



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Benyamin Sapiie

**PEMODELAN STRUKTUR GEOLOGI
DALAM EKSPLORASI DAN PENGEMBANGAN
LAPANGAN HIDROKARBON**

24 Agustus 2019
Aula Barat Institut Teknologi Bandung

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
24 Agustus 2019

Profesor Benyamin Sapiie

**PEMODELAN STRUKTUR GEOLOGI
DALAM EKSPLORASI DAN PENGEMBANGAN
LAPANGAN HIDROKARBON**



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PEMODELAN STRUKTUR GEOLOGI DALAM EKSPLORASI DAN
PENGEMBANGAN LAPANGAN HIDROKARBON
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 24 Agustus 2019.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Benyamin Sapiie
PEMODELAN STRUKTUR GEOLOGI DALAM EKSPLORASI DAN
PENGEMBANGAN LAPANGAN HIDROKARBON
Disunting oleh Benyamin Sapiie

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2019
vi+76 h., 17,5 x 25 cm
ISBN 978-602-6624-32-1

1. Geodinamika dan Sedimentologi 1. Benyamin Sapiie

KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, bahwasannya atas berkat dan rahmatNya, saya dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung, atas perkenannya saya menyampaikan orasi ilmiah ini pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar.

Orasi ilmiah ini mengangkat tema aplikasi pemodelan analog *sandbox* dalam eksplorasi dan pengembangan lapangan hidrokarbon serta peranya dalam menyelesaikan persoalan energi nasional dan mitigasi bencana. Pembahasan memfokuskan pada metode serta aplikasinya untuk contoh kasus struktur geologi pada lapangan hidrokarbon di Indonesia. Pembahasan juga menjelaskan pengembangan laboratorium pemodelan analog *sandbox*, serta inovasi dalam pembuatan aparatus dan teknologinya. Pada bagian akhir dibahas rencana pengembangan ke depan untuk meningkatkan pengertian dalam mekanisme sesar secara mikro, terutama berkaitan dengan migrasi dan akumulasi hidrokarbon.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan, dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca.

Bandung, 24 Agustus 2019

Benyamin Sapiie

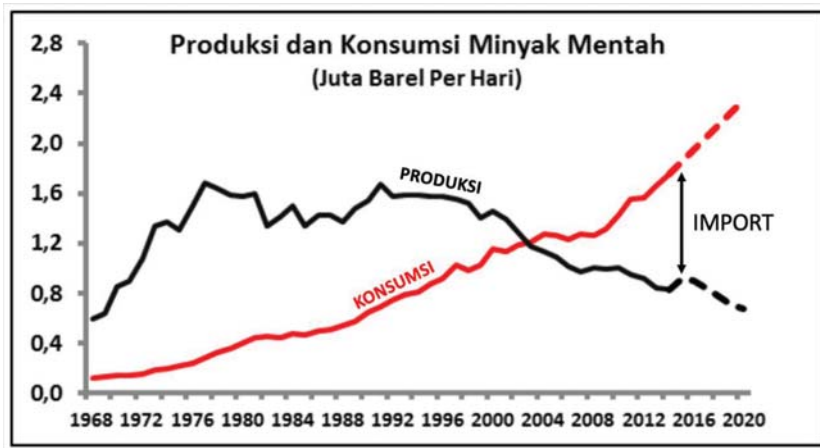
DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
2. KONSEP DEFORMASI KERAK BUMI	6
3. PEMODELAN ANALOG <i>SANDBOX</i>	11
3.1 Latar Belakang	11
3.2 Prinsip Dasar Pemodelan Analog <i>Sandbox</i>	12
3.3 Aparatus Pemodelan <i>Sandbox</i>	17
3.4 Material Pemodelan <i>Sandbox</i>	19
3.5 Desain Pemodelan	22
4. KASUS PEMODELAN STRUKTUR GEOLOGI	24
4.1 Kasus Deformasi Sesar Naik	25
4.2 Kasus Deformasi Sesar Normal	28
4.3 Kasus Deformasi Sesar Geser	29
4.4 Kasus Deformasi Sesar Inversi	32
5. KELEBIHAN DAN KETERBATASAN PEMODELAN <i>SANDBOX</i>	34
6. LANGKAH KE DEPAN	36
7. PENUTUP	43
8. UCAPAN TERIMA KASIH	43
DAFTAR PUSTAKA	47
BIODATA	51

PEMODELAN STRUKTUR GEOLOGI DALAM EKSPLORASI DAN PENGEMBANGAN LAPANGAN HIDROKARBON

1. PENDAHULUAN

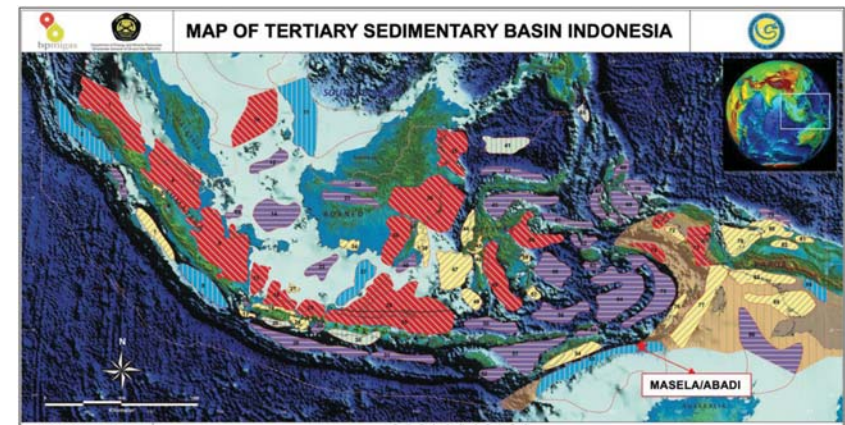
Eksplorasi sumber daya alam di Indonesia, contohnya hidrokarbon (minyak dan gas bumi), geotermal, batubara, dan mineral bijih, setidaknya telah berlangsung sejak 1800. Hal ini terbukti dari banyaknya lapangan minyak dan gas bumi Indonesia yang sudah berumur lebih dari 100 tahun. Namun, berdasarkan data dari SKKMIGAS dan ESDM, sejak 2004, produksi minyak bumi Indonesia terus mengalami penurunan (Gambar 1). Bahkan, pada saat ini produksi minyak bumi Indonesia adalah 749.600 barel minyak per hari (bopd) dan *lifting* gas bumi adalah 5,9 miliar metrik standar kaki kubik per hari (mscfd). Penurunan produksi kurang dari 1.000.000 bopd tersebut terjadi secara alami dikarenakan kebanyakan produksinya dilakukan dari lapangan-lapangan yang sudah tua (*mature field*). Produksi minyak bumi yang terus menurun sedangkan konsumsinya yang terus meningkat, membuat Indonesia berubah dari produsen menjadi importir. Tanpa adanya penambahan cadangan baru maka tidak lama lagi Indonesia akan mengalami masalah suplai energi hidrokarbon. Untuk mengatasi hal tersebut diperlukan adanya kegiatan eksplorasi yang lebih menyeluruh dan masif.



Gambar 1. Grafik hubungan produksi dan konsumsi hidrokarbon Indonesia (1968-2020).

Indonesia mempunyai 86 cekungan sedimentasi yang berdasarkan sejarah tektonik, umur cekungan dan mekanisme pembentukannya, dapat dibagi menjadi dua bagian yaitu Indonesia bagian barat dan timur (Gambar 2). Namun pada saat ini, baru 16 cekungan yang menghasilkan minyak bumi yaitu 11 cekungan di Indonesia bagian barat dan 5 cekungan di bagian timur (berwarna merah pada Gambar 2) ditambah 1 Lapangan Gas Masela/Abadi yang terletak di tengah laut Arafura di perbatasan dengan Australia, yang rencananya akan berproduksi pada tahun 2027. Indonesia bagian barat didominasi oleh cekungan yang menghasilkan minyak bumi sedangkan Indonesia bagian timur lebih didominasi oleh lapangan produksi gas. Hal ini disebabkan kedua bagian tersebut mempunyai karakteristik geologi yang berbeda, yaitu Indonesia bagian

timur mempunyai kondisi struktur geologi yang lebih kompleks serta didominasi oleh lingkungan laut dalam. Hal tersebut mengakibatkan eksplorasi di bagian ini relatif lebih sulit dan lambat. Oleh karena itu diperlukan inovasi teknologi dan pendekatan analisis struktur geologi yang baru serta detail.



Gambar 2. Peta penyebaran cekungan sedimentasi Tersier Indonesia (Sapiie dkk. 2008).

Prinsip dasar ilmu geologi adalah *"the present is the key to the past"* yang dicetuskan oleh seorang dokter dan ahli geologi dari Skotlandia pada abad ke-18 yang bernama James Hutton. Prinsip ini mengandung arti bahwa sejarah geologi dunia kita di masa lalu harus dijelaskan dengan apa yang bisa di observasi dan terjadi sekarang. Geologi struktur adalah ilmu geologi yang mempelajari deformasi kerak bumi baik di atas maupun di

bawah permukaan. Pengetahuan dan keahlian geologi struktur merupakan komponen utama selain dari industri sumber daya alam, seperti hidrokarbon, geotermal, batubara, dan mineral (contohnya emas dan tembaga), juga hidrogeologi dan lingkungan yang aplikasi keteknikannya dalam industri ini memiliki dampak ekonomi yang luas. Dalam hal lingkungan, pengetahuan geologi struktur juga merupakan kunci dalam memetakan dan memprediksi bencana alam geologi seperti gempa bumi, gunung api dan longsor. Bukti bahwa pengetahuan geologi struktur merupakan komponen utama dari industri sumber daya alam adalah bahwa berdasarkan data dari industri hidrokarbon di Indonesia memperlihatkan bahwa saat ini lebih dari 95% perangkat hidrokarbon adalah perangkat struktur yang keberadaannya dikontrol oleh struktur geologi seperti perlipatan dan sesar. Hal ini dikarenakan perangkat struktur merupakan tipe perangkat yang paling signifikan untuk akumulasi hidrokarbon terutama dalam hal kontribusi volumetrik yang digunakan sebagai dasar perhitungan cadangan hidrokarbon global. Bukti lain juga menunjukkan bahwa keberadaan endapan tembaga dan emas yang ditemukan dan diproduksi di pegunungan Jayawijaya termasuk Grasberg dan Erstberg juga dikontrol oleh struktur geologi (Sapiie, 2001; Sapiie dan Cloos, 2004). Oleh karena itu diperlukan analisis geologi struktur yang paling akurat dan efektif. Tujuan utama dari analisis ini adalah untuk mendefinisikan geometri struktur geologi hidrokarbon dan endapan mineral bijih sehingga dapat digunakan untuk mengukur

sumber daya alam dan menentukan metode produksi yang paling aman dan ekonomis.

Seperti telah dijelaskan di atas, teknik geologi struktur terkini merupakan salah satu dari sejumlah teknik yang diterapkan dalam industri perminyakan, khususnya eksplorasi hidrokarbon. Teknik tersebut merupakan komponen dasar dari analisis risiko volumetrik sebagai landasan ilmiah dalam penilaian keekonomian eksplorasi dan juga untuk keputusan bisnis. Salah satu yang dipelajari dalam teknik ini adalah mendefinisikan geometri struktur geologi yang menjadi perangkat struktural. Perangkat struktural terdiri dari unsur geometri struktur (contohnya struktur lipatan), strata batuan reservoir (contohnya batupasir), batuan penyekat (*top seal*, umumnya berupa batulempung yang bersifat impermiabel) dan sekatan sesar (*fault seal*). Penentuan geometri perangkat hidrokarbon dilakukan dengan cara menginterpretasi baik data permukaan maupun data bawah permukaan. Interpretasi geologi struktur permukaan dilakukan melalui pemetaan geologi, sedangkan untuk bawah permukaan menggunakan bantuan data geofisika yang umumnya berupa data seismik refleksi 2D/3D dan analisis data lubang bor umumnya berupa data *Wireline logs*. Kurang sempurnanya data geofisika dan geologi seringkali terjadi yang diakibatkan oleh permasalahan akuisisi serta kompleksitas kondisi geologi. Hal tersebut akan menyebabkan hasil interpretasi akan bervariasi cukup lebar. Sehingga memberikan ketidakpastian baik dalam hal bentuk,

ukuran maupun volume sebuah prospek hidrokarbon yang secara tidak langsung akan mempengaruhi bisnis dan keekonomiannya.

Salah satu solusi yang digunakan untuk memperkecil ketidakpastian interpretasi struktur geologi adalah dengan menggunakan permodelan analog. Permodelan analog *sandbox* salah satu pendekatan yang paling efektif dan murah untuk memperkecil ketidakpastian dalam interpretasi struktur geologi. Buku orasi ilmiah ini bertujuan memaparkan beberapa hasil penelitian dan inovasi teknologi menggunakan pendekatan permodelan analog *sandbox* yang dikembangkan di Laboratorium Geodinamika, Prodi Teknik Geologi ITB, terutama dalam membantu eksplorasi dan pengembangan lapangan hidrokarbon di Indonesia.

2. KONSEP DEFORMASI KERAK BUMI

Menurut Davis dan Reynolds (1996), secara kinematika deformasi dapat didefinisikan sebagai perubahan (strain/ ϵ) yang terdiri dari perubahan posisi (translasi), orientasi (rotasi), ukuran (dilatasi), dan bentuk (distorsi) pada batuan di kerak bumi. Deformasi tersebut merupakan akibat dari adanya tegasan (stress/ σ) yang merupakan ekspresi dari gaya yang diberikan terhadap luas permukaan batuan ($\sigma = F/A$). *Stress* (σ) pada batuan dapat berasal dari perubahan temperatur, kelembaban, akumulasi sedimen (beban), gravitasi (σ_v) maupun *stress* tektonik (σ_H) yang dihasilkan oleh adanya pergerakan serta interaksi dari lempeng-lempeng bumi (litosfer). *Stress* tektonik secara kontinu akan

menekan, menarik, melengkungkan dan menggeserkan batuan di kerak bumi.

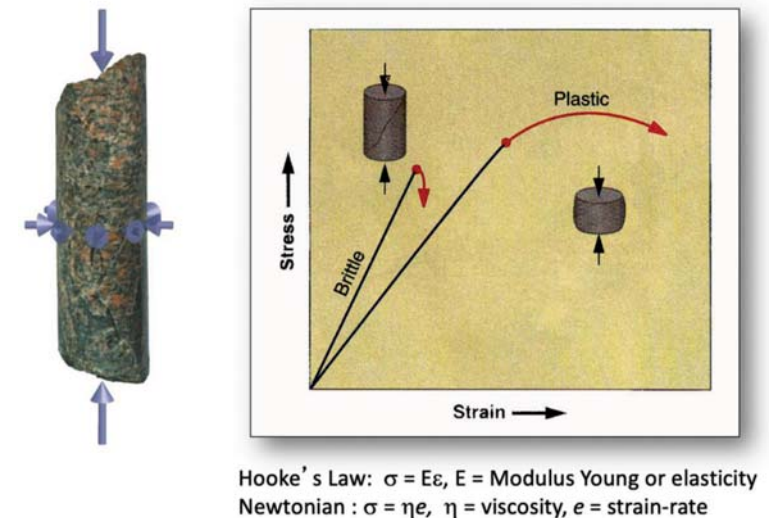
Berdasarkan pembelajaran dari perambatan gelombang gempa, struktur dalam bumi terdiri atas lempeng-lempeng (litosfer), astenosfer, mesosfer, inti luar dan inti dalam. Litosfer yang padat dan getas dapat bergerak di atas lapisan astenosfer yang relatif plastis dan panas. Pergerakan litosfer tersebut memungkinkan terjadinya interaksi antar lempeng. Dalam teori tektonik lempeng ada tiga tipe interaksi lempeng yaitu *divergent*, *subduction/collision* dan *transform*. Proses deformasi yang terjadi di kerak bumi, pada umumnya merupakan hasil dari proses tektonik lempeng. Ketiga jenis interaksi ini akan memberikan pola deformasi yang berbeda pada kerak bumi. Hal tersebut diakibatkan oleh adanya perbedaan distribusi *stress* yang diakibatkan oleh interaksi lempeng tersebut. Deformasi pada kerak bumi yang kita amati saat ini merupakan jejak deformasi yang telah terjadi beberapa ratus atau juta tahun yang lalu. Sumber energi tektonik berasal dari energi panas bumi yang diubah menjadi energi mekanik oleh arus konveksi. Aliran konveksi tersebut sangat besar, batuan panas di dalam mesosfir dan astenosfir perlahan-lahan menyeret dan melengkungkan litosfer secara kontinu yang akhirnya menyebabkan batuan terdeformasi, menjadi seperti yang kita lihat sekarang ini. Deformasi batuan litosfer berlangsung sangat lama atau *strain-rate* yang sangat lambat dan terlalu dalam untuk bisa diamati secara kontinu. Bukti interaksi lempeng-lempeng ini adalah terjadinya

gempa bumi atau vulkanisme di sepanjang batas lempeng atau sesar aktif yang menunjukkan bahwa deformasi, sedang berlangsung.

