

RANCANG BANGUN MODEL KOMPRESI DAN TARIK PERMODELAN SANDBOX DAN MANFAATNYA

F. Fahrudin^{*}, Dimas Asmarakandy

*Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275*

Abstrak

Permodelan sandbox dibuat dengan system tektonik konvergen dan divergen dengan menggunakan pergerakan satu sumbu. Permodelan ini bertujuan untuk membuat alat mesin sandbox yang bisa digunakan untuk penelitian dan pengajaran. Mesin berhasil dibuat dan sudah diujicobakan. Ujicoba dengan menggunakan satu lapisan pasir yang diambil dari Formasi Ngrayong. Percobaan selanjutnya dengan beberapa lapisan. Percobaan dilakukan dengan pengamatan yang meliputi pengamatan permukaan dan penampang verikal. Pengamatan yang aspek morfologi, kelurusan struktur, dan perkembangan sesar yang terbentuk. Hasil percobaan menunjukkan bahwa pembentukan morfologi sangat berkaitan dengan pembentukan sesar. Struktur sesar dengan pola forward propagating thrust faults. Sesar tersebut disebabkan imbrikasi. Lipatan yang terbentuk akibat mekanisme propagasi sesar.

Kata kunci: *sandbox; sesar naik; morfologi*

Abstract

[Design of Compression and Extensional of the Sandbox Model and Its Benefit] Divergent and convergent tectonic system can be studied from the sandbox modelling. This model has a axis of movement. Sandbox models intends to study the progress of structural geology such as fault and fold. We successfully made machine of sandbox. This machine has basal detachment from duraluminum. Material for model is taken by loose sand from Ngrayong Formation. This experiment focused to observation about morphology in surface and thrust or backthrust in subsurface. This experiment has compression system. Result of model was that morphological sequences associated with fault sequences. Fault is formed to have the pattern of forward propagating thrust faults. It's caused by imbricate thrust system. Folding is formed by the mechanism of fault propagation folding.

Keywords: *sandbox; thrust fault; morphology*

1. Pendahuluan

Pemodelan analog bertujuan untuk menyederhanakan contoh di alam dan didasarkan pada keserupaan gejala yang ditunjukkan oleh masalah yang dimiliki oleh model (Purwasmita, 2000). Kondisi awal sebelum deformasi dan setelah deformasi dapat dibandingkan dengan pemodelan analog. Pemodelan analog dengan *sandbox* digunakan untuk mempelajari pola dan geometri suatu hasil deformasi getas (*brittle*) (Sapiie dan Harsolumakso, 2000).

Penelitian ini bertujuan untuk meneliti perkembangan morfologi, pola dan distribusi struktur pada sistem tektonik konvergen dan membuat model rancangan bangun kompresi dan tarik permodelan *sandbox*.

2. Metode Penelitian

Pembuatan desain fisik mesin *sandbox* terbagi menjadi tiga yaitu perakitan mekanik, perakitan secara elektrik, dan perakitan secara digital. Setelah mesin

sandbox jadi kemudian dilakukan percobaan sistem kompresi dengan material pasir lepas dan membandingkan dengan kondisi di alam.

Material yang digunakan adalah pasir kuarsa Formasi Ngrayong berukuran 60-80 mesh ($\pm 0,178$ mm) sudut geser dalam sekitar 29° dan densitas $1,59 \text{ gr/cm}^3$. Sedang bahan kedua pasir kuarsa berukuran 30-50 mesh ($\pm 0,257$ mm) dengan sudut geser dalam sekitar 32° dan densitas $1,65 \text{ gr/cm}^3$. Lapisan percobaan ada 6 lapis dengan ketebalan lapisan sama yaitu 0,5 cm (Tabel 1). Kecepatan mesin *sandbox* 3Hz atau setara dengan 0,5 mm/menit.

3. Dasar Teori Pemodelan Sandbox

Pemodelan *sandbox* digunakan untuk mensimulasikan deformasi pada batuan dengan kondisi getas (Hubbert, 1951; Cloos, 1955; McClay, 1990). Deformasi pada kondisi getas akan mengikuti Hukum Gangguan dari Coulomb. Berdasarkan hukum tersebut, mekanisme dalam pengertian dasar tegasan dan hubungannya dengan geometri yang terbentuk

digambarkan dengan menggunakan diagram Mohr. McClay (1996) menyatakan bahwa hukum Gangguan dari Coulomb didasarkan pada model dinamik dan mekanika yang dikembangkan oleh Coulomb (1773) dan Mohr (1990). Hukum tersebut dirumuskan dengan Persamaan (1) sebagai berikut:

$$\sigma_c = \sigma_o + \tan \phi (\sigma_n) \tag{1}$$

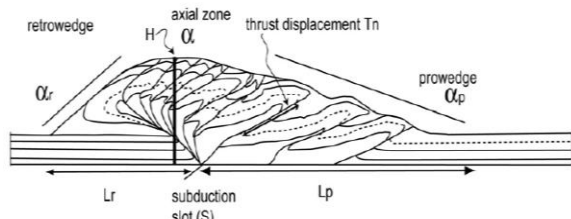
Dimana: σ_c = tegasan gerus kritis; σ_o =kohesivitas; $\tan \phi$ = koefisien gesek dalam; σ_n = tegasan normal. Persamaan ini menunjukkan tinggi dan kemiringan garis amplop keretakan untuk batuan pada saat mengalami kompresi dan tensional serta digambarkan pada diagram Mohr.

