

STUDI AWAL POLA STRUKTUR BUSUR MUKA ACEH, SUMATRA BAGIAN UTARA (INDONESIA): Penafsiran dan Analisis Peta Batimetri

Oleh :

H. Permana,^{1,2} L. Handayani¹ dan E.Z. Gaffar¹

¹ Puslit Geoteknologi LIPI, Jl. Sangkuriang – 40135, Bandung, Indonesia.

Telp: 62 22 250 36 54; Fax: 62 22 250 4593

² Email : permhp@yahoo.com

Diterima : Diterima : 17-06-2010; Disetujui : 21-11-2010

SARI

Analisis morfostruktur daerah penelitian menunjukkan tiga unit struktur geologi yang berbeda, antara lain zona penunjaman, zona deformasi aktif dan busur muka termasuk didalamnya tinggian busur muka dan cekungan busur muka. Struktur geologi zona penunjaman lempeng teramati sepanjang Palung Sunda paralel dengan zona deformasi aktif. Struktur geologi pada Tinggian Busur Muka membentuk sistim prisma akresi yang disusun oleh sesar anjak, sesar geser, perlipatan dan perlipatan naik. Pola kelurusan struktur umumnya berarah utara baratlaut-selatan tenggara di sebelah utara lintang 5°U, arah baratlaut-tenggara pada posisi 3°-5°U, kelurusan kemudian berbelok hampir barat-timur di sekitar 2°-3°U. Perubahan arah pola kelurusan struktur tersebut ditafsirkan sebagai jawaban terhadap naiknya tingkat kemiringan penunjaman lempeng dari daerah Simeulue ke arah Lintang 5°U -7°U atau secara umum dari selatan Sumatra ke arah utara Sumatra.

Di bagian tengah daerah telitian berkembang kelurusan patahan berarah utara-selatan yang memotong kelurusan berarah baratlaut-tenggara. Kelurusan tersebut ditafsirkan sebagai patahan geser dekstral dan kemungkinan masih aktif.

Kata Kunci: Analisis morfostruktur, zona penunjaman, zona deformasi aktif, busur muka, kelurusan, sesar anjak, sesar geser, perlipatan, perlipatan naik, kemiringan penunjaman lempeng

ABSTRACT

Morphostructure analyses of study area demonstrate three different units of geological structures: subduction zone, active deformation zone and fore-arc region, which include Fore Arc High and Fore Arc Basin. The plate subduction zone observes along Sunda Trench parallel with active deformation zone. Structure geology in Fore Arc High builds an accretionary prism system. It was composed by thrust fault, strike slip fault, folding and thrust fold. General trend of structural pattern is NNE-SSE at the north of 5°N, NW-SE direction at around 3°-5°N and changed in direction relative to E-W at about 2°-3°N. This direction variation of structural pattern trend was interpreted as a response to increase of obliquity degree of subducted plate from Simeulue area to 5° -7°N, or in general, from southern of Sumatra to north of Sumatra.

NS trend lineament has developed in the middle part of study area that also sliced the NW-SE main structural direction. These structural lineaments interpreted as dextral strike slip fault and it is possibly still active.

Keywords: *morphostructure analyses, subduction zone, active deformation zone, fore-arc lineament, thrust fault, strike slip, folding, thrust fold, plat, plate subduction obliquity*

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Berbagai survei geologi dan geofisika di lepas pantai barat Sumatra telah dilakukan sejak terjadinya gempa dan tsunami Aceh, 26 Desember 2004. Lebih dari 15 ekspedisi kelautan telah dilakukan sejak tahun 2005 sampai 2010 dengan menggunakan wahana riset asing dan milik nasional melalui kerjasama riset kelautan. Kerjasama survei antara BPPT dengan BGR-Jerman, kemudian antara NOC-Inggris, UTIG-Amerika, Jamstec-Jepang dengan BPPT-LIPI, sedangkan LIPI bekerjasama dengan IGP-Perancis. Wahana yang dipergunakan antara lain RV Sonne (Jerman), N/O Marion Dufresne (Perancis), Geco Searcher (Schlumberger), Tides (CGG Veritas), Roger Ravelle (Amerika) dan wahana riset nasional seperti R/V Baruna Jaya VIII (LIPI) dan Baruna Jaya II dan III (BPPT).

Salah satu hasil survei kelautan adalah data batimetri dihasilkan melalui ekspedisi kelautan Program HMS Scott, 2005 (Henstock et al., 2006), Aftershock, 2005 (Sibuet et al, 2007) dan Sumatra OBS, 2006 (Graindorge et al., 2008). Ekspedisi kelautan tersebut meliputi kawasan barat lepas pantai Sumatra bagian utara atau kawasan Busur Muka Aceh dan Kawasan Palung Sunda. Untuk kepentingan ilmiah, data tersebut dapat dimanfaatkan untuk penafsiran pola dan jenis struktur serta pola tektonik yang berkembang di kawasan kajian. Data batimetri regional yang dapat dimanfaatkan bersumber dari Gebco (General Bathymetric Chart of the Oceans) yang bebas diunduh dari website. Tersedianya peta pola struktur geologi bawah laut lepas pantai barat Utara Sumatra diharapkan dapat meningkatkan pemahaman kegiatan tektonik di kawasan tersebut sehingga bisa dimanfaatkan dalam upaya pengurangan resiko bencana khususnya gempa dan tsunami.

Metode Kerja

Dalam studi ini, data mentah hasil pemetaan batimetri berupa Dat. File baik berupa ASCII File maupun text File diolah menjadi data XYZ. Data diproses dengan menggunakan perangkat lunak baik GMT V. 4.2.0 (Wessel and Smith, 2007, *public software*) atau dapat pula dengan menggunakan maupun perangkat lunak lain untuk mendapatkan *Digital Terrain Modeling*

(DTM) dalam bentuk *.grd binary format. Untuk mendapatkan DTM menggunakan Metode krigging, dengan parameter: *data filter, search range dan spacing* dengan nilai yang disesuaikan dengan kebutuhan. Grid yang dihasilkan difilter (*Low pass filter Gaussian 3x3*) & *smoothing (spline smooth)*. Hasil DTM dalam bentuk *.grd atau *.nd dapat ditampilkan dengan menggunakan berbagai perangkat lunak. Semua tampilan peta batimetri dalam tulisan ini diolah dengan menggunakan perangkat lunak GMT V. 4.2.0. Gambar 1 memperlihatkan bagan alur pengolahan data XYZ sampai menjadi peta batimetri, analisis morfotektonik sampai pada pemanfaatan peta untuk berbagai kepentingan (geografi, geologi, rencana survei) akan tetapi tidak dapat digunakan untuk keperluan navigasi.

Data batimetri regional (*.grd atau *.nd) dapat diunduh secara gratis dari *General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) Digital Atlas (GDA)* dengan alamat <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>. Peta batimetri tersebut dapat dipergunakan untuk tampilan lokasi peta tetapi tidak bisa dipergunakan untuk kepentingan navigasi karena alasan ketelitian (1 menit). Peta-peta tersebut umum dipakai untuk perencanaan riset kelautan oleh kalangan peneliti dan perguruan tinggi di dunia. Dengan menggunakan perangkat lunak GMT V. 4.2.0, dibuat peta batimetri regional dengan memanfaatkan data dari Gebco tahun 2006 (file *gridone.grd*) dan data *Gebco* tahun 2008 yaitu *gebco_08.nc*. Luaran peta dari perangkat lunak dalam bentuk postskrip (ps file) yang dapat diekspor atau dibuka dalam bentuk pdf file, selanjutnya dapat ditampilkan dalam piranti lunak lainnya. Skrip pembuatan peta regional *Gebco* tahun 2006 (*gridone.grd*) untuk perangkat lunak GMT sebagai berikut:

- 1) [psbasemap -Ba1df1d/a1df1dWENS:": -Jm0/0/1:2750000 -R92/98/2/6.5 -K -V > dikti1.ps]
- 2) [grdimage gridone.grd -Cpurple2orange.cpt -R -Jm -K -O -V -B >> dikti1.ps]
- 3) [grdcontour gridone.grd -R92/98/2/6.5 -Jm0/0/1:2750000 -C500 -A1000 -K -O -V -B >> dikti1.ps]
- 4) [pscoast -Df1.0 -W1.0p -Bg1d -R -Jm -K -O >> dikti1.ps]

5) [psscale -Cpurple2orange.cpt -D0.5/8/15/0.5 \ -B1000:Bathymetry:/:m: -K -O >> dikti1.ps]

Sedangkan skrip pembuatan peta dari data regional *Gebco* 2008 yaitu mengganti file *gridone.grd* dengan *gebco_08.nc* yang skripnya sebagai berikut:

1) [psbasemap -Ba1df1d/a1df1dWENS:."" -Jm0/0/1:2750000 -R92/98/2/6.5 -K -V >> dikti1.ps]

2) [grdimage gebco_08.nc -Cpurple2orange.cpt -R -Jm -K -O -V -B >> dikti1.ps]

3) [grdcontour gebco_08.nc -R92/98/2/6.5 -Jm0/0/1:2750000 -C500 -A1000 -K -O -V -B >> dikti1.ps]

4) [pscoast -Df1.0 -W1.0p -Bg1d -R -Jm -K -O >> dikti1.ps]

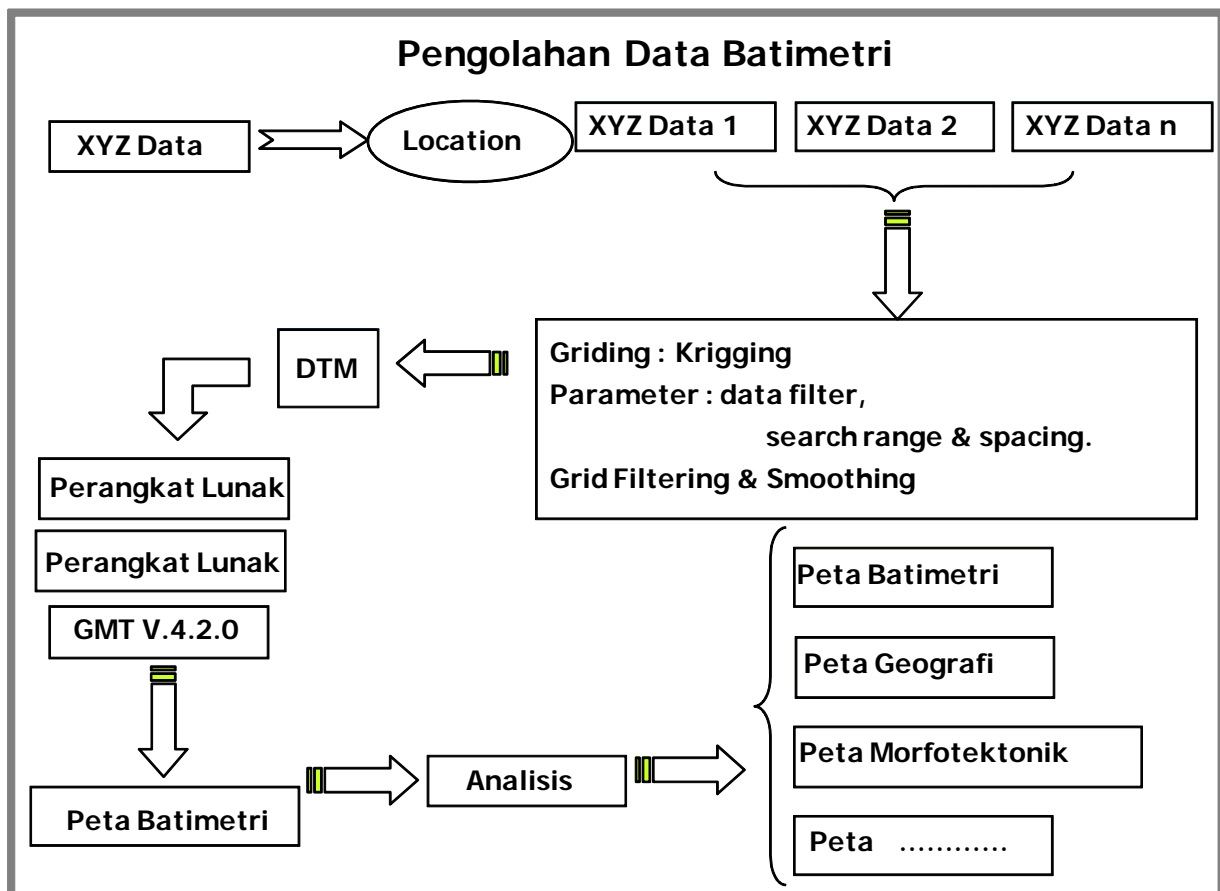
5) [psscale -Cpurple2orange.cpt -D0.5/8/15/0.5 \ -B1000:Bathymetry:/:m: -K -O >> dikti1.ps]

Hasil pengolahan peta tersebut disajikan dalam Gambar 3 dan 4. Peta batimetri dengan resolusi lebih besar didapatkan dari ekspedisi kelautan 2005 dan 2006. Data gabungan tersebut berupa file *hms0506.grd*, diolah dengan GMTmap dengan ditambahkan unsur iluminasi sebesar 45° untuk mendapatkan efek 3D. Hasil pengolahan peta tersebut ditampilkan dalam peta pada Gambar 5. Melalui peta Gambar 5 tersebut dilakukan berbagai penalaran pola struktur geologi.

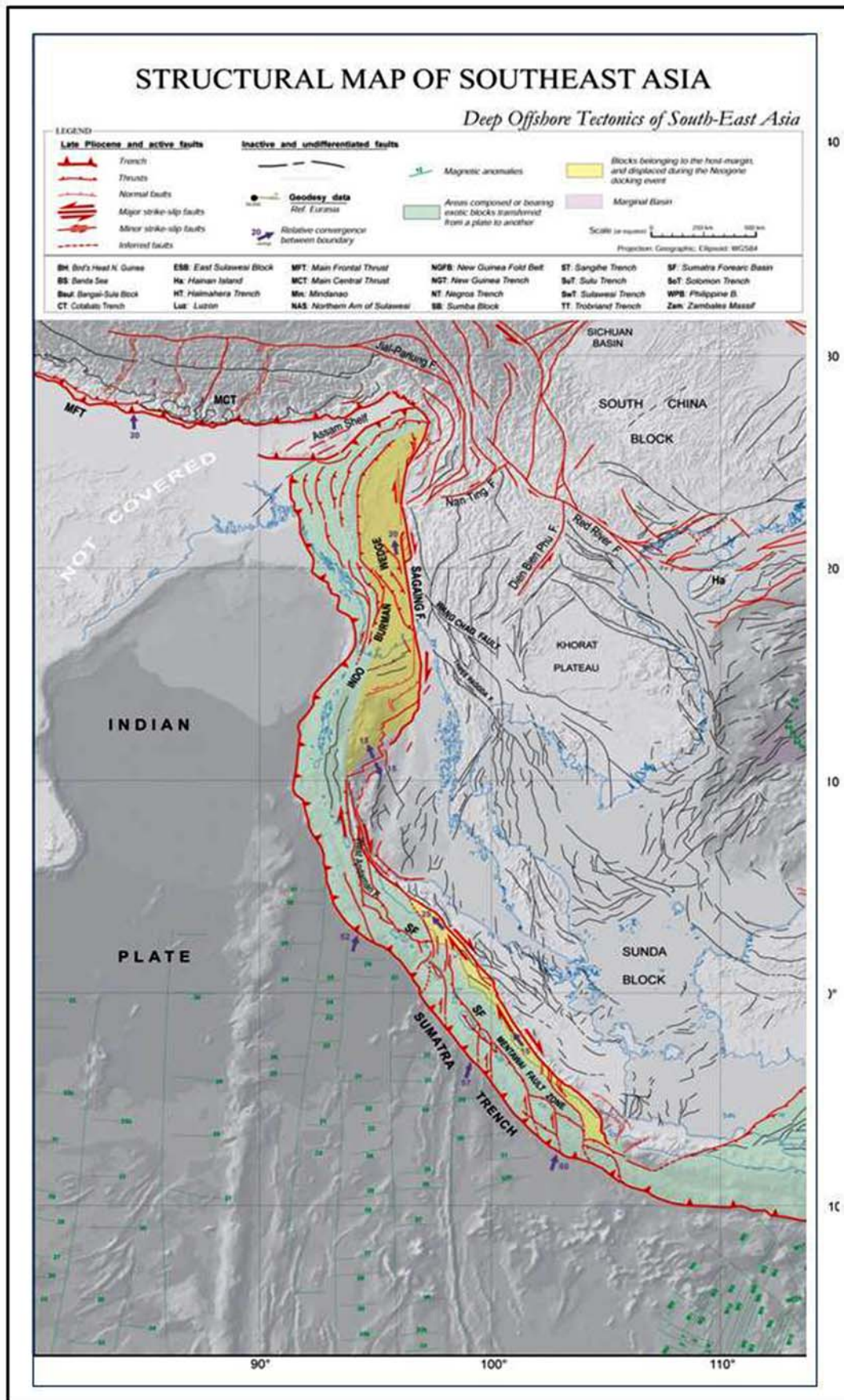
Skrip pengolahan peta batimetri seperti berikut:

1) [psbasemap -Ba2.0df2.0d/a2.0df2.0d WENS:."" -Jm1/0/1:3000000 -R92/96/1.5/7.5 -P -K -V > fra.ps]

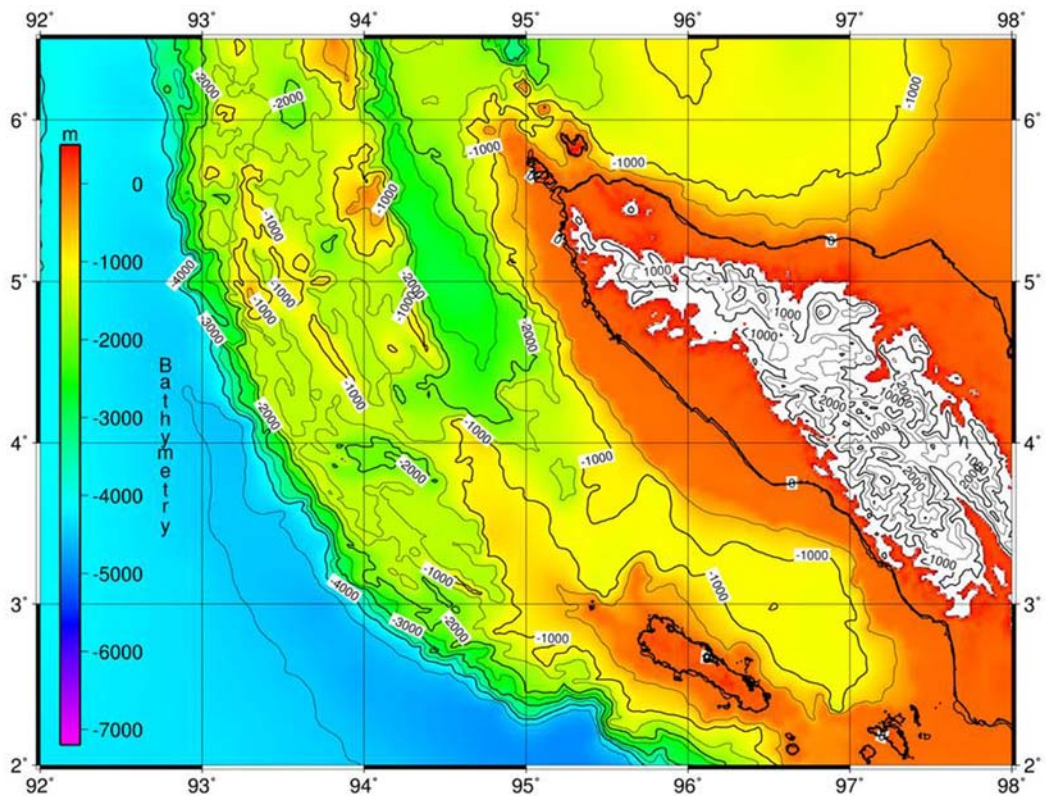
2) [makecpt -Crainbow -Z -T-5000/-200/500 -V > fr.cpt] [echo N 255 255 255 >> fr.cpt]



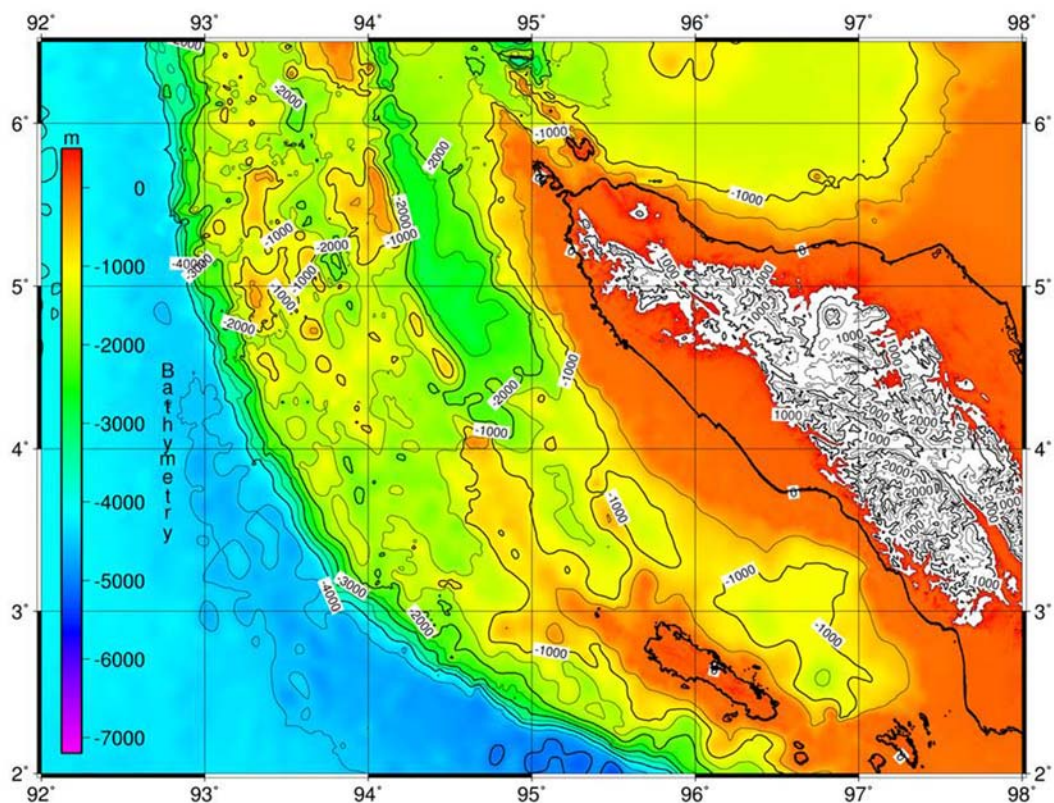
Gambar 1. Alur pengolahan data batimetri, analisis data dan luaran pemanfaatan peta batimetri.



Gambar 2. Pola umum struktur regional kawasan barat lepas pantai Sumatra yang terbentuk akibat subduksi miring antara Lempeng Indo-Australia dengan Lempeng Eurasia dan Lempeng mikro Burma (Pubellier et al, 2005).



Gambar 3. Peta batimetri berdasarkan data Gebco 2006 (file gridone.grd) dengan ketelitian 1 menit pada skala 1:2.750.000.



Gambar 4. Peta batimetri berdasarkan data Gebco 2008 (Gebco_08.nc) dengan ketelitian 1 menit (skala 1:2.750.000). Pada peta tersebut, morfologi sepanjang palung (laut dalam) lebih jelas teramati karena sudah disempurnakan dengan data batimetri hasil pengukuran HMS Scott pada 2005.

- 3) [grdgradient hms0506.grd -Gill45.grd -Nt -A45]
- 4) [grdimage hms0506.grd -Jm9 -B0.5/0.5NWSE -Cfr.cpt -Iill45.grd -R92/96/1.5/7.5 -P -V -K > fra.ps]
- 5) [psscale -D1.5/40/25/0.5 -Cfr.cpt -O -K >>fra.ps]
- 6) [pscoast -R -Dh -Jm -O -K -W4 >>fra.ps]

TATAAN GEOLOGI DAN TEKTONIK

Subduksi miring Lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara di bawah Lempeng Eurasia-Lempeng mikro Burma membentuk Palung Sunda dan struktur regional berupa kompleks sesar-sesar geser dekstral dan zona sesar anjak (Pubellier et al., 2005; Gambar 2) mulai dari Burma, Andaman, Nicobar, pantai barat Sumatra sampai selatan Pulau Jawa. Komplek struktur regional utama antara lain Patahan Sagaing (Myanmar), Patahan Besar Sumatra atau dikenal sebagai *the Great Sumatra Fault* (Gambar 2), Patahan *West Andaman* dan Patahan Mentawai. Patahan Besar Sumatra adalah patahan geser mengangan dengan panjang mencapai 1900Km - sejajar dengan Pegunungan Bukit Barisan yang terbentuk pada Akhir Miosen (Hamilton, 1979; Sieh dan Natawijaja, 2000).