Secara geologi, lempeng terdiri dari dua jenis batuan yaitu selubung bagian atas (*upper mantle*) dan kerak (*crust*) bumi. Sedangkan kerak bumi terdiri dari dua jenis batuan yaitu batuan kristalin dan batuan sedimen. Permukaan bumi pada umumnya ditutupi oleh batuan sedimen dan sedimen yang bersifat lepas-lepas. Sedimen tersebut terdiri dari butiran-butiran hasil rombakan baik dari batuan kristalin maupun batuan sedimen yang lebih tua dengan ukuran yang bervariasi. Deformasi yang terjadi di permukaan bumi dan cekungan sedimentasi dengan kedalaman rata-rata 3-5 Km, akan berbeda dengan deformasi yang terjadi pada kedalaman 5-10 Km atau yang lebih dari 10 Km. Selain karena adanya perbedaan material penyusunnya, juga dikarenakan adanya faktor kenaikan temperatur dan tekanan terutama tekanan vertikal (σ_v) terhadap kedalaman yang menyebabkan terjadinya proses kompaksi sehingga batuan semakin kuat. Tetapi jika batuan mencapai kedalaman lebih dari 10-15 Km, faktor kenaikan temperatur dan tekanan, akan merubah sifat batuan tersebut menjadi plastis (*ductile*). Pada kondisi ini batuan akan berubah menjadi batuan alihan (*metamorf*).

Perbedaan proses deformasi batuan secara umum dapat digambarkan oleh Hukum Hooke yang memberikan hubungan matematis antara stress (σ), strain (ϵ) dan kekuatan batuan sebagai berikut: $\sigma = E\epsilon$ dengan E adalah modulus elastisitas batuan (*Young modulus*) yang mewakili kekuatan

batuan. Hubungan ini akan lebih mudah diperlihatkan dalam grafik pada Gambar 3 (modifikasi Davis, 1996 dan Fossen, 2010). Hukum ini menyimpulkan bahwa deformasi batuan di bumi akan sangat tergantung pada jenis batuan yang diwakili oleh komposisi mineralogi dan tekstur yang akan memberikan sifat kekuatan batuan (E) terhadap kondisi temperatur dan tekanan tertentu. Dalam istilah geologi, hal ini dikenal sebagai sifat *reologi* batuan.



Gambar 3. Grafik deformasi batuan yang menggambarkan hubungan Hukum Hooke.

Deformasi batuan di bumi secara umum terjadi dalam berbagai skala. Hal tersebut akan terekam dalam dua jenis struktur geologi yaitu yang mewakili kondisi deformasi material yang getas (*brittle*) dan plastis (*ductile*)

seperti yang diperlihatkan oleh grafik pada Gambar 3. Deformasi untuk batuan dengan reologi getas akan dicirikan oleh kelompok rekahan (*fractures*) salah satunya dikenal sebagai sesar. Deformasi jenis ini bersifat diskontinu yang akan disertai oleh pelepasan energi *strain* elastis (*elastic strain energy*) yang dikenal sebagai seismisitas. Sedangkan deformasi batuan yang bersifat plastis akan dicirikan oleh kelompok perlipatan atau perubahan volume yang berlangsung secara kontinu. Sehingga tidak ada energi yang dilepaskan. Kedua jenis struktur geologi ini sangat umum di jumpai baik di permukaan bumi maupun di bawah permukaan bumi terutama pada cekungan-cekungan sedimentasi. Kehadiran kedua jenis struktur tersebut sangat penting untuk eksplorasi maupun pengembangan lapangan hidrokarbon. Hal ini dikarenakan perlipatan dapat berfungsi sebagai perangkap hidrokarbon, rekahan dan sesar dapat berfungsi sebagai jalur permeabilitas untuk fluida hidrokarbon mengalir ke atas maupun sebagai penyekat perangkap hidrokarbon. Permasalahan utama adalah bahwa gambaran tentang kondisi bawah permukaan merupakan hasil interpretasi sehingga banyak mengandung ketidakpastian. Ketidakpastian tersebut terutama berkaitan dengan hubungan antara waktu pembentukan struktur geologi, pematangan hidrokarbon dan perpindahan atau aliran hidrokarbon ke dalam perangkap (*hydrocarbon maturity and migration*). Oleh karena itu diperlukan kemampuan ahli geologi serta suatu metode pemodelan untuk untuk memperkecil ketidakpastian tersebut sehingga dapat memprediksi keberadaan hidrokarbon dalam suatu perangkap dengan lebih pasti.

3. PEMODELAN ANALOG *SANDBOX*

3.1 Latar Belakang

Salah satu masalah dalam memahami deformasi dalam kerak bumi adalah simulasi tentang perkembangan struktur dalam cekungan sedimentasi secara 3D. Masalah tersebut dapat dipecahkan dengan menggunakan pendekatan pemodelan analog. Pemodelan analog merupakan penyederhanaan dari keadaan di alam, dengan teknik ini, struktur yang terbentuk akibat deformasi dapat dimodelkan dan diteliti. Pada dua puluh tahun terakhir ini, pemodelan analog telah mengalami banyak kemajuan yang signifikan. Salah satu jenis pemodelan analog adalah pemodelan analog *sandbox*, telah digunakan secara luas dalam ilmu geologi struktur. Metode pemodelan analog *sandbox* (*Analogue sandbox modeling*) telah terbukti menjadi sebuah metode pemodelan fisik yang sangat efektif dan murah yang dilakukan di laboratorium, untuk meneliti deformasi dan evolusi struktur geologi batuan, khususnya deformasi batuan sedimen pada kedalaman kurang dari 10 Km. Selain itu, pemodelan analog *sandbox* dapat menyelidiki pengaruh suatu variasi parameter geologi dalam proses deformasi. Kondisi parameter fisik atau kondisi batas dapat diatur sehingga memungkinkan untuk dilakukan berbagai variasi percobaan (Withjack, 1999). Keuntungan lainnya adalah bahwa melalui pemodelan ini, dapat diteliti evolusi struktur geologi secara tiga dimensi untuk memperjelas dan memudahkan pengertian gambaran kinematikanya.

Pemodelan analog *sandbox* yang dikembangkan di laboratorium Geodinamik, Prodi Teknik Geologi, ITB telah berlangsung lebih dari 15 tahun dan merupakan laboratorium pertama di Asia Tenggara yang menggunakan teknologi canggih dalam melakukan pemodelan dan mengevaluasi hasilnya. Orasi ilmiah ini bertujuan memperkenalkan dan menjelaskan aplikasi pemodelan analog *sandbox* dalam berbagai kasus yang terjadi di berbagai cekungan sedimentasi dan lapangan hidrokarbon di Indonesia.

3.2 Prinsip Dasar Pemodelan Analog *Sandbox*

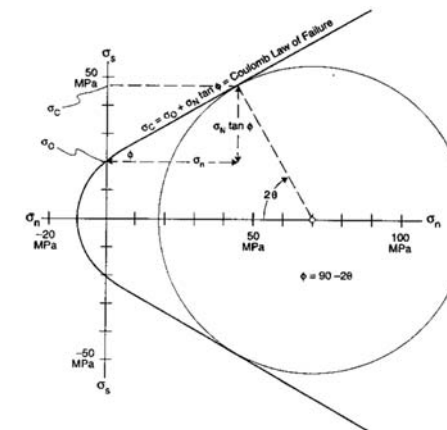
Pemodelan analog, yang disebut juga pemodelan fisik, yang bertujuan untuk memvisualisasikan proses deformasi telah dimulai sejak tahun 1815 oleh seorang ahli geologi bernama Hall (Graveleau, 2012). Metode ini terus berkembang sampai saat ini terutama di kalangan industri perminyakan. Berbagai hasil percobaan pemodelan analog dalam geologi struktur telah banyak dipublikasikan, misalnya pemodelan struktur geologi untuk sesar (Tschalenko, 1970; McClay, 1990; Sapiie dan Harsolumakso, 2000, Sapiie dkk., 2008, 2012, 2013; Sapiie dan Hadiana, 2007 dan 2014), lipatan (Withjack dan Jamison, 1986), dan tektonik (Withjack dan Peterson 1993).

Pemodelan analog *sandbox* umumnya digunakan untuk simulasi deformasi pada batuan dengan kondisi getas (Hubbert, 1951; Cloos, 1955; McClay, 1990). Hubbert (1951) mengembangkan percobaan pemodelan *sandbox* sederhana berdasarkan hukum kegagalan batuan Coulomb dan teori sesar dari Anderson (1951). Hukum kegagalan batuan dari Coulomb

(*Coulomb law of failure*) menerangkan mekanisme deformasi pada kondisi getas. McClay (1996) menyatakan bahwa hukum tersebut sebenarnya didasarkan pada model dinamika dan mekanika yang dikembangkan oleh Coulomb (1773) dan Mohr (1900). Hukum tersebut dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

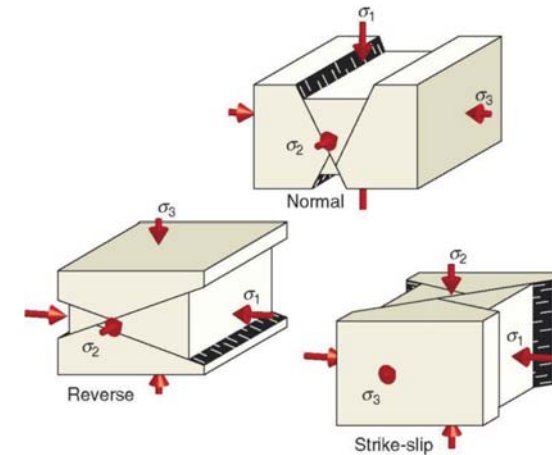
$$\sigma_c = \sigma_0 + \tan \phi (\sigma_n)$$

dengan σ_c adalah tegasan gerus kritis, σ_0 adalah kohesivitas, $\tan \phi$ = koefisien gesek dalam, dan σ_n adalah tegasan normal. Hubungan parameter-parameter dalam Hukum Coulomb umumnya dapat dipresentasikan menggunakan diagram Mohr. Diagram tersebut memperlihatkan kondisi deformasi (tensile atau kompresi), kohesivitas, besaran diferensial stress yang digambarkan sebagai lingkaran, titik kritis (σ_c) dan batas kritis yang digambarkan sebagai amplop (Gambar 4).



Gambar 4. Diagram Mohr yang memperlihatkan hubungan parameter Hukum Coulomb. (sumber dari Davis and Reynolds, 1996).

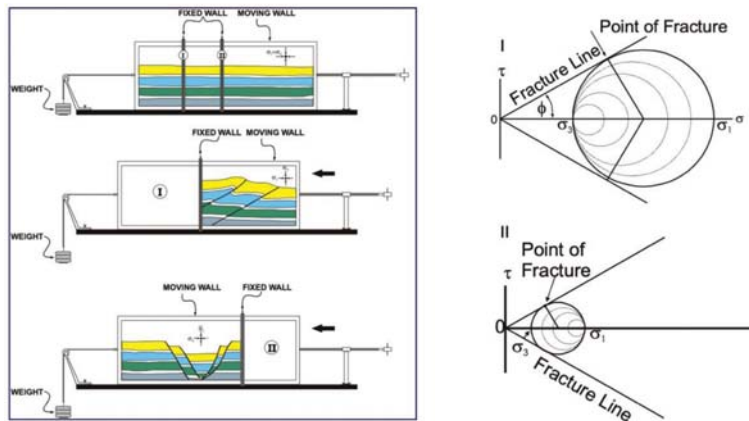
Berdasarkan konsep yang berkembang di geologi struktur, deformasi yang terjadi di dalam bumi dipengaruhi oleh tiga vektor *stress* utama (*principal stress*) yang semuanya bersifat kompresi (positif) yang terdiri dari satu vektor berarah vertikal dan dua vektor berarah horizontal sehingga membentuk persamaan *tensor* tiga dimensi mengandung 9 komponen stress (2^{nd} rank tensor). *Stress* utama (*principal stress*) bersifat tegak-lurus permukaan batuan (hanya normal *stress* saja dimana tidak shear stress yang bekerja) digambarkan sebagai $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ dimana $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Sehingga secara umum, deformasi hanya akan dipengaruhi oleh besaran dari stress maksimum (σ_1) dan *stress* minimum (σ_3). Perbedaan antara keduanya dinamakan *differential stress* (σ_d) yang dalam lingkaran Mohr digambarkan sebagai diameter (lihat Gambar 4). Teori sesar Anderson (1951) adalah teori yang memberikan hubungan antara ketiga *stress* utama dengan jenis rekahan atau sesar yang terbentuk antara lain sesar normal, sesar naik dan sesar geser (Gambar 5). Teori ini berdasarkan percobaan mekanika batuan di laboratorium untuk batuan yang bersifat homogen dan isotropik. Pada kenyataannya di alam, banyak batuan yang bersifat homogen namun tidak dalam kondisi isotropik dikarenakan banyak batuan yang sudah mempunyai bidang lemah (*anisotropy*), contohnya bidang perlapisan pada batuan sedimen.



Gambar 5. Teori Anderson (1951) tentang hubungan antara jenis sesar dan *stress* utama ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) dengan $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (sumber dari Fossen, 2010).

Percobaan analog *sandbox* yang dilakukan oleh Hubbert (1951) menggunakan sebuah kotak pasir berukuran 50x40x30 cm dengan dua buah kompartemen yang dipisahkan oleh sebuah dinding yang dapat bergerak (Gambar 6). Pada gambar 6 tersebut terlihat bahwa pada keadaan awal, keadaan sebelum dinding penyekat digerakkan, kedua kompartemen menggambarkan keadaan kondisi litostatik dimana tegasan pada semua sisi adalah sama ($\sigma_1 = \sigma_3$). Kondisi ini sangat dipengaruhi oleh perubahan salah satu tegasan. Saat dinding penyekat bergerak, kondisi litostatik berubah ($\sigma_1 \neq \sigma_3$) pada kedua kompartemen. Pada kompartemen sebelah kiri, σ_3 adalah horizontal dan σ_1 adalah vertikal, sedangkan pada kompartemen lainnya σ_1 adalah horizontal dan σ_3 adalah vertikal. Berdasarkan arah tegasan utama yang diketahui dan

koefisien gesek dalam yang dimiliki pasir, maka akan dapat diketahui orientasi sesar yang akan terbentuk pada percobaan *sandbox*. Perkembangan pembentukan sesar pada percobaan *sandbox* juga dapat diperlihatkan melalui Diagram Mohr. Pembentukan struktur saat tegasan maksimum (σ_1) bertambah sampai lingkaran Mohr menyentuh garis batas kritis maka akan terbentuk sesar naik (kondisi I). Sedangkan saat tegasan minimum (σ_3) berkurang sampai lingkaran Mohr menyentuh garis batas kritis, maka akan terbentuk sesar normal (kondisi II). Percobaan ini mendemonstrasikan bahwa pemodelan analog *sandbox* sederhana mampu memodelkan struktur geologi yang terpetakan di alam. Percobaan ini juga menunjukkan bahwa material pasir dapat digunakan sebagai analog untuk batuan berbutir yang merupakan karakteristik dari batuan sedimen baik di permukaan maupun kedalaman.



Gambar 6. Pemodelan analog *sandbox* sederhana dari Hubbert (1951).
(modifikasi dari Davis and Reynolds, 1996).

