

## Pengaruh *Fine Aggregate Angularity* dan Persentase Pasir Terhadap Permeabilitas Tanah Residual Tropis yang Dipadatkan

Erza Rismantojo

Kelompok Keahlian Geoteknik, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,  
Jl. Ganesa No.10, Bandung 40132, E-mail: erza@si.itb.ac.id

Reza Ismaniar

Staf Ahli Geoteknik PT. Soilens, Jl. P.H. Hasan Mustafa No. 41, Bandung 40124, Indonesia,  
E-mail: reza.ismaniar@gmail.com

### Abstrak

Penelitian ini mempelajari pengaruh *Fine Aggregate Angularity* (FAA) dan persentase komponen pasir pada permeabilitas arah vertikal campuran tanah lempung residual tropis dan pasir yang dipadatkan. FAA adalah nilai *uncompacted void ratio* pasir yang nilainya dipengaruhi oleh bentuk partikel dan tekstur permukaannya. Material yang digunakan adalah tanah merah residual tropis dari Jatigede dan tiga jenis pasir dari Galunggung, Growong, dan Cimalaka, Jawa Barat. Penelitian menggunakan metode desain faktorial dengan dua faktor utama dan tiga level untuk masing-masing faktor. Dua faktor yang diteliti adalah persentase kandungan pasir (20, 40, dan 60%) dan nilai FAA pasir (47,67, 57,00, dan 62,89%). Benda uji dibuat dengan cara dipadatkan pada kadar air optimum dengan target berat isi kering maksimum sesuai dengan hasil uji Standard Proctor Compaction (ASTM D698). Pengukuran permeabilitas campuran tanah merah dengan pasir mengacu pada British Standard BS 1377: Part 8:1990. Hasil pengujian pemadatan memperlihatkan bahwa semakin bertambah nilai FAA pasir maka semakin berkurang berat isi kering tanah campuran dan semakin bertambah harga kadar air optimumnya. Hasil pengujian permeabilitas menunjukkan bahwa peningkatan tegangan sel, peningkatan nilai FAA, dan pengurangan persentase pasir pada umumnya menurunkan harga koefisien permeabilitas arah vertikal. Hasil analisis metode ANOVA menunjukkan bahwa pengaruh faktor persentase pasir lebih dominan dibandingkan pengaruh faktor FAA.

**Kata- kata Kunci:** Campuran tanah residual dan pasir, nilai FAA, persentase pasir, permeabilitas.

### Abstract

This research studied the effect of *Fine Aggregate Angularity* (FAA) and sand content on the vertical coefficient of permeability of compacted tropical residual soil and sand mixtures. FAA is the *uncompacted void ratio* of sand which is influenced by particle shape and texture. The material used in this study consisted of tropical residual red clay soil collected from a quarry in Jatigede and three different sand types collected from Galunggung, Growong, and Cimalaka, all in West Java area. This experiment was conducted following a factorial design for two factors and three levels for each factor. The two factors are sand contents (20, 40, 60%) and FAA of sand (47.67, 57.00, 62.89%). The test specimens were compacted samples each prepared at the maximum dry density and optimum water content of Standard Proctor Compaction Test (ASTM D698). The test specimens were subjected to British Standard BS 1377:Part 8:1990 for permeability determination. This study indicated that the tropical red soil-sand mixture with the highest FAA value has the minimum dry density and the maximum optimum water content. The results also show that increasing confining pressure, increasing FAA, and decreasing sand content will decrease the vertical coefficient of permeability. The results of statistical analysis of variance (ANOVA) show that the sand content has the more dominant effect than the FAA factor on the coefficient of permeability of the compacted tropical red soil and sand mixtures.

**Keywords:** Tropical residual soil and sand mixtures, FAA value, sand content, permeability.

## 1. Pendahuluan

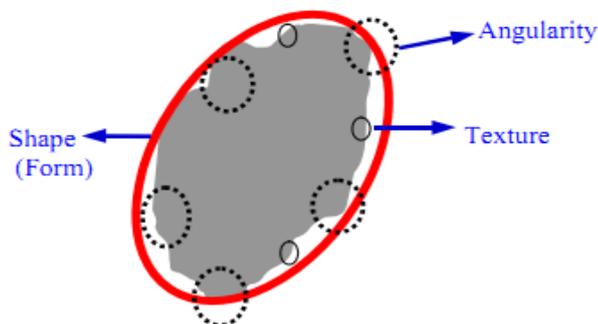
Penggunaan tanah lempung dicampur dengan agregat kasar sudah umum digunakan sebagai material inti bendungan (Shafiee, 2008) karena hasil pencampuran ini tidak hanya menghasilkan tanah yang mudah

dipadatkan tetapi juga memiliki kekuatan geser yang lebih besar, kepadatan yang lebih tinggi, dan kompresibilitas yang lebih kecil. Beberapa penelitian yang pernah dilakukan mempelajari pengaruh dari persentase komponen agregat kasar, ukuran butir agregat, dan tegangan (*confining pressure*) terhadap

permeabilitas campuran lempung dan agregat kasar (Shafiee, 2008, Dunn and Mehuys, 1984, Jafari et al., 2004, Indrawan et al., 2005, Tavakoli et al., 2010).

