



UNIVERSITAS DIPONEGORO

**ANALISIS SENSITIVITAS PEMODELAN ANALOG *SANDBOX* UNTUK
MENGETAHUI PERKEMBANGAN STRUKTUR SESAR NAIK**

TUGAS AKHIR

DIMAS ASMARAKANDY

L2L 009 030

PROGRAM STUDI TEKNIK GEOLOGI

FAKULTAS TEKNIK

SEMARANG

SEPTEMBER 2014

ANALISIS SENSITIVITAS PEMODELAN ANALOG *SANDBOX* UNTUK MENGETAHUI PERKEMBANGAN STRUKTUR SESAR NAIK

Dimas Asmarakandy, Ir. Dwiyanto JS., MT., Fahrudin ST. MT.

Program Studi Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

ABSTRAK

Pemodelan *sandbox* adalah salah satu jenis pemodelan analog dalam ilmu geologi yang memiliki tujuan utama yaitu simulasi gaya, deformasi dan evolusi struktur cekungan sedimen. Terbentuknya struktur geologi berupa sesar naik (*thrust* atau *backthrust fault*) diakibatkan oleh sistem tektonik konvergen dan dapat dimodelkan dengan pemodelan *sandbox*. Penelitian ini bertujuan untuk memahami mekanisme dan sekuens deformasi dari sistem sesar naik dengan mengetahui hasil deformasi yang berupa pola struktur geologi; mempelajari perkembangan morfologi, pola dan distribusi struktur pada sistem tektonik konvergen; mengetahui variabel pengujian dalam pembentukan deformasi pada pemodelan *sandbox*. Penelitian dilakukan dari tahap persiapan hingga pelaksanaan. Persiapan yang dilakukan adalah pewarnaan, pengeringan dan pengayakan bahan model yaitu pasir kuarsa Formasi Ngrayong dengan dua macam ukuran butir; kategori ukuran pasir kasar (30-50 mesh) dan kategori ukuran pasir halus (60-80 mesh). Selanjutnya melakukan uji konsistensi alat *sandbox*. Hingga terakhir menentukan kondisi batas pemodelan seperti ukuran butir, ketebalan dan *basement*. Pada tahap pelaksanaan, data yang dihasilkan yaitu; foto/ gambar hasil pemodelan, waktu pergerakan dan jumlah sesar yang terbentuk, jarak pemendekan dan perubahan *dip* sesar, serta perkembangan morfologinya. Struktur yang terbentuk yaitu *thrust* dan *backthrust fault*. Morfologi yang terbentuk merupakan sabuk sesar *thrust* yang perkembangannya ditandai oleh terbentuknya struktur-struktur sesar baru. Jumlah sesar bertambah dan sudut kemiringan sesar pun cenderung bertambah seiring dengan meningkatnya pemendekan. Semakin tebal lapisan pasir maka jumlah sesar yang terbentuk lebih sedikit sebaliknya semakin tipis lapisan maka jumlah sesar yang terbentuk lebih banyak. Perbedaan ukuran butir material akan menghasilkan pola struktur dan jumlah sesar yang berbeda pula.

Kata kunci : pemodelan *sandbox*, deformasi, morfologi, *thrust fault*, *backthrust fault*

PENDAHULUAN

Pemodelan *sandbox* adalah salah satu jenis pemodelan analog dalam ilmu geologi yang memiliki tujuan utama yaitu simulasi gaya, deformasi dan evolusi struktur cekungan sedimen. Pengetahuan mengenai

perkembangan struktural dihasilkan dari deformasi batuan yang sangat terbatas karena kurang diketahui sifat *in situ* batumannya. Meneliti deformasi batuan dengan pendekatan pemodelan analog dapat memecahkan masalah ini. Pemodelan analog dapat menghubungkan dan membandingkan

tahap awal deformasi tahap akhir deformasi. Perbandingan ini sangat penting dalam memahami perkembangan struktural yang dihasilkan dari deformasi batuan terutama di sekitar cekungan sedimen.

Mungkin dokumentasi pertama dari percobaan analog untuk mensimulasikan proses geologi dilakukan dari *Royal Society of Edinburgh* oleh Sir James Hall, 1815. Di sini, ia menggambarkan upaya pertama untuk model lipatan diamati dalam strata geologi. Sebuah langkah besar dalam pemodelan analog datang dengan munculnya teori skala cukup beralasan untuk pemodelan analog dari proses geologi, yang disediakan oleh Hubbert (1937).

Beberapa pemodel lain mengikuti di akhir tahun 1900-an mempelajari sesar, lipatan seperti P.O. Koons pada tahun 1990 dengan penelitiannya Dua Sisi Orogen: Erosi dan Kolisi pada Pegunungan Alps Selatan dengan *Sandbox* juga penelitian yang dilakukan Lui Huiqi, K.R. McClay dan D. Powell pada tahun 1992 yaitu Model Fisik dari Sabuk sesar *Thrust*. Masuk di abad 20 penelitian mulai bervariasi diantaranya P.R. Cobbold, S. Durand dan R. Mourgues pada tahun 2001 meneliti Sabuk sesar *Thrust* dengan Bantuan Fluida yang tak Berpengaruh; K. Agarwal dan K. Agrawal pada tahun 2002 meneliti Sabuk sesar *Thrust* dengan Variabel Gesekan Basal. Di tahun yang sama P.R. Cobbold dan F.O. Marques meneliti Topografi sebagai Faktor Utama dalam Pembentukan Sabuk *Thrust*. Pada tahun 2006 P.R. Cobbold dan R. Mourgues meneliti Tekanan Fluida dan Sabuk sesar *Thrust* menggunakan Model *Sandbox* meliputi Pori-pori Fluida.

METODE PENELITIAN

Sandbox merupakan pemodelan analog berupa boks yang digerakkan dengan mesin,

diisi dengan material (pasir, bubuk gipsum, dll.). Dimensi kotak adalah cukup besar untuk memastikan bahwa sebagian besar dari model lolos efek batas. Dimensi total alat pemodelan yaitu panjang 170 cm, lebar 50 cm, dan tinggi 130 cm. Namun untuk area kotak kerja sendiri yaitu panjang 72,5 cm, lebar 40 cm dan tinggi 40 cm. Dalam penelitian ini, material pemodelan yang digunakan adalah pasir kuarsa kering dengan sudut friksi internal sekitar $26,03^\circ$ untuk pasir berukuran 60 - 80 *mesh* ($\pm 0,178$ mm) dan $27,74^\circ$ untuk yang berukuran 30 - 50 *mesh* ($\pm 0,257$ mm) dan memiliki berat jenis sekitar $1,5 \text{ gr/cm}^3$ (Sapiie dan Hadiana, 2009). Pasir kuarsa ini didapatkan dari Formasi Ngrayong yang tersingkap di daerah Jatirogo, Kabupaten Rembang, Jawa Tengah. Untuk mendapatkan hasil berupa sesar naik maka metode yang diterapkan adalah metode kompresi. Dilakukan empat kali percobaan dengan perbedaan ketebalan lapisan dan ukuran butir pasir. Kecepatan alat pemodelan *sandbox* dengan frekuensi 3Hz atau setara dengan 0,5 mm/menit. Keempat percobaan dilakukan tanpa menggunakan *basement*.

Tatanan Percobaan

Percobaan pertama : Pengaturan yang dibuat pada percobaan pertama yaitu dengan bahan pasir kuarsa berukuran 60 - 80 *mesh*, terdiri dari empat lapisan dengan urutan dari dasar ke permukaan; lapisan pertama (paling dasar) berwarna coklat ketebalan 2 cm, lalu lapisan kedua berwarna hijau ketebalan 1 cm, lapisan ketiga berwarna coklat ketebalan 1 cm dan yang paling atas lapisan keempat berwarna merah ketebalan 1 cm; sehingga tinggi inisial 5 cm. *Wall* yang bergerak hanya bagian timur. Pengamatan dilakukan setiap pemendekan 2,5 cm. Secara persentase pemendekan 2,5 cm setara dengan pemendekan 3,5%. Pada akhir

percobaan pertama ini pemendekan hingga 28%. Percobaan kedua : Pengaturan yang dibuat pada percobaan kedua yaitu dengan bahan pasir kuarsa berukuran 60 - 80 *mesh* terdiri dari enam lapisan, dan semua lapisan memiliki ketebalan 0,5 cm dengan urutan dari dasar ke permukaan; lapisan pasir paling dasar berwarna coklat, lalu lapisan pasir berwarna merah, lapisan pasir berwarna coklat, lapisan pasir berwarna hijau, lapisan pasir berwarna coklat dan yang paling atas lapisan pasir berwarna merah; sehingga tinggi inisial 3 cm. *Wall* yang bergerak hanya bagian barat. Pada akhir percobaan kedua ini pemendekan hingga 35%.

Percobaan ketiga : Pengaturan yang dibuat pada percobaan ketiga yaitu dengan bahan pasir kuarsa berukuran 30 - 50 *mesh* terdiri dari enam lapisan, dan semua lapisan memiliki ketebalan 0,5 cm dengan urutan dari dasar ke permukaan; lapisan pasir paling dasar berwarna coklat, lalu lapisan pasir berwarna hijau, lapisan pasir berwarna coklat, lapisan pasir berwarna merah, lapisan pasir berwarna coklat dan yang paling atas lapisan pasir berwarna hijau; sehingga tinggi inisial 3 cm. *Wall* yang bergerak hanya bagian barat. Pada akhir percobaan ketiga ini pemendekan hingga 35%.

Percobaan keempat : Pengaturan yang dibuat pada percobaan keempat yaitu dengan bahan pasir kuarsa dengan ukuran campuran 60 - 80 *mesh* dan 30 - 50 *mesh* terdiri dari enam lapisan, dan semua lapisan memiliki ketebalan 0,5 cm dengan urutan dari dasar ke permukaan; lapisan pasir paling dasar berwarna hijau berukuran 30 - 50 *mesh*, lalu lapisan pasir berwarna coklat berukuran 60 - 80 *mesh*, lapisan pasir berwarna merah berukuran 30 - 50 *mesh*, lapisan pasir berwarna coklat berukuran 60 - 80 *mesh*, lapisan pasir paling dasar berwarna

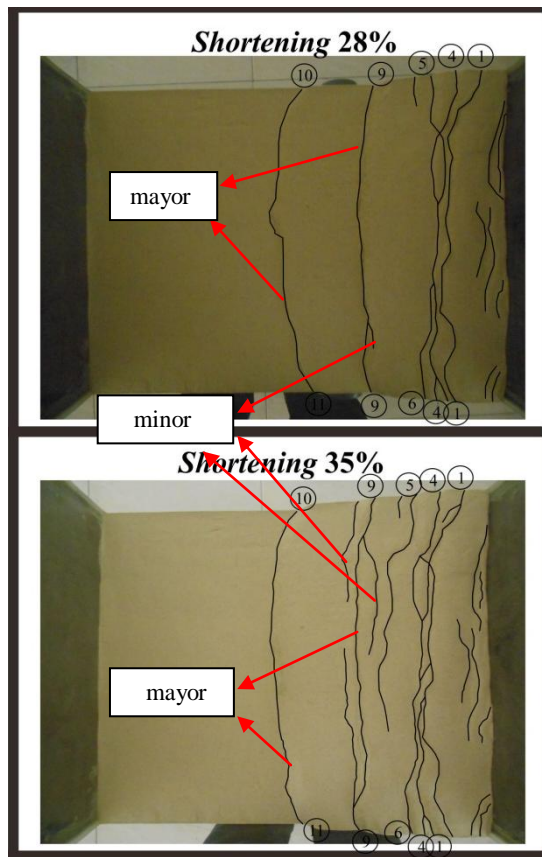
hijau berukuran 30 - 50 *mesh*, dan yang paling atas lapisan pasir berwarna coklat berukuran 60 - 80 *mesh*; sehingga tinggi inisial 3 cm. *Wall* yang bergerak hanya bagian barat. Pada akhir percobaan keempat ini pemendekan hingga 35%.