3.3 Aparatus Pemodelan *Sandbox*

Aparatus untuk pemodelan *sandbox* telah mengalami kemajuan pesat mengikuti perkembangan teknologi dan ilmu sains materi. Hubbert (1951) dan Cloos (1968) memperkenalkan aparatus pemodelan *sandbox* berukuran 50x40x30 cm, dimana aplikasi tekanannya menggunakan beban maupun diputar secara manual. Secara umum alat ini sudah dapat mendemonstrasikan pembentukan struktur geologi untuk kasus sederhana yang tidak menggunakan parameter terukur, seperti pengaturan besaran perubahan per waktu (*strain-rate*) dan besaran stress yang bekerja, sehingga memungkinkan untuk melakukan berbagai jenis pemodelan deformasi cekungan sedimentasi. Laboratorium Geodinamik, Prodi Teknik Geologi ITB telah mengembangkan tiga aparatus yang bersifat otomatis dan dinamis untuk mengakomodasi semua kondisi deformasi yang memungkinkan untuk disimulasi. Semua jenis aparatus kami bangun dan desain sendiri menggunakan bengkel dan komponen lokal. Ketiga jenis aparatus tersebut berhasil kami kembangkan karena adanya bantuan berupa berbagai dana penelitian baik dari pemerintah maupun perusahaan Migas nasional dan internasional, sejak 2003 sampai sekarang.

Untuk mencapai hasil yang diinginkan, aparatus yang digunakan untuk percobaan secara umum mengikuti prinsip yang dijelaskan oleh Hubbert (1951) dan Cloos (1968). Aparatus pertama berupa kotak kaca dengan bagian atas terbuka dengan dimensi cukup besar (panjang 1 m,

lebar 0,5 m, dan kedalaman 0,5 m) untuk memastikan terbebas dari efek tepi. Pada bagian dalam terdapat dinding yang dapat bergerak mendorong dan menarik. Pergerakan dinding tersebut dijalankan oleh motor penggerak dengan kecepatan konstan (5 cm/jam). Peralatan ini dirancang untuk deformasi bersifat tidak simetri, di mana pada ujung yang berlawanan dengan dinding aktif, terdapat dinding statis yang bertindak sebagai *backstop*. Aparatus yang kedua memiliki panjang 1 m, lebar 0,4 m, dan kedalaman 0,4 m. Peralatan ini menggunakan kotak kaca dengan tutup terbuka, dengan dinding luar statis, dan dua dinding aktif yang digerakkan oleh batang berulir, yang masing-masing dijalankan oleh motor penggerak dengan kecepatan yang dapat berubah-ubah secara dinamis. Peralatan ini terutama dirancang untuk mengatur deformasi yang lebih aktif dengan kecepatan deformasi bervariasi secara simetri maupun tidak simetri. Aparatus ketiga memiliki panjang 2 m, lebar 0,5 m, dan kedalaman 0,4 m. Aparatus ini khusus dirancang untuk deformasi sesar geser yang di kontrol oleh *shear stress* bukan oleh normal *stress*, dikenal sebagai mekanisme deformasi *simple shear*. Pada aparatus ini, dua pelat di lantai yang dapat bergerak, baik searah maupun berlawanan. Selain itu, dinding samping dari aparatus ini dirancang sedemikian rupa sehingga memungkinkan untuk berotasi sampai maksimum 45°. Baik pelat maupun dinding digerakkan oleh batang berulir, yang dijalankan oleh motor penggerak dengan kecepatan yang dapat berubah-ubah atau dinamis (Gambar 7).



Gambar 7. Tiga jenis apartus pemodelan *sandbox* yang digunakan untuk pemodelan struktur geologi di Laboratorium Geodinamik ITB.

3.4 Material Pemodelan *Sandbox*

Para ahli pemodelan analog, telah mencoba menggunakan berbagai macam material untuk mensimulasikan deformasi geologi. Ada tiga jenis material yang paling sering digunakan yaitu pasir, lempung basah dan polimer silikon (Eisenstadt dkk., 1997). Daftar dari sifat-sifat material pemodelan tersebut, seperti yang dicatat oleh beberapa peneliti, ditampilkan dalam Tabel 1. Penentuan jenis material pemodelan sangat tergantung pada jenis deformasi yang akan dimodelkan. Deformasi getas tergantung pada kekuatan tegasan, koefisien friksi dan kohesi. Kajian eksperimental dan teoritis memperlihatkan bahwa pasir merupakan

material sedimen yang baik untuk analog dalam lingkungan getas (*brittle*) yang memenuhi hukum Coulomb, selama deformasi yang dimodelkan bersifat dangkal dengan maksimum kedalaman 10 km. Deformasi batuan dalam lingkungan plastis (*ductile*) akan tergantung pada sifat-sifat reologi dan laju regangan (*strain-rate*) yang dalam hal ini berupa temperatur, tekanan dan komposisi. Berdasarkan hasil percobaan, untuk deformasi ini, jenis material yang paling cocok adalah lempung dan polimer silikon (McClay, 1990; Withjack dan Jamison, 1986; McClay dan Ellis, 1987).

Tabel 1. Daftar material yang umum digunakan untuk pemodelan analog.

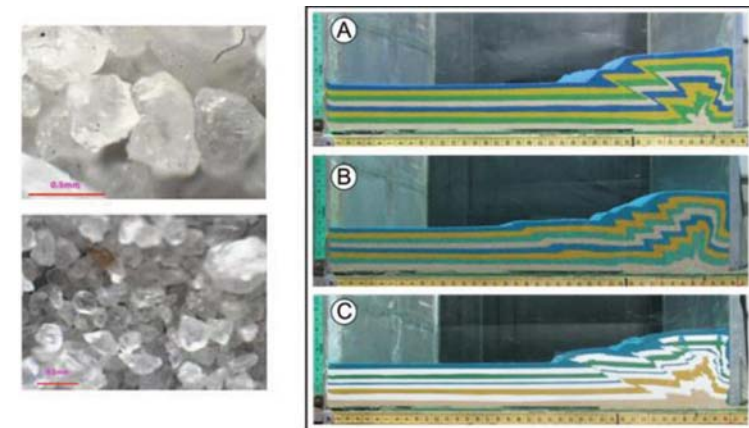
Material pemodelan	Komposisi dan ukuran	Densitas (gm/cm ³)	Kemiringan sesar normal	Koefisien internal friction	Kohesi
Pasir kering ¹ (melimpah)	Kuarsa ≤ 0,5 mm	1,53	56 - 57	0,40 - 0,45	< 300°
Pasir kering ¹ (terayak)	Kuarsa ≤ 0,5 mm	1.75 - 1.78	67 - 68	0,93 - 1,04	< 520°
Lempung basah ² (50% air)	Sebuk kaolin, nefelin-sienit, dan flint ≤ 0,5 mm	1.68	~ 62	0,52	40

Polimer silikon	Pabrik penghasil	Densitas (gm/cm ³)	Viskositas (Pa s)
PDMS ^{3,4} Minyak silika (polydimethylsiloxane)	SGM36 dari Dow Corning	0,97	10 ⁴ - 10 ⁵
	Rg20 dari Rhône-Poulenc	0,95	10 ⁴ - 10 ⁵
Bouncing Putty ⁵ (polyborondimethylsiloxane) Boron dibuat dari PDMS dan beberapa pengisi	Gomme GS1R dari Rhône-Poulenc	1,15	10 ⁴ - 10 ⁵

¹ dari Krantz (1991)
² dari Sims (1993)
³ dari Vendeville dkk. (1995)
⁴ dari Weijermars (1986)
⁵ dari Richard dan Krantz (1991)
^{*} nilai mungkin mendekati nol

Laboratorium pemodelan analog *Sandbox* Geologi Dinamik - ITB, mengkhususkan pemodelan dengan menggunakan jenis material pasir yang bersifat lepas-lepas. Material pasir yang digunakan berdasarkan

hasil penelitian kami adalah pasir kuarsa alami yang diambil dari Formasi Ngrayong, berumur Miocene (15 Ma) yang tersingkap di daerah Blora, Jawa Tengah. Setiap penelitian yang dilakukan, umumnya menggunakan pasir dengan dua ukuran yang berbeda, yaitu 80 *mesh* (0,178 mm) dan 50 *mesh* (0,257 mm) yang telah tersusun dan diberi warna. Jenis material lain yang khusus digunakan adalah Gypsum. Material gypsum ini digunakan dalam eksperimental deformasi yang melibatkan batuan dengan reologi yang bersifat plastis, contohnya kehadiran batugamping dan batulempung yang tebal (Gambar 8). Pemilihan besar butiran dan jenis material akan sangat tergantung dari informasi data lapangan atau analog model struktur geologi yang direncanakan.



Gambar 8. Photomikrograf dari butiran pasir untuk pemodelan (sebelah kiri), sebelah kanan memperlihatkan hasil pemodelan kompresi yang membandingkan material yang berbeda: pasir berukuran halus mesh 80 (A), pasir berukuran sedang mesh 50 (B) dan kombinasi antara pasir berukuran mesh 80 (50%) dan gypsum (50%) yang berwarna putih (C).

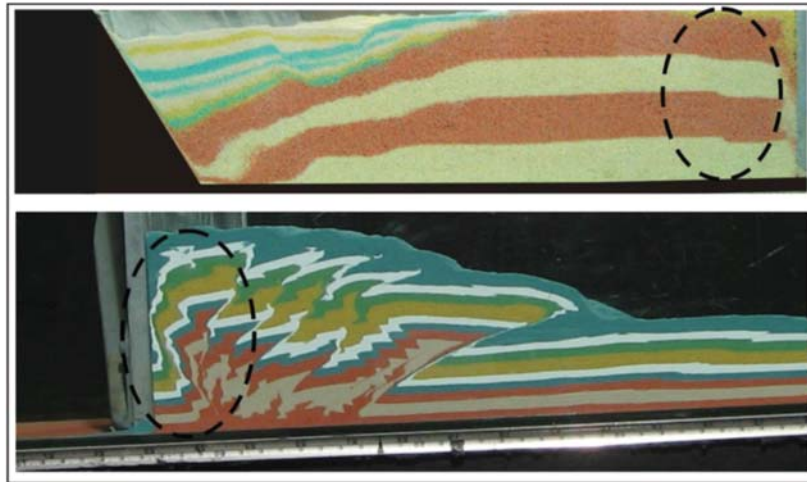
3.5 Desain Pemodelan

Desain pemodelan adalah bagian yang terpenting dari sebuah pemodelan analog agar mendapatkan hasil yang sesuai dengan keadaan di alam. Dalam merencanakan percobaan, beberapa parameter penting yang akan mempengaruhi hasil akhir harus dievaluasi secara hati-hati. Salah satu parameter penting tersebut adalah kondisi batas geologi. Kondisi batas geologi didefinisikan sebagai keadaan awal dari pemodelan yang akan membatasi perilaku material selama pemodelan. Kondisi batas dapat berupa bentuk sesar tertentu, perilaku *footwall*, distribusi pergeseran pada bidang sesar dan atau distribusi pergeseran pada bagian dasar model (Eisenstadt dkk., 1997).

Secara umum, tidak semua hasil pemodelan bisa memberikan jawaban memuaskan untuk suatu proses pembentukan struktur geologi dan akan sangat tergantung pada kasusnya (Mandl, 1988). Hal tersebut diakibatkan oleh permasalahan-permasalahan yang timbul pada saat penentuan kondisi batas, yang secara umum ada dua kondisi batas yang harus dipenuhi dalam suatu pemodelan yaitu kondisi batas kinematika dan mekanika (Graveleau, 2012). Berdasarkan keadaan tersebut maka sangat wajar apabila penentuan kondisi batas menjadi sangat penting. Untuk lebih memahami kondisi batas, maka sangat penting untuk membandingkan hasil percobaan dengan data hasil pekerjaan di lapangan suatu daerah. Walaupun suatu hasil pemodelan memiliki kemiripan yang sempurna dengan struktur geologi di alam yang dimodelkan, namun

tetap harus dilakukan analisis secara kritis dan hati-hati (Eisenstadt, dkk., 1997). Hasil percobaan dapat membimbing dalam menginterpretasikan struktur di lapangan, sumur pengeboran, dan data seismik. Pemodelan analog juga dapat membantu dalam memahami perkembangan morfologi selama pembentukan cekungan.

Salah satu permasalahan umum yang terjadi pada banyak percobaan adalah adanya efek tepi (Graveleau, 2012). Efek tepi yang paling sering ditemui adalah akibat gesekan di sepanjang dinding sisi kaca (Gambar 9). Efek tepi tersebut tidak dapat dihindari secara keseluruhan walaupun dinding sisi kaca ditambahkan pelicin yaitu disemprot oleh silikon. Dalam beberapa kasus, efek tepi dapat dikenali dengan mudah. Namun ada beberapa efek tepi yang sulit untuk dikenali, misalnya perilaku permukaan bebas, kondisi alas model, atau perilaku dari batas antar dua material yang berbeda, sehingga biasanya dianggap sebagai bagian dari hasil percobaan (Eisenstadt dkk., 1997). Oleh karena itu, merupakan hal penting untuk mengenali keberadaan efek tepi sebelum menganalisisnya sebagai bagian dari pola deformasi yang terbentuk. Salah satu cara mengenali keberadaan efek tepi adalah membandingkannya dengan sayatan vertikal pada bagian tengah dari hasil pemodelan.

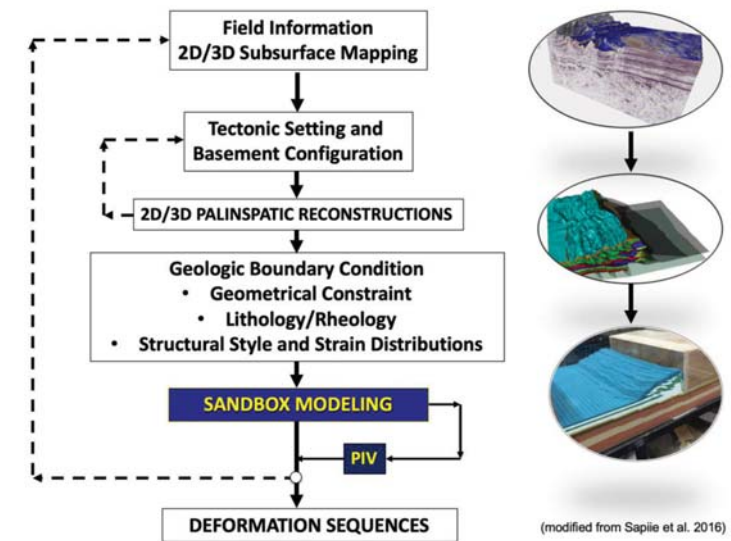


Gambar 9. Gambar hasil percobaan yang memperlihatkan adanya kondisi efek tepi.

4. KASUS PEMODELAN STRUKTUR GEOLOGI

Di alam terdapat tiga jenis sesar yang berbeda, yaitu sesar naik, sesar normal dan sesar geser. Ketiganya akan dimodelkan untuk mensimulasikan perkembangan deformasi yang terjadi pada kerak bumi. Setiap kasus akan menggunakan alat pemodelan *sandbox* yang berbeda. Paket material pasir, sebagai analog dari lapisan-lapisan batuan sedimen, disusun dari lapisan-lapisan tipis pasir dengan variasi warna yang disesuaikan dengan kondisi di alamnya. Tujuan utama dari pemberian warna pasir adalah untuk memungkinkan kita mengidentifikasi kehadiran struktur geologi baik sesar maupun lipatan pada penampang. Selama percobaan, baik foto permukaan morfologi yang terbentuk maupun penampang dari model diambil pada interval waktu yang ditentukan dengan menggunakan

kamera digital beresolusi tinggi, sehingga perkembangan evolusi progresif struktur geologi yang terbentuk, dapat diobservasi dan dipelajari. Untuk menguji konsistensi hasilnya, maka percobaan akan diulang 3 sampai 6 kali. Gambar 10 adalah diagram alir yang umumnya digunakan dalam studi pemodelan analog *sandbox*.



