

Model Struktur Geologi Zona Krakatau, Implikasi terhadap Perkembangan Sedimentasi Zona Krakatau

Alfathony Krisnabudhi^{1*} Agus Men Riyanto²⁾ Maaruf Mukti³⁾ Muhammad Gazali Rachman¹⁾

¹⁾Geological Engineering Department Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta
Jl.Padjajaran (Ringroad Utara) No.104 Condongcatur, Sleman, Yogyakarta 55283

²⁾Research Center for Geological Disaster, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bandung, Indonesia

³⁾Research Center for Geological Resources, National Research and Innovation Agency (BRIN), Bandung, Indonesia

*Email: alfathony.krisnabudhi@upnyk.ac.id

ABSTRAK

Krakatau merupakan salah satu zona paling aktif secara struktur geologi dan vulkanisme di area Indonesia bagian barat. Keberadaan struktur geologi yang terdapat pada zona ini diinterpretasikan memiliki peran dalam perkembangan kegunungapian khususnya pada kompleks Krakatau. Studi ini dilakukan dengan mengintegrasikan hasil re-interpretasi data bawah permukaan berupa seismik 2D dan hasil analisis momen tensor serta data permukaan berdasarkan multibeam satu *arc* per detik. Integrasi tersebut dilakukan guna mengetahui model struktur geologi baik secara kinematik dan dinamikanya serta implikasinya terhadap perkembangan stratigrafi area Krakatau.

Interpretasi *style* structure memperlihatkan bahwa area Krakatau didominasi oleh sistem extensional dimana sesar normal planar mendominasi dan membentuk geometri graben Krakatau. Geometri graben memiliki arah yang paralel utara-selatan dengan keberadaan sesar normal planar dari *West Krakatau Fault* (WKF) dimana keberadaan kelompok sesar tersebut diinterpretasikan juga memiliki peranan penting dalam mengontrol intrusi serta sedimentasi pada zona Krakatau. Terdapat empat unit stratigrafi pada zona Krakatau yang terbagi menjadi dua sistem sedimentasi; 1) pre-extensional dan 2) syn-extensional sistem. Unit 1 merupakan unit yang terendapkan pada umur Oligosen akhir-Miosen awal dimana unit 1 terendapkan sebelum sistem extensional bekerja sehingga unit ini dikategorikan sebagai sedimen pre-extensional. Unit 2 hingga unit 4 terendapkan pada umur Miosen tengah hingga Pleistosen, keberadaan unit 2 hingga 4 memiliki ketebalan yang bervariasi, pada area graben Krakatau unit 2-4 sangat tebal sementara pada area Krakatau *ridge* ketebalan unit 2 hingga 4 terlihat lebih rendah dibandingkan Krakatau graben. Berdasarkan hal tersebut unit 2 hingga unit 4 dikategorikan sebagai sedimen syn-extensional. Keberadaan sedimen syn-extensional sangat berhubungan erat dengan masifnya pembentukan cekungan *pull-apart* Semangko dimana inisiasi pembentukan cekungan tersebut dimulai pada kurun waktu Miosen tengah. Keberadaan struktur extensional pada graben Krakatau juga diduga menjadi agen munculnya intrusi *dyke*, intrusi yang terjadi diinterpretasikan terjadi pada kurun waktu Pleistosen sehingga sedimen unit 1 hingga unit 4 bagian bawah terpotong oleh intrusi.

Kata Kunci: Krakatau, extensional, graben, sedimentasi, stratigrafi

ABSTRACT

Krakatau is one of the most active zones in terms of geological structure and volcanism in the western part of Indonesia. The existence of geological structures found in this zone is interpreted as having a role in the development of volcanoes, especially in the Krakatau complex. This study was carried out by integrating the results of the re-interpretation of subsurface data in the form of 2D seismic and moment tensor analysis results and surface data based on multibeam one arc per second. The integration was carried out to determine the kinematic and dynamic structural model and its implications for the stratigraphic development of the Krakatau area.

The interpretation of the style structure shows that the Krakatau area is dominated by an extensional system where the normal planar fault dominates and forms the Krakatau graben geometry. The graben geometry has an N-S parallel direction with the existence of the normal planar fault of the West Krakatau Fault (WKF), where the existence of this fault group is also interpreted to have an essential role in controlling intrusion and sedimentation in the Krakatau zone. There are four stratigraphic units in the Krakatau zone which are divided into two sedimentation systems; 1) pre-extensional and 2) syn-extensional system. Unit 1 is a unit that was deposited in the late Oligocene-early Miocene, where unit 1 was deposited before the extensional system worked. Hence unit is categorized as pre-extensional sediment. Units 2 to 4 were deposited in the middle Miocene to Pleistocene, where units 2 to 4 have varying thicknesses within the Krakatau graben area units 2-4 are very thick, while in the Krakatau ridge area, the thickness of units 2 to 4 looks lower than the Krakatau graben. Based on this, units 2 to 4 are categorized as syn-extensional

sediments. The existence of syn-extensional sediments is closely related to the massive formation of the Semangko transtensional system, where the initiation of the formation of the basin began in the middle Miocene period. The existence of extensional structures in the Krakatau graben is also thought to be the agent for dyke intrusions. The intrusions are interpreted to have occurred during the Pleistocene period, so the intrusions intruded lower sediment units 1 to 4.

