

## POLA STRUKTUR DAN GEODINAMIKA CEKUNGAN BULA, BERDASARKAN ANOMALI GAYA BERAT

B. Setyanta dan I. Setiadi

Pusat Survei Geologi,  
Jl. Diponegoro No.57, Bandung 40122

### Sari

Gaya berat adalah salah satu metode geofisika yang dapat digunakan untuk mengetahui kondisi bawah permukaan dengan mengetahui parameter fisis rapat massa (densitas) batuan. Peta anomali gaya berat Seram yang direduksi berdasarkan rapat massa 2.67 gr/cc memperlihatkan Cekungan Bula yang berbentuk lembah anomali negatif yang bernilai -50 mgal hingga 0 mgal. Analisis data gaya berat dilakukan dengan memisahkan anomali regional dan residual dengan menggunakan cara *moving average* dan turunan tegak kedua (*second vertical derivative*). Pemodelan bawah permukaan dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak (*software*) pemodelan maju (*forward modeling*) gravmag. Hasil analisis gaya berat memperlihatkan dua struktur sesar regional, yaitu sesar mendatar berarah timur laut - barat daya dan sesar anjak barat-timur yang secara tektonis berbeda periodenya. Selain itu, hasil penyaringan dengan *moving average* dan peta turunan tegak kedua memunculkan daerah-daerah *closure* dan struktur-struktur lipatan pada batuan Pratersier yang secara geologis cukup menarik perhatian.

Kata kunci : Gaya berat, *moving average*, turunan tegak kedua, Cekungan Bula

### Abstract

*Gravity is one of the geophysical methods that can be used to estimate subsurface condition based on the density of rocks. Seram bouguer anomaly map reduced by density 2.67 gr/cc indicates negative anomaly pattern in Bula Basin with anomaly range between (-50 mgal – 0 mgal). Gravity data analyses were carried out by separating the residual and regional anomalies using moving average filtering and second vertical derivative. The subsurface modeling was done by using gravmag forward modeling software. The results show two regional faults i.e. the northeast-southwest strike slip fault and the east-west thrust fault. Those faults have different periods. The filtering using moving average and second vertical derivative shows closure areas and fold within Pretertiary rocks that geologically are interesting features.*

*Keywords : Gravity, moving average, second vertical derivative, Bula Basin*

### Pendahuluan

Kenyataan membuktikan bahwa anomali Bouguer di beberapa cekungan di Indonesia sebesar 30 hingga -50 mgal yang direduksi dengan rapat masa rata-rata 2,67 gr/cc seringkali berhubungan dengan endapan minyak dan gas bumi. Sebagai contoh zona Rembang yang melampar dari Blora hingga Madura dan cekungan-cekungan di Jawa Barat bagian utara yang diwakili anomali 30 hingga -50 mgal terbukti telah menghasilkan minyak dan gas bumi (Untung & Sato, 1978). Keadaan yang sama juga terdapat di Cekungan Salawati, di sebelah timur *Ayamuru Paliform*, Papua Barat (Untung, 1987). Cekungan Bula atau Cekungan Seram yang terletak di Pulau Seram bagian timur terdiri atas dua subcekungan, yaitu Subcekungan Wahai dan Subcekungan Bula.

Kedua cekungan tersebut dibatasi oleh Tinggian Hoti.

Pengamatan gaya berat yang dilakukan oleh Pusat Survei Geologi tahun 2005 dengan menerapkan cara sel dan menggunakan helikopter sebagai sarana transportasi menghasilkan peta anomali Bouguer dengan penyebaran titik pengamatan cukup merata. Pemetaan dengan selang titik kurang lebih 7 km tersebut menghasilkan peta anomali Bouguer yang bersifat regional. Peta anomali Bouguer yang menggunakan rapat massa 2,67 gr/cc sebagai dasar perhitungan, menggambarkan dengan jelas pola yang berhubungan dengan batas cekungan dan struktur geologi di daerah tersebut.

Peta hasil *moving average* yang dikontrol dengan peta turunan tegak kedua dibuat untuk mempertajam ciri-ciri yang menunjukkan batas-batas struktur maupun sub-subcekungan yang akan memberikan arahan pada penelitian selanjutnya.

## Metodologi

Sumber data didapat dari pengamatan gaya berat di Pulau Seram bagian timur yang dilakukan dengan metode putaran tertutup (*closed loop*) secara sel. pembacaan awal dan akhir dilakukan di BS Desa Makariki, Kecamatan Amahai, Kabupaten Maluku Tengah. Nilai gaya berat titik ini mengacu pada Titik Pangkal gaya berat regional di Bandara Patimura, Ambon, yang terhubung dengan *International Gravity Standardization Network* (IGSN, 1971, dalam Rais, 1979) dan terikat dalam Jaringan Gaya Berat Nasional (Adkins dr., 1978). Pengamatan gaya berat tersebut telah menghasilkan beberapa lembar peta gaya berat Bouguer skala 1 : 250.000, di antaranya Lembar Masohi (Padmawijaya & Setiadi, 2006) dan Lembar Bula & Watubela (Nainggolan & Hayat, 2006). Data Anomali Bebas Udara (*Free Air*) di laut diperoleh dari Bowin dr. (1981) yang kemudian direduksi menjadi anomali gaya berat Bouguer. Data tersebut kemudian disajikan dalam Peta Anomali Bouguer Pulau Seram dan sekitarnya. Peta Anomali Bouguer tersebut diolah lagi dan menghasilkan peta anomali regional dan peta anomali sisa melalui penyaringan dengan metode *moving average* dan dalam bentuk peta turunan tegak kedua (*Second Vertical Derivative*). Peta hasil perhitungan *moving average* yang mirip dengan peta turunan tegak kedua dianggap peta yang dapat menggambarkan kondisi geologi daerah tersebut. Karena itu, interpretasi geologi yang dihasilkan akan lebih baik jika dibandingkan dengan tidak menggunakan peta turunan tegak kedua sebagai pengontrol.

Berdasarkan peta Anomali Bouguer dan Peta Anomali Sisa dibuat analisis struktur geologi dan model bawah permukaan dengan menggunakan perangkat lunak pemodelan maju (*forward modeling*) yang didukung oleh data geologi dan data seismik hasil penelitian terdahulu. Kemudian dilakukan rekonstruksi tektonis-sedimentasinya dengan memperhatikan konsep-konsep pembentukan cekungan sedimen.

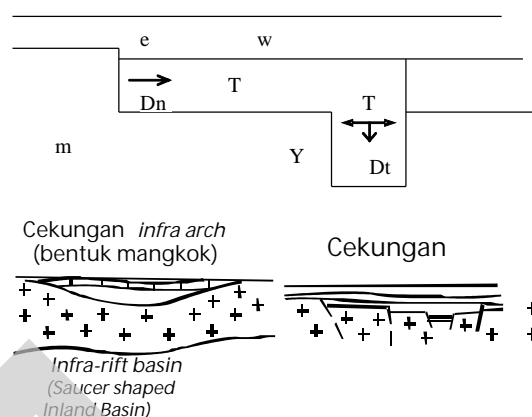
## Dasar Teori

### Pembentukan Cekungan

Pembentukan cekungan sedimentasi secara fisika telah banyak dibahas oleh para ahli, antara lain McKenzie (1972), Beaumont (1978), Allen & Allen (1990) dan lain-lain, sedangkan Dickinson (1971)

telah menyusun model cekungan sedimentasi secara umum berdasarkan posisi tektonisnya. Seely dr. (1974) telah mengemukakan konsep sedimentasi di sekitar zona tunjaman (*trench slope model*).

Pola dan urutan stratigrafi Seram menunjukkan bahwa pembentukan Cekungan Bula berkaitan dengan sistem tumbukan Benua Australia dan Busur Laut Banda (Munasri, dr., 1999). Beaumont (1978) mengandaikan suatu model dengan gaya yang disebabkan oleh desakan suatu lempeng sebesar  $Dn$  dan lempeng yang menunjam sebesar  $Dt$ . Maka berlaku :



Gambar 1. Skema suatu pelepasan energi pada pembentukan palungan (Beaumont, 1978).

$$Dn = eg(m - w)T/2$$

$$Dt = eg(m - w)Y$$

$$e = (m - w)T$$

dimana :  $e$  = ketinggian lempengan dari dasar laut

$g$  = percepatan gaya berat

$m$  = rapat massa mantel

$w$  = rapat massa air laut

= rapat massa lempeng

$T$  = tebal lempengan

$Y$  = tebal lempengan yang turun

Model ini berlaku untuk penunjaman yang disebabkan oleh tumbukan antara dua lempeng. Lempengan dengan rapat massa lebih tinggi akan menunjam di bawah lempengan dengan rapat massa lebih rendah, sehingga terjadi suatu tumpukan campuran batuan berasal dari dua lempeng tersebut yang lazim disebut material akrasi seperti Pulau Seram. Keadaan demikian selalu ditandai dengan anomali gaya berat rendah yang berpola memanjang di sepanjang parit tempat konvergensi (Heiskanen &

Meinesz, 1958). Konvergensi selalu disertai dengan deformasi kerak sehingga di beberapa tempat terjadi peninggian Moho dan retaknya bagian atas kerak, dan terganggunya kesetimbangan isostatik di wilayah itu (Sardjono, 2003). Proses ini menyebabkan terjadinya defisit massa yang segera diimbangi oleh luruhan batuan induk untuk mengisi cekungan tersebut membentuk batuan sediment klastika dan disebut sebagai cekungan sedimentasi. Karena rapat massa relatif lebih kecil dari 2,67 g/cc, maka nilai anomali gaya berat di daerah cekungan menjadi negatif.

