

Gerakan struktur dan kaitannya dengan faktor kendali tektonik, berdasarkan analisis stratigrafi; Studi kasus geologi kuartar terhadap fase perkembangan Danau Tondano purba sepanjang Remboken - Kakas, Kec. Remboken dan Kec. Kakas, Kab. Tomohon, Sulawesi Utara

HERMAN MOECHTAR, INDYO PRATOMO, HERMAN MULYANA,
dan SOEMANTRI POEDJOPRAJITNO

Pusat Survei Geologi, Jln. Diponegoro No. 57, Bandung

SARI

Studi stratigrafi endapan Kuartar yang dilakukan di kawasan barat laut Danau Tondano, Kabupaten Tomohon, Sulawesi Utara, menunjukkan terdapatnya enam fasies lingkungan pengendapan. Keenam fasies pengendapan itu terdiri atas tuf Tondano, erupsi gunung api muda, danau, pasir danau, pasang-surut, dan endapan rawa. Berdasarkan korelasi perubahan lingkungan pengendapan secara lateral dan vertikal, selanjutnya diketahui bahwa endapan Kuartar tersebut dapat dibedakan dalam tiga Unit Fasies Pengendapan (UFP I-III). Setiap Unit Fasies Pengendapan dicirikan oleh variasi perubahan lingkungan pengendapan yang dikendalikan oleh tektonik, dan kemudian diikuti oleh aktifnya sesar utama Sonder, yang terekam dalam setiap UFP. Karakter dari stratigrafi tersebut dapat disebut sebagai siklus tektonostratigrafi.

Studi yang dilakukan mencakup analisis sedimentologi dan stratigrafi terhadap enam hasil pemboran yang dilakukan sepanjang lintasan yang berarah hampir tenggara - barat laut dan hampir sejajar dengan garis permukaan air danau di bagian barat daya Danau Tondano. Kedalaman pemboran berkisar antara 1,20 hingga 8,70 m.

Kata kunci: sedimentologi, stratigrafi, tektonik, struktur geologi, Danau Tondano

ABSTRACT

Studies of stratigraphy on Quaternary deposits in the southwest region of Lake Tondano, Tomohon Regency, South Sulawesi, revealed six facies of deposition environments. These facies consist of Tondano tuff, young volcanic eruption, lake, sand lake, tidal lake, and swamp deposits. Based on the correlation of the lateral and vertical variation of the Quaternary deposits, three unit of the depositional facies were recognized (UFP I-III). Each of the depositional facies unit is characterized by variation of the depositional environment changes which were controlled by tectonics, and was followed by the activity of Sonder main fault. The Sonder main fault activity, which controlled the depositional environment changes was recorded as an UFP. Probably, the character of this stratigraphy could be called as cyclo-tectonostratigraphy.

The study was based on analyses of sedimentology and stratigraphy of six borehole information obtained along the E-NW traverse which is approximately parallel to the shorelines of the southwestern part of Lake Tondano. The penetration of the borehead varied from 1.20 to 8.7 m.

Keywords: *sedimentology, stratigraphy, tectonic, geology structure, Lake Tondano*

PENDAHULUAN

Evolusi geologi daerah semenanjung Minahasa tidak terlepas dari faktor kendali keberadaan struktur

cekungan busur gunung api akhir Tersier - Kuartar Sulawesi Utara dan Sangihe. Wilayah ini memiliki fase kejadian perulangan erupsi dan tektonik aktif, yang ditandai oleh pembentukan cekungan *pull-*

apart. Kegiatan ini berlanjut dengan berkembangnya vulkanisme di kawasan ini yang ditandai oleh pembentukan Kaldera Tondano pada $2 \pm 0,4$ j.t.l. (Lecuyer dr., 1997; Pratomo dan Lecuyer, *inprep.*, 2007), dan berkembang menjadi Danau Tondano seperti keadaan saat ini. Setiawan dr. (2002) dalam peta Neo-seismotektonik daerah Manado dan sekitarnya, Sulawesi Utara, skala 1:250.000 secara tegas membedakan sesar-sesar utama dan penyerta yang aktif selama kurun waktu Kuartar. Sesar-sesar tersebut pada umumnya sulit dijumpai di permukaan karena tertutupi oleh batuan gunung api muda. Dam dr. (2001) mempelajari aspek geologi Kuartar di bagian utara danau, dan membedakan tataan geomorfologi dan geologi cekungan Danau Tondano. Mulyana dan Santoso (2006) dalam studi mereka terhadap sedimentologi dan stratigrafi fasies endapan danau purba di bagian utara Danau Tondano menyimpulkan, bahwa proses eksternal erupsi gunung api, sirkulasi iklim, dan tektonik sebagai faktor kendali terbentuknya fasies Kuartar Danau Tondano purba. Mereka juga menyatakan bahwa iklim menuju kondisi minimum ditandai oleh suatu kegiatan erupsi gunung api, sedangkan di kala kondisi beralih ke maksimum diikuti oleh proses pengangkatan. Mulyana dan Moechtar (2007) yang melakukan penelitian Geologi Kuartar di tempat tersebut menyimpulkan, bahwa Danau Tondano mengalami perubahan bentuk bentang alam dari waktu ke waktu. Berubahnya lingkungan sangat dipengaruhi oleh turun-naiknya permukaan air danau, sedangkan fluktuasi tersebut bukan saja berkaitan dengan efek perubahan iklim secara universal, akan tetapi juga dikendalikan secara kuat oleh aktifitas tektonik dan vulkanik. Studi yang dilakukan Moechtar (2007, *inprep.*) terhadap korelasi unit fasies di bagian tenggara danau yang berkaitan dengan rekaman peristiwa geologi Kuartar pada sedimentasi dan fluktuasi permukaan air Danau Tondano purba menyatakan bahwa, turun-naiknya permukaan air danau dan perubahan iklim bukanlah satu-satunya faktor kendali berubahnya lingkungan. Karena itu berbagai faktor lainnya harus diperhatikan, seperti: perubahan topografi dan pasokan material dari kawasan di sekitarnya. Dengan demikian, di samping faktor global juga faktor regional (kaitannya dengan tektonik) dan lokal (vulkanotektonik) turut mempengaruhi (proses runtunan) stratigrafi daerah Danau Tondano.

Dari berbagai kesimpulan penelitian tersebut di atas dapat dipahami bahwa turun-naiknya permukaan air Danau Tondano dari waktu ke waktu tidak dapat dikorelasikan, dan permukaannya tidak akan pernah memiliki level yang sama dari satu tempat ke tempat lainnya dalam waktu suatu peralihan. Hal ini karena faktor perubahan global tersebut sangat dipengaruhi oleh kondisi regional dan lokal, khususnya tektonik dan vulkanotektonik. Untuk daerah yang stabil faktor lokalnya, seperti elevasi dan susunan batuan dasarnya juga 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 terhadap berpindahnya permukaan air danau dari waktu ke waktu telah menjadikan studi siklus stratigrafi menjadi acuan dalam memahami efek tektonik di tempat tersebut.

Dilatarbelakangi pernyataan tersebut di atas, maka permasalahan dinamika perkembangan Danau Tondano adalah rumit dan kompleks karena dikendalikan oleh berbagai faktor. Untuk itu, faktor yang mempengaruhi perkembangan danau tersebut kiranya perlu ditelaah secara menyeluruh, termasuk di bagian barat daya yang belum tersentuh sebelumnya. Maksud penelitian ini adalah untuk memberikan informasi tentang dinamika danau purba, (khususnya) dalam hal ini gerak-gerak struktur yang berada di sekitarnya yang berkaitan dengan perkembangan Danau Tondano purba. Guna mencapai maksud tersebut maka tujuan penelitian ini antara lain:

(a) mendeskripsi fasies endapan Kuartar dan menafsirkan lingkungan pengendapannya, sehingga perkembangan lingkungan purbanya dipahami,

(b) mempelajari perubahan fasies lingkungan pengendapannya secara lateral dan vertikal, yang selanjutnya dikelompokkan menjadi urutan stratigrafi, sehingga faktor kendali yang mempengaruhi pembentukannya dapat diketahui,

(c) mendiskusikan tektonik dan hubungannya dengan struktur geologi yang mengendalikan berubahnya lingkungan purba.