Tabel 1. Lapisan Model

No	Lapisan/Warna	Ukuran Butir (mesh)
1	Keenam/coklat	60 - 80
2	Kelima/hijau	30 - 50
3	Keempat/coklat	60 - 80
4	Ketiga/merah	30 - 50
5	Kedua/coklat	60 - 80
6	Pertama/hijau	30 - 50

Model sesar naik yang terbentuk pada zona subduksi mengalami propagasi seiringan dengan pemendekan dengan membentuk *prowedge* (Gambar 1). Pembentuk sesar naik sangat dipengaruhi oleh *basal detachment* dan struktur material penyusun model.

Gambar 1. Model *Prowedge* dan Pembentuk Thrust



Pada Zona Subduksi (Bigi dkk., 2010)

4. Hasil dan Pembahasan

Mesin Sandbox

Proses produksi dibagi menjadi dua tempat satu berada di Bandung untuk komponen dengan bahan durallium untuk struktur dalam dan pemegang kaca dan pengerjaan di Semarang untuk struktur utama, pengelasan struktur utama dan perakitan keseluruhan komponen *sandbox*. Bahan durallium sebagai *basal detachment* mempunyai komposisi aluminium dengan tembaga 4%.

Morfologi dan Sesar

Percobaan mengamati morfologi, pembentukan sesar di dinding selatan dan utara, serta sudut *prowedge*. Pemendekan (*shortening*) yang diamati dengan nilai 3,5%, 10%, 21% dan 28%. Rekapitulasi data tabulasi pembentukan sesar pada Tabel 2 dan data pengukuran *dip* sesar vs pemendekan pada Tabel 3. Sedangkan visualisasi morfologi pada Gambar 2 dan pembentukan sesar pada penampang dinding selatan (ds) dan dinding utara (du) pada Gambar 3 dan 4.

Awal mula percobaan, membentuk morfologi tinggi (*ridge*) yang memanjang dan terpusat di tengah (Gambar 2a). *Ridge* ini berhubungan pembentukan sesar yang dimulai juga dari tengah. Setelah itu, *ridge* berkembang sampai ke tepi.

Percobaan ini menghasilkan tiga zona *ridge* yaitu *ridge* pertama (ZR1) (kelurusan no. 1, 4, dan 5), *ridge* kedua (ZR2) (kelurusan no 9) dan *ridge* ketiga (ZR3) (kelurusan no. 10). Jarak antar *ridge* sekitar 5 cm (Gambar 2a, 2b, 2c, 2d).

Sesar yang terbentuk berupa *thrust* dan *backthrust* yang mengalami imbrikasi dengan dipengaruhi oleh *basal detachment*. *Thrust* yang terbentuk berupa imbrikasi dengan perkembangan ke depan (*forward breaking thrust*). Umumnya model *forward breaking thrust*, akan menghasilkan zona tidak aktif di belakang atau zona aktif berada di depan. Pada percobaan ini, saat pemendekan 28% penampang ds menghasilkan zona tidak aktif disekitar zona *ridge* pertama, sedangkan pada du disekitar zona *ridge* pertama masih aktif. Di zona ini terbentuk tf 7 (*thrust* ke-7).

Jumlah sesar yang terbentuk mengikuti fungsi waktu pemendekan baik penampang dinding utara dan selatan (Gambar 4 dan 5). Jumlah sesar sampai pada pemendekan 28% antara dinding utara dan selatan sama adalah 12 buah, dengan 3 sesar mayor. Sesar mayor pada kenampakan permukaan mempunyai nomor 1, 9, dan 10. Tiga sesar mayor (*thrust*) akan membentuk tiga zona *ridge*.

Prowedge, Spasi Sesar, dan Sesar Mayor.

Sudut *prowedge* yang terbentuk pada penampang ds adalah 13° sampai 7° sedangkan penampang du adalah 22° sampai 8°. Sudut *prowedge* yang terbentuk semakin kecil seiring dengan penambahan pemendekan (Tabel 4).

Spasi sesar yang terbentuk pada penampang ds antara 1,3 cm sampai 2,95 cm, pada penampang du antara 1,49 cm sampai 2,64 cm. Pada pemendekan 21% dan 28%, spasi sesar antar sesar semakin besar secara dengan arah perkembangan ke depan dari *thrust*.

Sesar Mayor pada penampang dinding selatan meliputi tf 1, tf 3 dan tf 5, pada penampang dinding utara meliputi tf 1, tf 4 dan tf 6. Sesar mayor ini yang membatasi antara zona *ridge*.