Penelitian yang dilakukan oleh Shafiee (2008) selain menggunakan pasir alami juga menggunakan bola-bola keramik sebagai komponen campuran agregat. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa campuran lempung dengan pasir alami dan campuran lempung dengan bola-bola keramik menghasilkan pengaruh yang cenderung berlawanan terhadap permeabilitas tanah campuran yang dihasilkan. Secara tidak langsung Shafiee (2008) mendapatkan pengaruh dari bentuk dan kekasaran permukaan partikel agregat yang digunakannya tetapi tidak menetapkan suatu parameter untuk mewakili kondisi tersebut.

Berdasarkan hasil penelitian tersebut maka peneliti menggunakan parameter *Fine Aggregate Angularity (FAA)* pasir untuk mempelajari pengaruh faktor bentuk dan kekasaran permukaan partikel pasir terhadap permeabilitas campuran tanah merah dan pasir. FAA adalah *uncompacted void ratio* yang nilainya menunjukkan pengaruh gabungan dari bentuk partikel, *angularity*, dan tekstur permukaan partikel (**Gambar 1**). Pengukuran parameter FAA tersebut dapat dilakukan menggunakan metode pengujian ASTM C1252 *Uncompacted Void Content of Fine Aggregate* dan *Virginia Test Method for Determining Percent Voids in Fine Aggregates (VTM-5)*. Peneliti menemukan adanya hubungan antara FAA pasir sebagai bahan campuran *Hot Mixed Asphalt (HMA)* dengan perilaku HMA tersebut pada pengujian di laboratorium (Rismantojo, 2003). Peneliti beranggapan bahwa parameter FAA ini juga dapat digunakan untuk mempelajari pengaruh bentuk dan kekasaran permukaan agregat kasar terhadap kekuatan geser dan permeabilitas tanah campuran.



**Gambar 1. Komponen properti Fine Aggregate Angularity (FAA) (NCHRP, 2005)**

**Tabel 1. Kombinasi benda uji penelitian**

	Persentase Pasir, %		
	20	40	60
FAA 1	xx <sup>(1)</sup>	Xx	xx
FAA 2	xx	Xx	xx
FAA 3	xx	xx	xx

Catatan: <sup>(1)</sup>Dua replika benda uji untuk masing-masing kombinasi

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Persiapan benda uji

Tanah residual tropis yang digunakan adalah tanah merah dari Jatigede, Jawa Barat. Tanah merah tersebut memiliki *plasticity index* 37,64%, *liquid limit* 91,82%, dan *specific gravity* 2,65. Hasil pengujian difraksi x-ray memperlihatkan bahwa kandungan mineral tanah merah didominasi oleh kaolinite. Pasir yang digunakan berasal dari Galunggung, Growong, dan Cimalaka juga dari Jawa Barat. Nilai FAA pasir-pasir ini diukur dengan alat yang didesain mengacu pada VTM-5 (**Gambar 2**). Alat ini memiliki dimensi sedikit berbeda dengan VTM-5 dan lebih besar daripada alat yang digunakan oleh ASTM C1252. Rismantojo, dkk. (2003) menemukan bahwa semakin besar dimensi alat yang digunakan semakin kecil pengaruhnya terhadap hasil pengukuran FAA. Nilai FAA masing-masing pasir Galunggung, Growong, dan Cimalaka adalah 47,67, 57,00, dan 62,89%.

Penelitian dirancang berdasarkan metode Desain Faktorial (*Factorial Design*) untuk dua faktor utama yaitu FAA pasir dan persentase pasir dimana masing-masing faktor memiliki tiga level (**Tabel 1**) sehingga diperoleh sembilan kombinasi benda uji. Persentase pasir yang digunakan adalah 20, 40, dan 60%. Untuk menghilangkan pengaruh dari distribusi ukuran butir, maka digunakan gradasi yang sama untuk ketiga pasir dan dipilih distribusi ukuran butir dengan gradasi baik (*well gradation*).