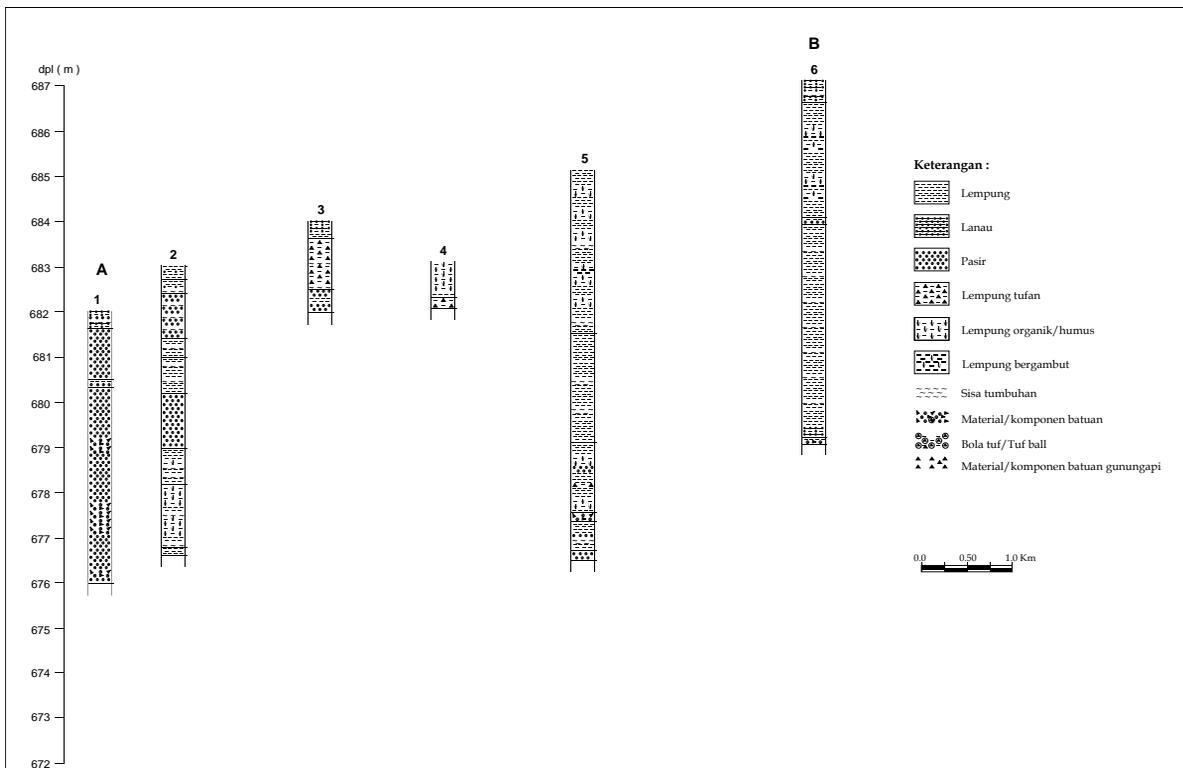


Gambar 1. Peta lokasi penelitian dan titik bor di barat daya Danau Tondano.

METODE

Guna memperoleh data bawah permukaan, telah dilakukan pemboran dangkal di paparan barat daya Danau Tondano dengan menggunakan skala penampang tegak 1 : 100 (Gambar 1). Enam titik lokasi dengan kedalaman antara 1,20 m hingga mencapai hampir 8,70 meter telah dilakukan pem-

borannya (Gambar 2). Korelasi rangkaian stratigrafi dan hubungan fasies, baik secara tegak ataupun mendatar, menjadi target untuk ditelaah di dalam menelusuri karakternya. Perubahan dari kompleks fasies endapan klastika kasar, halus, dan kombinasinya menjadi perhatian utama guna memahami proses pengendapannya dalam ruang dan waktu. Korelasi yang meliputi penyebaran fasies, baik secara



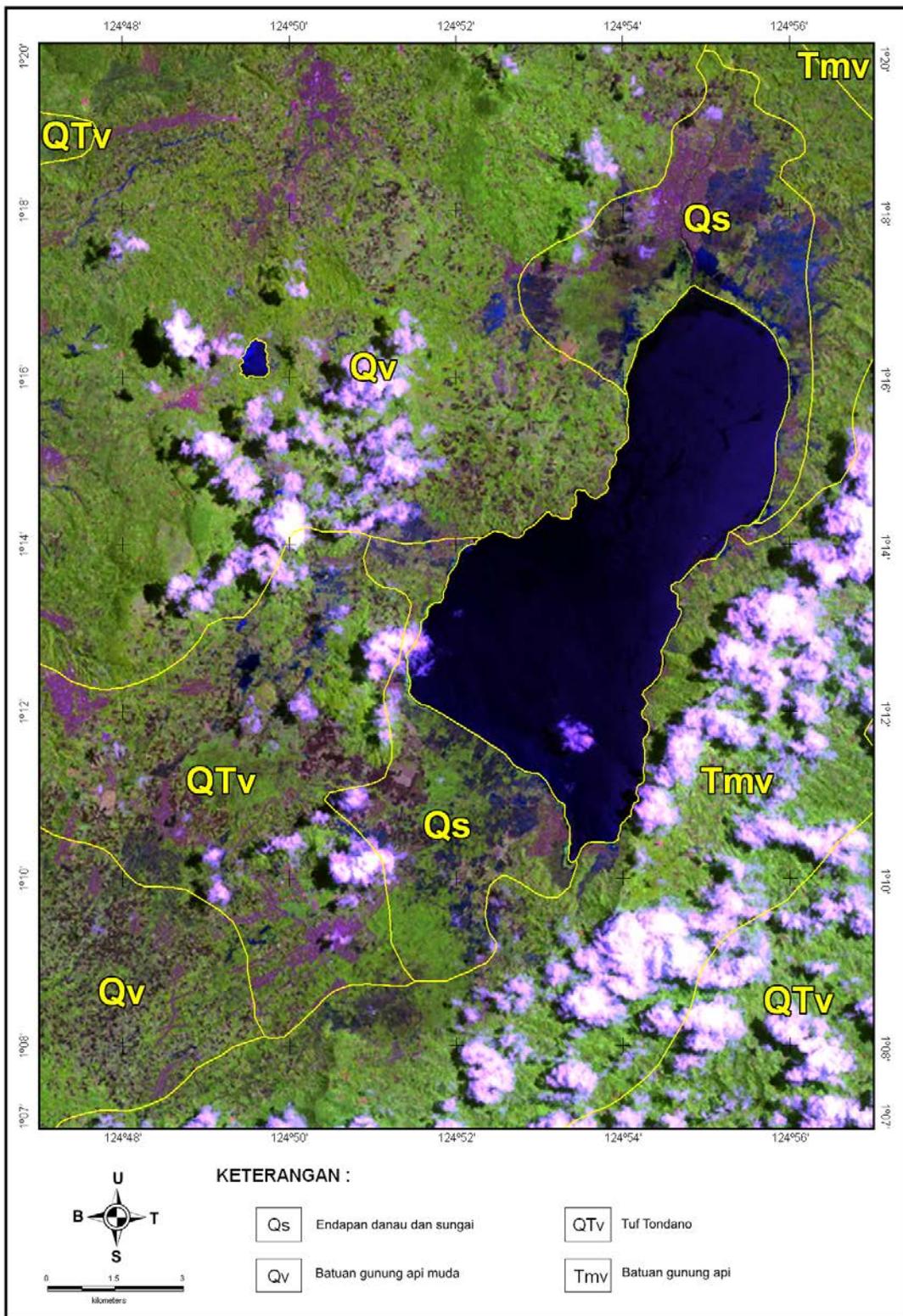
Gambar 2. Penampang tegak sedimen Kuartar A - B di barat daya Danau Tondano.

