

PENGARUH GRADASI DAN BENTUK BUTIRAN PASIR TERHADAP KUAT GESERNYA

Lambok Jadianan Simanjuntak¹⁾, Muhamad Yusa²⁾, Ferry Fatnanta²⁾

¹⁾Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

²⁾Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Riau

Kampus Bina Widya Jl. HR Soebrantas KM 12,5 Pekanbaru, Kode 28293

Email :lambok.jadianan@student.unri.ac.id

ABSTRACT

Gradation and grain shape of sand are some of the factors that influence the shear strength of sand. This needs to be considered, so that the effect can be maximized for construction related to sand. The purpose of this research is to find out how to analyze the shape of the sand grains and analyze the behavior of the angle of friction (ϕ) due to the influence of the grading and shape of the grains. The test is carried out by dividing the gradation, which consists of three variations with a relative density of 70%. Gradation 1 is dominated by medium granules as much as 100%, gradation 2 is dominated by coarse granules as much as 60%, and gradation 3 is dominated by fine granules as much as 40%. The shape of the sand grains is divided into two forms, namely the group of angular and rounded grains, which are distinguished based on the morphological parameters of the granules namely roundness (R), sphericity (S) and regularity (ρ). The morphological parameters of the granules are analyzed using imageJ. The results showed that the analysis of grains shape of sand using imageJ, obtained levels of grain shape from the two sands, namely sub-angular and sub-rounded. The effect of gradation on angle of friction (ϕ) is gradation dominated by coarse grains of 60%, namely gradation variation 2, and which has a long grain distribution, namely gradation variation 3 has a higher angle of friction (ϕ) compared to gradation variation 1. Comparison of the angle of friction (ϕ) between the grain shape of sand, that is sand with a sub-angular shape has a higher the angle of friction (ϕ) compared to sand with a sub-rounded shape.

Keywords: Sand, gradation, particle shape, imageJ, roundness (R), sphericity (S), regularity (ρ), angle of friction (ϕ).

A. PENDAHULUAN

Tanah merupakan material yang tidak bisa lepas dari dunia konstruksi, karena bangunan atau stabilitas galian dan timbunan yang dibangun diatas tanah, tergantung pada kuat geser tanah tersebut. Kuat geser adalah parameter penting yang diperlukan untuk analisis daya dukung tanah, yang mana kuat geser ini terdiri dari komponen yaitu, sudut geser (ϕ) dan kohesi (c).

Pasir adalah kelompok tanah non kohesif atau bersifat lepas dan mempunyai sifat-sifat teknis yang sangat baik, yang mana sifat teknis ini sangat dipengaruhi oleh parameter kuat geser pasir tersebut. Faktor-faktor yang mempengaruhi parameter kuat geser pasir adalah ukuran butiran, air yang terdapat di antara butiran, kekasaran permukaan butiran, kerapatan relatif

(D_r), angka pori (e), gradasi dan bentuk butiran.

Gradasi adalah salah satu dari banyak faktor yang berpengaruh terhadap kuat geser pasir. Gradasi merupakan gambaran dari distribusi butiran pasir, yang mana jika semakin panjang sebuah distribusi butiran, maka sudut geser (ϕ) pasir tersebut akan meningkat. Casagrande (dalam Hardiyatmo, 2002) mengatakan jika dua macam pasir mempunyai kerapatan relatif (D_r) yang sama, tetapi gradasinya berlainan, pasir yang bergradasi lebih baik (lebih panjang) akan mempunyai sudut geser (ϕ) yang lebih besar. Disisi lain, pengaruh dari banyaknya butiran kasar dalam sebuah gradasi, akan memberi peningkatan nilai sudut geser (ϕ) dari pasir tersebut. Seperti yang disimpulkan oleh Kara dkk (2013), Alias dkk (2014) dan Umam (2017) dalam penelitian mereka yang menganalisis tema yang sama, yaitu pengaruh gradasi terhadap perilaku sudut geser (ϕ) pasir. Dari hasil penelitian disimpulkan bahwa ukuran butiran pasir sangat mempengaruhi kuat geser tanah, yaitu semakin kasar ukuran butiran yang mendominasi di dalam sebuah gradasi, maka sudut geser (ϕ) tanah akan semakin besar dan sebaliknya, semakin halus ukuran butiran yang mendominasi, maka semakin kecil sudut geser (ϕ) yang dihasilkan.

Bentuk butiran pasir salah satu faktor yang mempengaruhi sudut geser (ϕ) pasir. Walaupun bukan faktor yang paling utama, akan tetapi bentuk butiran ini tidak bisa diabaikan, karena bentuk butiran yang cenderung bersudut dan cenderung bulat akan mempunyai pengaruh yang berbeda, yang mana pinggiran butiran pasir, yang cenderung bersudut, akan menghasilkan sudut geser (ϕ) yang lebih tinggi. Seperti yang

ditunjukkan dalam penelitian Sukumaran dan Ashmawy (2001) dan Cho dkk (2004) dalam penelitian mereka yang menganalisis tema yang sama, yaitu pengaruh bentuk butiran terhadap perilaku kuat geser pasir, memperoleh kesimpulan yang sama yaitu, butiran yang cenderung bersudut, mempunyai angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}) dan sudut geser (ϕ) yang tinggi, dibandingkan dengan butiran yang cenderung bulat.

B. TINJAUAN PUSTAKA

B.1. Pasir

Pasir merupakan tanah berbutir kasar yang terbentuk dari pelapukan batuan beku serta sedimen. Berdasarkan ukuran butiran, pasir mempunyai ukuran butiran sesuai standar AASHTO (*American Association of State Highway and Transportation Officials*) yaitu ukuran 2 mm sampai 0,075 mm. Sedangkan untuk standar USCS (*Unified Soil Classification System*), yaitu ukuran 4,75 mm sampai 0,075 mm. Berat jenis (*specific gravity*) (G_s) dari pasir berada pada rentang nilai 2,65-2,68.

Pasir mempunyai sifat-sifat teknis yang sangat baik. Sifat-sifat teknis yang dimiliki pasir adalah sebagai berikut:

1. Merupakan material yang baik untuk mendukung bangunan, badan jalan. tanah urug pada dinding penahan tanah.
2. Tanah yang baik untuk timbunan.
3. Dapat menjadi bahan tanggul, bendungan, jika dicampur dengan tanah kohesif.

