

Geologi Indonesia Bagian Barat dan Bagian Timur serta Kaitannya dengan Prospek *Carbon Capture and Storage* (CCS)

Geology of Western and Eastern Parts of Indonesia and Its Relationship to the Prospect of Carbon Capture and Storage (CCS)

Hadi Nugroho* dan Syaiful Bachri**

*Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Semarang. Email: hadinugroho@gmail.com

** Pusat Survei Geologi, Jl. Diponegoro No. 57, Bandung 40122. Email: syaifulbachri666@yahoo.co.id

Naskah diterima : 27 Februari 2015, Revisi terakhir : 24 April 2015, Disetujui : 27 April 2015

Abstrak - Secara umum Indonesia bagian barat memiliki stabilitas tektonik lebih tinggi, dengan kerentanan yang lebih rendah terhadap bahaya gempa bumi, khususnya di daerah Kalimantan, Jawa Bagian Utara-Barat, Sumatera bagian timur, serta kawasan di sebelah barat Kalimantan (Natuna dan sekitarnya). Penerapan teknologi EOR disarankan diterapkan di wilayah Indonesia Bagian Barat, khususnya di wilayah aman tersebut di atas, karena ketersediaan sumber emisi CO₂ dari ladang-ladang migas yang relatif tinggi dan keberadaan sumur-sumur tua, sementara di Indonesia timur tidak tepat untuk program EOR karena emisi CO₂ dari ladang-ladang migas terlalu kecil. Mineral *trapping* dapat dijadikan pilihan di masa akan datang di Indonesia Bagian Timur, mengingat banyaknya ketersediaan batuan ofiolit. Sementara penggunaan akifer dalam berair asin dapat diaplikasikan untuk menyimpan CO₂ yang dihasilkan PLTU, baik di Indonesia Barat maupun Timur. Batuan waduk CBM dapat diterapkan di Kalimantan maupun Sumatera, sementara penggunaan waduk hidrat gas untuk menyimpan CO₂ masih memerlukan penelitian lebih lanjut.

Kata kunci - Indonesia Barat, Indonesia Timur, tektonik, gempa bumi, EOR, CCS.

Abstract - In general the western part of Indonesia has more stable tectonic activity, with lower earthquake susceptibility, especially in Kalimantan, north-western part of Jawa, the eastern part of Sumatera, and in the area to the west of Kalimantan (Natuna and surroundings). EOR technology is proposed for the western part of Indonesia, particularly in those safe areas, due to the availability of relatively high emission sources from oil and gas fields and the occurrence of existing wells. On the other hand, EOR programme is not suitable for the eastern Indonesia since the CO₂ emission is too low. Mineral trapping can be alternative option in the future for eastern Indonesia since the abundance of ophiolite rocks. Meanwhile the use of saline aquifer can be applied for CO₂ storage which is produced by PLTU (Electric Steam Power Plants) either for eastern or western parts of Indonesia. CBM reservoir rocks can be applied in Kalimantan and Sumatera, meanwhile the use of hydrate reservoirs for CO₂ storage may take a further research.

Keywords - Western part of Indonesia, eastern part of Indonesia, tectonics, earthquakes, EOR, CCS.

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Carbon Capture and Storage (CCS) adalah salah satu upaya mitigasi terhadap perubahan iklim atau pemanasan global sebagai akibat meningkatnya emisi gas rumah kaca. Peningkatan emisi gas rumah kaca ini terutama diakibatkan oleh aktifitas manusia seperti pembakaran hutan dan kegiatan industri, misalnya industri migas dan industri petrokimia. Gas CO₂ merupakan gas rumah kaca yang paling menonjol yang dihasilkan oleh berbagai kegiatan manusia, yang

konsentrasinya di udara (atmosfer) makin meningkat seiring dengan bertambahnya berbagai kegiatan industri.

Dalam rangka menentukan tempat atau *site* untuk konstruksi penangkapan dan penyimpanan CO₂ perlu diperhatikan faktor-faktor geologi supaya tempat penyimpanan cukup aman dan terhindar dari kebocoran.

Maksud dan Tujuan

Tulisan ini bermaksud membahas secara umum berbagai faktor geologi di Indonesia bagian barat dan Indonesia bagian timur, khususnya dalam kaitannya dengan prospek penerapan *Carbon Capture and Storage* (CCS).

Faktor-faktor geologi tersebut antara lain adalah struktur geologi, kegempaan, ancaman aktifitas gunungapi, sebaran cekungan sedimen, keberadaan akifer air asin, keberadaan sumur-sumur migas yang memungkinkan ditingkatkan produksinya dengan metode EOR, keberadaan lapisan batubara dalam, serta kemungkinan adanya waduk hidrat gas, serta sebaran ofiolit.

Metodologi

Metodologi yang dipakai adalah membagi dua wilayah Indonesia, bagian barat dan bagian timur, yang memang menunjukkan pola tektonik dan struktur yang berbeda. Bagian barat dicirikan oleh tumbukan antara lempeng Indo-Australia dengan Eurasia, sementara di Indonesia bagian timur merupakan *triple junction* antara lempeng Eurasia, lempeng Pasifik dan lempeng Indo-Australia. Perbedaan pola tektonik ini kemudian dihubungkan dengan aktifitas struktur geologi yang ada, nilai kegempaan maupun aktifitas gunungapi, dan faktor-faktor geologi lainnya. Selanjutnya tiap-tiap faktor dihubungkan dengan faktor keamanan wilayah dan kecocokan untuk penerapan CCS.