Moving Average

Teknik ini pada dasarnya merupakan perata-rataan dari data anomali gaya berat yang ada. Hasil *moving average* merupakan harga anomali regional. Secara matematis dapat dituliskan :

$$Dg_{reg}(i) = \frac{Dg(i-1) + \dots + Dg(i) + \dots + Dg(i+n)}{N}$$

- n = lebar jendela =(N-1)/2
- i = Nomor stasiun
- g = Anomali Bouguer di titik i

Sementara harga anomali residualnya diperoleh dengan mengurangkan nilai anomali total terhadap anomali regionalnya (Griffin, 1949, dalam Telford dr, 1976). Hasilnya kemudian digunakan untuk pembuatan model geologi bawah permukaan, pengaruh lokal (dangkal) dan pengaruh regional (dalam) sudah diketahui berdasarkan lebar *window*.

Turunan Vertikal Orde Dua (*Second Vertical Derivative*)

Ada suatu kenyataan bahwa anomali Bouguer banyak dipengaruhi oleh gradien terjal kerak yang melandasinya. Untuk mengurangnya perlu dibuat peta anomali sisa dan peta derivatif vertikal orde dua (*Second Vertical Derivative*). *Second Vertical Derivative* (SVD) memunculkan efek dangkal pengaruh regionalnya, sehingga proses *filtering* dengan metode ini diharapkan dapat mengetahui gradien terjal anomali bouguer yang merupakan batas dari subcekungan sedimen.

Secara teoritis, metode ini diturunkan dari persamaan Laplace's (Argawal dan Lal, 1971, dalam Telford, 1976), yakni :

$$\nabla^2 Dg = 0$$

$$\nabla^2 Dg = \frac{\partial^2 (Dg)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (Dg)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (Dg)}{\partial z^2}$$

sehingga

$$\frac{\partial^2 (Dg)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (Dg)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (Dg)}{\partial z^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 (Dg)}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 (Dg)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 (Dg)}{\partial y^2}$$

Untuk data penampang , y mempunyai nilai konstan, maka persamaannya adalah:

$$\frac{\partial^2 (Dg)}{\partial z^2} = -\frac{\partial^2 (Dg)}{\partial x^2}$$

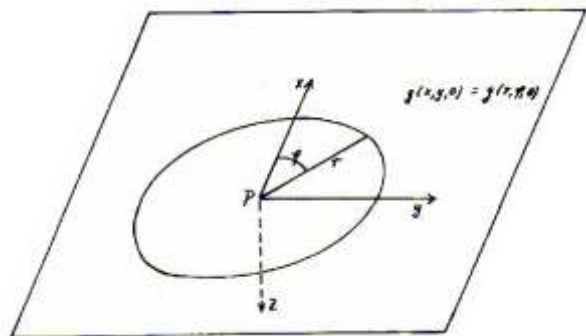
Dari persamaan di atas dapat diketahui bahwa *second vertical derivative* suatu anomali gaya berat permukaan adalah sama dengan negatif turunan orde dua horizontalnya, artinya bahwa anomali *second vertical derivative* dapat diperoleh melalui *derivative* orde dua horizontalnya yang lebih praktis dikerjakan.

Untuk mendapatkan  $\frac{\partial^2 (Dg)}{\partial z^2}$  dapat diperoleh dari metode analitik dengan menggunakan beberapa lingkaran (umumnya tiga lingkaran) yang berbeda jari-jarinya. Setiap lingkaran memberikan koefisien yang berbeda. Teknik ini telah dikembangkan beberapa ahli, diantaranya oleh Elkins(1951, dalam Telford dr, 1976).

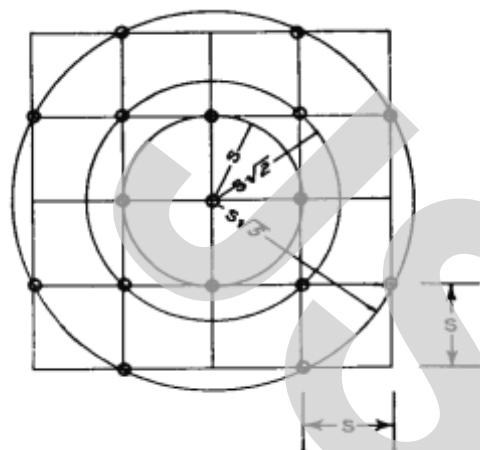
Jika nilai gravity  $g(x,y,0)$  diketahui di setiap tempat dalam bidang horizontal  $Z=0$  (Gambar 3.) dan  $P$  adalah titik pada bidang horizontal dengan  $\bar{r}$  adalah nilai rata-rata dari  $g$  pada lingkaran dengan jari-jari  $r$ , dan  $P$  adalah pusatnya, maka persamaan umumnya adalah :

$$\frac{\partial^2 g(r)}{\partial z^2} = \frac{1}{2p} \int_0^{2p} g(r, f, 0) df$$

Elkins (1951 dalam Telford dr. 1976) menghitung persamaan SVD dengan menggunakan grid persegi seperti pada Gambar 2 yang dibagi menjadi tiga konfigurasi yang sesuai dengan sistem koordinat tiga buah lingkaran, yaitu A, B, dan C. Dari proses perhitungan ini kemudian dihasilkan matriks-matriks sebagai dasar pembuatan peta turunan tegak kedua (SVD).



Gambar 2. Bidang horizontal nilai gaya berat dan notasi koordinatnya.



Gambar 3 : Sistem konfigurasi koordinat yang menggunakan grid untuk menghitung persamaan SVD (Elkins, 1951 dalam Telford dr. 1976).

Berdasarkan peta turunan tegak ini tidak dapat dibuat model bawah permukaan sehingga pemodelannya tetap menggunakan penampang anomali sisa.

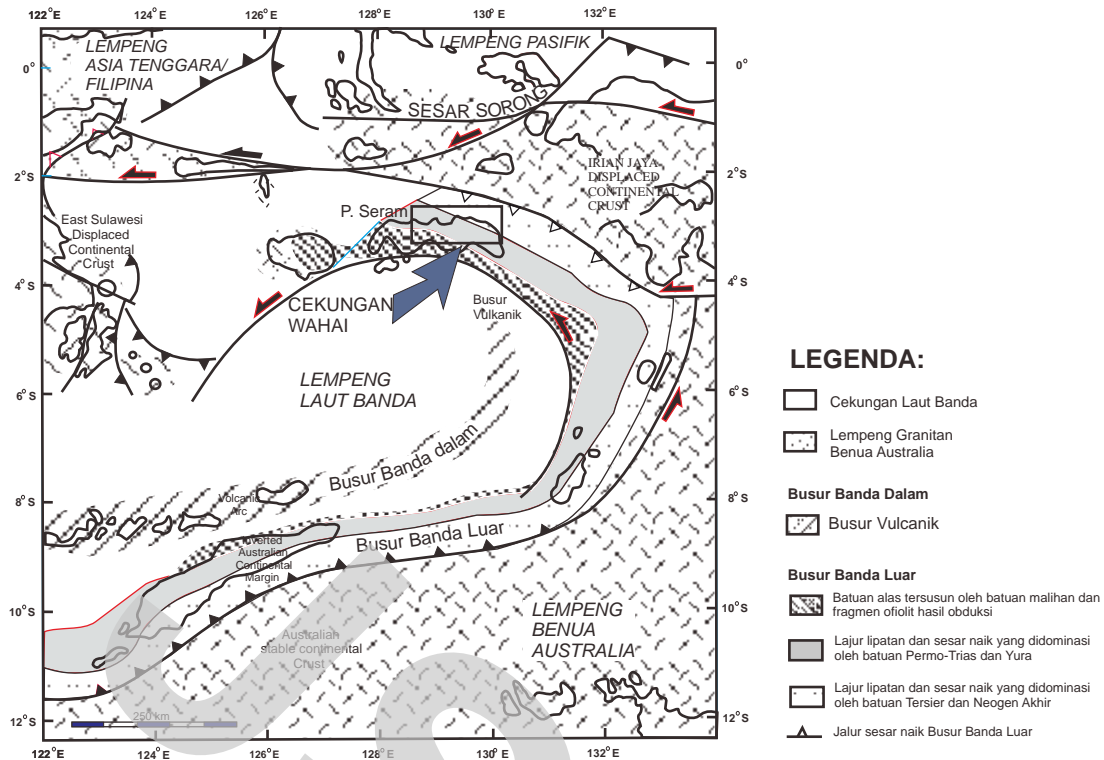
Dalam makalah ini sumber data didapat dari pemetaan gaya berat bersistem cara sel Lembar Masohi dan Lembar Bula dan Watubela oleh Pusat Survei Geologi tahun 2006 dengan jarak titik pengamatan berselang sekitar 7-9 km. Data tersebut digabung dengan anomali gaya berat bebas udara di sekitar Laut Seram, dan kemudian dilakukan pemrosesan yang menghasilkan peta SVD dan peta anomali sisa (Gambar 9 dan 10).

