

Petrogenesis batuan vulkanik daerah tambang emas Lebong Tandai, Provinsi Bengkulu, berdasarkan karakter geokimianya

ISKANDAR ZULKARNAIN

Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI, Jl. Sangkuriang, Kompleks LIPI Bandung

SARI

Lebong Tandai adalah desa di Kecamatan Napal Putih, Kabupaten Bengkulu Utara yang hanya dapat diakses dengan menggunakan lori masyarakat setempat, yang disebut "molek". Wilayah ini telah dikenal sebagai tambang emas sejak zaman Belanda.

Batuan vulkanik daerah ini termasuk ke dalam Formasi Hulusimpang yang didominasi oleh komposisi andesitik serta sedikit dasit dan basal dengan afinitas transisi antara kalk-alkalin dan toleit. Pola unsur jejak dan *REE* nya menunjukkan bahwa mereka berasal dari satu sumber magma ("magma satu") yang merupakan salah satu magma dari dua jenis magma yang diidentifikasi di Bengkulu. "Magma satu" bersumber dari magma berkemposisi adakitik yang merupakan percontoh batuan berkemposisi paling primitif di antara semua percontoh batuan "magma satu". Aktivitas sumber magma batuan Lebong Tandai telah berlangsung sejak lebih dari 30 juta tahun yang lalu, pada lingkungan *back-arc side* dan mengalami pengayaan pada unsur inkompatibel sewaktu menembus kerak bagian atas.

Keterdapatannya mineralisasi emas di kawasan ini menunjukkan bahwa "magma satu" merupakan magma yang berpotensi membawa mineralisasi emas di wilayah ini. Hal ini cukup beralasan bila dikaitkan dengan hasil penelitian di Filipina yang melaporkan bahwa batuan adakitik mengandung emas lebih banyak daripada batuan kalk-alkalin.

Makalah ini ditulis dengan menggunakan pendekatan geokimia melalui analisis unsur-unsur utama, jejak dan unsur tanah jarang (*REE*) serta penggunaan klasifikasi-klasifikasi yang umum dan khusus dalam pembahasan petrologi.

Kata kunci: Lebong Tandai, batuan vulkanik, petrogenesis, "magma satu", *back-arc side*, adakitik

ABSTRACT

Lebong Tandai is a village in the Napal Putih Sub-regency, North Bengkulu Regency, that can be accessed only through the local people train called "molek". The area is well known as a gold mine since the Dutch time.

Volcanic rocks in the area belong to the Hulusimpang Formation that are dominated by andesitic rocks with small amount of dacite and basalt. They show an affinity as a transition between calc-alkaline and tholeiite. Its trace elements and REE patterns show that they are derived from "magma one", one of the two magma sources producing volcanic rocks in Bengkulu. "Magma one" is derived from a magma source with adakitik composition due to the most primitive sample among the "magma one" samples. The Lebong Tandai magma activity has occurred since more than 30 million years ago in a back-arc side tectonical environment, and they were enriched on incompatible elements during an upper crust penetration.

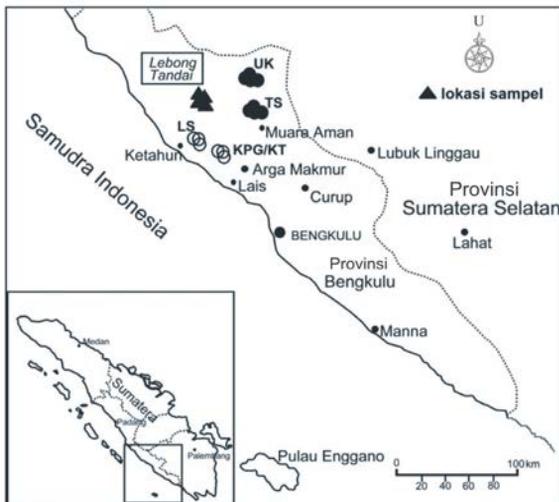
The occurrence of gold mineralization in this area indicates that the "magma one" is a gold bearing mineralized magma in this region. It seems to be reasonable when it is corresponded with an investigation result reported from the Phillipine that adakitik rocks contain higher gold concentration than calc-alkaline rocks.

This paper is written using a geochemical approach based on major elements, trace elements and rare earth elements (REE) that are plotted into general and specific classifications in a petrological discussion.

Keywords: Lebong Tandai, volcanic rocks, petrogenesis, "magma one", *back-arc side*, adakitik

PENDAHULUAN

Daerah Lebong Tandai yang saat ini secara administratif termasuk ke dalam wilayah Kabupaten Bengkulu Utara dengan ibu kota Arga Makmur (Gambar 1), telah dikenal sejak zaman Belanda sebagai daerah tambang emas. Desa Lebong Tandai hanya dapat diakses dari Desa Napal Putih, Kecamatan Napal Putih, dengan menggunakan kendaraan sejenis lori yang dalam bahasa lokal disebut “molek”, dengan waktu tempuh sekitar 3 jam, sedangkan untuk mencapai Desa Napal Putih dari Kota Arga Makmur diperlukan waktu sekitar 5 jam perjalanan dengan mobil. Setelah PT Lusang Mining menghentikan aktivitas penambangannya di kawasan desa tersebut pada tahun 1996, maka wilayah itu kemudian dihuni oleh masyarakat yang sebagian besar berprofesi sebagai penambang rakyat dan atau bekerja pada sektor ekonomi pendukungnya.



Gambar 1. Lokasi daerah Lebong Tandai yang hanya dapat dicapai dari Desa Napal Putih yang berjarak sekitar 5 jam perjalanan dengan mobil dari kota Arga Makmur.

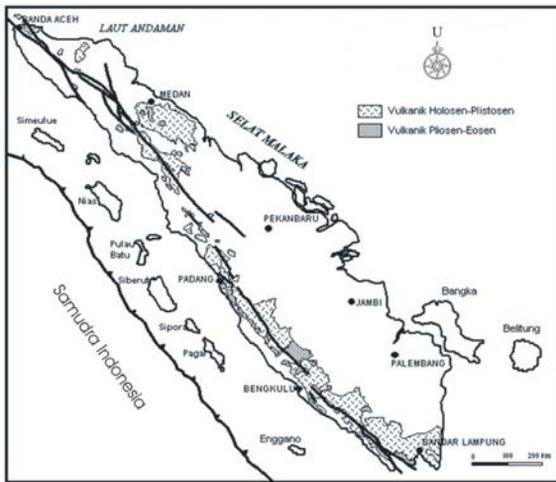
Daerah Lebong Tandai terletak di sayap barat sabuk Pegunungan Barisan yang memanjang dari selatan hingga ke utara Pulau Sumatera. Bila dicermati, maka akan terlihat bahwa kawasan ini termasuk ke dalam daerah sebaran batuan vulkanik yang hanya terkonsentrasi sepanjang sisi barat Pulau Sumatera. Distribusi batuan vulkanik sepanjang sisi barat pulau ini, pada dasarnya dikontrol oleh sistem penunjaman

(*subduction system*) di sebelah barat pulau, yang dibentuk oleh penunjaman Lempeng Samudra Hindia ke bawah Lempeng Benua Pulau Sumatera. Proses penunjaman tersebut berlangsung pada saat ini dengan kecepatan gerakan Lempeng Samudra Hindia sekitar 7 cm/tahun (Barber, 2000) dengan arah N23°E, sehingga dikenal juga dengan sebutan *oblique subduction* (Hamilton (1979). Penunjaman miring tersebut telah menghasilkan dua fenomena penting di Pulau Sumatera, yakni terbentuknya rantai vulkanik sepanjang sisi barat pulau dan terjadinya Zona Patahan Sumatera (*Sumatera Fault Zone*) yang juga memanjang dari utara hingga ujung selatan pulau (Fitch, 1972). Keberadaan rantai vulkanik ini sepanjang pulau, dicirikan oleh penyebaran batuan vulkanik, baik yang berupa aliran lava (*lava flow*) maupun yang berupa breksi vulkanik (*volcanic breccia*) dan tuf (*tuff*). Sementara Zona Patahan Sumatera di samping dicirikan oleh kelurusan-kelurusan yang sangat jelas pada citra satelit ataupun foto udara, juga ditunjukkan oleh bentuk-bentuk morfologi tidak stabil yang selalu mengalami kerusakan yang signifikan ketika terjadi gempa akibat bergesernya patahan tersebut.

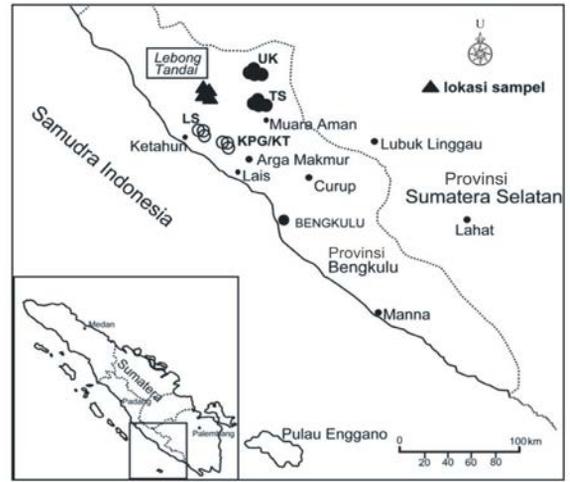
Zulkarnain (2007) menyatakan bahwa pola distribusi atau sebaran batuan vulkanik di Pulau Sumatera yang terkonsentrasi di sisi barat pada wilayah selatan dan tengah pulau serta kemudian “berbelok” ke arah timur di wilayah Sumatera Utara (Gambar 2), mengindikasikan adanya perbedaan sudut penunjaman lempeng samudra yang tertunjam (*subducted slab*) antara di bagian selatan dan tengah dengan yang di bagian utara. Kondisi tersebut mencerminkan penunjaman lempeng yang lebih curam di bagian tengah dan selatan pulau dibandingkan dengan di bagian utara yang lebih landai.

Pemahaman tersebut didasarkan pada asumsi bahwa pembentukan rantai vulkanik selalu dikontrol oleh proses pelelehan kerak samudra yang terjadi pada kedalaman tertentu pada zona penunjaman. Artinya, posisi lateral terjadinya proses pelelehan sebagian (*partial melting*) pada kerak samudra yang tertunjam, akan sangat bergantung pada besarnya sudut penunjaman.

Wilayah Desa Lebong Tandai yang terletak di antara lokasi batuan vulkanik pada sisi barat Bengkulu (daerah Ketaahun, Sungai Itik Besar, sekitar Desa Siguring dan Desa Lubuk Kembang) dengan lokasi batuan vulkanik pada sisi lebih ke timur (Gambar



Gambar 2. Peta penyebaran batuan vulkanik di pulau Sumatera yang menunjukkan dua kisaran umur berbeda, tetapi menempati wilayah yang sama. Dari Lampung hingga Sumatera Tengah, batu-batuan tersebut hanya terkonsentrasi sepanjang sisi barat pulau, sedangkan di utara menyebar hingga ke sisi timur (Zulkarnain, 2007).



