

Perubahan Struktur *Wet granular* Berbentuk Silinder Yang Dipanaskan

Zahrotul Firdaus Tri Wahyu Lestari^{a)}, Erlina^{b)}, Sparisoma Viridi^{c)}

Laboratorium Biofisika,
Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)} firdauszahrotul@gmail.com (corresponding author)

^{b)} rinaerlina106@gmail.com

^{c)} dudung@gmail.com

Abstrak

Meterial Granular merupakan kumpulan dari partikel makroskopik, seperti pasir atau butiran-butiran kaca yang dapat terlihat dengan mata secara langsung. Pengaruh adanya zat cair antar granular pada suatu material sangat mempengaruhi sifat dari material tersebut, sehingga material granular dapat dibagi menjadi dry granular dan wet granular. Salah satu perbedaan yang mencolok diantara keduanya adalah sudut yang dapat dicapai oleh masing-masing material. Wet granular material dengan sudut 90° dapat berubah menjadi dry granular dengan sudut kritis yang umumnya 35° jika dilakukan pengeringan. Pengeringan dilakukan dengan cara memanaskan sampel berupa wet granular dengan kadar air tertentu yang berbentuk silinder. Pemanasan dilakukan pada suhu stabil sehingga dapat teramati perubahan struktur dari wet granular menjadi dry granular dan sudut kritis yang dapat dicapai. Struktur yang terbentuk pada eksperimen menjadi dasar untuk pemodelan secara komputasi. Pemodelan dilakukan secara 2 dimensi dengan menyusun butiran menjadi persegi panjang dengan ketinggian tertentu. Liquid bridge pada granular dimodelkan dengan pegas, sehingga untuk setiap perubahan waktu 2 detik maka pegas akan menghilang, perubahan ini memodelkan proses penguapan pada wet granular yang dipanaskan. Hasil pemodelan menunjukkan bahwa struktur akhir dari sampel berupa piramida granular, struktur akhir sampel ini mirip dengan struktur pada struktur akhir sampel pada eksperimen yang berupa sandpile.

Kata Kunci: Dry granular, Pemanasan, Penurunan kadar air, Sand pile, Struktur, Sudut Kritis, Wet granular

PENDAHULUAN

Meterial Granular merupakan kumpulan dari partikel makroskopik, seperti pasir atau butiran-butiran kaca yang dapat terlihat dengan mata secara langsung. Studi mengenai granular memiliki sejarah yang panjang terutama untuk kebutuhan industri. Pengaruh adanya zat cair antar granular pada suatu material sangat mempengaruhi sifat dari material tersebut, sehingga material granular dapat dibagi menjadi *dry granular* dan *wet granular*. Salah satu perbedaan yang mencolok diantara keduanya adalah sudut yang dapat dicapai oleh masing-masing material. *Dry granular* umumnya hanya mencapai sudut 35°, sedangkan *wet granular* dapat mencapai 90° bahkan lebih. Salah satu material granular yang mudah didapatkan adalah pasir. Kadar air dalam pasir sangat mempengaruhi sifat pasir, seperti pada pembuatan istana pasir, apabila pasir dalam keadaan kering, pasir tidak bisa dibentuk sesuai keinginan, jika ditambahkan air dengan jumlah tertentu maka pasir akan mulai bisa dibentuk, namun jika penambahan air sudah berlebihan, pasir juga tidak dapat dibentuk.

Pada *wet granular* pengaruh adanya cairan antar granular sangat diperhitungkan. Efek yang ditimbulkan akibat adanya cairan ini adalah adanya kohesi antar granular, tetapi jika granular terlalu basah atau cairan yang

ada pada material tersebut terlalu banyak maka kohesi tersebut tidak lagi diperhitungkan. Kohesi pada *wet granular* muncul dari tegangan permukaan dan efek kapiler pada cairan. *Liquid bridge* yang terbentuk berupa meniskus antara udara dan cairan.

Dry granular dapat berubah menjadi *wet granular* jika diberikan penambahan zat cair, sebaliknya, *wet granular* dapat berubah menjadi *dry granular* jika dilakukan pengeringan. Perubahan jenis granular ini secara alami dapat terjadi pada pasir di pantai, namun pasir yang basah di pantai umumnya tidak membentuk sudut maksimal yang dapat dicapai oleh *wet granular*, sehingga proses perubahan struktur dari basah menjadi kering tidak teramati. Struktur yang dapat dibentuk oleh *dry granular* adalah berbentuk kerucut yang disebut *sand pile* atau gundukan pasir. *Sand pile* memiliki sudut maksimal yang dapat dicapai atau disebut sudut kritis berbeda untuk material yang berbeda.

Pengeringan secara alami dilakukan oleh sinar matahari, selain itu dapat dilakukan dengan pemanasan. Kadar air dalam *wet granular* akan berkurang selama pemanasan. Kekurangan dari pemanasan secara alami adalah waktu yang lama dan dapat terjadi perubahan suhu pemanasan secara tiba-tiba bergantung pada cuaca pada saat itu. Pemanasan dengan suhu yang stabil dapat menghasilkan pola pengurangan kadar air tertentu.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui perubahan struktur dari *wet granular* yang dipanaskan. Eksperimen dilakukan untuk mengetahui struktur yang terbentuk akibat dari pemanasan seiring dengan pertambahan waktu, serta sudut akhir dari longoran yang merupakan sudut kritis dari *sand pile*. Berdasarkan perubahan struktur sampel pada eksperimen, disusun pemodelan yang sesuai.