(modified from Sapiie et al. 2016)

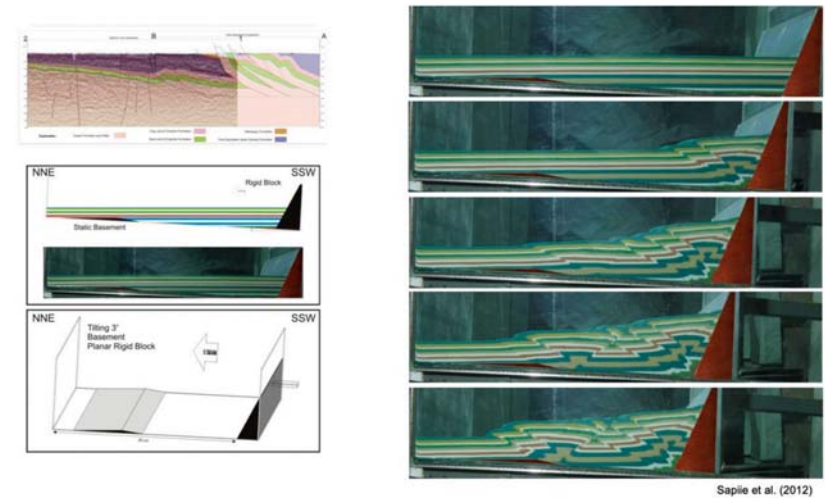
Gambar 10. Diagram Alir Pemodelan Analog *Sandbox*

4.1. Kasus Deformasi Sesar Naik

Indonesia diklasifikasikan sebagai wilayah tektonik aktif yang didasarkan pada adanya interaksi lempeng yang bersifat konvergen. Hal tersebut, mengakibatkan sistem sesar naik sangat umum dijumpai di wilayah kita. Salah satunya adalah *mega thrust system* dalam sistem

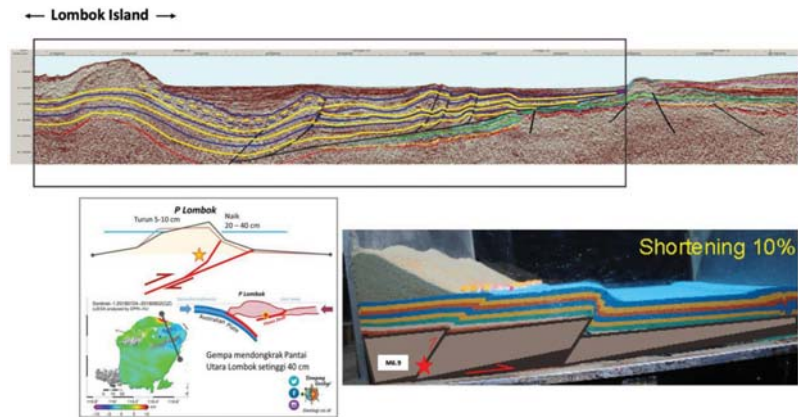
subduksi lempeng yang dapat menghasilkan gempa besar (magnitudo M9+) dan tsunami. Namun selain menghasilkan gempa berkekuatan besar, sistem sesar naik di Indonesia juga banyak menghasilkan perangkap hidrokarbon. Sistem sesar naik merupakan struktur geologi yang paling rumit dan sering kali sulit untuk diinterpretasi karena keterbatasan data seismik yang berkualitas baik. Hal tersebut dikarenakan geometri sistem sesar naik yang rumit sering memberikan refleksi yang tidak beraturan. Untuk mengatasi kondisi tersebut, maka diperlukan berbagai metoda pemrosesan ulang data seismik. Salah satu metode yang efektif untuk membantu interpretasi, selain pemrosesan ulang data seismik, adalah menggunakan integrasi pembuatan penampang seimbang (*balancing cross-section*) dan pemodelan analog *sandbox*.

Deformasi sistem sesar naik berkembang disebabkan oleh kompresi *stress* tektonik pada arah horizontal (σ_H). Secara geometri, sesar naik adalah ketika blok *hanging wall* relatif naik terhadap blok *foot wall*. Oleh karena itu, sesar naik mengakibatkan lapisan batuan di kerak bumi mengalami pemendekan secara horizontal dan memanjang secara vertikal. Proses terjadinya sesar naik adalah ketika *stress* tektonik horizontal menekan sangat kuat kerak bumi sehingga batuan pada kerak bumi mengalami pergeseran secara lateral di atas suatu bidang gelincir, kemudian terlipat dan akhirnya blok *hanging wall* naik di atas blok *foot wall*. Oleh karena itu, deformasi pada batuan sedimen, sesar naik umumnya berasosiasi dengan perlipatan (Gambar 11).



Gambar 11. Pemodelan kasus sesar naik berdasarkan interpretasi data seismik (kiri atas), desain pemodelan (kiri bawah) dan hasil pemodelan untuk beberapa pemendekan (kanan).

Selain terjadi pada sistem subduksi lempeng, sesar naik juga dapat berkembang di belakang busur kepulauan (Gunung Api). Sesar naik tipe ini banyak di jumpai di Indonesia, contohnya di Jawa, Lombok dan Nusa Tenggara. Gempa di Lombok yang terjadi pada tahun 2018, membuktikan bahwa sesar naik tipe ini juga ternyata menyimpan potensi gempa besar yang dapat menyebabkan kenaikan dan penurunan tanah di pulau tersebut sampai 20-40 cm (Gambar 12).



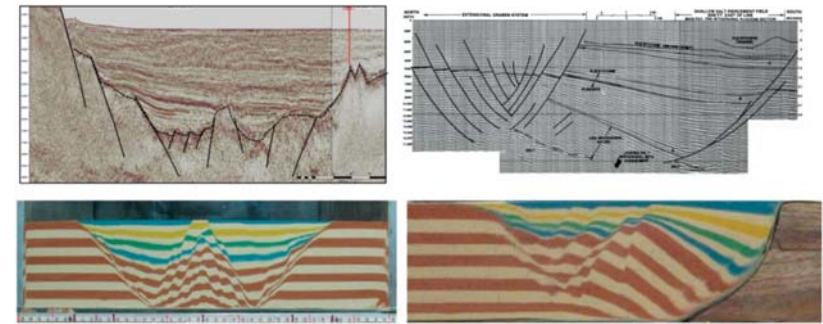
Gambar 12. Pemodelan *sandbox* sesar naik untuk kasus gempa Lombok 2018.

4.2. Kasus Deformasi Sesar Normal

Sesar normal merupakan salah satu jenis sesar yang penyebab utama terbentuknya adalah kompresi *stress* vertikal (σ_v) sehingga sangat dipengaruhi oleh adanya gaya gravitasi yang bekerja. Berdasarkan gerak relatifnya, sesar normal dapat didefinisikan sebagai sesar yang *hanging-wall* nya relatif turun terhadap *foot-wall*. Berdasarkan geometri tersebut, sesar normal menjadikan lapisan batuan di kerak bumi mengalami pemanjangan (ekstensi) secara horizontal dan memendek secara vertikal (Davis and Reynolds, 1996).

Pada deformasi sesar normal dikenal istilah *graben* dan *horst*. *Graben* adalah morfologi amblesan yang terbentuk diantara dua sesar normal dengan jurus yang sejajar namun memiliki kemiringan yang berlawanan ke arah dalam. Sedangkan *Horst* adalah morfologi tinggian yang terjadi

apabila dua sesar normal yang jurusnya sejajar dengan kemiringan berlawanan ke arah luar. Pada deformasi ini, apabila hanya ada satu sesar normal, maka morfologi amblesan yang terbentuk dikenal dengan istilah *half-graben*. Pada deformasi sesar normal dikenal juga istilah sesar *listric* apabila bentuk sesar normalnya melengkung dan sesar *planar* apabila bentuk sesar normalnya lurus (Gambar 13). Cekungan sedimentasi di Indonesia bagian Barat umumnya mempunyai struktur *half-graben* dan merupakan tempat terbentuknya hidrokarbon.



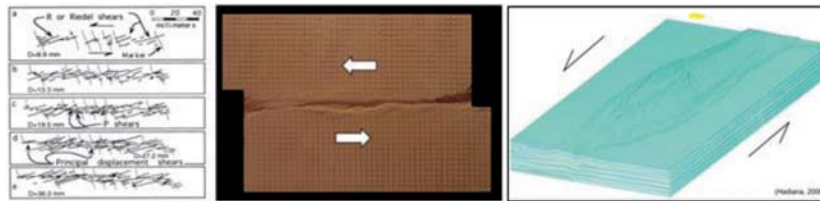
Gambar 13. Pemodelan kasus sesar normal dengan bentuk *graben* simetri berdasarkan interpretasi data seismik (kiri atas) dan gambar sebelah kanan memperlihatkan data seismik sesar normal dengan bentuk *half graben* dengan hasil pemodelan *sandbox* (kanan bawah).

4.3. Kasus Deformasi Sesar Geser

Deformasi sesar geser merupakan sistem sesar yang sangat rumit. Pola deformasi lokal pada sistem sesar ini sangat bervariasi secara horizontal. Sesar geser dipermukaan (*rupture*), biasanya dikenali dari

bentuk morfologi berupa lembah, gawir, pegunungan atau zona yang luas dan memanjang. Sesar geser dihasilkan dari tektonik yang oblique yang dikontrol oleh besaran *stress geser* (σ_s).

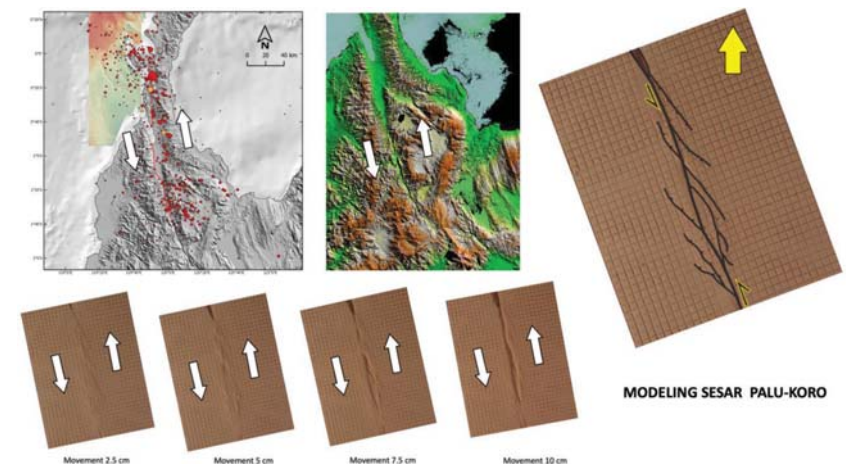
Sistem sesar geser, umumnya dicirikan oleh adanya struktur-struktur penyerta yang pembentukannya berhubungan dengan pergerakan dari sesar geser utama. Struktur penyerta tersebut dapat berupa sesar naik, sesar normal, dan lipatan. Yeats dkk. (1997) menyebutkan bahwa penelitian tentang hubungan antara sesar geser dengan struktur-struktur penyertanya, pertama kali diteliti oleh Riedel (1929) melalui pemodelan analog *clay-cake*. Percobaan tersebut kemudian dilakukan kembali oleh Tschalenko (1970) untuk menjelaskan mekanisme dan evolusi dari zona sesar mendatar lebih detail. Berdasarkan percobaan *shear-box*, Tschalenko telah sanggup menghubungkan tahap-tahap perkembangan dari zona sesar mendatar (Gambar 14).



Gambar 14. Pola struktur geologi dari hasil pemodelan *sandbox* untuk sesar geser.

Sistem sesar ini mudah untuk dikenali karena seringkali membentuk sesar utama yang panjang dan luas. Pada umumnya, deformasi pada

sistem sesar ini, secara signifikan menghasilkan gempa besar dengan besaran gempa (magnitude) 7-8. Contoh dari sistem sesar ini di Indonesia adalah Sesar Sumatra (*Semangko Fault Zone*), Sesar Palukoro, Sesar Yapen-Sorong, sedangkan di Amerika bagian barat adalah Sesar San Andreas. Sistem sesar ini, apabila muncul dipermukaan, gempa yang diakibatkannya seringkali menyebabkan kerusakan yang signifikan, contohnya Sesar Palukoro yang terjadi pada tahun 2018 (Gambar 15). Tetapi di sisi lainnya, sesar ini juga sangat efektif dalam membentuk cekungan sedimentasi yang sangat kaya akan hidrokarbon, contohnya Sistem Sesar Sumatra sebagai penyebab utama terbentuknya Cekungan Sumatra Tengah dan Selatan, cekungan penghasil hidrokarbon terbesar Indonesia.



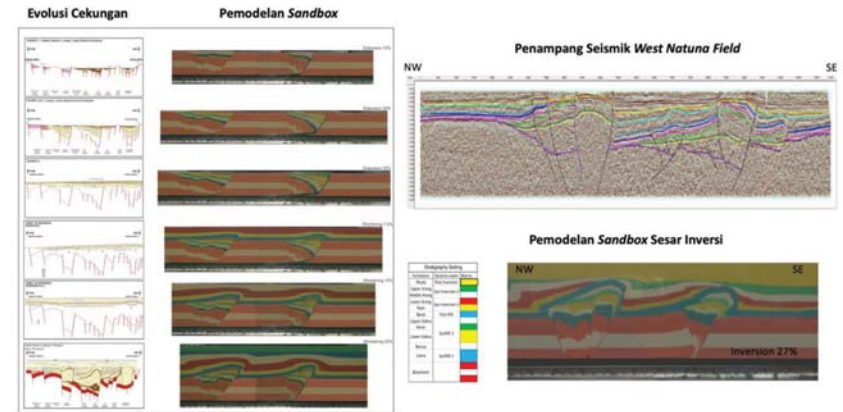
Gambar 15. Pemodelan *sandbox* sesar geser Palu Koro untuk kasus gempa 2018.

4.4. Kasus Deformasi Sesar Inversi

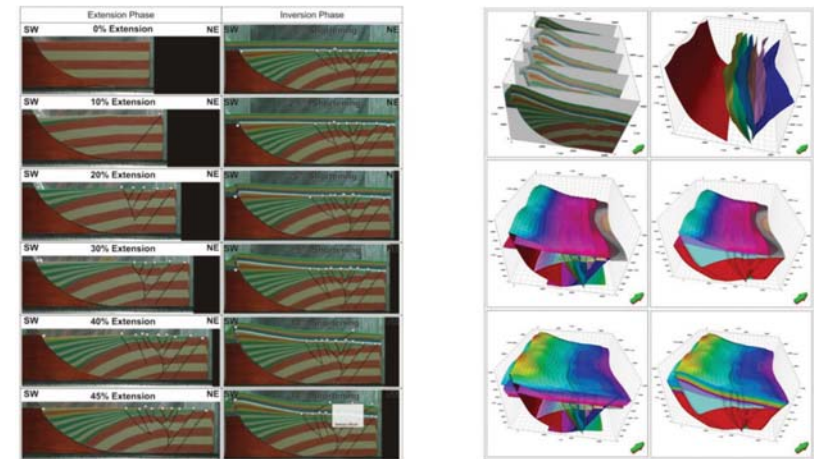
Struktur geologi yang paling rumit adalah struktur sesar yang terjadi pada suatu bidang sesar yang telah terbentuk sebelumnya. Kondisi ini memungkinkan untuk suatu sistem sesar normal berubah menjadi sesar naik (Gambar 15). Jenis struktur geologi, yang sangat penting ini, dinamakan sebagai sesar inversi. Hal ini dikarenakan sistem sesar ini, khususnya di Indonesia bagian barat merupakan lapangan hidrokarbon. Lapangan hidrokarbon di Cekungan Sumatra Tengah dan Selatan serta daerah Natuna Barat merupakan cekungan-cekungan sedimentasi yang di dominasi oleh kehadiran struktur sesar ini. Oleh karena itu, proses mekanisme inversi menjadi sangat penting dalam mengontrol pergerakan fluida hidrokarbon dari sumber ke perangkap (Gambar 17).



Gambar 16. Pemodelan *sandbox* sesar inversi (kanan = seismik, kiri = pemodelan *sandbox*).



Gambar 17. Pemodelan *sandbox* sesar inversi untuk lapangan Natuna Barat.



Gambar 18. Pemodelan *sandbox* (kanan), di buat menjadi model komputer 3D (kiri).

Hasil akhir dari sebuah pemodelan analog dapat dibuat menjadi model digital menggunakan suatu perangkat lunak pemodelan 3D.

Gambar 18, yang memperlihatkan pemodelan 3D pada kasus sesar inversi, menunjukkan bahwa hal ini sangat penting karena bisa digunakan sebagai model dalam melakukan suatu analisis struktur geologi bawah permukaan.

Berdasarkan semua uraian di atas, maka dapat disimpulkan bahwa tujuan utama dari penelitian ini, yaitu mengembangkan laboratorium pemodelan analog untuk mempelajari proses deformasi dan tektonik pada kerak bumi, telah berhasil dicapai. Selain itu, penelitian ini juga berhasil membuktikan bahwa metode pemodelan analog *sandbox* mampu memodelkan semua rezim tektonik, yang sebagian besar tatanan deformasinya terjadi pada batuan sedimen di kerak bumi. Namun walaupun begitu, beberapa hasil penelitian masih memiliki keterbatasan yang harus dievaluasi dan disempurnakan pada penelitian selanjutnya.