B.2. Kerapatan Relatif

Kerapatan relatif (D_r) adalah gambaran kepadatan dari tanah granuler. Kerapatan relatif (D_r) sangat berpengaruh pada sifat teknis tanah

granuler seperti pasir, karena kuat geser dan kompresibilitasnya, tergantung dari kepadatan butiran (Hardiyatmo, 2002). Kerapatan relatif (D_r) umumnya dipakai untuk menunjukkan tingkat kepadatan tanah berbutir kasar di lapangan. Karena itu, dalam prakteknya digunakan beberapa macam penetrasi yang dihubungkan dengan nilai kerapatan relatifnya (D_r) yang dinyatakan dalam persen (%), seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kerapatan Relatif (D_r) Tanah Berbutir.

Kerapatan relatif (%)	Deposit tanah
0 – 15	sangat lepas
15 – 50	lepas
50 – 70	menengah
70 – 85	padat
85 – 100	sangat padat

Sumber: (Hardiyatmo, 2002)

Hubungan kerapatan relatif (D_r) dengan angka pori (e) dapat dinyatakan dalam Persamaan 1.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \quad (1)$$

Hubungan berat jenis (G_s), berat volume air (γ_w) dan angka pori (e) terhadap berat volume tanah kering (γ_d) dapat dinyatakan dalam Persamaan 2 berikut:

$$\gamma_d = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e} \quad (2)$$

Nilai kerapatan relatif (D_r) pasir digunakan untuk menyatakan hubungan antara berat volume kering minimum dan maksimum (γ_{dmin} dan γ_{dmax}) dengan angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}). Maka Persamaan 2 dapat dinyatakan dalam Persamaan 3 dan Persamaan 4 berikut:

$$\gamma_{dmin} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{max}} \quad (3)$$

$$\gamma_{dmax} = \frac{G_s \gamma_w}{1 + e_{min}} \quad (4)$$

B.3. Gradasi

Gradasi adalah analisis gambaran dari distribusi ukuran butiran sampel tanah yang diperoleh dari analisis mekanis. Analisis mekanis adalah penentuan variasi ukuran partikel-partikel yang ada pada tanah. Variasi tersebut dinyatakan dalam persentase dari berat kering total.

Ada tiga parameter dasar yang diperoleh dari kurva distribusi butiran. Parameter-parameter tersebut adalah ukuran efektif (*effective size*), koefisien keseragaman (*uniformity coefficient*) dan koefisien gradasi (*coefficient of gradation*). Koefisien keseragaman (C_u) menunjukkan suatu rentang ukuran butiran tanah.

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5)$$

Koefisien gradasi (C_c) digunakan sebagai suatu ukuran dari bentuk kurva distribusi ukuran butiran.

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}} \quad (6)$$

Dengan:

D_{10} : diameter butiran yang bersesuaian dengan 10% yang lebih halus.

D_{30} : diameter butiran yang bersesuaian dengan 30% yang lebih halus.

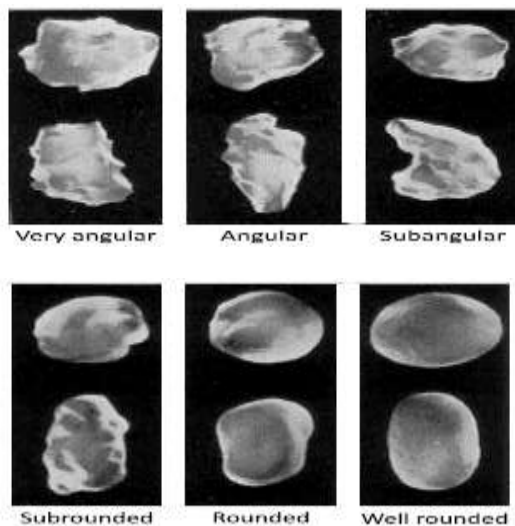
D_{60} : diameter butiran yang bersesuaian dengan 60% yang lebih halus.

Tanah granuler seperti pasir disebut bergradasi baik (*well graded*) jika $1 < C_c < 3$ dengan $C_u > 6$ dan bila persyaratan C_c telah terpenuhi. Jika hanya memenuhi salah satu nilai dari C_c dan C_u maka ukuran butiran semakin

sama atau dikategorikan bergradasi buruk (*poorly graded*), dan gradasi selang (*gap graded*) yaitu sebaran ukuran butiran tidak ada pada salah satu atau dua nomor saringan.

B.4. Morfologi Butiran Pasir

Morfologi butiran merupakan karakteristik dari kenampakan luar dari suatu butiran partikel. Powers (dalam Hryciw dkk, 2016) membagi bentuk butir sedimen pasir berdasarkan kebundaran atau keruncingan menjadi enam tingkatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

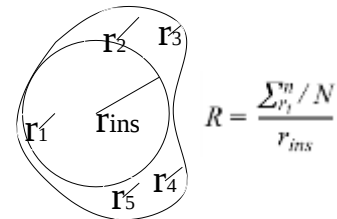


Gambar 1. Morfologi Butiran Pasir.
Sumber: Powers (dalam Hryciw dkk, 2016)

Membedakan bentuk butiran pasir ada parameter penting yang bisa digunakan sebagai acuan, yaitu *roundness* (*R*), *sphericity* (*S*) dan *regularity* (*ρ*).

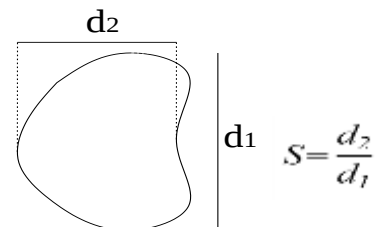
Roundness (*R*) adalah ketajaman pinggir dan sudut suatu material sedimen klastik. Wadell (dalam Hryciw dkk, 2016) menyatakan bahwa pengukuran *roundness* (*R*) suatu butiran dilakukan dengan cara mengukur jari-jari kelengkungan masing-masing sudut butiran (r_i), kemudian jari-jari

kelengkungan butiran tersebut, dibandingkan dengan jari-jari lingkaran maksimum yang dapat dimasukkan ke dalam butiran tersebut (r_{ins}).



Gambar 2. *Roundness* (*R*).

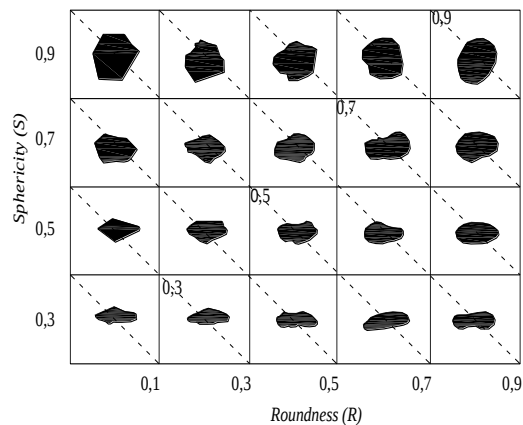
Sphericity (*S*) adalah parameter yang digunakan untuk mendefinisikan bentuk butiran berdasarkan volume butiran, yaitu perbandingan ukuran dari panjang, lebar dan tinggi butiran saling mendekati. Krumbein dan Sloss (dalam Hryciw dkk, 2016) mengasumsikan bahwa *sphericity* (*S*) adalah perbandingan antara lebar partikel (*particle width*) (d_2) dengan panjang partikel (*particle length*) (d_1).