PERUBAHAN STRUKTUR WET GRANULAR YANG DIPANASKAN

Metode Eksperimen

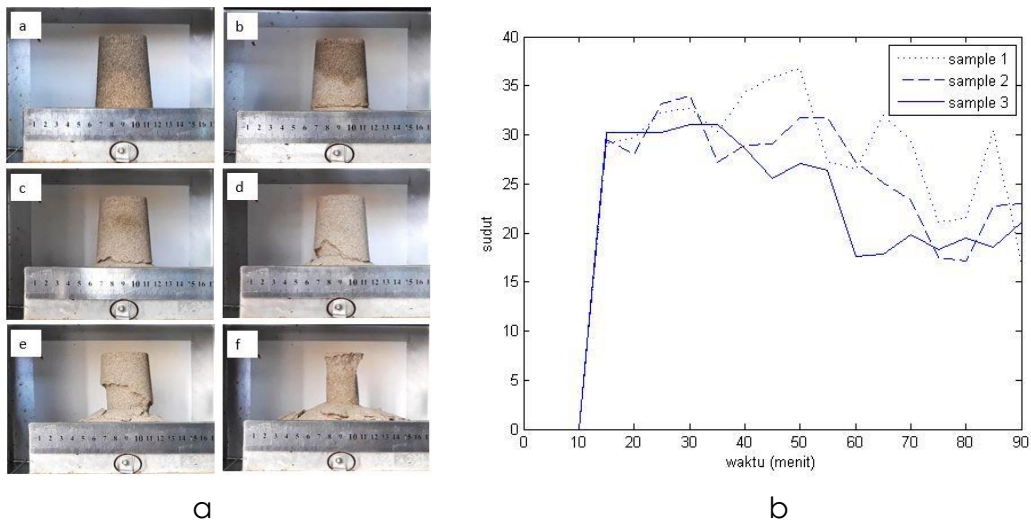
Bahan yang digunakan pada eksperimen adalah pasir yang diambil dari Pantai Pasir Putih Dalegan, Gresik, Jawa Timur. Pengambilan bahan dilakukan pada tanggal 7 Juni 2018. Pasir yang diambil adalah pasir yang dalam keadaan kering, sehingga untuk membuat sampel *wet granular* diperlukan penambahan air. Pembentukan silinder dilakukan dengan mencetak pasir pada wadah plastik silinder dengan volume 160ml yang diukur dengan gelas ukur kaca Fortuna 100ml. Pencampuran pasir dilakukan pada gelas kimia kaca Iwaki 250ml dan diaduk dengan spatula. Pengeringan dilakukan dalam oven listrik merk Cosmos tipe CO 958 dengan daya 395-795 Watt dan suhu maksimum 250°C. Suhu Pemanasan dalam oven dicek dengan menggunakan termometer air raksa dengan kapasitas suhu maksimum 300°C. Pengambilan data dilakukan dengan mengambil foto dari sampel dengan kamera *handphone* yang posisinya dijaga oleh tripod. Pada eksperimen, hal yang pertama dilakukan adalah persiapan alat dan bahan.

Oven dikondisikan dengan pada suhu 100°C dengan menggunakan termometer. Kemudian semua bahan yang berupa pasir diletakkan ke dalam loyang dan dipanaskan dalam oven dengan suhu 100°C selama 30 menit untuk menghilangkan air yang masih terkandung dalam pasir. Setelah dipanaskan, pasir didiamkan agar suhu pasir turun ke suhu normal. Tahap berikutnya adalah pencampuran 160ml pasir dengan 20ml air yang diukur dengan gelas ukur. Pencampuran ini dilakukan dalam gelas kimia 200ml dan diaduk dengan spatula hingga merata. Berikutnya adalah pencetakan sampel ke dalam wadah silinder, dan dicetak diatas permukaan datar dan siap untuk dipanaskan. Sampel yang dipanaskan sebanyak 3 sampel. Setiap sampel diberikan prosedur pembuatan yang sama. Variasi yang dilakukan pada eksperimen ini adalah variasi suhu pemanasan. Variasi pertama adalah variasi suhu pemanasan sebesar 100°C. Suhu tersebut didapatkan dengan pengondisian oven dengan termometer. Sampel dipanaskan dalam waktu 90 menit, dan diambil fotonya untuk setiap 5 menit dengan kamera *handphone*. Variasi berikutnya adalah pemanasan dengan suhu 150°C dan 200°C. Data yang didapat dari eksperimen tersebut adalah foto dari sampel setiap 5 menit sehingga diperoleh 19 data. Data tersebut kemudian diolah menggunakan software IC Measure untuk mendapatkan sudut kritis dari longoran yang terbentuk serta ketinggian longoran.

Perubahan Struktur Sampel

Wet granular berbentuk silinder mengalami perubahan struktur selama dipanaskan. Pemanasan dengan suhu yang berbeda menghasilkan struktur yang berbeda pada waktu yang sama. Visual dari perubahan struktur pada sampel 3 untuk pemanasan dengan suhu 100°C dapat dilihat pada Gambar 1a. Kondisi awal diasumsikan