5. KELEBIHAN DAN KETERBATASAN PEMODELAN *SANDBOX*

McClay (1996) menyatakan bahwa keuntungan dari pemodelan analog menggunakan *sandbox* adalah: (1) dapat mensimulasikan deformasi getas pada kerak bumi bagian atas (1-10 km), (2) dapat memberikan gambaran evolusi sesar secara progresif karena kondisi awal hingga akhir proses deformasi teramati dengan baik, (3) dapat memberikan gambaran deformasi internal pada blok sesar, (4) dapat dibuat ulang dan dapat dipelajari dari berbagai bidang dan penampang, (5) dapat memberikan acuan yang realistis untuk simulasi numerik dan

simulasi seismik, dan (6) kekuatan sistem pemodelan analog ditunjukkan oleh kemampuan untuk membuat replika dari situasi geologi. Yamada dan Matsuoka (2005) menambahkan bahwa pemodelan analog *sandbox* relatif sederhana dan sangat efektif. Selain itu, kelebihan dari pemodelan analog *sandbox* adalah dalam hal konstruksi model, waktu yang diperlukan relatif cepat dan biaya yang dibutuhkan relatif rendah, serta dalam membangun model tiga dimensi, relatif mudah (Koyi, 1997).

Suatu kelebihan inovasi dalam penelitian di laboratorium *sandbox* ITB dibandingkan dengan yang ada di luar negeri adalah material pasir yang digunakan, langsung berasal dari singkapan di alam (batupasir Ngrayong dari Tuban, Jawa Timur). Berdasarkan dari semua penelitian yang telah kami lakukan, material tersebut merupakan material yang paling cocok untuk pemodelan analog *sandbox*, bahkan untuk memodelkan kondisi geologi yang rumit dan sulit.

Namun, disamping banyak keuntungan, pemodelan analog *sandbox* juga mempunyai keterbatasan. Keterbatasannya adalah bahwa dalam pemodelan ini, kompaksi masih belum dapat diperhitungkan, karena material pasir kuarsa yang digunakan bersifat lepas-lepas dan kering. Selain itu, tidak ada kompensasi isostatik yang disebabkan oleh penggunaan material pemodelan bersifat non kohesif, sehingga pada model *sandbox* tidak akan terjadi proses pelenturan. Keterbatasan lainnya adalah belum dapat dilakukannya pemodelan dengan erosi serta variasi proses sedimentasi dan perubahan fasies secara lateral. Yamada dan

Matsuoka (2005) menambahkan bahwa pemodelan analog *sandbox* memerlukan peralatan percobaan yang didesain khusus untuk tiap program percobaan dan kehadiran efek tepi oleh peralatan yang sangat mempengaruhi hasil percobaan.

Walaupun memiliki keterbatasan, namun dengan melihat banyaknya keuntungan, maka hasil pemodelan analog *sandbox* masih sangat dapat dijadikan penuntun dalam interpretasi struktur geologi baik lapangan, sumur bor, maupun data seismik. Sebagai contoh, seseorang yang melakukan interpretasi dapat menggunakan hasil pemodelan untuk memprediksi geometri struktur bawah permukaan bumi yang datanya sedikit bahkan tidak ada. Selain itu, seorang penginterpretasi dapat menggunakan hasil pemodelan untuk menjelaskan perkembangan struktur sepanjang waktu. Sangatlah penting untuk diperhatikan bahwa sebelum mengaplikasikan hasil pemodelan dalam interpretasi struktur, seorang penginterpretasi harus sepenuhnya memahami keterbatasan dari studi pemodelan analog. Khususnya, mereka harus mengenali bagaimana material pemodelan, kondisi batas, dan efek tepi yang dapat mempengaruhi hasil pemodelan.

6. LANGKAH KE DEPAN

Seperti telah diuraikan sebelumnya, Pemodelan Analog *Sandbox* merupakan metode pemodelan analog yang paling efektif untuk studi dan pemahaman pola dan geometri dari deformasi pada kerak bumi. Khusus-

nya, deformasi yang terjadi pada cekungan sedimentasi yang mempunyai struktur geologi yang rumit. Hal tersebut dikarenakan berkaitan langsung dengan eksplorasi dan pengembangan lapangan hidrokarbon. Namun, masih ada beberapa hal yang ada pada kondisi sebenarnya, yang masih sulit untuk dimodelkan. Padahal, hal-hal tersebut, seperti tekanan, temperatur dan keberadaan fluida mungkin bisa berpengaruh terhadap hasil akhir suatu pemodelan. Keadaan tersebut perlu dipertimbangkan, karena, berdasarkan penelitian, di alam ditemukan suatu kondisi geologi yang apabila menggunakan konsep proses deformasi sederhana, sulit untuk dijelaskan. Hal ini dikarenakan adanya kombinasi antara gaya yang bekerja (tektonik vs gravitasi) dan sifat kekuatan batuan. Sebagai contoh adalah deformasi yang terjadi pada lingkungan pengendapan delta misalnya Delta Mahakam di Kalimantan Timur. Oleh karena itu, diperlukan adanya inovasi teknologi yang akan memberikan pendekatan yang berbeda, baik berupa kombinasi material pemodelan yang digunakan maupun desain aparatus. Contoh dari inovasi teknologi itu adalah pemodelan analog dengan menggunakan kombinasi material pasir dengan material sintetis yang dapat bersifat plastis (*viscous*) pada temperatur ruangan, misalnya *silicon putty* (PDMS, lihat Table-1).

Beberapa hal yang saat ini sedang dan akan dikembangkan di laboratorium *sandbox*, Geodinamik ITB adalah:

1. *Particle Image Velocimetry (PIV)*.

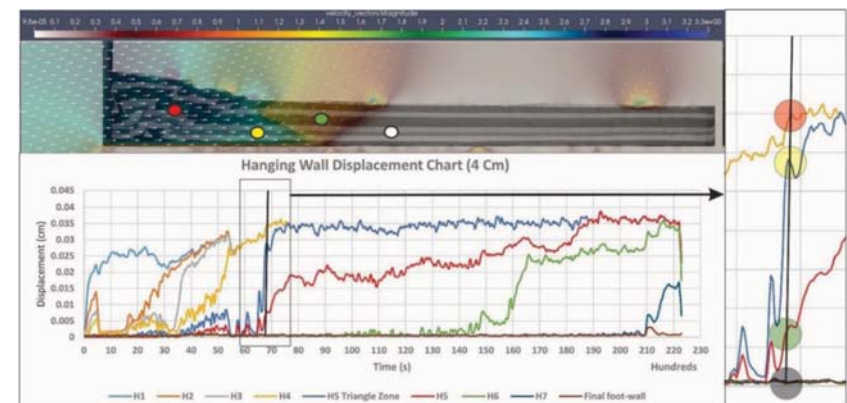
Salah satu permasalahan utama yang ingin diketahui dalam kasus

eksplorasi hidrokarbon adalah hubungan antar fluida dan pergerakan sesar. Untuk hal ini diperlukan pengamatan yang lebih mikro yang dapat memperlihatkan akumulasi *strain* pada jalur sesar yang akan dihubungkan dengan peningkatan jumlah rekahan mikro yang menyebabkan peningkatan permeabilitas sesar. Oleh karena itu, kami mengembangkan semua metode dengan memanfaatkan kamera digital yang mempunyai resolusi dan kecepatan tinggi. Salah satu metode tersebut adalah *Particle Image Velocimetry (PIV)*.

PIV merupakan metode pengukuran tidak langsung dan bersifat non-intrusif yang memungkinkan untuk mengidentifikasi vektor pergerakan, pada umumnya, fluida. Metode ini dapat juga diaplikasikan untuk mempelajari pergerakan material berbutir, sehingga, secara khusus, dapat juga dipergunakan untuk mempelajari perilaku kinematika pasir dalam pemodelan *sandbox*.

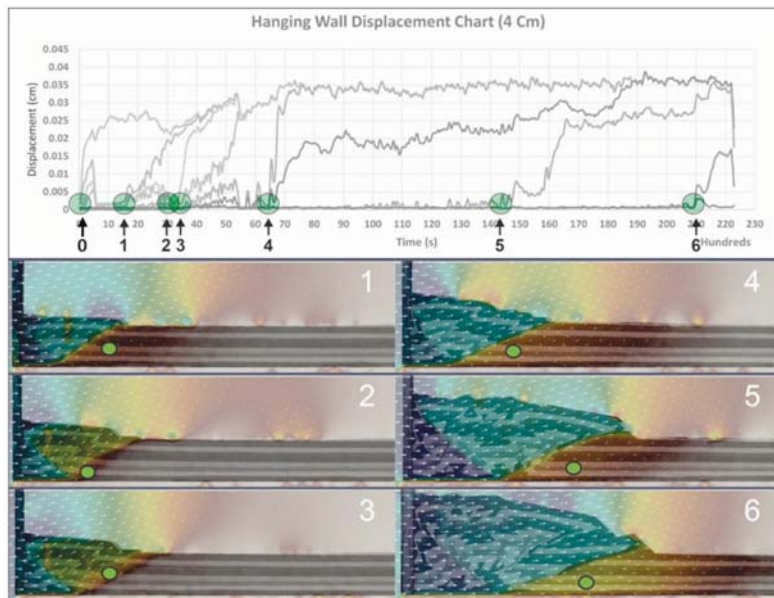
Produk dari PIV adalah berupa peta vektor perpindahan (*displacement*) yang terjadi pada dua buah citra fotografi yang diambil secara berurutan. Perlu diketahui, bahwa PIV tidak berupaya untuk mengobservasi dan mengidentifikasi sebuah butiran tertentu, selayaknya mata manusia bekerja, namun dalam suatu wilayah atau jendela tertentu yang disebut dengan *Interrogation Window (IW)*, dengan suatu IW akan memberikan satu buah panah vektor. Secara teoritis, resolusi maksimum dari metode ini dapat mencapai 0.125 mm/pixel, namun pada prakteknya, dengan menggunakan kamera

dengan sensitifitas tinggi, peningkatan resolusi dapat dicapai sehingga analisis dapat dilakukan pada citra dengan resolusi yang lebih tinggi. Analisis ini dilakukan dengan cara mengukur bagian-bagian model yang secara visual memiliki karakter pergerakan yang berbeda. Pada Gambar 19 terlihat bahwa ada empat segmentasi pergerakan yang masing-masing dicirikan oleh warna biru tua, biru muda, jingga, dan tanpa warna. Langkah selanjutnya, kecepatan untuk setiap titik waktu pengamatan untuk masing-masing segmentasi tersebut diukur dan diplot pada grafik waktu terhadap pergeseran.



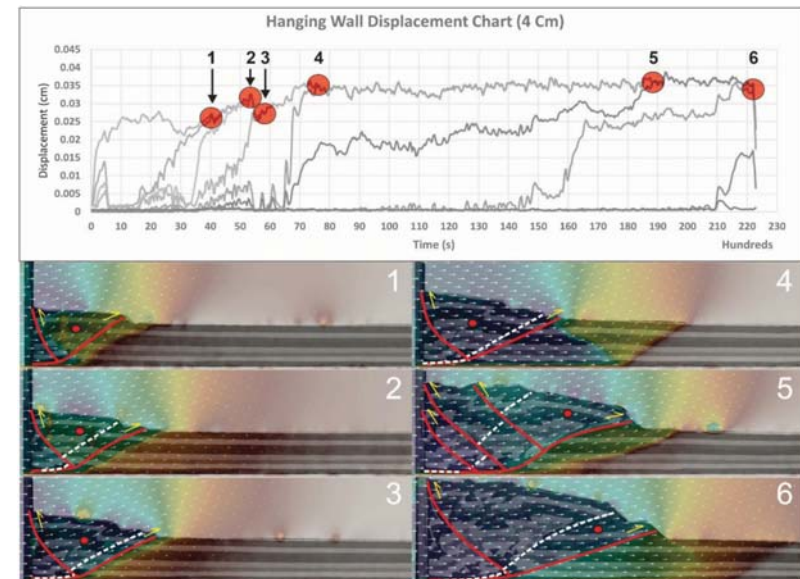
Gambar 19. Ilustrasi mengenai produk dari analisis PIV. Titik berwarna pada penampang menunjukkan lokasi pengukuran kecepatan dari blok yang berperan dalam proses deformasi. Blok ini diidentifikasi melalui kesamaan karakter gerak secara visual. Grafik ini menggambarkan dinamika pergerakan dari *hanging-wall* dan *foot-wall* selama proses deformasi. Inset menunjukkan besar kecepatan gerak dari blok yang bersangkutan, ditunjukkan oleh warna lingkaran yang sama.

Secara intuitif dapat ditafsirkan bahwa titik belok dari kurva menunjukkan awal mula dari proses pensesaran (Gambar 20). Jumlah dari titik belok ini menunjukkan jumlah *fore-thrust* yang terbentuk. Kemudian, pertemuan antara dua kurva menunjukkan akhir dari proses pensesaran (Gambar 21), dengan kata lain terjadinya amalgamasi antara blok *hanging-wall* dengan blok *foot-wall* didepannya. Dari grafik ini dapat ditelusuri lebih lanjut bahwa adanya koinidensi antara perubahan gradien dari kurva dengan fase deformasi atau aktifitas sesar (Gambar 22), sehingga apabila hasil

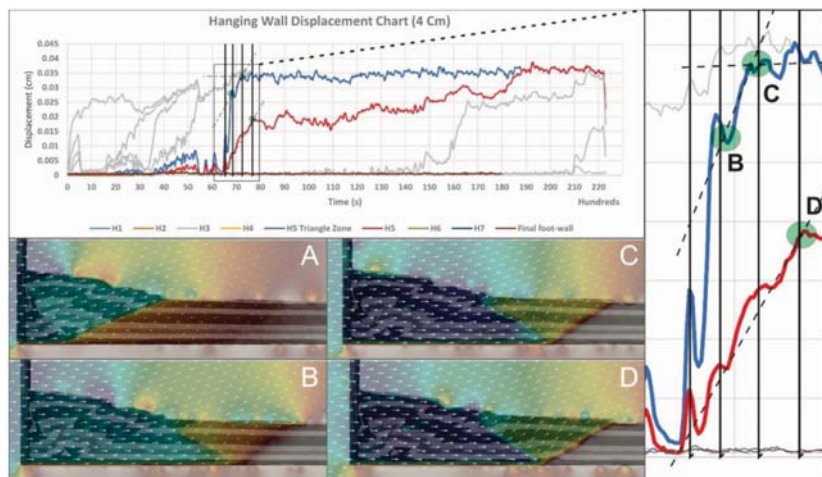


Gambar 20. Ilustrasi mengenai kondisi awal mula aktifnya sesar, dapat diketahui bahwa ada tujuh sesar.

pengamatan ini dapat dikorelasikan dengan aktifitas blok *hanging-wall* dari sesar aktif yang dijumpai hari ini, maka dapat dilakukan semacam prediksi mengenai aktifitas sesar tersebut. Saat ini penelitian PIV merupakan bagian dari disertasi mahasiswa S3 di laboratorium *Sandbox*, Geodinamik ITB.



Gambar 21. Pertemuan dua kurva menunjukkan tanda berakhirnya sebuah sesar.



Gambar 22. Ilustrasi mengenai koinidensi antara titik belok dari kurva dengan tahapan tertentu dari perkembangan sesar.

2. Metode yang harus dikembangkan untuk kedepannya adalah metoda pemodelan *sandbox* secara numerik dengan menggunakan pemodelan matematika elemen berhingga (*Finite Element Method/FEM*) atau *Finite Difference Method (FDM)*. Keuntungan dari pemodelan numerik ini adalah adanya kemudahan dalam memilih parameter deformasi dan menganalisis kondisi batas geologi. Namun dalam mengembangkan metode ini, diperlukan perngertian mendalam tentang mekanisme suatu deformasi yang terjadi, yang pada akhirnya, dapat membuat persamaan berurutan berkaitan dengan deformasi yang membentuk struktur geologi kompleks.

7. PENUTUP

Tantangan dalam dunia eksplorasi dan pengembangan lapangan hidrokarbon di Indonesia adalah nyata dan kritis. Permasalahan kompleksitas dalam struktur geologi yang ada di cekungan sedimentasi dan lapangan produksi hidrokarbon di Indonesia merupakan tantangan yang harus dihadapi dan diselesaikan segera, agar bisa membantu meningkatkan baik itu penemuan baru maupun memaksimalkan produksi yang telah ada. Masih banyak tantangan ke depan yang memerlukan banyak inovasi dalam teknologi maupun metode evaluasi dan analisis struktur geologi.