vertikal maupun lateral, secara spesifik perubahan warna fasies, termasuk butiran dan susunan fasies endapannya, diamati secara seksama. Penelaahan citra *landsat* untuk penafsiran geologi, khususnya struktur geologi, juga dilakukan. Diharapkan hasil penafsiran tersebut dapat memberikan informasi terhadap hubungan struktur geologi terhadap faktor kendali dinamika sedimentasi Kuartar di daerah penelitian. Akhirnya, kombinasi aspek pengamatan permukaan dan bawah permukaan tersebut menjadi sasaran utama penelitian ini.

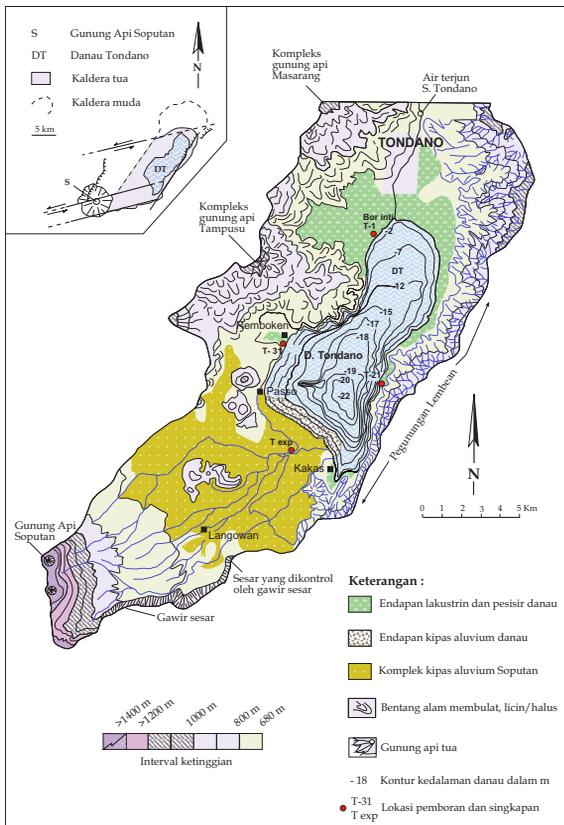
GEOLOGI

Secara geografis, daerah penelitian terletak pada koordinat $1^{\circ} 07' - 1^{\circ} 20' \text{ LU}$ dan $124^{\circ} 47' - 124^{\circ} 57' \text{ BT}$, termasuk bagian dari Lembar Manado berskala 1:50.000 (Gambar 1). Secara administratif, daerah ini berada di selatan Kota Tondano, dan menempati kawasan Kecamatan Kakas dan Kecamatan Remboken, Kabupaten Tomohon, Provinsi Sulawesi

Utara. Bentang alamnya merupakan dataran rendah aluvium, yang menurut Effendi dan Bawono (1997) disusun oleh endapan Kuartar yang terdiri atas fasies danau dan sungai (Qs). Bentang alam ini dikelilingi oleh tonjolan-tonjolan bukit yang memiliki ketinggian antara 700 sampai 1000 m, dan ditutupi oleh Batuan Gunung Api (Tmv), Tuf Tondano (Qtv), Batuan Gunung Api Muda (Qv), dan Endapan Danau & Sungai (Qs) (Gambar 3; Effendi dan Bawono, 1997). Secara fisiografis, daerah ini sangat peka terhadap pengaruh dinamika lokal dan regional sistem lajur penunjaman dan lajur gunung api muda yang secara umum memberikan implikasi dampak tektonik dan vulkanik, yaitu sebagai lajur gunung api muda Kuartar yang mungkin telah memulai aktifitasnya sejak Tersier. Wilayah ini juga dipengaruhi oleh lajur penunjaman Sulawesi Utara dan Sangihe Timur (Hamilton, 1979; Effendi dan Bawono, 1997). Oleh karena itu, daerah ini merupakan salah satu kawasan yang bertektonik rumit, serta memiliki aktifitas vulkanik yang tinggi mengingat kurun waktu dari proses tersebut dalam skala



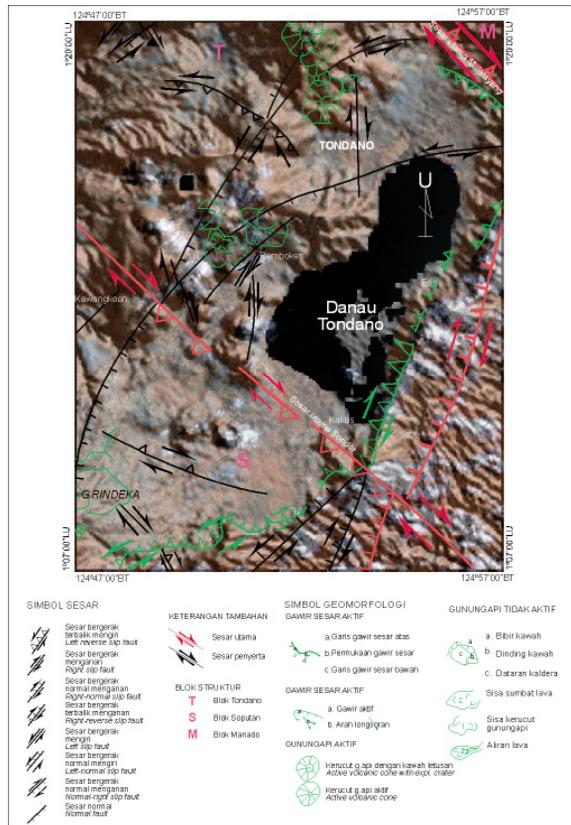
Gambar 3. Peta citra *Landsat* ETM+7 RGB.542 (PSG, 2007) dan peta geologi daerah penelitian menurut Efendi dan Bawono, 1997.



Gambar 4. Peta geomorfologi dan geologi cekungan Danau Tondano (menurut Dam dr., 2001).

relatif panjang. Pola atau susunan cekungan yang dipengaruhi oleh sistem sesar mendatar regional yang membentuk Danau Tondano berarah hampir timur laut - tenggara (Lécuyer dr., 1997).

Dam dr. (2001) membedakan susunan geomorfologi dan geologi cekungan Danau Tondano menjadi : (a) batuan gunungapi tua, torehan lembah berbentuk V, punggung curam yang tersebar di timur danau; (b) *smooth* (?) atau bentang alam membulat tanpa torehan lembah (aliran lava), tersebar di barat dan barat laut danau; (c) kompleks kipas aluvium Soputan 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 (Gambar 4). Setiawan dr. (2002) membedakan daerah Sulawesi Utara ini menjadi enam blok tektonik yang satu sama lainnya dibatasi oleh sesar-sesar utama, yaitu: Blok Amurang (A), Soputan (S), Tondano (T), Manado (M), Likupang (L), dan Batuangus (BA). Daerah penelitian termasuk ke dalam Blok Tondano (T).



Gambar 5. Peta struktur daerah Tondano mengantuk klasifikasi Ricard 1972, sebagai hasil penafsiran citra dan potret udara (modifikasi dari Setiawan dr., 2002).