HASIL PENELITIAN

Pemodelan analog *sandbox* metode kompresi menghasilkan struktur geologi berupa sesar *thrust* dan sesar *backthrust*. Sesar *thrust* terbentuk akibat gaya kompresif secara horisontal pada batuan yang telah melebihi batas retakan (*fracture point*), sedangkan sesar *backthrust* merupakan sesar dengan arah kemiringan berlawanan dari sesar *thrust* dan selalu terbentuk pada anjakan sesar *thrust* (*ramp*). Pada penelitian ini, ada tiga poin utama yang diamati. Tiga poin itu meliputi morfologi; perbandingan waktu pergerakan dinding (*wall*) dan jumlah sesar yang terbentuk; serta perbandingan pemendekan dan sudut kemiringan sesar (*dip fault*).

1. Morfologi

Pengamatan morfologi dilakukan secara vertikal dari alat pemodelan. Dengan metode kompresi, tentu menghasilkan morfologi sabuk sesar *thrust*. Hasil akan menunjukkan bentuk menyerupai pegunungan akresi. Seperti teori sudut lancip kritis bahwa tumbukan yang terjadi akan menimbulkan deformasi seperti lipatan dan sesar naik. Sabuk sesar *thrust* akan tumbuh seiring material pasir yang tertekan dari satu arah menindih material lain yang kondisinya statis. Hasil percobaan membentuk beberapa sabuk sesar *thrust*, terdiri dari sesar - sesar *thrust* atau *backthrust* sehingga bisa disebut sebagai seri sabuk sesar (*thrust belt series*) (Sapiie dan Handoyo, 2000). Pembentukan morfologi pada permukaan model biasanya



Gambar 1. Contoh kenampakan morfologi serta perbandingan morfologi mayor dan morfologi minor

akan menandakan terbentuknya deformasi lipatan atau sesar naik. Deformasi lipatan atau sesar naik akan terbentuk jika morfologi mayor terbentuk (**Gambar 1**). Dalam penelitian ini, pergerakan morfologi minor untuk pengamatan jarak pergerakannya diabaikan, yang diamati hanya pergerakan morfologi mayor saja.

Percobaan Pertama :

Morfologi mayor pertama kali terbentuk pada posisi paling dekat dengan *wall* yang bergerak (dalam percobaan pertama yaitu *wall* timur) dan morfologi selanjutnya terbentuk pada posisi menjauh dari *wall* yang bergerak atau setelah morfologi yang sebelumnya sudah terbentuk. Berdasarkan catatan waktu, pergerakan morfologi mayor berhenti pada menit ke-190 dari keseluruhan waktu 323 menit. Selama 190 menit, terbentuk enam morfologi mayor

(**Lampiran 1**). Pada percobaan pertama ini pembentukan morfologi rata – rata membutuhkan waktu 29 menit 20 detik. Sedangkan rata – rata jaraknya yaitu tiap 4,9 cm morfologi mayor terbentuk. Tinggi inisial lapisan atau morfologi terutama pada *wall* timur (*wall* yang bergerak) yaitu 5 cm. Sedangkan tinggi akhir setelah pemendekan 20 cm terjadi perbedaan pada sisi utara dan selatan. Sisi utara memiliki tinggi akhir 11,5 cm; sisi selatan memiliki tinggi akhir 10,5 cm.

Percobaan Kedua :

Berdasarkan catatan waktu, pergerakan morfologi mayor berhenti pada menit ke-340 dari keseluruhan waktu 6 jam 30 menit (390 menit). Selama 340 menit, terbentuk tujuh morfologi mayor di sisi utara dan lima morfologi mayor di sisi selatan (**Lampiran 2**). Pada percobaan pertama ini pembentukan morfologi rata – rata membutuhkan waktu 42 menit 30 detik. Sedangkan rata – rata jaraknya yaitu tiap 8 cm morfologi mayor terbentuk. Tinggi inisial lapisan atau morfologi terutama pada *wall* timur (*wall* yang bergerak) yaitu 3 cm. Sedangkan tinggi akhir setelah pemendekan 25 cm terjadi perbedaan pada sisi utara dan selatan. Sisi utara memiliki tinggi akhir 7,3 cm; sisi selatan memiliki tinggi akhir 7,9 cm.

Percobaan Ketiga :

Berdasarkan catatan waktu, pergerakan morfologi mayor berhenti pada menit ke-255 dari keseluruhan waktu 6 jam 30 menit (390 menit). Selama 255 menit, terbentuk lima morfologi mayor (**Lampiran 3**). Pada percobaan pertama ini pembentukan morfologi rata – rata membutuhkan waktu 42 menit. Sedangkan rata – rata jaraknya yaitu tiap 8,1 cm morfologi mayor terbentuk. Tinggi inisial lapisan atau morfologi terutama pada *wall* timur (*wall*

yang bergerak) yaitu 3 cm. Sedangkan tinggi akhir setelah pemendekan 25 cm terjadi perbedaan pada sisi utara dan selatan. Sisi utara memiliki tinggi akhir 7,7 cm; sisi selatan memiliki tinggi akhir 8,3 cm.

Percobaan Keempat :

Berdasarkan catatan waktu, pergerakan morfologi mayor berhenti pada menit ke-270 dari keseluruhan waktu 6 jam 30 menit (390 menit). Selama 270 menit, terbentuk hanya empat morfologi mayor (**Lampiran 4**). Pada percobaan pertama ini pembentukan morfologi rata – rata membutuhkan waktu 67,5 menit. Sedangkan rata – rata jaraknya yaitu tiap 11 cm morfologi mayor terbentuk. Tinggi inisial lapisan atau morfologi terutama pada *wall* timur (*wall* yang bergerak) yaitu 3 cm. Sedangkan tinggi akhir setelah pemendekan 25 cm yaitu 8 cm. Mengalami kenaikan tinggi morfologi yang sama yaitu 5 cm.

2. Waktu Pergerakan (Wall) dan Jumlah Sesar yang Terbentuk

Pada percobaan metode kompresi tipe dorong pemodelan *sandbox* ini mendapatkan hasil bahwa semakin *wall* bergerak maju (seiring waktu berjalan) maka jumlah sesar yang terbentuk semakin bertambah.

Percobaan Pertama :

Hingga akhir pemendekan 28% pada *wall* utara terbentuk tujuh sesar. Diantaranya empat *thrust fault* dan tiga *backthrust fault*. Pengamatan dilakukan sebanyak delapan kali dan keseluruhan pengamatan ditunjukkan pada (**Lampiran 5**). Pengamatan pertama (*shortening* 3,5%) terbentuk tiga sesar berupa satu *thrust fault* (tf 1) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan kedua (*shortening* 7%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan pertama. Pengamatan ketiga (*shortening* 10,5%)

jumlah sesar menjadi empat berupa dua *thrust fault* (tf 1, tf 2) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keempat (*shortening* 14%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan ketiga. Pengamatan kelima (*shortening* 17,5%) jumlah sesar menjadi lima berupa tiga *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keenam (*shortening* 21%) jumlah sesar menjadi enam berupa empat *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan ketujuh (*shortening* 24,5%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan keenam. Pengamatan terakhir (*shortening* 28%) jumlah sesar menjadi tujuh berupa empat *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4) dan tiga *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3).

Pada *wall* selatan terbentuk tujuh sesar. Diantaranya lima *thrust fault* dan dua *backthrust fault*. Pengamatan dilakukan sebanyak delapan kali dan keseluruhan pengamatan ditunjukkan pada (**Lampiran 6**). Pengamatan pertama (*shortening* 3,5%) terbentuk tiga sesar berupa satu *thrust fault* (tf 1) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan kedua (*shortening* 7%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan pertama. Pengamatan ketiga (*shortening* 10,5%) jumlah sesar menjadi empat berupa dua *thrust fault* (tf 1, tf 2) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keempat (*shortening* 14%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan ketiga. Pengamatan kelima (*shortening* 17,5%) jumlah sesar menjadi lima berupa tiga *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keenam (*shortening* 21%) jumlah sesar menjadi enam berupa empat *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan ketujuh (*shortening* 24,5%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan keenam. Pengamatan terakhir (*shortening* 28%)

jumlah sesar menjadi tujuh berupa lima *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2).

Percobaan Kedua :

Pada percobaan kedua ini dilakukan sepuluh kali pengamatan; sama seperti percobaan sebelumnya semakin *wall* bergerak maju (seiring waktu berjalan) maka jumlah sesar yang terbentuk semakin bertambah. Hingga akhir pemendekan 35% pada *wall* utara terbentuk sebelas sesar dan ditunjukkan pada (**Lampiran 7**). Diantaranya tujuh *thrust fault* dan empat *backthrust fault*. Pengamatan pertama (*shortening* 3,5%) terbentuk dua sesar berupa satu *thrust fault* (tf 1) dan satu *backthrust fault* (bt 1). Pengamatan kedua (*shortening* 7%) jumlah sesar menjadi empat berupa dua *thrust fault* (tf 1, tf 2) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan ketiga (*shortening* 10,5%) jumlah sesar menjadi enam berupa empat *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keempat (*shortening* 14%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan ketiga. Pengamatan kelima (*shortening* 17,5%) jumlah sesar menjadi delapan berupa enam *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5, tf 6) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keenam (*shortening* 21%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan kelima. Pengamatan ketujuh (*shortening* 24,5%) jumlah sesar menjadi sembilan berupa tujuh *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5, tf 6, tf 7) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan kedelapan (*shortening* 28%) jumlah sesar menjadi sebelas berupa tujuh *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5, tf 6, tf 7) dan empat *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4). Hingga pengamatan kesepuluh (*shortening* 31,5 - 35%) jumlah sesar tetap.

Pada *wall* selatan terbentuk sepuluh sesar. Jumlah ini lebih sedikit satu sesar jika

dibandingkan dengan *wall* utara yang berjumlah sebelas sesar. Diantaranya enam *thrust fault* dan empat *backthrust fault* (**Lampiran 8**). Pembentukannya sama dengan *wall* utara, yang membedakan yaitu pada pemendekan 17,5 – 21% *wall* utara membentuk dua *thrust fault* sedangkan *wall* selatan hanya membentuk satu *thrust fault*.