Key Words: Krakatau, extensional, graben, sedimentation, stratigraphy

PENDAHULUAN

Latar Belakang

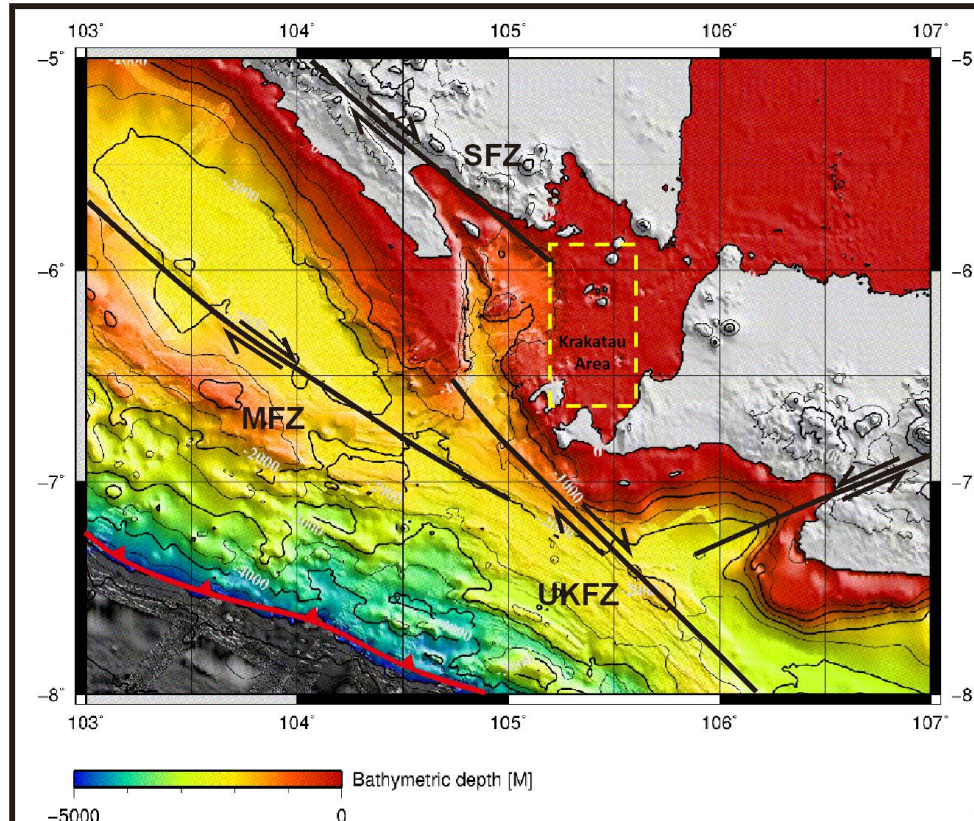
Krakatau merupakan area yang memiliki keunikan tersendiri secara geologi dimana area ini terletak pada sistem *active continental margin* (Hamilton, 1979 dan Moore dkk., 1980) yang memiliki aktivitas neotektonik dan gunung api yang cukup tinggi. Area ini juga berada pada sisi utara sistem sesar Sumatra berarah tenggara-baratlaut dimana area sesar tersebut masuk kedalam segmentasi bagian barat dari busur Sunda-Banda (Soeriaatmaja dkk., 2005). Keberadaan zona sesar Sumatra menjadi penting dalam mengontrol morfologi serta cekungan sepanjang Pulau Sumatra dan Selat Sunda. Kemunculan segmen sesar Sumatra bagian tenggara menyebabkan terbentuknya cekungan yang memiliki orientasi relatif utara-selatan (Krisnabudhi dkk., 2016). Cekungan dengan arah bukaan tersebut juga diakomodasi oleh pergerakan lempeng *sliver* Sumatra (Huchon dan Le Pichon, 1984) dimana bukaan cekungan tersebut dikenal sebagai cekungan *pull apart* Semangko (Krisnabudhi dkk., 2016; Mukti, 2018).

Keberadaan zona segmentasi bagian tenggara dari sesar Sumatra dan gunung api Krakatau menjadi penting dalam mendefinisikan perkembangan cekungan, baik secara dinamika struktur geologi maupun stratigrafi pada area Krakatau dimana masih terbatasnya penelitian terkait hal tersebut dikarenakan data bawah permukaan yang sangat terbatas. Penelitian ini fokus mengambarkannya *stye* struktur geologi area Krakatau dengan menggunakan integrasi data permukaan dasar laut serta data bawah permukaan guna mendeterminasi model struktur serta proses sedimentasi dari stratigrafi pada area Krakatau.

TATANAN TEKTONIK REGIONAL

Area Krakatau merupakan salah satu zona aktif deformasi baik secara tektonik maupun secara event gunung api di Indonesia (Bemmelen, 1949). Krakatau merupakan zona transisi tektonik, zona ini berada di perubahan sistem subduksi normal selatan Jawa menjadi subduksi miring sepanjang pantai barat Sumatra (Hamilton, 1979; Malod dkk., 1995; dan McCarthy dkk., 1997). Perubahan sistem penunjaman tersebut mengakomodasi terbentuknya kompleks struktur geologi masif yang mempengaruhi kontrol geologi terhadap sebagian besar Pulau Sumatra dan perairan Selat Sunda dimana struktur geologi tersebut adalah sesar mendatar manganan yang di sebut zona sesar Sumatra dan sesar mendatar manganan Ujungkulon (Diament dkk., 1992 dan Lelgemann dkk., 2000).