Berdasarkan penafsiran citra *landsat*, pola struktur Blok Tondano tersebut selanjutnya dapat direkonstruksi (Gambar 5).

SEDIMENTOLOGI DAN STRATIGRAFI

Litologi dan Lingkungan Pengendapan

Litologi sedimen Kuartar bawah permukaan di daerah penelitian tersusun oleh lempung bergambut, lempung organik/humus, lempung tufan, pasir, lanau, dan lempung (Gambar 2). Secara umum, ciri litologi yang demikian dapat dibedakan menjadi fasies erupsi gunung api sebagai tuf Tondano dan erupsi gunung api muda, fasies sedimen, dan tanah penutup. Selanjutnya, fasies sedimen dapat dibedakan menjadi endapan-endapan danau, pasir danau (fasies paparan danau), pasang-surut (perulangan fasies danau dan rawa), dan rawa (Gambar 2 dan 6).

Fasies erupsi gunung api (tuf Tondano)

Terdiri dari butiran andesit berukuran pasir, menyudut hingga menyudut tanggung dengan kandungan pecahan batupung, warna pelapukan coklat kekuningan sampai coklat kemerahan yang ditutupi di bagian atasnya oleh endapan permukaan rawa. Pemboran dilakukan di daerah dataran aluvium pesawahan yang semakin ke arah selatannya secara berangsur berubah menjadi dataran rendah hingga bergelombang yang ditempati oleh kompleks tuf Tondano. Dengan demikian, fasies ini dapat disetarakan sebagai batuan alas fasies sedimen, selaku paparan cekungan (Gambar 2 dan 6).

Fasies erupsi gunung api muda

Berupa lempung tufan, pasir tufan, dan tuf, berselingan dengan lapisan pasir secara teratur, tingkat konsistensi keras hingga sangat keras, berwarna abu-abu terang hingga kekuningan, banyak mengandung material hasil erupsi gunung api, pecahan batuan dan gelas vulkanik. Dijumpai pada kedalaman 7 m setebal 15 cm, dan diinterpretasikan sebagai batuan gunung api muda (Qv) (Gambar 6).

Endapan danau

Terdiri atas pasir yang ke arah bawahnya menjadi lempung pasiran dan padat; berwarna abu-abu, abu-abu kehijauan hingga hijau; mengandung humus dan sisa-sisa tumbuhan; bersisipan tipis pasir dan lempung setebal 5 - 10 cm. Semakin ke bawah fasies ini didominasi oleh lempung pasiran dengan sisipan pasir yang semakin menebal antara 10 - 15 cm, berwarna hijau keabu-abuan dengan kandungan sisa tumbuhan yang berlimpah. Diinterpretasikan sebagai endapan danau (Gambar 6).

Endapan pasir danau (fasies paparan danau)

Terdiri atas pasir halus - kasar, berwarna abu-abu hingga abu-abu gelap, terpilah sedang - baik, menyudut tanggung - membulat tanggung, ketebalan antara 20 cm hingga mencapai 4,5 m. Bagian interval bawahnya berlapis tipis dan berselang-seling dengan fasies lainnya, sedangkan lapisan tengah relatif lebih tebal yang menipis ke arah atasnya. Yang dimaksud dengan endapan pasir danau adalah fasies yang diendapkan di bagian pinggir atau paparan danau, yang sangat dipengaruhi oleh naik-turunnya permukaan air danau (Gambar 6).

Endapan pasang-surut (perulangan fasies rawa dan danau)

Dicirikan oleh perselingan antarbutiran halus, yaitu lapisan lempung, lempung lanauan, lempung berhumus, dan pasir halus. Ketebalan lapisannya antara 20 cm hingga 70 cm, banyak mengandung sisa tumbuhan dan pecahan cangkang moluska. Diinterpretasikan sebagai fasies endapan danau. Sementara itu, fasies danau ini berselingan dengan lempung berhumus berwarna coklat tua dengan ketebalan antara 20 - 30 cm yang diinterpretasikan sebagai fasies rawa. Perselingan kedua fasies tersebut ditafsirkan sebagai endapan pasang-surut, yaitu perulangan antara fasies danau dan rawa (Gambar 6).

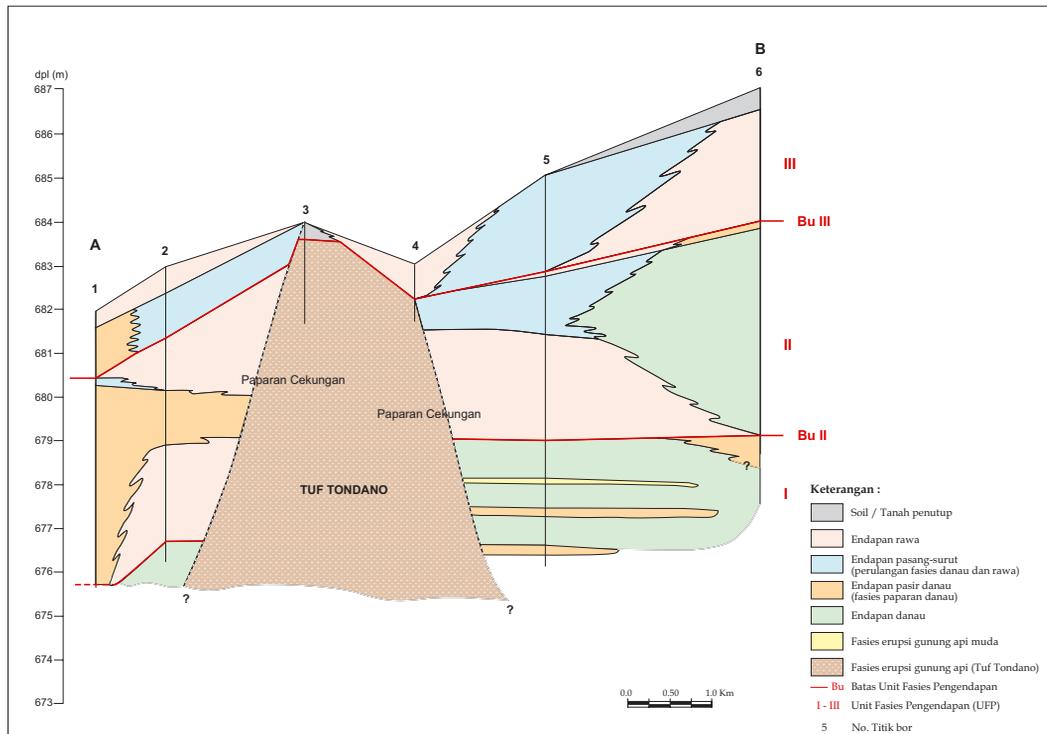
Endapan rawa

Lempung berwarna coklat gelap hingga coklat kehitaman, banyak mengandung humus yang diinterpretasikan sebagai fasies rawa dengan kisaran ketebalan antara 20-30 cm. Ke arah atasnya ditindih oleh lapisan lempung, lanau lempungan, dan lanau, berwarna abu-abu gelap sampai coklat, mengandung material gelas vulkanik dan lapisan tipis tuf. Jenis litologi tersebut diinterpretasikan sebagai endapan rawa. Selain itu, dijumpai perselingan tipis antara lempung, lempung berhumus, dan endapan gambut dengan tebal rata-rata 5 cm. Fasies ini berwarna coklat gelap hingga coklat kehitaman yang berselingan dengan fasies vulkanik, banyak mengandung sisa tumbuhan dan humus berwarna coklat gelap. Selain itu, ciri litologi endapan rawa ini ditandai pula oleh lempung, berwarna abu-abu, ketebalan lebih dari 1 m, agak padat, mengandung sisa tumbuhan, dan sedikit berhumus. Fasies tersebut diinterpretasikan sebagai endapan rawa (Gambar 6).