Percobaan Ketiga :

Pada percobaan ketiga ini dilakukan sepuluh kali pengamatan dan keseluruhan pengamatan ditunjukkan pada (**Lampiran 9**). Hingga akhir pemendekan 35% pada *wall* utara terbentuk delapan sesar. Diantaranya enam *thrust fault* dan dua *backthrust fault*. Pengamatan pertama (*shortening* 3,5%) terbentuk dua sesar berupa satu *thrust fault* (tf 1) dan satu *backthrust fault* (bt 1). Pengamatan kedua (*shortening* 7%) jumlah sesar menjadi empat berupa dua *thrust fault* (tf 1, tf 2) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan ketiga (*shortening* 10,5%) jumlah sesar menjadi lima berupa tiga *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keempat (*shortening* 14%) jumlah sesar menjadi tujuh berupa lima *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan kelima (*shortening* 17,5%) dan keenam (*shortening* 21%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan keempat. Pengamatan ketujuh (*shortening* 24,5%) jumlah sesar menjadi delapan berupa enam *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5, tf 6) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan kedelapan hingga pengamatan kesepuluh jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan ketujuh.

Pada *wall* selatan terbentuk delapan sesar. Jumlah sesar sama jika dibandingkan dengan *wall* utara. Diantaranya enam *thrust fault* dan dua *backthrust fault* (**Lampiran**

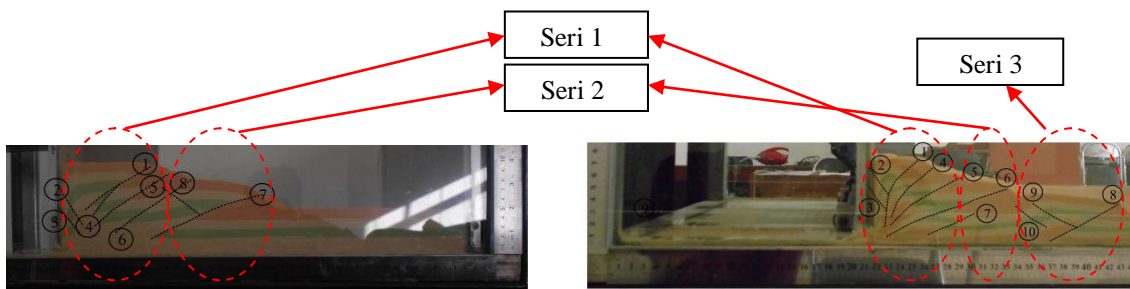
10). Pembentukannya sama dengan *wall* utara, yang membedakan yaitu pada *shortening* 14% *wall* utara membentuk dua *thrust fault* sedangkan *wall* selatan hanya membentuk satu *thrust fault*. Pada *shortening* 17,5% *wall* utara tidak membentuk sesar sedangkan *wall* selatan membentuk satu *thrust fault*.

Percobaan Keempat :

Pada percobaan keempat ini dilakukan sepuluh kali pengamatan dan keseluruhan pengamatan ditunjukkan pada (**Lampiran 11**). Hingga akhir pemendekan 35% pada *wall* utara terbentuk dua belas sesar. Diantaranya tujuh *thrust fault* dan lima *backthrust fault*. Pengamatan pertama (*shortening* 3,5%) terbentuk dua sesar berupa satu *thrust fault* (tf 1) dan satu *backthrust fault* (bt 1). Pengamatan kedua (*shortening* 7%) jumlah sesar menjadi empat berupa dua *thrust fault* (tf 1, tf 2) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan ketiga (*shortening* 10,5%) jumlah sesar menjadi lima berupa tiga *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan keempat (*shortening* 14%) jumlah sesar menjadi delapan berupa lima *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5) dan tiga *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3). Pengamatan kelima (*shortening* 17,5%) jumlah sesar menjadi sepuluh berupa enam *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5, tf 6) dan empat *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4). Pengamatan keenam (*shortening* 21%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan kelima. Pengamatan ketujuh (*shortening* 24,5%) jumlah sesar menjadi sebelas berupa tujuh *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5, tf 6, tf 7) dan empat *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4). Pengamatan kedelapan (*shortening* 28%) jumlah sesar menjadi dua belas berupa tujuh *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4,

tf 5, tf 6, tf 7) dan lima *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4, bt 5). Pengamatan kesembilan hingga kesepuluh jumlah sesar tetap sama.

Pada *wall* selatan terbentuk dua belas sesar. Diantaranya lima sesar *thrust* dan tujuh sesar *backthrust*. Hasil ini berbalik dengan yang ada pada *wall* utara. Hasil pengamatan ditunjukkan pada (**Lampiran 12**). Pengamatan pertama (*shortening* 3,5%) terbentuk dua sesar berupa satu *thrust fault* (tf 1) dan satu *backthrust fault* (bt 1). Pengamatan kedua (*shortening* 7%) jumlah sesar menjadi empat berupa dua *thrust fault* (tf 1, tf 2) dan dua *backthrust fault* (bt 1, bt 2). Pengamatan ketiga (*shortening* 10,5%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan kedua. Pengamatan keempat (*shortening* 14%) jumlah sesar menjadi tujuh berupa empat *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4) dan tiga *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3). Pengamatan kelima (*shortening* 17,5%) jumlah sesar menjadi delapan berupa empat *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4) dan empat *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4). Pengamatan keenam (*shortening* 21%) jumlah sesar menjadi sembilan berupa empat *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4) dan lima *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4, bt 5). Pengamatan ketujuh (*shortening* 24,5%) jumlah sesar menjadi sebelas berupa lima *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5) dan enam *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4, bt 5, bt 6). Pengamatan kedelapan (*shortening* 28%) dan kesembilan (*shortening* 31,5%) jumlah sesar tetap sama seperti pengamatan ketujuh. Pengamatan kesepuluh jumlah sesar menjadi dua belas berupa lima *thrust fault* (tf 1, tf 2, tf 3, tf 4, tf 5) dan tujuh *backthrust fault* (bt 1, bt 2, bt 3, bt 4, bt 5, bt 6, bt 7).



Gambar 2. Hasil pemendekan 28% : a) percobaan pertama (*wall* utara); b) percobaan kedua (*wall* selatan)

3. Pemendekan (*Shortening*) dan Sudut Kemiringan Sesar (*Dip Fault*)

Pemendekan (*shortening*) adalah pergerakan *wall* yang mendorong/ menekan model *sandbox*. Pengamatan pada setiap pemendekan dilakukan pada jarak tertentu. Setiap pemendekan mencapai 2,5 cm dilakukan pengamatan pada model dengan menghitung jumlah sesar, *dip* sesar, juga waktunya. Pemendekan selalu dalam bentuk persentase. Persentase pemendekan dihitung dari jarak tempuh pemendekan dibagi panjang total alat *sandbox*, dikalikan seratus persen :

$$\frac{\text{jarak tempuh wall bergerak}}{\text{panjang total alat} \approx 72,5} \times 100\%$$

Dalam percobaan pertama pemendekan mencapai 28%, sedangkan tiga percobaan berikutnya mencapai 35%. Kondisi maksimal pemendekan mencapai 40%, jika melampaui alat bisa mengalami kerusakan.

Sudut kemiringan sesar diukur menggunakan busur 360⁰, pengukuran dilakukan setiap 3,5% pemendekan. Sudut kemiringan sangat bervariasi setiap kali pemendekan bertambah. Pada seluruh percobaan nilai dari sudut kemiringan sesar tersebut bertambah besar seiring dengan bertambahnya pemendekan. Untuk sesar *backthrust*, nilai sudut kemiringan relatif tetap dan hanya mengalami kenaikan beberapa derajat saja.

4. Evaluasi Percobaan

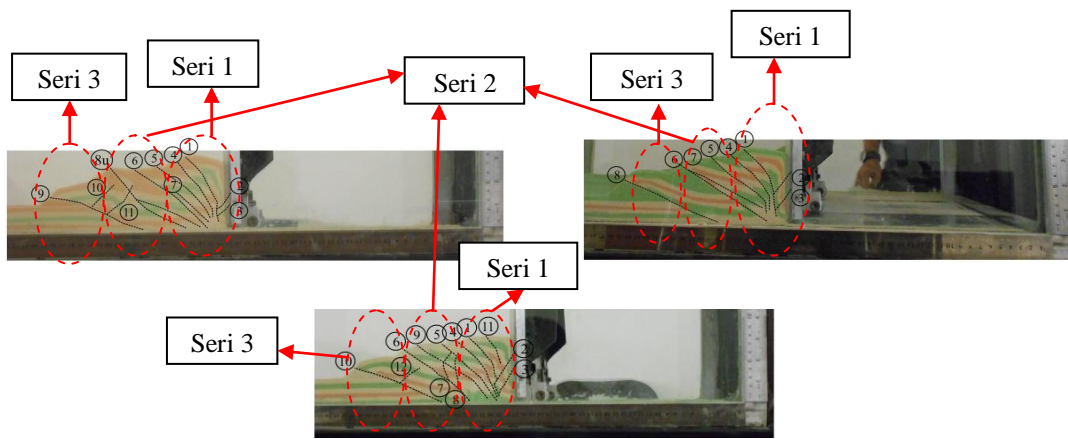
Secara keseluruhan, percobaan dilakukan empat kali untuk memahami mekanisme dan sekuen deformasi dari sistem sesar naik

(*thrust fault*) dengan mengetahui hasil deformasi yang berupa pola struktur geologi, perkembangan morfologi sabuk sesar (*thrust belt*); juga mengetahui variabel percobaan dalam pembentukan deformasi pada pemodelan analog *sandbox*. Variabel lebih ditekankan pada ukuran butir material (pasir kuarsa) dan ketebalan lapisan pasir.

Pada percobaan pertama dan kedua kesamaan variabel pada ukuran butir pasir yang sama (ukuran 60 – 80 *mesh*), namun berbeda pemendekan dan ketebalan lapisannya. Pada percobaan kedua, ketiga dan keempat kesamaan variabel pada ketebalan lapisannya (3 cm), namun berbeda ukuran butir pasirnya.

Percobaan pertama total akhir pemendekan adalah 28%. Sedangkan percobaan kedua total akhir pemendekan 35%, namun sebagai perbandingan penulis mengambil hasil akhir pemendekan yang sama dengan percobaan pertama yaitu 28%. Berdasarkan gambar 4.23, antara percobaan pertama membentuk dua seri sabuk sesar sedangkan percobaan kedua membentuk tiga seri. Namun jelas terjadi perbedaan pada jumlah sesar yang terbentuk, percobaan pertama membentuk tujuh sesar sedangkan percobaan kedua membentuk sepuluh sesar.

Seri satu : pada percobaan pertama dan kedua membentuk tiga sesar *thrust* dan dua sesar *backthrust*. Seri dua : pada percobaan pertama membentuk satu sesar *thrust* dan satu sesar *backthrust*, sedangkan pada percobaan kedua membentuk dua sesar *thrust*. Seri tiga pada percobaan kedua membentuk satu sesar *thrust* dan dua sesar



Gambar 3. Hasil pemendekan 35% : a) percobaan kedua (*wall utara*); b) percobaan ketiga (*wall utara*); c) percobaan keempat (*wall utara*)

backthrust. Dari perbandingan ini dapat disimpulkan bahwa variabel ketebalan lapisan pasir mempengaruhi jumlah sesar yang terbentuk pada pemodelan, semakin tebal lapisan maka jumlah sesar yang terbentuk lebih sedikit sebaliknya semakin tipis lapisan maka jumlah sesar yang terbentuk lebih banyak.