Beberapa Metode CCS

Terdapat beberapa metode CCS, yaitu:

1. Penginjeksian CO₂ ke dalam batuan reservoir pada ladang-ladang migas untuk kepentingan menyimpan CO₂ sekaligus meningkatkan produksi minyak. Teknologi ini dikenal dengan nama teknologi EOR (*Enhanced Oil Recovery*). Teknologi ini terutama diterapkan pada sumur-sumur migas yang sudah lemah tenaga waduknya (*reservoir drive*), atau

dikenal dengan nama *depleted reservoir*.

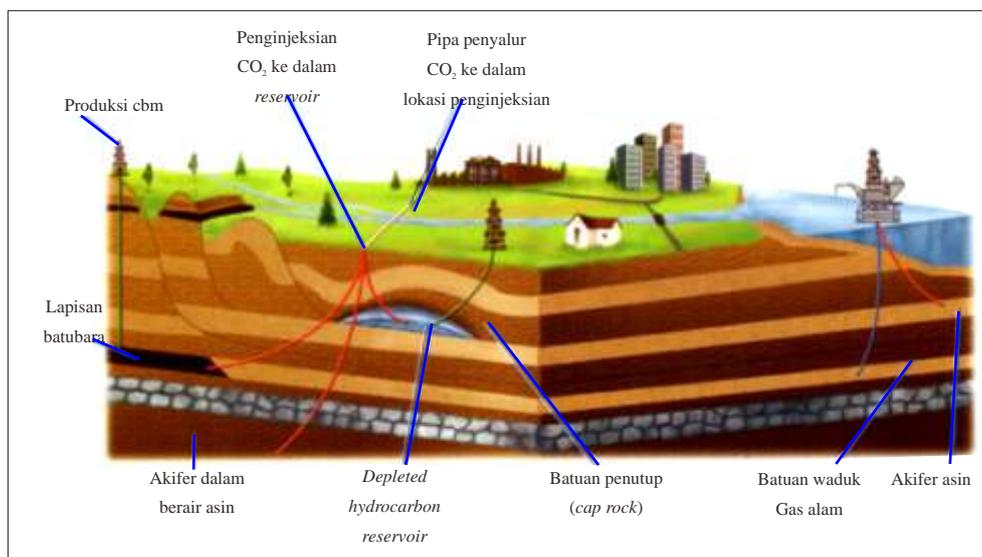
2. Penginjeksian CO₂ ke dalam batubara yang tak dapat diambil (*unmineable coal*). Penginjeksian ini dimaksudkan untuk menyimpan CO₂ sekaligus untuk meningkatkan produksi CBM (*Coal Bed Methane*).
3. Penginjeksian CO₂ ke dalam akifer dalam berair asin. Penginjeksian ini semata-mata untuk keperluan penyimpanan CO₂ tanpa ada maksud untuk meningkatkan produksi migas ataupun CBM.
4. Pemerangkapan atau karbonasi mineral dengan menggunakan batuan ofiolit atau batuan basa – ultrabasa. CO₂ di atmosfer akan bereaksi dengan batuan ofiolit dengan membentuk mineral karbonat. Sebenarnya reaksi ini secara alami sudah berlangsung, namun diperlukan waktu yang lama sekali untuk dapat terjadinya reaksi antara gas CO₂ di atmosfer dengan batuan ofiolit. Oleh karena itu pada saat ini berbagai ahli sedang melakukan penelitian untuk mempercepat proses reaksi tersebut (Bachri, 2008; 2010).

Dari berbagai metode tersebut di atas, baru metode yang pertama yang sudah diterapkan di Indonesia.

PEMBAHASAN DAN DISKUSI

Evolusi Tektonik Indonesia Bagian Barat

Sebagaimana dijelaskan oleh Katili (1975; Bachri, 2006), sejarah busur kepulauan Indonesia bagian barat dimulai pada awal Paleozoik, yaitu ketika terdapat dua sistem palung – busur yang berlawanan, yang dipisahkan oleh satu mikrokontinen, sebagaimana ditunjukkan oleh



Sumber : Dok. Pribadi

Gambar 1. Berbagai metode CCS

(1) adanya zona tunjaman di sebelah timur Semenanjung Malaya yang menghasilkan busur vulkano-plutonik di bagian tengah daerah tersebut, dan (2) adanya tunjaman ke arah benua Asia di bagian barat Sumatera.

Kegiatan penunjaman ke arah Asia berlanjut pada Karbon Akhir – Perem Awal, di Sumatera bagian barat, yang disertai kegiatan vulkanisme dan penempatan batuan granitan. Pada saat itu terjadi pula penunjaman ke arah baratdaya di tepian benua sebelah timur laut, yang diindikasikan oleh adanya batuan gunungapi dan granit di bagian timur Semenanjung Malaya dan Kalimantan bagian barat (Katili, 1975). Zona tunjaman ini sedikit bergeser ke arah samudera pada Perem – Trias Awal (Katili, 1989). Terbentuknya busur vulkano-plutonik pada pulau-pulau yang dikenal mengandung timah di Indonesia dan Semenanjung Malaya mengindikasikan bahwa zona Benioff kemungkinan lebih dangkal dibanding tunjaman sebelumnya (Katili, 1975).

Rifting pada Kapur Awal yang terjadi di Gondwana menyebabkan India terpisah dari Gondwana (Katili, 1989). Pada Kapur Akhir – Eosen Awal (70 ma), zona tunjaman di sebelah baratdaya dan timurlaut menjadi lebih besar karena masing-masing bergerak ke Samudera Hindia dan Laut Cina Selatan. Data paleomagnetik dari Plato Khorat (Daly dr., 1986) menunjukkan adanya rotasi kraton Sunda yang menyebabkan tertutupnya Laut Cina Selatan. Sementara itu tunjaman kerak samudera di bawah Kalimantan berlanjut, sementara vulkanisme dan penempatan granit terjadi sepanjang tepi kraton, termasuk Natuna dan Kepulauan Anambas.