Soil/Tanah penutup

Merupakan endapan permukaan terdiri atas lempung dan lanau pasiran, berwarna coklat kekuningan, coklat dan kuning; terpilah buruk, mengandung sisa tumbuhan dan diinterpretasikan sebagai tanah pelapukan yang berasal dari sedimen di bawahnya (*soil*).

Ciri litologi yang berbeda dan mencolok antara tuf Tondano dengan fasies sedimen, di antaranya: kekerasan, komposisi, dan warna; sehingga memberikan kesan bahwa fasies tersebut sebagai alas endapan sedimen dan batuan gunungapi muda



Gambar 6. Korelasi unit fasies pengendapan kuartar di barat daya Danau Tondano.

(Gambar 6). Di lapangan, batuan tersebut tersingkap di selatan danau pada bentang alam perbukitan bergelombang (Gambar 3), sehingga memperkuat dugaan bahwa fasies tersebut sebagai alas dari rangkaian sedimen Kuartar di daerah penelitian. Dam drr. (2001) menyebutnya sebagai kipas aluvium Sopotan berupa kerakal dan pasir yang menerus ke arah danau dengan ukuran pasir. Fasies piroklastika lainnya yang keterdapatannya bersama-sama dengan fasies sedimen memiliki sifat litologi yang relatif lunak dan berlapis, sehingga ditafsirkan sebagai material hasil erupsi gunung api yang masuk ke dalam danau (Gambar 6) dan kemungkinan termasuk ke dalam gunung api muda (Qv).

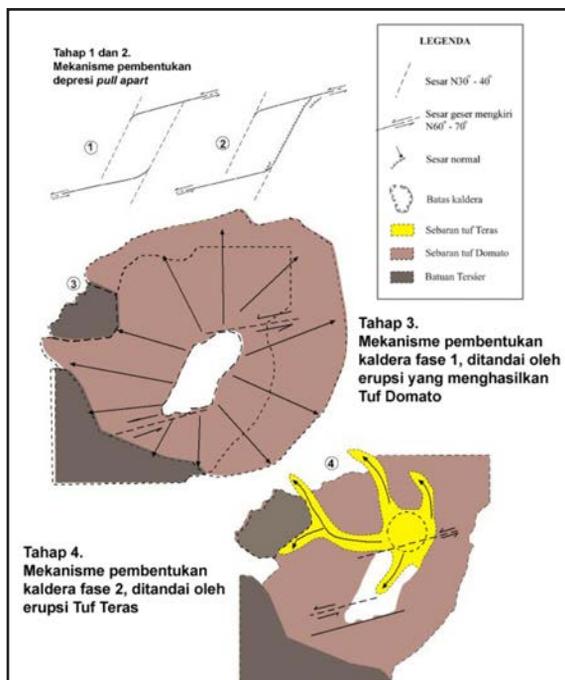
Rangkaian susunan litologi yang ditafsirkan tersebut di atas, selanjutnya dicirikan oleh suatu penerusan lapisan secara berkesinambungan, yaitu hasil suatu proses sedimentasi dari waktu ke waktu. Susunan lapisan tersebut secara lateral dan vertikal membentuk suatu rangkaian. Susunan perlapisan yang demikian dapat dikelompokkan menjadi satu kesatuan dengan karakter yang berbeda dari waktu ke waktu menjadi Unit Fasies Pengendapan (UFP)

(Gambar 6). Proses kesinambungan perlapisan tersebut masih berlangsung dan menerus hingga sekarang. Menurut Effendi dan Bawono (1997) daerah penelitian ditutupi oleh endapan danau dan sungai yang terdiri atas pasir, lanau, konglomerat, dan lempung napalan. Komposisi litologi tersebut tidak jauh berbeda dengan fasies di bawah permukaannya, sehingga rangkaian fasies tersebut dapat dimasukkan ke dalam apa yang dimaksud dengan endapan danau dan sungai (Qs). Hanya saja mungkin bagian atas hasil erupsi gunung api muda (Qv) turut memperkaya rangkaian endapan danau dan sungai purba di daerah ini.

RUNTUNAN STRATIGRAFI

Korelasi stratigrafi yang dilakukan didasari pada pengelompokan karakter perulangan perubahan lapisan secara lateral dan vertikal, dan secara terperinci ciri korelasi runtunan stratigrafi Kuartar di barat daya Danau Tondano di antaranya:

1. Perulangan proses pengendapan yang sama,



Gambar 7. Pembentukan kaldera Tondano, Minahasa (menurut Pratomo & Lecuyer, 2007). Memperlihatkan evolusi paleogeografi daerah Danau Tondano dan sekitarnya. Tahap 1 dan 2: pembentukan depresi 'pull-apart'; Tahap 3: pembentukan kaldera fase pertama, yang ditandai oleh erupsi Tuf Domato (2,0 + 0,4 Ma); Tahap 4: pembentukan kaldera fase kedua, ditandai oleh erupsi Tuf Teras (1,3 + 0,2 Ma).

yang berarti telah terjadi pembentukan lingkungan yang sama, tetapi berbeda umur.

2. Memiliki bentuk atau pola lapisan yang menerus, membaji, dan berjari-jemari.
3. Pada fasies endapan yang sama memiliki variasi komposisi litologinya yang berbeda (proses-proses pengasaran/penghalusan butiran, perubahan warna termasuk kandungan organik, dan pelapukan) apabila berbeda unit fasies pengendapannya.
4. Dominannya suatu fasies pengendapan dalam setiap unit fasies pengendapan.

Di dalam stratigrafi, parameter-parameter tersebut sangat berguna untuk mengelompokkan berbagai lapisan, terlebih dalam menelusuri sejarah perkembangan dinamika cekungan. Korelasi pola pengisian cekungan ini selanjutnya memberi petunjuk sehubungan dengan posisi relatif setiap kelompok

lapisannya. Dengan demikian, sejarah pembentukan dan perkembangan fasies danau di daerah penelitian dapat dipahami lebih lanjut.

Di utara, Unit Fasies Pengendapan (UFP) I ditandai oleh turun-naiknya permukaan air danau yang membentuk perulangan endapan danau dan pasir danau dengan diselingi oleh kegiatan erupsi gunung api. Runtunan stratigrafi UFP I ini ditindih oleh lingkungan rawa yang menjemari dengan fasies paparan danau di selatan dan fasies pasang-surut di utara. Di selatan berkembang fasies pasang surut yang ditutupi oleh fasies rawa, sebaliknya di utara fasies danau semakin berkembang yang menjemari dengan fasies pasang-surut sebelum ditutupi oleh fasies rawa dan paparan danau. Runtunan stratigrafi tersebut selanjutnya dikelompokkan menjadi UFP II. Proses perkembangan pembentukan fasies endapan selanjutnya diawali oleh perkembangan endapan-endapan pasir danau dan pasang-surut yang ditutupi oleh endapan rawa di selatan. Sebaliknya di utara, endapan pasang-surut tersebut berasosiasi dengan endapan rawa yang pada akhirnya ditindih oleh *soil*. Rangkaian fasies tersebut dikelompokkan menjadi UFP III (Gambar 6).