Perbandingan selanjutnya adalah percobaan kedua, ketiga dan keempat. Ketiga percobaan tersebut memiliki kesamaan variabel yaitu ketebalan lapisan pasir namun berbeda dalam ukuran butir pasir yang digunakan dalam pemodelan. Percobaan kedua menggunakan 100% pasir berukuran 60 – 80 *mesh*. Percobaan ketiga menggunakan 100% pasir berukuran 30 – 50 *mesh*. Percobaan keempat menggunakan 50% pasir berukuran 30 – 50 *mesh* dan 50% pasir berukuran 60 – 80 *mesh* dengan lapisan selang – seling.

Berdasarkan **gambar 3**, antara masing – masing percobaan membentuk tiga seri sabuk sesar namun terjadi perbedaan pada bentuk sesar (kehadiran *thrust* dan *backthrust*), sudut kemiringan sesar dan jumlah sesar yang terbentuk. Pada percobaan kedua membentuk sepuluh sesar, percobaan ketiga membentuk tujuh sesar dan percobaan keempat membentuk dua belas sesar. Berikut adalah penjelasan dari tiga seri sabuk sesar pada masing – masing percobaan, **Seri satu** : percobaan kedua

membentuk empat sesar *thrust* dan dua sesar *backthrust*; percobaan ketiga membentuk tiga sesar *thrust* dan dua sesar *backthrust*; percobaan keempat membentuk empat sesar *thrust* dan dua sesar *backthrust*, **Seri dua** : percobaan kedua membentuk dua sesar *thrust*; percobaan ketiga membentuk satu sesar *thrust*; percobaan keempat membentuk dua sesar *thrust* dan dua sesar *backthrust*, **Seri tiga** : percobaan kedua membentuk satu sesar *thrust* dan dua sesar *backthrust*; percobaan ketiga membentuk satu sesar *thrust*; percobaan keempat membentuk satu sesar *thrust* dan satu sesar *backthrust*.

Dari perbandingan ini dapat disimpulkan bahwa tidak hanya variabel ketebalan lapisan pasir yang mempengaruhi bentuk sesar, sudut kemiringan dan jumlah sesar yang terbentuk pada pemodelan, tetapi ukuran butir pasir juga dapat mempengaruhinya.

KESIMPULAN

Model analog *sandbox* telah berhasil mensimulasikan perkembangan sistem sesar naik. Dengan membandingkan hasil tiap percobaan, maka dapat disimpulkan :

- Pemodelan analog *sandbox* metode kompresi menghasilkan struktur geologi berupa sesar *thrust* dan sesar *backthrust*.
- Sesar *thrust* terbentuk akibat gaya kompresif secara horisontal pada batuan

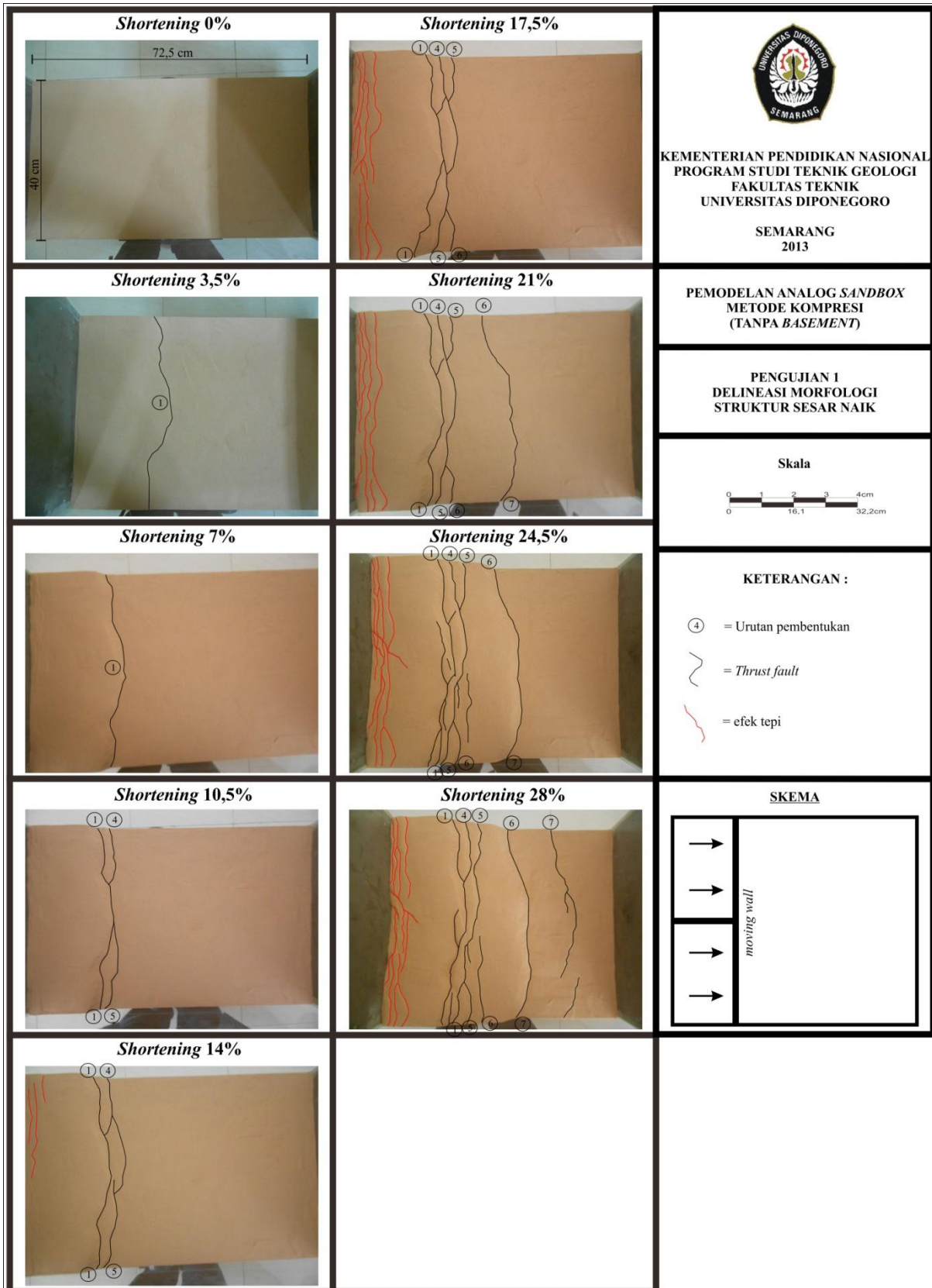
yang telah melebihi batas retakan (*fracture point*), sedangkan sesar *backthrust* merupakan sesar dengan arah kemiringan berlawanan dari sesar *thrust* dan selalu terbentuk pada anjakan sesar *thrust* (*ramp*).

- Morfologi yang terbentuk merupakan sabuk sesar *thrust* yang perkembangannya ditandai oleh terbentuknya struktur-struktur baru.
- Variasi *setting* tektonik akan mengontrol pola struktur serta geometri pada pemodelan, dari keempat percobaan yang dilakukan ada dua variabel yang berpengaruh terhadap hasil deformasi, yaitu variabel ketebalan dan ukuran butir material yang digunakan.
- Semakin tebal lapisan maka jumlah sesar yang terbentuk lebih sedikit sebaliknya semakin tipis lapisan maka jumlah sesar yang terbentuk lebih banyak.
- Perbedaan ukuran butir material akan menghasilkan pola struktur dan jumlah sesar yang berbeda pula.
- Jumlah sesar bertambah dan sudut kemiringan sesar pun cenderung bertambah seiring dengan meningkatnya pemendekan.
- Seiring dengan meningkatnya pemendekan, kehadiran sesar – sesar *thrust* lebih banyak dibandingkan sesar – sesar *backthrust*.