Gambar 3. *Sphericity* (*S*).

Krumbein dan Sloss (dalam Hryciw dkk, 2016), membuat grafik gabungan antara nilai *roundness* (*R*) dan *sphericity* (*S*) yang ditampilkan dalam 20 estimasi bentuk partikel butiran, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Dari grafik tersebut, terlihat bahwa semakin rendah nilai *roundness* (*R*), maka pinggiran dari butiran akan lebih cenderung meruncing atau menyudut. Sebaliknya, semakin tinggi nilai *roundness* (*R*), maka pinggiran dari butiran akan cenderung membulat.

atau membulat. Semakin rendah nilai *sphericity* (*S*), maka butiran akan mempunyai bentuk cenderung lonjong. Sebaliknya, semakin tinggi nilai *sphericity* (*S*), maka butiran akan mempunyai bentuk cenderung seperti bola.



Gambar 4. Estimasi Bentuk Butiran.

Sumber: Krumbein dan Sloss (dalam Hryciw dkk, 2016)

Garis diagonal pada grafik, merupakan nilai rata-rata dari penjumlahan *roundness* (*R*) dan *sphericity* (*S*) yang disebut dengan *regularity* (ρ). Berdasarkan nilai *regularity* (ρ), Rees (2010) membagi tingkatan bentuk butiran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai *Regularity* (ρ) Berbagai Tingkatan Bentuk Butiran.

<i>Regularity</i> (ρ)	Bentuk butiran
<0,4	<i>Angular</i>
0,4-0,65	<i>Sub-angular</i>
0,65-0,75	<i>Sub-rounded</i>
>0,75	<i>Rounded</i>

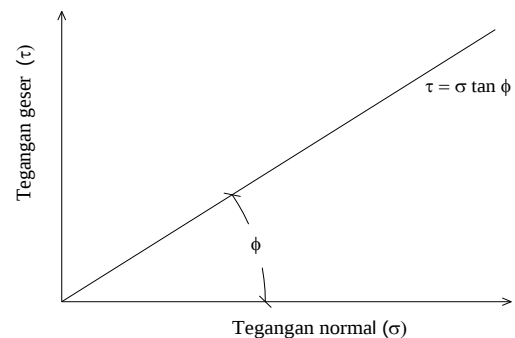
Sumber: (Rees, 2010)

B.5. Kuat Geser Pasir

Kekuatan geser suatu massa tanah merupakan perlawanan internal tanah tersebut per satuan luas terhadap keruntuhan atau pergeseran sepanjang bidang geser dalam tanah yang

dimaksud (Das, 1995). Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan atau tarikan (Hardiyatmo, 2002).

Tanah granuler seperti pasir, mempunyai tahanan geser berupa gesekan yang berasal dari butiran yang dikenal dengan istilah sudut geser internal (ϕ).



Gambar 5. Kuat Geser Tanah Granuler.

Sudut geser internal (ϕ) merupakan gradien dari hubungan tahanan geser sebagai fungsi dari tegangan normal (σ). Jika tegangan normal besar (σ), maka tegangan geser (τ) juga besar, seperti yang terlihat pada Gambar 5.

Persamaan garis dalam hubungan tersebut adalah:

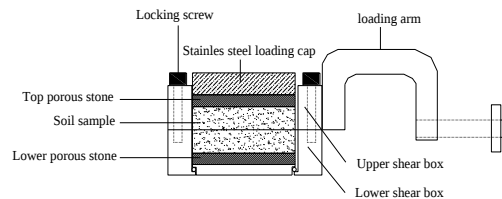
$$\tau = \sigma \tan \phi \quad (7)$$

Sehingga besar sudut geser adalah:

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\tau}{\sigma} \right) \quad (8)$$

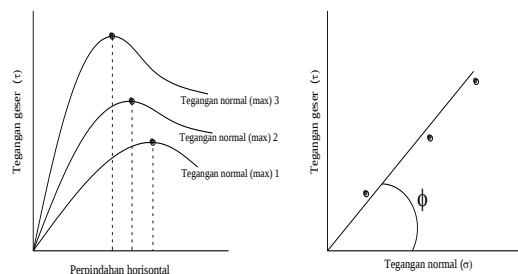
Tegangan normal (σ) adalah tegangan yang bekerja tegak lurus pada bidang gesernya. Jika tegangan normal (σ) bernilai nol, maka tegangan geser (τ) juga bernilai nol. Pasir dengan kondisi basah, kemungkinan mempunyai kohesi (*c*) yang lemah atau biasa disebut sebagai kohesi (*c*) semu. Namun kohesi (*c*) tersebut tidak boleh diperhitungkan sebagai bagian dari kuat geser.

Pengujian kuat geser untuk pasir, biasanya dilakukan dengan pengujian geser langsung. Bentuk susunan alat pengujian geser langsung ini, dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Alat Uji Geser Langsung.

Uji geser langsung biasanya dilakukan beberapa kali pada sebuah sampel tanah dengan bermacam-macam tegangan normal. Harga tegangan normal (σ) dan tegangan geser (τ) diperoleh dengan melakukan beberapa kali pengujian dan dapat digambarkan pada sebuah grafik dan selanjutnya dapat ditentukan harga-harga parameter kekutan geser, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.

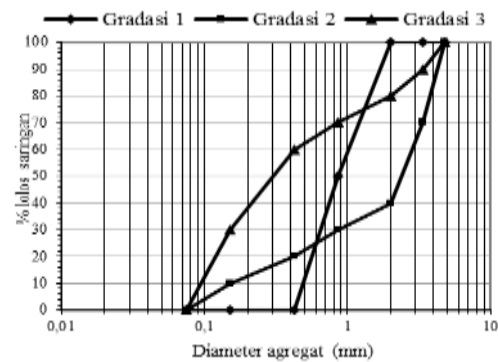


Gambar 7. Grafik Uji Geser Langsung.

C. METODOLOGI PENELITIAN

C.1. Gradasi Rencana

Gradasi yang direncanakan di antara lolos saringan No.4 dan tertahan No.6, No.10, No.20, No.40, No.100 dan No.200. Jenis gradasi yang digunakan adalah gradasi buruk, yang dibagi atas 3 variasi gradasi yang dibedakan berdasarkan persentase fraksi butiran kasar, sedang dan halus, seperti yang terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Gradasi Rencana.