ANALISIS PERUBAHAN FASIES SECARA LATERAL DAN VERTIKAL

Batas antara UFP I di utara (Bu II) yang berkisar antara 4,5 hingga 8,3 m dari permukaan (Gambar 6) menandakan bahwa akumulasi pengendapan semakin besar ke arah utara. Gejala ini berlangsung selama pembentukan UFP II dan III, sedangkan akumulasi pengendapan di selatan relatif tidak mencolok (Gambar 6). Hal tersebut dimungkinkan karena secara umum ke arah selatan cenderung terjadi pendalaman cekungan yang salah satu faktor penyebabnya karena terjadi penurunan. UFP I juga dicirikan oleh permukaan air danau yang ketika itu tinggi dengan diselingi oleh aktifitas erupsi gunung api, dan sebelum permukaan air danau turun di wilayah tersebut berkembang lingkungan rawa, yaitu sebagai alas dari UFP II. Peralihan lingkungan selama UFP II berlangsung secara cepat yang terbukti dari perulangan lingkungan rawa dan danau yang diikuti oleh terbentuknya fasies pasang-surut dan paparan danau. Berlangsungnya proses pengendap-

an pada UFP II berindikasikan bahwa pendalaman cekungan berada di utara, meski batas garis permukaan air danau ketika itu pernah meluas ke daerah Kakas di selatan. Akumulasi endapan pasang-surut yang dominan terbentuk pada UFP III membuktikan bahwa naik-turunnya permukaan air danau ketika itu relatif besar. Dengan berkembangnya endapan pasang-surut di selatan, diperkirakan bahwa telah terjadi pendalaman cekungan di tempat tersebut (Gambar 6).

Didasari runtunan stratigrafi yang dikaitkan dengan perubahan fasies secara lateral dan vertikal, maka ciri karakter cekungan tersebut, di antaranya adalah:

1. Setiap UFP ditandai oleh proses naiknya permukaan air danau. Pada hakekatnya, penyebab turun-naiknya muka air dikendalikan oleh dua faktor. Pertama, disebabkan oleh bertambah dan menurunnya volume air, yaitu yang berhubungan bertambah dan berkurangnya tingkat kelembaban (*humidity*), dan kedua oleh turun-naiknya alas cekungan yang berkaitan dengan tektonik. Faktor kendali kedua cenderung berperan besar terhadap perkembangan Danau Tondano purba yang terbukti dari perubahan lingkungannya yang tidak beraturan dan simetris dari waktu ke waktu.
2. Terbentuknya endapan pasang surut adalah sebagai indikasi perulangan yang cepat turun-naiknya permukaan air danau di wilayah lingkungan rawa. Gejala tersebut cenderung berkaitan dengan Bergeraknya alas cekungan yang dikendalikan oleh tektonik.
3. Endapan pasir danau yang ditafsirkan sebagai fasies paparan danau, umumnya terbentuk pada interval bawah dan atas dalam setiap periode UFP. Terbentuknya fasies tersebut cenderung terjadi di saat permukaan air danau pasang dan kembali turun, yang umumnya mengendapkan material kasar. Salah satu penyebab berlangsungnya proses tersebut berkaitan dengan arus gelombang danau yang membawa material kasar ke bagian paparan danau. Hal tersebut dapat terjadi apabila kemiringan paparan cekungan landai dengan jumlah pasokan material yang tinggi, seperti halnya pembentukan fasies pantai. Tidak tertutup kemungkinan bahwa pasokan material tersebut berasal dari daerah sekitarnya

dengan jumlah yang tinggi.

4. Kombinasi interaksi yang spesifik pada lingkungan rawa, paparan danau, cekungan banjir, dan pasang surut berlangsung pada periode-periode tertentu. Ini menandakan bahwa pasokan material ketika itu tinggi yang kemudian diikuti oleh turun-naiknya permukaan air. Salah satu faktor penyebab peristiwa demikian kemungkinan akibat alas cekungannya yang naik dan turun, sehingga memungkinkan terjadi perombakan. Turun-naiknya suatu dasar cekungan akan diikuti oleh pasang-surutnya permukaan air, yang selanjutnya diikuti pula perombakan material, khususnya di bagian paparan danau.

DISKUSI

Sedimentasi dan Faktor Kendalinya

Tuf Tondano yang berumur Plio-Plistosen dapat disinyalir sebagai alas cekungan Danau Tondano purba yang pada mulanya merupakan kaldera tua. Proses sedimentasi dari waktu ke waktu umumnya dikendalikan oleh peristiwa tektonik dan vulkanisme yang menyebabkan berevolusinya cekungan dari waktu ke waktu, sebagai danau vulkano-tektonik. Gerak-gerak tektonik akan memberikan sumbangsih terjadinya proses aliran gravitasi (*gravity flow*) dan rayapan (*creep*) yang umumnya berasal dari tuf Tondano. Pasokan material tersebut diklasifikasikan oleh Dam dr. (2001) sebagai kompleks kipas aluvium Sopotan dan endapan kipas aluvial danau (Gambar 4). Efek tektonik bukan saja telah menjadikan tingginya pasokan material ke arah danau, akan tetapi juga memberi efek terhadap berubahnya dimensi cekungan dari waktu ke waktu. Oleh karena itu, pola rangkaian pengendapan di daerah penelitian menjadi rumit dan tidak homogen. Lebih jauh, perkembangan cekungan yang dikaitkan dengan pola perulangan yang terbentuk dapat dijelaskan sebagai berikut:

UFP I

Secara umum, kondisi permukaan air danau selama pembentukan UFP I adalah tinggi, terbukti hampir keseluruhan areal ketika itu ditutupi oleh fasies danau. Gerakan tektonik selama pembentukan unit fasies tersebut relatif berpengaruh dan terasa karena tidak homogennya pola lapisan perulangan

fasies paparan dan danau secara vertikal (Gambar 6). Litologi fasies danau yang berwarna lebih gelap, yaitu kehijauan pada lapisan atas dibanding lapisan fasies danau yang terletak di bawahnya, kemungkinan berhubungan dengan penambahan volume air akibat tingkat kelembaban naik.

UFP II

Ciri rangkaian stratigrafi UFP II ditandai oleh: (a) permukaan air danau turun secara regional dan menjadikan wilayah tersebut menjadi lingkungan rawa; (b) permukaan air danau kembali naik di utara yang diikuti oleh meluasnya lingkungan pasang-surut; dan (c) permukaan air danau kembali turun dengan terbentuknya lingkungan rawa di bagian atas. Turun-naiknya permukaan air danau tersebut sulit dihubungkan dengan bertambah dan berkurangnya volume air ketika itu karena: (a) tidak teraturnya pola perlapisan yang terbentuk, terutama di selatan tempat endapan pasang-surut terbentuk secara setempat dan tidak menerus, seolah-olah elevasi di tempat tersebut mengalami perubahan dari sebelumnya; (b) litologi fasies rawa pada umumnya ditandai oleh kelangkaan kandungan humus dan berwarna lebih terang, sedangkan fasies danau juga ditandai oleh warna litologi yang lebih terang (abu-abu kehijauan) berupa pasir. Oleh karena itu, selama pembentukan UFP II, turun-naiknya permukaan air danau cenderung dikendalikan oleh tektonik, dan dengan demikian dapat diartikan bahwa secara umum muka air danau selama pembentukan UFP II adalah turun, tetapi sebagian besar dasar cekungan adalah turun.

UFP III

Pembentukan UFP III ditandai oleh: (a) dominannya fasies pasang-surut di daerah lingkungan rawa, (b) endapan pasir danau yang berintegrasi dengan fasies pasang-surut, dan (c) ditandai oleh meluasnya proses pelapukan dan pembentukan *soil* di utara. Litologi fasies rawa yang terbentuk memiliki perbedaan dengan litologi fasies yang sama pada UFP II, yaitu ditandai oleh warna yang lebih terang dan hampir-hampir tidak mengandung humus. Gejala tersebut menandakan bahwa tingkat kelembaban semakin turun. Sebaliknya, berkembangnya fasies pasang-surut membuktikan bahwa muka air danau kembali naik. Proses tersebut diikuti

oleh pembentukan *soil* yang menandakan bahwa permukaan air danau kembali turun. Proses-proses tersebut mengandung arti bahwa pada hakekatnya tingkat kelembaban yang berhubungan dengan tinggi rendahnya volume air semakin menurun dibanding UFP II, tetapi naiknya muka air danau berhubungan dengan tektonik.