Tabel 2. Tabulasi Pembentukan Sesar

No	Pemendekan (%)	Kenampakan sesar di permukaan	Kenampakan sesar di ds	Kenampakan sesar di du
1	3,5		1 bt1, tf1	bt1, tf1
2	10,5		1,4 bt1, bt2, tf1, tf2	bt1, bt2, tf1, tf2, tf3
3	21		1,4,5,9 bt1, bt2, bt3, bt4, bt5, tf1, tf2, tf3, tf4 bt1, bt2, bt3, bt4, bt5, bt6, tf1, tf2, tf3, tf4, tf5	bt1, bt2, bt3, bt4, tf1, tf2, tf3, tf4, tf5
4	28	1,4,5,9,10		bt1, bt2, bt3, bt4, bt5, tf1, tf2, tf3, tf4, tf5, tf6, tf7

Ket : bt = backthrust; tf = thrust

Tabel 3. Pengukuran *dip* sesar vs pemendekan

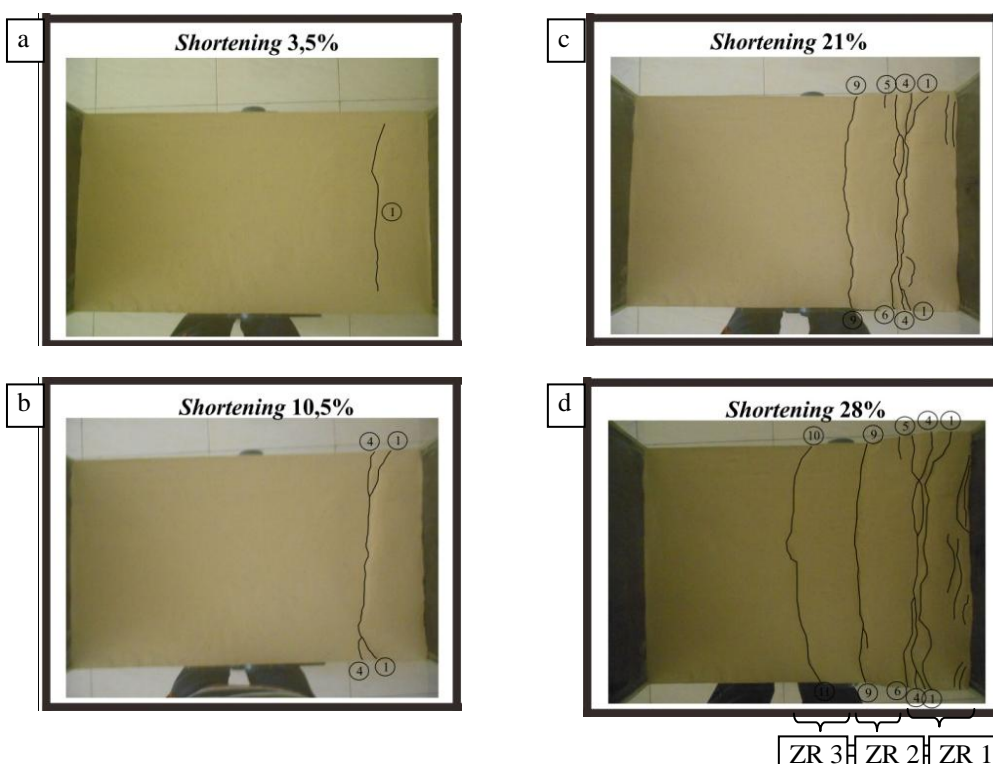
Pemendekan	<i>thrust 1</i>		<i>back thrust 1</i>		Pemendekan	<i>thrust 4</i>		<i>back thrust 4</i>	
	du (°)	ds (°)	du (°)	ds (°)		du (°)	ds (°)	du (°)	ds (°)
3,5	33	32	37	37	3,5				
7	31	30	42	43	7				
10,5	33	34	44	45	10,5				
14	38	45	45	48	14	34	30	40	37
17,5	38	50	48	50	17,5	38	38	42	38
21	47	55	50	50	21	28	38	42	40
24,5	48	56	50	52	24,5	27	38	45	42
28	48	56	50	52	28	29	38	46	42
31,5	48	56	52	52	31,5	30	38	46	43
35	48	56	52	52	35	30	38	46	44

Pemendekan	<i>thrust 2</i>		<i>back thrust 2</i>		Pemendekan	<i>thrust 5</i>		<i>back thrust 5</i>	
	du (°)	ds (°)	du (°)	ds (°)		du (°)	ds (°)	du (°)	ds (°)
3,5			45	34	3,5				
7	25	22	48	36	7				
10,5	27	28	47	38	10,5				
14	34	40	48	40	14				
17,5	35	48	52	45	17,5	25			
21	40	50	54	50	21	25			
24,5	44	48	54	52	24,5	28	32		39
28	45	48	55	52	28	28	32		37
31,5	45	50	55	52	31,5	32	30	35	37
35	45	50	55	52	35	35	24	35	38