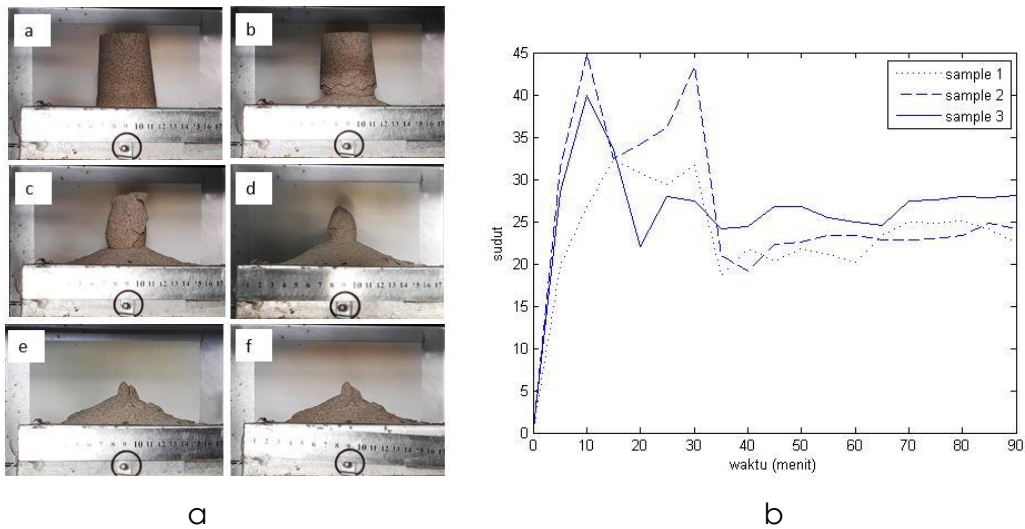
sudut yang terbentuk antara sampel dengan dasar adalah 90° . Setelah dipanaskan selama 20 menit, terlihat adanya perubahan warna pada sebagian sampel, hal tersebut karena air pada bagian terluar telah menguap, pada bagian dasar sampel sebelah kanan terjadi longoran, dan terdapat longoran sebelah kiri pada menit ke-40. Tinggi longoran bertambah pada menit ke-60, dan terlihat juga pengeringan pada sampel berlangsung pada lapisan dengan ketebalan tertentu, sehingga lapisan granular yang sudah kehilangan air sepenuhnya akan longsor dan membentuk sudut tertentu yang terlihat pada menit ke-80 dan 90. Struktur akhir yang terbentuk dapat dilihat pada menit ke-90. Struktur yang terbentuk masih terlihat adanya bentuk silinder yang masih dominan, hal ini menunjukkan masih terdapat air dalam sampel.



Gambar 1 a. Perubahan Struktur *Wet granular* yang Dipanaskan 100°C dengan Waktu (a) 0 menit, (b) 20 menit, (c) 40 menit, (d) 60 menit, (e) 80 menit, dan (f) 90 menit. b. Grafik Perubahan Sudut Longoran dari Pemanasan 100°C

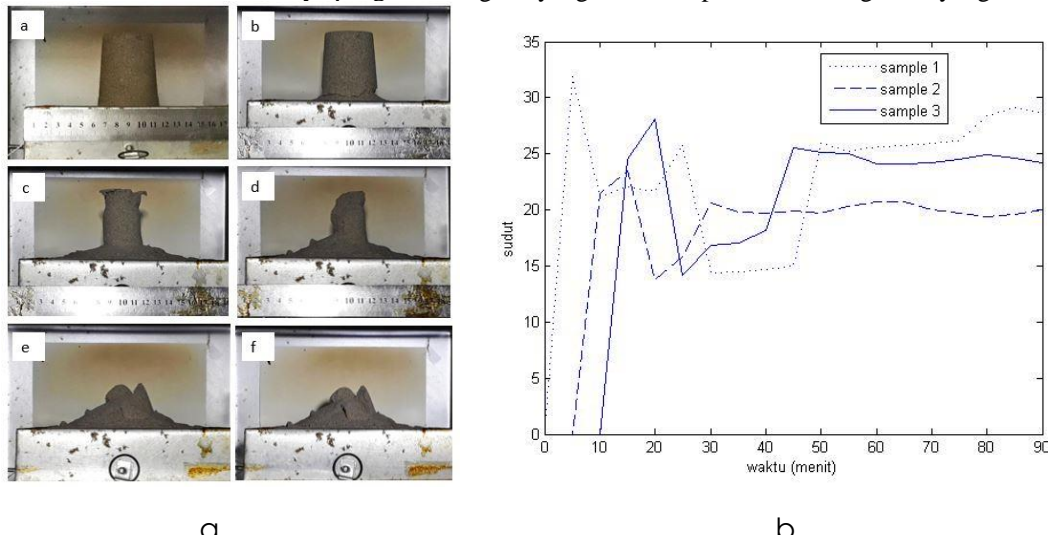
Sudut longoran sampel untuk setiap 5 menit pada masing-masing sampel dapat dilihat pada grafik pada Gambar 1b. Grafik menunjukkan sudut longoran yang terbentuk untuk setiap 5 menit. Sudut longoran pada semua sampel adalah 0° , karena masih belum ada longoran yang terbentuk. Sudut yang dimaksud adalah sudut antara permukaan longoran dengan sumbu horizontal. Sudut yang terbentuk setiap 5 menit menunjukkan pola yang tidak stabil, mengalami kenaikan dan penurunan, hal ini dikarenakan sampel masih belum mencapai sudut yang stabil karena masih ada granular yang masih memiliki kadar air dan menumpuk pada longoran yang sama, selain itu juga masih adanya struktur silinder yang dominan.

Visual dari perubahan struktur pada sampel dengan pemanasan 150°C dapat dilihat pada Gambar 2a. Struktur tersebut merupakan struktur dari sampel 3. Sampel membentuk longoran ketika menit ke-20. Panjang horizontal longoran bertambah pada menit ke-40 jika dibandingkan dengan sebelumnya, pada menit ini masih terdapat bentuk silinder yang dominan dan puncak dari struktur mulai berubah tidak lagi datar. Pada menit ke-60, struktur silinder mengalami penipisan dan puncak dari silinder tersebut membentuk sudut, hal ini menunjukkan adanya pengeringan tidak hanya di sisi yang mengelilingi silinder, bagian atas dari silinder juga mengalami pengeringan sehingga membentuk longoran juga. Pada menit ke-80 sama dengan menit ke-90 yaitu struktur silinder sudah tidak dominan. Struktur akhir berupa *sand pile*, dengan puncak berupa silinder dengan puncak tambahan kerucut yang tumpul, hal ini menunjukkan bahwa masih ada air yang membuat granular pada puncak *sand pile* masih bisa membentuk sudut 90° . Sedangkan grafik pengukuran sudutnya dapat dilihat pada Gambar 2b.