## Geologi Regional

### Kerangka Tektonis Busur Banda

Kawasan Indonesia Timur, termasuk Busur Banda adalah tempat berinteraksinya lempeng-lempeng aktif di dunia, yakni Lempeng Filipina (bagian

Lempeng Asia), Lempeng Laut Banda, Lempeng Australia, dan Lempeng Pasifik (de Smet, 1999, Gambar 4). Rezim tektonis pada interaksi tersebut melahirkan sesar besar yang berasosiasi dengan vulkanisme dan lipatan. Salah satu akibat lainnya dari interaksi beberapa lempeng tersebut adalah terbentuknya rangkaian busur luar, busur dalam (busur vulkanik), dan cekungan-cekungan sedimentasi yang disertai dengan kompleksitas deformasi litologi. Walaupun di tempat-tempat tertentu seperti di Seram subdaksinya hanya melibatkan dua lempeng, namun rezim tektonis yang bekerja berasal dari tiga lempeng yaitu Lempeng Laut Banda, Lempeng Australia, dan Lempeng Pasifik. Audley-Charles dr. (1974), Audley-Charles & Carter (1977); Chamalaun & Grady (1978) berpendapat bahwa jalur penunjaman (zona subdaksi) di Busur Banda berada di sebelah utara Pulau Timor dan di sebelah selatan Pulau Seram menerus hingga palung Weber membentuk setengah lingkaran (busur). Demikian pula hasil rekaman kegempaan dan analisis mekanisme focal gempa (Cardwell and Isacks, 1978), menunjukkan bahwa jalur tunjaman terletak di sebelah utara Pulau Timor dan di selatan Pulau Seram. Sementara Hamilton (1979) mengatakan bahwa jalur penunjaman terletak di sebelah selatan Pulau Timor dan di sebelah utara Pulau Seram. Pulau-pulau tersebut dianggap sebagai *nonvolcanic outer arc* dan pulau-pulau gunung apinya terdapat di sekeliling Laut Banda, seperti Pulau Wetar hingga Pulau Banda. Data gaya berat (Watt & Talwani, 1974, Bowin dr., 1981, Setyanta & Setiadi, 2007) dan data seismik (Kemp & Mogg, 1992, Audley-Charles & Carter, 1977, Bowin, dr., 1981) merefleksikan bahwa Pulau Seram adalah pulau akrasi yang menerus hingga Palung Seram (*Seram Trough*) di daerah *nonvolcanic outer arc* yang dialasi oleh batuan campuran aduk antara material-material kontinen (Seri Australia) dengan material asal kerak samudra. Laut Banda sendiri masih menjadi bahan silang pendapat di antara para ahli, di antaranya Audley-Charles, dr. (1974) yang berpendapat bahwa Laut Banda adalah *Recent oceanic sea floor spreading*, sementara itu Hamilton (1979) menyimpulkan sebagai akibat *open back arch spreading*.



Gambar 4. Lokasi daerah penelitian dan *trend* geologi regional Busur Banda (de Smet, 1999)

**Stratigrafi**

Data stratigrafi telah merekam bahwa sekurang-kurangnya terjadi dua kali kompresi tektonis dan dua kali *continental break up* yang berkaitan dengan pembentukan Pulau Seram (Kemp & Mogg , 1992, Setyawan dr., 2000). Kejadian tersebut berkaitan dengan pembentukan sedimen yang diakibatkan oleh *thermal subsidence* bagi pengendapan Seri Australia (*proto-Seram*) yang tersingkap sebagai batuan *allochthon* dan sebagai batuan sumber yang lebih muda (Kemp & Mogg , 1992. Audley-Charles dr., 1974, (Gambar 5 & 6). Suksesi sedimentasi tersebut kemudian secara tidak selaras diakhiri dengan pengendapan Seri Seram yang berumur lebih muda (batuan sedimen *autochthon* di Cekungan Bula, seperti Kelompok Wahai dan Kelompok Bula). Urut-urutan stratigrafi menurut Kemp & Mogg (1992) secara garis besarnya dapat dijelaskan sebagai berikut :

Pertama adalah Seri Australia yang merupakan *source rock* dari Seri Seram yang terdiri atas kelompok batuan malihan Formasi Kanikeh (Trias), Formasi Saman-saman (Trias-Yura), Karbonat Manusela (Yura) dan Kelompok Nief (Kapur-Miosen Akhir). Kedua adalah Seri Seram yang diawali

dengan terobosan batuan vulkanik (Ambon Volcanic) dan disusul dengan pengendapan Formasi Wahai (Pleistosen Awal) dan Formasi Fufa (Pleistosen Akhir).

**Anomali Gaya Berat Bouguer Pulau Seram Bagian Timur dan Interpretasi Geologinya**

*Anomali gaya berat Bouguer*

Penjelasan secara kualitatif mengenai medan gaya berat yang ditampilkan pada Peta Anomali Bouguer Pulau Seram bagian timur (Gambar 7) meliputi hal-hal pokok sebagai berikut :

Di bagian barat kelompok anomali ini agak melebar karena di bagian tersebut kelompok batuan malihan Seri Australia makin meluas sampai mendekati bagian utara Pulau Seram. Di bagian selatan, yaitu mulai dari zona laut dangkal pantai selatan hingga ke bagian agak ke tengah Laut Banda, terdapat kelompok isogal anomali Bouguer yang mempunyai nilai cukup tinggi, yaitu sekitar 80 mgal hingga sekitar 250 mgal. Hal ini diduga berhubungan dengan kerak Laut Banda yang mengalasi daerah ini, bahkan di beberapa tempat tersingkap sebagai batuan ofiolit. Pada bagian ini ada gangguan pola

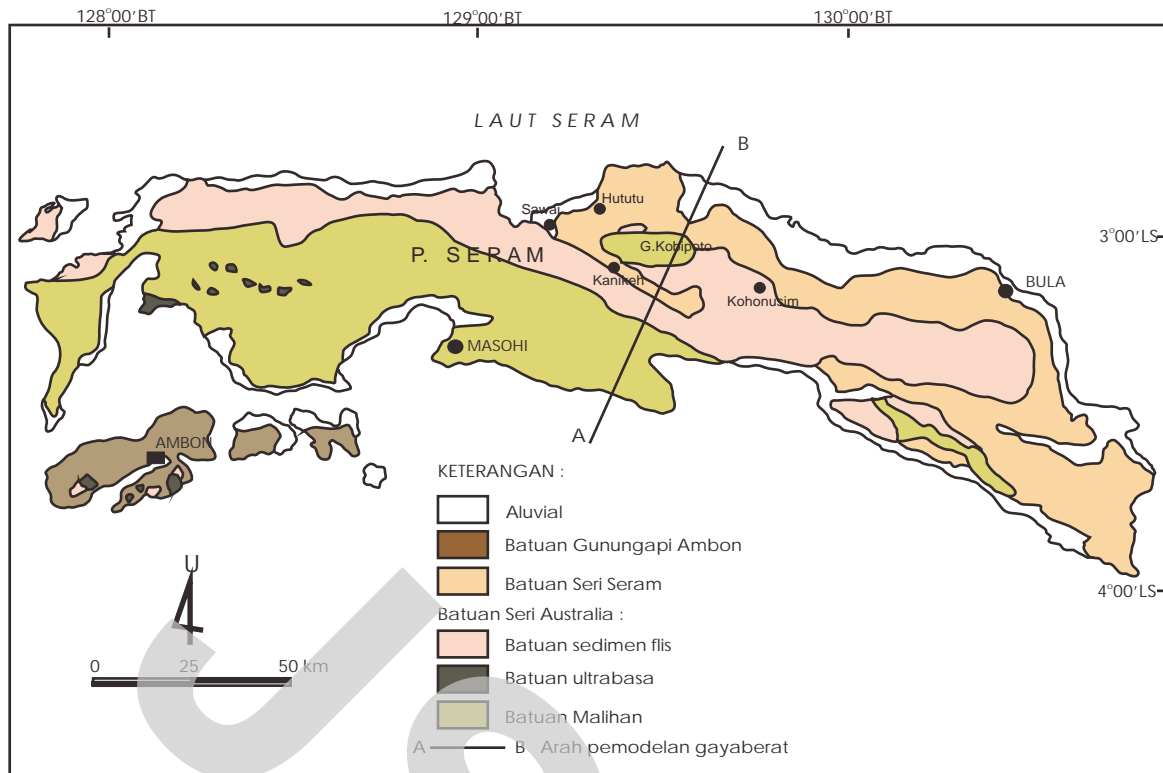
anomali di beberapa tempat yang menyebabkan terbentuknya bulatan-bulatan anomali yang tidak teratur. Hal ini ditafsirkan sebagai akibat terobosan batuan vulkanik Tersier bagian dari vulkanik Tersier Ambon. Di bagian utaranya, yaitu di sepanjang pantai selatan P. Seram, anomali berpola lajur memanjang arah barat-timur dengan landaian sedang hingga cukup terjal dan mempunyai nilai sekitar 0 mgal hingga 80 mgal. Terdapatnya landaian yang terjal di bagian pantai selatan penyelidikan ini ditafsirkan sebagai refleksi dari kelompok batuan malihan Pratersier yang diakhiri oleh batugamping berumur Trias Akhir dari Seri Australia yang tersingkap di bagian selatan Pulau Seram, seperti yang telah dikemukakan oleh Audley-Charles dr. (1979), Kemp & Mogg (1992) dan Tjokrosapoetro dr. (1993). Di bagian tengah pulau hingga menjorok ke arah Laut Seram membujur kelompok anomali dengan arah yang sama, yaitu barat-timur, tetapi gradiennya lebih landai daripada kelompok yang pertama dan kelompok kedua. Pada bagian ini anomali negatif berkisar antara -50 hingga 0 mgal yang membentuk konsentrasi rendahan anomali atau depresi anomali berbentuk elips. Kelompok anomali ini diperkirakan berhubungan dengan keberadaan batuan sedimen di dalam cekungan Tersier Seram Utara yang terdiri atas Formasi Wahai, Formasi Fufa dan batuan sedimen Kuartar (Audley-Charles dr., 1979 dan Tjokrosapoetro dr., 1993). Yang menarik adalah di bagian ini masih dapat dijumpai singkapan-singkapan batuan berumur Pratersier seperti batuan malihan di daerah Gunung Kobipoto, walaupun pada peta anomali Bouguer tidak terlihat. Keadaan ini akan menimbulkan penafsiran yang agak berbeda dengan hasil interpretasi geologi para ahli terdahulu. Jika dilihat secara keseluruhan pada peta ini (Gambar 10), terdapat sebuah blok lembah anomali berbentuk elips dengan arah sumbu relatif barat-timur. Bagian timurnya agak membelok ke selatan yang dibatasi oleh kontur anomali sebesar 0 mgal, yang terlihat sebagai konfigurasi lateral suatu cekungan. Lembah anomali ini ditafsirkan sebagai bentuk dari Cekungan Seram yang sedang dibahas. Berdasarkan kisaran nilai anomali gaya berat Bouguer, batuan dasar daerah ini diduga ada dua macam, yaitu di bagian selatan yang bernilai sekitar 40 mgal hingga 180 mgal. Batuan dialasi oleh kerak basalan Laut Banda, dan di bagian utara yang bernilai sekitar 40 mgal hingga -40 mgal batuannya termasuk Cekungan Seram dialasi oleh kerak granitan Benua Australia.