Pemendekan	<i>thrust 3</i>		<i>back thrust 3</i>		Pemendekan	<i>thrust 6</i>		<i>back thrust 6</i>	
	du (°)	ds (°)	du(°)	ds (°)		du (°)	ds (°)	du(°)	ds (°)
3,5					3,5				
7					7				
10,5	25	32			10,5				
14	34	32	35	36	14				
17,5	36	30	40	39	17,5				
21	38	20	41	41	21				
24,5	40	20	38	42	24,5	30			
28	42	19	38	42	28	30			
31,5	42	20	40	42	31,5	25			30
35	42	20	40	42	35	20			30

Keterangan :	du =	Dinding bagian sebelah utara
	ds =	Dinding bagian sebelah selatan

Pemendekan	<i>thrust 7</i>		<i>back thrust 7</i>	
	du (°)	ds (°)	du(°)	ds (°)
3,5				
7				
10,5				
14				
17,5				
21				
24,5	20			
28	20			
31,5	20			
35	20			30



Gambar 2. Morfologi sesar dan pembagian zona ridge.

Kemiringan Sesar (*Fault Dip*) dan Pemendekan.

Pada pemendekan 3,5% (ds dan du), terbentuk *backthrust* (bt 1) dan *thrust* (tf 1) yang membentuk tinggian (bagian dari zona *ridge* pertama). Tinggian ini membentuk antiklin dengan sudut kemiringan lapisan yang sangat landai antara 0-3°. Lipatan landai ini terbentuk dengan mekanisme *fault propagation folding*. Sayap lipatan yang terpotong tf 1 berarah SE. Kemiringan sesar tf 1 yaitu 32°- 33°, bt 1 adalah 37°.

Pada pemendekan 10,5% (ds dan du), material inti (lapisan paling bawah) dari *back thrust* dan *thrust* naik, tetapi bentuk geometri nya berbeda (Gambar 4b dan 5b). Naiknya lapisan inti ini disebabkan oleh *basal detachment*. Sekuen ini masih membentuk zona *ridge* pertama hanya sekuen sesar nya bertambah. Pada ds, sekuen sesar terdiri atas bt 1, bt 2, tf 1 dan tf 2. Pada du, sekuen sesar terdiri atas bt 1, bt 2, tf 1, tf 2 dan tf3. Pada ds, kemiringan bidang sesar *back thrust* yaitu 44°-47° dan *thrust* yaitu 34°-28°.

Pada pemendekan 21% (ds dan du), material inti pada ds berbeda dengan du. Lapisan inti pada ds, saling terpisah. Lapisan inti yang kedua menghasilkan sesar mayor tf 3 sebagai batas zona *ridge* kedua. Sedangkan pada du, lapisan inti masih satu lapisan, hanya bentuk bagian atas runcing-runcing, bentuk runcing ini sebagai jalur sesar (Gambar 4c dan 5c). Sekuen yang mendekati kesesuaian bentuk *imbricate thrust system* terjadi pada ds. Sekuen ini menghasilkan zona *ridge* pertama dan kedua. Sekuen ZR 1 terdiri atas bt 1, bt 2, bt 5, tf 1, dan tf 2. Sekuen ZR 2 terdiri atas bt 3, bt 4, tf 3, dan tf 4. Pada ZR 1, kemiringan lapisan yang terpotong tf 1 berubah ke arah NE mengikuti perubahan kemiringan sesar tf 1. Sesar tf 1 berubah menjadi *reverse fault*. *Reverse fault* membentuk *drag reverse* dengan bentuk *concave*. Kemiringan bidang sesar *backthrust* yaitu 50° dan *thrust* yaitu 55°-50°. Pada ZR 2 terbentuk tinggian kedua dengan sudut kemiringan lapisan antiklin yang sangat landai antara 0-3°. Lipatan landai ini terbentuk dengan mekanisme *fault propagation folding*. Sayap lipatan yang terpotong tf 3 berarah SE. Sekuen ZR 2 terdiri atas tf 3, tf 4, bt 3 dan bt 4. Saat propagasi sekuen ZR 2, pada ZR 1 masih aktif hal ini ditandai terbentuknya bt 5 dan kenaikan kemiringan bidang tf dan bt. Kemiringan bidang sesar tf 3 adalah 20°, bt 3 dan bt 4 adalah 41° dan 40°.

Pada pemendekan 28% (ds dan du), material inti pada ds berbeda dengan du. Lapisan inti pada ds, saling terpisah. Ada 3 lapisan inti, lapisan inti yang ketiga menghasilkan sesar mayor tf 5 sebagai batas zona *ridge* ketiga. Sedangkan pada du, lapisan inti ada dua, lapisan inti pertama menghasilkan ZR 1 dan ZR2, sedangkan lapisan inti kedua menghasilkan ZR 3 dengan sesar mayor tf 6 (Gambar 4d dan 5d). Sekuen yang mendekati kesesuaian bentuk *imbricate thrust system* terjadi pada ds dan du. Sekuen ini menghasilkan zona *ridge* ketiga. Pada ds, sekuen ZR 3 terdiri atas bt 6 dan tf 5. Sekuen ini membentuk

tinggian dengan antiklin yang mempunyai kemiringan lapisan 0-3°. Kemiringan sesar tf 5 yaitu 32°. Lipatan landai ini terbentuk dengan mekanisme *fault propagation folding*. Sayap lipatan yang terpotong tf 5 berarah SE. Saat propagasi sekuen ZR 3, lapisan batuan antiklin pada ZR 2 semakin besar sekitar 5-8°, sudut *pro wedge* semakin tinggi dan panjang *pro wedge* semakin kecil tetapi tinggian semakin besar. Kemiringan sesar mayor tf 3 adalah 20°, masih berupa *thrust*.