Gambar 2 a. Perubahan Struktur *Wet granular* yang Dipanaskan 150°C dengan Waktu (a) 0 menit, (b) 20 menit, (c) 40 menit, (d) 60 menit, (e) 80 menit, dan (f) 90 menit. b. Grafik Perubahan Sudut Longsor dari Pemanasan 150°C

Perubahan struktur dari sampel yang dipanaskan dengan suhu 200°C dapat dilihat pada Gambar 3a. Sampel yang ditampilkan adalah sampel 1 dengan pengambilan data kedua. Perubahan struktur terjadi lebih cepat dari pemanasan dengan suhu yang lebih rendah, karena air pada sampel lebih cepat menguap pada suhu yang lebih tinggi sehingga semakin cepat terbentuk longsor. Grafik perubahan sudut longsor sampel dengan pemanasan 200°C dapat dilihat pada Gambar 3b. Sudut longsor yang terbentuk mulai stabil pada menit ke-50. Selisih data dikarenakan adanya pengambilan garis yang mewakili permukaan longsor yang kurang pas.

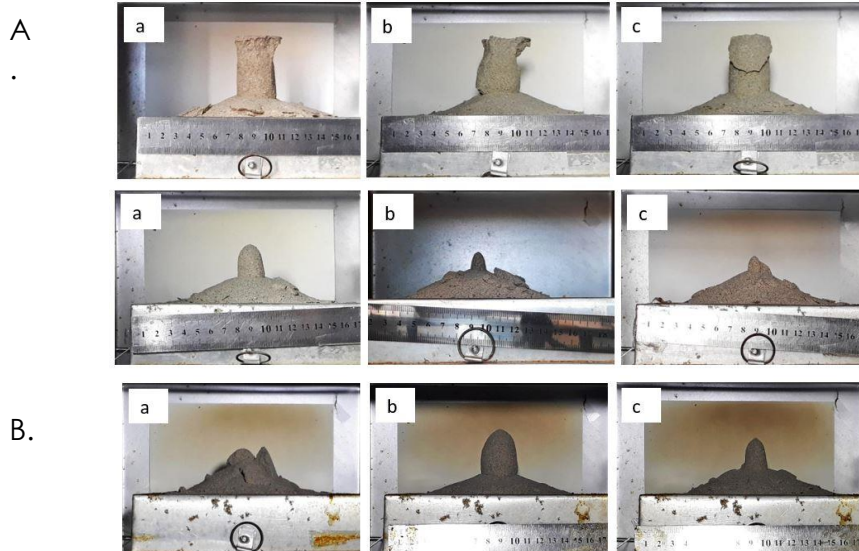


Gambar 3 a. Perubahan Struktur *Wet granular* yang Dipanaskan 200°C dengan Waktu (a) 0 menit, (b) 20 menit, (c) 40 menit, (d) 60 menit, (e) 80 menit, dan (f) 90 menit. b. Grafik Perubahan Sudut Longsor dari Pemanasan 200°C

Perbandingan Struktur akhir dari Pemanasan *Wet granular*

Struktur akhir dari sampel yang dipanaskan dengan suhu 100°C membentuk struktur yang cenderung sama untuk setiap sampel, yaitu masih terdapat struktur silinder yang dominan dengan permukaan atas silinder yang masih datar. Pemanasan sampel dengan suhu 150°C menghasilkan struktur akhir yang dapat dilihat pada

Gambar 4B. Struktur akhir yang terbentuk berbeda untuk masing-masing sampel. Sampel 1 masih berbentuk silinder dengan puncak yang tidak datar sama seperti sampel 2, sedangkan sampel lainnya sudah membentuk *sand pile*. Struktur akhir pemanasan sampel dengan suhu 200°C menghasilkan hasil akhir yang berbeda, hal ini bisa disebabkan karena pemberian air yang tidak merata pada sampel sehingga kadar air tiap lapisan pada sampel tidak sama, dapat dilihat pada Gambar 4C.



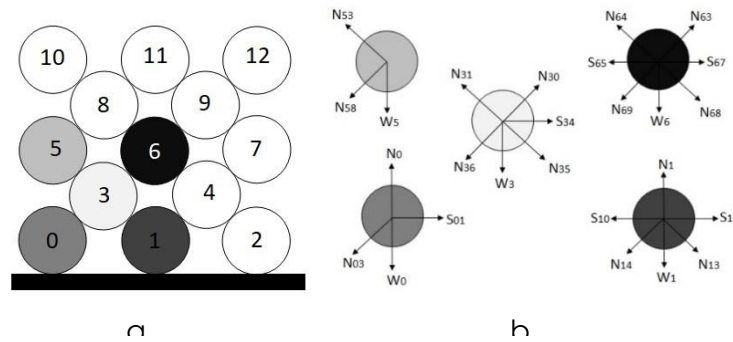
Gambar 4. A) Struktur Akhir dari *Wet granular* yang Dipanaskan 100°C. B) Struktur Akhir dari *Wet granular* yang Dipanaskan 150°C, C) Struktur Akhir dari *Wet granular* yang Dipanaskan 200°C

Sudut akhir sampel yang merupakan sudut akhir adalah sudut pada struktur akhir yang membentuk *sand pile*. Berdasarkan hasil yang didapatkan, sudut akhir sampel untuk pemanasan suhu 150°C dan 200°C merupakan sudut kritis dari sampel 100°C tidak dijadikan pertimbangan karena belum membentuk struktur akhir. Sudut akhir yang terbentuk bernilai 20° – 28° dengan rata-rata sebesar 24,57°.