Akhir kata, saya berharap pendekatan pemodelan struktur geologi terutama analog *sandbox* dapat digunakan secara maximal dan berkesinambungan baik untuk kepentingan penelitian-penelitian mahasiswa S1, S2 dan S3 maupun pemecahan permasalahan struktur geologi yang timbul dalam eksplorasi dan pengembangan lapangan hidrokarbon di Indonesia. Sangat diharapkan dengan memanfaatkan aplikasi pemodelan analog *sandbox*, di masa depan ITB dapat menjadi ujung tombak yang membantu memecahkan permasalahan energi nasional melalui penemuan lapangan hidorkarbon yang baru.

8. UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadiran Allah SWT atas semua karunia yang telah dilimpahkanNya hingga saat ini.

Perkenankan saya menyampaikan ucapan terimakasih yang sebesar-besarnya khususnya kepada yang terhormat:

- Rektor dan Pimpinan ITB,
- Pimpinan dan Anggota Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan untuk menyampaikan orasi ilmiah dihadapan para hadirin sekalian pada forum yang terhormat ini.
- Ibu Dr. Ir. Dina Anggreni Sarsito, MT
- Bapak Dr. Eng. Imam Achmad Sadisun ST. MT, selaku Dekanat dan
- Seluruh Staf Akademik yang telah banyak membantu kelancaran aktifitas di FITB-ITB.

Pencapaian jabatan guru besar ini tentunya bukan semata-mata suatu pencapaian pribadi melainkan banyak pihak yang turut memberikan bantuan dan dukungannya. Dalam membangun dan berinovasi untuk pemodelan analog *sandbox* yang pertama dan satu-satunya di Asia Tenggara, tentunya tidak mungkin tanpa bantuan dari berbagai pihak, baik itu individual termasuk seluruh mahasiswa bimbingan dan asisten akademik, pemerintah maupun perusahaan Migas Nasional dan Multinasional.

Saya mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada begitu banyak pihak yang telah membantu, yang tidak dapat saya sebutkan satu persatu pada kesempatan terbatas ini. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan tersebut.

Terima kasih khusus saya ucapkan kepada:

- Prof. R. P. Koesoemadinata
- Prof. Emmy Suparka
- Prof. Lambok Hutasoit
- Prof. Jahdi Zaim
- Prof. Eddy A. Subroto
- Prof. Sri Widiyantoro
- Prof. Satria Bijaksana
- Prof. Doddy Abdassah
- Prof. Edy Sunardi (UNPAD)
- Prof. Mark Closs (UT, Austin, TX, USA)
- Prof. Robert Hall (RHUL, UK)

yang telah memberikan rekomendasinya untuk pengangkatan guru besar saya. Semoga Allah SWT membalas budi baik Bapak dan Ibu Sekalian.

Terima kasih saya ucapkan juga kepada guru-guru saya, khususnya (alm) Prof. Sukendar Asikin serta rekan-rekan Dosen di Prodi Teknik Geologi ITB, terutama teman-teman di Laboratorium Pemodelan Analog *Sandbox* Geologi Dinamik, khususnya Dr. Meli Hadiana, ST. MT. yang selama ini selalu membantu dan mensupport secara konsisten dalam penelitian-penelitian maupun studi yang saya lakukan. Semoga Allah SWT memberikan kesehatan dan membalas semua kebaikan tersebut.

Terima kasih yang tak terbatas saya ucapkan kepada orang tua saya tercinta,

- Mami, Dra. Siti Kencana Moeis (alm),
- Drs. Rudi Wilson (alm)
- Papa, Prof. Dr. Ir. Sudjana Sapiie MSc. (Yang saya hormati dan banggakan)

Mereka yang telah membesarkan dan mendidik dengan penuh kasih sayang dan selalu mendoakan untuk kebaikan saya.

- Kepada Kakak dan adik-adik saya, Gina, Chicky, Stephanie, Mimi dan Afra serta keluarga besarnya, terima kasih atas doa, perhatian, bantuan, dan dukungannya selama ini, semoga Allah SWT selalu menjaga dan memberikan jalan yang terbaik untuk kita semua.

Terima kasih juga saya tujukan kepada Keluarga besar Mertua saya,

- Papa, A. Rusli Nasution (alm)
 - Mama, Maskurnia Moensie (alm),
- beserta Kakak-kakak dan Adik-adik atas bantuan, dukungan serta doanya selama ini. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan tersebut dan memberikan kesehatan kepada kita semua.

Terima kasih khusus, saya berikan kepada Isteri dan putra-putri tercinta,

- YUSDIANA MORA SAPIIE
 - RENDHY MORENO SAPIIE
 - MORENDA BENITTA SAPIIE
- yang selama ini selalu mendampingi, dan memberikan kasih sayang, dukungan, perhatian serta mendoakan untuk kesehatan

dan keberhasilan saya. Semoga Allah SWT selalu melindungi kita semua.

DAFTAR PUSTAKA

Anderson, E.M., 1951, *The Dynamics of Faulting*, Oliver & Boyd.

Cloos, E., 1955, *Experimental Analysis of Fracture Patterns*, Bulletin Geology Society, Vol. 66, hal. 241-256.

Cloos, E., 1968, *Experimental analysis of Gulf Coast fracture patterns*, Bull. Am. Ass. Petrol. Geol., Vol. 52, hal. 420-441.

Coulomb, C. A., 1776, *Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture*, Mem. Acad. Roy. Div. Sav., Vol. 7, hal. 343-387.

Davis, G. dan Reynolds, S. J., 1996, *Structural Geology of Rocks and Regions*, John Wiley & Sons Inc, hal. 776.

Eisenstadt, G., Withjack, M.O. dan Vendeville, B.C, 1997, *Introduction to Experimental Modeling of Physical Processes*. University of Texas.

Fossen, H., 2010, *Structural Geology*, Cambridge University Press. Cambridge, U.K & New York, hal. 323, 349, 394, dan 397.

Graveleau, F., Malavieille, J. dan Dominguez, S., 2012, *Experimental modelling of orogenic wedges: A review*, Tectonophysics. Vol. 538-540, hal. 1-66.

Hubbert, M. K., 1951, *Theory of Scale Models as Applied to Study of Geological*

- Structure. Geological Society of America, Vol. 48, hal.1459-1520.
- Koyi, H., 1997, *Analogue Modeling: From a Qualitative to a Quantitative Technique - a Historical Outline*, Journal of Petroleum Geology, Vol. 20, No. 2, hal. 223-238.
- Mandl, G. A., 1988, *Mechanics of Tectonic Faulting*, Elsevier.
- McClay, K. R. dan Ellis, P., 1987, *Listric Extensional Fault Systems-results of Analogue Model Experiments*, Basin Research, Vol. 1, hal. 55-70.
- McClay, K. R. 1990. *Deformation Mechanics in Analogue Models of Extensional Fault Systems*. Geological Society Special Publication. Vol. 54: hal. 445-454.
- McClay, K. R., 1996, *Structural Geology*, Fault Dynamic Research Group, Geology Departement, Royal Holloway University of London, hal. 25-38.
- Mohr, O., 1900, *Welche Umstande Bedingen Die Elastizitatzgrenze Und Den Bruch Eines Materials? (What Are The Conditions For The Elastic Limit And The Fracturing Of The Materials?)*, Z. Der. dt. Ing, Vol. 44, hal. 1524-30, 1572-7.
- Riedel, W., 1929, *Zur Mechanik Geologischer Brucherscheinungen. Centralblatt Fur Minerologie, Geologie, und Paleontologie*, 1929B, hal. 354.
- Sapiie, B. dan Hadiana, M., 2014, *Analogue Modeling of Oblique Convergent Strike-Slip Faulting and Application to The Seram Island, Eastern Indonesia*, Indonesia Journal on Geoscience, Vol. 1, No 3, hal. 121 – 134.

- Sapiie, B. dan Hadiana, M., 2007, *The Mechanism of Some Rift Basin in the Western Indonesia*, Proceedings of 31st Annual Convention Indonesian Petroleum Association, Jakarta.
- Sapiie, B., Hadiana, M., Pamumpuni, A., Kurniawan, A. dan Daniel, D., 2013, *Evolution of Fold-Thrust-Belt Deformation in the Eastern Indonesia Region*, Proceedings of 37th Annual Convention of the Indonesian Petroleum Association, Jakarta, Indonesia.
- Sapiie, B., Hadiana, M., Patria, M., Adyagharini, A. C., Saputra, A., Teas, P., dan Widodo, 2012, *3D Structural Geology Analysis Using Integrated Analogue Sandbox Modeling: A Case Study Of The Seram Thrust-Fold Belt*, Proceedings of 36th Annual Convention Indonesian Petroleum Association, Jakarta.
- Sapiie, B. dan Harsolumakso, A.H., 2000, *Pemodelan Analogik untuk Proses Pembentukan Struktur Geologi*, Buletin Geologi, Departemen Teknik Geologi, ITB, Vol. 32, No. 3.
- Sapiie, B., Pamumpuni, A. dan Hadiana, M., 2008, *Balancing cross-section and sandbox modeling of Satui Fold-thrust-belt, Asem-asem Basin, South Kalimantan*, Proceedings of the 32nd Annual Convention of the Indonesian Petroleum Association, Jakarta, Indonesia.
- Tschalenko, J.S., 1970, *Similarities Between Shear Zones of Different Magnitudes*, GSA Bull. Vol. 81, hal. 1625-1640.
- Withjack, M.O. dan Peterson, E.T., 1993, *Prediction of normal fault geometries*

- *A sensitivity analysis*, Association of American Petroleum Geologists Bulletin, Vol. 77, hal. 1860 - 1873.

Withjack, M. O., 1999, *Application of Modeling Results: in Introduction to Experimental Modeling of Tectonic Processes*, Geological Society of America.

Withjack dan Jamison. 1986. *Deformation Produced by Oblique Rifting*. Tectonophysics. Vol. 126, hal. 99 - 124.

Yamada, Y. dan Matsuoka, T., 2005, *Digital Sandbox Modeling Using Distinct Element Method: Applications to Fault Tectonics*, dalam Sorkhabi, R. dan Tsuji Y. Eds, Faults, fluid flow, and petroleum traps, Association of American Petroleum Geologists Memoir, Vol. 85, hal. 107 - 123.

Yeats, S. R., Sieh, K. E, & Allen, C. R., 1997, *The Geology of Earthquakes*, Oxford University Press, hal. 167-244.

BIODATA



Nama : **Prof.Ir. BENYAMIN SAPIIE, Ph.D.**
Tmpt. & tgl. lhr. : Bandung, 16 Oktober 1961
Kel. Keahlian : Geodinamika dan Sedimentologi
Fak./Sekolah : Fakultas Ilmu dan Teknologi
Kebumian
Nama Istri : Ir. Yusdiana Mora Sapiie, MT.
Nama Anak : 1. Rendhy Moreno Sapiie, S.Si. Msc.
2. Morenda Benitta Sapiie. S.Sn.

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

1. 1998 : S3 Geological Sciences, University of Texas at Austin, USA.
2. 1987 : S1 Teknik Geologi, Institut Teknologi Bandung, ITB.

II. RIWAYAT KERJA DI ITB

1. Staf Pengajar Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian - Teknik Geologi, Maret 1988 - sekarang.
2. Kepala Laboratorium Geologi Komputasi, Prodi Teknik Geologi, FITB - ITB, 2008 - 2012.
3. Ketua Program Studi Magister dan Doktor, Prodi Teknik Geologi, FITB - ITB, 2012 - 2015.
4. Wakil Dekan Bidang Akademik, FITB - ITB, 2015 - 2016.
5. Dekan, FITB - ITB, 2016 - sekarang.

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

1. CPNS, III/a, Maret 1989.

2. Penata Muda, III/a, Oktober 1990.
3. Penata Muda Tk.I, III/b, April 2001.
4. Penata, III/c, Oktober 2004.
5. Penata Tk. I, III/d, Oktober 2008.
6. Pembina, IV/a, Oktober 2010.
7. Pembina TK. I, IV/b, April 2019.

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

1. Asisten Ahli, Januari 2001.
2. Lektor, Juni 2004.
3. Lektor Kepala, 1 Mei 2008.
4. Professor/Guru Besar, November 2018.

V. PENGALAMAN KERJA

1. *Visiting Professor/Research Scientist in Nuclear Sciences and Engineering, MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY, USA (MIT).*
(2009-2010)

Sebagai ahli geologi struktur dan geomekanik, peneliti ilmiah, menulis proposal penelitian dan *supervisor* mahasiswa dalam “*deep borehole disposal of nuclear wastes program and enhanced geothermal (nuclear geothermal) research*” di USA.

2. **INDUSTRI PESAWAT TERBANG NUSANTARA (P.T. IPTN) BANDUNG:**
(1988- 1989)

Ahli Geologi dan Remote Sensing dalam melaksanakan penelitian, pemanfaatan beberapa tipe penginderaan jauh (seperti SAR) dalam pemetaan geologi dan mengembangkan perangkat lunak penginderaan jauh untuk komputer desktop.

3. **P.T. TRIAS dan P.T. Gondwana (Konsultan geologi) BANDUNG, INDONESIA**
(1987–1988)

Sebagai Ahli Geologi dalam melaksanakan beberapa pemetaan permukaan di Sumatra, Kalimantan, Timor dan Jawa. Juga melaksanakan proyek pemetaan lapangan dalam hubungannya dengan eksplorasi mineral dan hidrokarbon.

VI. KEGIATAN PENELITIAN DAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT

1. Tectonic Evolution and Distributions of Triassic Sandstone at Bird Head Area: Implication of New Hydrocarbon Plays in West Papua, Indonesia, 2018.
2. Pemodelan Rekahan Geologi dengan Observasi Lapangan dan Pemetaan dengan AUV (Drone): Fase II, 2018.
3. Significant Impact Using integrated 3D *Sandbox* Modeling and Palinspatic Reconstructions of Fold-Thrust-Belt for Exploring Hydrocarbon Prospect in Eastern Indonesia, 2018.
4. Model Analog *Sandbox* Untuk Perkembangan Morfologi Akibat Sesar Naik Aktif”, Dikti, 2017-2019, Bandung.
5. Geological Field Work Study Services, ENI Arguni I Limited, 2017.
6. Karst Field Trip and Workshop for Tangguh Drilling Program, BP

- Berau Ltd, 2017.
7. Provision for plan of Development Studies and Reserve Certification of Salawati Block Services, Mont D'Or Salawati Limited, 2016.
 8. Advanced Outcrop Mapping Using Drone Technology 3D Digital Photography at Mahakam District East Kalimantan / AMVOP, Total E&P Indonesia, 2016.
 9. Studi Potensi Mikrofases Karbonat Sebagai Batuan Induk dan Dampak Pensesaran Pada Batuan Karbonat, PT. Pertamina (Persero), 2015.
 10. Joint Study West Yamdena, PT Saka Energi Indonesia, 2015.
 11. Conventional Oil & Gas Joint Study of Sermata Island Offshore Block, Shell International Exploration and Production BV, 2015.
 12. Shale Hydrocarbon Joint Study at Eastern Region of Central Sumatera Basin, Riau, Konsorsium Lion Energy LTD-Techwin Energy LTD (Konsorsium Sumteng Timur), 2015.
 13. Provision of Joint (G&G) Study Cendrawasih VIII Services, Lundin Oil & Gas BV, 2015.
 14. Model Analog *Sandbox* Untuk Perkembangan Morfologi Akibat Sesar Naik Aktif, LPPM, 2015.
 15. Model Analog *Sandbox* Untuk Perkembangan Morfologi Akibat Sesar Naik Aktif, AUN-SEED Net, 2014.
 16. Structural Restoration Study Phase 2, INPEX BABAR SELARU LTD., 2014.
 17. Consultancy Services for Karst Formation Analysis for Tangguh Overburden Project, BP Berau Ltd, 2014.

18. G&G Supervising and Consultancy Services, KSO PT. Pertamina EP, PT Energi Jambi Indonesia, 2014.
19. Joint Study SW Timor Sea, Total E&P Indonesia, 2014.
20. Joint Study NE Timor Sea, Total E&P Indonesia, 2014.
21. Oil and Gas Joint Study of Offshore Numfor - Biak Basin – Papua, Repsol Exploration Numfor BV, 2014.
22. Studi Fault Seal Analysis Area Ciputat Rengasdengklok, PT. Pertamina EP, 2014.
23. Jasa Studi Rekahan Pada Shale dan Hubungannya terhadap Akumulasi Gas Pada WK Migas Tanjung - I Kalimantan Selatan, PT. Pertamina (Persero), 2014.
24. Advanced Reprocessing Multi Attribute Seismic, Goldwin Pacific Ltd., 2014.
25. Oil and Gas Joint Study of Dolok Block, Papua, Energy Partners Dolok, PT., 2013.
26. Studi Bersama Wilayah Apel, Daratan Riau, Goldwin Pacific Ltd., 2013.
27. Palinspatic Reconstruction and 3D Structural Evolution of the Sadang South Sageri & Surrounding Area (South Makassar Basin), Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan TALISMAN (SAGERI) Ltd., 2013.
28. Oil and Gas Joint Study of South MOA Island, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Shell Indonesia, 2013.
29. Geomechanical Analysis of Fractured Basement Minas NFR, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Chevron Pacific Indonesia Bakung Office, 2013.