Pada du, sekuen ZR 3 terdiri atas bt 5 dan tf 6. Sekuen ini tidak membentuk tinggian tetapi terdapat yang dikontrol *thrust* dengan sesar mayor tf 6. Kemiringan sesar tf 6 yaitu 30°. Saat propagasi sekuen ZR 3, sudut *pro wedge* semakin tinggi dan panjang *pro wedge* semakin kecil tetapi tinggian semakin besar. Ketika propagasi ZR 3, ZR 1 dan ZR 2 juga masih aktif.

Gambar 5 dan 7 pada penampang du, menunjukkan bahwa tf 1, tf 2, tf 3 dan tf 5 *dip* sesar semakin naik seiring dengan penambahan pemendekan, sedangkan tf 4 dan 6 *dip* sesarnya semakin turun seiring dengan penambahan pemendekan. Bt 1, bt 2, bt 3, bt 4 dengan penambahan pemendekan nilai *dip* sesarnya semakin naik. Gambar 6 dan 8 pada penampang ds, bahwa tf 1, tf 2, dan tf 4 *dip* sesar semakin naik seiring dengan penambahan pemendekan, sedangkan tf 3 dan 5 *dip* sesarnya semakin turun seiring dengan penambahan pemendekan. Bt 1, bt 2, bt 3 dengan penambahan pemendekan nilai *dip* sesarnya semakin naik.

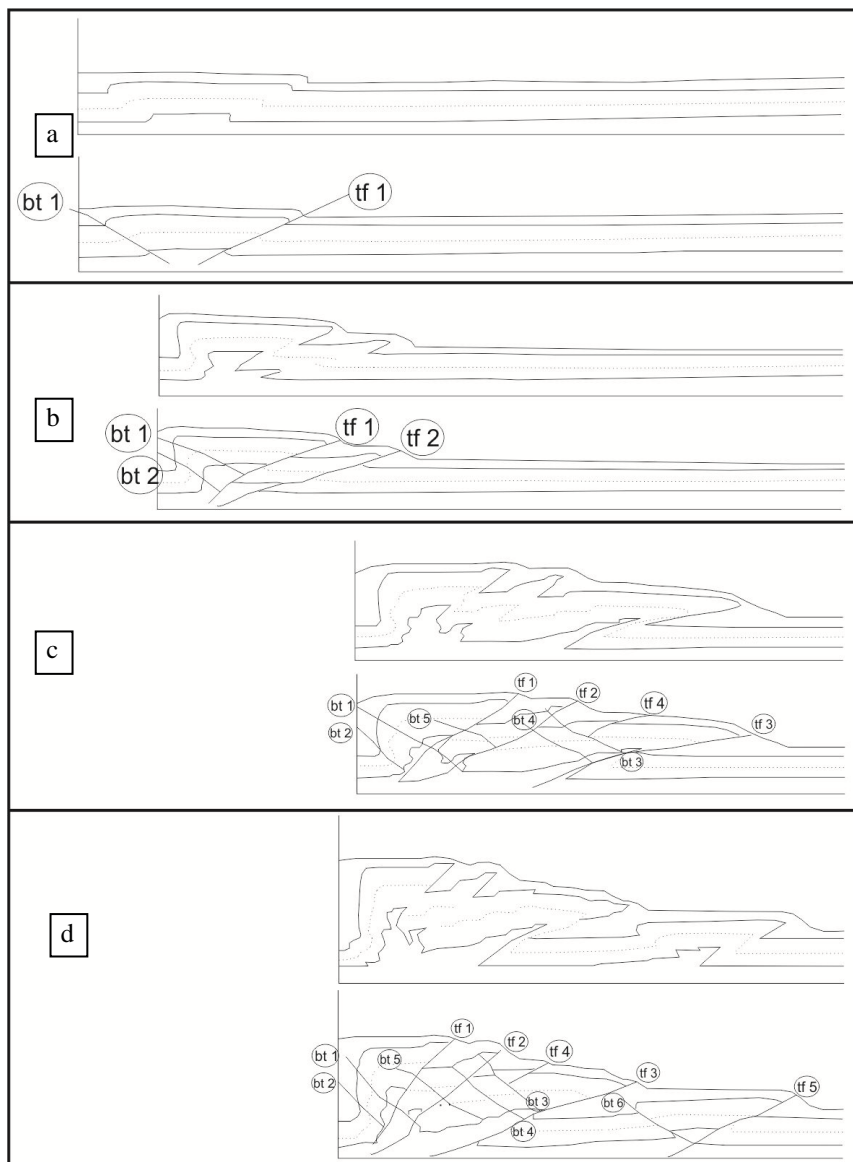
Manfaat Percobaan *Sandbox*

Sandbox modeling mempunyai manfaat, antara lain:

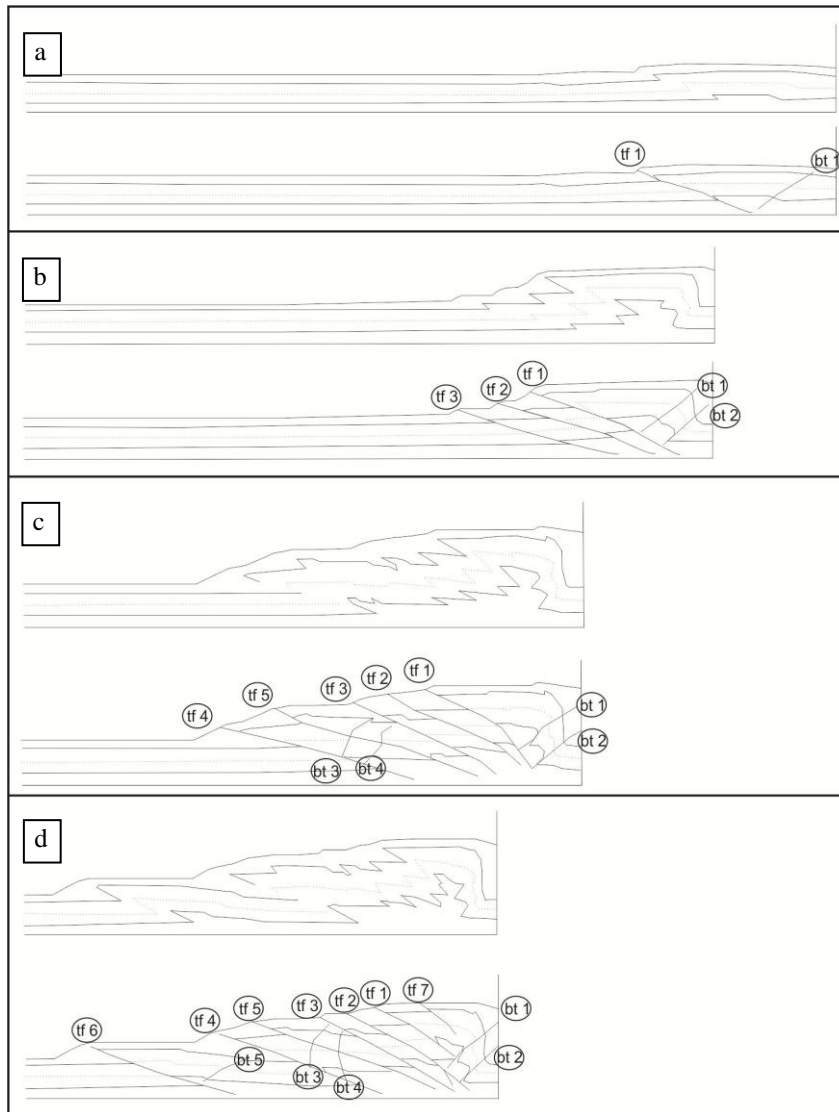
1. Memodelkan sistem tektonik pada kerak bumi, konfigurasi struktur dan parameter lain.
2. Memodelkan perkembangan sesar pada skala cekungan hidrokarbon dan pembentukan sesar di permukaan bumi.
3. Memodelkan sesar kaitannya dengan sistem kegeunaan suatu daerah.

Tabel 4. Pemendekan, sudut *prowedge*, dan spasi sesar

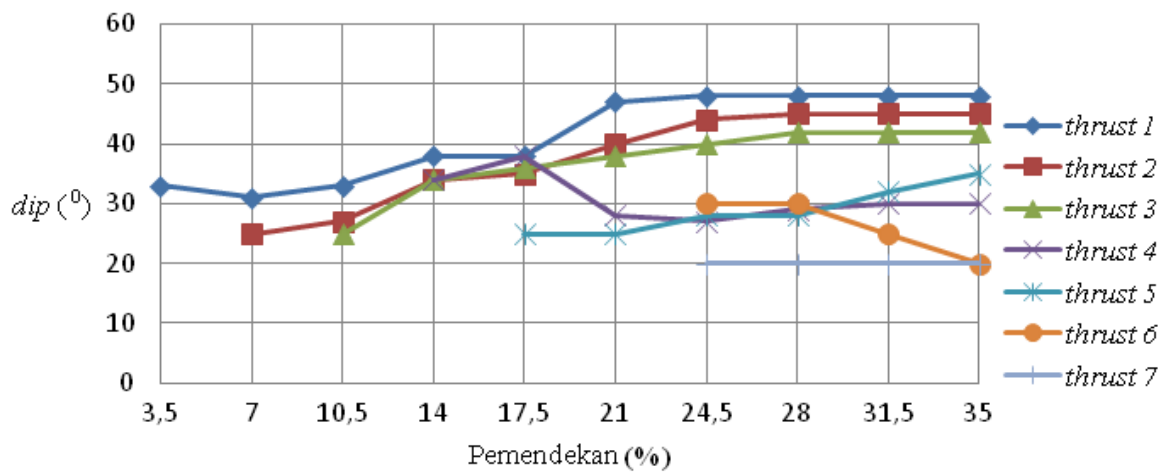
Pemendekan (%)	Sudut <i>Prowedge</i> (α)(derajat)		spasi sesar pada penampang ds (cm)									
	ds	du	spasi sesar pada penampang ds (cm)			spasi sesar pada penampang du (cm)						
			tf1-tf2	tf2-tf3	tf3-tf5	tf1-tf2	tf2-tf3	tf3-tf5	tf5-tf4	tf4-tf6	tf1-tf7	
10,5	13	22	1,3			1,54	1,54					
21	7	12	1,47	1,96		1,7	1,7	1,97	1,88			
28	7	8	1,93	2,622	2,95	1,49	1,49	1,84	1,66	2,64	1,8	2