Tektonik Kaitannya Dengan Struktur Geologi

Plateau Tibet adalah indikator yang baik dalam pemahaman gerak vertikal utama (*uplift*) aktif di Asia dan berubahnya iklim global sejak akhir Kenozoikum (Jin drr., 2007). Mereka menyatakan bahwa aktifnya tektonik dicirikan oleh suatu variasi sedimen *detrital* ke arah delta dan pedataran karena di bagian hulunya dibatasi oleh sedimen sungai dan kipas Bengal yang sangat dipengaruhi oleh kejadian tektonik. Sebaliknya perubahan iklim disebabkan oleh peristiwa global dari sirkulasi atmosfer. Di daerah penelitian, variasi litologi yang demikian mungkin dicerminkan oleh akumulasi endapan pasir danau yang didominasi oleh material piroklastika, dan menurut Dam drr. (2001) material tersebut adalah endapan kipas aluvial danau. Morgan dan Lezzar (2007) dalam studinya pada Danau Tanganyika yang terdalam dan terluas di Afrika Timur yang didasari oleh batimetri dan profil seismik, menyatakan bahwa tubuh sedimen *lobe* dimulai dari bagian depan (*proximal*), tengah (*intermediate*), dan bagian belakang (*distal*). Sistem tubuh sedimen tersebut yang tidak seumur dan memperlihatkan arah sumbu pengendapan yang berbeda satu sama lainnya. Perubahan dan perpotongan tubuh *lobe* tersebut disebabkan oleh beralihnya lokasi mulut sungai yang diakibatkan oleh tektonik. Berubahnya lingkungan dari waktu ke waktu yang dicirikan oleh korelasi Unit Fasies Pengendapan di daerah penelitian (Gambar 6) disebabkan oleh tektonik yang mengakibatkan berubahnya alas cekungan (*baselevel*). Hal serupa juga dikemukakan oleh Kotila dan Sanwal (2004) bahwa punahnya fauna dan berubahnya lingkungan purba akibat tektonik sangat terkait di wilayah aliran sungai dan danau. Peristiwa tersebut sebagai salah satu konsekuensi dari tektonik Kuartar yang mengaktifkan kembali sesar-sesar, yang mengakibatkan berubahnya pola aliran termasuk alur sungai dan permukaan danau. Di daerah penelitian, kandungan cangkang moluska

hampir-hampir tidak dijumpai, sedangkan di bagian utara Danau Tondano, sedimen yang sama memiliki kandungan moluska yang berlimpah (Mulyana dan Santoso, 2006; Mulyana dan Moechtar, 2007). Langkanya fauna tersebut dijumpai di daerah penelitian, kemungkinan berhubungan dengan pergerakan tektonik aktif di tempat tersebut, sehingga alas cekungan bergerak dan permukaan air danau turun-naik yang menyebabkan fauna tidak dapat hidup secara layak.

Dumurdzanov dan Burchfiel (2004) melakukan penelitian evolusi cekungan Neogen-Plistosen Macedonia dan mengatakan bahwa gerak vertikal alas cekungan adalah sebagai indikator meluasnya kemiringan topografi yang memberikan refleksi ke akumulasi cekungan hingga Plistosen, dan intensitasnya semakin berkurang ke Resen. Di daerah penelitian, gerak vertikal tersebut mungkin berhubungan dengan tidak simetrisnya permukaan batas setiap Unit Fasies Pengendapan (Gambar 6).

Peta struktur daerah penelitian memperlihatkan bahwa lokasi penelitian terletak dan dilintasi oleh sesar utama Sonder (Gambar 5). Setiawan dr. (2002) mengklasifikasikan sesar tersebut sebagai sesar bergerak terbalik mengangan yang berarti bahwa areal yang mengarah ke danau bergerak naik. Gerak mendatar mengangan naik tersebut hubungannya dengan runtunan stratigrafi di daerah penelitian dicirikan oleh munculnya tuf Tondano, sehingga tuf Tondano sebagai batuan alas sedimen Kuartar tersebut menjadi paparan cekungan. Sebaliknya bagian yang turun akibat aktivitas sesar tersebut memberi dampak bermigrasinya permukaan air danau dari waktu ke waktu. Beberapa fase kejadian tektonik dan hubungannya dengan sesar yang dimaksud di antaranya adalah (Gambar 5 dan 6):

1. Fase pertama yaitu selama pembentukan UFP I ditandai oleh bergesernya batuan alas yang dicirikan oleh terbentuknya perulangan endapan pasir danau dan danau. Akhir proses terbentuknya UFP I ini memperlihatkan sesar mendatar tersebut sebagian bergerak turun, terbukti dari tidak homogenya permukaan fasies endapan UFP I. Pada sesar mendatar, gejala perulangan gerak aktif mendatar naik dan turun umum terjadi. Mulyana dan Moechtar (2007) yang melakukan penelitian di bagian paparan utara Danau Tondano menyimpulkan bahwa

umur karbon (C^{14}) pada lapisan yang setara EFP I ini adalah 10.260 ± 300 t.y.l. dengan kondisi iklim saat itu pada tingkat kelembaban tinggi hingga maksimum yang dicirikan oleh berkembangnya flora dan fauna secara baik, dengan diselingi oleh erupsi gunung api.

2. Fase kedua berkaitan dengan terbentuknya bagian bawah UFP II, ditandai oleh efek tektonik yang menyebabkan sesar Sonder kembali bergerak naik, sehingga permukaan air danau turun dan menjadikan wilayah tersebut menjadi lingkungan rawa. Proses yang diikuti oleh sesar tersebut kembali bergerak turun, dan menyebabkan permukaan air danau kembali naik, membentuk endapan danau dan pasang-surut. Iklim saat itu berada pada kondisi maksimum hingga agak basah atau menuju minimum yang berlangsung pada 6.970 ± 250 t.y.l., sehingga berakibat perkembangan flora dan fauna semakin berkurang. Aktivitas gunung api tidak terekam pada UFP II ini, tetapi di utara kegiatan gunung api terekam pada bagian tengah interval (Mulyana dan Moechtar, 2007).
3. Fase ketiga dicirikan oleh sesar mendatar bergerak turun yang menyebabkan posisi garis permukaan air danau bergeser membentuk bagian bawah UFP III. Selanjutnya, turunnya permukaan air danau yang membentuk UFP III bagian atas berhubungan dengan menurunnya tingkat kelembaban. Mulyana dan Moechtar (2007) menyimpulkan bahwa iklim ketika itu berada pada tingkat kelembaban agak basah hingga menuju kering, dan bagian tengah intervalnya berumur 1.760 ± 190 t.y.l. Kondisi perkembangan flora dan fauna semakin berkurang pada fase ketiga tektonik tersebut.

Sesar utama Sonder yang bergerak terbalik mengangan apabila dikaitkan dengan stratigrafi Kuartar daerah penelitian, setidaknya-tidaknya telah mengalami pengaktifan sebanyak tiga kali. Umumnya, sesar bergerak terbalik mengangan tersebut bergerak naik dan diikuti oleh gejala penurunan (UFP I dan II). Tidak semua gerak struktur tersebut diawali oleh gerak mendatar naik, namun gerak mendatar turun juga terjadi (UFP III). Gerak turun dan naik sesar mendatar pada umumnya bergerak dan mengikuti bentuk elipsoidal, sehingga dari waktu ke waktu

akan dijumpai perulangan gerak naik dan turun tersebut pada wilayah yang sama. Peristiwa tersebut ternyata dapat dijadikan sebagai faktor kendali dalam susunan stratigrafi cekungan yang dibatasi oleh suatu sesar. Oleh karena itu, susunan stratigrafi daerah penelitian dapat dijadikan sebagai siklus stratigrafi yang dilandasi oleh tektonik. Hal ini karena pengelompokan fasies (Unit Fasies Pengendapan) dikendalikan oleh tektonik.