Gradasi 1 (G1) didominasi oleh pasir fraksi butiran sedang sebesar 100% dengan nilai C_u dan C_c sebesar 2,041 dan 0,836. Gradasi 2 (G2) didominasi oleh pasir fraksi butiran kasar sebesar 60% fraksi butiran sedang sebanyak 20% dan fraksi butiran halus sebanyak 20%. dengan nilai C_u dan C_c sebesar 18,667 dan 13,487. Gradasi 3 (G3) didominasi oleh pasir fraksi butiran halus sebesar 60% fraksi butiran kasar sebanyak 20% dan fraksi butiran sedang sebanyak 20%. dengan nilai C_u dan C_c sebesar 4,474 dan 0,101. Pembagian persentase fraksi setiap variasi gradasi, dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3. Persentase Tertahan Setiap Saringan.

No	G1 % tertahan	G2 % tertahan	G3 % tertahan
4	0%	0%	0
6	0%	30%	10%
10	0%	30%	10%
20	50%	10%	10%
40	50%	10%	10%
100	0%	10%	30%
200	0%	10%	30%

C.2. Analisis Bentuk Butiran

Analisis bentuk butiran bertujuan untuk memperoleh parameter morfologi bentuk butiran, yaitu *roundness* (R), *sphericity* (S) yang dianalisis dengan

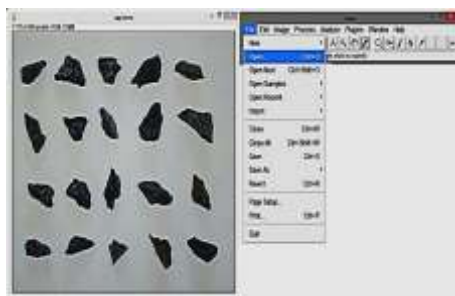
menggunakan *ImageJ*. Analisis ini juga digunakan untuk memastikan bahwa morfologi butiran pasir dari kedua pasir memang berbeda. Jumlah sampel butiran yang digunakan untuk mewakili setiap kelompok pasir yaitu sebanyak 200 butiran yang tertahan di saringan No.6 dan No.10. Proses pengambilan butiran dilakukan secara acak dari kedua saringan, yaitu 100 butiran dari saringan No.6 dan 100 butiran dari saringan No.10. Pengambilan foto butiran menggunakan kamera telepon pintar yang mana dalam setiap frame terdapat 20 butiran, seperti yang terlihat pada Gambar 9.



Gambar 9. Contoh Foto Butiran.

Langkah-langkah cara menganalisis morfologi bentuk butiran adalah sebagai berikut:

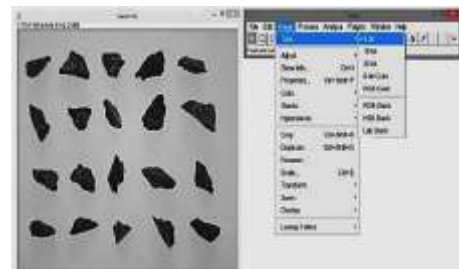
1. Membuka aplikasi *ImageJ*, lalu memilih *menu file*, klik *open*, lalu memilih *file* foto butiran, seperti yang terlihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Tampilan Butiran di Kotak Dialog *ImageJ*.

2. Memilih *menu image*, kemudian memilih *sub menu type*, lalu

memilih *8 bit*, seperti yang terlihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Foto Butiran Diubah Menjadi Tipe *8 bit*.

3. Memilih *menu process*, memilih *sub menu binary*, lalu memilih *make binary*, seperti yang terlihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Tampilan Butiran Dengan Format *Binary*.

4. Memilih *menu plugins*, kemudian pada kotak dialog *plugins*, memilih *particles8*, kemudian memilih kotak *white particle (255) on black (0) background* dan *morphology parameters*, kemudian memilih *Ok*, seperti yang terlihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Kotak Dialog *Particles8*.

- Mengolah data yang diperoleh dari *ImageJ* dengan perangkat lunak pengolah angka (*excel*). Kemudian dari data tersebut, ditentukan kategori tingkatan bentuk dari pasir yang dianalisis, berdasarkan grafik estimasi dari bentuk butiran menurut krumbein dan sloss, serta parameter *regularity* (ρ). Contoh data analisis *ImageJ* dapat dilihat pada Gambar 14.

Gambar 14. Data Morfologi Butiran Dari Analisis *ImageJ*.

C.3. Variasi Sampel

Penamaan sampel dibuat setelah proses perencanaan gradasi dan analisis butiran telah selesai dilaksanakan. Hal ini sengaja dilakukan, supaya penamaan sampel mengacu pada inisial tingkatan bentuk butiran dan variasi gradasi. Rencana variasi sampel terdiri dari 3 variasi gradasi yang mempunyai kerapatan relatif sebesar 70% (kondisi padat) yang dikombinasikan dengan bentuk butiran pasir, yaitu bentuk butiran *sub-angular* (SA) dan *sub-rounded* (SR) seperti yang terlihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Penamaan Sampel

Bentuk pasir	Gradasi (G)	Penamaan sampel
SA	G1	SA-G1
	G2	SA-G2
	G3	SA-G3
SR	G1	SR-G1
	G2	SR-G2
	G3	SR-G3

Pengujian sampel dilakukan sebanyak dua kali, maka penamaan

sampel akan ditambah angka 1 dan 2 dibelakang nama sampel.

C.4. Pengujian Berat Jenis

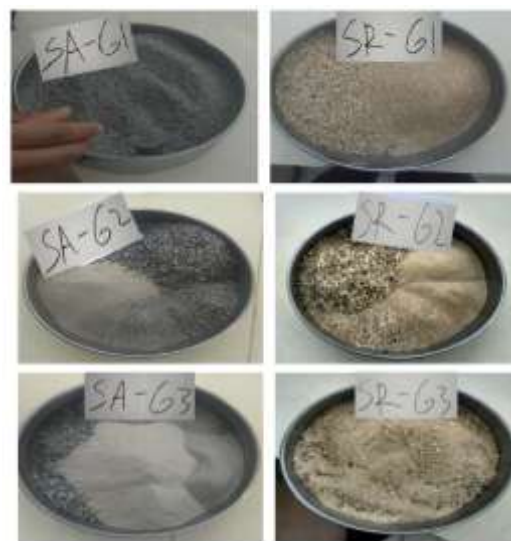
Pengujian berat jenis dilakukan untuk mengetahui berat jenis dari pasir dengan mengacu pada standar ASTM D 854, seperti yang terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15. Pengujian Berat Jenis.