Patahan Sumatra memotong daratan Sumatra mulai dari barat laut Sabang, Banda Aceh, Bukittinggi, Padang, Bengkulu sampai Teluk Semangko. Di Selat Sunda, patahan tersebut berbelok ke arah selatan, memotong Busur Muka Sumatra. Ke arah lepas pantai Sumatra, subduksi miring tersebut di atas membentuk busur kepulauan non vulkanik seperti P. Enggano, Kepulauan Mentawai, Nias dan Simeulue serta patahan geser dekstral Mentawai (Diament et al., 1992), yang membelah cekungan Busur Muka Mentawai mulai dari Cekungan Bengkulu, sampai Kelokan (*arch*) Pini. Penelitian terbaru (Singh and Permana, 2008; Permana et al., 2008; 2009; Singh et al., 2009) membuktikan bahwa Patahan Mentawai tidak murni sebagai patahan geser tetapi secara parsial menunjukkan unsur pergeseran naik (*thrust*) atau *back thrust*.

Subduksi miring Lempeng India (Kerak Samudra Hindia) dengan Eurasia sudah dimulai pada 50-45 Juta tahun lalu/Jtl (Daly et al, 1989;

Metcalfe, 1993). Subduksi miring (Lempeng India) di bawah tepian barat Sumatra pada Akhir Eosen - Awal Oligosen (38 - 35Ma) mengakibatkan pembentukan Busur Muka Sumatra (*Sumatra Fore Arc*) (Laughton, Sclater and, McKenzie 1973, Malod and Kemal, 1996) diikuti oleh pembentukan Palung Sunda pada Oligosen Atas (29Ma) (Laughton, Sclater and, McKenzie 1973; Hamilton, 1981). Pembentukan busur muka tersebut diawali dengan pembukaan Cekungan Busur Muka (*Fore Arc Basin*), paralel dengan Palung Sunda pada Oligosen sampai Awal Miosen (Karig et al., 1979; Karig et al., 1980; Malod and Kemal, 1996; Schlüter et al., 2002; Susilohadi et al., 2005, Berglar et al, 2009).

PETA BATIMETRI BARU

Peta batimetri seperti layaknya peta topografi di daratan dapat dipakai untuk kepentingan peta dasar penelitian, peta lokasi, peta geografi maupun dimanfaatkan untuk penafsiran pola struktur geologi. Pola struktur yang dihasilkan sangat bergantung kepada tingkat ketelitian/resolusi peta yang dipergunakan. Contoh seperti pada Gambar 3, berupa peta dasar dari Gebco 2006 dengan file *Gridone.grd* yang dapat dibedakan dengan jelas terutama pada daerah palung dibandingkan dengan peta Gebco 2008 berupa data *gebco_08.nc* (Gambar 4), yang sudah meliputi data pengukuran batimetri dari kapal HMS Scott 2005 (Henstock, McNeill and Tappin, 2006). Dengan tingkat ketelitian 1 menit, tidak banyak unsur struktur geologi yang dapat dikenali kecuali zona penunjaman atau palung.

Dengan menggunakan peta yang diolah dengan menggunakan data survei batimetri (Gambar 5) dilakukan analisis morfotektonik yang tujuannya untuk menafsirkan struktur geologi yang berkembang di kawasan Busur Muka Aceh. Dalam tulisan hasil awal penelitian ini belum dilakukan validasi dengan data bawah permukaan seperti seismik pantul maupun gayaberat sehingga struktur geologi yang ditarik baru dari aspek permukaan saja sedangkan sudut kemiringan patahan dan jenis patahan hanya diperkirakan saja atau menurut literatur.

1. Gambaran Peta Batimetri

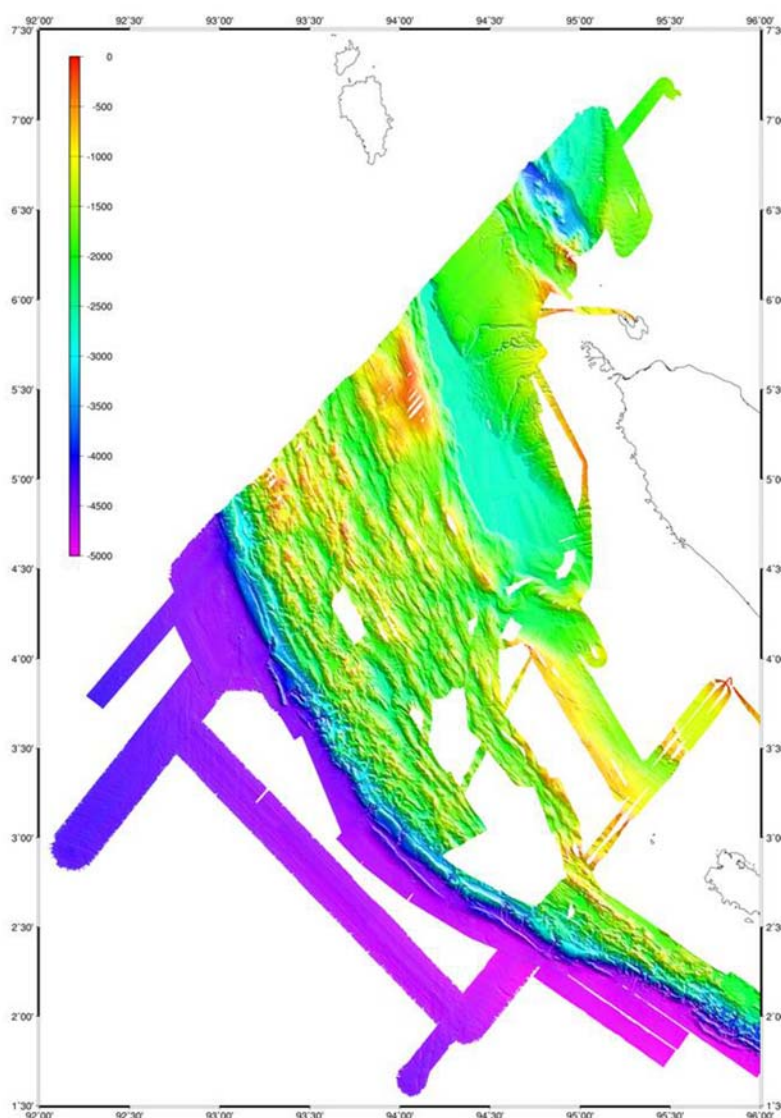
Daerah kajian meliputi kawasan 92° - 96°T dan 2° -7°U, terletak di sebelah barat Aceh.

Secara geografis, sisi barat kawasan telitian dibatasi oleh Samudra Hindia, di sisi utara berbatasan dengan Pulau Nicobar (India) dan Pulau Sumatra, kemudian dengan Selat Malaka di sisi timur sedangkan ke arah selatan dibatasi oleh Pulau Simeulue dan Samudra Hindia (Gambar 6).

Bentang alam daerah kajian pada umumnya membentuk perbukitan dan lembah berarah barat-laut-tenggara sampai relatif berarah barat-timur. Kawasan telitian merupakan suatu zona penunjaman dan kompleks busur muka atau *Fore Arc* yang dinamakan sebagai “Kompleks Busur Muka Aceh” (Gambar 6). Unsur struktur geologi tersebut, dari arah laut ke arah darat, tersusun atas Palung Sunda (*Sunda Trench*) dengan kedalaman bervariasi mulai dari 4000 m di utara sampai kedalaman 5500 m di selatan Simeulue. Berikutnya adalah Zona Deformasi, berada pada kedalaman 4000 m sampai 3000m, membentuk punggung bukit dan lembah tidak teratur sejajar dengan palung. Kemudian Punggungan atau Tinggian Busur Luar Aceh (*Fore-arc High*) berada pada kedalaman sekitar 300 m sampai 1000 m, yang secara geologi merupakan suatu prisma akresi, tersayat oleh Sistem sesar anjak (*thrust fault*), atau terlipat dalam Sistem zona perlipatan (*Fold belt*) atau *thrust fold*. Bentuk morfologi sepanjang Busur Muka Aceh tersebut sangat kasar akibat patahan *wrench* dan patahan anjak (Karig et al., 1979).

Tinggian Busur Luar bagian paling dangkal sekitar 300 m dinamakan Tinggian Aceh (*Aceh High*). Pada umumnya bentang alam dicirikan oleh perbukitan dan lembah memanjang dengan kedalaman perbukitan bervariasi antara 500 m sampai 2000 m sedangkan lembah-lembah berada pada kedalaman 2000-2500 m. Ke arah timur dari sistem Busur muka, terbentuk suatu lembah yang terbuka melebar ke arah

selatan memiliki kedalaman sampai 3000 m diapit oleh perbukitan di sisi barat dan paparan di sisi timur. Cekungan tersebut merupakan Cekungan Busur Muka (*Fore arc Basin*) dengan kedalaman 2000 m sampai 3000 m dinamakan sebagai Cekungan Aceh (*Aceh Basin*). Di selatan dari Cekungan Aceh dijumpai suatu punggung berarah barat-timur disebut sebagai Punggungan Tuba (*Tuba Ridge*) (Malod dan Kemal., 1996) dengan kedalaman sekitar 700 m. Ke arah utara dari Pulau Weh dijumpai morfologi lembah berbentuk elips dengan kedalaman mencapai 3500 m dinamakan Cekungan Rondo. Di dalam lembah muncul morfologi melingkar diperkirakan sebagai tubuh gunungapi bawah



Gambar 5. Gambaran morfologi bawah laut berdasarkan Peta batimetri gabungan data hasil ekspedisi HMS Scott (2005), Aftershock (2005) dan Sumatra OBS (2006), skala 1:3.000.000.

laut dengan puncak berada pada kedalaman 1500 m. Gambar 6 memperlihatkan unsur-unsur Komplek Busur Muka Aceh.