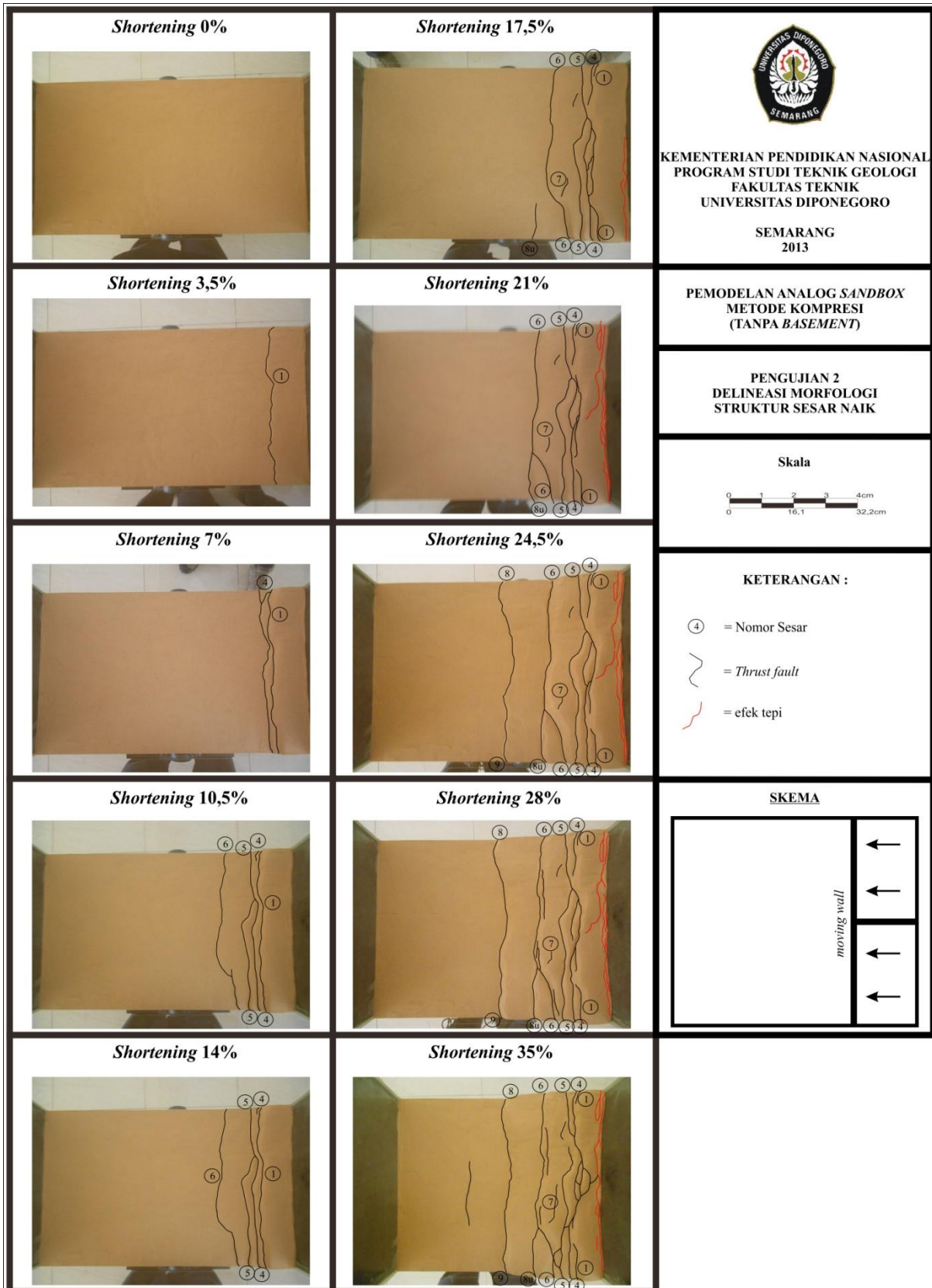
DAFTAR PUSTAKA

- Agarwal K.K., Agrawal G.K., 2002. *Analogue sandbox models of thrust wedges with variable basal frictions*. *Gondwana Research* 5, 641–647.
- Anderson, E.M. 1950. *The Dynamics of Faulting*. Edinburgh: Oliver & Boyd.
- Astawa M.R., Kramadibrata S. 1999. *Mekanika Batuan*. Institut Teknologi Bandung: Bandung.
- Barcilon V. 1987. *A note on 'Noncohesive critical Coulomb wedges: an exact solution' by F.A. Dahlen*. *Journal of Geophysical Research* 92, 3681–3682.
- Cloos E. 1955. *Experimental Analysis of Fracture Patterns*. *Bulletin Geology Society*. v.66, p. 241-256.
- Cobbold P.R., Durand S., Mourgues R., 2001. *Sandbox modelling of thrust wedges with fluid-assisted detachments*. *Tectonophysics* 334, 245–258.
- Dahlen, F.A. 1984. *Noncohesive critical Coulomb wedges: an exact solution*. *Journal of Geophysical Research* 89, 10,125–10,133.
- Dahlen, F.A. 1990. *Critical taper model of fold-and-thrust belts and accretionary wedges*. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 18, 55–99.
- Dahlen, F.A., Suppe, J., Davis, D. 1984. *Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges: cohesive Coulomb theory*. *Journal of Geophysical Research* 89, 10,087–10,101.
- Dahlen, F.A., Suppe, J. 1988. *Mechanics, growth, and erosion of mountain belts*. *Geological Society of America - Special Paper* 218, 161–178.
- Davis, D., Suppe, J., Dahlen, F.A. 1983. *Mechanics of fold-and-thrust belts and accretionary wedges*. *Journal of Geophysical Research* 88, 1153–1172.
- Eisenstadt G., De Paor D. 1987. *Geology*. v.15:7. 630-633.
- Eisenstadt G., Vendeville B.C. Withjack M.O. 1995. *Introduction to Experimental Modeling of Tectonic*

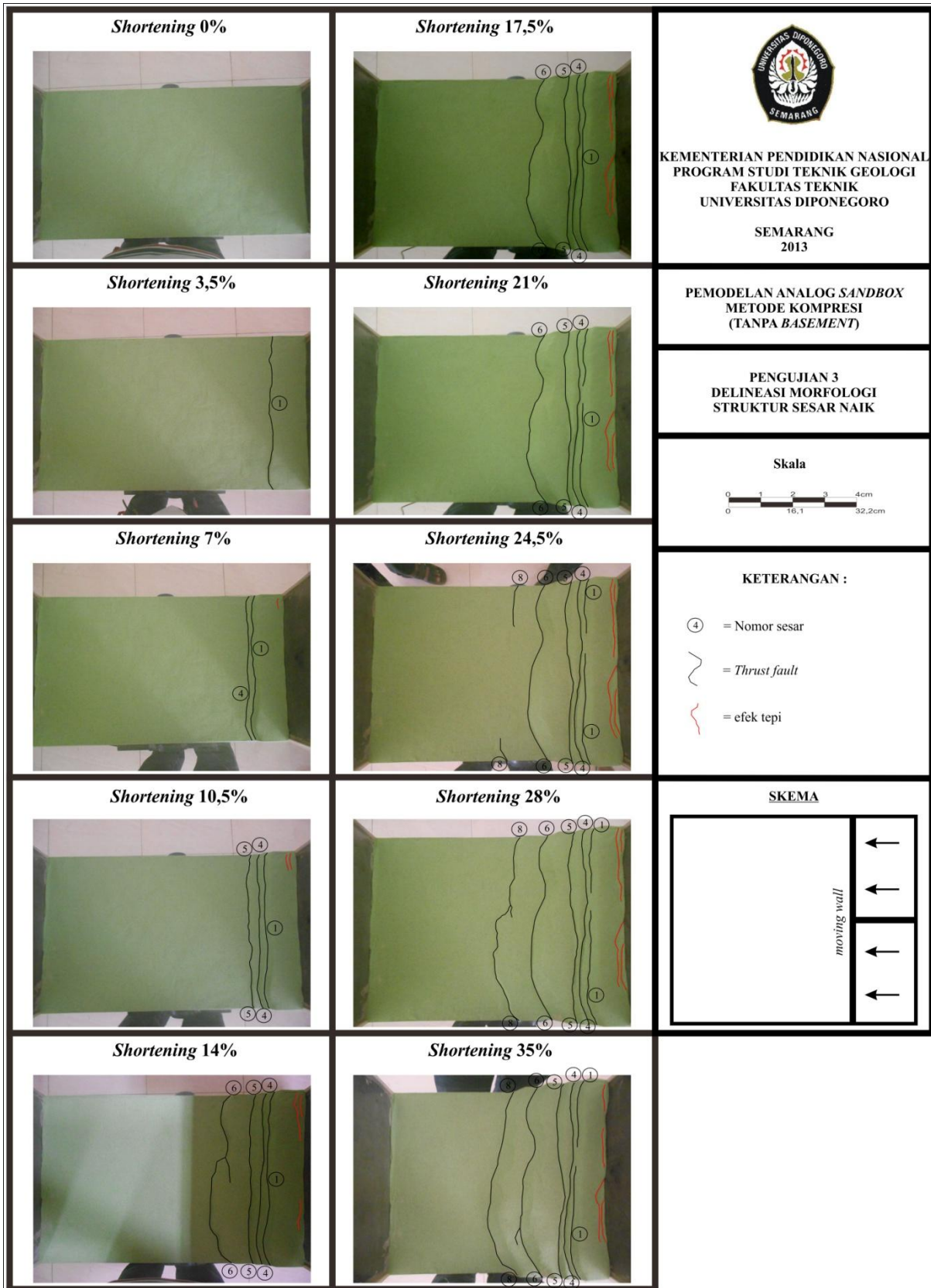
- Processes. GSA Annual Meeting.* New Orleans: USA.
- Fossen H., 2010. *Structural Geology.* United Kingdom: Cambridge University Press.
- Hubbert M.K. 1951. *Theory of Scale Models as Applied to Study of Geological Structure.* Geological Society of America. v.48. p.1459-1520.
- Huiqi Lui, McClay K.R., Powell D. 1992. *Physical models of thrust wedges.* In: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics.* Chapman and Hall, New York, pp. 71–81.
- Koons, P.O., 1990. *Two-sided orogen: collision and erosion from the sandbox to the Southern Alps, New Zealand.* *Geology* 18, 679–682.
- Marques F.O., Cobbold P.R., 2002. *Topography as a major factor in the development of arcuate thrust belts: insights from sandbox experiments.* *Tectonophysics* 348, 247–268.
- Mourgues R., Cobbold P.R., 2006. *Thrust wedges and fluid overpressures: sandbox models involving pore fluids.* *Journal of Geophysical Research* 111, B05404. doi:10.1029/2004JB003441.
- Purwasasmita M. 2000. *Konsep Teknologi, Tahap Persiapan Bersama.* Institut Teknologi Bandung.
- Rossetti F., Faccenna C., Ranalli G., Storti F., 2000. *Convergence rate-dependent growth of experimental viscous orogenic wedges.* *Earth and Planetary Science Letters* 178, 367–372.
- Sapiie B., Hadiana M. 2009. *Pemodelan analog sandbox dan analisis kesensitifan untuk studi perkembangan sistim sesar mendatar konvergen.* *Buletin Geologi.* Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Sapiie B., Handoyo. 2000. *Pemodelan Analog Sandbox untuk Deformasi Kontraksional.* FIKTM ITB internal report.
- Scholz, C.H., 2002. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting.* Cambridge: Cambridge University Press.
- Schultz R.A., 1996. *Relative scale and the strength and deformability of rock masses.* *Journal of Structural Geology* 18: 1139-1149.
- Suppe J. 1985. *Principles of Structural Geology.* Prentice-Hall, Inc. Englewood Cliffs: New Jersey. p. 292-294.
- Vann I. Graham R. Hayward A. 1986. *Journal of Structural Geology.* v.8 , n 3-4. p. 215-227.
- Vendeville B.C., Jackson D. 1992. *Scaling: in Introduction to Experimental Modeling of Tectonic Processes.* Geological Society of America. H. 2-1 – 2-19.



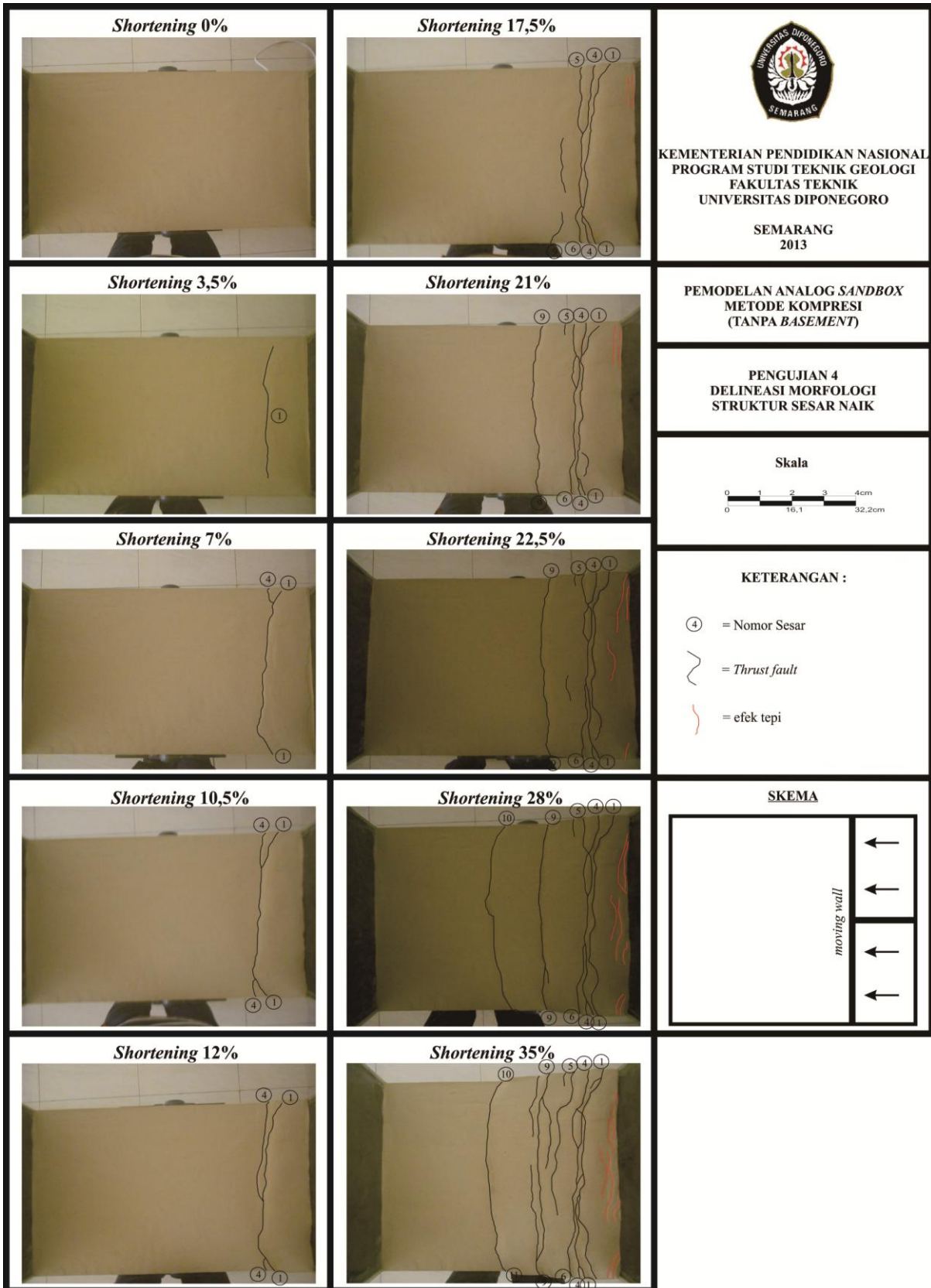
Lampiran 1. Kenampakan morfologi pada percobaan pertama