Pengujian *Standard Proctor Compaction* yang mengacu pada standar ASTM D 698-91 dilakukan pada campuran masing-masing kombinasi sehingga diperoleh berat isi kering maksimum dan kadar air optimum dari masing-masing kombinasi campuran tersebut. Benda uji



**Gambar 2. Alat VTM-5 Modifikasi**

dari masing-masing kombinasi dibuat dengan cara pemadatan di dalam cetakan silinder kuningan berdiameter 50mm dan tinggi 100mm pada kadar air optimum untuk mencapai berat isi kering maksimum masing-masing kombinasi campuran. Berat isi kering maksimum dan kadar air optimum untuk kesembilan kombinasi untuk tiga level FAA dan tiga level persentase pasir dapat dilihat pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.

Proses pembuatan benda uji diawali dengan pencampuran tanah merah dan pasir secara manual menggunakan tangan dan alat bantu. Penambahan air dilakukan setelah tanah merah dan pasir terlihat homogen. Hasil pencampuran tanah merah, pasir, dan air ditutup rapat dengan plastik yang kedap udara dan didiamkan selama ±24 jam. Campuran tanah kemudian dicetak di dalam silinder berdiameter 50mm dan tinggi 100mm. Tanah dimasukkan ke dalam silinder dan ditumbuk dalam tiga lapis. Masing-masing lapisan ditumbuk dengan jumlah pukulan yang sama sehingga diperoleh berat isi kering sesuai dengan berat isi kering maksimum hasil pengujian kompaksi *Standard Proctor* masing-masing campuran.

**2.2 Prosedur pengujian**

Pengujian permeabilitas mengacu pada BS 1377: Part 8:1990. Pertama-tama benda uji dijenuhkan dahulu dengan cara memberikan *back pressure* ke dalam benda uji. Untuk mencegah kerusakan benda selama penjenruhan maka dibuat perbedaan tekanan sekitar 0,1 kg/cm<sup>2</sup> (9,8kPa) antara *back pressure* dan *confining pressure*. Benda uji kemudian dikonsolidasikan pada tiga tekanan efektif yang berbeda, σ<sub>v</sub> yaitu 0,5, 1,5, dan 5,0kg/cm<sup>2</sup> (49,1, 147,2, dan 490,5kPa) Pengujian permeabilitas dilakukan pada masing-masing tiga tingkat tegangan efektif tersebut. Koefisien permeabilitas yang ditentukan adalah permeabilitas arah vertikal.

**Tabel 2. Berat isi kering maksimum hasil pengujian pemadatan *standard proctor***

Berat Isi Kering Maksimum (kN/m <sup>3</sup> )		Persentase Pasir, %		
Nama Pasir	FAA (%)	20	40	60
Galunggung	47,67	13,60	14,65	16,13
Growong	57,00	12,74	13,44	14,54
Cimalaka	62,89	12,42	13,02	13,42

**Tabel 3. Kadar air optimum hasil pengujian pemadatan *standard proctor***

Kadar Air Optimum (%)		Persentase Pasir, %		
Nama Pasir	FAA (%)	20	40	60
Galunggung	47,67	32,1	28,4	20,8
Growong	57,00	33,7	31,4	25,4
Cimalaka	62,89	35,6	31,8	25,0