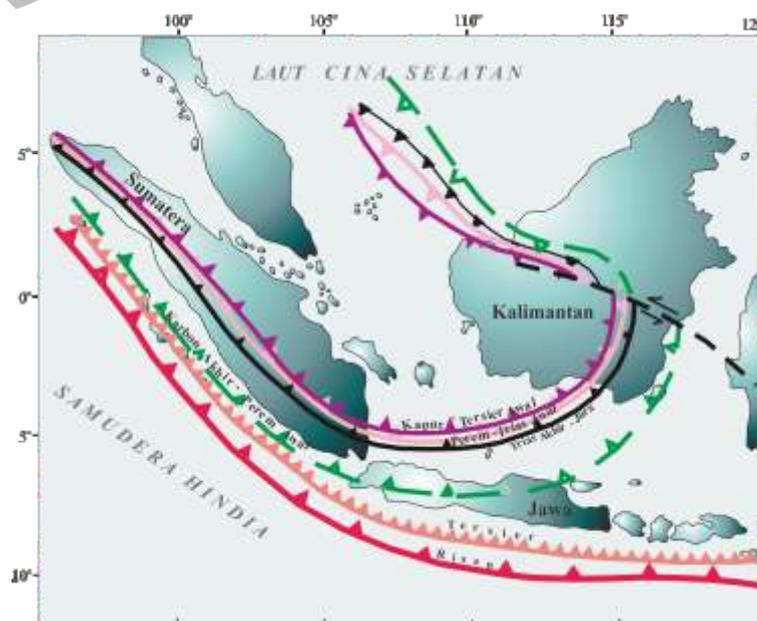
Tunjaman sepanjang jalur Lupa – Natuna di tepi baratdaya Laut Cina Selatan berhenti pada akhir Eosen (White & Wing, 1978, dalam Katili, 1989). Pada 50–45 ma atau Eosen Tengah terjadi tumbukan antara India dan Eurasia (Katili, 1989). Selanjutnya pada 40 ma (Eosen Akhir) terjadi pengekstrusian Birma dan Thailand (Tapponier dr., 1982) yang menghasilkan pembentukan cekungan – cekungan *pull apart* seperti Cekungan Sumatera Utara, Sumatera Tengah dan Sumatera Selatan. Kemudian tunjaman bergeser sedikit ke selatan, dimana parit bawahlaut (*trench*) terletak di selatan Sumatera dan Jawa. Pada sekitar 40 ma tersebut terjadi perubahan arah gerakan lempeng Pasifik, dari NNW ke WNW (Ben-Avraham & Uyeda, 1973). Terjadinya rotasi Kalimantan searah jarum jam menyebabkan terjadinya bukaan pada Laut Cina Selatan (Daly dr., 1986).

Pada Oligosen Akhir (30 ma), tunjaman di selatan Sumatera dan Jawa mengakibatkan terjadinya vulkanisme yang menghasilkan Formasi Andesit Tua. Zona tunjaman tersebut pada Pliosen bergeser ke selatan ke posisi Parit Sumatera – Jawa masa kini. Namun, berdasarkan sebaran batuan gunungapi, dapat disimpulkan bahwa vulkanisme Kenozoik Akhir sampai Holosen mengalami migrasi ke arah yang berlawanan, yang diduga dikarenakan kemiringan zona Benioff jauh lebih landai dibanding pada waktu pertengahan Tersier (Katili, 1975). Evolusi zona tunjaman Indonesia bagian barat sejak Karbon Akhir – Perem Awal hingga kini disajikan dalam Gambar 2.

Evolusi zona tunjaman yang berpola semi konsentris tersebut menunjukkan bahwa Indonesia Bagian Barat dicirikan oleh model tektonik *fixist* dibanding mobilistik yang ditandai tidak adanya pergerakan atau perpindahan lempeng secara horisontal yang signifikan. Pergeseran horisontal yang cukup signifikan selama ini hanya dikenal di sepanjang Sesar Sumatera, sehingga sesar tersebut menjadi pusat zona gempa bumi. Keberadaan sesar aktif ini perlu diwaspadai dalam rangka penempatan *site* CCS (Bachri, 2008; 2010).

Evolusi Tektonik Indonesia Bagian Timur

Pecahnya Gondwana telah menghasilkan sumbu pemekaran utama di Samudera Hindia yang kemudian diikuti oleh penyesuaian pola tunjaman di Indonesia.



Sumber : Katili (1989)

Gambar 2. Perkembangan zona tunjaman di Indonesia bagian barat.

Ketika Australia bergerak ke utara, Papua mendekat dan menumbuk busur Kepulauan Sepik (Downey, 1986) pada sekitar 30 juta tahun (Katili, 1989).

Pada sekitar 20 juta tahun lalu, suatu sistem parit – busur berarah barat – timur, sekitar 8000 km panjangnya, terbentuk dan membentang dari ujung barat Sumatera sampai Buru, bahkan lebih ke timur ke busur Melanesia melalui Jawa, kepulauan Lesser, Timor, Tanimbar, Kai dan Seram (Katili, 1989).

Sebelum benua Australia yang bergerak ke utara sampai di tepian Asia Tenggara busur vulkanik Sulawesi – Mindanao yang berarah utara – selatan dijumpai sekitar 8000 km di sebelah timur Kalimantan (Katili, 1978). Ke arah tenggara, busur Kepulauan Sepik yang berarah barat – timur menyatu dengan Papua dan memisahkan antara Australia dengan Pasifik (Katili, 1989).

