api akhir Kuarter umumnya berkembang di bagian barat cekungan. Sistem tektonika dan erupsi gunung api di tempat tersebut kemungkinan memiliki siklus yang saling berkaitan. Lajur sesar utama Malalayang dan Sonder yang berarah barat laut - tenggara yang merupakan batas Tondano membentang mulai dari pantai utara hingga selatan, dan mempunyai sesar-sesar penyerta lain yang menunjukkan kerumitannya (Setiawan dkk., 2002) (Gambar 4). Ini menandakan bahwa daerah ini memiliki berbagai peristiwa tektonik yang berlangsung secara dinamis.

- Munculnya endapan danau pada 8.460 ± 270 jti, kemungkinan sebagai bagian dari puncak kelembaban yang mengikuti siklus Milankovitch *Precession* 20.000 tahunan. Kondisi ini identik dengan puncak mencainya es dan permukaan laut tinggi pada ± 9.000 jti. Ini berarti bahwa proses terbentuknya Uft II dicirikan oleh puncak meluasnya lingkungan danau akibat tingkat kelembaban tinggi ketika itu.

KESIMPULAN

- Fasies pengendapan Kuarter daerah penelitian dapat dibedakan menjadi endapan-endapan cekungan banjir, rawa, dataran banjir, alur sungai, pasang-surut, endapan pasir danau, danau, serta fasies gunung api muda dan erupsi gunung api (tuf Tondano). Selanjutnya fasies tersebut dapat dikelompokkan menjadi tiga unit fasies pengendapan.



Gambar 4. Peta pola sebaran struktur aktif daerah Danau Tondano dan sekitarnya (Setiawan dkk. 2002).

- Turun-naiknya permukaan air danau dan perubahan iklim bukanlah satu-satunya faktor kontrol berubahnya lingkungan. Karena itu berbagai faktor lainnya harus diperhatikan seperti perubahan topografi dan pasokan material sekitarnya. Dengan demikian, di samping faktor global juga faktor regional (kaitannya dengan tektonika) dan lokal (vulkanotektonika) turut mempengaruhi proses runtunan stratigrafi daerah penelitian.
- Turun-naiknya permukaan air danau dari waktu ke waktu tidak dapat dikorelasikan secara akurat, dan tidak pernah akan sama bila dikorelasikan dari satu tempat ke tempat lainnya dalam waktu peralihan yang sama. Hal ini karena faktor perubahan global tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi regional dan lokal, khususnya tektonika dan vulkanotektonika. Untuk daerah yang stabil faktor lokal seperti elevasi dan susunan batuan dasarnya sangat mempengaruhi proses turun-naiknya permukaan air danau, khususnya terhadap pasokan sedimennya. Oleh karena itu, ordo dalam setiap perubahan permukaan air danau

lebih relevan untuk dikorelasikan. Ordo turun-naiknya permukaan air danau tersebut dapat terekam dalam studi siklus stratigrafi. Sebaliknya, perubahan yang mencolok pada berpindahnya permukaan air danau dari waktu ke waktu telah menjadikan studi siklus stratigrafi menjadi acuan dalam memahami efek tektonika di tempat tersebut.

- Proses erupsi gunung api, sirkulasi iklim, dan tektonika merupakan proses eksternal di cekungan Kuarer Tondano. Ketiga faktor tersebut tercermin dari rangkaian fasies bawah permukaan. Setiap peristiwa tersebut merupakan efek tersendiri (*independent factors*), sehingga kejadiannya tidak bersama-sama, akan tetapi saling berkaitan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Herman Mulyana, MSc. yang telah menjalin kerja sama yang baik selama di lapangan, serta memberikan masukan-masukan yang berharga selama penulisan makalah ini.