Wilayah kompleks Krakatau dibatasi oleh cekungan Sunda-Asri pada bagian utara, sementara pada bagian selatan dan barat kompleks Krakatau dibatasi oleh zona cekungan *pull-apart*/sistem transtensional Semangko. Secara umum batas utara kompleks Krakatau memiliki aktivitas neotektonik yang lebih tenang dibandingkan area barat dan selatan kompleks Krakatau dimana area tersebut sangat dikontrol oleh fitur sistem transtensional Semangko yang merupakan bagian dari segmen tenggara dari zona sesar Sumatra yang secara umum dikategorikan sebagai sesar aktif (Krisnabudhi dkk., 2016; Arisbaya dkk., 2016b; dan Natawidjaja, 2018). Perkembangan cekungan *pull-apart* Semangko tersebut dimulai pada kurun waktu Miosen tengah dimana pergerakan sesar Sumatra dan pengangkatan Bukit Barisan sudah mulai aktif. Perkembangan cekungan *pull-apart* Semangko diasumsikan memiliki kesamaan stratigrafi dengan area Krakatau.



Gambar 1 Kompleks Krakatau terletak pada bagian timur dari sistem transtensional Selat Sunda dimana terdapat dua sesar utama yaitu *Sumatra Fault Zone* (SFZ) dan *Ujungkulon Fault Zone* (UKFZ). Kedua sesar tersebut terbentuk akibat akomodasi subduksi *oblique* pada bagian barat Pulau Sumatra.

DATA DAN METODOLOGI

Studi yang dilakukan pada area Krakatau menggunakan integrasi data bawah permukaan dan permukaan yang mencerminkan dasar dari perairan Selat Sunda Indonesia. Kami melakukan re-interpretasi 2D seismik berdasarkan publikasi Schullter dkk., (2002), Susilohadi dkk., (2006) dan Mukti, (2016) untuk menentukan *structural style*, kinematika dan sejarah pengisian cekungan. Data multibeam GEBCO juga digunakan dalam penelitian ini dimana data tersebut memiliki resolusi satu *arc* per detik. Data multibeam tersebut digunakan untuk menginterpretasi pola kelurusan struktur serta bathimetri pada area penelitian. Terkait dengan identifikasi aktivitas kegempaan, kami menggunakan data seismisitas yang tersedia. Data seismisitas dan momen tensor digunakan untuk mengidentifikasi jalur kegempaan dan kinematika struktur pada area Krakatau. Keseluruhan data tersebut diintegrasikan guna menjelaskan model struktur geologi dan perkembangan sedimentasi zona Krakatau.

HASIL PENELITIAN

STRUCTURAL STYLE KRAKATAU

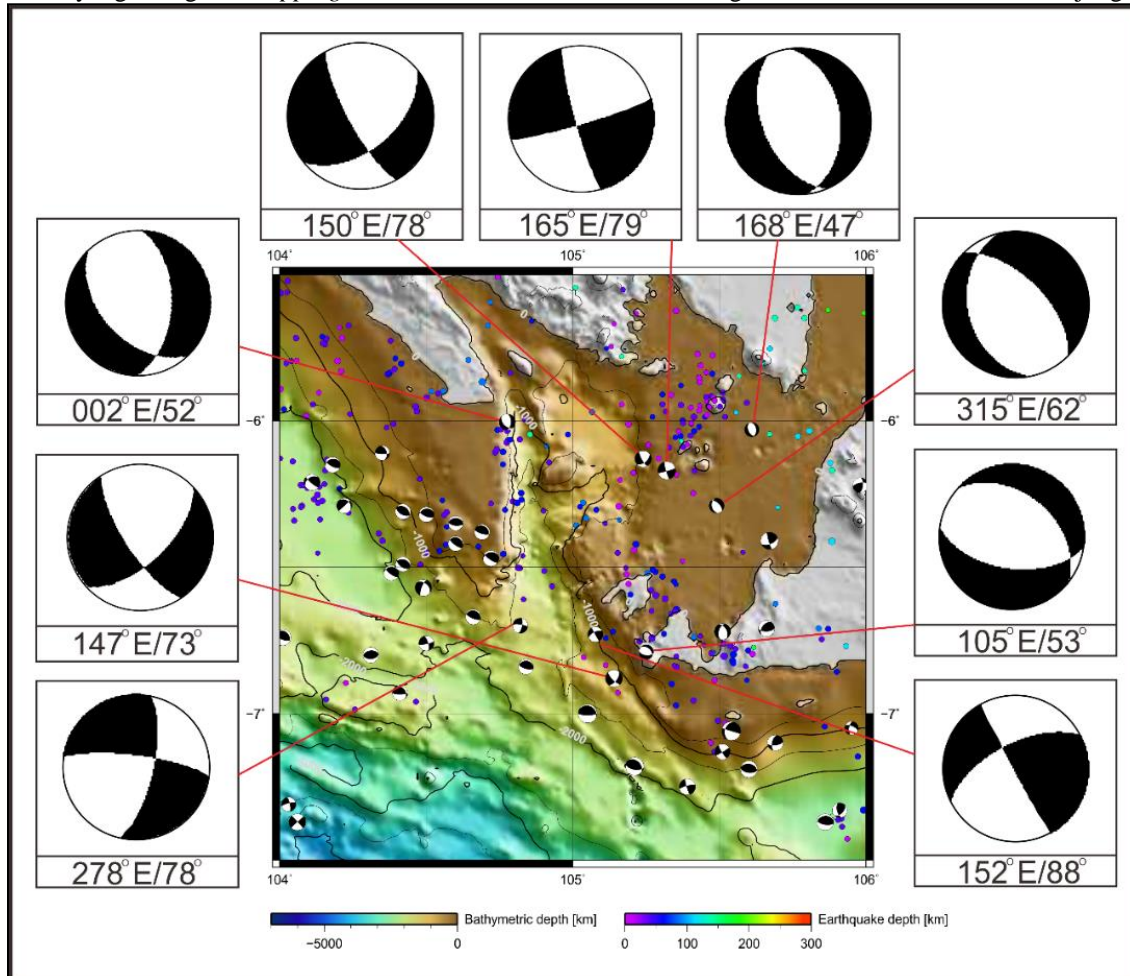
Analisis dan interpretasi struktur geologi dilakukan dengan menggunakan data bathimetri *swath*, seismik, dan data *focal mechanism*. Keseluruhan data tersebut diintegrasikan agar dapat mendeterminasi *structural style* pada area studi. Secara umum struktur yang hadir di area Krakatau merupakan efek dari hadirnya segmen bagian tenggara dari *great* sesar Sumatra dimana segmen bagian tenggara merupakan zona *overstepping* dari sesar Semangko dan sesar Ujung Kulon. Segmen tenggara dari sesar Sumatra ini diinterpretasikan berakhir pada batas zona subduksi di selatan Pulau Jawa.