PEMODELAN PERUBAHAN STRUKTUR WET GRANULAR DENGAN METODE MOLECULAR DYNAMIC

Struktur 3D dari *wet granular* yang dikeringkan dimodelkan sebagai model 2D, sehingga struktur silinder dimodelkan menjadi bentuk persegi panjang. Hasil eksperimen pengeringan pasir dijadikan sebagai acuan dalam pemodelan ini. Proses perubahan kandungan air dimulai dari struktur teratas. Granular teratas akan mengalami perubahan dari *wet granular* menjadi *dry granular* karena kehilangan air, sehingga perlahan akan merubah struktur yang mulanya memiliki sudut 90° menjadi *sand pile* dengan sudut kritis tertentu. Kadar air dalam setiap lapisan mengalami pengurangan untuk setiap waktu.

Model 2D tersusun dari sejumlah granular yang tersusun secara horizontal dengan ketinggian tertentu. Granular pada ketinggian yang sama disusun secara terpisah dengan jarak tertentu yang menggambarkan adanya *liquid bridge*. Pada lapisan berikutnya letak granular berada diatas *liquid bridge* lapisan dibawahnya, sehingga granular akan kontak dengan granular lain secara diagonal. Susunan granular tersebut dapat dilihat pada Gambar 5a.



Gambar 5. a) Susunan Granular Pemodelan. b) Diagram Gaya Granular Pemodelan

Setiap granular memiliki massa sehingga memiliki gaya berat. Granular yang berada di dasar mengalami kontak dengan alas sehingga mengakibatkan gaya normal yang berlawanan dengan gaya berat pada granular tersebut. Selain itu granular juga mengalami kontak dengan granular lain dan mengakibatkan adanya gaya normal. Konsekuensi adanya *liquid bridge* antar granular dimodelkan dengan pegas, sehingga antar granular tidak bisa lepas karena terikat oleh pegas. Diagram gaya pada granular dapat dilihat pada Gambar 5b. Granular dengan letak yang berbeda memiliki interaksi yang berbeda, sehingga gaya yang mempengaruhi juga berbeda.

Gaya berat pada granular disimbolkan dengan W yang dirumuskan dengan

$$W = m g - b v \tag{1}$$

dimana m merupakan massa granular dan g merupakan percepatan gravitasi. b merupakan konstanta redaman, konstanta ini secara fisis merupakan akibat dari adanya gesekan dengan udara. Pemberian redaman ini bertujuan untuk memperlambat kecepatan dari granular yang jatuh, sehingga ketika menumbuk granular yang terdapat didasar, tidak mengalami tumbukan yang mengakibatkan granular terpental berlawanan arah dengan arah datangnya tumbukan. Sedangkan v merupakan kecepatan dari butiran. Gaya normal butiran karena kontak dengan alas disimbolkan dengan N yang nilainya sama dengan gaya berat namun memiliki arah yang berlawanan. Gaya Normal akibat kontak dengan granular lain dideskripsikan sebagai

$$N = -k_n \xi - \gamma_n \dot{\xi} \tag{2}$$

dimana k_n merupakan konstanta interaksi, ξ dan $\dot{\xi}$ adalah faktor overlap, γ_n merupakan konstanta redaman. Overlap diperbolehkan selama interaksi antar bola. overlap antar granular dikontrol dengan faktor overlap, sebagai contoh

$$\xi = \max(0, R_1 + R_2 - |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|) \tag{3}$$

perubahan dari faktor overlap selama interaksi antar granular dapat dituliskan sebagai

$$\dot{\xi} = \frac{1}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} [(x_1 - x_2)(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) + (y_1 - y_2)(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) + (z_1 - z_2)(\dot{z}_1 - \dot{z}_2)] \tag{4}$$

Liquid bridge antar granular diasumsikan dengan gaya pegas karena gaya pegas mengikat antar dua butiran dan sifat dari *liquid bridge* yang mengikat dua butiran yang dikenainya. Gaya pegas dirumuskan sebagai berikut

$$S = -k_s(x - x_0) - b_s v \tag{5}$$

dengan k_s merupakan konstanta pegas dan x merupakan posisi dari granular dan x_0 merupakan panjang dari pegas yang nilainya sama dengan selisih jarak antar granular, b_s merupakan konstanta redaman, sedangkan v adalah kecepatan butiran.

Granular yang kehilangan pegas akan jatuh ke dasar, dan akan mengalami kontak dengan lantai dan mengalami gaya gesek dengan lantai yang dirumuskan sebagai

$$F_f = \mu N \tag{6}$$

dengan μ merupakan konstanta gesekan dan N adalah gaya normal karena interaksi dengan lantai.

Total gaya yang didapatkan digunakan untuk mendapatkan kecepatan dengan menggunakan Hukum II Newton

$$\sum \vec{F} = m a \tag{7}$$

$$\vec{a}_i(t) = \frac{1}{m} \sum \vec{F}_i(t) \tag{8}$$

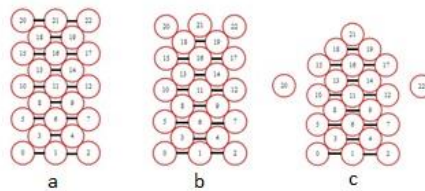
dengan m merupakan massa granular dan a adalah percepatan granular. Setelah didapatkan percepatan maka dengan menggunakan Metode Euler akan didapatkan kecepatan dan posisi yang baru

$$\vec{v}_i(t + \Delta t) = \vec{v}_i(t) + \vec{a}_i(t)\Delta t \tag{9}$$

$$\vec{r}_i(t + \Delta t) = \vec{r}_i(t) + \vec{v}_i(t)\Delta t \tag{10}$$

Jadi granular akan bergerak berdasarkan posisi yang baru.