C.5. Pengujian kerapatan Relatif

Pengujian kerapatan relatif (D_r) bertujuan untuk mendapatkan berat volume kering minimum dan maksimum (γ_{dmin} dan γ_{dmax}). Prosedur pengujian mengacu pada standar dari jepang, yaitu standar JGS0161:2009. Sampel yang digunakan adalah sampel yang sudah diatur gradasinya sesuai gradasi rencana, seperti yang terlihat pada Gambar 16, dan proses pengujian dapat dilihat pada Gambar 17.



Gambar 16. Sampel Pengujian.



Gambar 17. Pengujian Kerapatan relatif.

C.6. Menghitung Angka Pori (e) dan Berat Volume Kering (γ_d)

Menghitung angka pori (e) dan berat volume kering (γ_d), bertujuan untuk mengetahui angka pori dan berat volume kering pada kondisi kerapatan relatif sebesar 70%. Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Menghitung angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}) berdasarkan nilai berat jenis (G_s) dan berat volume kering minimum dan maksimum (γ_{dmin} dan γ_{dmax}) yang diperoleh dari pengujian kerapatan relatif.
2. Menghitung angka pori (e) pada kondisi kerapatan relatif (D_r) 70%.
3. Menghitung berat volume kering (γ_d) pada kondisi kerapatan relatif (D_r) 70%, berdasarkan hubungan nilai berat jenis (G_s) dan angka pori (e) pada kondisi kerapatan relatif (D_r) 70%.

C.7. Menghitung Berat Sampel

Menghitung berat sampel bertujuan untuk mengetahui berat sampel yang dibutuhkan untuk mengisi ring *direct shear*. Selain itu, perhitungan ini juga bertujuan untuk mengetahui berat sampel tertahan pada setiap saringan, supaya gradasi yang direncanakan tetap sama dengan sampel yang dimasukkan ke dalam ring *direct shear*.

Langkah-langkah perhitungannya adalah sebagai berikut:

1. Menghitung volume ring *direct shear*.

2. Menghitung berat sampel yang dibutuhkan untuk mengisi ring *direct shear*, dengan cara mengalikan berat volume (γ_d) pada kondisi kerapatan relatif (D_r) 70%, dengan volume ring *direct shear*.
3. Menghitung berat tertahan pada setiap saringan, yaitu dengan cara mengalikan berat sampel yang dibutuhkan untuk mengisi ring *direct shear*, dengan persentase berat tertahan pada setiap saringan.
4. Menimbang berat tiap sampel, sesuai proporsi berat yang tertahan pada setiap nomor saringan dan menyatukannya dalam wadah yang sama.

C.8. Pengujian Geser Langsung

Pengujian geser langsung (*direct shear test*) mengacu pada standar ASTM D 3080. Tujuan dari pengujian ini adalah untuk mendapatkan parameter kuat geser tanah yaitu sudut geser (ϕ). Metode pengujian geser yang dilakukan adalah metode regangan terkendali (*strain controlled*), yaitu kecepatan pergeseran yang diatur sedemikian rupa. Pengujian dilakukan sebanyak 2 kali untuk semua sampel, dan parameter kuat geser yang diperoleh dari pengujian akan dirata-ratakan. Proses pengujian geser langsung, dapat dilihat pada Gambar 18.



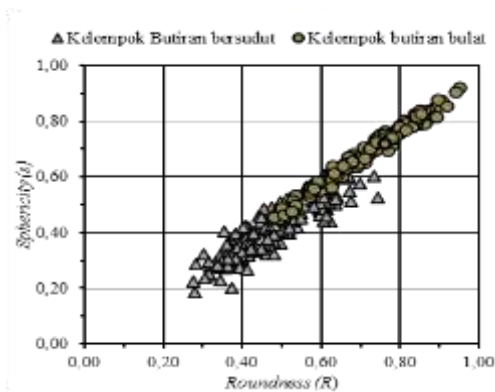
Gambar 18. Pengujian Geser Langsung.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

D.1. Hasil Analisis Bentuk Butiran

Hasil dari analisis parameter bentuk butiran yang berjumlah 200

butiran dari setiap kelompok pasir, yaitu nilai parameter *roundness* (R) dan *sphericity* (S) yang diperoleh dari *ImageJ*, diplot ke dalam grafik estimasi bentuk butirannya seperti yang terlihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Distribusi Estimasi Bentuk Butiran.

Berdasarkan Gambar 19, terlihat bahwa distribusi dari estimasi bentuk butiran kelompok pasir butiran bersudut, lebih condong ke arah nilai *roundness* (R) dan *sphericity* (S) yang rendah, yang artinya estimasi bentuk butiran pasir tersebut, cenderung mempunyai bentuk butiran yang lonjong dengan pinggiran tajam atau menyudut. Sebaliknya, distribusi dari estimasi bentuk butiran kelompok pasir butiran bulat, lebih condong ke arah nilai *roundness* (R) dan *sphericity* (S) yang tinggi, yang artinya estimasi bentuk butiran pasir tersebut, cenderung mempunyai bentuk butiran seperti bola dengan pinggiran yang melengkung.

Kelompok pasir butiran bersudut, mempunyai nilai rata-rata *roundness* (R) dan *sphericity* (S), yaitu sebesar 0,47 dan 0,41. Dari nilai tersebut, diperoleh nilai *regularity* (ρ) sebesar 0,44. Kelompok pasir butiran bulat, mempunyai nilai rata-rata *roundness* (R) dan *sphericity* (S), yaitu sebesar 0,66 dan 0,72. Dari nilai tersebut, diperoleh nilai *regularity* (ρ) sebesar

0,69. Berdasarkan nilai parameter *regularity* (ρ) dari kedua pasir, maka tingkatan bentuk butiran dari kelompok pasir butiran bersudut adalah *sub-angular*, dan kelompok pasir butiran bulat adalah *sub-rounded*.

D.2. Hasil Pengujian Berat Jenis

Hasil pengujian berat jenis (G_s) dari kedua pasir dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil Pengujian Berat Jenis.

Bentuk Pasir	G_s
SA	2,657
SR	2,655

Dari pengujian, diperoleh nilai berat jenis (G_s) dari pasir bentuk *sub-angular* lebih tinggi, yaitu sebesar 2,657 dibandingkan dengan pasir bentuk *sub-rounded* sebesar 2,655. Berdasarkan rentang nilai berat jenis (G_s) untuk pasir, yaitu 2,65 - 2,68, maka nilai berat jenis (G_s) dari kedua pasir telah memenuhi rentang nilai yang ditetapkan.