Sekitar 20 ma, Papua dan Sepik yang kini menyatu menjadi mikrokontinen yang lebih besar, sampai di tepi lempeng Asia Tenggara dan bertumbukan dengan busur-dalam Melanesia yang menghadap ke selatan (Daly dr.,1986). Hal ini menyebabkan adanya interaksi antara lempeng Australia yang bergerak ke utara dan lempeng Pasifik yang bergerak ke arah barat – baratdaya, yang akibatnya menghasilkan beragam bentuk struktur. Beberapa sesar mendatar utama berarah barat-timur terbentuk, seperti Sesar Sorong dan Sesar Tarera – Aiduna. Sebagai akibat dari pergerakan sesar-sesar tersebut terbentuklah cekungan *pull apart*, misalnya Cekungan Salawati.

Sekitar 10 ma, terbentuk suatu tunjaman ke arah selatan melalui sebelah utara Papua, dan masih aktif sampai sekarang (Daly dr.,1986). Tunjaman ini tidak disertai kegiatan kegungungan di Papua.

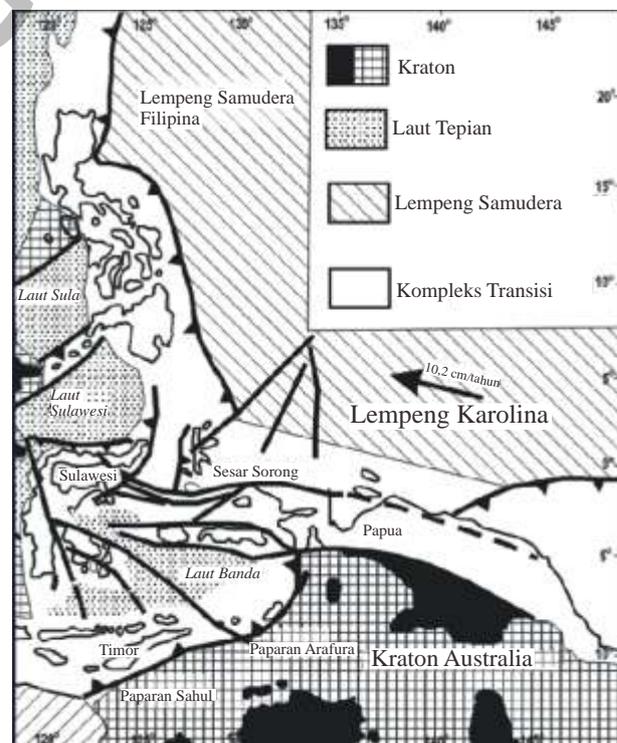
Sekitar 5 ma, ketika Australia masih bergerak ke utara, Papua berotasi ke kiri, akibatnya terjadilah pelengkungan ke barat laut pada Busur Banda yang semula berarah barat-timur. Sementara itu gerakan sesar-sesar transform telah menyebabkan beberapa mikrokontinen (Buton, Sula, dll) bertumbukan dengan Busur Sulawesi dan Halmahera yang menghadap ke timur, sehingga kedua busur kepulauan tersebut membentuk huruf K (Katili, 1989).

Tumbukan antara beberapa mikrokontinen dengan busur Sulawesi dan Halmahera tersebut mengakibatkan batuan ultrabasa terobdaksi di lengan timur dan lengan tenggara. Gaya tektonik ke arah barat melalui Sesar Sorong dan Sesar Matano mengakibatkan Sulawesi semakin terdorong ke arah Kalimantan dan menyebabkan tertutupnya Laut Sulawesi purba. Hal ini

menyebabkan terjadinya obdaksi kompleks tunjaman Meratus dan Pulau Laut yang berumur Kapur – awal Tersier, serta terjadinya Pegunungan Meratus (Katili, 1978).

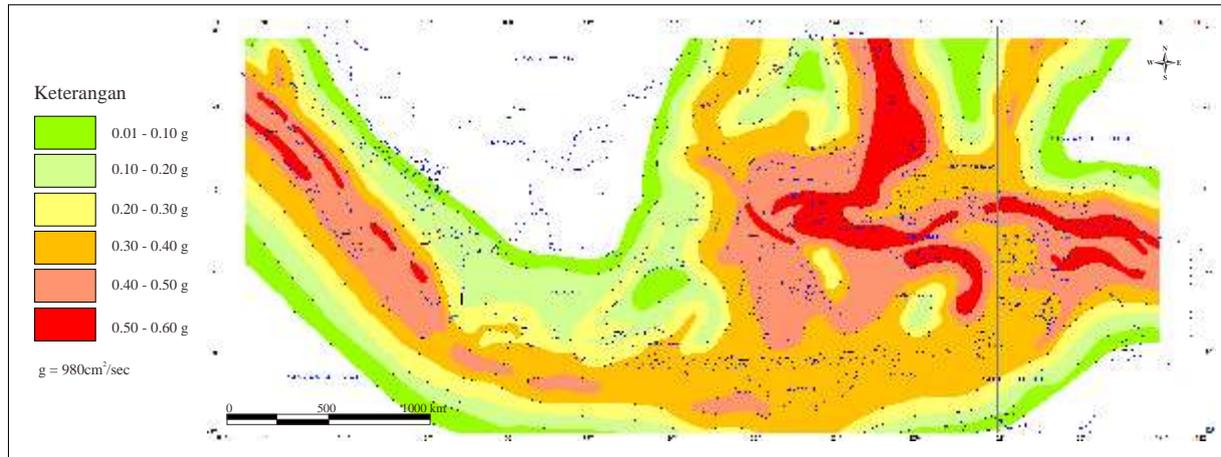
Laut Sulawesi Selatan, sekarang disebut Selat Makassar, terbuka lagi mulai akhir Pliosen, sebagai akibat adanya pemekaran sepanjang sesar-sesar *transform*, yang salah satunya yang terpenting menjadi Sesar Paternoster. Pemekaran ke arah timur di selatan Sesar Paternoster tersebut menyebabkan terjadinya tunjaman yang mengakibatkan terjadinya gunungapi Kuartar Lompobatang dan Barupu di lengan selatan Sulawesi (Katili, 1989).