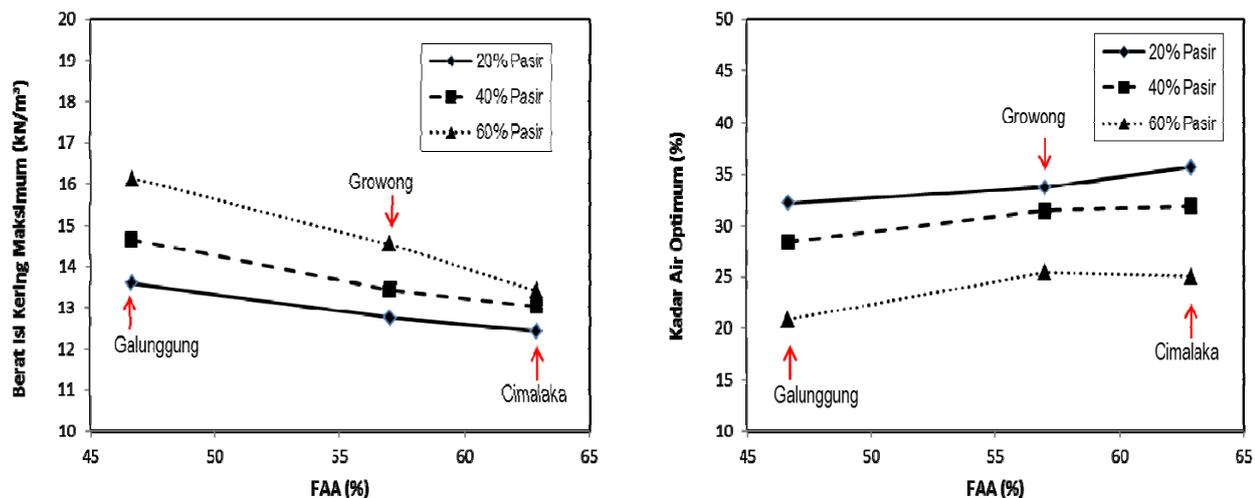
**3. Hasil dan Analisis**

**3.1 Hubungan antara berat isi kering maksimum dan kadar air optimum hasil pemadatan *standard proctor* dengan nilai FAA**

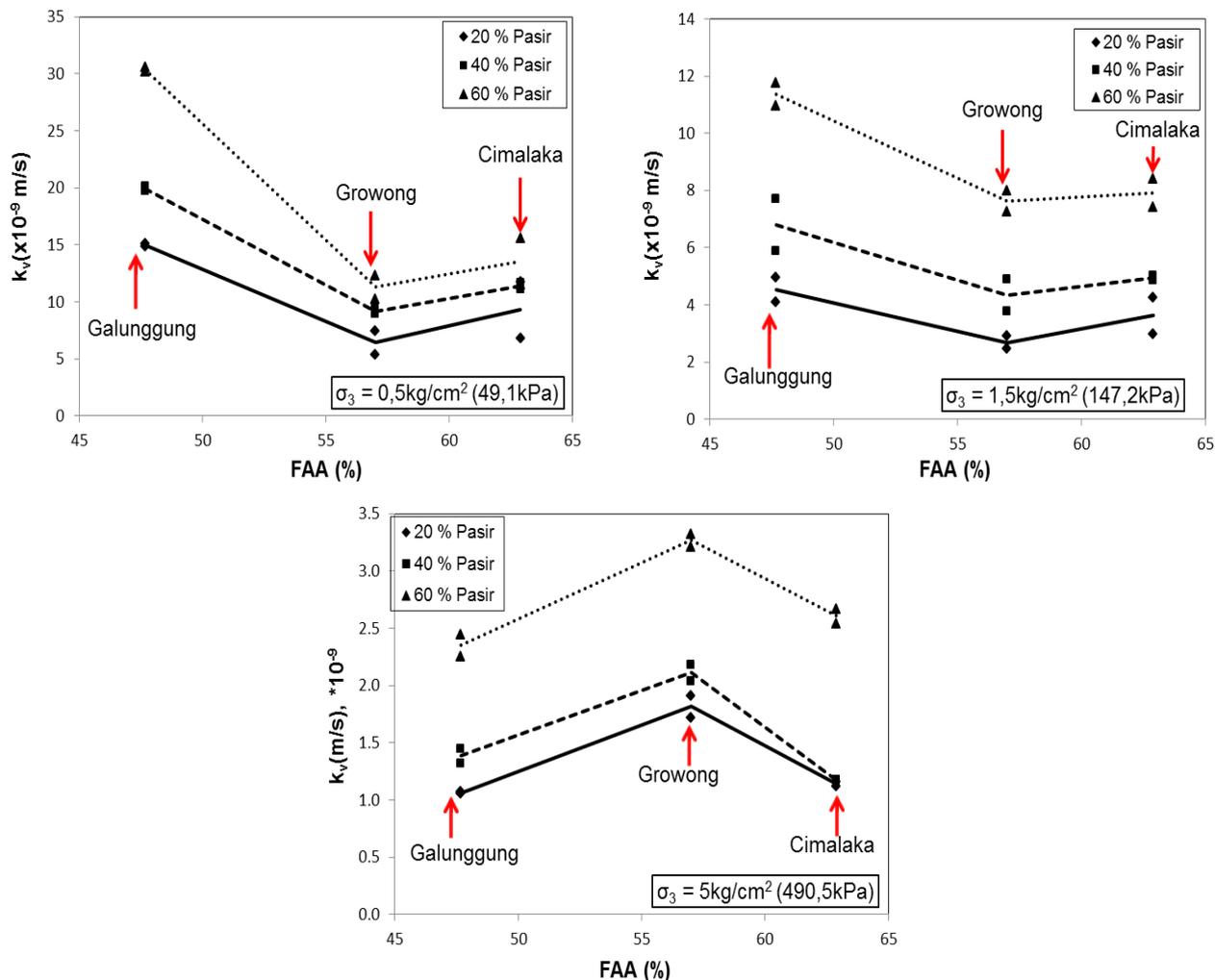
Hubungan antara berat isi kering maksimum dan kadar air optimum hasil pemadatan *Standard Proctor* dengan nilai FAA pasir dapat dilihat pada **Gambar 3**. Secara umum terlihat bahwa semakin besar nilai FAA pasir yang digunakan semakin kecil berat isi kering maksimum hasil pemadatan *Standard Proctor* dan semakin besar kadar air optimum untuk mencapai kepadatan maksimum tersebut. Perilaku ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai FAA pasir yang digunakan semakin sukar tanah campuran tersebut untuk dipadatkan. Hasil pemadatan juga memperlihatkan bahwa semakin banyak kandungan pasir yang digunakan semakin mudah tanah campuran ini untuk dipadatkan dan semakin kecil kadar air optimum untuk mencapai kepadatan maksimum tersebut. Terlihat ada hubungan yang relatif linear antara berat isi kering maksimum hasil pemadatan *Standard Proctor* dengan nilai FAA komponen pasir tanah campuran sehingga parameter FAA dapat dianggap sebagai faktor yang signifikan untuk menjelaskan perilaku hasil pemadatan campuran tanah merah dan pasir.