D.3. Hasil Pengujian Kerapatan Relatif (D_r)

Hasil pengujian kerapatan relatif (D_r) yaitu berupa berat volume kering minimum dan maksimum (γ_{dmin} dan γ_{dmax}) dari pasir, seperti yang terlihat pada Tabel 6. Berat volume kering (γ_d) yang diperoleh merupakan kepadatan maksimum dan minimum yang dapat dicapai oleh pasir ketika diuji.

Tabel 6. Hasil Pengujian Kerapatan Relatif.

Sampel	γ_{dmin}	γ_{dmax}
	gr/cm ³	gr/cm ³
SA-G1	1,232	1,406
SA-G2	1,552	1,784
SA-G3	1,463	1,678
SR-G1	1,532	1,672
SR-G2	1,774	1,956
SR-G3	1,595	1,801

D.4. Hasil Perhitungan Angka Pori (e) dan Berat Volume Kering (γ_d)

Berat volume kering minimum dan maksimum (γ_{dmin} dan γ_{dmax}) yang diperoleh dari pengujian kerapatan relatif (D_r) merupakan kepadatan maksimum dan minimum yang dapat dicapai oleh pasir. Kepadatan yang maksimum berarti mempunyai kerapatan relatif (D_r) sebesar 100%, dan kepadatan minimum berarti mempunyai kerapatan relatif (D_r) sebesar 0%. Karena pada penelitian ini kerapatan relatif yang mau dicapai adalah sebesar 70%, maka harus dicari angka pori (e) pada kondisi tersebut, berdasarkan hubungan angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}) dengan Berat volume kering minimum dan maksimum (γ_{dmin} dan γ_{dmax}). Angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}) dihitung dengan menggunakan Persamaan 3 dan Persamaan 4. Hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Perhitungan angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}).

Sampel	e_{max}	e_{min}
SA-G1	1,157	0,890
SA-G2	0,712	0,489
SA-G3	0,816	0,583
SR-G3	0,733	0,588
SR-G2	0,497	0,357
SR-G3	0,665	0,474

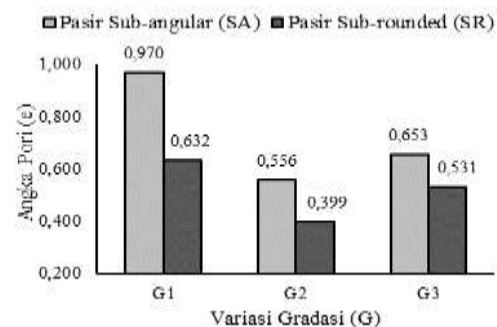
Setelah mengetahui nilai dari angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}), selanjutnya adalah mencari angka pori (e) dan berat volume kering (γ_d) pada kondisi kerapatan relatif sebesar 70%. Angka pori (e) dihitung berdasarkan hubungan angka pori maksimum dan minimum (e_{max} dan e_{min}) dengan besar kerapatan relatif, yaitu dengan menggunakan

persamaan 1, dan berat volume kering (γ_d) dihitung dengan menggunakan Persamaan 2. Hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil Perhitungan angka pori (e) dan Berat volume kering (γ_d).

Sampel	e	γ_d (gr/cm ³)
SA-G1	0,970	1,349
SA-G2	0,556	1,707
SA-G3	0,653	1,607
SR-G1	0,632	1,627
SR-G2	0,399	1,898
SR-G3	0,531	1,734

Dari perhitungan angka pori (e), terlihat bahwa angka pori dari butiran pasir *sub-angular* lebih tinggi dari butiran *sub-rounded*, seperti yang terlihat pada Gambar 20.



Gambar 20. Perbandingan Angka Pori (e) Kedua Pasir.

Perilaku yang ditunjukkan oleh angka pori (e) akibat bentuk butiran pasir pada penelitian ini, bersesuaian dengan pernyataan dari Sukumaran dan Ashmawy (2001) dan Cho dkk (2004) yaitu butiran yang cenderung bersudut, mempunyai angka pori yang tinggi, dibandingkan dengan butiran yang cenderung bulat. Penomena ini bisa terjadi, karena struktur tanah dengan bentuk butiran yang bersudut, cenderung membentuk struktur sarang lebah, yang mana struktur tersebut menimbulkan ruang yang banyak diantara butiran.

D.5. Hasil Perhitungan Berat Sampel

Berat sampel dihitung dengan mengalikan berat volume (γ_d) dengan volume ring *direct shear* yaitu sebesar $58,534\text{cm}^3$. Hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel 9.

Tabel 9. Hasil Perhitungan Berat Sampel.

Sampel	Berat sampel total
SA-G1	78,95
SA-G2	99,94
SA-G3	94,07
SR-G1	95,26
SR-G2	111,07
SR-G3	101,49

Pembagian berat sampel dihitung dengan membagi berat sampel total sesuai persentase tertahan pada setiap saringan, seperti yang terlihat pada Tabel 10 dan Tabel 11.

Tabel 10. Pembagian Berat Sampel Pasir *Sub-angular*.

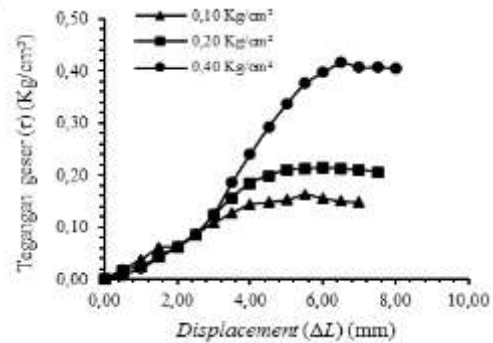
No. Ayakan	SA-G1	SA-G2	SA-G3
	Berat tertahan (gr)	Berat tertahan (gr)	Berat tertahan (gr)
4	0	0	0
6	0	29,98	9,41
10	0	29,98	9,41
20	39,48	9,99	9,41
40	39,48	9,99	9,41
100	0	9,99	28,22
200	0	9,99	28,22
Total	78,95	99,94	94,07

Tabel 11. Pembagian Berat Sampel Pasir *Sub-rounded*.

No. Ayakan	SR-G1	SR-G2	SR-G3
	Berat tertahan (gr)	Berat tertahan (gr)	Berat tertahan (gr)
4	0	0	0
6	0	33,32	10,15
10	0	33,32	10,15
20	47,63	11,11	10,15
40	47,63	11,11	10,15
100	0	11,11	30,45
200	0	11,11	30,45
Total	95,26	111,07	101,49

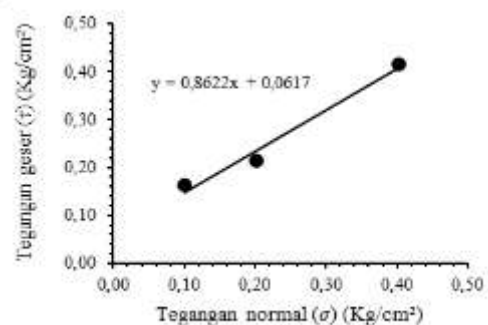
D.6. Hasil Pengujian Geser Langsung

Hasil grafik pengujian geser langsung yang ditampilkan hanya contoh sampel dari SA-G1-1, yaitu pada Gambar 21 dan Gambar 22.