Umur	Litologi	Formasi	Link.Sed.	Tektonika	
Holosen					SERI SERAM
Pleistosen		Formasi Fufa	Neritik	Cekungan fore land	
	Akhir				
Awal		F. Wahai	Batial	Periode uplift dan gravity sliding	
Pliosen		Vulkanik Ambon	Tektonit		
Miosen		Lapisan Atas Niel	Reefs	Onst o uplift	SERI AUSTRALIA
Oligosen			Batial sampai laut dangkai		
Eosen				Uplift	
Pliosen		Lapisan bawah Niel	Reefs		
KAPUR			Batial sampai linkungan karbonat	Sekuen pasif ( Marginal sag)	
	Akhir				
KAPUR				Continental breakup/ seafloor spreading	
	Awal				
TRIAS	Atas	Serpit Kola	Serpit neritik	Nira-cratonic rifting & Marine influx	
	Tengah	Fm. Manusela	Oolitik		
	Bawah	Saman-saman	Laut dalam Marit & Basilitik		
PERM	Atas	Formasi Kanikeh	Turbidit	Incipient rifting	
	Bawah	Kompleks Tehoru/ kobipolo	Unit Basement Malihan		

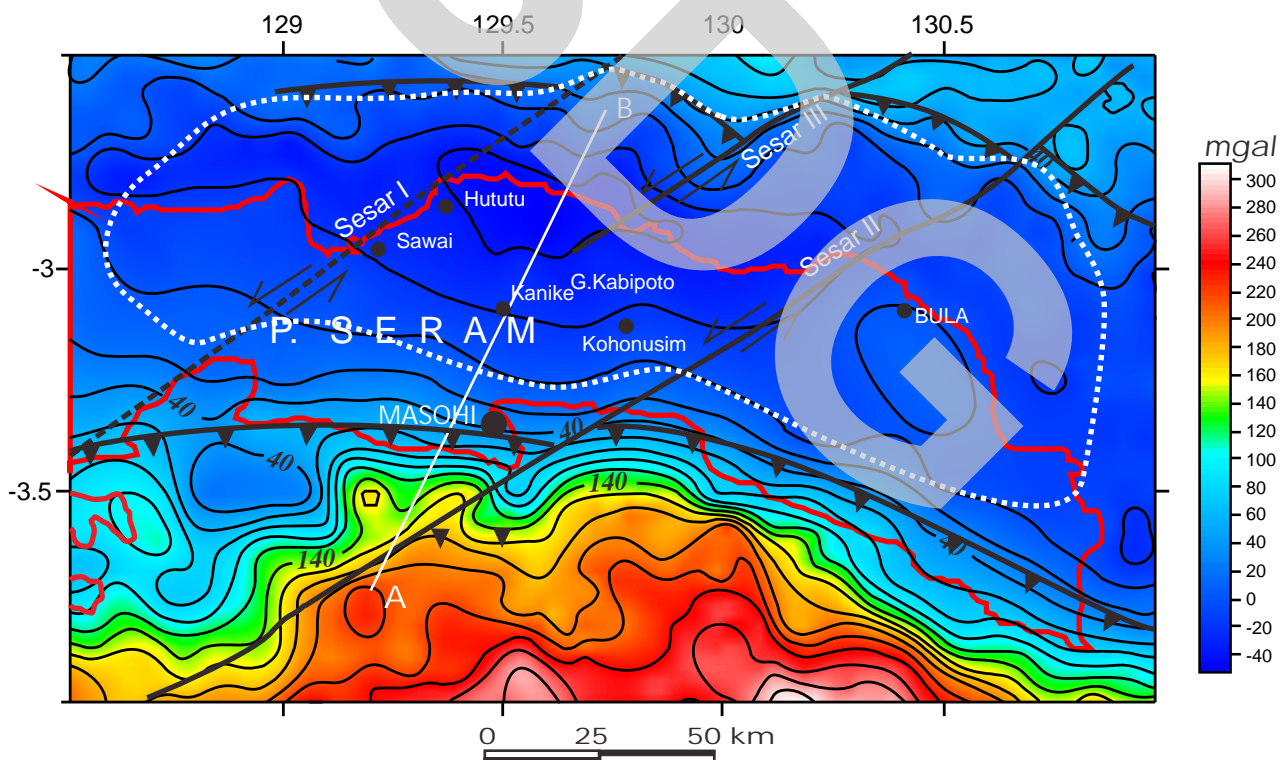
Gambar 5. Intisar kolom stratigrafi dan sejarah tektonik Pulau Seram (disederhanakan dari Kemp & Mogg, 1992).

### Anomali Sisa

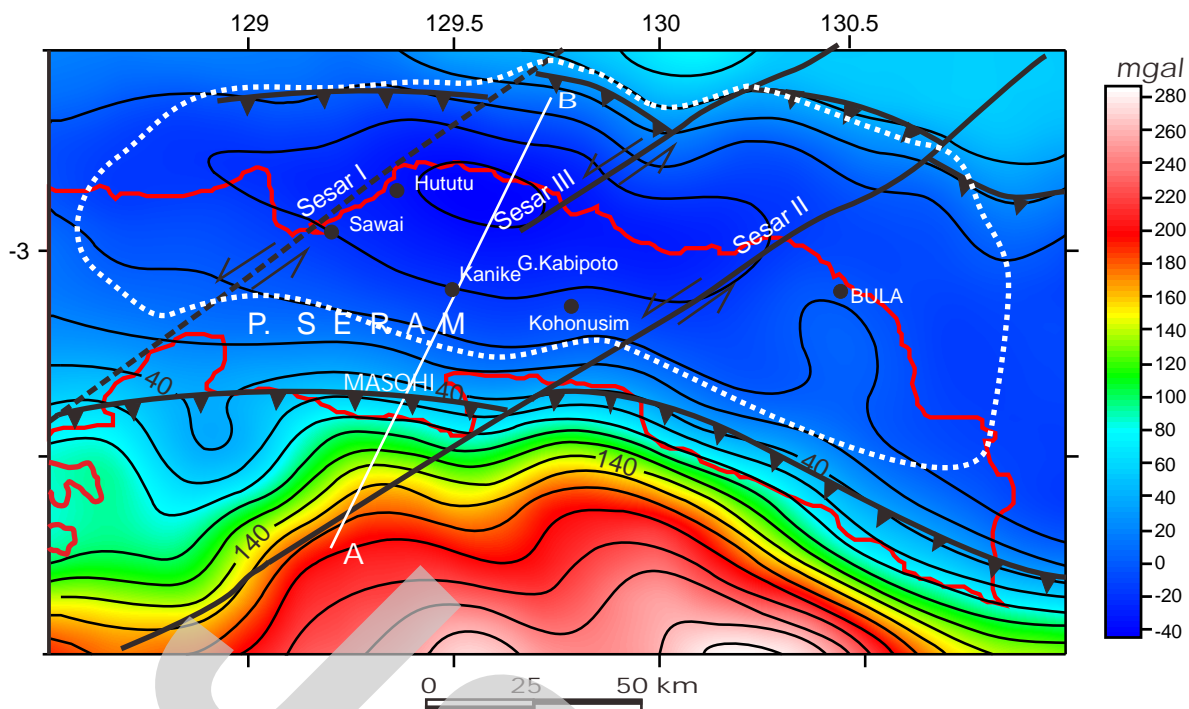
Peta anomali sisa yang dipakai adalah hasil *moving average* pada jendela 9 (Gambar 10). Peta anomali sisa ini mirip dengan peta turunan tegak ke dua (peta SVD pada Gambar 9). Maksud pembuatan peta ini ialah untuk mengetahui gangguan-gangguan setempat, dalam hal ini batuan-batuan yang mempunyai rapat massa tinggi terhadap sekelilingnya menimbulkan anomali-anomali positif, sedangkan batuan dengan rapat massa rendah menimbulkan anomali negatif. Kelompok anomali positif di bagian selatan berbentuk bulatan-bulatan tidak teratur yang bernilai berkisar 0-18 mgal adalah cerminan dari batuan ultrabasa yang tersingkap di sepanjang garis kelurusan sesar naik. Sementara di



Gambar 6. Penyebaran litologi Pulau Seram (disederhanakan dari Kemp & Mogg, 1992, Audley-Charles, drr., 1974).



Gambar 7 : Peta anomali Bouguer dan struktur geologi regional Pulau Seram bagian timur dan sekitarnya (interval kontur 20 mgal, AB arah pemodelan gaya berat, garis putus-putus adalah batas cekungan berdasarkan peta anomali Bouguer). Sumber : Anomali *Free Air* di laut Bowin, drr. (1981), Anomali Bouguer di darat Padmawijaya & Setiadi, (2006) dan Nainggolan & Hayat (2006).