30. Oil & Gas Joint Study of Non Conventional (shale Hydrocarbon) Area at Bengkalis Deep Block, Riau, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PETROSELAT LTD., 2013.
31. Provision of Detail Geological Survey in Jailolo, Northern Halmahera, Indonesia, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Star Energy Geothermal Halmahera, PT., 2013.
32. Jasa Studi G&G Prospek Fracture Play, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan BOB PT. Bumi Siak Pusako-Pertamina Hulu, 2013.
33. WD Paleocene Compartmentalization Study, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan BP Berau Ltd., 2013.
34. Structural Project of Sorong Area Halmahera II PSC, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Statoil Indonesia Halmahera II AS, 2013.
35. Swakelola-Structural Restoration Study, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Inpex Babar Selaru Limited, 2013.
36. Joint Study untuk Wilayah BOKA, Daratan PAPUA, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Konsorsium PT Pertamina Hulu Energi-ExxonMobil Oil Indonesia, 2013.
37. Carbonate Fractured Reservoir Study at Ujung Pangkah Field, East Java, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Hess (Indonesia Pangkah) Ltd., 2013.
38. Carbonate Laboratory Analysis and Salawati Basin Comparison (seismic Interpretation & Petrographic Analysis), Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Statoil Indonesia Halmahera II AS, 2013.
39. Provision of Sample Purchase and Lab. Analysis Services, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan LUNDIN SAREBABV, 2013.
40. Study Sponsorship Agreement, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan

Repsol Exploration Cendrawasih II BV, 2013.

41. Provision of Comprehensive Study On JS-I Ridge Fracture Basement Reservoir, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Pertamina Hulu Energi WMO, PT., 2013
42. "Sumba-Sawu" Block Joint Study, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Total E&P Sawu, 2012.
43. Joint Study: Wilayah Kerja Gas Metana Batubara (WK GMB) di Long Beleh Area Provinsi Kalimantan timur, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Konsorsium PT. Noventa Energy-ExxonMobil, 2012.
44. Provision of Intergrated Fault Modeling and Well Targeting Services for Rajabasa, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Supreme Energy Rajabasa PT., 2012.
45. Migas Joint Study of Central Mahakam, Offshore Makassar Strait, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Perfect Circle Engineering PT., 2012.
46. Joint Study On/Offshore Seram Area, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Consorsium of Manawoka Exploration Limited - Samud, 2012.
47. Rajamadala Limestone Research, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan ESSO Exploration Inc., 2012.
48. Studi Regional Play Mesozoik Kawasan Timur Indonesia, Studi Regional Play Paleogene, Pra-Tersier dan Basement Area Jawa dan Studi Regional Endapan Syn-Rift di Sumatera, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Pertamina (persero) UTC, 2012.
49. North Adang Block Joint Study, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan TOTAL E&P Kendilo, 2012.

50. Studi Bersama dalam rangka penawaran langsung wilayah Kerja Gas Metana Batubara (WK GMB) di Available Blok GMB Kuala Kapuas I Provinsi Kalimantan Tengah, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Tranaco Utama, PT. CBM Asia Development Corp., 2012.
51. Joint Study Potensi Hidrokarbon di Blok Abar, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Pertamina (Persero), 2012.
52. Seal Integrity Study of Kujung Prospect, East Java, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Husky-CNOOC Madura Ltd., 2012.
53. Studi Bersama Wilayah Muna, On/Offshore Sulawesi Tenggara, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Asia Mineral Samudra, 2012
54. Studi Bersama Wilayah Kerja Migas Non Konvensional (Shale Hydrocarbon) di Area Existing WK Migas West Tanjung, Kalimantan Tengah, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan MRI Energy, PT, 2012.
55. Studi Bersama Wilayah Bukit Barat, Lepas Pantai Natuna, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Premier Oil Overseas BV, 2012.
56. Evaluasi Cadangan Hidrokarbon dan Batubara di Lapangan Tapian Timur, Tanjung, Kalimantan Selatan, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Adaro Indonesia, PT., 2012.
57. G&G Study Fractured Reservoir Characterization of LAMA Formation Natuna Block A, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Premier Oli Indonesia, 2012.
58. Provision of Structural Characterization of Warukin Coal (Bid number A2342166), Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Indobarambai Gas Methan, PT. Barito Basin Gas, 2012.
59. Cendrawasih-Field Study and Laboratory Analysis, Kerjasama

- PT. LAPI-ITB dengan ExxonMobil (Cepu), 2012.
60. Fractured Basement Study Focused on NEB and Panen Field, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Petrochina International Jabung Ltd., 2012.
61. Provision of Anoa North GGRE Study, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Premier Oil, Sulawesi Selatan, 2012.
62. Alur Siwah NSBA Seismic Study, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Premier Oil, Sulawesi Selatan, 2012.
63. A Review of the Geology of the Biak Basin, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan BUT Repsol Exploration Cendrawasih II BV, 2012.
64. Kapuas CBM Geological Field Work, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan BP Kapuas III Limited (EP), 2012.
65. Kapuas CBM Geological Field Work, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan BP Kapuas II Limited (EP), 2012.
66. Rajamandala Limestone Research Proposal, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan ESSO, 2011.
67. Migas Joint Study of West Tanjung Area, Onshore Central Kalimantan (Studi Bersama Wilayah West Tanjung, Daratan Kalimantan Tengah), Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Karya Inti Petroleum, 2011.
68. Technical Due Diligence/Studi Kelayakan Teknik Karang Agung Block – Odira Energy, Karang Agung – Sumatra Selatan, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Pamapersada Nusantara, 2011.
69. Provision of Integrated Fault Modeling and Well Targeting Services for Muara Laboh, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT.

- Supreme Energy, 2011.
70. Fracture and Geomechanics Study of Suban Field, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Conoco Phillips (Grissik), 2010-2011.
 71. Studi Bersama Wilayah Gurita, Natuna Barat, Kepulauan Riau, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Ditjen MIGAS Natuna Ventures B.V, 2010.
 72. Provision of Sekayu Block G & G Study Service (91030011-OQ), Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Star Energy (Sekayu) LTD., 2009-2010.
 73. Rajamandala Research and Drilling, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Exxon Mobil (ESSO Indonesia Inc), 2009-2010.
 74. Sand Box Modelling Study of Citarum Block, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan BPREC Ltd., 2010.
 75. Structural Restoration of Semai Area, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Murphy Oil Corporation dan, 2010.
 76. Migas Joint Study of North Kuantan, Riau, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. MRI Energi/BP Migas, 2008-2009.
 77. Migas Joint Study of Gundih/Ex-Blora Region, Continent Jawa Tengah, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Seleraya/Ditjen Migas, 2008-2009.
 78. Study Petroleum System Sulawesi Timur dan Maluku-Papua Selatan, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Badan Pelaksana Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi (BP Migas), 2008-2009.
 79. Buton Geological Field Survey, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan JAPEX BUTON LTD., 2009.

80. Jasa Akuisisi Seismik 3D di Lokasi/Daerah Gunung Kemala Limau, Sumatera Selatan, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan PT. Elnusa TBK., 2008.
81. Pemodelan Analog *Sandbox* Untuk Deformasi Kontraksional, LPPM, 2006-2007
82. Jasa Studi Regional dan Eksplorasi Hidrokarbon CPP Blok, Cekungan Sumatera Tengah, LPPM, 2005
83. "Study of Central Sumatera Tectonic Framework Evaluation", LPPM 2005
84. Studi Stratigrafi/Sedimentasi dan Analisa Karakter Sesar Implikasinya dalam pemerangkapan Hidrokarbon daerah Karangbaru-Melandong-Tegaltaman-Cekungan Jawa Barat Utama, LPPM, 2005.

VII. BUKU REFERENSI

1. **Benyamin Sapiie**, Agus Handoyo Harsolumakso, 2019, Geologi Struktur, ITB Press, ISBN 978-623-7165-41-5.
2. **Benyamin Sapiie**, Agus Handoyo Harsolumakso, 2019, Prinsip Dasar Geometri untuk Struktur Geologi, ITB Press, ISBN 978-623-7165-51-4.

VIII. PUBLIKASI

1. Agus H. Harsolumakso, **Benyamin Sapiie**, Alfend Rudyawan, Herwin Tiranda, Ezidin Reski, Reni Fauziah. Understanding Structural Style of Onshore Timor Basin from Detailed Fieldwork. Modern Applied Science, Canadian Center of Science and Education, Vol. 13, No. 4; 2019.

2. Mudrik R. Daryono, Danny H. Natawidjaja, **Benyamin Sapiie**, Phil Cummins, "Earthquake Geology of the Lembang Fault, West Java, Indonesia", Tectonophysics, Elsevier, 180-191, December 2019.
3. Jeres R. Cherdasa, Ken Prabowo, Tutuka Ariadji, **Benyamin Sapiie**, Zuher Syihab, "Formation Evaluation and Contingent Storage Capacity Estimation for Carbon Capture Storage and Utilization; A Case Study from East Natuna", Modern Applied Science; Vol.12, No.4; 2018, Canadian Center of Science and Education, ISSN: 1913-1844, 2018.
4. Riza Aria Amar, **Benyamin Sapiie**, "Fault Seal Analysis in Offshore Gas Fields of South Mahakam Area, Kutai Basin, Indonesia", the 42nd IPA Convention & Exhibition, 2 – 4 May, 2018, JCC Jakarta.
5. **Benyamin Sapiie**, Meli Hadiana, Terry Alfa Furqan, "3D Analysis of Fold-Thrust-Belt Deformation Using *Sandbox* Modeling: Implications for New Hydrocarbon Play of Eastern Indonesia", GSA Annual Meeting in Indianapolis, Indiana, USA, 4-7 November 2018.
6. **Benyamin Sapiie**, Indra Gunawan, Agus Handoyo Harsolumakso, "Integrated Structural Geology Approach in Evaluating Hydrocarbon Potential of West Timor, Indonesia", GSA Annual Meeting in Indianapolis, Indiana, USA, 4-7 November 2018.
7. **Benyamin Sapiie**, "Characteristic and Mechanism Thin-skinned Fold-Thrust-belt of Eastern Indonesia using Analogue *Sandbox* Modeling". Workshop EAGE *sandbox* modeling di Royal

- Holloway University of London, 2018.
8. Susilo, A, B., Meilano, I., Abidin, H, Z., Sarsito, D, A., **Sapiie, B.**, Effendi, J., "Geodetic Strain to Study the Deformation Model of Indonesian Semi Dynamic Datum 2013", AIP Conference Proceedings, Volume 1987, 18 July 2018, Article number 020102 7th International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, ISEDM 2017; CCRS Hall of Bandung Institute of Technology Bandung; Indonesia; 20-21 November 2017.
9. Susilo., Meilano, I., Abidin, H, Z., Sarsito, D, A., **Sapiie, B.**, Daryono., Effendi, J., "Implementation of M6.5 Pidie Jaya earthquake's deformation model for Indonesian geospatial reference system 2013", AIP Conference Proceedings, Volume 1987, 18 July 2018, Article number 020102 7th International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, ISEDM 2017; CCRS Hall of Bandung Institute of Technology Bandung; Indonesia; 20-21 November 2017.
10. Artyanto, A., **Sapiie, B.**, Abdullah, C, I., Sidik, R, P., "Identification of Natural Fractures and in Situ Stress at Rantau Dedap Geothermal Field", IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 103, Issue 1, 10 January 2018, 6th ITB International Geothermal Workshop, IIGW, Bandung.
11. Susilo., Abidin, H, Z., Meilano, I., **Sapiie, B.**, Gunawan, E., Wijarnato, A, B., Effendi, J., "Preliminary Co-Seismic Deformation Model for Indonesia Geospatial Reference System 2013", AIP Conference Proceedings, Volume 1857, 25 July 2017, Article number 4987073 6th International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, ISEDM 2016; CCRS Hall of Institut

Teknologi Bandung (ITB) Bandung; Indonesia; 11 - 12 October 2016.

12. Sarsito, D, A., Susilo, Simons, W, J, F., Abidin, H, Z., **Sapiie, B.**, Triyoso, W., Andreas, H., "Newly velocity field of Sulawesi Island from GPS observation", AIP Conference Proceedings, Volume 1857, 25 July 2017, Article number 4987073 6th International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, ISEDM 2016; CCRS Hall of Institut Teknologi Bandung (ITB) Bandung; Indonesia; 11 - 12 October 2016.
13. Sarsito, D, A., Susilo, Simons, W, J, F., Abidin, H, Z., **Sapiie, B.**, Triyoso, W., Andreas, H., "Rotation and strain rate of Sulawesi from geometrical velocity field", AIP Conference Proceedings, Volume 1857, 25 July 2017, Article number 4987073 6th International Symposium on Earth Hazard and Disaster Mitigation, ISEDM 2016; CCRS Hall of Institut Teknologi Bandung (ITB) Bandung; Indonesia; 11 - 12 October 2016.
14. **Benyamin Sapiie**, Meli Hadiana, "Geometry and Evolution of Fold-Thrust Belt: Insight *Sandbox* Modeling", Geosciences and Remote Sensing, 8-9 November 2017, Las Vegas, Nevada, USA.
15. **Benyamin Sapiie**, Arif Rifianto, Tectonics and Geological Factors Controlling Cleats Development in The Barito Basin, Indonesia, Journal of Engineering and Technological Sciences, ITB, Vol. 49 No.3, 2017.
16. **Benyamin Sapiie**, Muhamad Aziz Nugraha, Rizky Kurniawan Wardana, Arif Rifianto, Fracture Characteristics of Melange Complex Basement in Bantimala Area, South Sulawesi, Indonesia, Indonesian Journal on Geoscience, Vol. 4 No. 3 December 2017.

17. **Benyamin Sapiie**, Indra Gunawan, Alfend Rudyawan, Chapter II "Eastern Indonesia Tectonics; What We Learned So Far", Memoir #1, Petroleum Systems of the Eastern Indonesia Region, Hal. 42-89, SKK Migas 2017.
18. Danny Hilman Natawidjaja, **Benyamin Sapiie**, Mudrik M. Daryono, Gayatri Indah Marliyani, Astyka Pamumpuni, M. Ma'ruf Mukti, Supartoyo, Sri Hidayati, Achmad Solikhin, "Bab II Geologi Gempa Indonesia", Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia, Hal. 19-80, Tahun 2017.
19. **Benyamin Sapiie**, Indra Gunawan, Adhipa Herlambang, Maisi Asri Riswanti, Arif Rifianto, Sigit Rahardjo, Ari Samudra, Perdana Rakmana Putra, Problems In Conducting Fault Seal Analysis In Carbonate Reservoir, Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Forty-First Annual Convention & Exhibition, JCC, Jakarta, May 2017.
20. **Benyamin Sapiie**, Derry Apriansyah, Eko Yoan Toreno, Nanang Abdul Manaf, "A New Approach In Exploring A Basement-Fractured Reservoir In The Sumatra Back-Arc Basin", Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Forty-First Annual Convention & Exhibition, JCC, Jakarta, May 2017.
21. Perdana Rakhmana Putra, Tasiyat, **Benyamin Sapiie**, Agus M. Ramdhan, "Pore Pressure Prediction and Its Relationship to Structural Style in Offshore Tarakan Sub-Basin, Northeast Kalimantan", Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Forty-First Annual Convention & Exhibition, JCC, Jakarta, May 2017.
22. **Benyamin Sapiie**, Indra Gunawan, Alfend Rudyawan, Astyka

- Pamumpuni, Agus Handoyo Harsolumakso, Chalid Idham Abdullah, Asep H. P. Kesumadjana, Meli Hadiana, Indro Purwaman, Shinta Damayanti, Wendy Kurniawan, Agung Shirly, Development of New Tectonic Model and Paleogeography as Challenge for Future Hydrocarbon Exploration of Eastern Indonesia, Joint Convention Malang 2017, HAGI-IAGI-IAFMI-IATMI (JCM 2017).
23. **Benyamin Sapiie**, Kinematic Analysis of Fault-Slip Data in The Central Range of Papua, Indonesia, Indonesian Journal on Geoscience, Vol. 3 No. 1, Hal. 1-16, April 2016.
 24. **Benyamin Sapiie**, Ferry Yulian, Jesika Chandra, Awang H. Satyana, Dessy Dharmayanti, Asep H. Rustam, Ian Deighton, "Geology and Tectonic Evolution of Fore-Arc Basins: Implications of Future Hydrocarbon Potential in the Western Indonesia", Proceedings, Indonesian Petroleum Association, Thirty-Ninth Annual Convention & Exhibition, May 2015.
 25. **Benyamin Sapiie**, Harya Danio, Awali Priyono, Ariesty Ratna Asikin, Djedi S. Widarto, Eko Widiyanto, Takeshi Tsuji, "Geological Characteristic and Fault Stability of the Gundih CCS Pilot Project at Central Java, Indonesia", Proceeding of the 12th SEGJ International Symposium, Tokyo, Japan, pp. 110-113, 2015.
 26. **Benyamin Sapiie**, Meli Hadiana, Analogue Modeling of Oblique Convergent Strike-Slip Faulting and Application to The Seram Island, Eastern Indonesia, Indonesian Journal on Geoscience Vol. 1 No. 3, Page 121-134, December 2014.
 27. **Benyamin Sapiie**, Arif Rifiyanto, A.M. Surya Nugraha, Tectonic Controlled of Cleats development as Implication of Coal Bed

Methane (CBM) Prospect in the Barito Basin, South B, 76th EAGE Conference & Exhibition 2014, Amsterdam RAI, The Netherlands, 16-19 June 2014.