Pada pemodelan ini hilangnya *liquid bridge* akibat penguapan air ditunjukkan dengan hilangnya konstanta pegas antar granular. Proses hilangnya pegas ini dimulai pada lapisan paling atas dan seterusnya untuk setiap perubahan 2 detik, dapat dilihat pada Gambar 6.

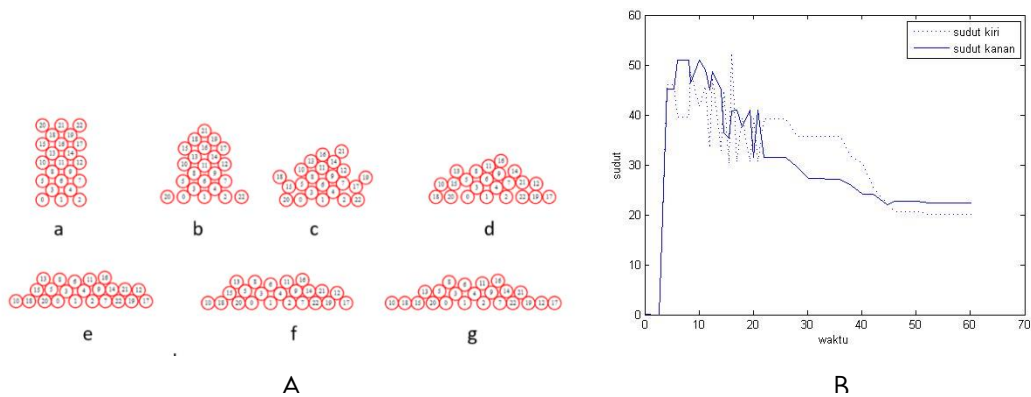


Gambar 6. Proses perubahan akibat hilangnya pegas seiring bertambahnya waktu, (a) keadaan awal (b) t bernilai 2 detik atau ketika pegasnya hilang dan (c) t bernilai 3 detik

Pegas digambarkan dengan garis hitam yang berada diantara granular, saat kondisi awal setiap granular dihubungkan dengan pegas, saat t bernilai 2 detik maka pegas pada lapisan teratas hilang, sehingga butiran paling atas tidak saling berikatan, akibatnya butiran tersebut akan jatuh karena efek dari gaya gravitasi, dan gaya normal akibat kontak antar butiran hanya bisa membuat butiran yang berada di tengah tetap pada posisinya. Proses hilangnya pegas ini mengakibatkan perubahan struktur pada sampel, terlihat bahwa lapisan paling atas membentuk struktur piramid, seperti pada eksperimen menghasilkan permukaan puncak yang tidak rata melainkan membentuk piramid.

Butiran yang jatuh ke alas, masih memiliki kecepatan dalam arah x akibat adanya interaksi dengan butiran sebelumnya dan gaya normal karena menumbuk lantai, sehingga butiran tersebut akan bergerak menjauhi sampel. Setiap perubahan 2 detik, lapisan teratas akan kehilangan pegas, sehingga butiran teratas akan terjatuh seiring bertambahnya waktu.

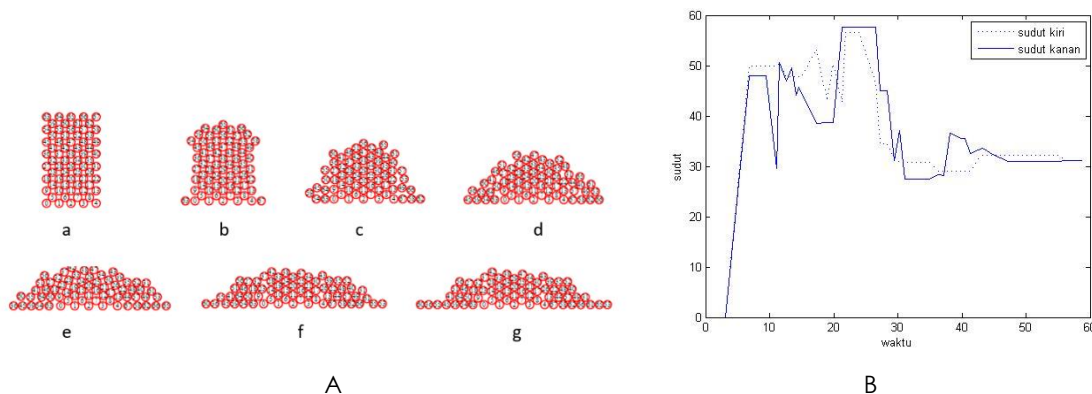
Pemodelan dilakukan dengan jumlah butiran yang berbeda, yaitu 23, 68, 137, dan 213. Pada jumlah butiran 23, perubahan struktur *wet granular* dapat dilihat pada Gambar 7A. Butiran mengalami perubahan struktur akibat hilangnya pegas yang mengikat antar butiran. Penghilangan pegas diawali dengan butiran paling atas, sehingga butiran tersebut jatuh ke dasar karena pengaruh beban dari butiran. Butiran yang jatuh tersebut memodelkan longsoran dari sampel. Pada pemodelan ini antar butiran terpisah dengan jarak tertentu sehingga tidak terdapat gaya gesek antar butiran. Ketika butiran jatuh ke lantai, butiran akan berinteraksi dengan lantai dan mengakibatkan adanya gaya gesek dengan lantai, sehingga butiran akan terhenti. Seiring bertambahnya waktu, pegas lapisan sampel akan kehilangan pegas sehingga butiran tidak lagi terikat dan jatuh ke dasar membentuk pola paling stabil. Perubahan sudut seiring pertambahan waktu dapat dilihat pada grafik dalam Gambar 7B.