INTERPRETASI SEISMISITAS, MOMEN TENSOR DAN MULTIBEAM

Keberadaan seismisitas yang cukup tinggi terekam pada wilayah Krakatau bagian utara dan selatan. Berdasarkan interpretasi, aktivitas seismisitas yang terjadi di area utara merupakan seismisitas yang berhubungan dengan gunung api Krakatau sementara pada area tengah dan selatan diinterpretasikan berhubungan dengan pergerakan segmen

bagian tenggara sesar Sumatra. Keberadaan segmen tersebut secara kelurusan morfologi terlihat dengan sangat baik pada data multibeam dimana pada area barat Krakatau terdapat cekungan *pull-apart* Semangko.

Hasil analisis momen tensor mendapati dua sesar normal ditemukan pada wilayah utara Kompleks Krakatau dengan kedudukan $N 168^{\circ}E/47^{\circ}$ dan $N 315^{\circ}E/62^{\circ}$, selain sesar normal dapat dijumpai juga dua sesar mendatar kanan *oblique* turun pada wilayah anantara Krakatau *ridge* dan graben Semangko timur bagian utara dengan kedudukan $N 150^{\circ}E/78^{\circ}$ dan $N 165^{\circ}E/79^{\circ}$. Sementara pada bagian selatan area Krakatau yang berada dekat dengan Pulau Panaitan didominasi oleh kelompok sesar normal dengan kedudukan $N 105^{\circ}E/53^{\circ}$ dan sesar mendatar kanan dengan kedudukan $N 152^{\circ}E/88^{\circ}$. Berdasarkan hasil analisis tersebut, secara umum area Krakatau saat ini dikontrol oleh sesar normal dan sesar mendatar kanan *oblique* dimana keberadaan kedua struktur tersebut terbentuk tidak lepas dari pengaruh pergerakan yang saling *overstepping* antara sesar mendatar kanan Semangko dan sesar mendatar kanan Ujungkulon.



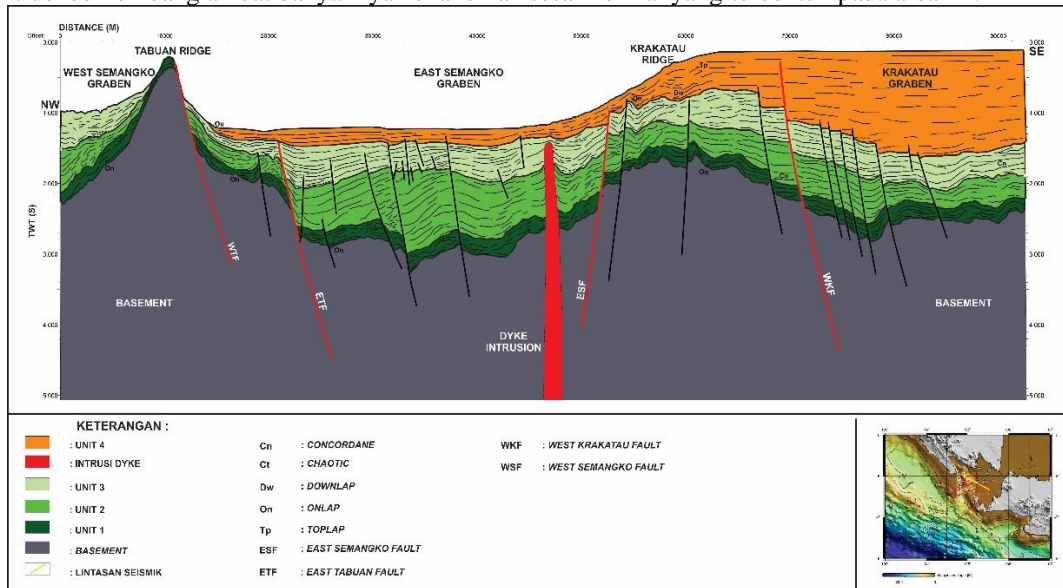
Gambar 2 Peta Momen tensor dan seismisitas perairan Selat Sunda