Melihat evolusi tektonik Indonesia Bagian Timur seperti dikemukakan di muka, tampaklah bahwa model evolusi tektoniknya lebih bersifat mobilistik yang dicirikan dengan banyaknya sesar-sesar *transform* yang mengakibatkan adanya pergerakan lempeng secara horisontal yang cukup signifikan (Bachri, 2014 *in press*). Sesar-sesar tersebut sampai kini masih aktif, sehingga merupakan pusat-pusat zona gempabumi yang harus diwaspadai dalam rangka menentukan *site* CCS (Gambar 3).



Sumber : Simandjuntak & Barber, 1996

Gambar 3. Peta tektonik Indonesia Bagian Timur.



Sumber : Badan Geologi (2009a)

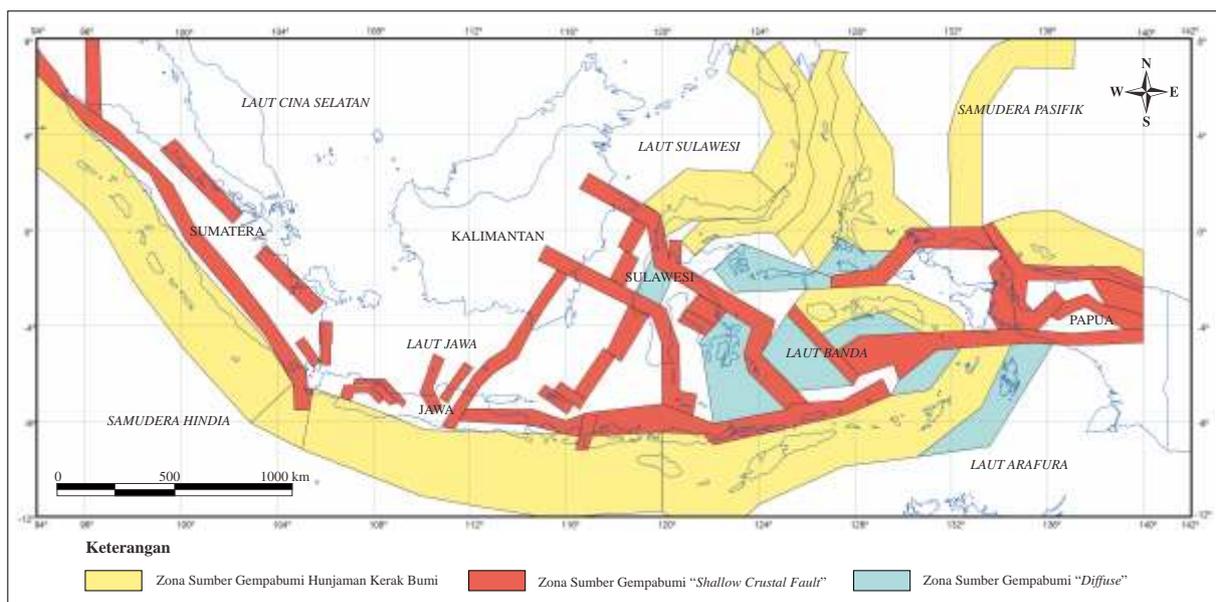
Gambar 4. Peta percepatan puncak batuan dasar Wilayah Indonesia untuk Periode Ulang 500 tahun.

Kegempaan

Indonesia yang merupakan pertemuan tiga lempeng utama, yaitu Indo-Australia, Pasifik dan Lempeng Asia Tenggara atau Lempeng Eurasia, sangat dipengaruhi oleh gempa tektonik. Berdasarkan data statistik dapat disusun peta percepatan puncak batuan dasar (Gambar 4), yang pada prinsipnya menggambarkan tingkat kerentanan terhadap gempa bumi. Simbol warna hijau menggambarkan tingkat kerentanan terhadap gempabumi paling rendah, sementara simbol warna merah menggambarkan daerah yang paling rentan terhadap pengaruh gempabumi. Dengan demikian Indonesia bagian barat, terutama pada jalur Kalimantan dan Sumatera bagian timur, termasuk daerah Natuna, memiliki risiko bahaya gempabumi paling rendah sehingga cocok untuk penempatan *site* CCS.

Sebaliknya Indonesia bagian timur seluruhnya mempunyai tingkat kerawanan yang lebih tinggi, sehingga tidak cocok untuk penempatan CCS, khususnya dengan metode penginjeksian CO_2 . Namun bila diperhatikan pada sebaran pusat-pusat zona gempa bumi (Gambar 5), daerah-daerah yang aman menurut Gambar 4, masih ada beberapa daerah yang tidak aman, yaitu daerah yang dilewati sesar-sesar aktif. Oleh karena itu, penempatan CCS hendaknya di luar daerah pusat gempabumi yang berupa sesar-sesar aktif.

Mengingat hal tersebut di atas, maka pembangunan konstruksi program CCS hendaknya perlu mempertimbangkan faktor kegempaan. Bila risiko bahaya gempa kecil, masih dimungkinkan membangun konstruksi dengan memperhatikan jenis konstruksi yang tahan gempa.