ACUAN

- Allen, P.A. and Allen, J.R., 1990. Basin Analysis: Principles and Application. *Blackwell Scientific Publication* : 451 pp.
- Anadón, P., Cabrera, L. & Kelts, K., 1991. Preface. In: *Lacustrine Facies Analysis* (Eds. Anadón, P., Cabrera, L. & Kelts, K.). *Spec. Publs Int. Ass. Sediment* 13 : 129-145.
- Baltzer, T., 1991. Late Pleistocene and Recent detrital sedimentation in the deep parts of northern Lake Tanganyika (East Africa rift), in Anadon, P., et.al., eds., *Lacustrine Facies Analysis: Spec. Publs. Int. Ass. Sediment* 13 : 147-173.
- Dam, M.A.C., Fluin, J., Suparan, P., Kaars, S. van der, 2001. Palaeoenvironmental developments in the lake Tondano area (N. Sulawesi, Indonesia) since 33,000 yr. BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 171 : 147-183.
- Dury, G.H., 1977. Underfit streams: retrospect, and prospect. In: *River channel changes* (Ed. By K.J. Gregory). Wiley, Chichester : 281-293.
- Effendi, A.C. & Bawono, S.S., 1997. *Peta Geologi Lembar Manado*, Sulawesi Utara, skala 1:250.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Jordan, J.W., 1999. Late Quaternary sea-level change in southern beringia: coastal paleogeography of the western Alaska Peninsula. <http://es.epa.gov/ncer/fellow/progress/96/jordanja99.html>. Progress Report, EPA Grant Number: U915030, *University of Wisconsin-Madiso* : 2p.
- Kutzbach, J.E., and Street-Perrot, F.A., 1985. Milankovitch forcing of fluctuations in the level of tropical lakes from 18 to 0 kye BP. *Nature* 317 : 130-134.

- Lécuyer, K., Bellier, O., Gourgaud, A., Vincent, P.M., 1997. Tectonique active du Nord-Est de Sulawesi (Indonésie) et contrôle structural de la caldeira de Tondano (Active tectonics of north-east Sulawesi (Indonesia) and structural control of the Tondano caldera. *C.R. Acad. Sci. Paris, Earth Planet. Sci.* 325 : 607-613.
- Leopold, L.B. and Miller, J.P., 1954. A postglacial chronology for some alluvial valleys in Wyoming. *Prof. Pap. U.S. Geol. Surv.* 1261.
- Mulyana, H. dan Santoso, 2006. Sedimentologi dan stratigrafi fasies endapan danau purba Tondano, Kabupaten Minahasa (Sulawesi Utara) (Berdasarkan pada analisis geologi bawah permukaan sehubungan dengan studi deformasi landform). *Jurnal Sumber Daya Geologi* XVI (3): 144-158.
- Overpeck, J.T., Anderson, D., Trumbore, S., Prell, W., 1996. The south-west Indian Monsoon over the last 18.000 years. *Clim. Dyn.* 12 : 213-225.
- Pandarinath, K., Shankar, R. and Yadava, M.G. 2001. Late Quaternary changes in sea level and sedimentation rate along the SW coast of India: Evidence from radiocarbon dates. *Current Science* 81 (5) : 594-600.
- Perlmutter, M.A. and Matthews, M.A., 1989. Global Cyclostratigraphy. In: T.A. Cross (ed.), *Quantitative Dynamic Stratigraphy. Prentice Englewood, New Jersey* : 233-260.
- PLN, 1994. Gambar situasi topografi kedalaman Danau dan Sungai Tondano. PLN, Pembangkit dan penyaluran Jawa bagian Barat, sektor Saguling. PLN, Wilayah VII, sektor Minahasa.
- Scott, D.L., Ng'ang'a, P., Johnson, T.C. and Rosendahl, B.R., 1991. High-resolution acoustic character of Lake Malawi (Nyasa), East Afrika and its relationship to sedimentary processes. In: Anadon, P., et.al., eds., *Lacustrine Facies Analysis. Spec. Pubs. Int. Ass. Sediment.* 13 : 129-145.
- Setiawan, JB., J.H., Lumbanbatu, U.M dan Poedjoparjitno, S., 2002. Pemetaan Seismotektonik Daerah Manado dan Sekitarnya Propinsi Sulawesi Utara. Puslitbang Geologi, Tidak diterbitkan, 43 h.