INTERPRETASI SEISMIK

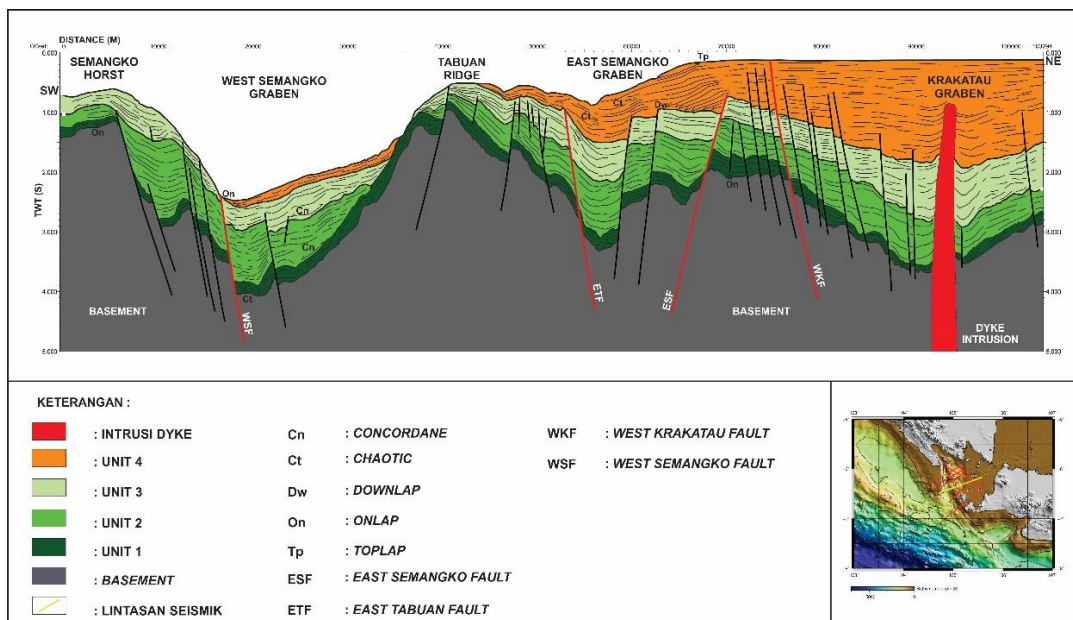
Data seismik yang digunakan dalam penelitian ini terpusat pada area Krakatau dimana hasil interpretasi memperlihatkan bahwa area ini didominasi oleh sistem extensional dimana sesar normal planar membentuk geometri graben dan half graben yang disebut sebagai Krakatau graben. Bagian barat Krakatau Graben dibatasi oleh Krakatau *Ridge* (Gambar 3) dimana *ridge* tersebut memisahkan antara graben Semangko bagian timur dengan *West Krakatau Fault* (WKF) yang memiliki arah utara-selatan.

Sementara berdasarkan penampang seismik berarah timur timurlaut-barat baratdaya (Gambar 4) memperlihatkan geometri graben Krakatau yang cukup dalam mencapai 4000 (ms). Berdasarkan interpretasi kemunculan sesar normal planar yang bersifat domino menjadi struktur utama yang terdapat pada graben Krakatau, selain itu berdasarkan

interpretasi seismik juga ditemukan intrusi *dyke* pada area central graben Krakatau dimana kami menginterpretasikan bahwa intrusi berkembang akibat banyaknya zona lemah sesar normal yang terbentuk pada area ini.



Gambar 3 Interpretasi seismik dengan arah barat-laut-tenggara dimana *style* struktur geologi area Krakatau didominasi oleh sistem extensional.



Gambar 4 Interpretasi seismik dengan arah timur-timurlaut-barat-baratdaya dimana *style* struktur geologi area Krakatau didominasi oleh sistem extensional. Sistem extensional yang terjadi di area Krakatau diinterpretasikan menjadi agen utama munculnya intrusi *dyke* berumur Pleistosen