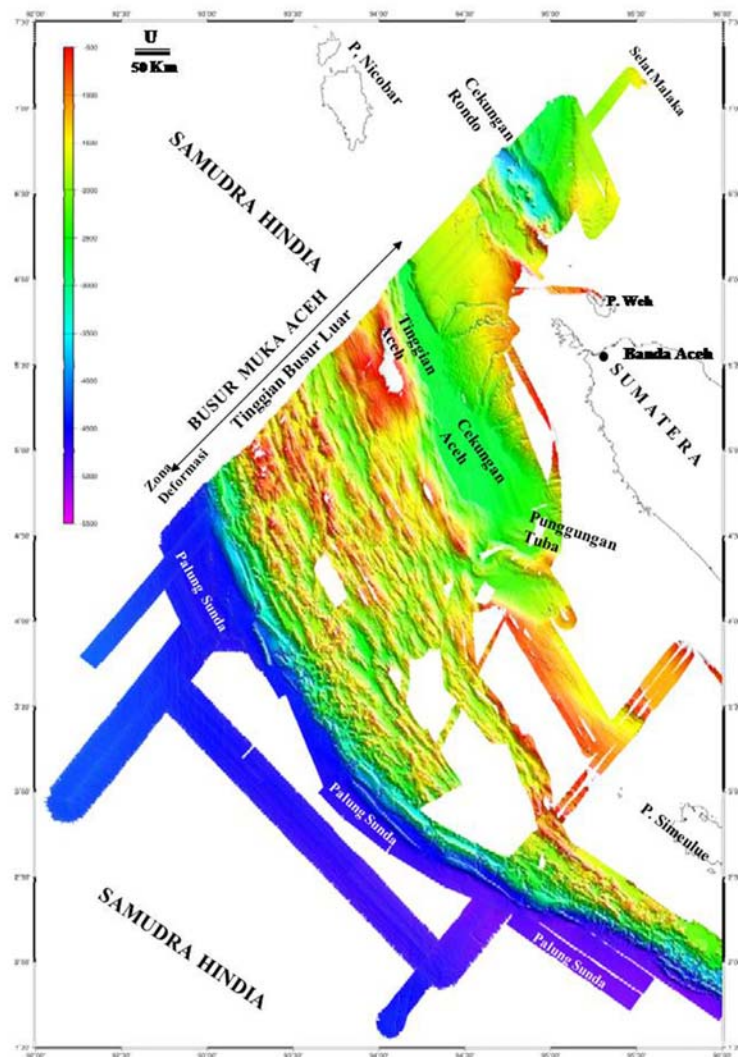
2. Analisis Morfostruktur

Penafsiran kelurusan struktur dari data batimetri atau morfologi permukaan dasar laut menerapkan kaidah-kaidah umum seperti pola-pola kelurusan memanjangnya bukit atau punggung, lembah maupun gawir-gawir. Pola kelurusan ini dapat mewakili kelurusan patahan/sesar, bidang patahan atau perbukitan lipatan. Sesuai dengan resolusi peta, maka penafsiran kelurusan tidak sampai dapat menentukan posisi bidang perlapisan batuan, bidang patahan maupun jenis batuan. Penafsiran jenis batuan hanya sampai pada tingkat kekerasan relatif berdasarkan tekstur morfologi, kasar atau halus. Kaidah lainnya adalah hukum potong memotong, dimana kelurusan struktur yang memotong merupakan kelurusan yang terbentuk lebih akhir.

Analisis morfostruktur dalam tulisan ini terbatas pada kawasan Busur Muka Aceh dan zona penunjaman, berdasarkan pada, antara lain 1). kelurusan lembah atau gawir perbukitan dan 2). kelurusan perbukitan. Kelurusan struktur jenis pertama umumnya berukuran lebih dari 100 Km sampai lebih dari 400 Km, memanjang berarah hampir baratlaut-tenggara terutama pada posisi geografis 3,5°-7°U. Ke arah selatan dari 3,5°U, kelurusan struktur tersebut berubah arah menjadi dominan berarah hampir barat baratlaut-tenggara timur (BBL- TgT) seperti ditampilkan pada Gambar 7. Kelurusan struktur jenis pertama ini dipotong oleh kelurusan gawir bukit atau lembah sempit yang berarah hampir utara-selatan (U-S) terutama di kawasan tengah daerah penelitian (Gambar 7).

Kelurusan struktur jenis kedua merupakan penafsiran kelurusan perbukitan atau

punggung (Gambar 8). Walaupun teramati cukup dominan dan tersebar merata di seluruh kawasan, kelurusan perbukitan umumnya berukuran pendek, terputus maupun berbelok dengan ukuran 1 Km sampai dengan 50 Km panjang. Kelurusan punggung di dominasi oleh kelurusan berarah Baratlaut-Tenggara (BL-Tg) terutama pada lintang 5°-7°N akan tetapi terjadi perubahan arah dominan kelurusan pada lintang 4°-5°U yaitu kelurusan berarah barat baratlaut – timur tenggara seperti halnya yang teramati pada lintang 3°-4°U. Ke arah selatan, pada lintang 2°-3°U, arah dominan kelurusan perbukitan berubah menjadi relatif barat-timur (B-T). Arah dan panjang panah pada Gambar 8 menunjukkan arah dominan dan frekuensi dari kelurusan perbukitan.



Gambar 6. Aspek geografis dan unsur struktur geologi di daerah penelitian. Sekala peta 1:3.000.000.

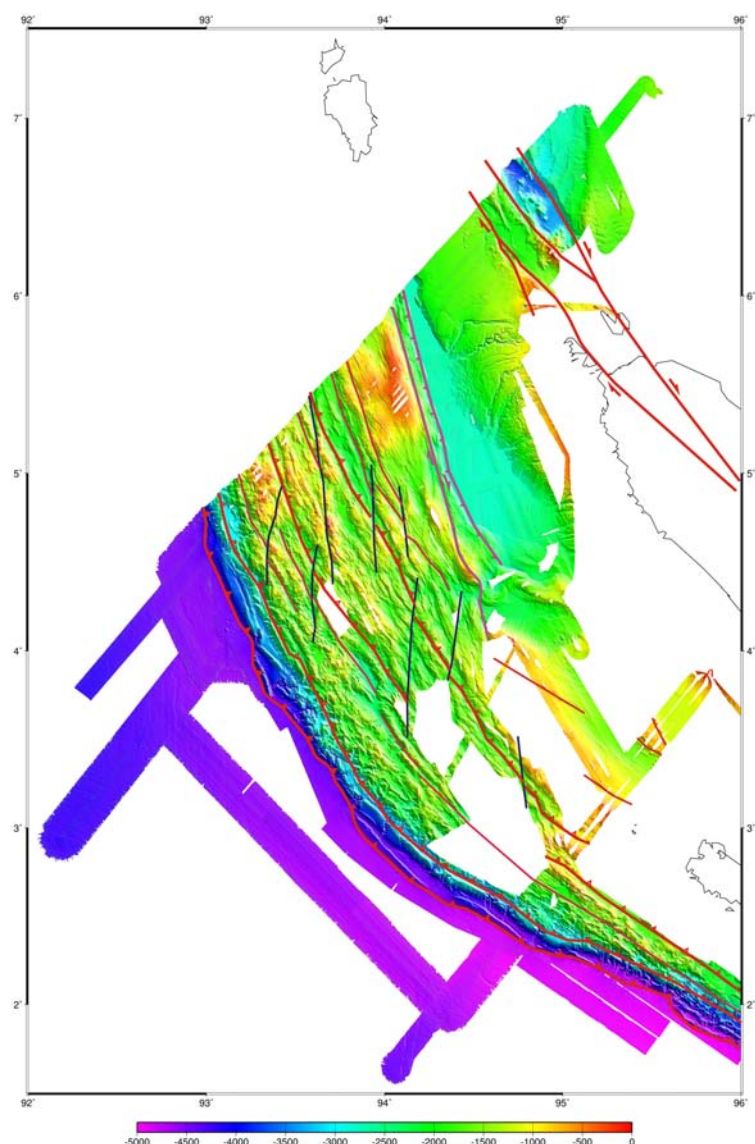
Berdasarkan rona dan tekstur morfologi, maka dapat dibedakan tiga macam tekstur utama yaitu morfologi bertekstur sangat halus seperti teramati di kawasan laut dalam, palung dan cekungan Aceh. Ditafsirkan batuan penutup daerah tersebut merupakan batuan lunak atau batuan yang belum mengalami kompaksi. Tekstur yang sama menempati daerah lembah-lembah walaupun sering tidak homogen, artinya banyak tonjolan perbukitan kecil. Jenis tekstur lainnya adalah kasar, membentuk punggung-punggungan atau perbukitan yang cukup menonjol serta relatif dangkal yang ditafsirkan sebagai batuan relatif kompak atau tua atau batuan telah mengalami kompaksi selama terjadinya akresi.