Gambar 8. Peta anomali regional hasil *moving average* pada jendela 9 dan struktur regional P. Seram. Garis putus-putus adalah batas cekungan berdasarkan peta anomali Bouguer.

daratan Pulau Seram, perbedaan nilai anomali tidak terlalu tinggi. Hal ini karena kontras rapat massa batuan tidak terlalu signifikan, namun demikian masih dapat dilihat *closure* tinggian-tinggian anomali yang disebabkan oleh batuan-batuan Pratersier, seperti di Gunung Kabipoto dan di pantai selatan-timur Pulau Seram. Selain itu, berdasarkan peta anomali sisa juga dapat ditarik kelurusan-kelurusan struktur geologinya seperti pada elipsoid anomali positif dengan panjang gelombang sedang, yang arah sumbuanya dapat ditafsirkan sebagai arah sumbu lipatan, yaitu arah tenggara-barat laut.

#### Model Bawah Permukaan Gaya berat

Pemodelan bawah permukaan sederhana yang memperlihatkan konfigurasi batuan dasar dan batuan sedimen di dalam cekungan diproses dengan perangkat lunak khusus dan dikembangkan di Pusat Survei Geologi. Rapat massa batuan yang diperlukan untuk pemodelan diacu dari Telford dr. (1976). Pada Gambar 11 konfigurasi model bawah permukaan gaya berat Bouguer arah selatan-utara (penampang AB) memperlihatkan bahwa batuan Pratersier (2,3 gr/cc dan 2,35 gr/cc) dan batuan Tersier (2,00 gr/cc) berada di bagian tengah hingga utara, dan dialasi oleh kerak granitan benua mikro Australia (2,67 gr/cc), sedangkan di bagian selatan batuan campur-

aduk antara kerak basal dan kerak granit (2,80 gr/cc) tersingkap ke permukaan oleh suatu sistem sesar naik, dan diikuti naiknya kerak basaltan (2,90 gr/cc) akibat gaya kompresi yang berlangsung terus. Dalam penentuan rapat massa batuan, terdapat perbedaan atau kontras sekitar -0.34 gr/cc antara rapat massa batuan sedimen pengisi Cekungan Bula dan rapat massa batuan yang mengalasi, yaitu batuan kerak granitan Benua Australia (2,67 gr/cc) yang dalam perhitungan menghasilkan kedalaman cekungan sekitar 5500 m (Gambar 11).

Pada model gaya berat sisa, dengan rapat massa rata-rata latar (*background density*) sebesar 2,67 gr/cc, yaitu berdasarkan rapat massa kerak granitik yang mengalasi daerah pemodelan dapat dibuat poligon-poligon yang memperlihatkan pemisahan antara batuan sediment Pratersier (2,40 gr/cc), batuan Tersier, dan batuan Kuarter (2,0 gr/cc, Gambar 12). Batuan Pratersier yang terlihat pada pemodelan kemungkinan adalah sekis dan batu sabak dari Kompleks Tehoru dan Kompleks Saku, sedangkan batuan Tersiernya adalah batuan sedimen *flysh* Formasi Kanikeh (Tjokrosapoetro dr., 1993). Di bagian selatan profil pemodelan terlihat sesar-sesar anjak pada batuan berapat massa tinggi (sekitar 2,90 gr/cc) yang diperkirakan merupakan



batuan ofiolit yang telah mengalami obduksi (Setyanta & Setiadi, 2007). Sementara di bagian tengah dan utara terdapat lengkung-lengkung anomali positif yang diperkirakan refleksi tersingkapnya batuan sedimen Pratersier di sekitar Gunung Kabipoto akibat sesar naik. Di bagian utara penampang anomali terbentuk lengkung-lengkung anomali negatif yang merupakan cerminan dari batuan Prakuarter (2,45 gr/cc) yang melengkung ke bawah. Kemudian di lintasan paling utara, terbentuk lagi lengkung anomali positif yang diikuti penurunan secara tajam pada ujung kurva. Konfigurasi lengkung anomali positif merupakan refleksi lapisan sedimen Pratersier yang membentuk antiklin. Pada penampang, lapisan ini tertutup oleh batuan Tersier dan Kuarter, kemudian penurunan secara tajam di akhir kurva lebih banyak disebabkan oleh pengaruh massa Laut Seram (1,04 gr/cc).

#### Diskusi

##### *Struktur Geologi dan Geodinamika di sekitar Cekungan Bula*

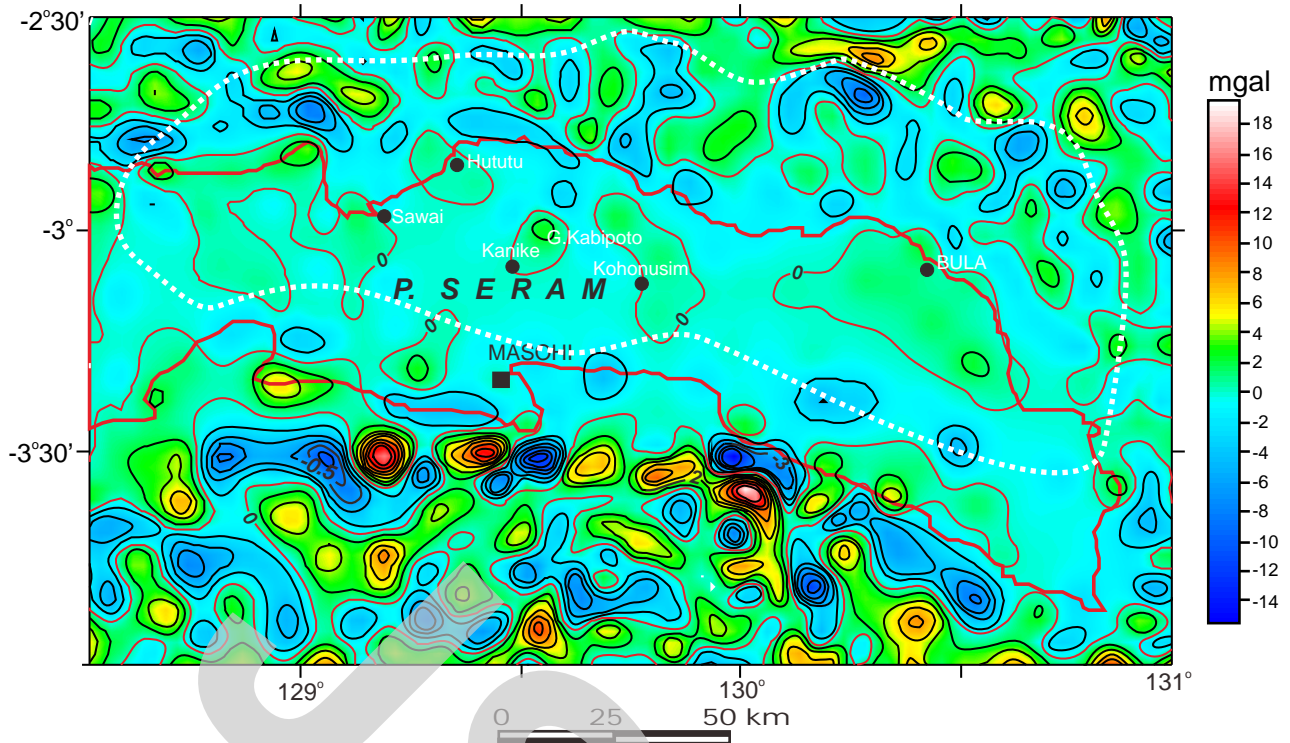
Struktur geologi, khususnya di sekitar Cekungan Bula, Maluku dan di sekitar Busur Bandam, pada umumnya telah banyak dikaji oleh para peneliti terdahulu, di antaranya adalah Zilman and Paten (1975), Charlton and Hall (1994), AudleyCharles dr. (1974), Hamilton, (1979), Harris (2003), Tjokrosoetro dr. (1993) dan Kemp & Mogg (1992).

Berdasarkan data geologi, gaya utama pembentuk struktur di sekitar kawasan ini berasal dari arah timur laut dan dari selatan ke utara yang aktif sejak awal Mesozoikum (Visher & Hermes, 1962, Letouzey dr., 1983). Menurut Atmawinata dan Ratman (1982) dua gaya berasal dari Lempeng Samudra Pasifik (timur laut), dan Lempeng Laut Banda (selatan). Kedua gaya tersebut secara bersama-sama mendorong kerak benua mikro Seram yang sudah mulai bergerak ke barat disertai dengan pembentukan sesar-sesar naik di bagian selatan Seram yang menyebabkan batuan-batuan ultramafik dan banchuh (*ultramafic and collision complex mélange*) tersingkap. Batuan-batuan kerak ini (proto Seram) merupakan batuan sumber seri Seram berikutnya (AudleyCharles dr., 1974 dan Kemp & Mogg, 1992). Kemudian pada awal Miosen, interaksi gaya-gaya utama di daerah ini