STRATIGRAFI REGIONAL

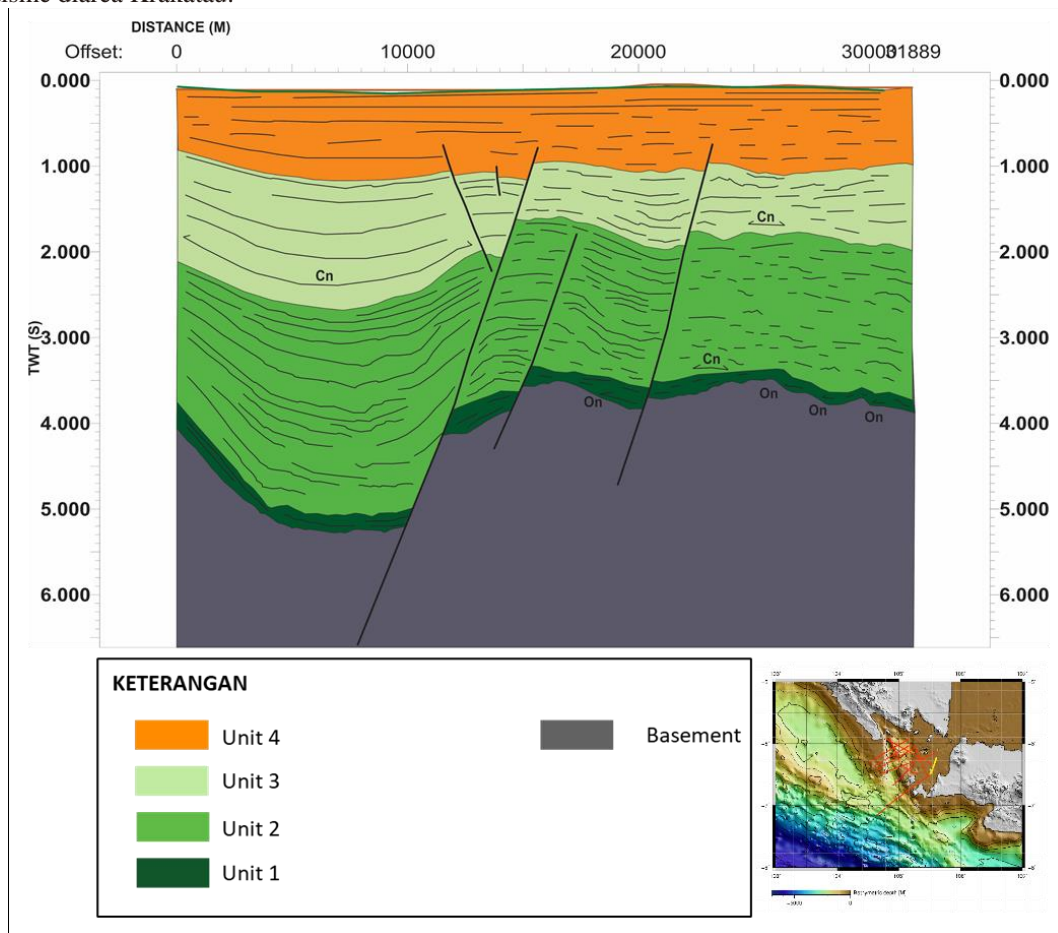
Pembagian satuan unit batuan serta penentuan lingkungan pengendapan pada daerah penelitian dilakukan berdasarkan interpretasi horison seismik setiap *top* unit batuan. Pembagian unit batuan berdasarkan interpretasi dan analisis karakter fasies seismik yang ada. Selain interpretasi data seismik refleksi 2D dalam pembagian unit satuan batuan, hubungan stratigrafi antar satuan batuan berdasarkan posisi stratigrafi yang diperoleh dari kesebandingan stratigrafi cekungan Mallingping dan cekungan busur muka Bengkulu dari referensi peneliti terdahulu maupun beberapa data yang didapatkan saat penulis melakukan penelitian juga menjadi dasar dalam pembagian satuan batuan daerah penelitian.

Penentuan umur unit satuan batuan mengacu pada data referensi penelitian terdahulu yang dimodifikasi berdasarkan hasil penelitian mengenai Selat Sunda (Susilohadi dkk., 2009) khusus bagian lepas pantai Banten dan Krakatau menggunakan hasil penelitian sumur eksplorasi AMINOIL dan Pertamina C-1-SX (Noumjaim, 1976).

STRATIGRAFI ZONA KRAKATAU

Stratigrafi zona Krakatau secara umum terendapkan pada area graben Krakatau. Stratigrafi pada area ini tersusun atas empat unit dimana secara umum memiliki umur yang relatif sama dengan stratigrafi pada area cekungan *pull-apart* Semangko. Secara geometri graben Krakatau lebih mendalam ke arah tenggara sehingga berdasarkan interpretasi seismik unit 2-hingga unit 3 relatif lebih tebal dibandingkan area barat laut. Berbeda dengan sedimen unit 3, unit ini secara umum memiliki ketebalan yang lebih masif dibagian timurlaut dibandingkan area tenggara.

Proses sedimentasi di graben Krakatau relatif sama dimana unit 1 memiliki ketebalan yang relatif konstan diseluruh area Krakatau. Sementara sedimen unit 2 hingga unit 4 memiliki ketebalan yang relatif lebih bervariasi dimana unit 2 dan 3 menipis kearah tinggian Panaitan, sementara unit 4 onlap terhadap unit 3 di area tengah graben Krakatau. Berdasarkan data dari sumur C-1-SX sedimen berumur Pliosen (ekuivalen unit 3) dan Pliostosen (ekuivalen unit 4) tersusun atas satuan batuan vulkanik klastik (Noumjaim, 1976) yang diinterpretasikan berasal dari aktivitas magmatisme diarea Krakatau.