Gambar 7.A) Proses perubahan struktur pemodelan *wet granular* 23 butiran pada (a) 0 detik (b) 4 detik (c) 10 detik (d) 14 detik (e) 20 detik (f) 30 detik (g) 60 detik. B) Grafik perubahan sudut sampel dengan 23 butiran seiring pertambahan waktu

Grafik berupa titik-titik menunjukkan perubahan sudut sebelah kiri sampel, sedangkan garis solid menunjukkan perubahan sudut pada sebelah kanan sampel. Sudut yang terbentuk cenderung mengalami penurunan, namun mengalami fluktuatif pada diantara 0 sampai 24 detik, hal ini karena ketika granular yang jatuh tersebut bertumpuk mula-mula granular tersebut membentuk sudut yang besar namun granular yang dibawah akan mengalami pergeseran apabila masih terdapat celah antar granular dalam ketinggian yang sama, sehingga granular yang awalnya menumpuk maka akan perlahan masuk ke dalam celah tersebut dan merubah sudut sampel yang terbentuk menjadi lebih kecil.

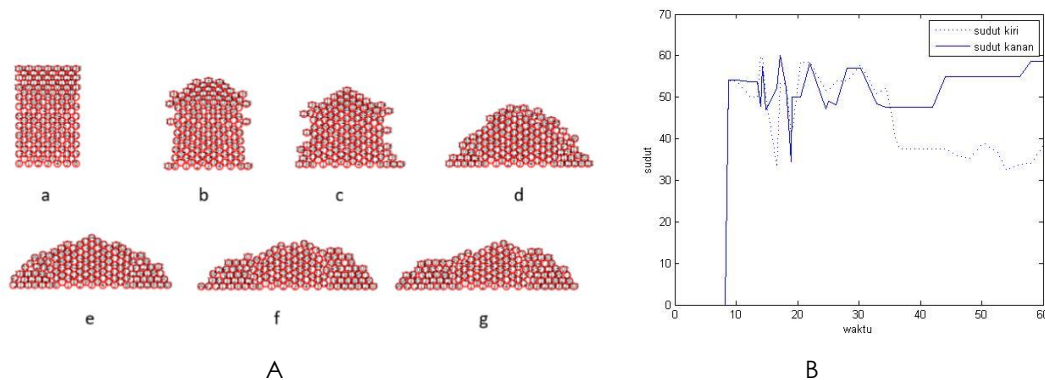
Pemodelan berikutnya dengan menambahkan jumlah granular menjadi 68. Perubahan struktur sampel dapat dilihat pada Gambar 8A. Sampel mengalami perubahan struktur berupa perubahan sudut dan perubahan tinggi. Perubahan sudut sampel dapat dilihat pada Gambar 8B. Butiran pada lapisan teratas yang kehilangan pegas akan jatuh ke dasar dan membuat tumpukan butiran sehingga meningkatkan sudut longoran. Seiring pertambahan waktu butiran yang bertumpuk tersebut bergerak menuju tepi sampel dan jatuh ke dasar, diikuti tumpukan butiran di atasnya sehingga terjadi perubahan sudut yang fluktuatif. Pada waktu 42 detik sampel sudah mengalami kestabilan sudut. Sampel masih mengalami pergerakan tetapi tidak signifikan sehingga tidak mempengaruhi sudut sampel.



Gambar 8.A) Proses perubahan struktur pemodelan *wet granular* 68 butiran pada (a) 0 detik (b) 6 detik (c) 14 detik (d) 19 detik (e) 27 detik (f) 40 detik (g) 60 detik. B) Grafik perubahan sudut sampel dengan 68 butiran seiring pertambahan waktu.

Jumlah butiran yang disimulasikan berikutnya adalah 137. Pola perubahan struktur sampel tidak jauh berbeda dengan pemodelan dengan butiran berjumlah 68. Perubahan struktur sampel dan sudut sampel dapat

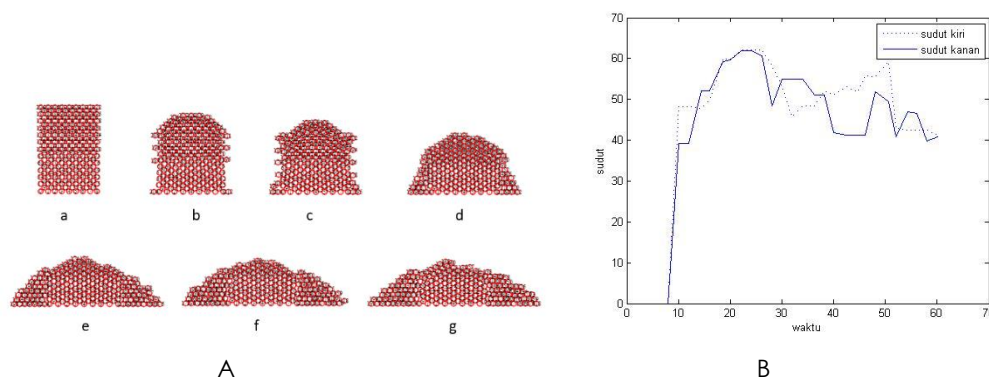
dilihat pada Gambar 9. Sampel mengalami penurunan sudut dan ketinggian, dan struktur akhir yang mirip dengan pada model dengan 68 butiran.



Gambar 9. A) Proses perubahan struktur pemodelan *wet granular* 137 butiran pada (a) 0 detik (b) 8 detik (c) 14 detik (d) 25 detik (e) 34 detik (f) 48 detik (g) 60 detik. B) Grafik perubahan sudut sampel dengan 137 butiran seiring pertambahan waktu.