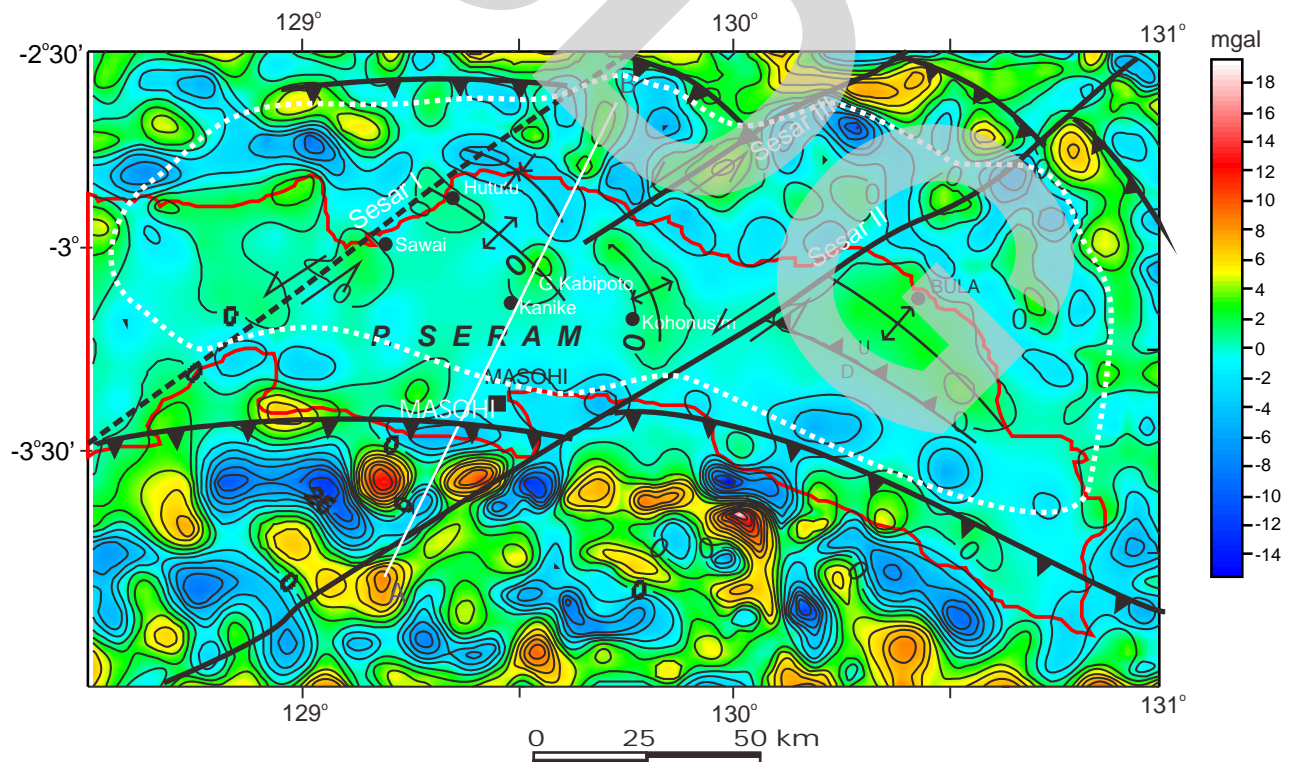
membentuk kompleks sesar mendatar mengiri yang lazim dikenal sebagai Lajur Sesar Sorong. (LSS). Namun demikian pada mulanya sebelum terbentuk LSS, diperkirakan gaya utama tersebut telah membentuk sesar mendatar dengan arah timur laut – barat daya yaitu Sesar I. Hal ini dapat dilihat dari bentuk Pulau Seram yang kelihatan seolah-olah bagian barat pulau bergeser ke barat daya. Sifat lentur (*ductile*) kerak basalan Laut Banda dan stabilnya kerak granitan menyebabkan terbentuknya obduksi kerak basalan dan kerak batuan campur aduk hasil interaksi batuan granitan dan batuan basal melalui sesar-sesar naik yaitu di bagian selatan P. Seram yang dapat terlihat dari peta anomali regional, anomali Bouguer, maupun peta anomali sisa. Proses ini diikuti oleh penurunan batuan dasar di bagian tengah yang memungkinkan terbentuknya cekungan Seram.

Perkembangan sesar-sesar naik (*backthrusting*) di daerah ini diperkirakan melalui proses dorong-mendorong (*piggyback*) yang konsep hipotesisnya dibuat oleh Seely dr. (1974). Di daerah penelitian, proses ini didisertai dengan pembentukan struktur lipatan dan munculnya kompleks ultramafik dan banchuh (*ultramafic and collision complex mélange*, Gambar 13). Pembentukan sesar naik ini diikuti terbentuknya Sesar II dan Sesar III yang berarah hampir sama, yakni timur laut - barat daya. Pada saat yang kritis ketika daya dorong sudah lemah karena konsentrasi massa batuan di depannya, selanjutnya arah gayanya dibelokkan untuk membentuk LSS yang masih aktif hingga sekarang. Sesar I kemungkinan terbentuk pada jaman Pratersier dan telah tertutup oleh sedimentasi yang lebih muda, sehingga dalam peta anomali Bouguer tidak terlihat. Sementara sesar II dan III kemungkinan berumur lebih muda dan melibatkan batuan-batuan dasar sampai batuan berumur Pliosen, sehingga bisa terlihat dari peta anomali Bouguer, anomali regional, maupun anomali sisa (Gambar 7, 8 dan 10).

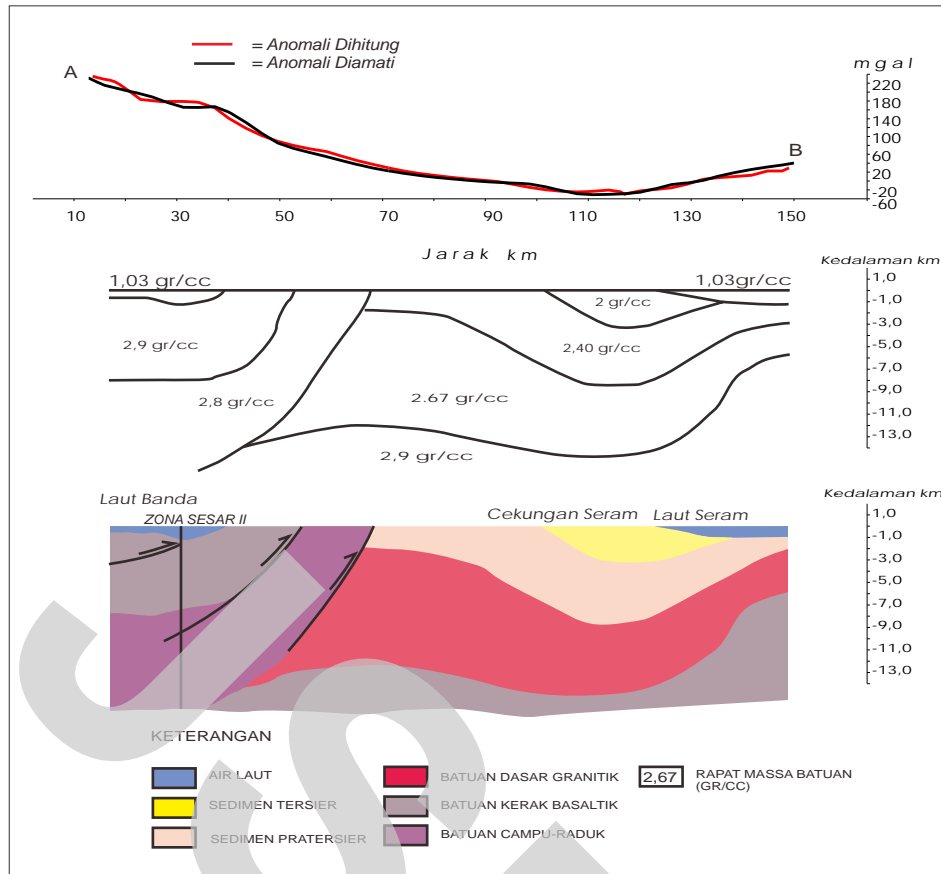
Dari uraian di atas, pembentukan Cekungan Seram berbeda dengan teori pembentukan cekungan yang dikemukakan oleh Beaumont (1978) maupun Sardjono (2003) karena di sini terjadi ketidaklaziman, yaitu penekukan kerak granitik ke bawah kerak samudera sehingga terjadi kerumitan-kerumitan geologi.



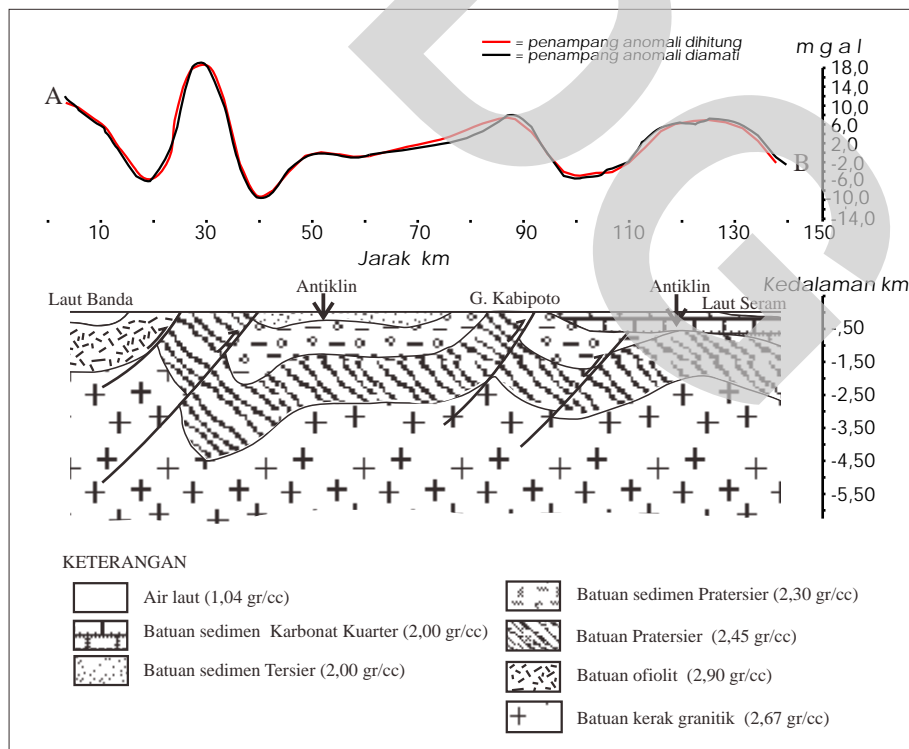
Gambar 9. Peta kontur SVD P. Seram dan sekitarnya (interval 1 mgal, garis putus-putus menunjukkan batas cekungan berdasarkan peta anomali Bouguer).