Sumber : Badan Geologi (2009a)

Gambar 5. Peta zona sumber gempabumi Indonesia.



Sumber : USGS (2001)

Gambar 6. Sebaran gunungapi aktif di Indonesia.

Namun bila faktor kegempaan tinggi maka sebaiknya dihindari membangun konstruksi program CCS, kecuali bila dapat diterapkan metode CCS yang relatif aman. Metode CCS yang relatif aman adalah penggunaan akifer berair asin dan mungkin juga dengan menggunakan ofiolit. Pada akuifer berair asin, CO₂ akan bereaksi dengan air asin dan membentuk zat padat tersusun karbonat sehingga aman dari kebocoran. Demikian pula halnya dengan ofiolit yang akan bereaksi dengan CO₂ membentuk zat padat, namun hal ini sampai sekarang masih dalam penelitian untuk mempercepat reaksi, sehingga untuk sementara belum dapat diaplikasikan.

Sebaran Gunungapi Aktif

Gunungapi aktif merupakan salah satu sumber bencana geologi yang harus dihindari untuk penempatan CCS. Sebagaimana tertera dalam Gambar 6, gunungapi aktif terdapat di sepanjang Busur Sunda, Busur Banda, Sulawesi, Halmahera, dan lajur Sangihe – Talaud. Namun tidak seluruhnya di sepanjang busur tersebut ditempati oleh gunungapi, misalnya Sumatera bagian timur jauh dari gunungapi sehingga masih memungkinkan digunakan sebagai lokasi CCS. Untuk daerah gunungapi tidak aktif perlu dipertimbangkan kemungkinan terjadinya aktifitas lagi, dengan membangun konstruksi yang dinilai cukup tahan terhadap aktifitas gunungapi yang biasanya tidak sebahaya gunungapi yang masih aktif.

Sebaran Cekungan Sedimen

Badan Geologi (2009b) telah menerbitkan peta

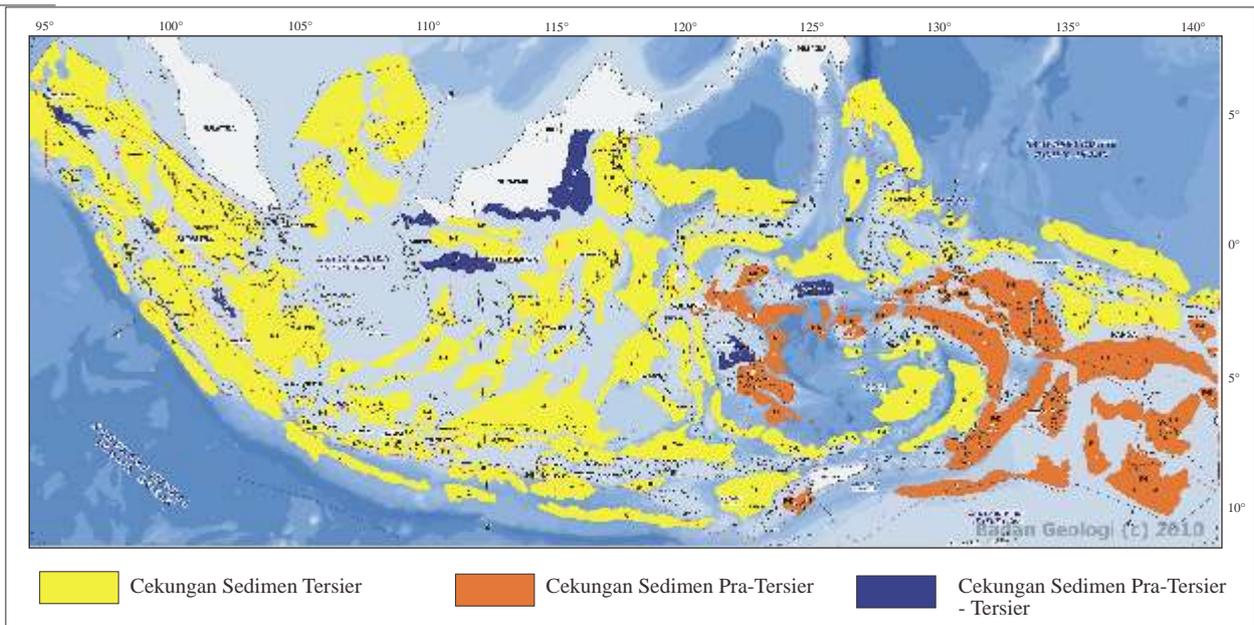
cekungan sedimen Indonesia yang meliputi 128 cekungan sedimen (Gambar 7). *Geological Storage* yang berupa batuan waduk disertai batuan penutup (*seal*) selalu terdapat dalam cekungan sedimen, sehingga setiap upaya mencari *geological storage* hendaknya mengacu pada peta sebaran cekungan sedimen. Tipe *geological storage* pada tiap cekungan berbeda-beda, ada yang berupa batuan waduk minyak dan gas bumi, ada lapisan batubara dalam, maupun akifer dalam berair asin.

Lapisan Batubara yang Sangat Dalam

Diantara cekungan-cekungan sedimen di Indonesia, beberapa di antaranya mengandung batubara, dan kemungkinan terdapat lapisan batubara dalam yang mengandung CBM. Di Indonesia bagian barat, batubara terutama dijumpai di Sumatera dan Kalimantan, sedangkan di Indonesia timur meskipun terdapat cekungan batubara namun jumlahnya relatif sedikit dengan cadangan yang relatif kecil pula (Gambar 8). Oleh karenanya program CCS dengan menggunakan lapisan batubara dalam dapat diwacanakan atau diprogramkan untuk Indonesia bagian barat, khususnya Sumatera dan Kalimantan.