**3.2 Hubungan antara permeabilitas dengan nilai FAA dan tegangan efektif**

Hubungan antara koefisien permeabilitas vertikal dengan nilai FAA dan tegangan efektif dapat dilihat pada **Gambar 4**. Pada tegangan efektif 0,5 dan 1.5kg/cm<sup>2</sup> (49,1 dan 147,2kPa), untuk ketiga nilai FAA, secara umum nilai koefisien permeabilitas vertikal meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan pasir. Koefisien permeabilitas tertinggi dimiliki oleh campuran tanah dengan persentase pasir 60% dan nilai permeabilitas terendah untuk persentase pasir 20%. Pada kedua tegangan efektif tersebut tanah campuran dengan FAA pasir yang lebih besar cenderung memiliki koefisien permeabilitas yang lebih rendah. Seperti terlihat pada **Gambar 4** untuk tegangan efektif 0,5kg/cm<sup>2</sup> (49,1kPa) tanah campuran dengan FAA 46,67% (Pasir Galunggung) memiliki harga koefisien permeabilitas yang besarnya sekitar dua kali dari koefisien permeabilitas tanah campuran dengan FAA 57,00% (Pasir Growong). Koefisien permeabilitas tanah campuran dengan FAA pasir 62,89% juga lebih kecil daripada tanah campuran dengan FAA 46,67% tetapi harganya lebih besar daripada tanah campuran dengan FAA 57,00% walaupun perbedaannya tidak terlalu signifikan.



Gambar 3. Hubungan antara berat isi kering maksimum dan kadar air optimum hasil pematatan *standard proctor* dengan nilai FAA



Gambar 4. Hubungan antara nilai permeabilitas dengan nilai FAA

Perilaku yang sama juga diperlihatkan oleh tanah campuran pada tegangan efektif  $1,5\text{kg/cm}^2$  ( $147,2\text{kPa}$ ). Semakin besar persentase kandungan pasir semakin besar juga koefisien permeabilitas arah vertikalnya. Tanah campuran dengan FAA  $46,67\%$  memiliki koefisien permeabilitas yang lebih besar daripada tanah campuran dengan FAA  $57,00$  dan  $62,89\%$ . Seperti juga pada kondisi tegangan efektif  $0,5\text{kg/cm}^2$  tanah campuran dengan FAA pasir  $62,89\%$  memiliki koefisien permeabilitas yang lebih besar daripada tanah campuran dengan FAA  $46,67\%$  tetapi perbedaannya tidak terlalu signifikan.