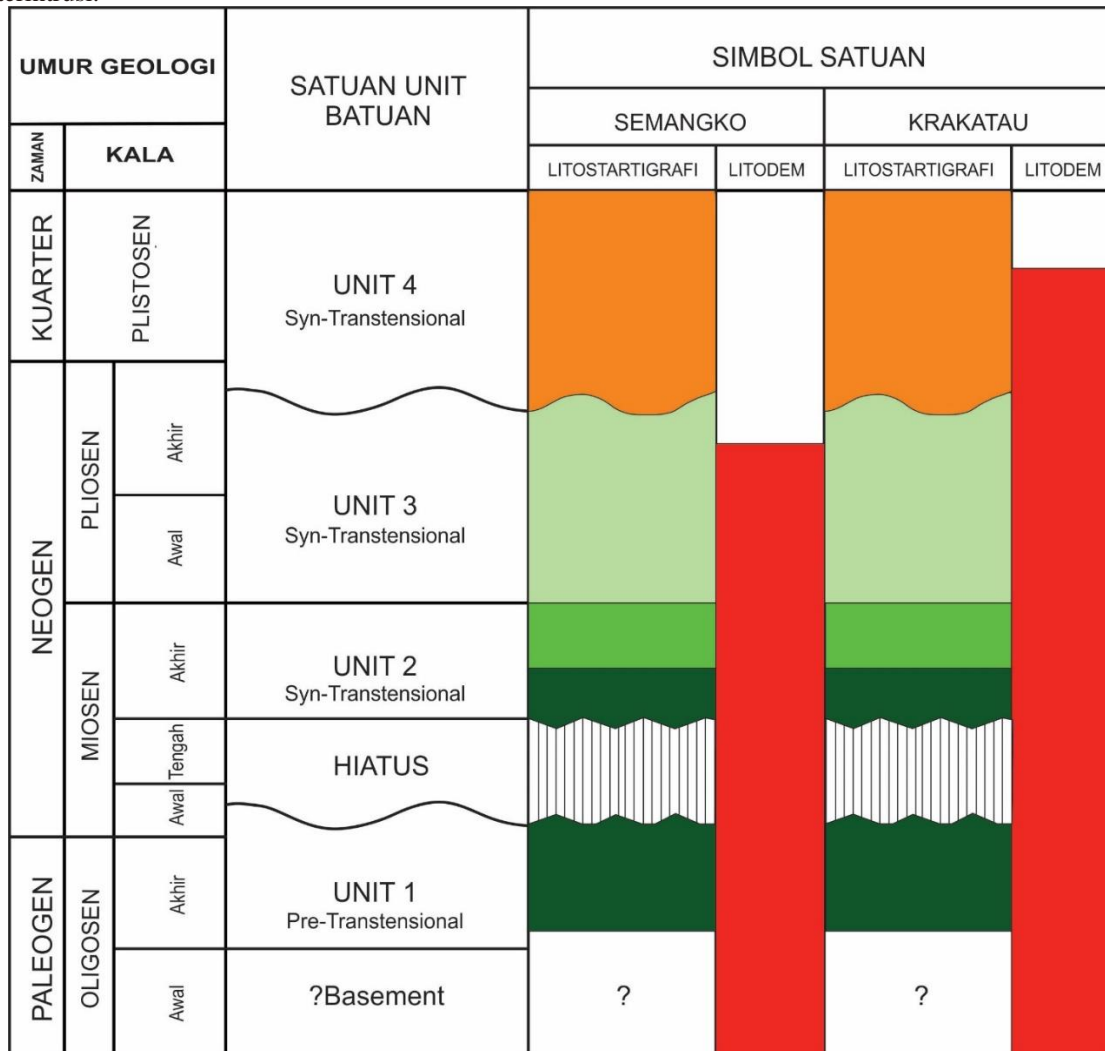
Gambar 5 Interpretasi seismik area Krakatau

DISKUSI DAN PEMBAHASAN

Perkembangan struktur geologi dan stratigrafi area Krakatau sangat berhubungan dengan interaksi kedua sesar mendatar; sesar Semangko dan Ujung Kulon. Kedua sesar tersebut merupakan segmen bagian tenggara dari sesar Sumatra dimana saat interaksi kedua sesar tersebut terjadi maka akan terjadi bukaan cekungan. Bukaan cekungan tersebut juga mempengaruhi area Krakatau dimana sistem extensional yang sangat masif juga dapat ditemukan pada area ini. Hubungan sedimentasi dengan kehadiran sistem sesar tersebut mengindikasikan bahwa terdapat dua sistem

pengendapan; 1) pre-extensional dan 2) syn-extensional. Unit yang dikategorikan sebagai sedimen pre-extensional adalah Unit 1 dimana unit ini terendapkan sebelum sistem extensional dimulai.

Unit 2 hingga unit 4 dikategorikan sebagai sedimen syn-extensional (Gambar 6) dimana hal ini terlihat bahwa unit 2 hingga unit 4 tebal pada area *half* graben dan graben Krakatau sementara area bagian barat unit tersebut mengalami penipisan khususnya pada batas area *basin side wall fault* antara graben Semangko timur dan graben Krakatau. Secara neotektonik, keberadaan seismisitas yang cukup tinggi mengindikasikan kedua sesar Semangko dan Ujungkulon dikategorikan sebagai sesar aktif bagian dari segmen tenggara sesar Sumatra keberadaan kedua sesar tersebut mempropagasi sistem extensional ke area Krakatau. Aktivitas sistem extensional pada area Krakatau juga diasumsikan mempengaruhi aktivitas magmatisme pada kompleks gunung api Anak Krakatau dimana rekahan-rekahan yang terbentuk pada area tersebut memungkinkan menjadi jalan magma naik ke permukaan. Aktivitas magmatisme pada area Krakatau juga terlihat pada interpretasi seismik dimana ditemukannya aktivitas intrusi pada area central Krakatau graben. Intrusi batuan beku tersebut diinterpretasikan sebagai intrusi andesitik dimana kami menginterpretasikan bahwa intrusi terjadi pada kurun waktu Pleistosen dimana unit 1 hingga unit 4 bagian bawah menjadi lapisan sedimen yang terintrusi.