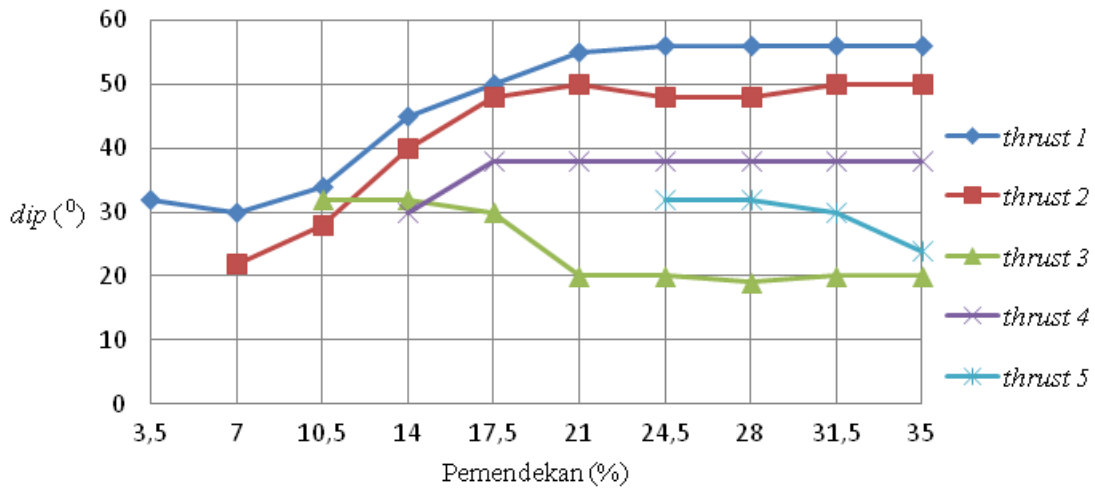
Gambar 3. Sekuen hasil percobaan kompresi penampang ds dengan a). Pemendekan 3,5% b). Pemendekan 10,5% c). Pemendekan 21% d). Pemendekan 28%.



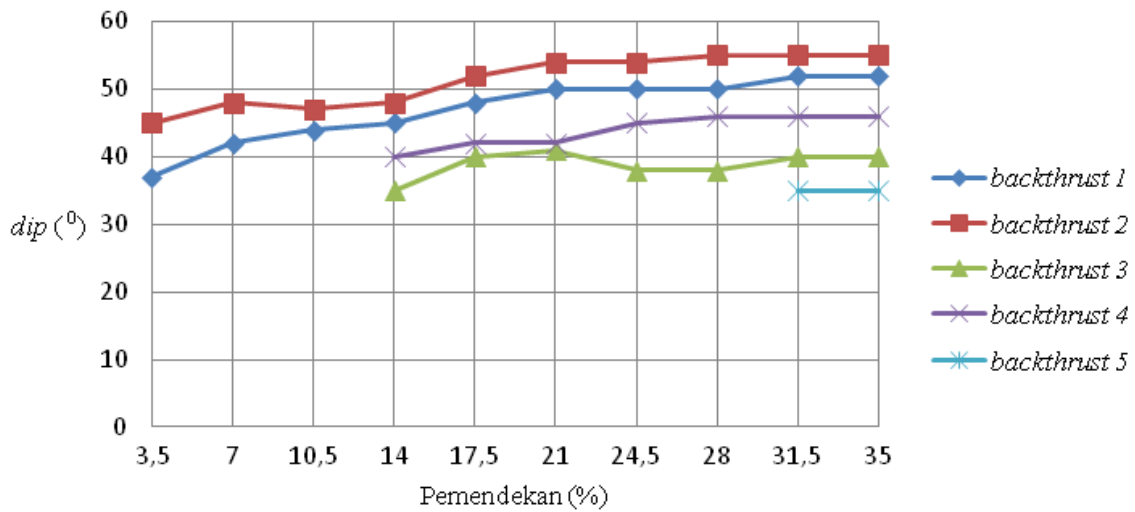
Gambar 4. Sekuen hasil percobaan kompresi penampang du dengan a). Pemendekan 3,5% b). Pemendekan 10,5% c). Pemendekan 21% d). Pemendekan 28%.