Gambar 21. Hubungan Tegangan Geser (τ) dan Pergeseran (ΔL).

Berdasarkan Gambar 21, diperoleh nilai tegangan geser maksimum (τ) dari setiap beban normal (σ) yang berbeda-beda, kemudian dari grafik tersebut, dibuat hubungan dari keduanya, yang mana tegangan geser (τ) adalah fungsi dari tegangan normal (σ) seperti yang terlihat pada Gambar 22.



Gambar 22. Hubungan Tegangan Geser (τ) dan Tegangan Normal (σ).

Berdasarkan Gambar 22, diperoleh parameter kuat geser berdasarkan gradien persamaan regresi linear yang diperoleh dari grafik hubungan tegangan geser (τ) dengan tegangan

normal (σ). Parameter kuat geser dihitung dengan Persamaan 8, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut:

$$\text{Sudut geser } (\phi) = \tan^{-1}(0,862) = 40,77^{\circ}$$

$$\text{Kohesi } (c) = 0,062 \text{ Kg/cm}^2$$

Dengan cara yang sama, parameter kuat geser untuk pengujian sampel yang lain dapat dilihat pada Tabel 12.

Tabel 12. Parameter Kuat Geser dari Uji Geser Langsung.

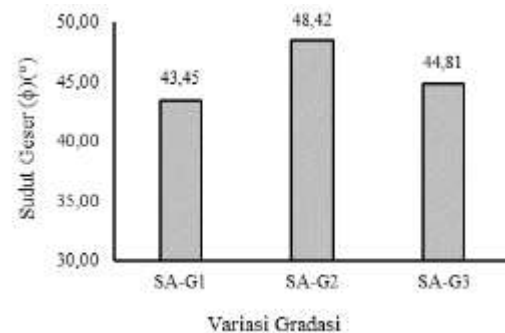
Nama sampel	Parameter kuat geser		Parameter kuat geser rata-rata	
	ϕ ($^{\circ}$)	c (Kg/cm ²)	ϕ ($^{\circ}$)	c (Kg/cm ²)
SA-G1-1	40,77	0,062	43,45	0,056
SA-G1-2	46,13	0,051		
SA-G2-1	47,17	0,127	48,42	0,151
SA-G2-2	49,68	0,176		
SA-G3-1	43,52	0,086	44,81	0,082
SA-G3-2	46,09	0,077		
SR-G1-1	41,35	0,041	37,36	0,057
SR-G1-2	33,38	0,073		
SR-G2-1	49,86	0,072	46,30	0,085
SR-G2-2	42,75	0,097		
SR-G3-1	36,63	0,070	38,15	0,058
SR-G3-2	39,68	0,045		

Dari pengujian geser langsung, diperoleh parameter kuat geser berupa sudut geser (ϕ) dan kohesi (c). Seharusnya parameter kuat geser yang dihasilkan hanya sudut geser (ϕ) saja, karena sampel pasir yang digunakan untuk pengujian berada dalam kondisi kering atau kadar air (w) adalah 0%, akan tetapi dari pengujian diperoleh kohesi (c). Untuk penelitian ini, munculnya kohesi (c) pada pengujian geser langsung, karena adanya kemungkinan fenomena *apparent mechanical force*. Hal ini bisa terjadi

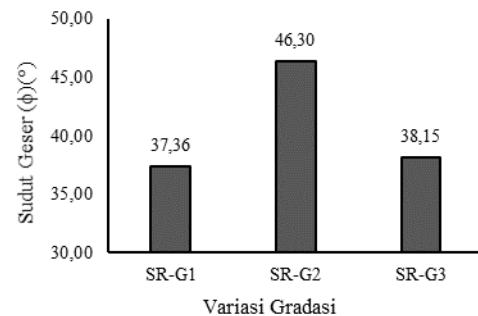
karena kondisi butiran saat berada di dalam kotak geser, saling mengunci satu sama lain (*interlocking* yang tinggi diantara butiran), dimana hal ini dapat memunculkan munculnya kohesi (c) semu.

D.6.1. Perilaku Sudut Geser Akibat Gradasi

Perilaku sudut geser (ϕ) dari kedua pasir akibat pengaruh dari gradasi, dapat dilihat pada Gambar 23 dan Gambar 24.



Gambar 23. Perbandingan Sudut Geser Pasir *Sub-angular* (ϕ) Akibat Gradasi.



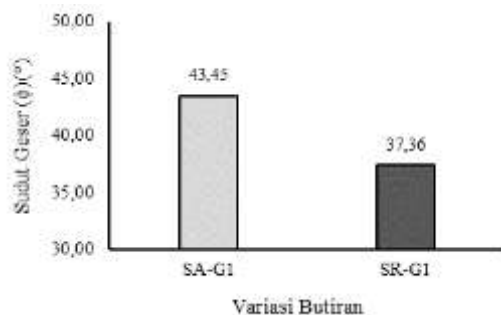
Gambar 24. Perbandingan Sudut Geser Pasir *Sub-rounded* (ϕ) Akibat Gradasi.

Berdasarkan Gambar 23 dan Gambar 24, diperoleh korelasi antara perilaku sudut geser (ϕ) dengan gradasi yaitu, bahwa semakin banyak butiran kasar dalam sebuah gradasi maka sudut geser (ϕ) yang dihasilkan akan tinggi. Hal itu terlihat pada variasi gradasi 2 dari kedua pasir yaitu sampel SA-G2 dan SR-G2 mempunyai sudut geser (ϕ)

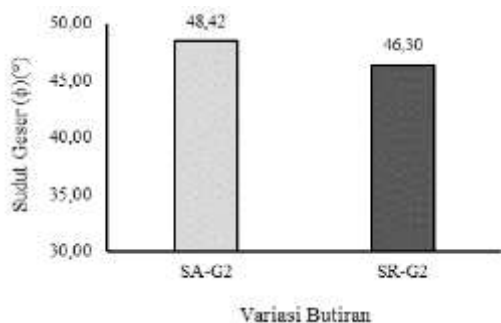
yang lebih tinggi dari variasi gradasi 3 yaitu sampel SA-G3 dan SR-G3 walaupun panjang distribusi butirannya sama. Disisi lain, gradasi yang mempunyai distribusi butiran yang lebih panjang, akan mempunyai sudut geser (ϕ) yang lebih tinggi daripada gradasi yang mempunyai distribusi butiran yang pendek. Hal itu terlihat pada variasi gradasi 3 dari kedua pasir yaitu sampel SA-G3 dan SR-G3 yang mempunyai sudut geser (ϕ) yang lebih tinggi dari variasi gradasi 1 yaitu SA-G1 dan SR-G1.