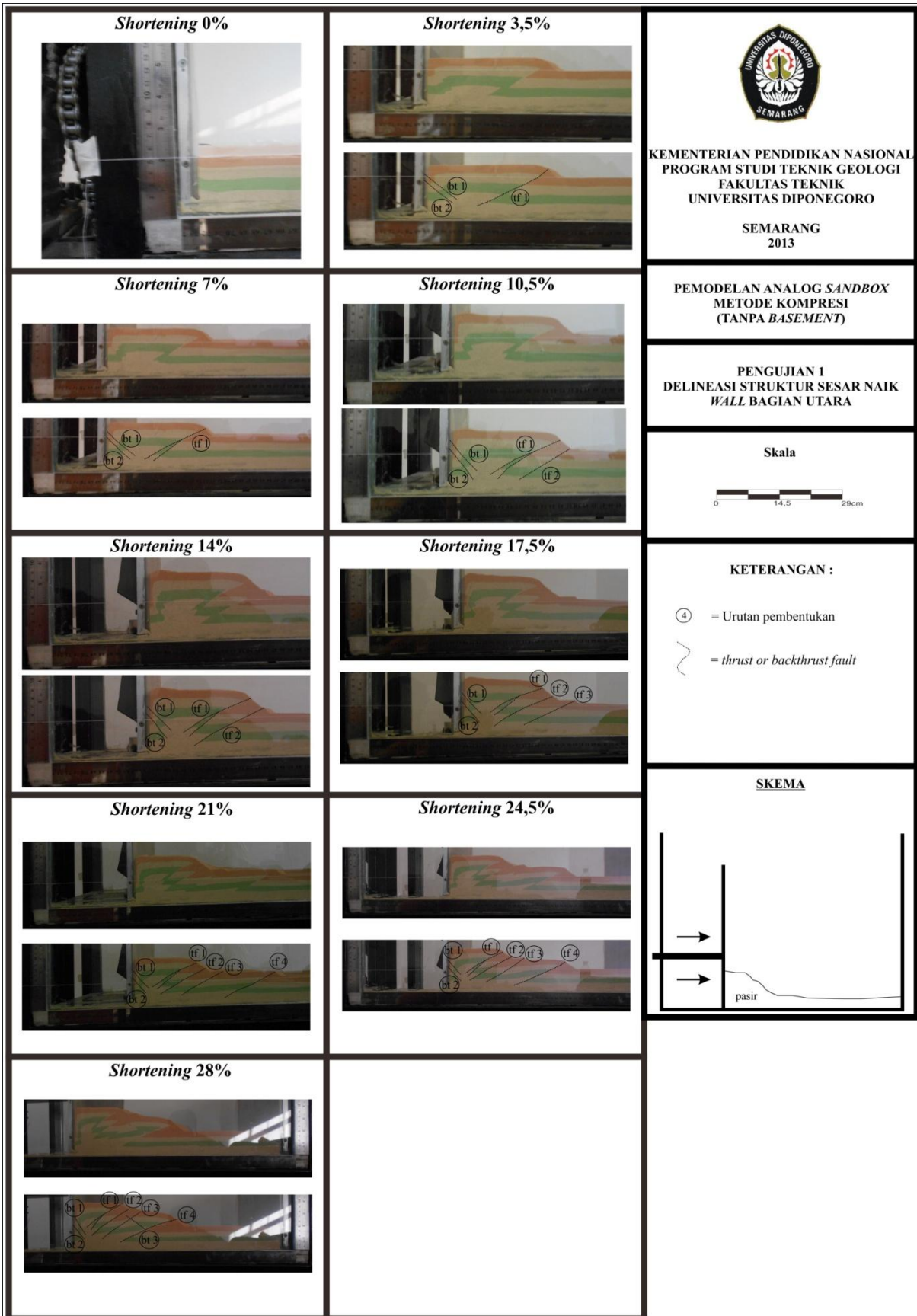
Lampiran 2. Kenampakan morfologi pada percobaan kedua



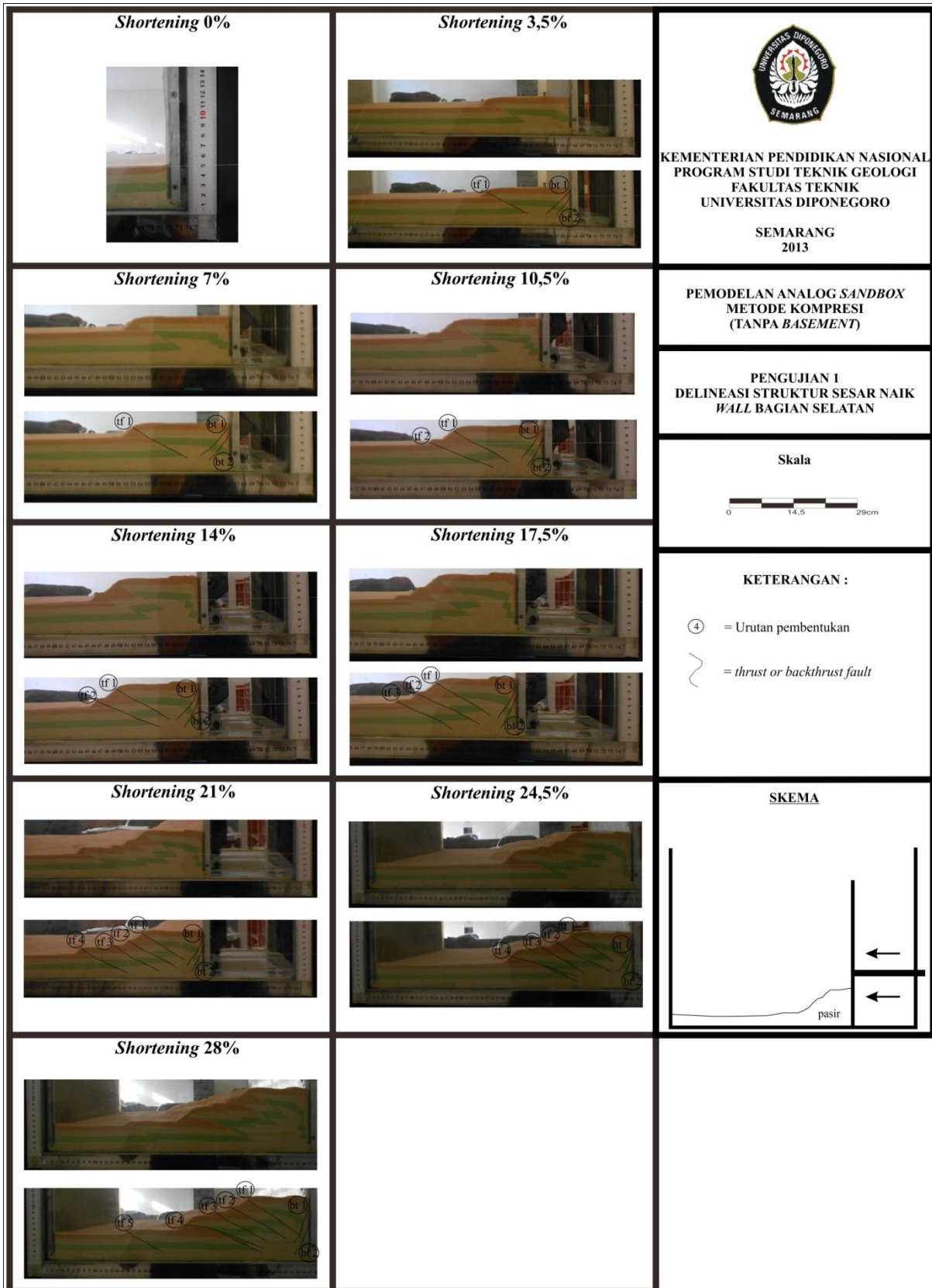
Lampiran 3. Kenampakan morfologi pada percobaan ketiga