Gambar 6 Stratigrafi Semangko dan Krakatau

KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini adalah:

1. Krakatau merupakan zona bukaan (extensional) yang terbentuk pada kurun waktu Miosen tengah dimana sistem extensional tersebut berkorelasi dengan pembentukan cekungan *pull apart* Semangko yang disebabkan oleh pergerakan sesar Sumatra dan sesar Ujungkulon.

2. Berdasarkan interpretasi seismik area Krakatau terdiri atas dua geometri; 1) graben Krakatau dan 2) Krakatau *ridge*. Krakatau *ridge* secara umum membatasi zona *pull-apart* Semangko dengan zona graben Krakatau.
3. Secara stratigrafi, area Krakatau ini memiliki empat unit sedimen; unit 1 hingga unit 4 dimana unit 1 dikategorikan sebagai sedimen pre-transtensional, unit 2 hingga unit 4 dikategorikan sebagai sedimen syn-transtensional.
4. Keberadaan zona extensional diinterpretasikan menjadi agen munculnya intrusi *dyke* berumur Pleistosen pada zona graben Krakatau.

DAFTAR PUSTAKA

- Arisbaya, I., Mukti, M.M., Permana, H., 2016b, Seismic evidence of the southeastern segment of the Sumatran Fault Zone in Sunda Strait and Southern Java, in: Proceedings GEOSEA XIV & 45th IAGI Annual Convention 2016.
- Bemmelen, R.W. van, 1949, The Geology of Indonesia, Vol. IA: General Geology of Indonesia and Adjacent Archipelagoes, The Hague.
- Diamant, M., Harjono, H., Karta, K., Deplus, C., Dahrin, D., Zen Jr., M.T., Gerard, M., Lassal, O., Martin, A., Malod, J., 1992, Mentawai Fault Zone off Sumatra: a new key to the geodynamics of western Indonesia. *Geology* 20, 259–262.
- Harjono, H. dkk, 1991, Seismicity of The Sunda Strait: Evidence for Crustal Extention and Volcanological Implications 10, 17–30.
- Huchon, P., Le Pichon, X., 1984, Sunda Strait and Central Sumatra fault. *Journal of Geology*. Vol 12, pp. 668–672.
- Krisnabudhi, A., Abdullah, F., dan Mukti, M.M., 2016, Palinspastic reconstruction of structural evolution in the Semangko pull apart basin, Sunda Strait: timing and kinematics. GEOSEA XIV Congress and 45th IAGI Annual Convention 2016.
- Lelgemann, H., Gutschef, M.-A., Bialas, J., Flueh, E.R., Weinrebe, W., 2000, Transtensional Basins in the Western Sunda Strait. *Geophys. Res. Lett.* 27, 3545–3548.
- Malod, J.A., Karta, K., Beslier, M.O., Zen, M.T., 1995, From normal to oblique subduction: Tectonic relationships between Java and Sumatra. *J. Southeast Asian Earth Sci.* 12, 85–93.
- McCarthy, A.J., Elders, C.F., 1997, Cenozoic deformation in Sumatra: Oblique subduction and the development of the Sumatran Fault, in: Fraser, A.J., Matthews, S.J. (Eds.), Petroleum Geology of Southeast Asia, Geological Society Special Publication, 126. *Geological Society London*, pp. 355–363.
- Moore, G.F., Curray, J.R., Moore, D.G., Karig, D.E., 1980, Variations in deformation along the Sunda forearc, northeast Indian Ocean. In: Hayes, D.E. (Ed.), Amer. *Geophys. Union Geophys., Monograph*, vol. 23, pp. 145–160.
- Mukti, M., 2018, Structural configuration and depositional history of the Semangk, pull-apart basin in the southeastern segment of Sumatra fault zone. *Jurnal Riset Geologi Dan Pertambangan*, 28, 115-128.
- Mukti, M., Singh, S., Arisbaya, I., Deighton, I., Handayani, L., Permana, H., Schnabel, M., 2016 Geodynamics of Sunda Strait forearc based on seismic reflection data, in: Prosiding Pemaparan Hasil Penelitian Geoteknologi LIPI 2015.
- Natawidjaja, D.H., 2018. Updating active fault maps and sliprates along the Sumatran Fault Zone, Indonesia, in: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. pp. 1–11.
- Noujaim, A.K., 1977, Drilling in a high temperature and over-pressured area, Sunda Straits, Indonesia. *Proc. Annu. Conv. Indonesia. Pet. Assoc.* 5 (2), 211–214.
- Schlüter, H.U., Gaedicke, C., Roeser, H. a., Schreckenberger, B., Meyer, H., Reichert, C., Djajadihardja, Y., Prexl, a., 2002, Tectonic features of the southern Sumatra-western Java forearc of Indonesia. *Tectonics*. Vol 21, pp. 11-1-11–15.
- Susilohadi, S., Gaedicke, C., Djajadihardja, Y., 2009, Structures and sedimentary deposition in the Sunda Strait, Indonesia. *Tectonophysics* 467, 55–71.