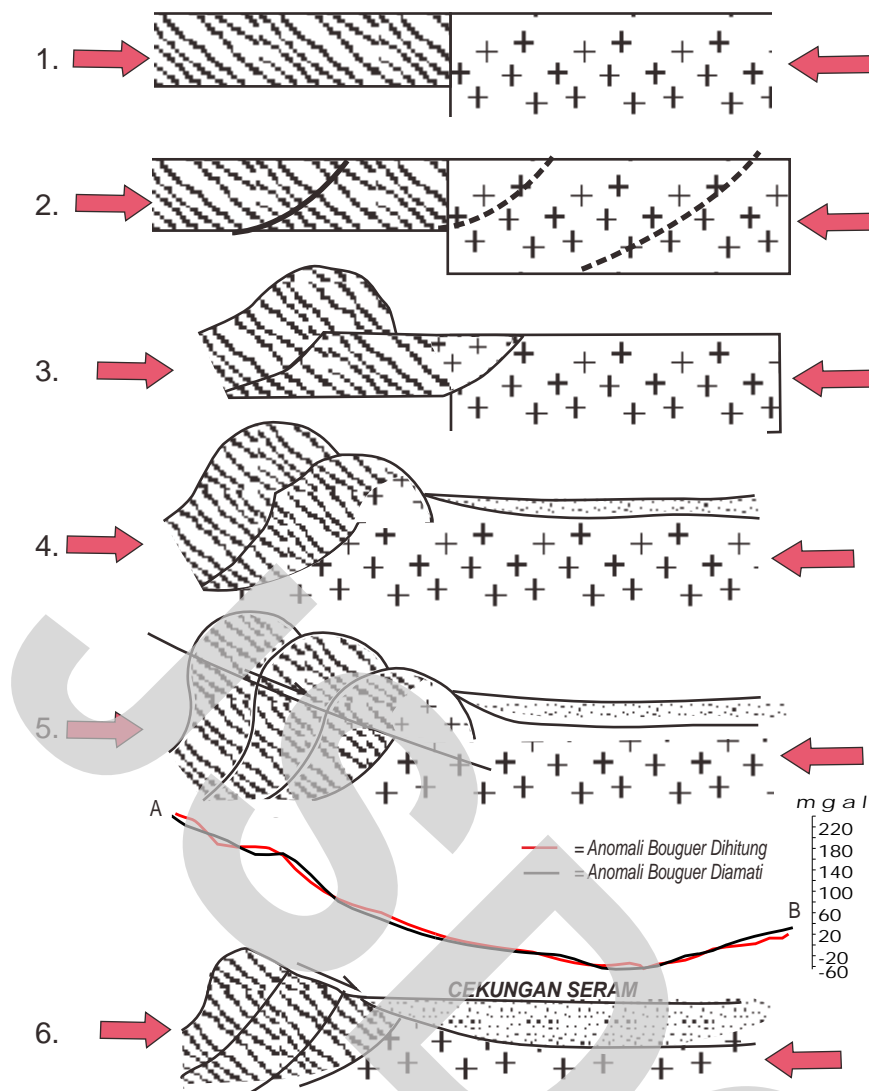
Gambar 10. Peta anomali sisa hasil *moving average* pada jendela 9 (interval 1 mgal) yang hampir sama dengan peta turunan tegak kedua (SVD) dan peta struktur geologi P. Seram. Garis AB arah pemodelan, garis putus-putus adalah batas cekungan berdasarkan peta anomali Bouguer.



Gambar 11. Model bawah permukaan arah AB daerah Seram berdasarkan data anomali gaya berat Bouguer.



Gambar 12. Penampang geologi bawah permukaan berdasarkan penampang gayaberat sisa arah AB (selatan utara) hasil *Moving Average* pada jendela 9 Cekungan Bula



Gambar 13. Geodinamika tektonik *piggyback* pada pembentukan Cekungan Seram.

Pada pembahasan kerangka tektonis Busur Banda terdapat dua pendapat antara Hamilton (1979) dan Audley-Charles dr. (1974), Audley-Charles & Carter (1977); Chamalaun & Grady (1978) mengenai posisi tektonis Cekungan Seram terhadap jalur penunjamannya, yakni di sebelah selatannya atau di sebelah utaranya. Namun demikian, dari data gaya berat secara regional terlihat bahwa Cekungan Seram terletak di antara daerah akresi dan daerah busur luar nonvulkanik di sebelah selatan jalur penunjaman. Jalur penunjamannya sendiri terletak di Laut Seram tempat terdapat jalur anomali negatif yang merefleksikan Palung Laut Seram.

Model bawah permukaan gaya berat Bouguer yang dihasilkan dari perhitungan rapat massanya

memperlihatkan bahwa batuan di Cekungan Seram terbentuk melalui runtunan sedimentasi dari Pratersier hingga Resen. Pada mulanya batuan kerak Laut Banda dan batuan kerak granitan yang tersingkap menjadi batuan sumber sedimentasi cekungan, sehingga selanjutnya terbentuk batuan-batuan Pratersier dengan rapat massa sekitar 2,4 gr/cc. Kemudian secara tektonis setelah mengalami pelipatan kuat batuan Pratersier ini ikut tersesarkan dan bersama-sama ofiolit kerak Laut Banda mengalami pendauran ulang orogenesis (*recycle orogenic*) menjadi sumber provenans, Cekungan Wahai (Tersier). Dengan demikian, dari model gaya berat dapat ditafsirkan bahwa batuan Pratersier dan batuan Tersier sebenarnya merupakan proses

tektonis dan sedimentasi yang berkelanjutan bersama-sama membentuk Cekungan Seram. Sebagai akibatnya, batuan malihan di daerah Gunung Kabipoto (Pratersier) tidak terlihat sebagai tinggian pada peta anomali Bouguer karena masih termasuk dalam anggota Cekungan yang menerus dengan batuan di atasnya. Keadaan yang demikian dapat dilihat dari kandungan litologinya dari masing-masing formasi batuan (dari tua ke muda) yang masih memperlihatkan beberapa kesamaan (Tjokrosapoetro drr., 1993). Namun demikian batuan Tersiernya belum mengalami perlipatan kuat seperti batuan Pratersier di bawahnya. Hubungan tektono-stratigrafi semacam ini berpengaruh terhadap pembentukan deposentrum-deposentrum yang mempunyai nilai ekonomi, namun masih perlu dibuktikan dengan penelitian lebih terperinci.

#### Potensi hidrokarbon

Asal-mula minyak bumi di Cekungan Seram saat ini masih menjadi bahan perbincangan. Bahwasanya minyak bumi di cekungan Bula berasal dari batuan induk lapisan Trias dan Kapur, telah banyak dikemukakan oleh para ahli geologi perminyakan, di antaranya adalah Kusumadinata (1980), Kemp & Mogg (1992), dan Sullivan drr. (2006). Di samping itu ada juga yang berpendapat bahwa minyak bumi berasal dari lapisan Plio-Pleistosen yang diendapkan dalam lingkungan laut terbuka dan terbentuk secara cepat (Zilman & Paten, 1975, Gribi, 1974, dalam Kusumadinata, 1980). Sehubungan dengan hal tersebut penulis berpendapat bahwa seandainya minyak bumi berasal dari batuan induk Plio-Plistosen, yakni Formasi Wahai, maka tidak menutup kemungkinan akan terjadi migrasi sekunder berupa migrasi tektonis (*tectonic migration*) ke batuan Pratersier, di samping migrasi ke lapisan batuan yang lebih muda. Dinamika tektonis di daerah ini yang sangat kuat dan aktif mengakibatkan perlipatan kuat, sesar-sesar naik, dan kontak-kontak tektonis antar formasi. Keadaan yang demikian terlihat dari penampang gaya berat sisa yang menghasilkan model sederhana struktur bawah permukaan. Batuan yang membentuk struktur perlipatan adalah batuan PraTerier (Gambar 12). Perlipatan ini terbentuk akibat *flexure* batuan dasar kerak granitan oleh tektonis dan pembebanan sedimentasi di daerah *fore land*-nya. Di Cekungan Seram terdapat

Formasi Manusela yang berumur Mesozoikum (Tjokrosapoetro drr., 1993) yang memenuhi syarat sebagai reservoir (Nilandaroe drr., 2001), di samping itu juga sebagai batuan induk (Sullivan drr. 2006). Pada model gaya berat sisa formasi ini kemungkinan adalah batuan malihan dengan rapat massa sekitar 2,4 gr/cc (Gambar 12). Keadaan yang demikian bisa saja merupakan asal mula minyak bumi di lapangan Nief atau *Oseil Field* pada Formasi Manusela di Cekungan Bula, walaupun masih harus dibuktikan secara geokimiawi lebih teliti. Keadaan struktur geologi di daerah ini juga penting untuk diperhatikan karena sebagian besar perangkap hidrokarbon di daerah ini adalah perangkap struktur. Peta turunan tegak kedua dan peta anomali sisa Cekungan Seram memperlihatkan adanya suatu *closures* di beberapa tempat, yaitu di sekitar lapangan Bula yang diperkirakan merupakan antiklin yang perlu dicermati (Gambar 10), dan daerah lain yang meliputi Hututu, Kanike, dan di sekitar Kohonusim.

#### Kesimpulan

- Pada peta Anomali Bouguer Seram bagian timur dan sekitarnya, Cekungan Seram ditunjukkan oleh kontur anomali -50 mgal hingga 0 mgal yang membentuk lembah anomali negatif.
- Berdasarkan nilai rapat massa dalam pemodelan, cekungan tersebut tersusun oleh batu-batuan sedimen Tersier dan batuan malihan Pratersier yang dialasi oleh batuan kerak garnitan benua mikro dari Australia.
- Berdasarkan data gaya berat setidaknya batu-batuan di Cekungan Seram telah terpotong oleh tiga sesar utama, yaitu sesar pertama memotong batuan yang tua, sedangkan kedua sesar lainnya memotong semua batuan.
- Secara tektono stratigrafi, Cekungan Seram berasal dari batuan kerak granitan dan kerak basalan yang sama-sama terobduksi.
- Peta anomali sisa hasil moving average yang sesuai dengan peta turunan tegak kedua menunjukkan adanya *closure*, dan model penampang bawah permukaan masih perlu dicermati. Kenampakan-Penampakan ini perlu ditindaklanjuti dengan penelitian yang lebih teliti dalam rangka tahap awal penelitian potensi sumber daya energi.

## Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kami ucapkan kepada Kepala Pusat Survei Geologi atas izin penerbitan tulisan ini dan kepada Koordinator Kelompok Program Pemetaan dan Penelitian Dasar, PSG yang telah memberi

semangat dalam penulisan makalah ini, serta kepada rekan-rekan, khususnya Ir. Bambang S. Widijono, yang membantu dalam penyelesaian penulisan ini.

## Acuan

- Adkins, J.S., Sutisna, S. dan Untung, M., 1978. A Regional gravity base station network for Indonesia. Geological Survey of Indonesia, *Publikasi Teknik- Seri Geofisika*, no. 6, hal. 10 .
- Allen, P.A, and Allen, J.R., 1990. *Basin Analysis*. Principle and application, Blackwell, 451 pp.
- Atmawinata, S dan Ratman, N., 1982. Struktur geologi Pulau Yapen dan hubungannya dengan lajur sesar Sorong, *Prosiding PIT XI IAGI*, Jakarta.
- Audley-Charles, M.G., Carter, D.J. and Barber, A.J., 1974. Stratigraphic basis for the interpretations of the Outer Banda Arc, Eastern Indonesia, *Proc. Indon. Petrol. Assoc.*, 3<sup>rd</sup> Ann. Conv., Jakarta, pp. 25-44.
- Audley-Charles, M.G., Carter D.J., 1977. Interpretation of a regional seismic line from Misol to Seram. Implications for regional structure and petroleum exploration. *Proc. Indon. Petrol. Assoc.*, 6<sup>th</sup> Ann. Conv., Jakarta, pp. 3-11.
- Argawal, N.P and Lal Tarkeshhwar, 1971. Application of Rational Approximation in Calculation of the Second Derivative of the Gravity Field. *Geophys.*, V.36, 3. p, 571-581.
- Beaumont, C., 1978. The evolution of sedimentary basin on a viscoelastic lithosphere, theory and examples, *Geophysics J.R., Austr. Soc.* V.55, pp. 471-497.
- Bowin, C.O., Purdy, G.M., Johnson, C.R., Shor, G., Lawver, L., Hartono, H.M.S. & Jezek, P., 1980. Arc-continent collision in Banda Sea Region. *Am.Assoc.Petrol.Geol.Bull.*, vol. 64, pp.868-915.
- Bowin, C.O., Warsi, C. and Milligan, J., 1981. *Free Air Anomali Atlas of the word*. Government Printing Office, Washington DC, USA.
- Cardwell, K.R. and Isacks, B.L., 1978. Geometry of subducted lithosphere beneath the Banda Sea in Eastern Indonesia from seismicity and fault plane solutions. *J. Geophys. Res.*, 83. 2825-2838.
- Chamalaun, F.H. & Grady, A.E., 1978. The tectonic development of Timor, a new model and its implication for petroleum exploration. *Aust. Petrol. Explor. Assoc. Jour.*, v. 18, pp.102-108.
- Charlton & Hall, 1994. New biostratigraphic result from the Kolbano area, southern West Timor implication for the Mesozoic-Tertiary stratigraphy of Timor. *Southeast Asia Earth Sci.*, V.9. pp. 113-122.
- de Smet, M.E.M., 1999. On The Origin of The Outer Banda Arc, Tectonics and Sedimentation of Indonesia. *Proc. of the Geology of Indonesia Book 50<sup>th</sup> Ann. Mem. Sem.* Authored by R.W. van Bemmmelen, ed.by H.Darman & F.H. Sidi, 81 pp.
- Dickinson, W.R., 1971. Clastic sedimentary sequences deposited in shelf, slope and trough settings between magmatic arcs and associated trenches : *Pacific Geology*, v. 3, p. 15-30.
- Hamilton, W., 1979. Tectonic of the Indonesia Region. *U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 1078*, 345 hal.
- Harris, R., 2003. Geodynamic patterns of ophiolites and marginal basins in the Indonesian and New Guinea regions. In : *Ophiolites in Earth History*, Dilek. Y. & Robinson P.T. (eds), *Geological Society, London Special Publications*. 218, 481-505.
- Heiskanen, W.A. and Vening Meinesz, 1958. *The Earth and its Gravity Field*. McGraw-Hill, New York.
- Katili, J.A., 1980. *Geotectonic of Indonesia*, a Modern View, with Tjia H.D. comt. Dir. Gen. of Min., Jakarta, Indonesia.

- Kemp, G. and Mogg, W., 1992. A re-appraisal of the geology, tectonic and prospectivity of Seram Island, Eastern Indonesia. *Proc. Indon. Petrol. Assoc., Twenty First. Ann. Conv.*, Jakarta, pp. 521-552.
- Kusumadinata, R.P., 1980. *Geologi Minyak dan Gas Bumi*. Edisi II, jilid 2, ITB, Bandung, 296 hal.
- Letouzey, J., P. de Clarens, J. Guignard & J. Louis Berthon, 1983. Structure of the north Banda-Molucca area from multichannel seismic reflection data, *Proc. Indon. Petrol. Assoc. Twelfth Ann. Conc.* Jakarta, pp. 143-156.
- McKenzie, D.P., 1972. Active tectonics of the Mediteranean region. *Geophysics J.R., Austr. Soc. V.30*.
- Munasri, Permana, H. dan Siregar, S., 1999. Is Seram Island the Mirror of Timor Island. *Proc. of the 28<sup>th</sup> IAGI Ann. Conv.*, in eds. I. Busono & H. Alam, pp. 51-61.
- Nainggolan, D.A. dan Hayat, D.Z., 2006. *Peta anomali Bouguer Lembar Bula-Watubela, Maluku, skala 1 : 250.000*, PSG, Bandung.
- Nilandaroe, N., Mogg, W. and Barracclough, R., 2001. Characteristics of the fractured carbonate reservoir of the Oseil Field, Seram Island, Indonesia. *Proc. Indon. Petrol. Assoc., 28<sup>th</sup>. Ann. Conv.*, Jakarta October 2001, v. 1, pp. 439-456.
- Padmawijaya, T. dan Setiadi, I., 2006. *Peta anomali Bouguer Lembar Masohi, Maluku, skala 1 : 250.000*, PSG, Bandung.
- Rais, J., 1979. International Gravity Standardization Network (IGSN, 1971), *Proceeding, PIT HAGI 9-10 Oktober 1978, Yogyakarta*, hal.80-89.
- Sardjono, 2003. Anomali gaya berat dan dinamika kerak bumi. *Majalah IAGI*, 33, (2) : 43-55.
- Seely, D.R., Vail, P.R. and Walton, G.G., 1974. Trench slope model. *Proc. Indon. Petrol. Assoc., 3<sup>th</sup>. Ann. Conv.*, Jakarta June 1974, pp. 333-351.
- Setyanta, B. dan Setiadi, I., 2007. Anomali gaya berat dan tataan tektonis sekitar perairan Laut Banda dan Pulau Seram. *Jurnal Sumber Daya Geologi v.XVII, no.6*. Pusat Suvei Geologi, hal. 408-419.
- Setyawan, B.S., Wijaya B. dan Guntoro A., 2000. Mengurai perkembangan tektonis Pulau Seram dan Ambon. *Abstracts 29<sup>th</sup> Ann. IAGI Conv.*: h. 102.
- Sullivan, T.O., Pegun, D. and Tarigan, J., 2006. Seram oil, search, past discoveries and future oil potential, *Proc. Indon. Petrol. Assoc., 14<sup>th</sup>. Ann. Conv.*, Jakarta, pp.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E. and Keys, D.A., 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, Melbourne, 860 pp.
- Tjokrosapoetro, S. dan Budhistira, T., 1982. Geology and tectonics of the Northern Banda Arc. *Buletin GRDC*, Bandung, Indonesia, No.6, 20 hal.
- Tjokrosapoetro, S., Achdan, A., Suwitodirdjo, K., Rusmana, E dan Abidin, H.Z., 1993. *Peta Geologi Lembar Masohi, Maluku, skala 1 : 250.000*, PPPG, Bandung.
- Untung, M and Sato, Y., 1978. Gravity and geological studies in Jawa, Indonesia. *Special Publication, no.6*, Geol. Sur. Of Indonesia & Geol. Sur. Of Japan, 207 pp.
- Untung, M and Sato, Y., 1987. The isostatic state of the crust in the western portion of Irian Jaya, *Procc. Of the 6<sup>th</sup> regional congress on geology, mineral and energy resources of Southeast Asia, Jakarta, Indonesia, 1987*, 24pp, unpublsh.
- Visser W.A., and Hermes, J.J., 1962. Geological results of the exploration for oil in Netherlands New Guinea. *Verh. Kon. Ned. Geol. Mijnbuowk. Genoot., Geol. Ser., vol.20*, pp. 1- 265.
- Watts, A.B. and Talwani, M., 1974. Gravity anomalies seaward of deep-sea trenches and their tectonic implications. *Geophys. J.R.Astron.Soc.*, v.36, 57-90.
- Zilman, N.J. and Paten R.J., 1975. Geology and petroleum prospect of Seram Island, Eastern Indonesia. *Aust. Petrol. Explor. Assoc. Jour.*, v.15, pp.73-80.