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

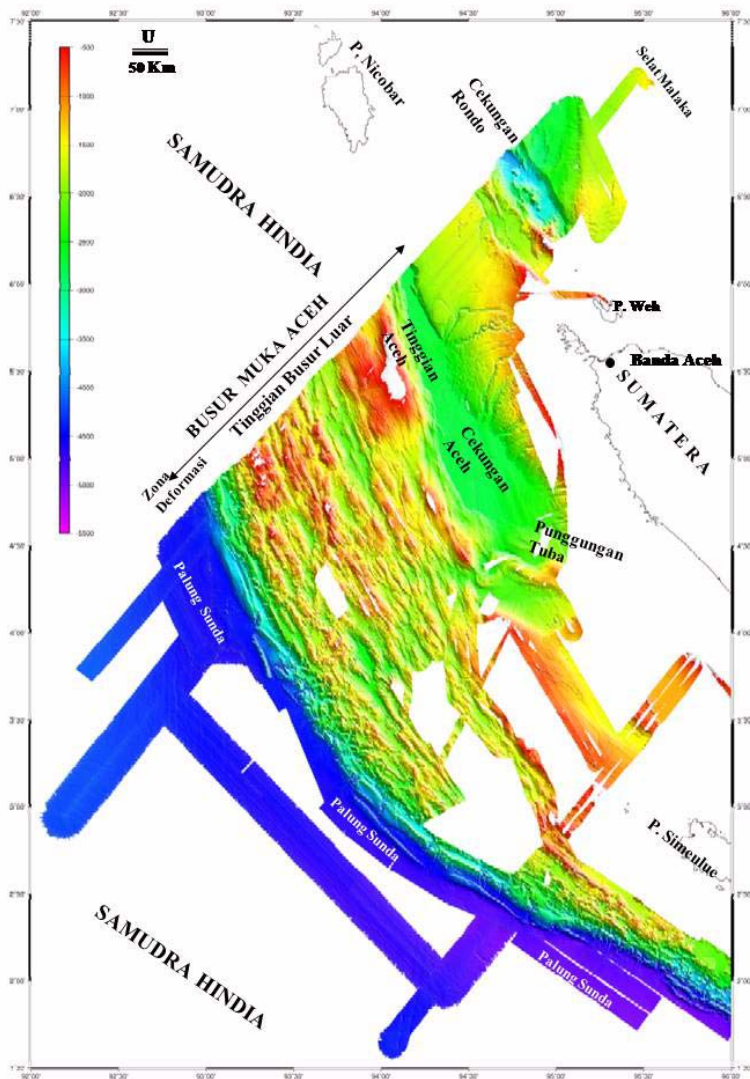
Unsur struktur utama berdasarkan analisis morfostruktur adalah kelurusan-kelurusan lembah maupun gawir. Di bagian sisi baratdaya peta, kelurusan lembah mewakili zona penunjaman lempeng, membentuk Palung Sunda (Gambar 9). Kelurusan struktur yang teramati bersebelahan dengan palung ditafsirkan sebagai sesar palung ditafsirkan sebagai sesar anjak (*thrust fault*) pada zona deformasi. Walaupun masih perlu diperdebatkan, bagian paling bawah dari patahan anjak dalam sistem prisma akresi merupakan Sesar Anjak Bawah (*lower thrust*). Kelurusan Sesar Anjak Utama (*main thrust fault*) berarah umum baratlaut-tenggara merupakan patahan yang memotong bagian tengah kawasan Punggungan Busur Luar Aceh sedangkan pada bagian tepi timur ditempati Sesar Anjak Atas (*upper thrust fault*). Pengkelasan patahan anjak ini diulas dalam Sibuet et al. (2007) meskipun masih harus divalidasi oleh data pengukuran dan penafsiran seismik. Kelurusan perbukitan merupakan kompleks sabuk perlipatan, dapat berupa punggung-punggungan sinklin atau antiklin yang dalam hal ini belum dapat dipisahkan. Kelurusan-kelurusan yang berarah baratlaut-

tenggara tersebut dipotong oleh kelurusan-kelurusan berarah U-S yang hadir lebih akhir, diperkirakan sebagai patahan geser atau patahan normal. Kelurusan tersebut muncul pada kawasan ditempat mana terjadi transisi atau meningkatnya tegasan geser. Graindorge et al. (2008), menafsirkan kelurusan U-S di kawasan Punggungan Busur Luar sebagai akibat patahan geser dekstral yang dibuktikan oleh Berglar et al., 2009 melalui studi seismik.

Di sisi barat Cekungan Aceh, dijumpai kelurusan struktur yang ditafsirkan sebagai perpanjangan dari patahan geser West Andaman dan Sesar Anjak Aceh (Malod and Kemal, 1996; Sibuet et al., 2007; Graindorge et al., 2008;



Gambar 7. Hasil Analisis morfostruktur kawasan Busur Muka Aceh yang memperlihatkan pola kelurusan struktur paralel dengan kelurusan lembah atau gawir.



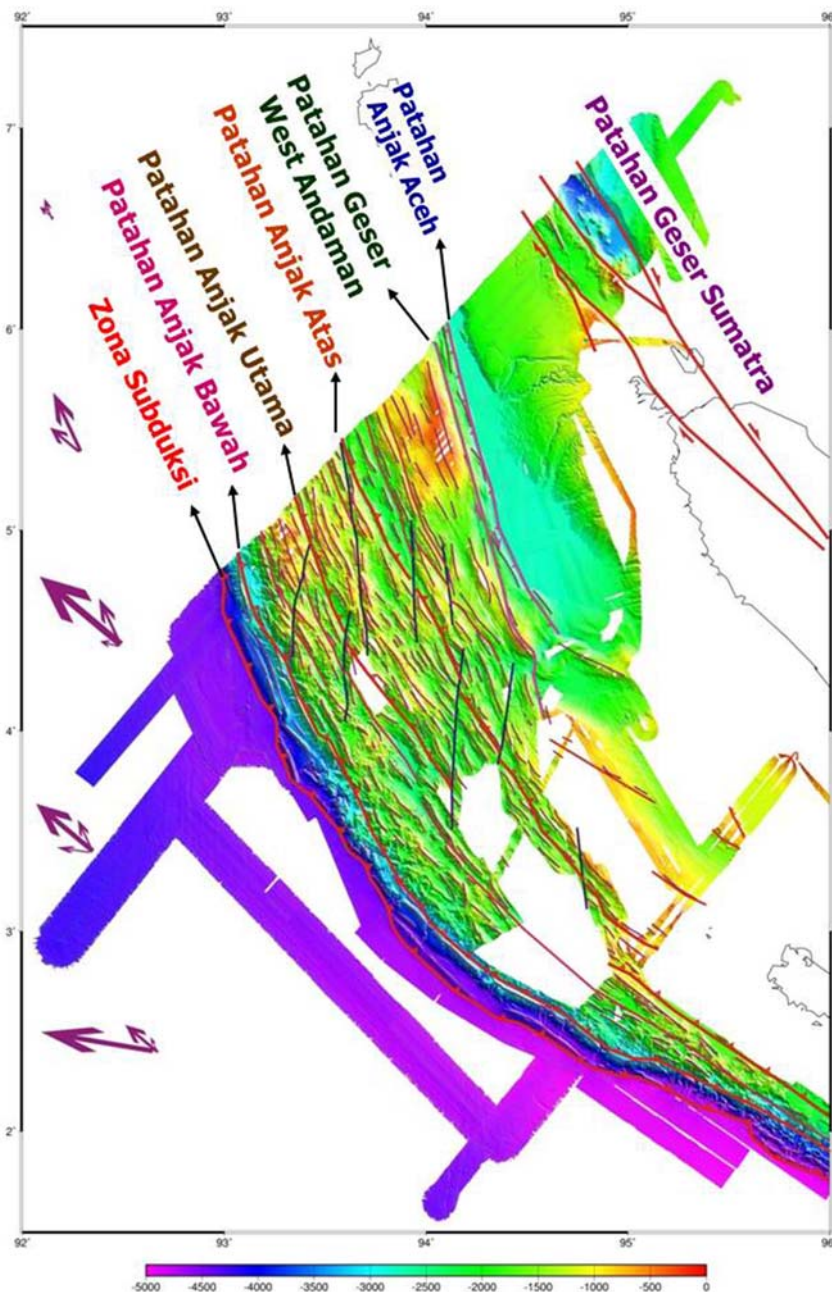
Gambar 8. Kelurusan punggungan yang berkembang di kawasan Busur Muka Aceh berdasarkan Analisis morfostruktur. Arah panah di sisi kiri adalah frekuensi dan arah kelurusan punggungan.