D.6.2. Perilaku Sudut Geser Akibat Bentuk Butiran

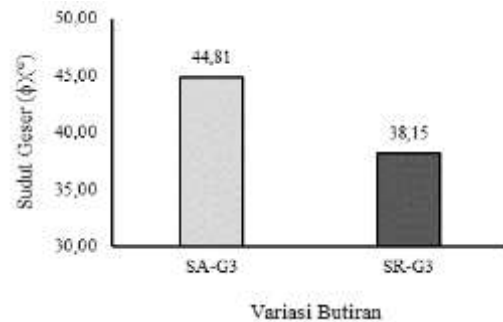
Perilaku sudut geser (ϕ) dari kedua pasir akibat dari pengaruh bentuk butiran, dapat dilihat pada Gambar 25, Gambar 26 dan Gambar 27.



Gambar 25. Perbandingan Sudut Geser (ϕ) Pasir *Sub-angular* dan *Sub-rounded* Pada Variasi Gradasi 1.



Gambar 26. Perbandingan Sudut Geser (ϕ) Pasir *Sub-angular* dan *Sub-rounded* Pada Variasi Gradasi 2.



Gambar 27. Perbandingan Sudut Geser (ϕ) Pasir *Sub-angular* dan *Sub-rounded* Pada Variasi Gradasi 3.

Berdasarkan Gambar 25, Gambar 26 dan Gambar 27, diperoleh korelasi dari perilaku sudut geser (ϕ) akibat bentuk butiran yaitu, bentuk butiran pasir yang cenderung bersudut menghasilkan sudut geser (ϕ) yang lebih tinggi dari pasir dengan bentuk butiran yang cenderung bulat. Hal itu jelas terlihat pada pasir dengan bentuk butiran *sub-angular* (SA) pada semua variasi gradasi, mempunyai sudut geser (ϕ) yang lebih tinggi dibandingkan pasir dengan bentuk butiran *sub-rounded* (SR). Hal ini bisa terjadi, karena butiran yang cenderung bersudut mempunyai *interlocking* yang tinggi (bertautan satu sama lain) dan ini akan menyebabkan gesekan antar butiran meningkat.

E. KESIMPULAN

Setelah melakukan pengujian, pengolahan dan pembahasan, diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Hasil analisis morfologi bentuk butiran pasir, yaitu kelompok pasir butiran bersudut mempunyai nilai rata-rata dari parameter *roundness* (R), *sphericity* (S) dan *regularity* (ρ), yaitu sebesar 0,47, 0,41, dan 0,44. Kelompok pasir butiran bulat, mempunyai nilai rata-rata dari parameter *roundness* (R),

sphericity (*S*) dan *regularity* (*ρ*), yaitu sebesar 0,66, 0,72, dan 0,69. Berdasarkan nilai parameter tersebut, maka tingkatan bentuk butiran dari kelompok pasir butiran bersudut adalah *sub-angular*, dan kelompok pasir butiran bulat adalah *sub-rounded*.

2. Hasil pengaruh gradasi terhadap perilaku sudut geser (ϕ), yaitu gradasi yang lebih banyak didominasi oleh fraksi butiran kasar dan yang mempunyai distribusi butiran yang panjang, akan meningkatkan sudut geser (ϕ).
3. Hasil pengaruh bentuk butiran terhadap perilaku sudut geser (ϕ), yaitu pasir dengan bentuk butiran cenderung bersudut, menghasilkan sudut geser (ϕ) yang lebih tinggi dari pasir dengan bentuk butiran cenderung bulat.

DAFTAR PUSTAKA

- Alias, R., Kasa, A., & Taha, M. R. (2014). Particle Size Effect on Shear Strength of Granular. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil, Architectural, Structural and Construction Engineering Vol:8 No:11, 2014*.
- Ashmaw, A. K., Sukumaran, B., & Hoang, V. V. (2003). Evaluating the Influence of Particle Shape on Liquefaction Behavior Using Discrete Element Modeling. *The International Society of Offshore and Polar Engineers*.
- ASTM-D-2435. (1994). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. *American Standard Testing and Material*.
- ASTM-D-422. (1994). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils. *American Standard Testing and Material*.
- ASTM-D-854. (1994). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *American Standard Testing and Material*.
- Bogss, S. (2009). *Petrology of Sedimen Rocks 2nd ed*. New York: Cambridge University Press.
- Budhu, M. (2010). *Soil Mechanics and Foundation 3rd ed*. United States of America.
- Cho, G.-C., Dodds, J., & Santamarina, J. C. (2004). Particle Shape of on Packing Density Stiffness and Strength - Natural and Crushed Sands-.
- Coduto, D. P. (1999). *Geotechnical Engineering Principles and Practices*. Prentice hall.
- Cox, M. R., & Budhu, M. (2007). A Practical Approach to Grain Shape Quantification. *Engineering Geology*.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2*. Jakarta: Erlangga.
- Ferreira, T., & Rasband, W. (2011). *The ImageJ User Guide — Version 1.44*. Retrieved from <http://imagej.nih.gov/ij/docs/user-guide.pdf>.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hryciw, R. D., Zheng, J., & Shetler, K. (2016). Particle Roundness and Sphericity from Images of Assemblies by Chart Estimates

- and Computer Methods. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*
- JGS-0161-2009. (2009). Laboratory Testing Standards of Geomaterials: Test for Physical Properties - Test Method for Minimum and Maximum Densities of Sand. *The Japanese Geotechnical Society*.
- Kara, E. M., Meghachou, M., & Aboubekr, N. (2013). Contribution of Particles Size Ranges to Sand Friction. *ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research*.
- Olson, D. R., & Lai, J. (2004). *Direct Shear Testing*. Chaoyang: Department of Construction Engineering Advanced Geotechnical Laboratory.
- Rees, S. D. (2010). *Effects of Fines on The Undrained Behaviour of Christchurch Sandy Soils*. Department of Civil and Natural Resources Engineering. Christchurch: University of Canterbury.
- Sukumaran, B., & Ashmawy, A. K. (2001). Quantitative Characterisation of The Geometry of Discrete Particles . *Geotechnique* 51(7):619-627.
- Umam, K. (2017). Pengaruh Gdasi Pasir dan Kadar Lempung Terhadap Kuat Geser Tanah. *Jom FTEKNIK Volume 4 No. 1 Februari 2017*, 6-7.