Selain itu, hubungan antara tektonik dan siklus erupsi di selatan paparan Danau Tondano seperti di daerah penelitian hanya terjadi pada UFP I; demikian pula halnya di bagian tenggara Danau Tondano yang penelitiannya dilakukan oleh Moechtar (2007, inprep) hanya terjadi pada UFP 1 pula. Sebaliknya, di utara kegiatan erupsi terjadi di samping pada UFP I juga pada UFP II. Timbulnya perbedaan tersebut tentunya menyangkut dinamika geologi Danau Tondano yang kompleks, yang di utaranya dipengaruhi oleh sesar aktif utama Malalayang (Gambar 5). Oleh karena itu, wilayah Tondano ditandai oleh beberapa pasang sesar aktif dengan beberapa pusat erupsi yang aktif pula. Untuk mengkaitkan pola siklus-siklus erupsi, tektonik, dan proses sedimentasi dan stratigrafi pada Plistosen Akhir-Resen di wilayah Danau Tondano perlu dilakukan penelitian yang sifatnya lebih komprehensif dan terperinci.

Dengan demikian, evolusi/sejarah erupsi dan kegiatan tektonik menjadi penting untuk mengetahui geodinamika daerah ini karena berlangsung dalam berbagai siklus, mulai dari yang panjang, menengah, hingga pendek. Pratomo dan Lecuyer (2007) merekonstruksi pembentukan Kaldera Tondano yang terjadi sejak $2,0 \pm 0,4$ juta tahun lalu (Gambar 7). Rekonstruksi tersebut kiranya berhubungan dengan siklus panjang, dan kemungkinan siklus erupsi yang terekam di dalam stratigrafi penelitian ini mengikuti siklus Milankovitch 20.000 tahunan (?) yaitu siklus menengah. Oleh karena itu, rekaman siklus erupsi di dalam stratigrafi daerah penelitian, di samping terkait dengan besaran siklusnya, juga mungkin dapat diasumsikan, bahwa: (a) semakin menurunnya aktifitas erupsi yang terjadi mulai dari UFP I hingga II, atau (b) memiliki pusat erupsi yang berbeda, sehingga akumulasi materialnya memiliki perbedaan antara utara dan selatan Danau Tondano.

KESIMPULAN

1. Susunan fasies endapan Kuartar di daerah penelitian dicirikan oleh perubahan dan pergeseran lingkungan pengendapan dari waktu ke waktu. Pergeseran tersebut diakibatkan oleh perulangan gerak mendatar turun dan naik oleh sesar mendatar yang identik dengan siklus tektonik. Sesar yang dimaksud adalah sesar utama Sonder sebagai sesar mendatar bergerak menganan, dan merupakan sesar regional di daerah penelitian. Meskipun siklus iklim sudah terganggu oleh pengaruh tektonik, tetapi kegiatan perubahan iklim dapat mengendalikan berlangsungnya tektonik. Oleh karena itu, analisis evolusi perubahan lingkungan yang berkaitan dengan pengelompokan Unit Fasies Pengendapan di daerah penelitian dapat dijadikan indikator pemahaman tektonik dan perubahan iklim.
2. Sesar-sesar utama yang berarah barat laut-tenggara adalah termasuk sesar yang penting berkaitan dengan tektonik Danau Tondano, khususnya pada Plistosen Akhir hingga sekarang. Di samping sebagai faktor kendali tektonik, juga menyebabkan batuan alas sedimen Kuartar Danau Tondano bergerak. Gejala tersebut terekam di dalam endapan danau dan sungai (Qs) yang menerus ke bawah permukaan. Dari runtunan stratigrafi Kuartar di daerah penelitian, tidak tertutup kemungkinan karakter demikian dapat dijadikan sebagai salah satu studi siklus tektonostratigrafi.

Ucapan Terima Kasih— Ucapan terima kasih ditujukan kepada rekan sejawat Sonny Mawardi yang telah membantu dan memberikan saran dan diskusi sehubungan dengan penulisan makalah ini.

ACUAN

- Dam, Rien A.C., Fluin, J., Suparan, P., dan Van der Kaars, S., 2001. Palaeoenvironmental developments in the lake Tondano area (N. Sulawesi, Indonesia) since 33,000 yr. BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 171, p.147-183.
- Dumurdzanov, N. dan Burchfiel, T., 2004. Evolution of the Neogene-Pleistocene Basins of Macedonia. *Geological Society of America, Digital Map and chart Series* 1, 20 p.

- [Http://www.gsamaps.gsjournals.org/images/maps/.../dmc001.pdf](http://www.gsamaps.gsjournals.org/images/maps/.../dmc001.pdf) (10 September, 2007).
- Effendi, A.C. dan Bawono, S.S., 1997. *Peta Geologi Lembar Manado, Sulawesi Utara, Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Hamilton, W., 1979. *Tectonics of the Indonesian region*. U.S. *Geol. Survey Prof. Paper* 1078, 345 p.
- Jin, Z.D., Bickle, M.J., dan Wang, S.M., 2007. *An early-Pleistocene environment of a Tibetan lake related to tectonic activity and climatic change*. [Http://www.pages-igbp.org/products/osmabstracts/Jin_Zhangdong%20et%20al.pdf](http://www.pages-igbp.org/products/osmabstracts/Jin_Zhangdong%20et%20al.pdf) (6 Agustus 2007).
- Kotila, B.S. dan Sanwal, J., 2004. *Fauna and palaeoenvironment of Late Quaternary fluvio-lacustrine basin in Central Kumaun Himalaya*. *Current Science*, Vol. 87, No. 9, 10 November 2004, 1295-1299. [Http://www.ias.ac.in/currsci/na102004/1295.pdf](http://www.ias.ac.in/currsci/na102004/1295.pdf) (6 Agustus 2007).
- Lécuyer, K., Bellier, O., Gourgaud, A., dan 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, p. 607-613.
- Moechtar, H., 2007. *Rekaman peristiwa Geologi Kuartar pada sedimentasi dan fluktuasi muka air danau Tondano purba didasari korelasi unit fasies di tenggara Danau, Sulawesi Utara*. *Jurnal Sumberdaya Geologi*, Dalam persiapan penerbitan (inprep).
- Morgan, L. dan Lezzar K., 2007. *Tectonic controls of sedimentary pathways and depocenters: Canyon conveyor belts and ridge rubbish on the Luiche River Platform Margin, Lake Tanganyika*, 7 p. [Http://www.geo.arizona.edu/nyansa/pdf/Morgan.pdf](http://www.geo.arizona.edu/nyansa/pdf/Morgan.pdf) (2 Agustus 2007).
- Mulyana, H. dan Moechtar, H., 2007. *Geologi Kuartar Danau Tondano (Sulawesi Utara)*. *Jurnal Teknologi Mineral, Fakultas Ilmu Kebumihan dan Teknologi Mineral ITB, Dalam persiapan penerbitan*.
- 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 Sumberdaya Geologi*, Vol. XVI, No. 3, h. 144-159.
- Pratomo, I. dan Lecuyer, F., 2007. *Sebaran Gunungapi Kuartar di Minahasa (Sulawesi Utara), dalam konteks volcano-tekonik*. *Jurnal Sumberdaya Geologi, Dalam persiapan penerbitan (inprep)*.
- Setiawan, JB.J.H., Lumbanbatu, U.M., dan Poedjoprajitno, S., 2002. *Peta Neo-seismotektonik Daerah Manado dan sekitarnya, Sulawesi Utara, Skala 1:250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung. *Dalam Persiapan Penerbitan*.