Gambar 3. Peta lokasi daerah tambang emas Leborg Tandai yang terletak di antara lokasi batuan vulkanik daerah Bengkulu yang tersingkap di sisi barat (kode LS dan KPG/KT) dengan yang tersingkap di sisi sebelah ke timur (kode TS atau Tambang Sawah dan UK atau Ulu Ketenong).

3) pada sayap barat Pegunungan Barisan (daerah Muara Aman, Desa Tambang Sawah dengan kode TS dan Ulu Ketenong dengan kode UK). Wilayah ini diasumsikan akan menunjukkan keterkaitan genetik dengan “magma satu” atau “magma dua” yang merupakan sumber batuan vulkanik di daerah Bengkulu (Zulkarnain, 2007). “Magma satu” dicirikan oleh anomali negatif Nb yang cukup signifikan pada *spider diagram rock/primitive mantle* tetapi minor pada Ti serta adanya anomali positif yang minor pada Zr dan Sr. Kelompok ini memiliki kandungan Nb yang rendah namun dengan kisaran yang lebar antara 1,9 hingga 8,0 ppm, Ti yang tinggi antara 3000 hingga 7700 ppm, serta kandungan P yang tinggi dengan kisaran yang lebar antara 430 sampai 2100 ppm dengan rata-rata sekitar 630 ppm. Sementara itu, “magma dua” dicirikan oleh adanya anomali negatif pada unsur Nb, P, dan Ti, kandungan Nb-nya berkisar antara 2,8 hingga 6,5 ppm, kandungan Ti yang rendah, antara 1400 hingga 2800 ppm, serta P yang juga sangat rendah, yakni antara 260 sampai 480 ppm. Pola seperti ini sangat umum dijumpai pada kelompok batuan yang dikenal dengan nama *thronjemite-tonalite-granodiorite* atau sering disingkat *TTG* (Martin dr., 2005). Selain itu, batuan yang berasal dari “magma dua” tersebut juga memperlihatkan adanya sedikit anomali negatif pada unsur Sr. Lebih jauh dilaporkan bahwa tidak terdapat

kecenderungan variasi geokimia yang sistematis pada batuan vulkanik di daerah Bengkulu, mulai dari yang tersingkap di sisi barat ke arah batuan yang terbentuk di sisi sebelah timur. Artinya, pola-pola geokimia yang ditemukan pada batuan di sisi sebelah barat juga dijumpai pada batuan vulkanik yang tersingkap di sisi yang lebih timur. Padahal secara umum, “harusnya” akan terjadi perubahan komposisi batuan atau komposisi magma dari lokasi yang dekat ke palung (*trench-side*) ke arah busur belakang (*back-arc side*). Batuan vulkanik *trench-side* pada umumnya berkomposisi intermedier dan berubah menjadi basaltik ke arah *back-arc side*, seperti yang ditemukan pada batuan vulkanik di sekitar Manado dan Pulau Siau (Zulkarnain, 2001). Lebih jauh, dilaporkan bahwa hampir semua percontohan yang dianalisis dari sisi barat maupun timur tersebut menunjukkan karakter *back-arc side*, walaupun terdapat sedikit percontohan yang menunjukkan karakter *trench-side*. Hal tersebut menginterpretasikan bahwa semua batuan vulkanik tersebut merupakan produk busur vulkanik *back-arc side*, sementara batuan vulkanik yang merupakan produk busur *trench-side* tidak tersingkap dan kemungkinan masih berada di bawah permukaan laut. Adanya sedikit percontohan yang memperlihatkan karakter *trench-side*, diperkirakan terjadi akibat adanya kontaminasi pada batuan tersebut.

Dalam tulisan ini, akan dibahas karakter geokimia batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam konteks kedua jenis sumber magma yang sudah diidentifikasi di wilayah Bengkulu, dan dikaitkan dengan potensi mineralisasi emas yang terdapat di wilayah tersebut.

METODE ANALISIS

Terdapat 38 percontohan yang dikoleksi dari daerah Lebong Tandai, namun hanya delapan percontohan yang dianalisis secara kimiawi. Unsur kimia yang dianalisis pada kedelapan percontohan tersebut terdiri atas unsur-unsur utama (*major elements*), unsur jejak (*trace elements*), dan unsur tanah jarang atau *Rare Earth Elements (REE)*. Analisis tersebut dilakukan di Laboratorium Komersial di Kanada yaitu *Activation Laboratory* dengan menggunakan suatu metode yang mereka kembangkan sendiri yang terdiri atas *Fusion-ICP metabolate/tetraborate* untuk paket *whole rock* dan *Fusion-ICP/MS* untuk paket unsur jejak dan *REE*. Kualitas data yang dihasilkan dengan kedua metode tersebut sama baiknya dan bahkan melebihi kualitas hasil pengukuran dengan metode *XRF*.

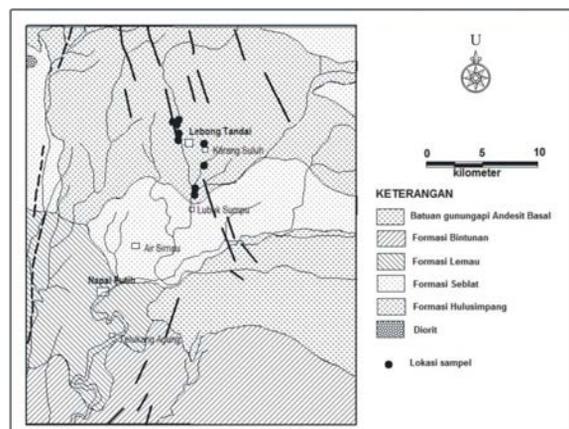
GEOLOGI DAERAH LEBONG TANDAI

Daerah Lebong Tandai termasuk ke dalam sistem Cekungan Bengkulu dan Pegunungan Barisan. Cekungan tersebut terletak di bagian barat daratan Sumatera dan berbatasan dengan busur gunung api, yang terbentuk dan berkembang akibat adanya pensesaran bongkah yang terjadi pada Kala Kapur Akhir atau Tersier Awal (Mangga dr., 1987). Sejarah geologi Cekungan Bengkulu dan Pegunungan Barisan dimulai sejak Oligosen hingga Miosen Awal. Sedimentasi Cekungan Bengkulu diawali pada kala Oligosen dan berakhir pada Plio-Plistosen, yang menghasilkan satu seri stratigrafi Formasi Seblat, Formasi Lemau, Formasi Simpangaur, dan Formasi Bintunan. Satuan paling bawah adalah Formasi Seblat yang mempunyai kedudukan jari-jemari dengan Formasi Hulusingang dari jalur Pegunungan Barisan. Sedimen yang berfasies transisi (Formasi Simpangaur) atau darat (Formasi Bintunan) di beberapa tempat mengandung lapisan

lignit yang cukup tebal.

Sebagian besar batuan Oligo-Miosen telah terubah dan termineralisasi oleh aktivitas magmatik berumur Miosen Tengah. Mineralisasi tersebut menghasilkan mineral bijih seperti emas, perak, dan tembaga pada daerah tertentu. Gerak kompresif subdaksi Lempeng Samudra Hindia yang sangat dominan pada kala Plio-Plistosen telah menyebabkan terjadinya pengangkatan Pegunungan Barisan yang mencapai puncaknya pada kala itu, yang dicirikan oleh kegiatan vulkanik dan magmatik. Proses tektonika ini memicu pembentukan cekungan antarpegunungan. Struktur yang penting di daerah ini adalah Sesar Semangko yang merupakan sesar geser mengangan dan berkembang sejak Plio-Plistosen, dan terdiri atas beberapa segmen yang arahnya sejajar dengan Pulau Sumatera (Gafoer dr., 1992).

Di sebelah selatan, daerah Lebong Tandai didominasi oleh Formasi Bintunan yang berumur Plio-Plistosen, Formasi Lemau yang berumur Miosen Tengah hingga Akhir dan produk vulkanik Kuartar yang berkomposisi andesit basal (Gambar 4). Menurut Mangga dr. (1987) dan Kusnama dr. (1993), Formasi Bintunan dibentuk oleh litologi batupasir tufan berbatu apung, tuf pasir, konglomerat aneka bahan dengan sejumlah sisipan lignit atau sisa tumbuhan. Sementara itu, Formasi Lemau disusun oleh batulempung dan batulanau gampingan, batupasir gampingan dan breksi dasit bersisipan batugamping.



Gambar 4. Peta geologi regional daerah Lebong Tandai dan sekitarnya, serta lokasi pengambilan percontohan (dimodifikasi dari peta geologi lembar Sungaipenuh dan Ketaun, Bengkulu; Kusnama dr., 1993).

Bagian tengah dan utara daerah Lebong Tandai didominasi oleh Formasi Hulusimpang dan Formasi Seblat serta sedikit batuan terobosan berkomposisi diorit. Formasi Hulusimpang yang berumur Miosen Awal dibentuk oleh lava andesit-basal, breksi vulkanik, dan tuf dengan sisipan batupasir. Umumnya batu-batuan tersebut telah mengalami ubahan sehingga berwarna hijau. Sementara Formasi Seblat yang berumur Oligo-Miosen disusun oleh perselingan batulanau dan batulempung dengan sisipan batugamping. Formasi ini menunjukkan struktur sedimen turbidit.

Semua percontoh yang dianalisis dan didiskusikan dalam tulisan ini, dikoleksi dari Formasi Hulusimpang di wilayah sekitar Desa Lebong Tandai, sepanjang Sungai Lusang dari dekat dusun Lubuk Sumpu ke arah utara (lihat lokasi percontoh pada peta geologi di atas).

HASIL ANALISIS

Karakter geokimia batuan vulkanik daerah Lebong Tandai akan dibahas dengan pendekatan klasifikasi dan pola komposisi kimia berdasarkan pada unsur jejak (*trace elements*), *REE* dan unsur utama (*major elements*). Pembahasan akan dimulai dengan unsur jejak terlebih dahulu, kemudian *REE* dan baru terakhir akan dibahas unsur utama. Hal ini dilakukan karena pembahasan unsur utama yang di-

lakukan tanpa mengetahui terlebih dahulu hubungan genesis antar percontoh batuan yang dibahas (apakah semua percontoh berasal dari magma yang sama atau tidak), tidak akan memberikan arti apa-apa dan bahkan bisa menyesatkan dalam konteks fraksinasi magma. Pola ini memang agak menyimpang dari pola pembahasan geokimia pada umumnya yang selalu dimulai dengan unsur utama.

Unsur Jejak (*Trace Elements*)

Hasil analisis unsur jejak delapan percontoh dari daerah Lebong Tandai diberikan pada Tabel 1 (dalam ppm) di bawah ini. Unsur jejak batuan vulkanik daerah Lebong Tandai menunjukkan kandungan Nb yang relatif rendah dan berkisar dari 3 ppm hingga 5 ppm dengan konsentrasi yang tinggi pada Ti (4400 - 5500 ppm) dan P (870 - 1600 ppm). Unsur-unsur yang inkompatibel (Rb dan Ba) memperlihatkan variasi yang cukup lebar, terutama untuk Rb yang berkisar dari 25 ppm hingga 214 ppm, sedangkan Ba bervariasi dari 210 ppm hingga 589 ppm. Kandungan Zr dan Sr juga memperlihatkan adanya pola bimodal, yang dicerminkan oleh percontoh dengan kandungan Zr lebih tinggi dari 150 ppm dan Sr lebih tinggi dari 350 ppm. Sementara itu, semua unsur jejak yang kompatibel (Dy, Y, Er, dan Yb) memperlihatkan konsentrasi yang relatif konstan.

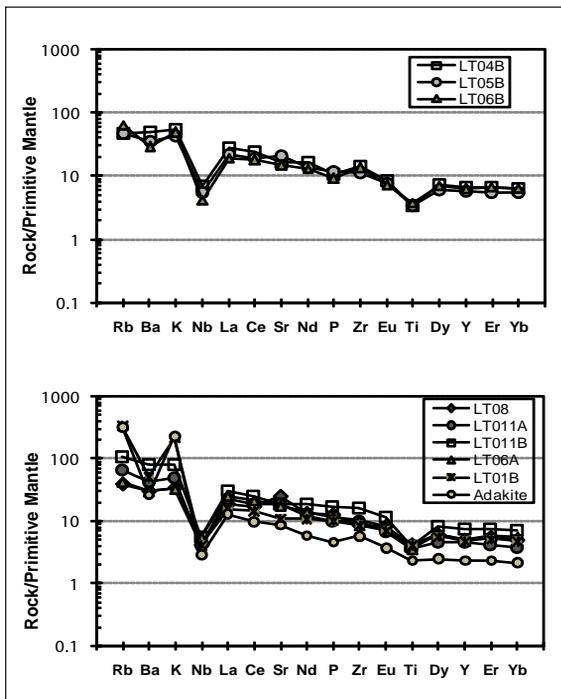
Variasi unsur inkompatibel yang cukup lebar dan adanya pola bimodal pada Zr dan Sr tersebut, juga terlihat pada pola diagram laba-laba percontoh-

Tabel 1. Analisis Unsur Jejak 8 Percontoh dari Daerah Lebong Tandai, Bengkulu Utara

Unsur	LT01B	LT04B	LT05B	LT06A	LT06B	LT08	LT011A	LT011B
Rb	214	30	30	27	41	25	43	70
Ba	359	350	255	210	208	212	306	589
Nb	3	5	4	4	3	3	3	4
La	10,9	19,4	15,2	17,5	13,5	12,9	16,1	21,6
Ce	25,9	43,2	34,5	38,3	32,4	30,9	34,1	46,6
Sr	233	350	453	372	315	530	396	405
Nd	14,8	22,6	18,5	19,2	18,2	18,2	16,4	25,6
P	960,6	1047,9	1135,2	1091,5	873,2	1222,5	960,6	1615,5
Zr	96	160	128	117	152	97	115	189
Eu	1,21	1,42	1,29	1,38	1,22	1,4	1,18	1,96
Dy	4,2	5,4	4,6	4,6	5,3	4,5	3,5	6,1
Y	22	30	26	23	29	23	21	34
Er	2,5	3,3	2,7	2,8	3,3	2,7	2	3,6
Yb	2,4	3,2	2,7	2,8	3,2	2,5	1,9	3,5

percontoh tersebut. Sebelum unsur-unsur jejak batuan Lebong Tandai diplot ke dalam diagram laba-laba, seluruh konsentrasi unsur tersebut dinormalisasi terlebih dahulu menurut metode Sun dan McDonough (1989).

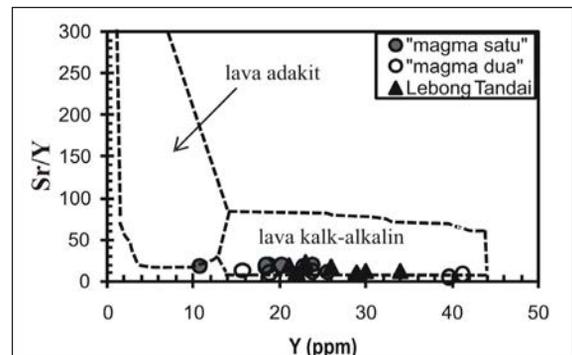
Hasil plot konsentrasi unsur jejak batuan vulkanik daerah Lebong Tandai pada diagram laba-laba menunjukkan pola yang sangat mirip satu dengan lainnya yang dicirikan oleh anomali negatif pada unsur Nb dan Ti (Gambar 5). Namun, secara lebih rinci dapat dipisahkan berdasarkan adanya pola yang menunjukkan anomali positif Zr yang samar (Gambar 5 atas) dan Sr (Gambar 5 bawah). Kedua diagram juga memperlihatkan adanya variasi konsentrasi pada unsur-unsur inkompatibel (Rb, Ba, dan K) yang cukup lebar. Sementara unsur-unsur yang kompatibel (Dy, Y, Er, dan Yb) hampir tidak memperlihatkan variasi konsentrasi, kecuali dalam kisaran yang sempit. Salah satu percontoh batuan "magma satu" yang tergolong ke dalam batuan adakit, menunjukkan sifat paling primitif dengan pola anomali positif yang kecil pada Zr dan anomali positif yang signifikan pada Rb dan K.



Gambar 5. Diagram laba-laba (*spider diagram*) batuan vulkanik daerah Lebong Tandai yang memperlihatkan anomali negatif pada Nb dan Ti serta anomali positif yang minor pada Zr dan Sr.

Seperti telah disinggung sebelumnya, bahwa pembahasan karakter geokimia batuan vulkanik daerah Lebong Tandai ini dilakukan dalam kaitannya dengan dua jenis magma ("magma satu" dan "magma dua") yang telah diidentifikasi di wilayah Bengkulu (Zulkarnain, 2007). Oleh karena itu, hasil analisis semua unsur kimia batuan vulkanik daerah Lebong Tandai ini dibahas dalam perbandingan dengan klasifikasi tersebut. Adapun ciri dari kedua magma tersebut akan dibahas lebih terperinci pada bagian diskusi.

Hasil plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram korelasi Y vs Sr/Y (Defant dan Drummond, 1990), menempatkan batuan vulkanik Lebong Tandai sebagai batuan kalk-alkalin dengan rentang kandungan Y yang cukup lebar, antara 21 hingga 34 ppm (Gambar 6). Salah satu percontoh batuan "magma satu" menunjukkan karakter yang mirip dengan batuan adakit.



Gambar 6. Hasil plot percontoh batuan vulkanik daerah Lebong Tandai yang menunjukkan sebaran di antara "magma satu" dan "magma dua" (dari Defant dan Drummond, 1990).

Dibandingkan dengan "magma satu" dan "magma dua", distribusi batuan vulkanik daerah Lebong Tandai berada pada zona antara "magma satu" dan "magma dua". "Magma satu" memiliki rentang konsentrasi Y yang lebih sempit (antara 18 hingga 24 ppm), sedangkan "magma dua" memiliki variasi kandungan Y yang sangat lebar, yakni antara 16 ppm hingga 42 ppm. Satu percontoh batuan "magma satu" menunjukkan kandungan Y yang cukup rendah (11 ppm) sehingga dimasukkan ke dalam batuan yang memiliki kemiripan karakter dengan batuan adakit. Walaupun masih diperlukan lebih banyak

data lagi untuk meyakini hal tersebut, namun bisa dikatakan bahwa peluang untuk terjadinya batuan adakit di busur vulkanik Sumatera bukanlah sesuatu yang tidak mungkin.

Hasil plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai pada diagram Nb/Yb vs Th/Yb (Gambar 7) memperlihatkan sebaran batuan tersebut pada dua klaster yang terpisah, seperti yang juga diperlihatkan oleh batuan dari “magma satu” dan “magma dua”.

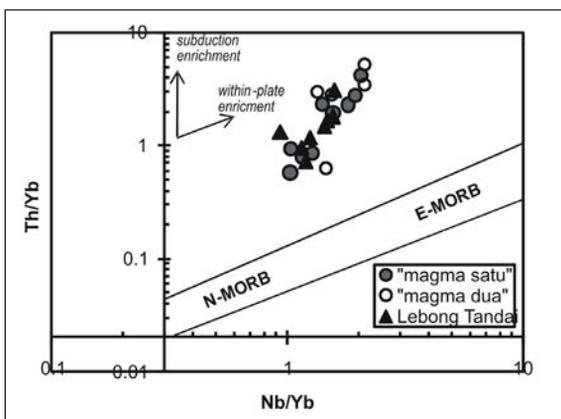
Klaster pertama mewakili batuan dengan rasio Th/Yb yang lebih rendah, sedangkan klaster kedua memiliki rasio Th/Yb yang lebih tinggi. Namun, kedua klaster tersebut menunjukkan terjadinya proses pengayaan ketika magma menembus lempeng benua (*within-plate*) dan bukan pada zona penunjaman. Bila dicermati lebih detail, maka terlihat bahwa distribusi batuan vulkanik Lebong Tandai pada diagram tersebut, lebih banyak berasosiasi dengan batuan “magma satu”.

Sementara itu, hasil plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai pada diagram Nb/Y vs Th/Nb (Gambar 8) yang merupakan klasifikasi tektonik, menunjukkan bahwa batuan vulkanik daerah Lebong Tandai memiliki karakter yang mewakili dua sistem busur yang berbeda, yakni busur yang sedang berkembang (*evolved-arc*) dan busur yang matang (*mature-arc*).

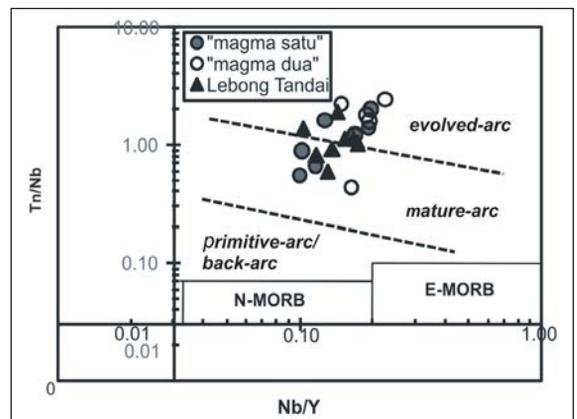
Namun demikian, penyebaran percontoh batuan tersebut secara lebih detail menunjukkan bahwa aktivitas magmatik di kawasan ini sedang berkembang menuju *evolved arc*. Bila ditempatkan pada kerangka

dua jenis magma di kawasan Bengkulu ini, maka akan terlihat bahwa semua percontoh daerah Lebong Tandai selalu berasosiasi dengan batuan “magma satu”. Keduanya menunjukkan proses peralihan yang menerus dari fase akhir busur yang matang menuju ke arah busur yang sedang berkembang. Hal ini ditunjukkan oleh dominasi batuan “magma dua” yang berkomposisi lebih asam pada busur yang sedang berkembang.

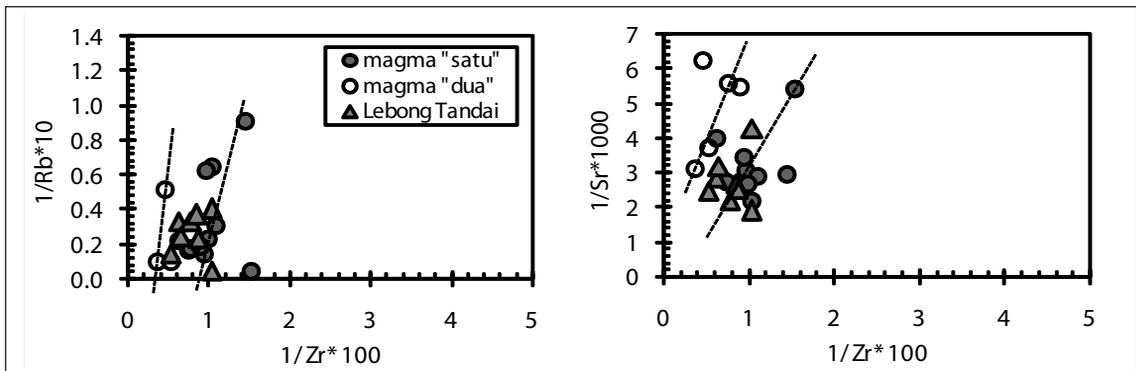
Tatsumi dan Eggins (1985) menggunakan korelasi antara Zr, Nb, Y, dan unsur-unsur inkompatibel, seperti Ba, Rb, Sr, dan K untuk mengetahui apakah sekelompok batuan vulkanik yang berada dalam satu wilayah tertentu, berasal dari magma yang sama atau tidak. Sebagai absis mereka menggunakan $1/Zr \cdot 100$, sedangkan untuk ordinat digunakan unsur Nb, Y, Ba, Rb, Sr, dan K. Hasil plot batuan daerah Lebong Tandai dalam diagram $1/Zr \cdot 100$ vs $1/Rb \cdot 10$ dan $1/Sr \cdot 1000$ menunjukkan variasi Zr yang cukup lebar (Gambar 9a). Diagram tersebut menunjukkan bahwa unsur Sr lebih spesifik dalam memisahkan antara magma yang berbeda dibandingkan dengan Rb. Hasil plot tersebut juga menunjukkan bahwa batuan vulkanik daerah Lebong Tandai lebih banyak berasosiasi dengan “magma satu” (terutama pada diagram $1/Sr \cdot 1000$), walaupun sebagian percontoh masuk ke wilayah “magma dua” pada diagram $1/Rb \cdot 10$. Sementara itu, hasil plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram $1/Zr \cdot 100$ vs $1/Ba \cdot 10$, $1/K \cdot 10000$, $1/Y \cdot 100$, dan $1/Nb \cdot 10$ (Gambar 9b) menunjukkan distribusi yang tidak



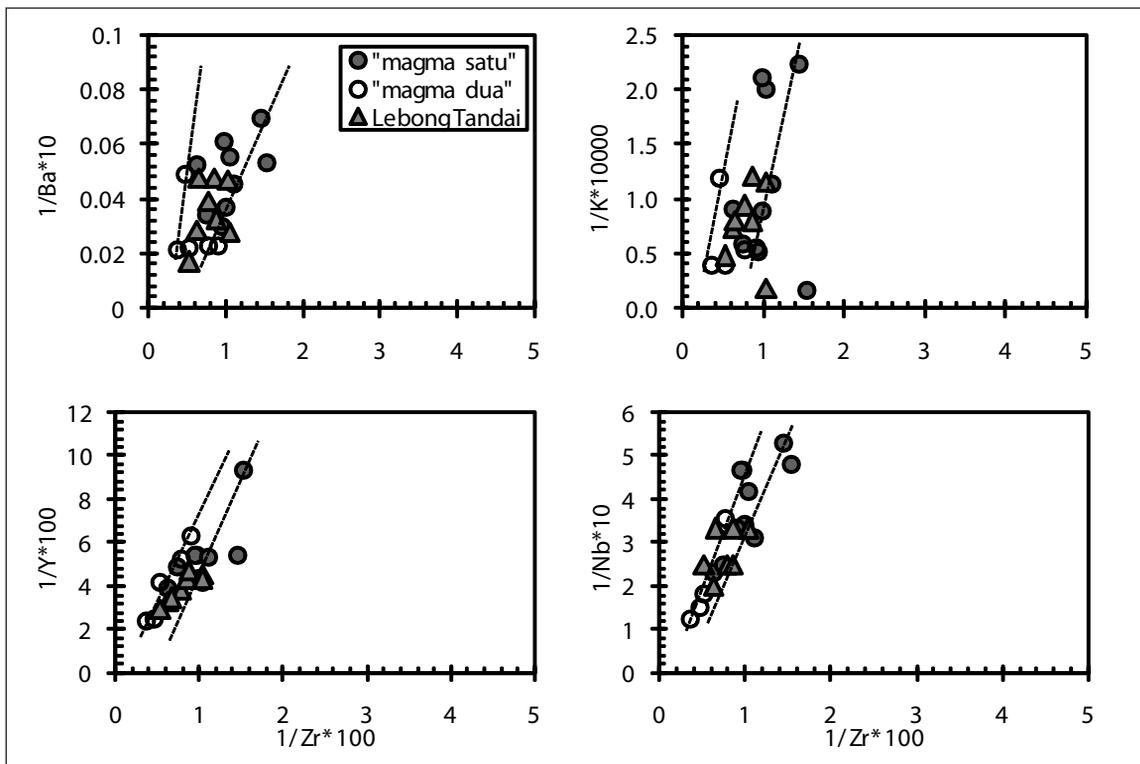
Gambar 7. Plot percontoh batuan vulkanik daerah Lebong Tandai yang hampir berimpit dengan produk “magma satu” dan menunjukkan pengayaan akan Th dan Nb di dalam lempeng benua (dari Stern dr., 1995).



Gambar 8. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai berimpit dengan sebaran batuan produk “magma satu” dan menunjukkan proses peralihan yang menerus dari *evolved-arc* ke *mature-arc* (dari Stern dr., 1995).



Gambar 9a. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai pada diagram $1/Zr*100$ vs $1/Rb*10$ dan $1/Sr*1000$ menunjukkan bahwa batu-batuan tersebut berasal dari "magma satu" (dari Tatsumi and Eggins, 1985).



Gambar 9b. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai pada diagram $1/Zr*100$ vs $1/Ba*10$ dan $1/K*10000$, $1/Y*100$ dan $1/Nb*10$ menunjukkan bahwa batu-batuan tersebut berasal dari "magma satu" (dari Tatsumi dan Eggins, 1985).

terlalu jelas. Pemisahan kedua magma yang berbeda dengan unsur-unsur tersebut, tidak semuanya menghasilkan pembedaan yang tegas. Unsur Ba dan K tidak memberikan pemisahan yang jelas, sedangkan unsur Y dan Nb memberikan pemisahan yang lebih baik. Secara umum, dapat dikatakan terdapat kecenderungan yang jelas bahwa semua batuan

vulkanik daerah Lebong Tandai berasosiasi dengan batuan "magma satu".

Unsur Tanah Jarang (*Rare Earth Elements*)

Hasil analisis *REE* batuan vulkanik daerah Lebong Tandai ditampilkan pada Tabel 2. Dari tabel tersebut terlihat bahwa semua unsur *REE* batuan

Tabel 2. Hasil Analisis Unsur REE Batuan Vulkanik Daerah Lebong Tandai, Bengkulu Utara

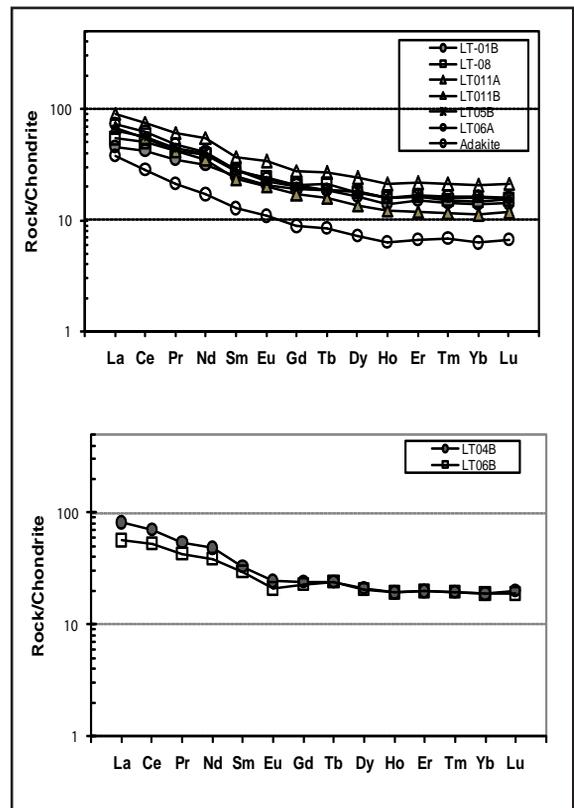
Unsur	LT01B	LT04B	LT05B	LT06A	LT06B	LT08	LT011A	LT011B
La	10,9	19,4	15,2	17,5	13,5	12,9	16,1	21,6
Ce	25,9	43,2	34,5	38,3	32,4	30,9	34,1	46,6
Pr	3,33	5,22	4,21	4,53	4,1	4,01	3,98	5,86
Nd	14,8	22,6	18,5	19,2	18,2	18,2	16,4	25,6
Sm	3,8	5,1	4,3	4,4	4,6	4,2	3,6	5,7
Eu	1,21	1,42	1,29	1,38	1,22	1,4	1,18	1,96
Gd	3,9	5	4,2	4,3	4,7	4,3	3,5	5,7
Tb	0,7	0,9	0,7	0,7	0,9	0,8	0,6	1
Dy	4,2	5,4	4,6	4,6	5,3	4,5	3,5	6,1
Ho	0,8	1,1	0,9	0,9	1,1	0,9	0,7	1,2
Er	2,5	3,3	2,7	2,8	3,3	2,7	2	3,6
Tm	0,37	0,5	0,41	0,42	0,5	0,39	0,3	0,54
Yb	2,4	3,2	2,7	2,8	3,2	2,5	1,9	3,5
Lu	0,36	0,51	0,41	0,41	0,48	0,39	0,3	0,54

vulkanik Lebong Tandai memperlihatkan adanya variasi konsentrasi antara satu percontoh dengan percontoh lainnya. Variasi ini juga ditunjukkan oleh adanya kisaran rasio La/Lu yang cukup signifikan dengan rentang nilai antara 28 hingga 53. Untuk mendapatkan pola REE, maka unsur-unsur tersebut di plot ke dalam diagram laba-laba (*spider diagram*), namun sebelumnya semua konsentrasi unsur-unsur tersebut juga dinormalisasikan dulu terhadap *chondrite* dengan menggunakan metode Sun dan McDonough (1989).

Hasil plot batuan vulkanik Lebong Tandai menunjukkan pola distribusi unsur-unsur yang sangat mirip dengan rentang fraksinasi yang relatif sempit, dan percontoh LT-11A merupakan percontoh dengan komposisi paling primitif (Gambar 10). Namun, dibandingkan dengan percontoh adakit, batuan adakit adalah yang paling primitif dengan konsentrasi HREE di bawah rasio 10 terhadap *chondrite*. Enam percontoh (LT-01B, LT-05B, LT-06A, LT-08, LT-11A, dan LT-11B) memperlihatkan pola yang sangat mirip, dengan ciri yang menunjukkan terjadinya pengayaan signifikan pada *Light Rare Earth Elements (LREE)* dan pengayaan minor pada *Heavy Rare Earth Elements (HREE)* dalam rasio terhadap *chondrite*. Sementara itu, terdapat dua percontoh (LT-04B dan LT-06B) yang juga memiliki pola yang mirip dengan keenam percontoh lainnya, namun menunjukkan adanya anomali negatif yang minor pada unsur Eu.

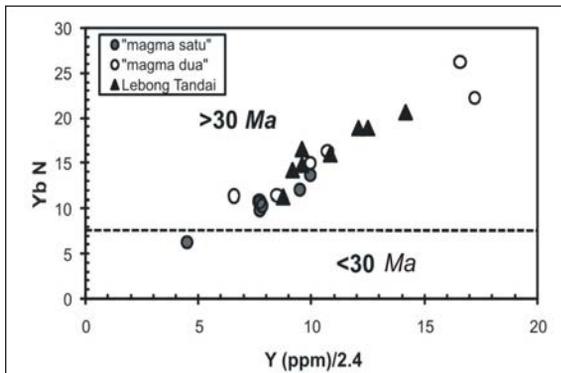
Kedua percontoh yang terakhir memperlihatkan rasio terhadap *chondrite* yang sama untuk HREE, tetapi mengalami tingkat pengayaan yang berbeda

untuk LREE. Walaupun percontoh LT-06A dikoleksi pada lokasi yang hampir sama dengan percontoh LT-06B, ternyata karakter REE keduanya berbeda.



Gambar 10. Plot unsur REE batuan vulkanik daerah Lebong Tandai yang memperlihatkan pola relatif sama dengan rentang fraksinasi yang sempit. Dua percontoh memperlihatkan adanya anomali negatif kecil pada unsur Eu.

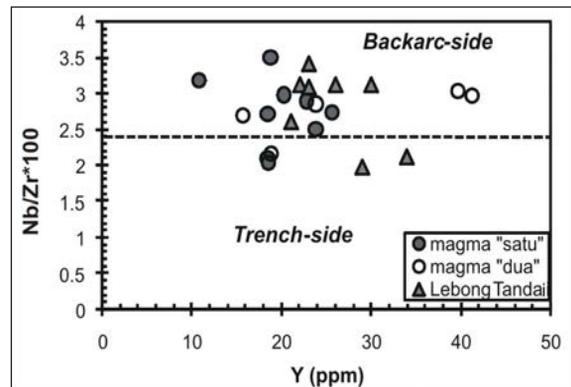
Martin (1999) menggunakan korelasi unsur Y vs Yb yang sudah dinormalisasikan untuk mengidentifikasi batu-batuan vulkanik yang berumur lebih muda dan lebih tua dari 30 juta tahun. Hasil plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram tersebut menunjukkan bahwa semua batuan tersebut berusia lebih tua dari 30 juta tahun (Gambar 11). Hal ini selaras dengan umur batuan Formasi Hulusimpang yang berkisar dari Oligosen Akhir ke Miosen Awal.



Gambar 11. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram Y vs Yb_N yang mengindikasikan bahwa semua batuan tersebut berusia lebih tua dari 30 juta tahun (dari Martin, 1999).

Sementara itu, bila pembentukan rantai vulkanik dipahami sebagai fungsi kontrol dari proses penunjaman lempeng samudra ke bawah lempeng benua (Gambar 2), maka seyogyanya akan terbentuk sepasang rantai vulkanik (*pair of volcanic-chain*), yaitu batuan vulkanik *trench-side* dan *back-arc side*. Untuk mengetahui karakter batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam konteks tektoniknya, maka batu-batuan tersebut diplot ke dalam diagram Y vs $Nb/Zr \cdot 100$ pada Gambar 12.

Hasil plot tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar batuan vulkanik Lebong Tandai, seperti juga batuan yang berasal dari “magma satu” dan “magma dua” menunjukkan karakter *back-arc side*, walaupun terdapat beberapa percontoh yang menunjukkan karakter *trench-side*. Mengingat kondisi tektonik tersebut sangat terkait dengan sudut penunjaman yang sangat berbeda antara *trench-side* dan *back-arc side*, dan sulitnya untuk menjelaskan bagaimana dua magma yang berasal dari kedalaman yang sangat berbeda dapat berada pada lokasi yang sama di



Gambar 12. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai yang menunjukkan dominasi karakter *back-arc side*, walau terdapat sejumlah kecil percontoh yang berkarakter *trench-side* (Zulkarnain, 2001).

permukaan, maka kemungkinan besar semua batuan daerah Lebong Tandai, seperti juga batuan “magma satu dan dua”, berasal dari magma berkarakter *back-arc side*. Sementara itu, adanya beberapa percontoh yang menyimpang ke wilayah *trench-side* diperkirakan akibat adanya proses pengayaan unsur Zr yang terjadi secara lokal.

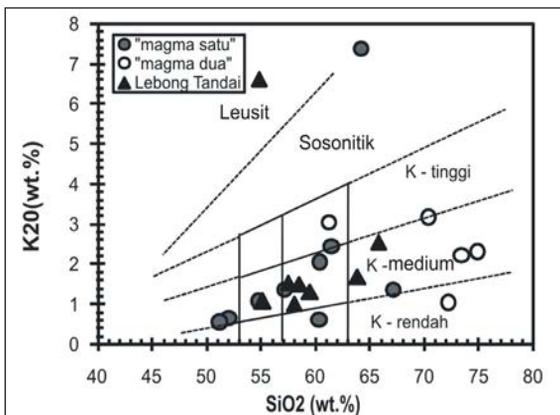
Unsur Utama (*Major Elements*)

Berdasarkan unsur utamanya, batuan vulkanik daerah Lebong Tandai didominasi oleh batuan berkomposisi intermedier, mulai dari andesit hingga dasit dan hanya satu percontoh (LT-01B) yang berkomposisi andesit basaltik (Tabel 3).

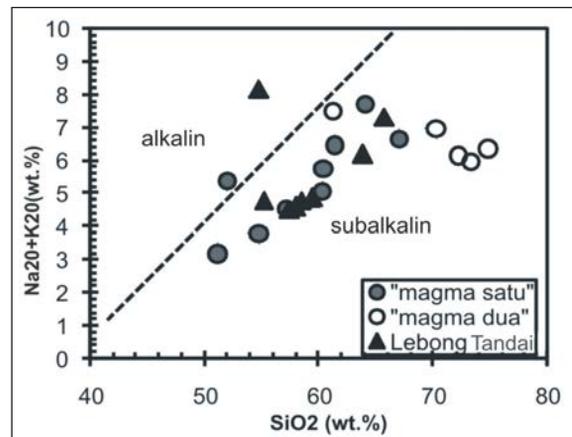
Tabel 3 menunjukkan, bahwa setidaknya dua percontoh, yakni LT-01B dan LT-04B telah mengalami proses ubahan yang ditunjukkan oleh tingginya nilai *LoI* (*Lost on Ignition*) kedua batuan tersebut (3,44 dan 3,19 % berat). Proses ubahan yang dialami kedua batuan tersebut sangat berbeda, percontoh LT-01B menunjukkan pengayaan akan komponen K_2O , sedangkan percontoh LT-04B mencerminkan terjadinya pengayaan akan Na_2O dan pemiskinan akan K_2O . Hasil plot batuan vulkanik Lebong Tandai dalam diagram klasifikasi antara SiO_2 vs K_2O , menempatkan semua batuan vulkanik daerah Lebong Tandai sebagai batuan vulkanik K-medium dengan kisaran komposisi dari basal hingga dasit, kecuali satu percontoh yang diklasifikasikan sebagai leusit (Gambar 13). Percontoh yang terakhir ini telah mengalami ubahan dan pengayaan akan komponen K_2O , sehingga tidak mencerminkan karakter aslinya.

Tabel 3. Analisis Unsur Utama 8 Percontoh dari Daerah Lebong Tandai, Bengkulu Utara, Sumatera

Unsur	LT01B	LT04B	LT05B	LT06A	LT06B	LT08	LT011A	LT011B
SiO ₂	52,83	61,65	58,26	56,91	57,78	53,97	56,41	64,65
TiO ₂	0,899	0,743	0,753	0,779	0,839	0,927	0,796	0,88
Al ₂ O ₃	17,53	17,13	19,2	19,14	17,46	19,99	16,58	16,54
Fe ₂ O ₃ (T)	7,97	4,67	5,27	6,44	6,85	6,94	8,64	4,76
MnO	0,741	0,152	0,114	0,376	0,137	0,117	0,156	0,095
MgO	4,89	1,98	1,95	4,36	3,62	2,95	3,7	0,36
CaO	3,45	3,97	7,32	5,35	7,13	7,98	7,2	3,43
Na ₂ O	1,49	4,34	3,48	3,53	3,23	3,64	2,93	4,69
K ₂ O	6,39	1,63	1,28	0,99	1,49	1,04	1,51	2,51
P ₂ O ₅	0,22	0,24	0,26	0,25	0,2	0,28	0,22	0,37
LoI	3,439	3,191	1,8	2,148	1,28	1,745	0,901	1,657
Total	99,85	99,70	99,69	100,27	100,02	99,58	99,04	99,94



Gambar 13. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai yang menunjukkan rentang komposisi batuan tersebut dari andesit hingga dasit (Peccerillo dan Taylor, 1976). (Data “magma satu” dan “magma dua” diambil dari Zulkarnain, 2007).



Gambar 14. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram korelasi SiO₂ vs Total Alkali yang menunjukkan bahwa hampir semua batu-batuan tersebut tergolong ke dalam jenis subalkalin (Le Bas dr., 1986).

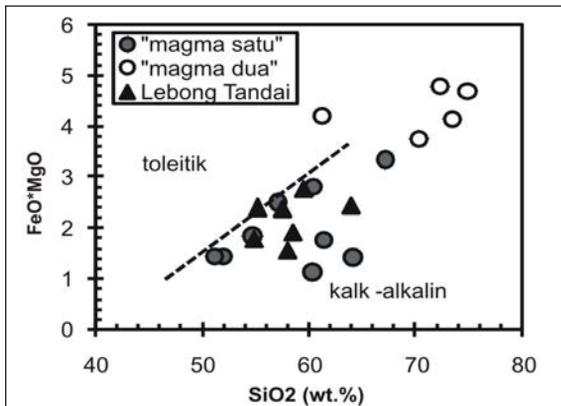
Hal yang sama juga terlihat pada satu percontoh batuan “magma satu” yang jatuh pada zona sosonitik. Secara umum, batuan Lebong Tandai berasosiasi dengan batuan “magma satu”.

Untuk mengetahui afinitas batuan vulkanik daerah Lebong Tandai, maka semua batuan vulkanik tersebut diplot ke dalam diagram korelasi SiO₂ vs Total Alkali (Gambar 14), menurut Le Bas dr. (1986). Hasil plot tersebut menunjukkan bahwa hampir semua batuan tersebut termasuk ke dalam jenis subalkalin dan hanya ada satu percontoh yang termasuk ke dalam batuan jenis alkalin. Satu percontoh tersebut adalah percontoh LT-01B yang sudah mengalami proses alterasi, sehingga hasil plotnya tersebut tidak menggambarkan jenisnya yang sesungguhnya. Untuk mengurangi pengaruh alterasi yang menyebabkan perubahan konsentrasi

pada total alkali batuan, maka digunakan klasifikasi lain dari Miyashiro (1974) yang mengkorelasikan SiO₂ vs FeO*/MgO (Gambar 15)

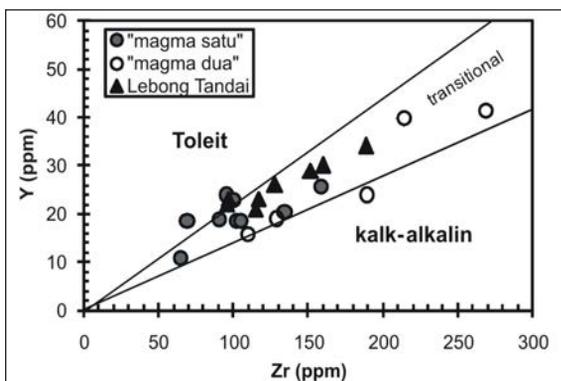
Hasil plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai pada Gambar 15 menunjukkan bahwa semua batuan vulkanik daerah Lebong Tandai termasuk ke dalam batuan kalk-alkalin dan semuanya tersebar dalam areal batuan yang berasal dari “magma satu”. Diagram ini juga menunjukkan pemisahan yang jelas antara sebaran percontoh “magma satu” dan “magma dua”. Hal ini terjadi karena variabel unsur yang digunakan adalah unsur Fe dan Mg yang merupakan unsur-unsur kompatibel dan terakumulasi di dalam batuan pada tahap awal fraksinasi suatu magma.

Namun demikian, bila diperhatikan penyebaran batu-batuan tersebut di dalam diagram pada Gambar 15, maka akan terlihat bahwa hampir semua percon-



Gambar 15. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram SiO_2 vs FeO^*/MgO , menunjukkan bahwa semua batuan tersebut tergolong batuan kalk-alkalin (Miyashiro, 1974).

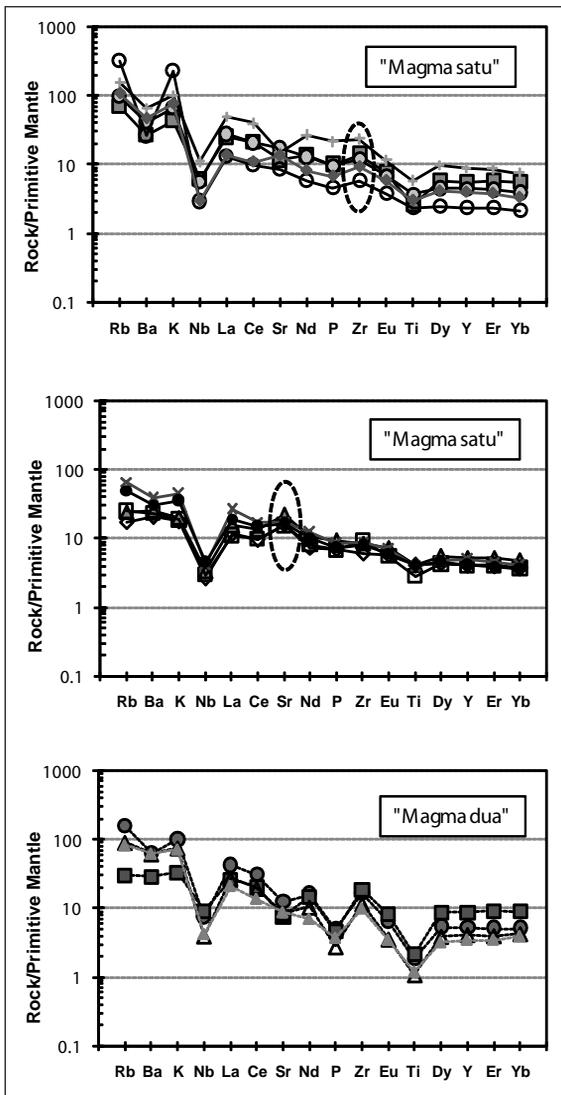
toh terkonsentrasi di sekitar garis pembatas antara jenis toleit dan kalk-alkalin. Oleh karena itu, untuk mendapatkan karakter afinitas yang lebih jelas dari batuan vulkanik daerah Lebong Tandai, termasuk batuan "magma satu" dan "magma dua", maka semua batuan tersebut diplot di dalam diagram korelasi dari Barrett dan MacLean (1999) yang menggunakan unsur Zr vs Y. Hasil plot semua batuan tersebut memasukkan semua batuan vulkanik daerah Lebong Tandai, seperti juga semua batuan "magma satu" dan "magma dua", ke dalam jenis transisi antara jenis kalk-alkalin dan toleit (Gambar 16). Kondisi ini menjelaskan mengapa hampir semua batuan tersebut terkonsentrasi di sekitar garis pembatas kalk-alkalin dan toleit pada Gambar 15.



Gambar 16. Plot batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram Zr vs Y yang menunjukkan bahwa batuan-batuan tersebut, seperti juga "magma satu" dan "magma dua", termasuk ke dalam jenis transisi (Barrett dan MacLean, 1999).

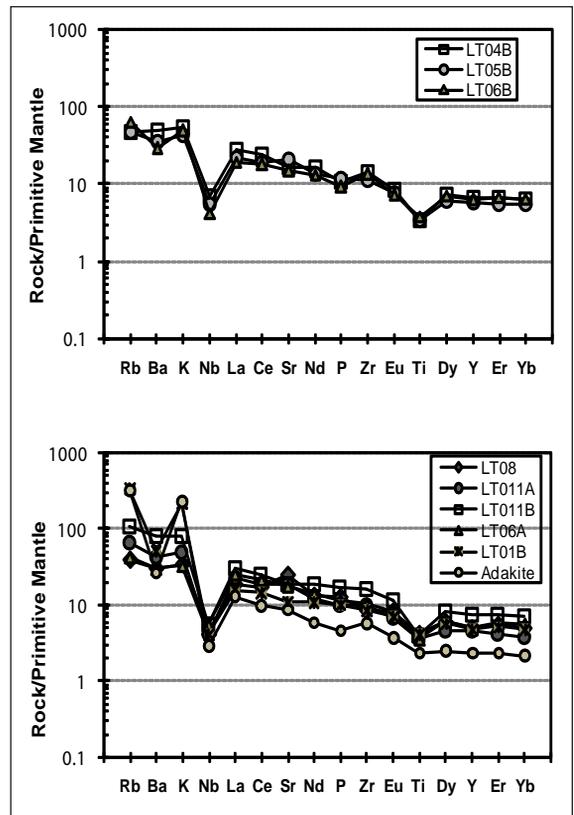
DISKUSI

Pola unsur jejak semua batuan vulkanik daerah Lebong Tandai dalam diagram laba-laba memperlihatkan kemiripan satu sama lain dengan anomali negatif yang jelas pada Nb dan Ti (Gambar 5). Hal tersebut menunjukkan bahwa semua batuan tersebut berasal dari magma yang sama dengan tingkat fraksinasi atau diferensiasi magma yang berbeda, namun proses fraksinasi tersebut tidak diikuti oleh perubahan yang signifikan pada unsur Nb dan Ti. Walau secara umum pola tersebut terlihat sama, namun secara detail terlihat bahwa sebagian percontohan menunjukkan pengayaan akan Zr dan sebagian lagi pada Sr dalam jumlah yang tidak terlalu signifikan. Kedua pola tersebut sama dengan yang dijumpai pada pola unsur jejak batuan vulkanik Bengkulu yang digolongkan sebagai "magma satu". Zulkarnain (2007) menemukan bahwa batuan vulkanik di daerah Bengkulu, baik yang tersebar dan tersingkap di sisi barat (daerah Air Ketahun, Sungai Itik Besar, sekitar Desa Siguring dan Desa Lubuk Kembang) maupun yang dikoleksi dari sisi yang lebih ke timur (Muara Aman, Tambang Sawah, dan Ulu Ketenong) berasal dari dua jenis magma yang berbeda, yang diklasifikasikan sebagai "magma satu" dan "magma dua". "Magma satu" dicirikan oleh anomali negatif Nb yang signifikan pada *spider diagram rock/primitive mantle* tetapi minor pada Ti, serta anomali positif yang minor pada Zr dan Sr. Kelompok ini memiliki kandungan Nb yang rendah, namun dengan kisaran yang lebar (1,9 - 8,0 ppm), Ti yang tinggi (3000 - 7700 ppm), serta kandungan P yang tinggi dengan kisaran yang lebar (430 - 2100 ppm) dengan rata-rata sekitar 630 ppm. Sementara itu, "magma dua" dicirikan oleh adanya anomali negatif pada unsur Nb, P, dan Ti. Kandungan Nb-nya berkisar antara 2,8 hingga 6,5 ppm, kandungan Ti yang rendah (1400 - 2800 ppm), serta P yang juga sangat rendah (260 - 480 ppm). Pola seperti ini sangat umum dijumpai pada kelompok batuan yang dikenal dengan nama *thronjemite-tonalite-granodiorite* atau sering disingkat *TTG* (Martin dr., 2005). Selain itu, batuan-batuan yang berasal dari "magma dua" tersebut juga memperlihatkan adanya sedikit anomali negatif pada unsur Sr. Perbandingan antara pola "magma satu" dengan pola batuan vulkanik daerah Lebong Tandai diberikan pada Gambar 17 dan 18. Komposisi batuan adakit yang paling primitif di antara seluruh batuan



Gambar 17. Perbandingan pola unsur jejak “magma satu dan dua”.

“magma satu” mencerminkan bahwa batuan ini adalah sumber magma dari “magma satu”. Dengan demikian, berdasarkan karakter pola unsur jejaknya, maka dapat dikatakan bahwa semua batuan vulkanik daerah Leborg Tandai berasal dari sumber magma dengan karakter “magma satu”. Sementara itu, terjadinya variasi komposisi batuan tersebut mulai dari basal, andesit, hingga dasit diakibatkan oleh proses fraksinasi magma asalnya. Fraksinasi ini sepertinya berlangsung lebih jauh daripada batuan vulkanik “magma satu”, yang ditunjukkan oleh rentang kandungan Y yang lebih lebar dibandingkan batuan



Gambar 18. Pola unsur jejak batuan vulkanik daerah Leborg Tandai.

“magma satu” (Gambar 6). Hasil plot batuan Leborg Tandai pada Gambar 6 menunjukkan seolah-olah batuan vulkanik daerah Leborg Tandai merupakan produk transisi “magma satu” menuju “magma dua”, padahal kedua magma tersebut merupakan dua magma yang berbeda secara genetis. Jadi, secara umum dapat dikatakan bahwa batuan vulkanik daerah Leborg Tandai merupakan produk magma satu yang sudah mengalami fraksinasi lebih lanjut, tetapi bukan produk transisi dari “magma satu” menuju komposisi “magma dua”.

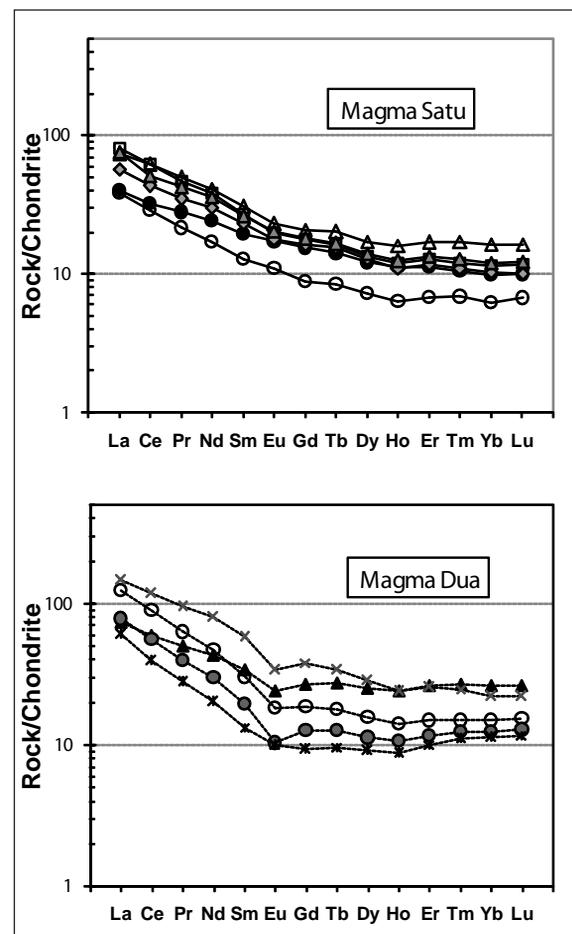
Data unsur jejak batuan vulkanik leborg Tandai, juga menunjukkan bahwa batu-batuan ini telah mengalami pengayaan akan unsur Th dan Nb, kemungkinan besar akibat proses kontaminasi, sewaktu magma asalnya menerobos kerak benua di bawah Sumatera dalam perjalanannya menuju ke permukaan (Gambar 7). Namun, proses pengayaan ini juga terjadi dengan dua tingkat atau intensitas pengayaan yang berbeda, sehingga menghasilkan

dua klaster yang terpisah. Data ini juga menunjukkan bahwa pola pengayaan yang dialami oleh batuan vulkanik Lebong Tandai sama dengan yang ditunjukkan oleh batuan “magma satu”. Sementara itu, dari klasifikasi tektonik busur yang dibuat oleh Stern dr. (1995), sebagian besar batuan vulkanik daerah Lebong Tandai termasuk ke dalam busur yang matang (*mature arc*) dan ini dicirikan oleh komposisi batuan yang didominasi oleh komposisi andesitik (Gambar 8). Kondisi ini juga ditunjukkan oleh batuan “magma satu”, sedangkan batuan “magma dua” pada umumnya tergolong ke dalam busur yang sedang berkembang (*evolved arc*). Kemiripan karakter geokimia batuan vulkanik Lebong Tandai dengan “magma satu” juga terlihat pada diagram korelasi antara $1/Zr \cdot 100$ dengan unsur-unsur Rb, Ba, Sr, K, Y, dan Nb (Gambar 9a dan b). Namun, dalam klasifikasi ini pemisahan yang tegas antara karakter “magma satu” dan “magma dua” hanya dapat terlihat dengan baik pada unsur Sr, Y, dan Nb, sedangkan pada ketiga unsur lainnya (Rb, Ba, dan K) tidak terlihat dengan jelas karena ketiganya telah mengalami pengayaan pada saat proses kontaminasi.

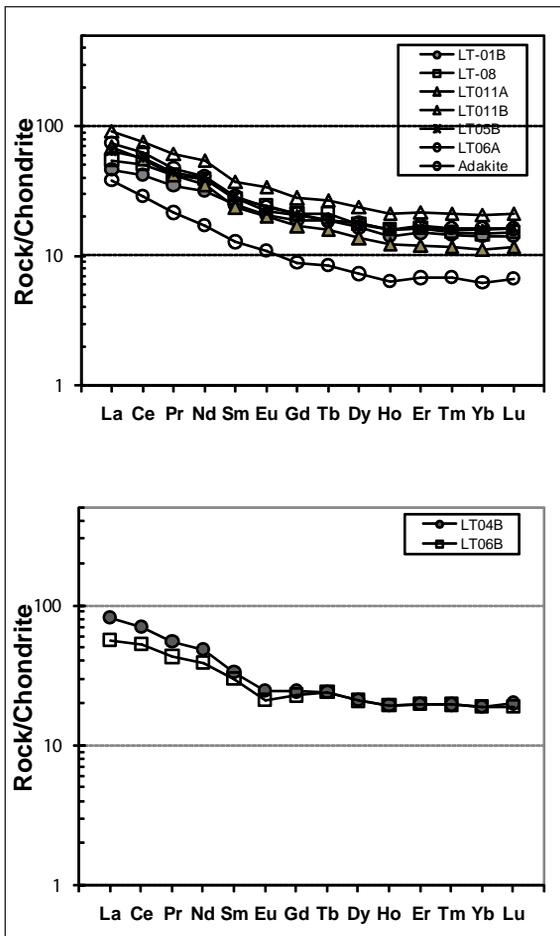
Pola *REE* batuan vulkanik Lebong Tandai dalam diagram laba-laba, pada dasarnya memperlihatkan pola yang sama dengan sedikit variasi berupa anomali negatif yang samar pada unsur Eu dalam percontoh LT-04B dan LT-06B (Gambar 10). Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa semua batuan vulkanik tersebut berasal dari satu sumber magma yang sama. Namun, dalam proses fraksinasi telah terjadi kesetimbangan yang sangat lokal dengan kristalisasi mineral plagioklas pada satu bagian dalam sistem magma, sehingga menghasilkan anomali negatif yang tidak signifikan pada unsur Eu. Plot *HREE* batuan vulkanik Lebong Tandai menunjukkan pola yang datar (*flat*) dengan nilai rasio *rock/chondrite* di atas 10, tanpa adanya gejala *depletion*. Hal ini menunjukkan bahwa cairan sisa magma batuan ini tidak mengandung mineral garnet sebagai residual (Wilson, 1989). Sementara itu, plot *LREE* batuan Lebong Tandai ini menunjukkan variasi yang lebih lebar, namun dengan pola yang sama. Kondisi ini menunjukkan bahwa tidak terjadi fluktuasi pengayaan yang signifikan, bahkan terhadap unsur-unsur yang kompatibel, ketika magma asalnya mengalami kontaminasi. Dibandingkan dengan pola *REE* batuan vulkanik Bengkulu, maka terlihat dengan jelas bahwa pola *REE* batuan vulkanik

Lebong Tandai memperlihatkan kemiripan dengan batuan “magma satu”. Perbandingan pola *REE* antara batuan vulkanik Bengkulu dengan Lebong Tandai masing masing disajikan pada (Gambar 19 dan 20). Data *REE* juga menunjukkan bahwa semua batuan vulkanik Lebong Tandai, seperti juga semua batuan “magma dua” dan hampir semua batuan “magma satu” memiliki umur yang lebih tua dari 30 juta tahun (Gambar 11). Namun, bila dilihat dari tingkat kematangan busur vulkaniknya, maka seyogyanya aktivitas “magma satu” dimulai lebih awal dan kemudian digantikan oleh aktivitas “magma dua” yang berkomposisi lebih asam. Korelasi antara Y dengan $Nb/Zr \cdot 100$ menunjukkan bahwa aktivitas magmatik yang sudah berlangsung lebih dari 30 juta tahun lalu tersebut berlangsung pada lingkungan tektonik *back-arc side* (Gambar 12).

Hasil plot batuan vulkanik daerah Lebong



Gambar 19. Pola unsur *REE* “magma satu dan dua”.



Gambar 20. Pola unsur REE batuan Leborg Tandai (kanan) yang mirip dengan pola “magma satu”.

Tandai dalam diagram SiO_2 vs K_2O menunjukkan bahwa semua batuan vulkanik tersebut termasuk batuan K-medium (Gambar 13), yakni golongan batuan yang umum dijumpai sebagai produk zona penunjaman. Plot batuan Leborg Tandai bersama-sama dengan batuan “magma satu” dan “magma dua” pada diagram di atas, menunjukkan suatu kecenderungan (*trend*) fraksinasi yang dapat menimbulkan interpretasi bahwa telah terjadi proses fraksinasi magma dari “magma satu” ke batuan vulkanik Leborg Tandai, dan akhirnya menjadi “magma dua”. Namun, kecenderungan tersebut bersifat semu karena pada dasarnya “magma satu” dan “magma dua” adalah dua magma yang berbeda secara karakter dan genesis. Tetapi kecenderungan yang ditunjukkan oleh percontoh “magma satu” dan batuan vulkanik Leborg Tandai adalah kecenderungan

derungan fraksinasi yang sesungguhnya karena mereka berasal dari magma yang sama, yakni “magma satu”. Sementara itu, satu percontoh batuan vulkanik daerah Leborg Tandai yang jatuh pada klasifikasi leusitik, sebenarnya adalah batuan andesit basaltik (percontoh LT-01B) yang sudah mengalami proses K-metasomatisme. Uraian di atas menjelaskan betapa unsur-unsur utama sangat mudah untuk berubah dan kecenderungan yang ditunjukkannya akan dapat memberikan informasi petrogenesis dan kesimpulan yang salah dan menyesatkan. Itulah sebabnya, dalam tulisan ini pembahasan unsur utama ditempatkan pada bagian akhir setelah pembahasan unsur jejak (*trace elements*) dan REE.

Terkait dengan afinitas batuan vulkanik Leborg Tandai, penggunaan klasifikasi yang didasarkan pada unsur utama (baik total alkali maupun rasio FeO/MgO) mengelompokkan semua batuan tersebut ke dalam jenis subalkalin dan kalk-alkalin (Gambar 14 dan 15). Namun, pengelompokan batuan tersebut di sekitar garis pemisah antara kelompok kalk-alkalin dengan toleit (Gambar 15) mengisyaratkan bahwa batuan tersebut masih belum sepenuhnya memiliki karakter kalk-alkalin. Hal tersebut terbukti dengan penggunaan unsur jejak dalam diagram korelasi Zr vs Y yang mengelompokkan semua batuan vulkanik daerah Leborg Tandai, termasuk semua batuan vulkanik daerah Bengkulu, ke dalam kelompok transisi antara kalk-alkalin dengan toleit (Gambar 16).

KESIMPULAN

Dari semua uraian di atas dapat disimpulkan bahwa batuan vulkanik daerah Leborg Tandai didominasi oleh komposisi andesitik dengan sejumlah kecil batuan yang berkomporsi dasitik dan basal. Batuan tersebut tergolong ke dalam batuan transisi antara jenis kalk-alkalin dan toleit. Berdasarkan kandungan unsur jejak (*trace elements*) dan REE-nya, terbukti bahwa batuan daerah Leborg Tandai berasal dari “magma satu” yang merupakan salah satu sumber magma dari dua sumber magma yang sudah diidentifikasi di daerah Bengkulu (Zulkarnain, 2007). Sumber magma dari “magma satu” tersebut sepertinya adalah batuan berkomporsi adakit, yang merupakan batuan berkomporsi paling primitif dari semua batuan “magma satu”. Pola geokimia batuan vulkanik daerah Leborg Tandai menunjukkan bahwa

mereka merupakan produk fraksinasi lanjut “magma satu”. Indikasi tersebut diperkuat oleh pola *REE* yang menunjukkan pola yang sama dalam rentang fraksinasi yang sempit. Semua percontoh menunjukkan pengayaan *LREE* mulai dari 45 hingga 90 kali *chondrite* dan *HREE* dari 11 hingga 20 kali *chondrite*. Aktivitas kedua magma tersebut telah berlangsung sejak lebih dari 30 juta tahun yang lalu di mana aktivitas “magma satu” yang mengawali kegiatan magmatik di wilayah ini kemudian digantikan oleh “magma dua” yang berkomposisi lebih asam. Kondisi ini sekaligus menunjukkan bahwa kawasan ini tengah berkembang dari busur yang matang (*mature arc*) menuju busur yang sedang berkembang (*evolved arc*). Cairan sisa magma pada “magma satu” tidak mengandung garnet sebagai komponen residual dan pada lingkup yang lokal, magma tersebut mengalami kesetimbangan dengan kristalisasi plagioklas. “Magma satu” dalam perjalanannya menuju ke permukaan telah mengalami proses kontaminasi pada saat menembus kerak bagian atas (*upper crust*), sehingga pengayaan akan unsur-unsur inkompatibel terjadi bukan pada zona penunjaman, melainkan pada saat menembus *upper crust*.

Secara lingkungan tektonik batuan vulkanik daerah Lebong Tandai, dihasilkan oleh kegiatan busur magmatik yang berkarakter *back-arc side*, sedangkan adanya penyimpangan yang terjadi pada sebagian kecil percontoh, tampaknya lebih disebabkan oleh terjadinya pengayaan lokal pada unsur Y dan Zr.

Karena daerah Lebong Tandai merupakan daerah tambang emas yang sudah ditambang sejak zaman Belanda, maka dapat dikatakan bahwa batuan vulkanik yang menunjukkan karakter “magma satu” tersebut merupakan magma yang berpotensi untuk membawa mineralisasi emas. Hal ini didasarkan pada kenyataan, bahwa semua batuan vulkanik yang terdapat di kawasan Lebong Tandai ini berasal dari satu sumber magma, yakni “magma satu”. Walaupun hipotesis ini masih perlu diuji dan dibuktikan lebih jauh dengan data yang lebih banyak dari daerah-daerah vulkanik yang telah terbukti menghasilkan mineralisasi emas, namun adanya bukti bahwa “magma satu” berasal dari magma berkomposisi adakitik, cukup memperkuat hipotesis tersebut. Hal ini dikaitkan dengan suatu penelitian yang dilakukan oleh Jego dr. (2006) pada percontoh dari Cuyapo,

Luzon Utara, Filipina, yang menemukan bahwa konsentrasi emas yang lebih tinggi ditemukan pada batuan adakitik daripada di dalam batuan kalk-alkalin yang normal.

Ucapan Terima Kasih—Data yang dianalisis dan dikaji dalam tulisan ini merupakan bagian hasil penelitian Tim Mineralisasi Emas di Pusat Penelitian (Puslit) Geoteknologi LIPI Bandung pada tahun 2006, dan penulis merupakan peneliti utamanya. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih dan penghargaan yang tinggi kepada semua anggota Tim yang jelas memiliki peran dalam pengumpulan data lapangan dan percontoh batuan dalam penelitian tersebut. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Pimpinan Puslit yang telah memberi kesempatan kepada Tim untuk mewujudkan ide atau pemikiran mereka melalui kegiatan penelitian yang dibiayai melalui APBN.

ACUAN

- Barber, A.J., 2000. The origin of the Woyla Terranes in Sumatra and the Late Mesozoic evolution of the Sundaland margin. *Journal of Asian Earth Sciences*, 18, h.713–738.
- Barrett, T.J. dan MacLean, W.H., 1999. Volcanic sequences, lithogeochemistry, and hydrothermal alteration in some bimodal volcanic-associated massive sulfide systems. Dalam: Barrie, C.T. dan Hannington, M.D (eds), *Volcanic Associated Massive sulfide systems: Processes and examples in modern and Ancient Settings. Reviews in Economic Geology*, 8, h.101-131.
- Defant, M.J. dan Drummond, M.S., 1990. Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere. *Nature*, 347, h.662-665.
- Fitch, T.J., 1972. Plate convergence, transcurrent faulting and internal deformation adjacent to Southeast Asia and the Western Pacific. *Journal of Geophysical Research*, 77, h.4432–4460.
- Hamilton, W.B., 1979. *Tectonics of the Indonesia region*. US Geol. Surv. Prof. Paper, 1078, 345 h.
- Gafoer, S., Amin, T.C., dan Pardede, R., 1992. *Peta Geologi Lembar Bengkulu, Sumatera, skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Jego, S., Polve, M., de Parseval, Ph., dan Maury, R., 2006. *Gold in adakitik magmas: Concentrations and Localisation within the rocks*, Abstracts, www.cosis.net/abstracts/RSTGV/00283/RSTGV-A-00283.pdf
- Kusnana, Pardede, R., Andi Mangga, S., dan Sidarto, 1993. *Geologi Lembar Sungai penuh dan Ketaun, Sumatera, skala 1 : 250.000*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi Bandung.
- Le Bas, M. J., Le Maitre, R. W., Streckeisen, A., dan Zanettin, B., 1986. A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali–silica diagram. *Journal of Petrology*, 27, h.745-750.
- Mangga, S.A, Gafoer S., dan Suwarna, N., 1987. *Hubungan*

- geologi antar kepulauan Mentawai dan daratan Sumatera bagian selatan pada Tersier*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Martin, H., 1999. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids. *Lithos*, 46, h.411-429.
- Miyashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Science*, 274, h.321-355.
- Pearce, J.A, Harris, N.B., dan Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology*, 25, h.956-983.
- Peccerillo, A. dan Taylor, S.R., 1976. Geochemistry of Eocene calcalkaline volcanic rocks from Kastamonu area, northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 56, h.221-246.
- Stern, A.R., Syme, E.C., Bailes, A.H., dan Lucas, S.B., 1995. Paleoproterozoic (1.90-1.86 Ga) arc volcanism in the Flin Flon Belt, Trans-Hudson Orogen, Canada. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 119, h.117-141.
- Sun, S. dan McDonough, W.F, 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes, Dalam: Saunders, A.D. & Norry, M.J. (eds), *Magmatism in the ocean Basins, Geological Society Special Publication*, 42, h.313-345.
- Tatsumi, Y. dan Eggins, S., 1985. *Subduction zone magmatism*. Blackwell Science, *Frontiers in Earth Sciences*, 211 h., ISBN 0-86542-361-X.
- Wilson, Majorie, 1989. *Igneous Petrogenesis; A Global Tectonic Approach*. Unwin Hyman Ltd., London, 466 h., ISBN 0-04-552024-0.
- Zulkarnain, I., 2001. Rock Chemistry of Quaternary Volcanics around Manado and Siau Island, North Sulawesi. *Jurnal Teknologi Mineral - FIKTM - ITB*, 8, (1), h.37-52.
- Zulkarnain, I., 2007. *Variasi geokimia batuan vulkanik daerah Bengkulu di sabuk pegunungan Bukit Barisan, Sumatera dan implikasi tektoniknya*, (dalam penerbitan).

Naskah diterima : 16 Januari 2008

Revisi terakhir : 22 April 2008