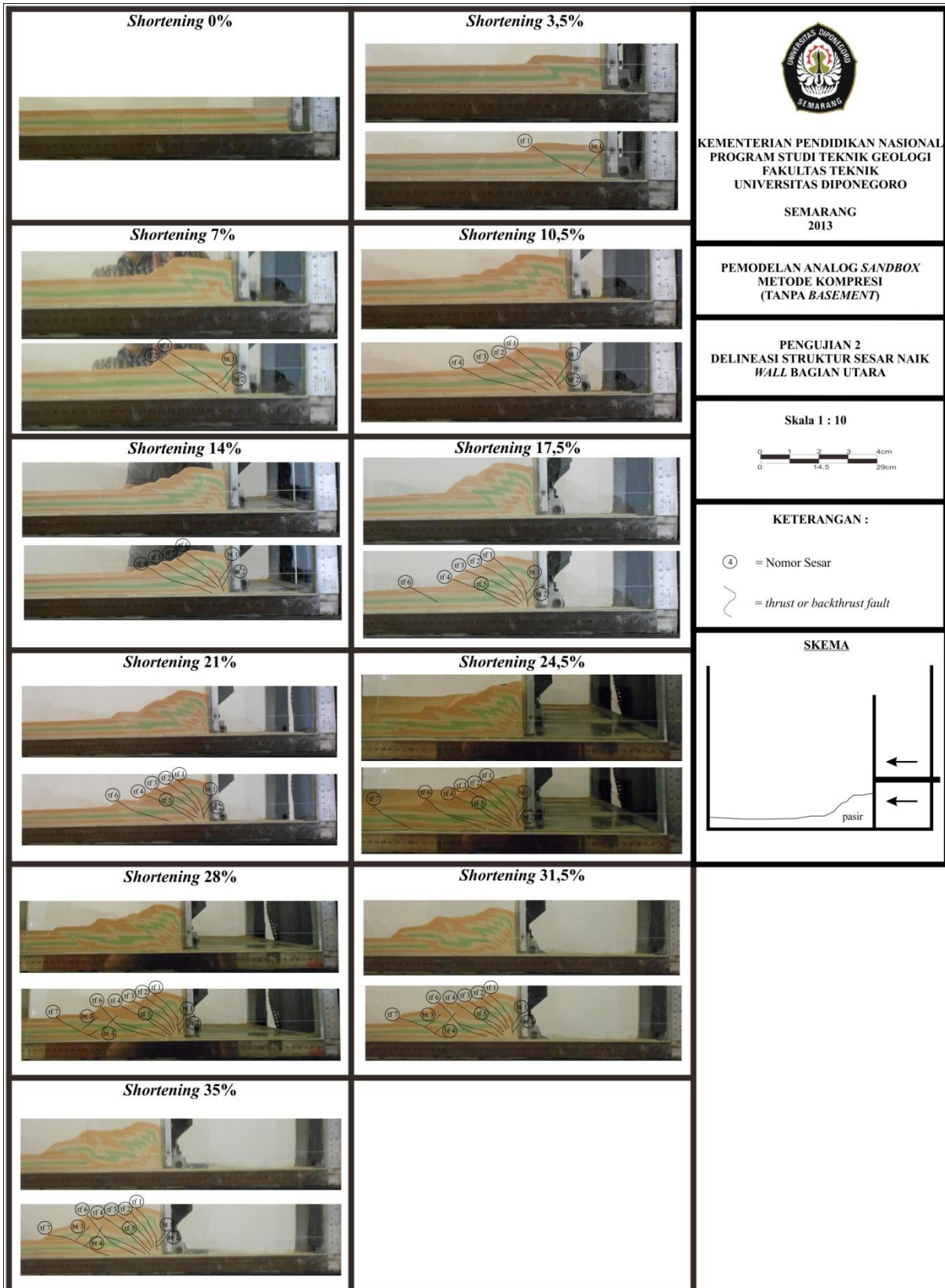
Lampiran 4. Kenampakan morfologi pada percobaan keempat



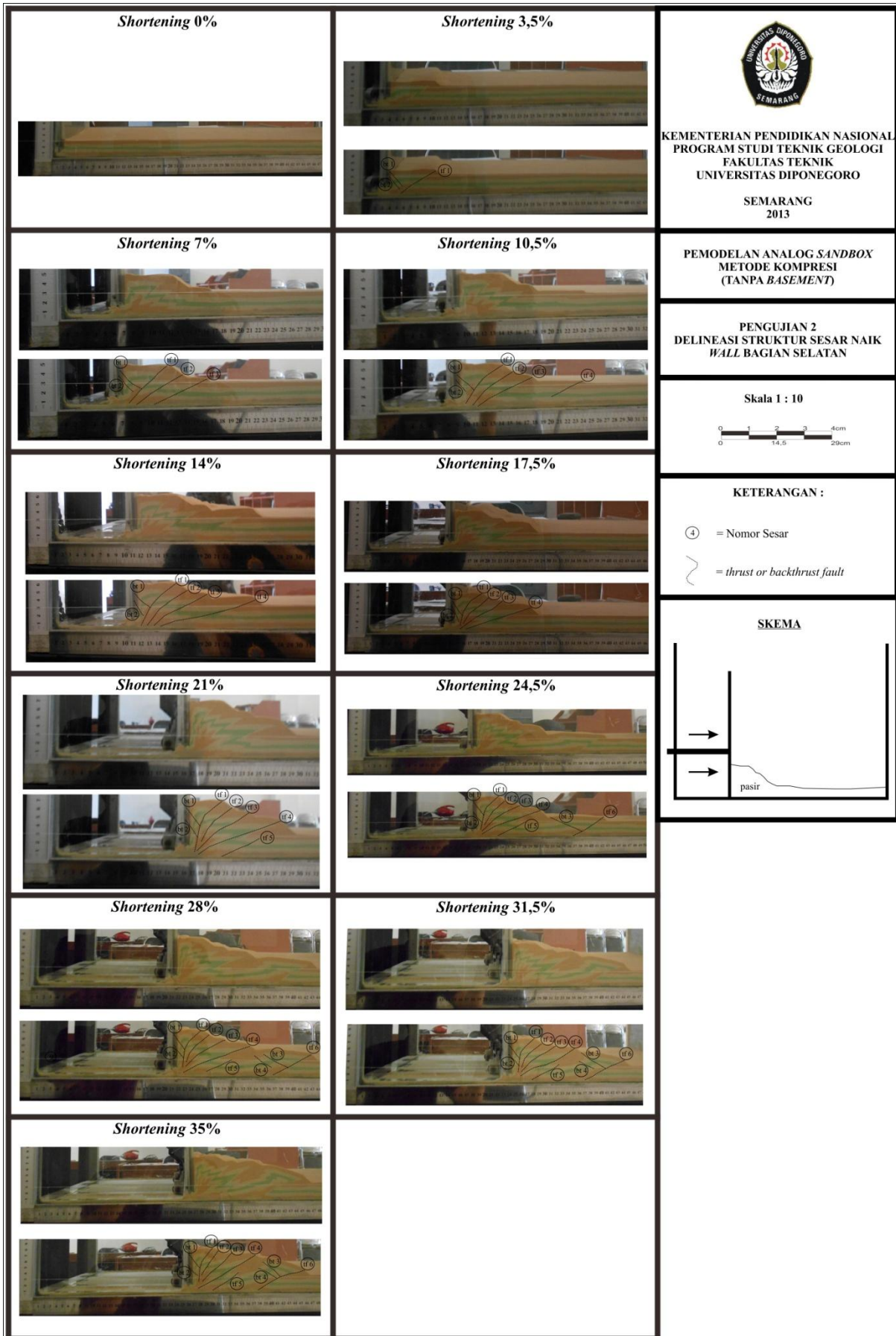
Lampiran 5. Kenampakan sesar (percobaan pertama) pada *wall* utara



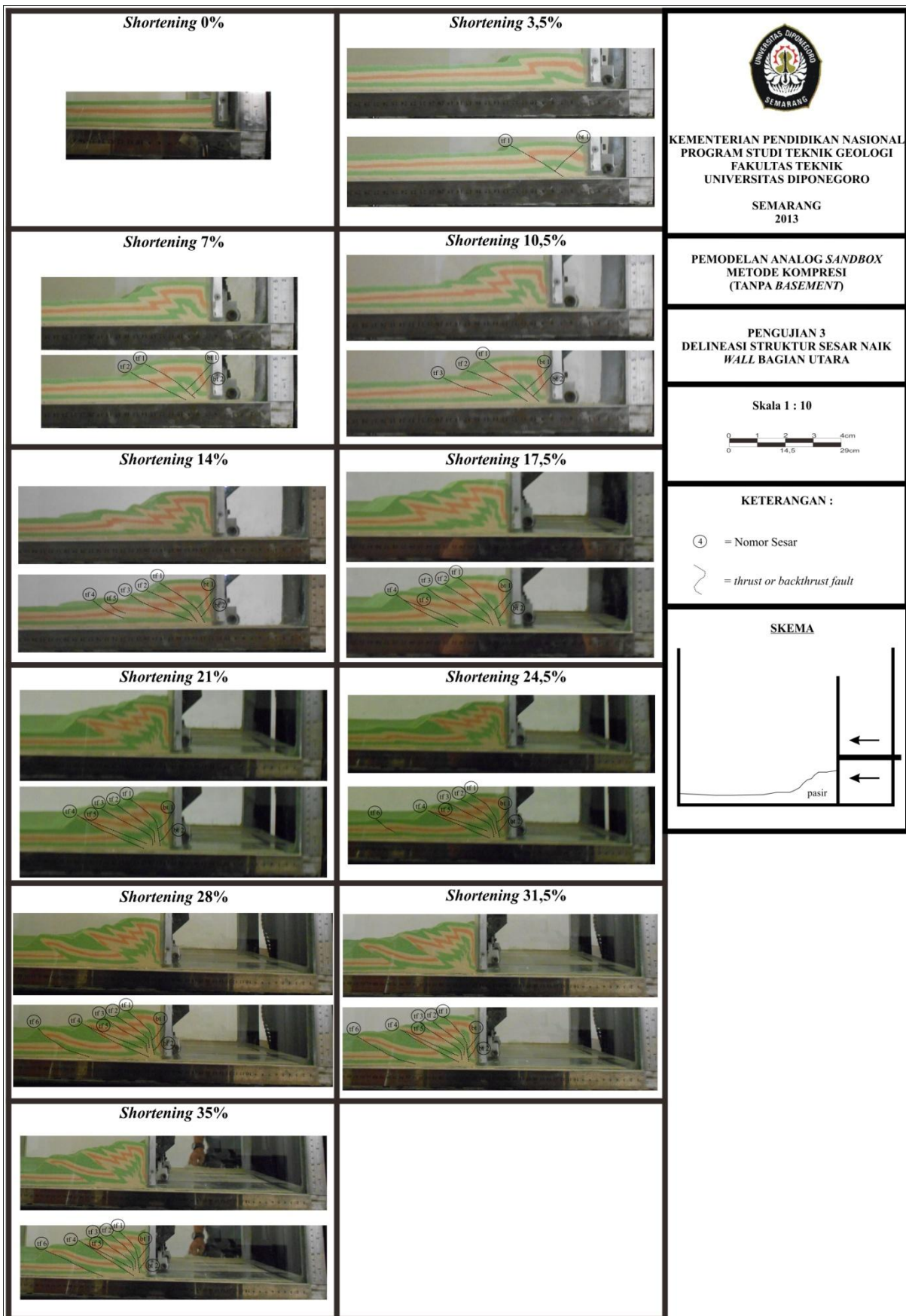
Lampiran 6. Kenampakan sesar (percobaan pertama) pada *wall* selatan