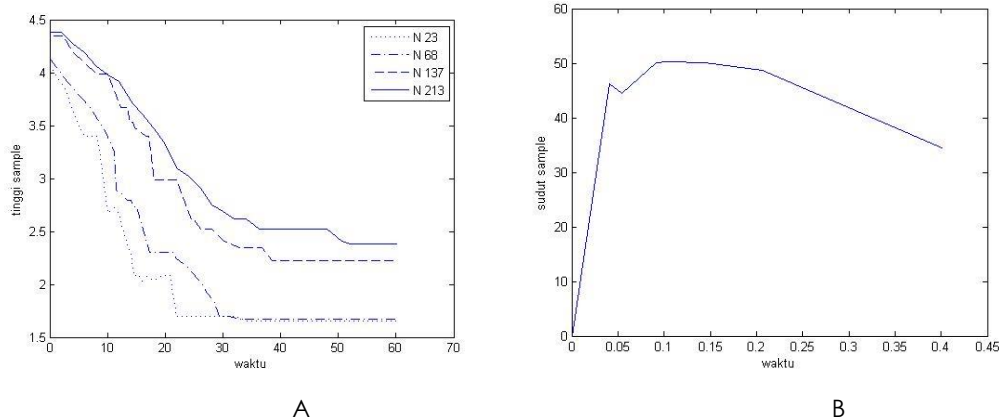
Model berikutnya adalah model dengan 213 butiran. Model ini mengalami perubahan struktur ketinggian dan sudut yang dapat dilihat pada Gambar 10. Sudut sampel cenderung mengalami penurunan, selain itu sampel mengalami pelebaran seiring bertambahnya waktu, semakin membentuk seperti piramid dengan sudut yang lebih kecil dari sebelumnya.

Perbandingan perubahan ketinggian pada model dapat dilihat pada Gambar 11A. Tinggi mula-mula sampel yaitu antara 4-4.5. kemudian mengalami penurunan ketinggian dan menuju kestabilan pada detik ke-30. Hal ini menunjukkan bahwa pada waktu tersebut, butiran-butiran yang berada pada center sampel sudah tidak mengalami pergerakan yang signifikan, sehingga tidak merubah tinggi sampel. Pada waktu tersebut masih terjadi perubahan struktur berupa pelebaran sampel, karena butiran yang bertumpuk bergerak ke arah tepi sampel sehingga masih terjadi perubahan sudut.



Gambar 10. A) Proses perubahan struktur pemodelan *wet granular* 213 butiran pada (a) 0 detik (b) 10 detik (c) 14 detik (d) 22 detik (e) 40 detik (f) 50 detik (g) 60 detik. B) Grafik perubahan sudut sampel dengan 213 butiran seiring pertambahan waktu.

Perbandingan sudut akhir yang dibentuk sampel dapat dilihat pada Gambar 11B. Sudut akhir ini merupakan sudut sampel yang dibentuk pada waktu 60 detik. Semakin banyak jumlah butiran dalam model semakin tinggi sudut akhir yang di capai sampel. Namun kenaikan tersebut tidak linier, jika dilihat pada grafik, kenaikan tersebut seolah menuju nilai kestabilan di sudut tertentu, sehingga jika jumlah butiran lebih dari jumlah tertentu maka sudut akhir sampel berada pada kisaran angka yang sama.



Gambar 11. A) Grafik perubahan ketinggian sampel seiring pertambahan waktu. B) Grafik perbandingan sudut akhir sampel terhadap jumlah butiran.

KESIMPULAN

Eksperimen pemanasan *wet granular* dilakukan dengan bahan pasir yang dipanaskan dengan suhu 100°C, 150°C, 200°C. Perubahan struktur tersebut terjadi secara berlapis-lapis, lapisan terluar sampel kehilangan air terlebih dahulu, karena sudah berubah menjadi *dry granular* yang tidak memiliki kohesi antar butiran, maka butiran-butiran pada lapisan tersebut jatuh kebawah dan membentuk longoran dengan sudut tertentu.

Sudut sampel yang diambil yaitu sampel dengan pemanasan suhu 150°C dan 200°C, karena pada suhu ini sampel sudah berubah menjadi struktur akhir berupa *sand pile*. Sudut akhir yang terbentuk bernilai 20°- 28° dengan rata-rata sebesar 24.57°, Sudut tersebut merupakan sudut kritis yang dapat dicapai pada sampel.

Pemodelan sampel dilakukan dengan butiran yang saling terikat dengan pegas sebagai model *liquid bridge* pada *wet granular*. Proses perubahan dari *wet granular* menjadi *dry granular* dimodelkan dengan hilangnya pegas yang mengikat antar butiran dan dimulai dari lapisan teratas, sehingga butiran jatuh ke dasar dan membentuk longoran yang merubah struktur sampel.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada berbagai pihak yang telah membantu dalam penulisan makalah ini.

REFERENSI

1. Mitarai N, Nori F.(2006). *Wet granular Material*. Advances in Physics, 55.
2. Hong D.C.(1993). *Stress Distribution of Hexagonally Packed Granular Pile*. Physical Review E, 47(1).
3. Grindlay J, Opie A.H. (1995). *Contact Force Distribution in a pile of Rigid Disks*. Physical Review E, 51(1).
4. Fauzi U, Viridi S, Ghaisani Q. *Two Dimension Numerical Modeling in Laboratory Experiment of Slope Change in Granular Piles Due to Water Content*. Bandung, 2010: Asian Physics Symposium, Institut Teknologi Bandung
5. Viridi S, Fauzi U, Adelia. *To Ddivide or not to Divide: Simulation of Two-Dimensional Stability of Three Grains using Molecular Dynamics*. Bandung, 2010: Asian Physics Symposium, Institut Teknologi Bandung.
6. Fauzi U, Viridi S, Nurhasan. *Molecular Dynamics Simulation on Particular grain Weighting in a Granular Pile: An Attempt to Induce an Articial micro Landslide*. Prosiding International Conference on Physics and its Application, 2012: American Institute of Physics.