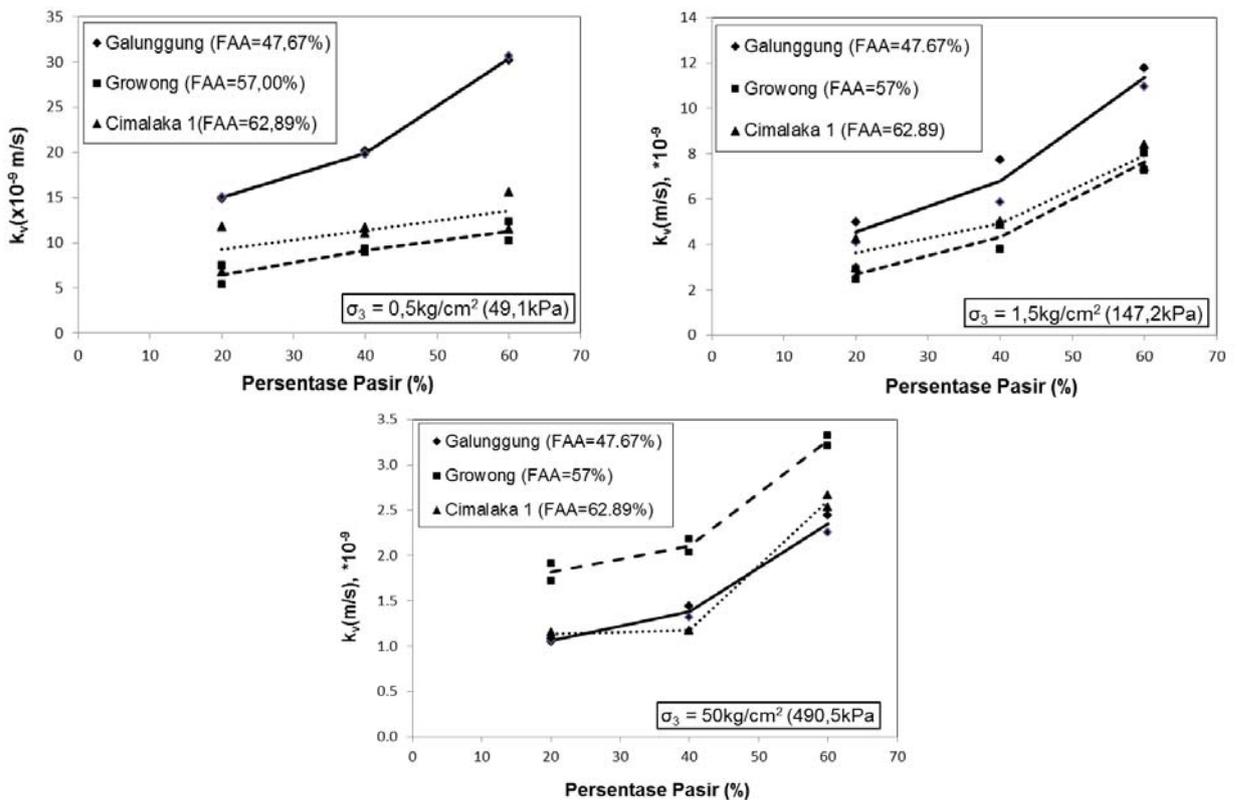
Perilaku hubungan yang berbeda antara koefisien permeabilitas dan FAA diperlihatkan oleh tanah campuran yang diuji pada tegangan efektif  $5,0\text{kg/cm}^2$  ( $490,5\text{kPa}$ ). Pada kondisi tegangan yang relatif tinggi ini koefisien permeabilitas tanah campuran dengan FAA terendah dan tertinggi ( $46,67$  dan  $62,89\%$ ) menjadi memiliki koefisien permeabilitas yang besarnya hampir sama dengan perbedaan yang tidak signifikan. Sedangkan permeabilitas tanah campuran dengan FAA  $57,00\%$  terlihat berbeda dan lebih besar dari kedua campuran lainnya. Pada tegangan sel efektif yang tinggi ini nilai permeabilitas ketiga campuran bervariasi antara 1 sampai dengan  $3 \times 10^{-9}\text{m/detik}$  dengan nilai maksimum dimiliki oleh tanah campuran dengan FAA  $57\%$ .

Pasir Growong memiliki banyak pori (*porous*) dan lebih rapuh dibandingkan pasir Cimalaka dan Galunggung. Perilaku anomali yang diperlihatkan oleh pasir Growong kemungkinan besar diakibatkan oleh perubahan gradasi, ukuran, dan bentuk partikel pada saat persiapan benda uji.

### 3.3 Hubungan antara permeabilitas dengan persentase pasir

Pengaruh persentase kandungan pasir pada nilai permeabilitas vertikal tanah campuran untuk tiga tegangan sel efektif  $0,5$ ,  $1,5$ , dan  $5,0\text{kg/cm}^2$  ( $49,1$ ,  $147,2$ ,  $490,5\text{kPa}$ ) dapat dilihat pada **Gambar 5**. Secara umum terlihat bahwa semakin besar persentase kandungan pasirnya semakin besar juga nilai permeabilitas vertikal tanah campurannya.