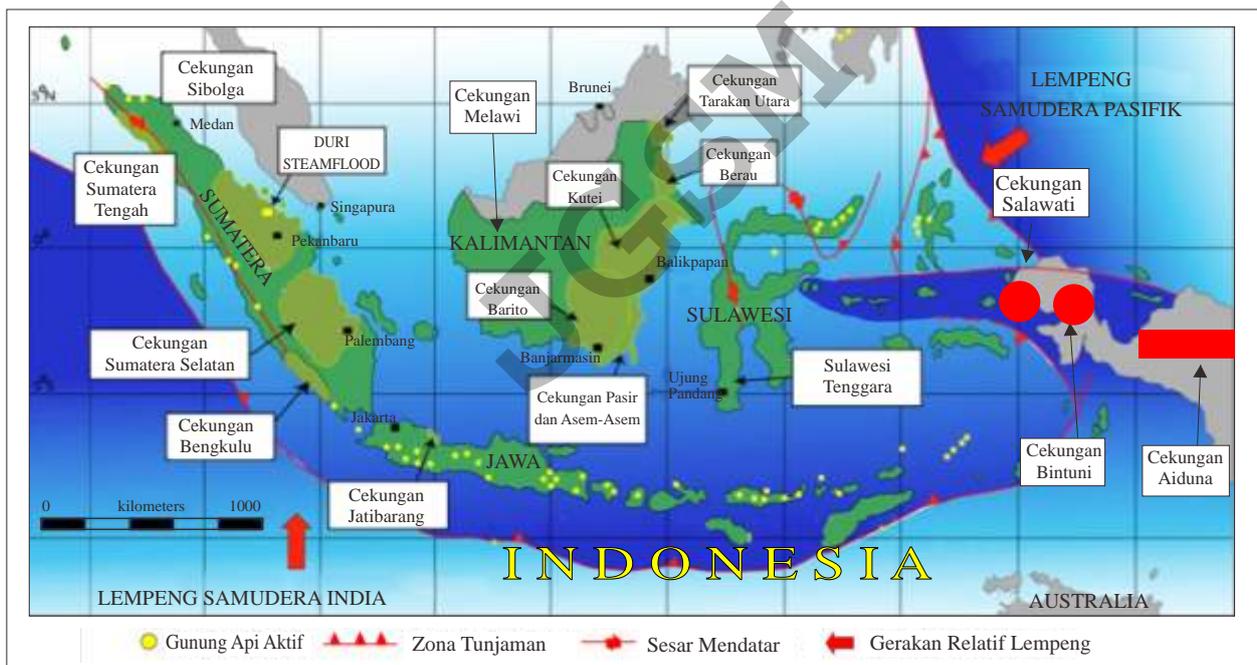
Sebaran Batuan Ofiolit

Sebagaimana telah diuraikan di depan bahwa karbonasi mineral, yaitu mereaksikan CO₂ dari atmosfer dengan batuan ofiolit, sampai kini masih menjadi bahan kajian bagaimana caranya mempercepat reaksi tersebut. Namun, untukantisipasi di masa datang, perlu disajikan data keberadaan batuan ofiolit di Indonesia. Di Indonesia



Sumber : Badan Geologi (2009b)

Gambar 7. Peta Cekungan Sedimen Indonesia.



Sumber : Lubis (2009)

Gambar 8. Peta sebaran cekungan batubara di Indonesia.

bagian barat, ofiolit dijumpai sangat terbatas, namun di Indonesia bagian timur, ofiolit dijumpai cukup melimpah. Ofiolit dijumpai di lengan timur dan tenggara Sulawesi, Halmahera, Papua, Waigeo dan beberapa pulau kecil lainnya (Gambar 9). Dengan demikian, Indonesia bagian timur dapat dicadangkan untuk lokasi CCS dimasa datang, manakala teknologi pemerangkapan CO₂ dengan batuan ofiolit sudah ditemukan.

Batuan Waduk Hidrat Gas

Keberadaan batuan waduk (*reservoir*) hidrat gas di Indonesia antara lain di jumpai di Laut Sulawesi, Selat Makassar Utara, serta laut selatan dari Sumatera Utara dan Selatan (Prihantono dan Bachri, 2008). Besar kemungkinan di laut-laut dalam lainnya mengandung endapan hidrat gas. Mengingat lokasinya yang cukup dalam, maka diduga dimasa datang batuan waduk hidrat gas juga berpotensi untuk penyimpanan CO₂.



Sumber : Islah (2012)

Batuan ultramafik

Gambar 9. Sebaran batuan ofiolit di Indonesia Bagian Timur.

Sampai saat ini belum ada penelitian khusus mengenai batuan waduk hidrat gas di Indonesia, namun penelitian seismik yang dilakukan pihak asing telah mengidentifikasi temuan adanya lapisan-lapisan yang mengandung hidrat gas, misalnya di kawasan laut sebelah selatan Bengkulu, selatan Sumatera Utara dan di Laut Sulawesi.

Sumber Emisi CO₂

Terdapat beberapa sumber emisi CO₂ di Indonesia, meliputi:

1. Sumur-sumur produksi migas.

Di Indonesia bagian timur rata-rata sumur-sumur produksi migas menghasilkan emisi CO₂ relatif kecil, yaitu sama dengan atau kurang dari 3%, sementara sumur-sumur di Sumatera, Jawa, dan Kalimantan rata-rata memproduksi CO₂ sekitar 10%. Hal ini membuat program CCS, khususnya dengan teknologi EOR, kurang pas diterapkan di Indonesia bagian timur, namun tepat dilaksanakan di Indonesia bagian barat.