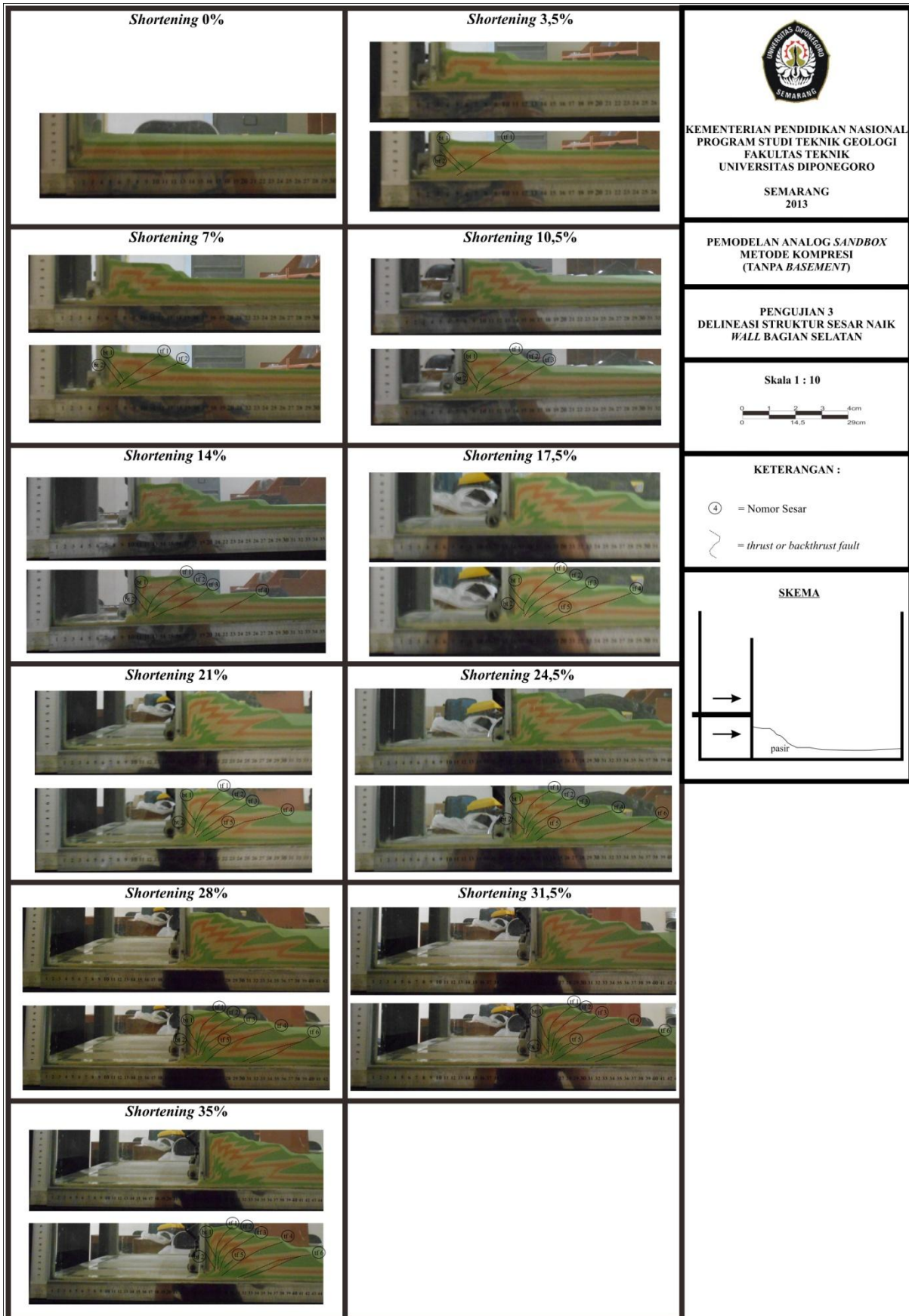
Lampiran 7. Kenampakan sesar (percobaan kedua) pada wall utara



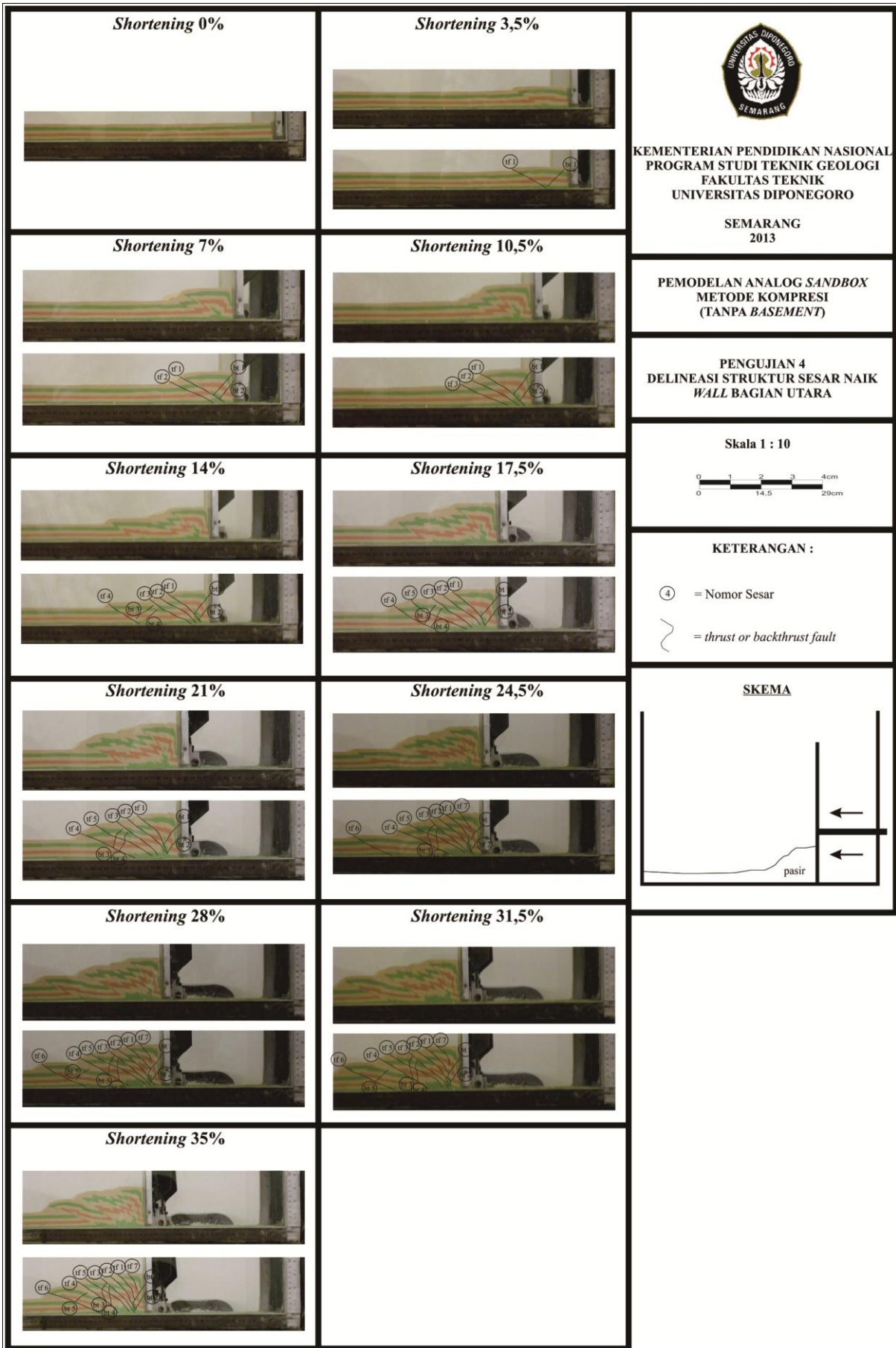
Lampiran 8. Kenampakan sesar (percobaan kedua) pada *wall* selatan



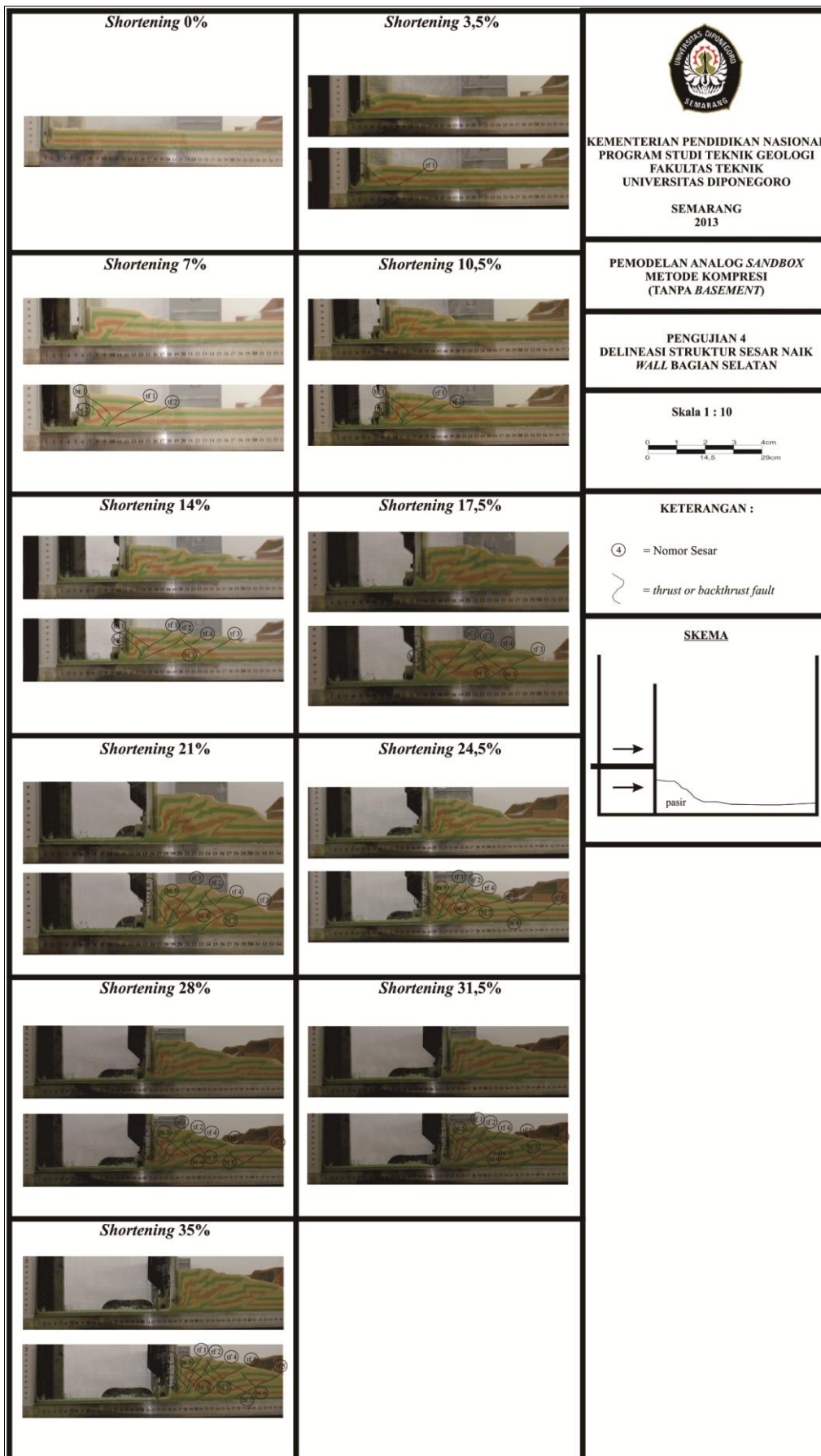
Lampiran 9. Kenampakan sesar (percobaan ketiga) pada *wall* utara



Lampiran 10. Kenampakan sesar (percobaan ketiga) pada *wall* selatan



Lampiran 11. Kenampakan sesar (percobaan keempat) pada *wall* utara



Lampiran 12. Kenampakan sesar (percobaan keempat) pada *wall* selatan