Dari grafik terlihat penambahan persentase pasir untuk semua variasi tegangan sel dan variasi nilai FAA meningkatkan permeabilitas campuran tanah. Pada umumnya nilai permeabilitas vertikal meningkat lebih signifikan pada saat persentase pasir bertambah dari  $40$  menjadi  $60\%$  dibandingkan pada saat penambahan dari  $20$  menjadi  $40\%$ .



Gambar 5. Hubungan antara nilai permeabilitas dengan persentase pasir

#### 4. Analisis Statistik

Analisis statistik menggunakan metode ANOVA (*Analysis of Variance*) dibuat untuk mengetahui, di antara faktor FAA dan persentase pasir, faktor yang paling mempengaruhi permeabilitas campuran tanah merah dengan pasir. Hipotesis  $H_0$ , yaitu tidak ada pengaruh yang diakibatkan oleh faktor-faktor FAA dan persentase pasir terhadap permeabilitas, dapat ditolak jika harga *significance*  $\alpha \geq p$ -value. Hasil analisis statistik ANOVA untuk  $s_u/\sigma_3$  versus FAA dan persentase pasir dapat dilihat pada **Tabel 4** sampai **Tabel 6**.

Untuk *significance level*  $\alpha=0,05$  hasil analisis ANOVA menunjukkan bahwa faktor-faktor FAA dan persentase pasir secara signifikan mempengaruhi permeabilitas tanah campuran. Pada tegangan sel efektif paling rendah yaitu  $0,5\text{kg/cm}^2$  ( $49,1\text{kPa}$ ) pengaruh faktor FAA cenderung lebih besar daripada pengaruh persentase pasir seperti terlihat dari nilai *Sum of Squares* FAA yang lebih besar daripada *Sum of Squares* persentase pasir. Tetapi untuk tegangan sel yang lebih besar,  $1,5$  dan  $5,0\text{kg/cm}^2$  ( $147,2$  dan  $490,5\text{kPa}$ ), pengaruh persentase pasir terlihat lebih dominan daripada pengaruh FAA.

Selain itu ditemukan juga adanya interaksi di antara kedua faktor FAA dan persentase pasir. Interaksi terjadi jika perilaku hubungan antara permeabilitas terhadap persentase pasir dipengaruhi oleh faktor FAA dan sebaliknya. Seperti terlihat pada **Gambar 5**, contohnya pada tegangan sel  $0,5\text{kg/cm}^2$  ( $49,1\text{kPa}$ ), perilaku perubahan nilai permeabilitas terhadap persentase pasir Growong dan Cimalaka cenderung lebih linear dibandingkan dengan dengan perilaku yang diperlihatkan oleh pasir Galunggung. Pada tegangan  $5,0\text{kg/cm}^2$  ( $490,5\text{kPa}$ ) perilaku yang diperlihatkan pasir Cimalaka terlihat berbeda dengan kedua pasir lainnya. Interaksi ini terjadi ini disebabkan oleh adanya faktor-faktor lain yang tidak dapat terkontrol selama pengujian. Berdasarkan pengamatan salah satu faktor tersebut adalah kekerasan atau kekuatan butiran partikel pasir. Pasir Growong memiliki partikel yang lebih rapuh dibandingkan dengan kedua pasir lainnya sehingga pada saat proses pembentukan benda uji terjadi perubahan ukuran butir yang akhirnya akan menghasilkan benda uji dengan nilai FAA yang berbeda dengan nilai FAA pasir aslinya.

**Tabel 4. Analysis of variance (ANOVA) nilai permeabilitas vs FAA dan persentase pasir untuk  $\sigma_3=0,5\text{kg/cm}^2$  ( $49,1\text{kPa}$ )**

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	$F_0$	P-value
FAA	2	555,9	277,9	98,6	0
% Pasir	2	203,5	101,8	36,1	0
FP interaction	4	86,2	21,5	7,6	0,006
Error	9	25,4	2,8		
Total	17	870,9			

**Tabel 5. Analysis of variance (ANOVA) nilai permeabilitas vs FAA dan persentase pasir untuk  $\sigma_3=1,5\text{kg/cm}^2$  ( $147,2\text{kPa}$ )**

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	$F_0$	P-value
FAA	2	23,8	11,9	22,6	0
% Pasir	2	89,5	44,7	85,1	0
FP interaction	4	3,6	0,9	1,7	0,23
Error	9	4,7	0,5		
Total	17	121,6			

**Tabel 6. Analysis of variance (ANOVA) nilai permeabilitas vs FAA dan persentase pasir untuk  $\sigma_3=5,0\text{kg/cm}^2$  ( $490,5\text{kPa}$ )**