2. Program PLTU berbasis batubara (Program percepatan tenaga listrik 10.000 MW). Program ini berpotensi meningkatkan pencemaran udara dengan CO₂ hasil pembakaran batubara. Namun karena harga batubara relatif murah dan tersedia melimpah di Indonesia, maka pemerintah mengambil kebijakan memanfaatkan batubara untuk bahan bakar PLTU.

3. Industri non migas, seperti pupuk, semen, dan industri petrokimia lainnya yang menggunakan batubara sebagai bahan bakar.

4. Kebakaran hutan. Kebakaran hutan yang disebabkan oleh kegiatan manusia sangat berpotensi menghasilkan CO₂ yang mencemari atmosfer, namun hal ini di luar jangkauan program CCS.

KESIMPULAN

Indonesia bagian barat secara umum memiliki stabilitas tektonik lebih tinggi. Meskipun demikian, penempatan lokasi CCS di Indonesia bagian barat hendaknya memperhatikan keberadaan sesar-sesar lokal aktif. Metode CCS yang disarankan untuk wilayah ini adalah penerapan teknologi EOR, karena ketersediaan sumber emisi CO₂ dari ladang-ladang migas yang relatif tinggi dan keberadaan sumur-sumur tua. Di lain pihak, penggunaan lapisan batubara dalam (*reservoir CBM*) dapat menjadi alternatif di masa datang untuk wilayah Indonesia bagian barat.

Sementara itu *mineral trapping* dapat dijadikan pilihan di masa yang akan datang untuk wilayah Indonesia bagian timur, mengingat banyaknya ketersediaan batuan ofiolit.

Penggunaan akifer berair asin dapat diaplikasikan untuk menyimpan CO₂ yang dihasilkan PLTU. Untuk itu disarankan di lakukan penelitian mengenai sesaran akifer air asin di seluruh wilayah Indonesia

UCAPAN TERIMA KASIH

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Kusnama M.Phil yang turut serta memberikan pandangan tentang naskah ini. Ucapan terima kasih juga kami ucapkan kepada Dr. R. Sukhyar atas segala diskusi yang pernah kita lakukan berkenaan dengan pelaksanaan CCS di Indonesia

ACUAN

- Bachri, S., 2006. *Evolusi Bagian Barat dan Timur Busur Kepulauan di Indonesia*. Pusat Survei Geologi, laporan tidak terbit.
- Bachri, S., 2008. Overview of Some Geological Factors and Prospect of CO₂ Storage in Indonesia. *Paper presented in CCOP meeting*, Bangkok 2008.
- Bachri, S., 2010. Prospek CCS di Indonesia Bagian Barat dan Timur ditinjau dari aspek geologi. Makalah dipresentasikan pada *Workshop Perubahan Iklim*, Badan Geologi, Manado.
- Bachri, S., 2014. Perkembangan Sisten Tunjaman VS Perkembangan Sesar Mendatar: Representasi Pola Evolusi Tektonik Indonesia Bagian Barat Vs Indonesia Bagian Timur. *Jurnal Geologi Indonesia*, in press.
- Badan Geologi, 2009a. *Peta Percepatan Puncak Batuan Dasar Wilayah Indonesia Untuk Periode Ulang Gempa 500 Tahun atau 10% kemungkinan Terjadi Dalam 50 Tahun*.
- Badan Geologi, 2009b. *Peta Cekungan Sedimen Indonesia Berdasarkan Data Gaya Berat dan Geologi*. Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Bandung.
- Ben-Avraham, Z. & Uyeda, S., 1973. The evolution of the China Basin and the Mesozoic Paleogeography of Borneo. *Earth Planet Sci. Lett.*, 18:365-376.
- Dally, M., Hopper, B.G. & Smith, D.G., 1986. Reconstruction of movements of major plates in SE Asia, *Proc. B.P. Workshop on Eastern Indonesia* (unpub.).
- Downey, J.W., 1986. The geology and edition of the Arafura Sea and Irian Jaya. *Proc. B.P. Workshop on Eastern Indonesia*. Unpub.
- Islah, I., 2012. Tinjauan keterdapatan emas pada Kompleks Ofiolit di Indonesia *Bulletin Sumber Daya Geologi*, Vol.7, Nomor 1:1-11.
- Katili, J., 1975. Volcanism and plate tectonics in the Indonesian Island Arcs, *Tectonophysics*, 26: 165-188.
- Katili, J., 1989. Evolution of southeast Asian Arc complex. *Geologi Indonesia* 12: 113-143.
- Lubis, I., 2009. Wilayah Kerja dan Split Keuntungan CBM Indonesia.
<http://ibrahimlubis.wordpress.com>, 14 September 2009
- Prihantono, A. & Bachri, S., 2008. Gas hydrate potential in Indonesia with reference to the southern Sea of Sumatra and West Jawa. Paper presented in the *CCOP Workshop on the Challenge of Extracting Gas Hydrate as an Environmentally-friendly Source of Energy and Storing CO₂ in the Gas Hydrate Reservoir*, Hanoi.
- Simandjuntak, T.O. & Barber, A.J., 1996. Contrasting tectonic styles in the Neogene orogenic belts of Indonesia. In : Hall, R. And Blundel, D. (eds), 1996. Tectonic evolution of Southeast Asia. *Geological Society Special Publication* No. 106:185-201.
- Tapponier, P., Peltzer, G., Le Dain, A.Y. & Armijo, R., 1982. Propagating extrusion tectonics in Asia: New insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, v.10: 611-616.
- USGS, 2001. *Major volcanoes of Indonesia*.