Klingelhofer, Dessu, dan Permana, H., 2006). Ke arah timurlaut, di daratan Sumatra bagian utara, berkembang kelurusan struktur berarah baratlaut-tenggara yang merupakan bagian dari patahan geser Sumatra (Sieh dan Natawidjaja, 2000).

Pola struktur yang berkembang dalam Sistem busur muka Aceh dikontrol oleh subduksi miring Lempeng India dibawah Lempeng Eurasia. Sebelum Awal Miosen (20 Jtl), Sumatra mempunyai posisi berarah relatif utara-selatan (Hall, 1996). Pada kondisi tersebut, diperkirakan tegasan utama lebih didominasi oleh tegangan kompresi membentuk kelurusan struktur sejajar dengan palung berupa patahan

anjak dan sabuk perlipatan seperti yang berkembang menjadi kompleks patahan anjak (Gambar 7). Pada Miosen Tengah (15 Jtl), Sumatra mengalami rotasi berlawanan jarum jam akibat berlanjutnya pergerakan India menabrak Eurasia (Hall, 1996), sehingga Sumatra mempunyai posisi berarah hampir baratlaut-tenggara. Pada tahap ini, komponen penunjaman miring mulai berkembang dicirikan oleh terjadi penurunan tegangan/gaya kompresi diikuti naiknya tegangan/gaya geser (*shear/S*) selama terjadinya rotasi Sumatra (Hamilton, 1981; 1979; Malod and Kemal, 1996; Hall, 1996). Penunjaman miring dan tegasan geser semakin meningkat sejak 15-10 Jtl (Hall, 1996). Hal tersebut mengakibatkan Sistem patahan anjak maupun kompleks perlipatan mengalami tarikan sehingga membentuk struktur relatif *en echelon* akibat meningkatnya tegasan geser Kelurusan-kelurusan struktur sejajar palung mengalami tarikan sehingga terpotong-potong oleh kelurusan berarah utara-selatan seperti diperlihatkan pada Gambar 8.

Meningkatnya tegasan geser akibat penunjaman miring lempeng terutama sejak Akhir Miosen sampai Holosen (Hall, 1996) menyebabkan terjadinya penguraian tegasan utama (*slip partitioning*) menjadi gaya kompresi (*frontal*) dan gaya geser selama subduksi berlangsung (Malod dan Kemal, 1996; Baroux et al., 1998). Derajat penguraian tegasan utama berbeda dan lebih jelas di bawah prisma akresi dan busur muka. Selama tahap ini, tegasan geser menjadi dominan (Baroux et al, 1998) sehingga membentuk kelurusan-kelurusan struktur yang memotong kelurusan sejajar palung atau kelurusan berarah utara-selatan. Kelurusan hampir berarah utara-selatan diperkirakan sebagai patahan geser dekstral (Graindorge et al., 2008). Kajian sismik pantul membuktikan salah satu kelurusan utara-selatan merupakan patahan geser dekstral (Berglar et al., 2009).



Gambar 9. Unsur struktur yang berkembang di daerah Busur Muka Aceh hasil penafsiran data batimetri. Arah panah di sisi kiri adalah vector dan arah kelurusan punggung.

Hasil seluruh penafsiran unsur struktur pada Busur Muka Aceh diperlihatkan pada Gambar 9.

KESIMPULAN

Analisis morfostruktur pada peta batimetri di kawasan zona penunjaman dan Busur Muka Aceh telah dapat digunakan untuk menafsirkan minimal tiga unit pola kelurusan yang berbeda yaitu:

Zona penunjaman lempeng sepanjang Palung Sunda dapat dipetakan lebih akurat melalui peta batimetri terbaru

Kelurusan lembah dan gawir di dalam kompleks Busur Muka Aceh membentuk unsur patahan utama yang ditafsirkan sebagai sesar anjak berarah utara baratlaut-selatan tenggara di kawasan utara lintang 5°U dan berbelok hampir barat-timur di selatan Pulau Simeulue (Gambar 7 dan 8). Komplek sesar anjak di dekat palung (sesar anjak bawah - Gambar 9) atau pada zona deformasi lebih aktif dibandingkan dengan Komplek Sesar Anjak Utama dan sesar anjak yang dekat dengan Cekungan Busur Muka Aceh (Komplek Sesar Anjak Atas). Kelurusan struktur berupa gawir dan lembah sempit umumnya berarah utara-selatan yang memotong kelurusan berarah baratlaut-tenggara (Gambar 7). Kelurusan tersebut dianggap kelurusan paling muda berupa patahan geser dekstral yang kemungkinan masih aktif.

Kelurusan perbukitan yang membentuk kelurusan *en echelon* dengan arah bervariasi utara baratlaut-selatan tenggara dan baratlaut – tenggara, dan kemudian berubah menjadi berarah hampir barat-timur di sekitar Pulau Simeulue (Gambar 8). Pola kelurusan perbukitan tersebut ditafsirkan sebagai respon dari naiknya tingkat kemiringan bidang penunjaman lempeng dari daerah Simeulue ke arah Lintang 5°U -7°U atau secara umum dari selatan Sumatra ke arah utara Sumatra (Baroux et al., 1998)

Unsur struktur geologi umumnya berarah baratlaut-tenggara ditafsirkan sebagai patahan

anjak (*thrust fault*) dengan bidang kemiringan (ditafsirkan) berarah timurlaut. Kemungkinan sebagian dari patahan anjak tersebut berkembang dari kompleks lipatan atau *thrust fold*. Salah satu kelurusan di tepi cekungan Aceh dinamakan sebagai Patahan Aceh yang diperkirakan sebagai patahan *Back Thrust* (Chauhan et al., 2009) bersebelahan dengan Patahan geser *West Andaman (WAF)* merupakan penerusan patahan dari kawasan Andaman-Nicobar. Suatu morfologi punggung dengan kedalaman sampai 300 m dinamakan Punggung Aceh yang bersebelahan dengan Cekungan Aceh.

Menggunakan kaidah hukum potong memotong dapat disebutkan bahwa kelurusan berarah utara – selatan (U-S) merupakan unsur struktur relatif paling muda dibandingkan dengan kelurusan lembah dan perbukitan yang berarah Baratlaut-Tenggara (Bl-Tg) atau kelurusan barat-timur.

Daerah Busur Muka Aceh mengalami minimal empat periode pembentukan struktur sejak penunjaman lempeng terjadi. Antara lain periode pembentukan palung (Palung Sunda) dan pembukaan cekungan busur muka (Cekungan Aceh) disertai pengisian sedimen dalam cekungan. Tahap berikutnya adalah pembentukan zona prisma akresi dengan Sistem sesar anjak dan terakhir terbentuk patahan geser dekstral berarah utara-selatan akibat meningkatnya derajat kemiringan subduksi lempeng.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kegiatan pengolahan dan penulisan makalah ilmiah didanai melalui Kegiatan Program Insentif Peneliti dan Perekayasa LIPI dengan sumber dana dari kerjasama LIPI dan Departemen Pendidikan Nasional Tahun Anggaran 2009. Kami ucapkan terimakasih kepada Prof. Singh (IPG-Paris, Prancis) penanggung jawab program SAGER dan Dr. Klingelhoefer (IFREMER, Brest, Prancis) yang telah memberikan bantuan dalam penggunaan data batimetri. Begitu pula ucapan terimakasih pada Dr. Henstock dan Dr. McNeill (NOC-UK) atas dukungannya dalam pemanfaatan data batimetri hasil ekspedisi HMS Scott 2005. Pengolahan data batimetri dikerjakan oleh rekan Pradiya Avianto dari Puslit Oseanografi LIPI.