Source of Variation	Degree of Freedom	Sum of Squares	Mean Square	$F_0$	P-Value
FAA	2	2,4	1,2	157	0
% Pasir	2	6,9	3,4	442,2	0
FP interaction	4	0,12	0,03	3,8	0,04
Error	9	0,07	0,008		
Total	17	9,5			

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Berat isi kering maksimum dan kadar air optimum tanah hasil campuran tanah merah residual tropis dengan pasir yang dipadatkan dengan metode *Standard Proctor* tergantung pada parameter FAA pasir dan persentase kandungan pasir
2. Semakin besar nilai FAA pasir yang digunakan semakin kecil berat isi kering maksimum hasil pemadatan *Standard Proctor*
3. Semakin besar nilai FAA pasir yang digunakan semakin besar kadar air optimum yang diperlukan untuk mendapatkan berat isi kering maksimum hasil pemadatan *Standard Proctor*
4. Permeabilitas campuran tanah merah residual dengan pasir dipengaruhi oleh FAA pasir, persentase pasir yang digunakan, dan tegangan sel efektif
5. Semakin besar persentase pasir yang digunakan semakin besar nilai permeabilitas arah vertikal tanah hasil campuran antara tanah merah residual dan pasir yang dipadatkan pada kadar air optimum untuk mencapai berat kering maksimum pemadatan *Standard Proctor*
6. Penambahan persentase pasir untuk semua variasi tegangan sel dan variasi nilai FAA meningkatkan permeabilitas arah vertikal campuran tanah. Pada umumnya nilai permeabilitas arah vertikal meningkat lebih cepat jika kandungan pasir yang digunakan di atas 40% dibandingkan campuran yang kandungan pasirnya dibawah 40%
7. Berdasarkan analisis statistik ANOVA pada tegangan sel efektif 1,5 dan 5,0kg/cm<sup>2</sup> (147,2 dan 490,5kPa) faktor persentase pasir memiliki pengaruh yang lebih signifikan terhadap permeabilitas tanah campuran dibandingkan dengan pengaruh yang diberikan oleh faktor FAA
8. Selain faktor FAA dan persentase pasir, faktor lain seperti kekerasan partikel atau ketahanan partikel terhadap kerusakan, terutama pada saat persiapan tanah campuran, juga mempengaruhi nilai permeabilitas tanah hasil campuran. Faktor ini sangat dominan pada persentase pasir yang kecil.

## 6. Ucapan Terima Kasih

Penulis berterima kasih kepada Program Riset Peningkatan Kapasitas LPPM ITB 2010 dan Laboratorium Soilens atas dukungannya.

## Daftar Pustaka

- ASTM C1252, 1998, *Standard Test Methods for Uncompacted Void Content of Fine Aggregate (as Influenced by Particle Shape, Surface Texture, and Grading)*, Annual Book of ASTM Standards Volume 04.02, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2001.
- ASTM D698-91, 1999, *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort*, Annual Book of ASTM Standard Section 4. Vol. 04.08. ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 78-85.
- British Standards 1377: Part 8, 1990, *Methods of Test of Soils for Civil Engineering Purposes, Consolidation Section*.
- Dunn, A.J., and Mehuys. G.R., 1984, *Relationship Between Gravel Content of Soils and Saturated Hydraulic Conductivity in Laboratory Tests*, p. 55-63. In J.E. Box, Jr. (ed.) *Erosion and productivity of soils containing rock fragments*. SSSA Spec. Publ. 13. SSSA, Madison, WI.
- Indrawan, I.G.B., Rahardjo, H., Leong, E.C., 2005, *Effects of Coarse-Grained Materials on Properties of Residual Soil*, *Engineering Geology*, 82, 154-164
- Jafari, M.K., Shafiee, A., 2004, *Mechanical Behavior of Compacted Composite Clays*, *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (6), 1152–1167.
- NCHRP, 2005, *Appendixes to NCHRP Report 555: Test Methods for Characterizing Aggregate Shape, Texture, and Angularity*.
- Rismantojo, E., Haddock, J.E., White, T.D., 2003, *Comparison of Fine Aggregate Uncompacted Voids Content Measured by the ASTM C 1252 and the VTM-5 Devices*, *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 31, No. 4.
- Shafiee, A., 2008, *Permeability of Compacted Granule-Clay Mixtures*, *Engineering Geology* 97, 199–208.
- Tavakoli, H.R., Shafiee, A., Jafari, M.K., 2010, *Hydraulic Conductivity of Compacted Composite Clays*, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 1, No. 3.

