

**PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG KOLOM STABILISASI  
TANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO DENGAN METODE *DEEP SOIL MIX*  
TIPE *PANELS* DIAMETER 2 CM TERHADAP DAYA DUKUNG TANAH**

**JURNAL**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**Disusun Oleh:**

**ARIF LUQMAN HAKIM  
NIM. 115060100111061**

**KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI  
UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK SIPIL  
2015**

# Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Kolom Stabilisasi Tanah Ekspansif di Bojonegoro dengan Metode *Deep Soil Mix* Tipe *Panels* Diameter 2 cm terhadap Daya Dukung Tanah

Arif Luqman Hakim, Suroso, Yulvi Zaika

Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya

Jalan MT. Haryono 167, Malang 65145, Indonesia

E-mail: arifluqmanhakim15@gmail.com

## ABSTRAK

Tanah lempung ekspansif merupakan tanah dengan daya dukung rendah dan memiliki potensi kembang-susut yang tinggi, sehingga sering menimbulkan kerusakan pada bangunan di atasnya. Oleh karena itu, diperlukan suatu upaya stabilisasi untuk mengurangi potensi kembang-susut dan meningkatkan daya dukungnya sehingga dapat digunakan sebagai tanah dasar untuk kegiatan konstruksi. *Deep Soil Mixing (DSM)* merupakan salah satu metode stabilisasi tanah lapisan dalam dimana bahan aditif dimasukkan dan dicampur ke dalam tanah dengan menggunakan mesin bor atau auger. Pada penelitian ini, tanah ekspansif dari Bojonegoro akan distabilisasi menggunakan metode DSM tipe *Panels* dengan diameter kolom 2 cm. Bahan aditif yang ditambahkan yaitu 15% fly ash. Variasi jarak dan panjang kolom dilakukan untuk mengetahui pengaruhnya terhadap nilai daya dukung tanah. Berdasarkan hasil pengujian, variasi jarak dan panjang kolom berpengaruh terhadap peningkatan daya dukung tanah. Semakin besar panjang kolom dan semakin kecil jarak antar kolom, nilai daya dukung semakin besar. Namun, variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh lebih besar terhadap peningkatan nilai daya dukung. Jarak dan panjang kolom yang menghasilkan daya dukung maksimum yaitu jarak antar kolom terkecil dengan panjang kolom terbesar. Nilai daya dukung maksimum yaitu sebesar 1040 kN/m<sup>2</sup> yang meningkat 173,648% dari tanah sebelum distabilisasi dan nilai swelling menurun 24,326% dari tanah sebelum distabilisasi.

**Kata kunci:** Lempung ekspansif, stabilisasi tanah, fly ash, deep soil mix, jarak dan panjang kolom, daya dukung

## Pendahuluan

Dalam suatu konstruksi baik gedung maupun jalan, tanah merupakan bagian yang sangat penting karena berfungsi sebagai tempat pijakan dimana konstruksi tersebut dibangun. Bangunan akan dapat berdiri kokoh jika didukung oleh tanah dasar yang baik. Namun, tidak sedikit pula bangunan berdiri di atas tanah dasar yang kurang baik, seperti pada tanah lempung ekspansif. Tanah lempung ekspansif merupakan tanah dengan daya dukung rendah dan memiliki potensi kembang-susut yang tinggi, sehingga sering menimbulkan kerusakan pada bangunan di atasnya. Upaya stabilisasi perlu dilakukan untuk memperbaiki kondisi tanah tersebut.

Salah satu upaya stabilisasi yang dapat dilakukan yaitu dengan menambahkan bahan aditif seperti fly ash ke dalam tanah. Metode ini banyak dilakukan untuk

menstabilisasi tanah lapisan dangkal. Namun, pada beberapa kasus ditemui adanya lapisan tanah ekspansif yang dalam sehingga jika digunakan metode stabilisasi lapisan dangkal, akan membutuhkan bahan dan biaya lebih tinggi. Maka diperlukan metode stabilisasi untuk lapisan dalam agar hasil yang diharapkan dapat tercapai dengan maksimal dan juga lebih efisien dalam bahan, biaya, dan waktu pelaksanaannya. *Deep Soil Mixing (DSM)* merupakan salah satu metode stabilisasi tanah lapisan dalam dimana bahan aditif dimasukkan ke dalam tanah dengan menggunakan mesin bor atau auger.

Penelitian akan difokuskan untuk mengetahui nilai daya dukung tanah lempung ekspansif dengan memberikan variasi jarak dan panjang kolom tipe *Panels* dengan diameter 2 cm menggunakan metode *Deep Soil Mixing (DSM)*. Kadar fly ash

yang ditambahkan adalah sebesar 15%. Penelitian ini diharapkan mampu meningkatkan nilai daya dukung dan menurunkan nilai *swelling* tanah lempung ekspansif di daerah Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.

Adapun tujuan penelitian ini sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui pengaruh variasi jarak dan panjang kolom tipe *Panels* dengan diameter 2 cm terhadap nilai daya dukung pada tanah lempung ekspansif di Bojonegoro dengan pencampuran 15% *fly ash*.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang kolom yang optimum untuk meningkatkan nilai daya dukung pada tanah lempung ekspansif di Bojonegoro dengan pencampuran 15% *fly ash*.
3. Untuk mengetahui pengaruh stabilisasi tanah lempung ekspansif di Bojonegoro dengan metode *Deep Soil Mix* dengan bahan aditif 15% *fly ash* terhadap nilai pengembangan (*swelling*) tanah.

### Tinjauan Pustaka

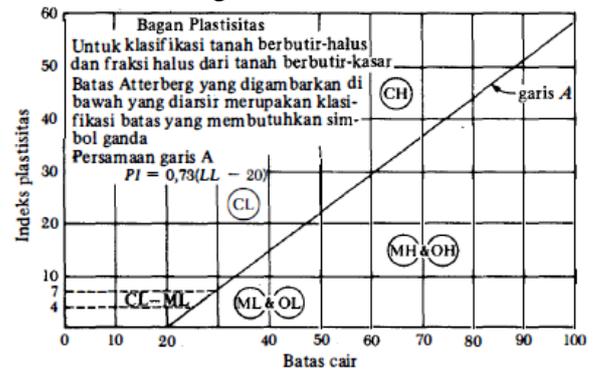
#### Pengertian Tanah Ekspansif

Tanah lempung ekspansif memiliki sifat yang khas yaitu kandungan mineralnya memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi, mengakibatkan lempung ekspansif memiliki potensi kembang susut yang tinggi apabila terjadi perubahan kadar air. Pada peningkatan kadar air, tanah ekspansif akan mengembang disertai dengan peningkatan tekanan air pori dan timbulnya tekanan kembang. Bila kadar airnya berkurang sampai batas susutnya, akan terjadi penyusutan. Sifat kembang susut yang demikian dapat menyebabkan kerusakan pada bangunan di atasnya. (Hardiyatmo, 2006)

#### