

## MODEL STRUKTUR SUBDUKSI KERAK DI PERAIRAN LAUT MALUKU DAN VULKANISME BERDASARKAN ANALISIS GAYA BERAT DAN KEGEMPAAN

B. Setyanta dan I. Setiadi

Pusat Survei Geologi  
Jl. Diponegoro No. 57 Bandung 40122

### S a r i

Busur vulkanik di kawasan Laut Maluku yang berderet memanjang dengan arah utara-selatan, di ujung lengan utara Sulawesi terdiri atas Kepulauan Taguladang, Biaro, Bangka, Sangihe, dan di bagian barat Halmahera seperti Pulau Ternate, Makian, Kayoa dan Pulau Tidore. Kedua gugusan kepulauan busur vulkanik tersebut pada bagian tengahnya dipisahkan oleh deretan kepulauan non vulkanik seperti Pulau Tifore dan Pulau Mayu yang tersusun oleh melange. Anomali gaya berat di daerah ini menunjukkan pola lajur-lajur yang arahnya cenderung utara-selatan, se arah dengan pola struktur geologi regional dengan nilai anomali antara -100 mGal hingga 260 mGal. Analisa pemodelan gaya berat menunjukkan adanya subduksi di bawah Kepulauan Halmahera yang miring dengan curam ke timur, sedangkan di bagian barat yaitu di bawah Lengan Utara Sulawesi tidak tampak. Pola struktur hasil analisis gaya berat menunjukkan bahwa sesar-sesar mendatar di bagian barat dan sesar sesar naik di bagian timur mengontrol kegiatan vulkanisme di daerah ini.

Kata kunci : Anomali gaya berat, kegempaan, model struktur kerak, aktivitas Vulkanisme, Perairan laut Maluku

### Abstract

*Volcanic arc in Maluku Sea area with relative north-south trend, in the North Arm of Sulawesi consists of Taguladong, Biaro, Bangka, Sangihe islands, and west part of Halmahera are Ternate, Makian, Kayoa and Tidore islands. Bouguer anomaly in this area shows the line patterns that trend to be north-south, in same direction of the pattern of the regional geological structures with the anomaly value range (-100 mGal until 260 mGal). Gravity modelling analysis indicate the presence of subduction beneath the islands of Halmahera is tilted to the east with a steep, while in the western part which is below the north arm of Sulawesi is not visible. Structure pattern of gravity analysis show strike slip fault system in the west part, and thrust fault in the east part that controlling volcanism activity in this area.*

Keyword:

### Pendahuluan

Secara geografis daerah penelitian terletak pada 124°30' sampai 128°30' Bujur Timur dan antara 1° 15' Lintang Selatan hingga 2°40' Lintang Utara. Kawasan di perairan Laut Maluku yang terletak di antara Pulau Halmahera, Maluku dan ujung Lengan Utara Sulawesi ini menyimpan gejala-gejala tektonik yang unik. Fenomena yang menonjol di kawasan itu diantaranya adalah tingginya frekuensi gempa tektonik yang sering melanda daerah tersebut (McCaffrey, *et. al.*, 1983). Selain itu busur gunung api di daerah itu merupakan jalur gunung api paling aktif di dunia. Sebagian besar deretan gunung api di kawasan ini setiap tahun nyaris meletus atau giat, bahkan beberapa di antaranya hampir giat sepanjang tahun (Dasuki, 1992). Akhir-akhir ini tiga gunung api di kawasan itu yaitu Lokon, Soputan di Sulawesi

Utara dan Ibu di Halmahera sedang giat mengepul dan memuntahkan material-material vulkaniknya, bahkan Gunung Ibu sejak 2008 bertahan dengan status siaga.

Dengan latar belakang masalah yang telah disebutkan di atas, akan dilakukan analisis data sigi gaya berat dan pemodelan kerak di daerah perairan Laut Maluku dan sekitarnya sehingga dapat menerangkan mekanisme gempa dan vulkanisme di daerah ini.

Pada tahun 2005 Pusat Survei Geologi telah melakukan pengamatan gaya berat sistem sel di daratan dengan transportasi menggunakan helikopter meliputi Kepulauan Halmahera, Taliabu (Mangole), Lengan utara Sulawesi dan pulau-pulau kecil di utaranya.

Namun demikian sebelum kegiatan pemetaan di daratan tersebut, Watt, dr. (1978) terlebih dahulu telah memetakan gaya berat bebas udara di kawasan perairan laut Maluku.

Perilaku atau dinamika kerak pada masa lalu di daerah ini pada dasarnya tercermin pada produk-produk yang dapat diamati pada saat ini, termasuk kenampakan anomali gaya berat di daerah ini sehingga sudah menjadi tugas pemerhati ilmu kebumiharian untuk menelaah peta-peta gaya berat yang sudah terbit ke dalam suatu tulisan.

## Metoda

Metoda yang dilakukan dalam penelitian ini adalah menghimpun data gaya berat bebas udara di laut dari Watt dr. (1978) dan data gaya berat Bouguer di darat yang selanjutnya direduksi menjadi Peta Anomali Bouguer. Setelah itu dibuat model bawah permukaan dengan parameter-parameter yang lain seperti ketebalan sedimen, kedalaman air laut, dan informasi geologi yang lain.

Penafsiran struktur kerak dilakukan dengan membuat penampang gaya berat bawah permukaan memotong dataran Sulawesi Utara, Laut Maluku, Pulau Mayu dan Halmahera Utara. Penampang tersebut dibuat berdasarkan :

1. Pengukuran gaya berat di daratan (anomali Bouguer) dan data gaya berat di sebagian perairan Laut Maluku (dalam *Free Air Anomaly*) hasil pengukuran Bowin dr. (1981).
2. Data geologi dan geofisika dari penulis terdahulu.
3. Data kedalaman laut di perairan Laut Banda.

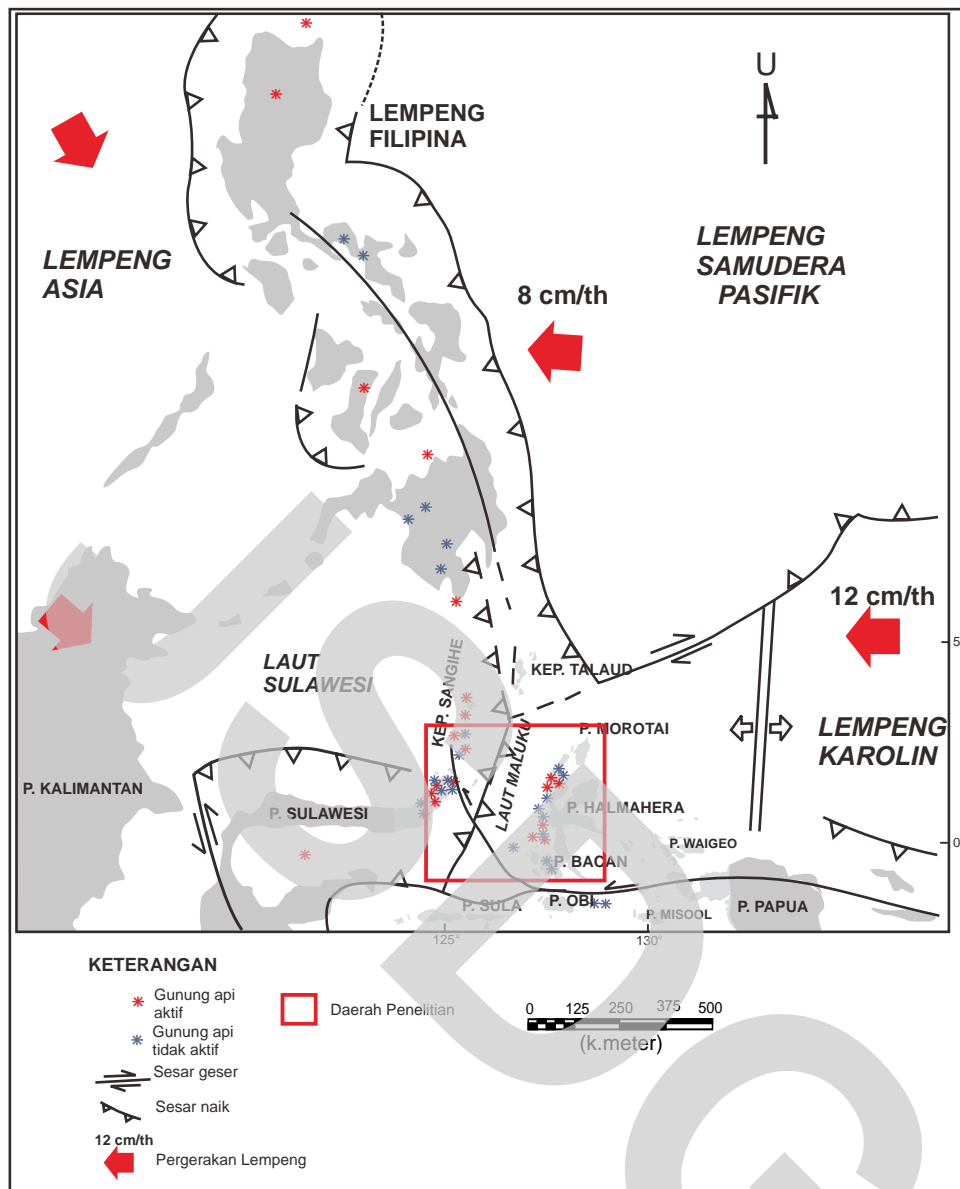
Pembuatan penampang gaya berat dilakukan dengan pemodelan ke depan (*forward modelling*), yaitu dengan cara menghitung anomali gaya berat Bouguer yang diakibatkan oleh bentuk geometri tubuh geologi yang terletak di bawah permukaan bumi dan di bawah permukaan laut menggunakan perangkat komputer dengan terlebih dahulu mengasumsikan atau memperkirakan rapat masa spesifik bawah permukaan. Nilai anomali menurut perhitungan ini selanjutnya dibandingkan terhadap nilai anomali yang diamati (dibaca pada peta). Kesesuaian di antara keduanya dicapai pada keadaan di mana sifat fisik, bentuk geometri dan letak model mendekati keadaan sebenarnya dari tubuh geologi yang diselidiki. Namun demikian model gaya berat yang akan dibuat harus mengacu juga pada beberapa hipotesis atau anggapan untuk menjadi pegangan disamping data-data lain yang tersedia seperti geologi permukaan, geokimia dan data kegempaan. Anomali bebas udara (*free air anomaly*) di perairan Laut Maluku harus direduksi terlebih dahulu menjadi anomali Bouguer supaya garis-garis konturnya dapat

digabungkan atau disambungkan dengan kontur anomali Bouguer di daratan.

Sebagai data pengendali model bawah permukaan gaya berat adalah data dan informasi topografi kedalaman laut (Gambar 4), peta geologi permukaan, tektonika dan data kegempaan. Dengan menerapkan pengendalian seperti ini diharapkan akan mengurangi ambiguitasnya sehingga model yang dihasilkan dapat mendekati tataan geologi sebenarnya.

## Tektonik Setting

Daerah Laut Maluku dan kawasan timur Indonesia pada umumnya mempunyai tatanan geologi dan fisiografi yang berbeda dengan kawasan barat Indonesia. Kerangka tektonik di sekitar Laut Maluku yaitu di sekitar Sulawesi Bagian Utara dan di sekitar Kepulauan Halmahera merupakan hasil bentukan aktifitas tiga lempeng utama yaitu Lempeng Filipina, Lempeng Australia dan bagian tenggara Lempeng Eurasia (Hamilton, 1979, Katili, 1978, Cardwell & Isacks, 1979, McCaffrey & Silver, 1980, Sukamto dr, 1981, Gambar 1). Perbedaan arah gerak, tumbukan yang tidak frontal dan perbedaan komposisi ketiga lempeng yang saling berinteraksi tersebut menghasilkan beberapa sempalan kerak benua atau benua renik (*detached continental crust*) yang saling kait-mengait dan saling bertumbukan, membentuk pola tektonik yang rumit disertai dengan pembentukan beberapa sesar regional di sekitar daerah ini (Cardwell & Isacks, 1979, Cardwell dr, 1980, Fauzi dr, 1999, Sudradjat, 1989, Sardjono, 1999). Sedangkan di sekitar Laut Maluku sendiri terdapat orogenesis aktif Talaud yang satu-satunya di dunia di mana terdapat subduksi ganda yang mengarah ke barat dan ke timur (Simanjuntak dan Barber, 1996). Posisi tektonik dari barat ke timur daerah penelitian ditempati oleh gugusan kepulauan busur vulkanik di utara Sulawesi, gugusan kepulauan non vulkanik Talaud (*Talaud Mayu Ridge*), gugusan kepulauan vulkanik barat Halmahera dan busur non vulkanik Halmahera timur (Sukamto dr, 1981). Gugusan kepulauan vulkanik ditandai dengan deretan gunung api aktif (Dasuki, 1992). sedangkan gugusan kepulauan non vulkanik ditandai dengan ofiolit dan melange (Atmadja & Sukamto, 1979, Sukamto, 1989). Analisis data geokimia menyebutkan bahwa batuan ultramafik (gabro, basal dan diabas) di Talaud-Mayu merupakan batuan toleitik-samudera (*abyssal tholeiites*) dari slab allochthonous yang bergerak ke atas pada jalur subduksi (Atmadja & Sukamto, 1979).



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian dan kedudukan unsur tektonik serta pergerakan lempeng Indonesia (diadopsi dari Sudradjat, 1989 Hamilton, 1979, Katili, 1978, Cardwell dan Isack, 1979).

Ringkasan Geologi sepanjang penampang barat-timur

Penampang bawah permukaan gaya berat yang akan dibuat adalah arah AB (barat-timur). Penampang tersebut melintasi bagian utara P. Sulawesi (Lembar Manado), Pulau Mayu (Lembar Talaud) dan Pulau Halmahera bagian utara. Daerah Manado dan sekitarnya didominasi oleh batuan vulkanik Tersier dan Kuartar (Effendi & Bawono, 1997, Silver, 1979, Hakim & Hall, 1991). Lembar Talaud (*Talaud-Mayu*

*ridge*) di dominasi oleh batuan vulkanik Tersier, ophiolit dan melange (Atmadja & Sukamto, 1979, Sukamto & Suwarna, 1986) yang berasosiasi dengan pematang tengah samudera tholeitik yang materialnya berasal dari lempeng samudera atau mantel atas (Atmadja & Sukamto, 1979). Sedangkan Halmahera bagian utara di kuasai oleh batuan vulkanik, batuan ultrabasa, metamorf dan ofiolit (Supriatna, 1980, Apandi & Sudana, 1980). Ringkasan geologi di sekitar Laut Maluku dapat dilihat pada Gambar 2.

## Anomali Bouguer

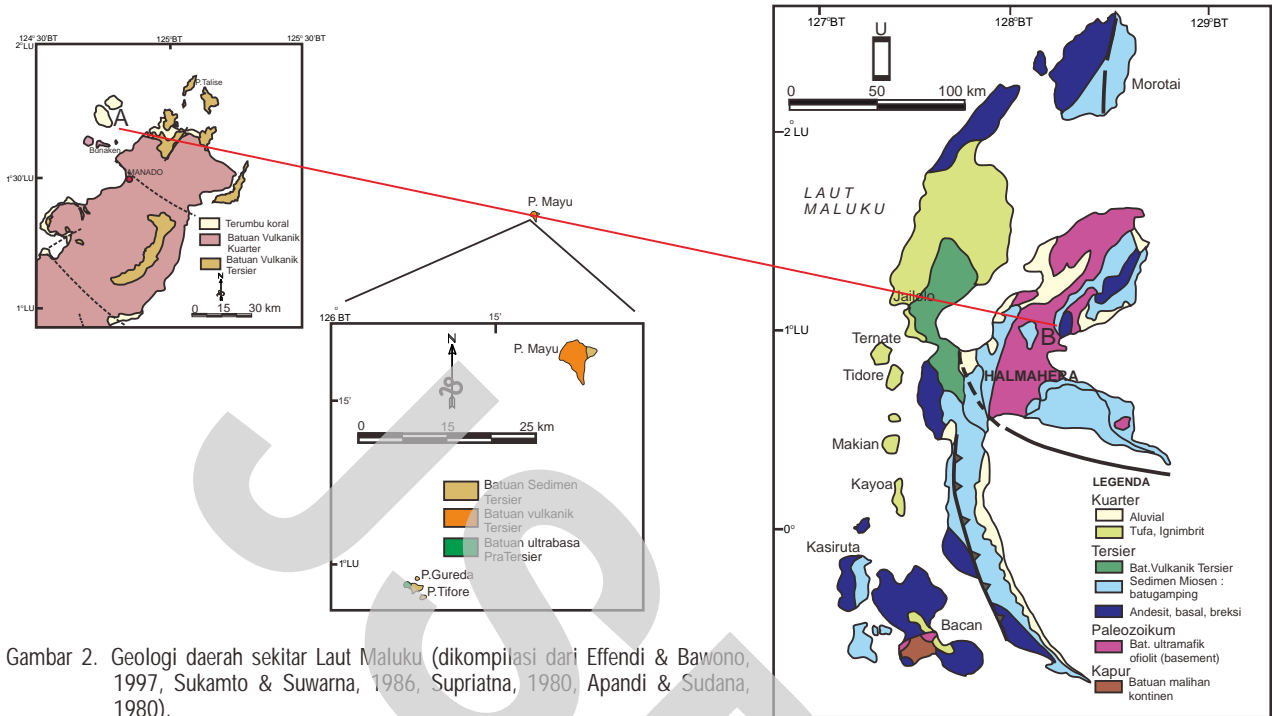
Beberapa lembar peta anomali Bouguer dengan skala 1 : 250.000 yang dikompilasi menjadi satu peta anomali Bouguer daerah Laut Maluku dan sekitarnya adalah Lembar Manado (Sobari, dr., 1992), Lembar Talaud dan Mayu (Sobari dan Siagian, 2006), Lembar Ternate (Nasution dan Hayat, 2007) dan Lembar Morotai (Susilo dan Nainggolan, 2007). Peta-peta tersebut kemudian digabung dengan peta gaya berat bebas udara (*Free Air Anomali map*, Bowin, et al., 1981) yang sudah direduksi menjadi anomali Bouguer (Gambar 3).

Anomali Bouguer daerah penelitian mempunyai kisaran nilai -100 mGal hingga 260 mGal. Berdasarkan nilai dan polanya, secara garis besarnya anomali Bouguer dapat dikelompokkan menjadi tiga bagian yaitu bagian timur (kelompok I), bagian tengah (kelompok II) dan bagian barat (kelompok III). Kelompok I terdiri dari kelompok anomali dengan nilai 100 mGal hingga 240 mGal, pada bagian tepi barat membentuk pola lajur-lajur yang cembung ke arah barat dengan gradien tinggi (kontur anomali rapat). Bagian tertinggi dan rendahan membentuk pola-pola yang tidak teratur dengan gradien rendah. Pada bagian tertinggi berasosiasi dengan batuan vulkanik dan batuan ofiolit di lengan barat Pulau Halmahera (Supriatna, 1980, Apandi & Sudana, 1980) sedangkan bagian rendahan berasosiasi dengan bentuk Cekungan Teluk Kao di bagian utara Pulau Halmahera (sebelah selatan Pulau Morotai) dan Cekungan Weda di bagian tenggara daerah penelitian. Gradien tinggi atau kerapatan kontur merupakan gambaran adanya sesar naik pada jalur ini, yang batuan dasar kerak samudera (batuan ultramafik dan ofiolit) tersingkap bersama dengan batuan vulkanik Tersier. Kelompok II (bagian tengah) terdiri dari 2 (dua) bagian kelompok rendahan anomali yaitu di bagian utara dan selatan. Rendahan anomali di bagian selatan mempunyai nilai antara -100 mGal hingga sekitar 40 mGal, berbentuk lembah anomali yang berpola lingkaran besar tidak teratur. Di bagian sisi timur laut lembah anomali kontur anomalnya membentuk lajur-lajur yang agak rapat yang ditafsirkan ekspresi dari suatu kelurusan geologi yang diperkirakan merupakan sesar geser manganan. Bagian lembah anomali ini diperkirakan merupakan bagian dari Cekungan Halmahera Barat (Sobari dr., 2009). Kemudian pada bagian utara masih dalam kelompok II terdiri dari kelompok anomali yang membentuk rendahan anomali yang diperkirakan menerus ke utara dengan nilai antara -

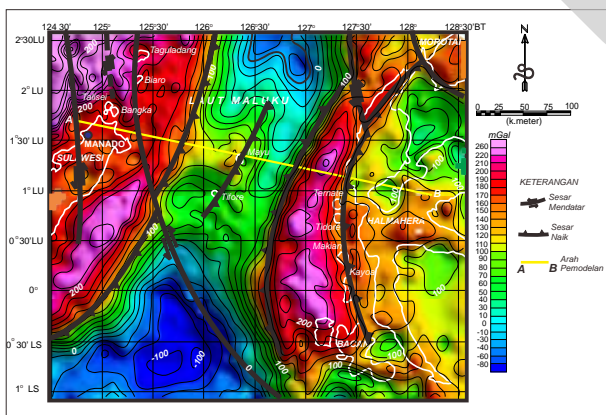
60 mGal hingga sekitar 40 mGal. Kelompok rendahan anomali ini ditafsirkan merupakan bagian dari Cekungan Morotai Barat yang diperkirakan menerus dari utara hingga sebelah timur Kepulauan Sangihe (Sobari, dr., 2009). Antara Cekungan Halmahera Barat dan Cekungan Morotai Barat dibatasi oleh suatu lajur tinggian anomali bernilai 60 mGal hingga 85 mGal yang polanya tidak teratur di sekitar Pulau Mayu. Keadaan yang demikian kemungkinan ditimbulkan oleh fragmen-fragmen batuan akrasi yang berasal dari kerak samudera, selubung atas dan juga fragmen-fragmen batuan sedimen PraTersier dan Tersier yang sebagian tersingkap oleh sesar anjak di Pulau Mayu (Atmadja & Sukanto, 1979). Kemudian kelompok III adalah kelompok kontur anomali tinggi membentuk lajur-lajur menyerupai busur memanjang hampir utara-selatan, cembung ke arah timur yang mempunyai kisaran nilai antara 100 mGal hingga 260 mGal. Kelompok III ini ditafsirkan merupakan gambaran dari batuan-batuan vulkanik Tersier dan Kuartar di daerah Sulawesi Utara dan sekitarnya pada jalur mendala geologi Sulawesi Barat (Effendi & Bawono, 1997. Simanjuntak, 1993).

## Data kegempaan

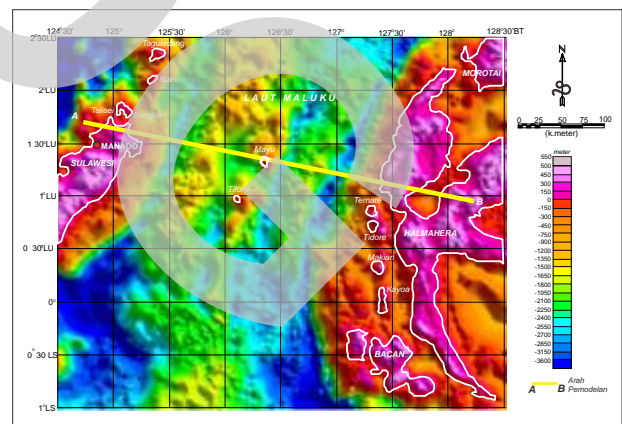
Data kegempaan terutama kegempaan tektonik diperlukan untuk membantu pembuatan model bawah permukaan gaya berat. Data kegempaan diperoleh dari literatur yaitu dari McCaffrey et al (1983) dan McCaffrey & Silver (1980) yang kemudian digunakan untuk membantu pemodelan bawah permukaan karena kondisi kegempaan suatu daerah sangat berhubungan dengan kondisi struktur dan tektonik daerah tersebut (Gambar 5 dan 6). Dengan kata lain semakin rumit dan kompleks proses tektonik dan pembentukan struktur pada suatu daerah, maka semakin tinggi kondisi kegempaan atau seismisitasnya. Hal tersebut secara empirik telah banyak dibuktikan oleh banyak ahli kebumihian yang menggunakan pendekatan teori tektonik lempeng. Analisis hasil plotting sumber gempa menggambarkan bahwa Zona Kemiringan Benioff di bawah jalur gunung api Sulawesi Utara terletak sekitar 100-180 km di bawah permukaan bumi dan tidak terlalu curam dibandingkan dengan yang ada di bawah Halmahera yang mempunyai kedalamannya sekitar 60 hingga 150 km tapi lebih curam dan intensitas kegempaannya lebih tinggi (McCaffrey & Silver, 1980, McCaffrey et al, 1983, Gambar 5 dan 7b).



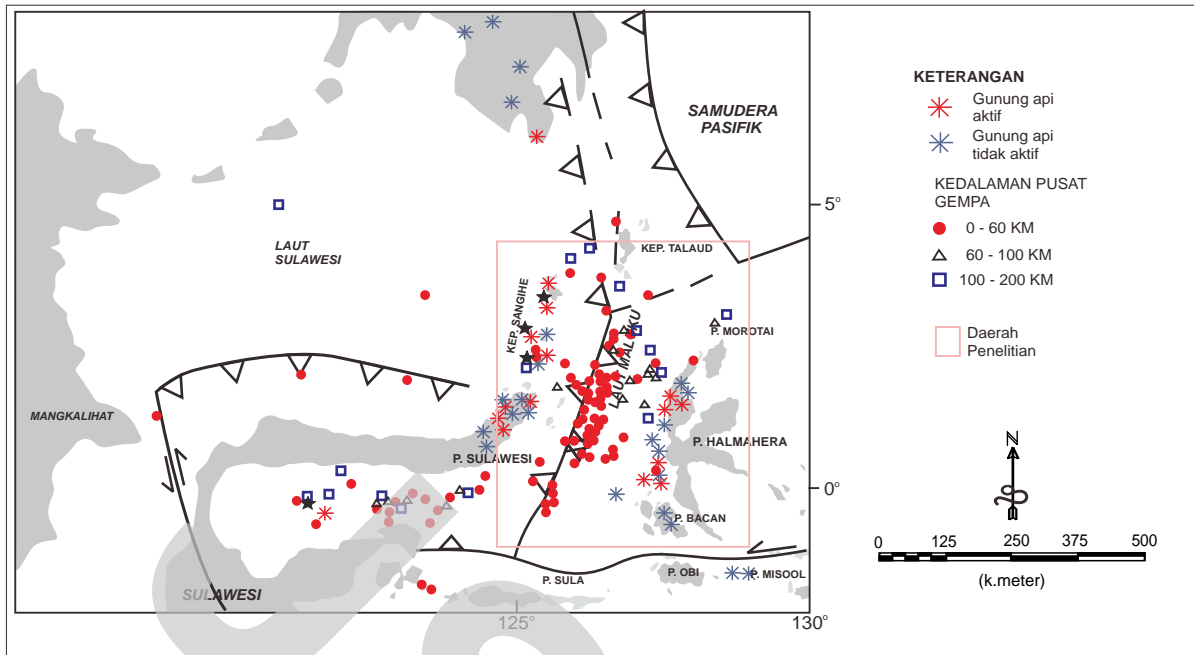
Gambar 2. Geologi daerah sekitar Laut Maluku (dikompilasi dari Effendi & Bawono, 1997, Sukanto & Suwana, 1986, Supriatna, 1980, Apandi & Sudana, 1980).



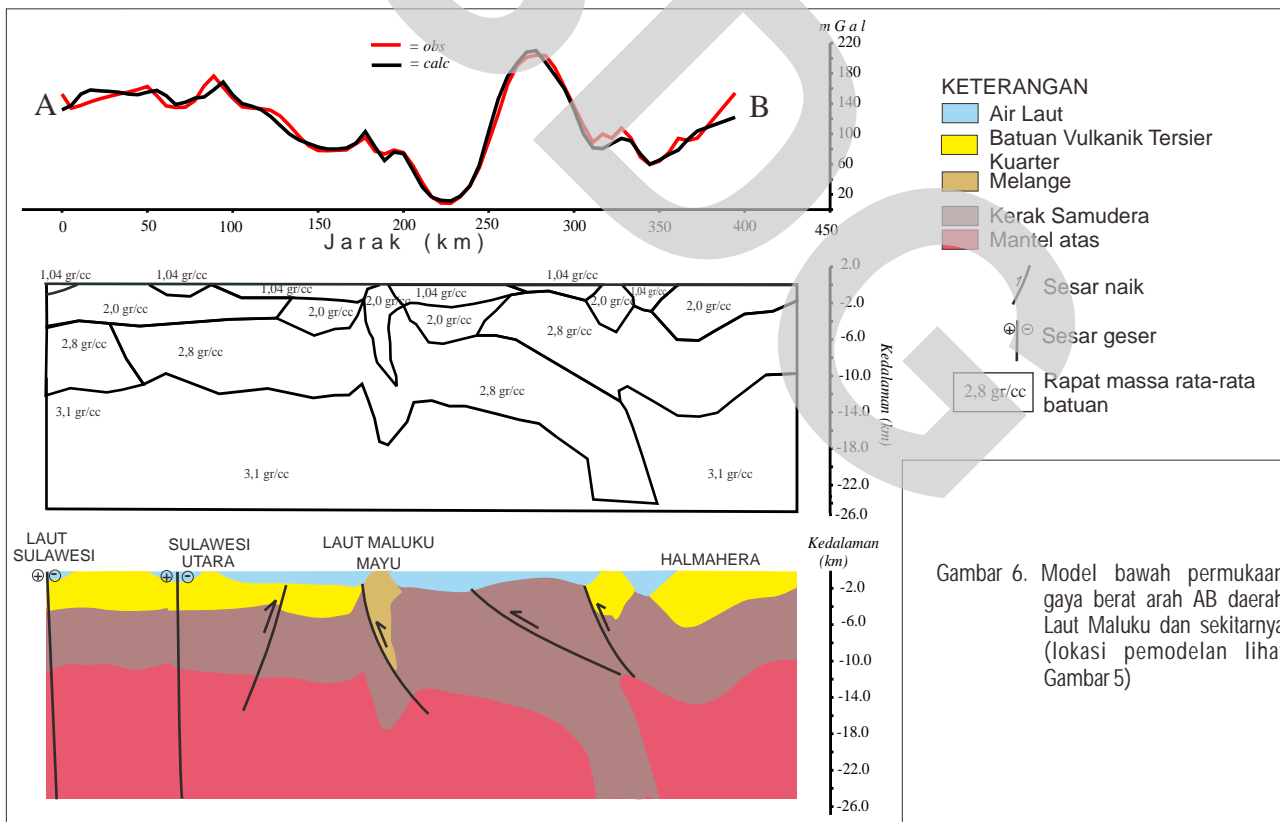
Gambar 3. Peta anomali gaya berat Bouguer Laut Maluku dan sekitarnya (selang kontur 20 mGal, penarikan struktur berdasarkan anomali gaya berat).



Gambar 4. Peta Topografi Citra Laut Maluku dan sekitarnya (AB arah pemodelan gaya berat).



Gambar 5. Peta kegempaan dan vulkanisme di sekitar Laut Maluku (McCaffrey & Silver, 1980 dan McCaffrey, *et al.*, 1983).



Gambar 6. Model bawah permukaan gaya berat arah AB daerah Laut Maluku dan sekitarnya (lokasi pemodelan lihat Gambar 5)

## Analisis model bawah permukaan gaya berat

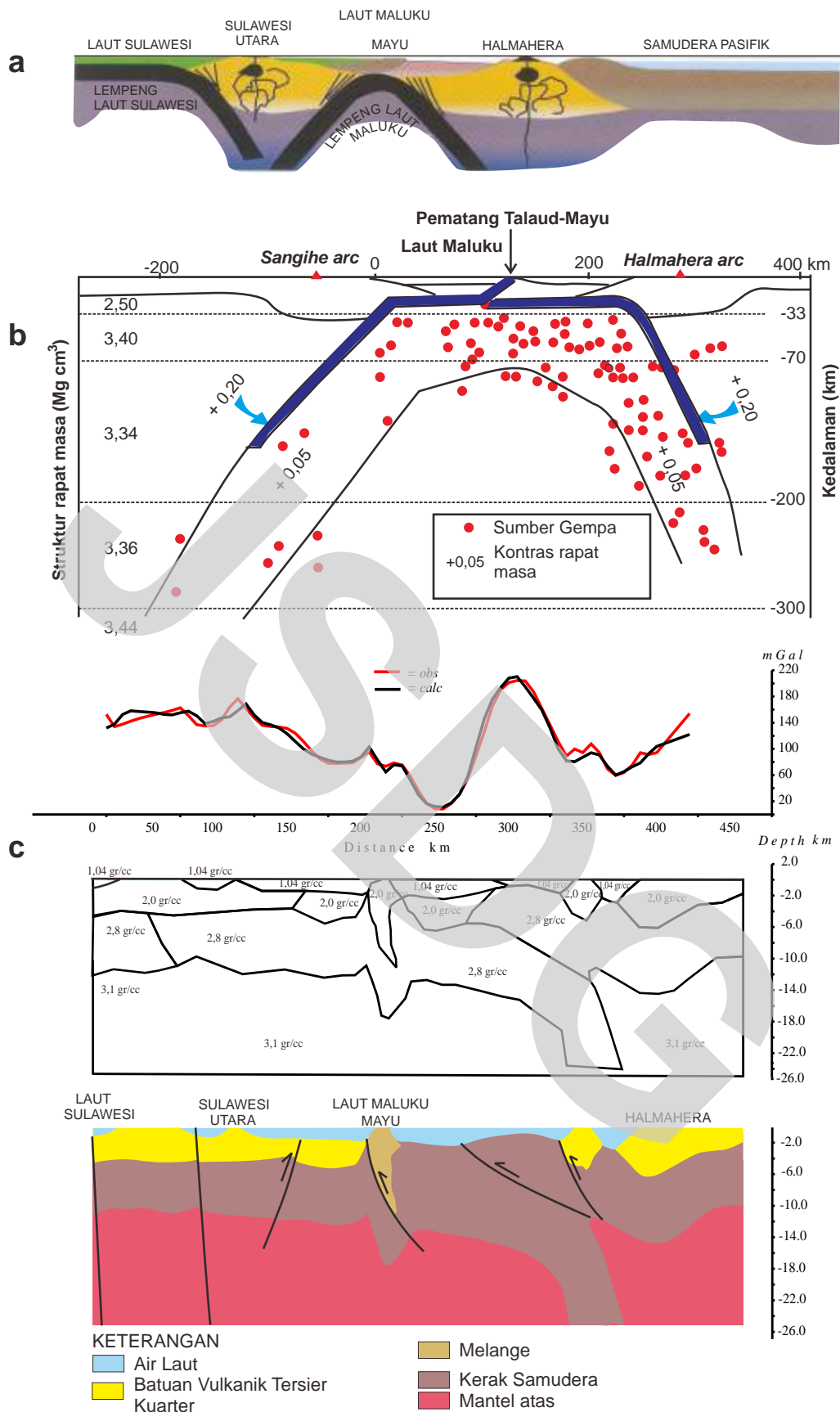
Model bawah permukaan penampang gaya berat sepanjang kurang lebih 400 km dengan arah relatif barat-timur (arah AB) yang berawal dari daratan Lengan Utara Sulawesi hingga Halmahera Timur diperlihatkan pada Gambar 6. Pemodelan gaya berat ini menggunakan kalkulasi algoritma 2,5 D hasil pemrograman komputer oleh Cady (1980) yang dapat dioperasikan di Pusat Survei Geologi, Badan Geologi Bandung.

Zona pertama dari kilometer 0 sampai 220 anomali menunjukkan gelombang pendek dengan nilai anomali dari sekitar 80 mGal hingga 180 mGal. Segmen ini merupakan cerminan dari batuan vulkanik Tersier dan Kuartar (rapat massa sekitar 2,0 gr/cc) yang dialasi oleh kerak samudera Laut Sulawesi (rapat massa sekitar 2,8 gr/cc). Kerak ini mempunyai undulasi slab yang tidak terlalu tinggi dan kemiringan yang tidak terlalu tajam. Kemudian dari km 220 hingga km 310 anomali gaya berat Bouguer memperlihatkan adanya gelombang panjang dengan kontras nilai terendah dan tertinggi cukup tajam yaitu antara 20 mGal hingga 220 mGal. Bagian anomali rendah pada segmen ini adalah pengaruh dari Laut Maluku yang cukup dalam yaitu sekitar 1500 meter dengan sedimen Tersier cukup tebal yaitu sekitar 4000 meter lebih yang mengisi batuan dasar kerak samudera Laut Maluku yang melengkung ke bawah. Bagian anomali positif tinggi pada segmen ini adalah cerminan dari batuan dasar kerak samudera Laut Maluku (rapat massa sekitar 2,8 gr/cc) yang naik ke atas mendekati permukaan, bahkan di bagian selatan daerah penelitian material batuan kerak ini tersingkap ke permukaan (lihat peta geologi Halmahera). Selanjutnya ke arah timur anomali menurun tajam hingga 80 mGal. Keadaan ini ditafsirkan sebagai kondisi kerak yang menunjam dengan sudut curam ke arah timur dengan kemiringan hampir 80° ke bawah. Kemudian dari km 310 hingga km 400 kenampakan kurva anomali gaya berat Bouguer kembali ke frekuensi rendah yang tidak mempunyai perbedaan mencolok dengan anomali tinggi. Keadaan yang demikian ini diinterpretasikan sebagai kondisi kerak samudera yang di atasnya terdapat sedimentasi dengan rapat massa relatif seragam yaitu batuan vulkanik Tersier dan vulkanik Kuartar (rapat massa sekitar 2,0 gr/cc). Undulasi kurva anomalnya lebih banyak dipengaruhi oleh massa air laut (rapat massa 1,04 gr/cc).

## Geodinamika

Pergerakan Lempeng Pasifik ke arah barat yang mengikuti sesar transformasi mendatar Sorong telah banyak menimbulkan kompleksitas tatanan geologi wilayah Sulawesi-Halmahera karena mendapatkan perlawanan dari lempeng Laut Sulawesi. Tumbukan dua lempeng ini memunculkan busur dalam vulkanik Sangihe dan busur luar non vulkanik Talaud yang cenderung sejajar dengan arah relatif utara-selatan.

Di Kepulauan Talaud batuan vulkanik ini tersingkap bersama-sama melange dan batuan ofiolit (Sukanto & Suwarna, 1986). Studi petrografi batuan ofiolit mengindikasikan bahwa batuan ini sudah mengalami efek metamorfosis yang tinggi sebelum mengalami alih tempat karena tektonik. Hasil analisis kimia menerangkan bahwa batuan ini berasal dari *abyssal tholeiites* di daerah pematang tengah samudera (Atmadja & Sukanto, 1979). Namun demikian dari nilai anomali Bouguer sekitar Kep. Talaud-Mayu (100-140 mGal) hasil pengukuran oleh tim gaya berat Pusat Survei Geologi belum mencerminkan nilai suatu batuan pematang tengah samudera basaltik (*mid oceanic ridge*). Nilai anomali ini kemungkinan adalah cerminan batuan-batuan sedimen Tersier (vulkanik, sedimen laut, batugamping dan *melange*) yang terangkat bersama-sama fragmen batuan ofiolit (*ofiolit root*) dan membentuk gugusan kepulauan setelah terbentuk *mid oceanic ridge*. Hal ini menyebabkan batuan ofiolit mengalami fragmentasi dan sebagian mengalami proses pemalihan menjadi material-material batuan *melange* selanjutnya mengalami *tectonic emplacement*, sehingga mempunyai rapat massa rendah yang terinterpretasikan pada nilai anomali Bouguer. Hingga saat ini pergerakan Lempeng Pasifik ke arah barat diperkirakan mencapai kecepatan 8 hingga 12 cm/th (Gambar 1). Karena membentur Kraton Asia yang stabil sesar-sesar mendatar yang berarah barat-timur kemudian terpecah menjadi dua arah yaitu ke arah barat daya dan ke arah barat laut. Sesar yang ke arah barat laut terlihat pada peta gaya berat Bouguer di mana sesar tersebut se arah dengan deretan gugusan gunung api aktif di daerah utara Sulawesi. Dengan demikian ada kaitannya antara sesar mendatar ini dengan keaktifan gunung berapi di kawasan ini, karena gempa di zona sesar aktif memicu naiknya magma ke permukaan akibat terbentuk celah-celah di sekitar zona sesar. Demikian pula di kawasan Halmahera dan sekitarnya, busur vulkaniknya hampir sejajar dengan zona sesar naik yang terlihat dari analisis gaya berat



Gambar 7. Model litosfera bawah permukaan daerah Laut Maluku dan sekitarnya berdasarkan data seismik (Simanjuntak and Barber, 1996, Gambar a) data kegempaan (McCaffrey & Silver, 1980, Gambar b.) dan berdasarkan analisa gaya berat (Gambar c.)



yaitu relatif utara selatan. Aktivitas gunung api di sekitar Halmahera diperkirakan berhubungan dengan sesar naik tersebut karena pergerakan pada zona sesar juga akan memicu naiknya magma ke permukaan melalui zona lemah yang ditimbulkan oleh aktivitas sesar. Gunung-gunung api yang terletak pada satu zona sesar akan cenderung giat pada saat yang hampir bersamaan jika terjadi gempa seperti yang terjadi baru-baru ini, di mana G. Gamalama, G. Ibu dan G. Dukono meningkat aktivitasnya pada waktu hampir bersamaan. Secara geologis terdapatnya sesar naik ini memang terlihat di mana batuan ofiolit yang terletak di belakang busur vulkanik (di Halmahera tenggara) naik ke permukaan dan tersingkap. Keberadaan batuan ofiolit seperti ini tidak terlihat di utara Sulawesi, karena di kawasan Sulawesi Utara struktur geologi yang mengontrol adalah sesar mendatar (Gambar 3).

Dobel subduksi di sekitar Laut Maluku yang selama ini ditafsirkan oleh beberapa ahli (McCaffrey & Silver, 1980, Simanjuntak and Barber, 1996) ternyata tidak terlihat dari model gaya berat, yang terlihat hanya subduksi di bawah Kepulauan Halmahera. Hal ini bisa jadi karena subduksi yang ada di bawah lengan utara Sulawesi mungkin terletak jauh di sebelah barat daerah pemodelan yaitu di bawah Laut Sulawesi sehingga tidak terlihat, atau memang tidak terdapat subduksi pada segmen ini. Jika diperhatikan secara seksama kurva anomali gaya berat di bagian barat area pemodelan tidak mencerminkan adanya subduksi (Gambar 6 dan 7c). Dengan demikian vulkanisme pada jalur Sulawesi Utara kemungkinan muncul karena adanya sesar regional yang berarah tenggara-barat laut yang berbelok menjadi utara-selatan (Gambar 3). Hal ini berbeda dengan vulkanisme di Kepulauan Maluku yang memang terbentuk oleh subduksi dan sesar-sesar naik.

#### Acuan

- Apandi, T dan Sudana, D., 1980. *Peta geologi lembar Ternate, Maluku Utara*. skala 1 : 250.000, PPPG, Bandung.
- Bowin, C.O., Warsi, C. and Milligan, J., 1981. *Free Air Anomali Atlas of the world*. Government Printing Office, Washington DC, USA.
- Cady, J.W., 1980. Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygonal prism. *Geophysics*, 45 (10), pp 1507-1512.

#### Kesimpulan

1. Berdasarkan analisis data gaya berat dan kegempaan, daerah penelitian dialasi oleh batuan kerak Samudera.
2. Nilai anomali di sekitar P. Talaud-Mayu belum mencerminkan nilai anomali batuan *Mid Oceanic Ridge* masih mencerminkan nilai anomali batuan sedimen. Kurva anomali di bagian timur mencerminkan adanya subduksi sedangkan di bagian barat hanya mencerminkan adanya slab yang relatif datar.
3. Deretan gunung api di Sulawesi Utara berkaitan dengan jalur sesar mendatar, sedangkan deretan gunung api di sebelah barat Halmahera berkaitan dengan subduksi dan sesar-sesar naik.
4. Gempa di daerah zona sesar dapat memicu meningkatnya kegiatan vulkanisme pada jalur gunung api tersebut.

#### Saran

1. Perlu dilakukan studi statistik kejadian-kejadian gempa dan kegiatan erupsi gunung berapi di kawasan ini dan selanjutnya diambil kesimpulan berdasarkan data-data tersebut mengenai seberapa dekat hubungan antara kegempaan dan vulkanisme.
2. Perlu diwaspadai bahwa jika terjadi gempa tektonik yang bersumber pada jalur sesar-sesar besar biasanya tidak lama lagi akan diikuti erupsi gunung berapi pada jalur sesar walaupun waktunya belum bisa diprediksi.

#### Ucapan terima kasih

*Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Kepala Pusat Survei Geologi, Pimpinan Proyek, Drs. Indra Budiman, MSc. (alm) dan para editor yang telah membantu dalam penulisan hingga penerbitan tulisan ini.*

- Cardwell, R.K. and Isacks, B.L., 1979. Geometry of the subducted lithosphere beneath the Banda Sea in Eastern Indonesia from seismicity and fault plane solutions. *Journal of Geophysical Research*, 83, B6, 2825-2838.
- , Isacks, B.L. and Karig, D.E., 1980. The spatial distribution of earthquakes, focal mechanism solutions and subducted lithosphere in the Philippine and northeastern Indonesia. In Hayes (eds.). The tectonic and geologic evolution of South-East Asian seas and islands, *American Geophysical Union, Monograph 23*.
- Dasuki, R., 1992. Kegiatan Gunungapi Karangetang (Api Siau), Sulawesi Utara. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, No 11, vol II, .PPPG, Bandung. hal 12-16.
- Effendi, A.C. dan Bawono, S.S., 1997. *Peta geologi lembar Manado, Sulawesi*. skala 1 : 250.000, PPPG, Bandung.
- Fauzi, R.M., Puspito, N.T., Ibrahim, G. dan Gunawan, M.T., 1999. Deformasi lapisan kerak dan slab di Laut Banda berdasarkan seismisitas. *Prosiding Himpunan Ahli Geofisika Indonesia, PIT XXIV*, Surabaya Oktober 1999, hal. 68-72.
- Hamilton, W., 1979. Tectonic of Indonesia Region, *Geol. Sur.Prof. Papers US, Govt. Print. Off. Washington DC*.
- Katili, J.A., 1978. Past and present geotectonic position of Sulawesi, Indonesia. *Tectonophysics*, v.45, pp. 289-322.
- McCaffrey, R. and Silver, E.A., 1980. Crustal structure of the Molucca Sea collision zone, Indonesia, In Hayes (eds.). The tectonic and geologic evolution of South-East Asian seas and islands, *American Geophysical Union, Monograph 23*, 161-177.
- , Sutardjo, R., Susanto, R., Buyung, N., Sukarman, B., Husni, M., Suciono, Satuju, D. and Sukanto, R., 1983. Micro-earthquake Surveys of the Molucca Sea and Sulawesi, Indonesia. *Bulletin of the GRDC*, no. 7, March 1983, pp. 13-23.
- Nasution, J. dan Hayat, D.Z., 2007. *Peta Anomali Bouguer Lembar Ternate, Maluku*. skala 1 : 250.000, Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Sardjono, 1999. Gravity field and structure of the Crust of the Banggai Islands Region, Eastern Indonesia implications for tectonics and hydrocarbon prospects. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral*, v.IX, hal. 16-29.
- Simanjuntak, T.O., 1993. Neogene Plate Convergence in Eastern Sulawesi. *Jurnal Geologi dan Sumberdaya Mineral, no. 25 v. VIII* DGSDM, Bandung.
- , and Barber, A.J., 1996, Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belt of Indonesia, In : Hall, R. & Blundell, D.J. (eds). Tectonic evolutions of South East Asia, *Geological Society Special Publ.* 106, 185-201.
- Silver, E.A., 1979. The tectonics of the Eastern Indonesian Region : A Highlight. *the GRDC Bull.*, n. 2, Dec., 1979, pp. 1-5.
- Sobari, I, Simamora, W.H. dan Sardjono, 1992. *Peta Anomali Bouguer Lembar Manado, Sulawesi Utara*. skala 1 : 250.000, PPPG, Bandung.
- dan Siagian, H.P., 2006. *Peta Anomali Bouguer Lembar Talaud dan Mayu, Sulawesi*. skala 1 : 250.000, Pusat Survei Geologi, Bandung.
- , Nasution, J., Siagian, H.P., Budiman, I., Hayat, D.Z., Simamora, W.H., Widijono, B.S., Rahardjo, D.N. dan Taufan, Y.A., 2009. *Peta Cekungan Sedimen Indonesia berdasarkan anomali gaya berat*. Badan Geologi, Departemen ESDM RI.
- Sudradjat, A., 1989. Forecasting and mitigation of geologic hazard in Indonesia, Geologi Kuarter kaitannya dengan bencana alam. *Publikasi Khusus* no. 8, PPPG, Bandung.

- Sukamto, R., 1989. Tectonic significance of melange on the Talaud Islands, northeastern Indonesia. *Proceedings 16<sup>th</sup> Regional Cong. On Geol. Min. and Hydrocarb. Res. of Southeast Asia*, Jakarta, Indonesia, 24 pages.
- , & Suwarna, N., 1986. *Peta geologi lembar Talaud, Sulawesi*. skala 1 : 250.000, PPPG, Bandung.
- , Apandi, Supriatna, S. And Yasin, A., 1981. The geology and tectonic of Halmahera Island and surrounding areas, In : *The Geology and Tectonics of eastern Indonesia*, A.J. Barber & S. Wiriyosujono (eds.), GRDC Spec. Publ., no. 2, pp 259-372.
- Supriatna, S., 1980. *Peta geologi lembar Morotai, Maluku Utara*. skala 1 : 250.000, PPPG, Bandung.
- Suria Atmadja, R. and Sukamto, R., 1979. Ophiolite rocks association on Talaud Islands, East Indonesia. *Bulletin of the GRDC*, no. 1, March 1979, pp. 17-35.
- Susilo, A dan Nainggolan, D.A., 2007. *Peta Anomali Bouguer Lembar Morotai, Maluku*. skala 1 : 250.000, Pusat Survei Geologi, Bandung.
- Watt, A.B., Bodine, J.H. and Bowin, C.O., 1978. *A Geophysical atlas of the east and southeast Asian Seas- Free Air Gravity Field*. The geological Society of America Inc., 3300 Penrose Place Brothers, Colorado.

JSDG