PUSTAKA

- Baroux, E., Avouac, J-P, Bellier, O., and Sebrier, M. 1998. Slip-partitioning and fore-arc deformation at the Sunda Trench, Indonesia. *Terra Nova*, 10, 139-144. 1998.
- Berglar, K., Gaedicke, C., Dieter Franke, D., Ladage, S., Frauke Klingelhoefer, F., Djajadihardja, Y.S. 2009. Structural evolution and strike-slip tectonics off north-western Sumatra. *Tectonophysics PII*: S0040-1951(09)00562-9; doi: 10.1016/j.tecto.2009.10.003. Accepted date: 6 October 2009
- Chauhan, A.P.S, Singh, S.C, Nugroho D. Hananto, N.D., Carton, H., Klingelhoefer, F., Dessa, J.-X., Permana, H., White, N. J. 6 Graindorge D. and SumatraOBS Scientific Team. 2009. Seismic imaging of forearc backthrusts at northern Sumatra subduction zone. *Geophys. J. Int.* (2009) doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04378.x
- Daly, M. C., Cooper M.A., Wilson I., Smith, D.G. and Hooper, B.G.D., 1989, Cenozoic plate tectonics and basin evolution in Indonesia.: *Marine end Petroleum Geology*, v. 8, February, p. 2 - 21.
- Dessa, J-X., F. Klingelhoefer, D. Graindorge, C. André, H. Permana, M.A. Gutscher, A.
- Chauhan, S. C. Singh, and the SUMATRAOBS scientific team. 2008. Megathrust Earthquakes Can Nucleate in the Fore-arc Mantle: Evidence From the 2004 Sumatra Event. *Sciences*.
- Diament, M., Harjono, H., Karta, K., Deplus, C., Dahrin, D., Zen, MT, Jr., Gerard, M., Lassal, O., Martinn, A., and Malod, J. 1992. Mentawai fault zone off Sumatra : A new key to the geodynamic of western Indonesia, *Geology*, v.20.
- General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) Digital Atlas (GDA). <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gebco/>.
- Graindorge, D., F. Klingelhoefer, J-C Sibuet, L. McNeill, T. J. Henstock, S. Dean, M-A
- Gutscher, J. X. Dessa, H. Permana, S. C. Singh, H. Leau, N. White, H. Carton, J. A. Malod, C. Rangin, K. G. Aryawan, A. K. Chaubey, A. Chauhan, D. R. Galih, C. J. Greenroyd, A. Laesanpura, J. Prihantono, G. Royle, U.

- Shankar. 2008. Impact of lower plate structure on upper plate deformation at the NW Sumatran convergent margin from seafloor morphology. *Earth and Planetary Science Letters* 275 (2008) 201–210
- Hall, R., 1996. Reconstructing Cenozoic SE Asia. *Geological Society Special Publication*, v. no. 106, p. p. 153 – 184.
- Hall, R., 2002. Cenozoic geological and plate tectonic evolution of SE Asia and the SW Pacific: computer-based reconstructions, model and animations, *Jour. Asian Earth Sci.*, 20, 353–434, 2002.
- Hamilton, W. 1979. *Tectonics of the Indonesian region*, US Government Printing Office, Washington, DC.
- Hamilton, W. 1981. Subduction in the Indonesian region. Talwani, M., ed. *Island arcs deep sea trenches and back arc basin*. Walter C. Pitman III. AGU. Maurice Ewing Series 1. Washington D.C., 2nd Printing. 1981.
- Henstock, T.J., McNeill, L.C. and Tappin, D.R. 2006. Seafloor morphology of the Sumatran subduction zone: Surface rupture during megathrust earthquakes? *Geology*, v34, pp485-488, 2006.
- Karig, D.E., Lawrence, M.B., Moore, G.F., Curry, J.R. 1980. Structural framework of the fore-arc basin, NW Sumatra. *Jour. Geol. Soc.* (London) 137, 77– 91.
- Karig, D., S. Suparka, G. Moore, and P. Hehanusa. 1979. Structure and Cainozoic evolution of the Sunda arc in the central Sumatra region, *AAPG Mem.*, 29.
- Klingelhoefer, F., Dessa, J-X. and Permana, H. 2006. On board “Marion Du Fresne” from Jakarta 07/07/2006 to Colombo 09/08/2006. Ifremer – Centre de Brest – BP 70 – 29280 Plouzané – France Phone: (33) 298 22 42 21 (*On board Report*, unpublished)
- Laughton, A.S ; J.G Sclater, & D.P McKenzie. 1973. The Structure and Evolution of the Indian Ocean, Implication of Continental Drift to The Earth Sciences, Vol 1, *Academic Press*, London and New York.
- Malod, J.A. & Kemal, B.M. 1996. The Sumatra margin: oblique subduction and lateral displacement of the accretionary prism. From Hall, R. & Blundell, D. (eds). 1996. Tectonic Evolution of Southeast Asia. *Geological Society Special Publication* No. 106, pp. 19-28.
- Metcalfe, I. Southeast Asia terranes: Gondwanaland origins and evolution. 1993. *Gondwana Eight*, Findlay, Unrug, Banks & Veevers (eds) @ 1993. Balkema, Rotterdam. ISBN 90 5410304 3.
- Morley, C.K., 2002. Tectonic Setting of Continental Extensional Provinces and Their Impact on Sedimentation and Hydrocarbon Prospectivity. Sedimentation in Continental Rifts. SEPM Special Publication No. 73, Copyright # 2002 SEPM (*Society for Sedimentary Geology*), ISBN 1-56576-082-4, p. 25-55.
- Permana, H., Singh, S. C, Hananto, N.D., Natawidjaja, D.H., Harjono, H., A. Chauhan and P. Avianto. 2009. On Land-Offshore geological structure correlation: a morpho-structures study of Mentawai Islands. *Asia Oceania Geosciences Society*, Singapore, 11-15 Agustus 2009 (unpublish-oral presentation).
- Permana, H., S. C. Singh & Research Team (N. Hananto, A. Chauhan, M. Denolle, A. Hendriyana, Sumirah, A.W. Djaja, E. Rohendi, C. Sudjana, J. Prihantono, D.D. Wardhana). 2008. Submarine landslide and Localized Tsunami Potentiality of mentawai Basin, Sumatra, Indonesia. *ICTW Electronic publication.*, Nusa Dua, Bali. Kementerian Riset dan Teknologi.
- Pubellier, M., Rangin, C and Le Pichon, X. 2005. Deep Offshore Tectonics of South East Asia (Dotsea). A synthesis of deep marine data in Southeast Asia. *Memoires de la Societe Geologique de France*, 2005, n.s., no. 176
- Schlüter, H.U., Gaedicke, C., Roeser, H.A., Schreckenberger, B., Meyer, H., and Reichert, C., Djajadihardja, Y., Prexler, A. Tectonic features of the southern Sumatra-western Java fore-arc of Indonesia. *Tectonics*, vol. 21, no. 5, 1047, doi: 10.1029/2001TC901048. 2002.

- Sibuet, J.-C., Rangin, C., Le Pichon, X., Singh, S., Cattaneo, A., Graindorge, D., Klingelhoefer, F., Lin, J.-Y., Malod, J.A., Maury, T., Schneider, J.-L., Sultan, N., Ueber, M., Yamaguchi, H., the "Sumatra aftershocks" team, 2007. 26th December 2004 Great Sumatra–Andaman Earthquake: Seismogenic Zone and Active Splay Faults. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 263, pp. 88–103. doi:10.1016/j.epsl.2007.09.005.
- Sieh, K. and Natawidjaja, D.H. 2000. Neotectonics of the Sumatran fault, Indonesia. *J. Geophys. Res.* 105:28295–326
- Singh, S., and Permana, H. 2008. PreTIGAp 2008. Pre-Tsunami Investigation of Seismic Gap. June 26, 2008. *On Board report*. Unpublish.
- Singh, S.C., Hananto, N.D., Chauhan, A.P.S., Permana, H., Denolle, M., Hendriyana, A. and Natawidjaja, D.H. 2009. Evidence of active backthrusting at the NE Margin of Mentawai Islands, SW Sumatra. *Geophys. Jour. Int.* (2009) doi: 10.1111/j.1365-246X.2009.04458.x
- Susilohadi, S., Gaedicke, C., and Ehrhardt, A. 2005. Neogene structures and sedimentation history along the Sunda forearc basin off southwest Sumatra and southwest Java. *Marine Geology* , 219 (2005) 133-154.
- Wessel, P. and Smith, W.H.F. 2007. The Generic Mapping Tools GMT V. 4.2.0. A Map-making .