28. **Benyamin Sapiie**, Agus Handoyo Harsolumakso, Pedoman Praktikum Geologi Fisik (GL-2011), ITB, 2013.
29. **Benyamin Sapiie**, Mark Cloos, Strike-slip Faulting and Veining in the Grasberg Giant Porphyry Cu-Au Deposit, Etsberg (Gunung Bijih) Mining District, Papua, Indonesia, International Geology Review, Vol. 55 No. 1, p. 1-42, 10 January 2013.
30. Mark Cloos, **Benyamin Sapiie**, Porphyry Copper Deposits: Strike-slip Faulting and Throttling Cupolas, International Geology Review, Vol. 55 No. 1, p. 43-65, 10 January 2013.
31. **Benyamin Sapiie**, Meli Hadiana, Astyka Pamumpuni, Ade kurniawan, Dicky Daniel, Evolution of Fold-Thrust-Belt Deformation in the Eastern Indonesia Region, Proceedings The 37th Indonesian Petroleum Association Convention and Exhibition, Jakarta Convention Center, 15-17 Mei 2013.
32. **Benyamin Sapiie**, Catatan Kuliah GL 2012 Tektonofisik, ITB, 2012.
33. **Benyamin Sapiie**, Meli Hadiana, Masio Patria, A.C. Adyagharini, Afif Saputra, Philips Teas, Widodo, 3D Structural Geology Analysis Using Integrated Analogue *Sandbox* Modeling: A Case Study of the Seram Thrust-Fold Belt, Proceeding Indonesian Petroleum Association, The 36th Annual Convention & Exhibition, Jakarta, 23 - 25 May 2012.
34. Dwi Amanda Utami, Dardji Noeradi, **Benyamin Sapiie**, Sedimentary Cycle Reconstruction of Reef and Fragmental

Limestone in Cikamuning Area, Padalarang, West Java, Based on Shallow Well Data and Outcrops, Proceeding Indonesian Petroleum Association, Thirty Fifth Annual Convention & Exhibition, Jakarta 18 - 20 May 2011.

35. Fikril Hakiki, Rizky P. Sekti, Aram N. Derewetzky, Christian J. Strohmenger, Shawn M. Fullmer, Toni Simo, **Benyamin Sapiie**, Dwiharso Nugroho, Facies Analysis of the Tertiary Rajamandala Limestone Integrated Surface and Subsurface Data (Java, Indonesia), Proceeding Indonesian Petroleum Association, Thirty Fifth Annual Convention & Exhibition, Jakarta 18 - 20 May 2011.
36. **Benyamin Sapiie**, Mechanics of Oblique Convergent Strike-Slip Faulting - A Comparison Result of *Sandbox* and Finite Element Modeling, 73rd EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE Europe 2011, Vienna, Austria, 23 - 26 May 2011.
37. **Benyamin Sapiie**, Noer Aziz Magetsari, Agus Handoyo Harsolumakso, Chalid Idham Abdullah, Catatan Kuliah GL 1211 Geologi Fisik, ITB, 2010.
38. **Benyamin Sapiie**, A.C. Adyagharini, Philips Teas, New Insight of Tectonic Evolution of Cendrawasih Bay and Its Implication for Hydrocarbon Prospect, Papua, Indonesia, Proceeding Indonesian Petroleum Association, Thirty Fourth Annual Convention & Exhibition, Jakarta 18 - 20 May 2010.
39. **Benyamin Sapiie**, Dardji Noeradi, A.M. Surya Nugraha, Wendy Kurnawan, Toni Simo, Dwiharso Nugroho, 3D Palindaptic Reconstructions of Rajamandala Carbonate Complex as Implication of Paleogeography in the Western Java, Indonesia, Proceeding Indonesian Petroleum Association, Thirty Fourth

Annual Convention & Exhibition, Jakarta 18 - 20 May 2010.

40. **Benyamin Sapiie**, Astyka Pamumpuni, A.M. Surya Nugraha, Wendy Kurniawan, Isto J. Saputra, Toni Simo, "Balancing Cross-Section and Fractures Characterization of Rajamandala Limestone, Western Java, Indonesia", AAPG International Conference & Exhibition, New Orleans, Louisiana, United States, 11-14 April 2010.
41. **Benyamin Sapiie**, Fractures Characterization in Carbonate Rocks, 72nd EAGE Conference & Exhibition Incorporating SPE Europe 2010 Barcelona, Spain, 14 - 17 June 2010.
42. You Ho Lee, Charles W. Forsberg, Michael Driscoll, **Benyamin Sapiie**: "Options for Nuclear-Geothermal Gigawatt-Year Peak Electricity Storage System", Department of Nuclear Science and Engineering, Cambridge, June 13-17, 2010, Volume 3, Pages 2175-2184, 2010.
43. Astyka Pamumpuni, Isto Jannata Saputra, **Benyamin Sapiie**, Outcrops Scale Fractures Characteristic in the Rajamandala Formation as Implication for Carbonate Fractured reservoir, Proceedings PIT IAGI Lombok 2010, The 39th IAGI Annual Convention and Exhibition, Senggigi, Nusa Tenggara Barat, 22 - 25 November 2010.
44. Windeati Argapadmi, Isto Jannata Saputra, **Benyamin Sapiie**, Klapanunggal Limestone as Analogue of Late Miocene Carbonate in Northern West Java, Proceedings PIT IAGI Lombok 2010, The 39th IAGI Annual Convention and Exhibition, Senggigi, Nusa Tenggara Barat, 22 - 25 November 2010.
45. **Benyamin Sapiie**, M.J. Driscoll and K.G. Jensen "Regional

Examples of Geological Settings for Nuclear Waste Disposal in Deep Boreholes", Center for Advanced Nuclear Energy Systems, Massachusetts Institute of Technology (MIT), MIT-NFC-TR-113, January 2010, *Visiting scholar dan Research Scientist*, Geomechanic Expert di Department of Nuclear Sciences and Engineering, MIT

46. **Benyamin Sapiie**, M.J. Driscoll "A Review of Geology-Related Aspects of Deep Borehole Disposal of Nuclear Wastes", Nuclear Fuel Cycle Technology and Policy Program, Center for Advanced Nuclear Energy Systems, Massachusetts Institute of Technology (MIT), MIT-NFC-TR-109, Cambridge, August 2009, *Visiting scholar dan Research Scientist*, Geomechanic Expert di Department of Nuclear Sciences and Engineering, MIT.
47. Ambaria Prakoso, Agung Gunawan, **Benyamin Sapiie**, Bintoro Wibowo, Wah Adi Suseno, "Fault Seal Analysis on Seribu North Field, Sunda Basin, Southeast Sumatra", Proceeding, Indonesian Petroleum Association, 33th Annual Convention & Exhibition, Jakarta, 2009.
48. **Benyamin Sapiie**, Astyka Pamumpuni, Meli Hadiana, Balancing Cross-Section and *Sandbox* Modeling of Satui Fold-Thrust-Belt, Asem-Asem Basin, South Kalimantan, Proceeding Indonesian Petroleum Association, Thirty Fourth Annual Convention & Exhibition, Jakarta 27 - 29 May 2008.
49. Mark Cloos, **Benyamin Sapiie**, Andrew Quarles Van Ufford, Richard J. Weiland, Paul Q. Warren, Timothy P. McMahon. Collisional delamination in New Guinea: The geotectonics of subducting slab breakoff, Special Paper of the Geological Society of America Volume 400, Pages 1-51, 2005.

50. Fachri, M., Noeradi, D., **Sapiie, B.**, 2005, *Application of The Percolation Theory in Fault-Related Fracture Analysis and Its Implication on The Determination of Fracture Distribution*. Proceedings Joint Convention Surabaya 2005 – HAGI-IAGI-PERHAPI. The 30th HAGI, The 34th IAGI, and The 14th PERHAPI Annual Conference and Exhibition, p. 246-259.
51. Fachri, M., **Sapiie, B.**, Sunyoto, W., Widodo, S., Yudihandri, Margotomo, W., 2005, *Analogue Fractured Reservoir Characterization in Grasberg Igneous Complex (GIC) and New Guinea Limestone Group, Papua*. Proceedings of the 33rd Annual Convention of the Indonesian Petroleum Association, p. 543-557.
52. Prasetyadi, C., Suparka, E.R., Harsolumakso, A.H., **Sapiie, B.**, 2005, *Eastern Java Basement Rock Study: Preliminary Results of Recent Field Study In Karangsambung and Bayat Areas*. Proceedings Joint Convention Surabaya 2005 – HAGI – IAGI - PERHAPI. The 30th HAGI, The 34th IAGI, and The 14th PERHAPI Annual Conference and Exhibition, p. 310-321.
53. **Sapiie, B.**, Hadiana, M., Nugraha, I., and Sayentika, 2005, *Analogue Modeling of Rift Mechanism in the Paleogene Graben System of the Western Indonesia*, Proceedings of the 33rd Annual Convention of the Indonesian Petroleum Association, I, p. 593-604.
54. **Sapiie, B.**, *The Mechanism of Mineralized Veins in the Grasberg Igneous Complex Irian Jaya, Indonesia*. Buletin Geologi, vol.37, No.3, 2005, p-99-119.
55. Saputra, H.,N., **Sapiie, B.**, 2005, *Analogue Study of Basement Fractured Reservoirs in Kotopanjang Area, Central Sumatra*. Proceedings of the 33rd Annual Convention of the Indonesian

Petroleum Association, p. 53-60.

56. **Benyamin Sapiie**, Mark Cloos, Strike-slip faulting in the core of the Central Range of west New Guinea: Ertzberg Mining District, Indonesia, Bulletin of the Geological Society of America, 2004.
57. **Sapiie, B.**, 2004, *Sandbox modeling and its application in engineering geology*: Proceeding 2nd International Workshop on Earth Science and Technology, Kyushu University, Fukuoka, Japan, p. 255-263.
58. **Sapiie, B.** and Cloos, M., 2004, *Strike-slip faulting in the core of the Central Range of West New Guinea: Ertzberg Mining District, Indonesia*: GSABulletin, v. 116, p. 277-293.
59. **Sapiie, B.**, Rimbaraya, N., Budi, M., Widodo, S., and Sunyoto, W., 2004, *The yellow Valley Syncline and Pit Stability Plan at the Grasberg Cu-Au Mine, Papua, Indonesia*: Proceeding 2nd International Workshop on Earth Science and Technology, Kyushu University, Fukuoka, Japan, p. 395-402.
60. **Sapiie, B.**, 2002, *Geologi dan mineralisasi uranium sedimenter, daerah Aloban-Sibolga, Sumatera Utara*: Prosiding seminar sehari, Ungkapan rasa syukur atas karya-karya dan pengabdian Prof. Dr. R. P. Koesoemadinata, ITB, Bandung, p. 27-45.
61. **Sapiie, B.**, 2001, *Structural pattern and Deformation style in the central range of Irian Jaya (West Papua), Indonesia*, Proceeding Indonesian Petroleum Association, 28th Annual Convention and Exhibition, October 2001.
62. **Sapiie, B.**, 2000, *Structural geology and ore deposit: case study of the Grasberg super porphyry Cu-Au mineralization, Irian Jaya, Indonesia*, Proceedings of the 29th Annual Convention, Indonesian

Association of Geologists, Bandung, Indonesia.

63. **Sapiie, B.**, Natawidjaya, D. H., and Cloos, M., 1999, *Strike-slip tectonics of New Guinea: Transform motion between the Caroline and Australian plates*: Proceedings of the 28th Annual Convention, Indonesian Association of Geologists, and Jakarta, Indonesia.

IX. PENGHARGAAN

1. Karya ilmiah dan presentasi terbaik, IAGI 28th Annual Convention, Jakarta, 1999.
2. Karya ilmiah dan presentasi terbaik (LASUT award), IAGI 29th Annual Convention, Bandung, 2001.
3. Presentasi terbaik IAGI 31st Annual Convention, Surabaya, 2002.
4. Satyalancana Karya Satya 10 Tahun, Presiden RI, 2003.
5. Presentasi terbaik (LASUT) IAGI 33rd Annual Convention, Bandung, 2004.
6. Karya ilmiah dan Presentasi Terbaik Indonesian Petroleum Association Annual Meeting, Jakarta, 2007.
7. Presentasi Poster terbaik Indonesian Petroleum Association Annual Meeting, Jakarta, 2007.
8. Sertifikasi Dosen Profesional Bidang Ilmu Geologi, Rektor UGM, 2009.
9. Karya ilmiah dan presentasi terbaik Indonesian Petroleum Association Annual Meeting, Jakarta, 2010.
10. Dosen Berprestasi ITB, Rektor ITB, 2012.
11. Satyalancana Karya Satya 20 Tahun, Presiden RI, 2013.

12. Penghargaan 25 Tahun ITB, ITB, 2013.
13. Penghargaan Bidang Karya Inovasi, ITB, 2015.
14. Best Paper, Geology. The 39th IPA Convention & Exhibition, IPA, 2015.

X. SERTIFIKASI, PELATIHAN, DAN KURSUS

1. Analogue *Sandbox* Modeling Workshop, Bandung, 2018.
2. Seminar Bidang Minyak dan Gas Bumi yang diselenggarakan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, Badan Geologi dengan tema "Penguatan Peran Geosains untuk Menentukan Potensi Hidrokarbon di Kawasan Perbatasan NKRI", Hotel Grand Sahid Jaya, Jakarta, 2017.
3. Field Trip Geologi dengan Judul "Obduction Tectonic of Ophiolite Complex of AL-Hajar Mountain", North Oman, 2016.
4. Sosialisasi Pedoman Tata Kerja Migas Non Konvensional-Tight Reservoir, Hotel Tentrem, Yogyakarta., 2016.
5. Forum EP, SKK Migas, Hotel JW Marriot, Jakarta, 2015.
6. Tim Pemutakhiran Peta Nasional Bahaya Gempabumi Indonesia Tahun 2015-2017, Jakarta, 2015.
7. Komite Eksplorasi Nasional, Kementerian Energi & Sumber Daya Mineral, Jakarta, 2015.
8. Analogue *Sandbox* Modeling Workshop, Bandung, 2014.
9. Pre-Tertiary Fracture Basement Reservoir Central Sumatera & Ombilin Basins: Workshop and Field Trip 2013, Divisi Eksplorasi - SKK Migas, Kerjasama PT. LAPI-ITB dengan Pekanbaru & Bukittingi, 2013.

10. Analogue *Sandbox* Modeling Workshop, Bandung, 2010.
11. Analogue *Sandbox* Modeling Workshop, Bandung, 2009.

XI. KEANGGOTAAN ASOSIASI

1. AAPG (American Association of Petroleum Geologists).
2. EAGE (European Association of Geoscientists & Engineers).
3. IAGI (Ikatan Ahli Geologi Indonesia).
4. AGU (American Geophysical Union).
5. FOSI (Forum Sedimentologist Indonesia).
6. GSA (Geological Society of America).
7. AOGS (Asia Oceania Geosciences Society).