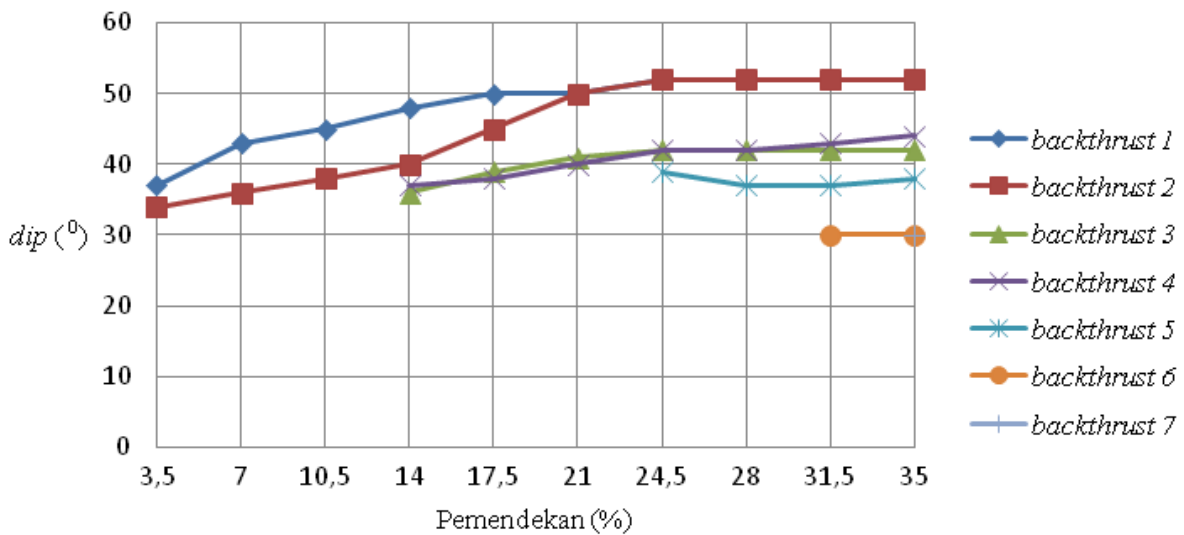
Gambar 5. Perbandingan *thrust fault*, pemendekan dan *dip* sesar (dinding utara)



Gambar 6. Perbandingan thrust fault, pemendekan dan dip sesar (dinding selatan)



Gambar 7. Perbandingan backthrust fault, pemendekan dan dip sesar (dinding utara)



Gambar 8. Perbandingan backthrust fault, pemendekan dan dip sesar (dinding selatan)

5. Kesimpulan

Permodelan analog *sandbox* berhasil dibuat dengan tahapan pekerjaan dilakukan di Bandung dan di Semarang. Permodelan analog *sandbox* dibuat dengan satu sumbu yang bias digunakan untuk permodelan regim tektonik konvergen dan divergen. Bahan durallium sebagai *basal detachment* mempunyai komposisi aluminium dengan tembaga 4%.

Sesar yang terbentuk berupa *thrust* dan *backthrust* yang mengalami imbrikasi dengan dipengaruhi oleh *basal detachment*. *Thrust* yang terbentuk berupa imbrikasi dengan perkembangan ke depan (*forward breaking thrust*). *Thrust* akan berkembang lebih lanjut membentuk *reverse fault* dengan bentuk *drag* yang *concave*.

Percobaan ini menghasilkan tiga zona *ridge* yaitu *ridge* pertama (ZR1) (kelurusan no. 1, 4, dan 5), *ridge* kedua (ZR2) (kelurusan no 9) dan *ridge* ketiga (ZR3) (kelurusan no. 10). Jarak antar *ridge* sekitar 5 cm. Setiap awal pembentukan zona *ridge* akan membentuk lipatan dengan mekanisme *fault propagation folding*, lipatan ini akan berubah arah lapisan seiringan dengan propagasi *thrust* lebih lanjut.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih disampaikan kepada Fakultas Teknik Undip yang telah mendanai penelitian ini.

DaftarPustaka

- Hubbert, M.K. (1951). Theory of Scale Model as Applied to The Study of Geologic Structures. *Geological Society of America*. Vol.48, p.1459-1520.
- Bigi, S, dkk. (2010). Load and unload as interference factors on cyclical behavior and kinematics of coulomb wedges: Insights from sandbox experiments. *Journal of Structural Geology* 32, hal. 28-44.
- McClay, K. (1990). Deformation Mechanics in Analogue Models of Extensional Fault Systems. *Geological Society Special Publication* 54, p. 445-454.
- McClay, K. (1996). Structural Geology, Short Course fo CONOCO, Jakarta, Indonesia, *Fault Dynamic Research Group, Geology Dept. Royal Holloway University of London, England*, h.25-38.
- Purwasasmita, M. (2000). Konsep Teknologi, Tahap Persiapan Bersama, Institut Teknologi Bandung.
- Sapiie, B. dan Harsolumakso, A.H. (2000). Permodelan Analog untuk Proses Pembentukan Struktur Geologi. v.32, No. 3, Departemen Teknik Geologi, Institut Teknologi Bandung.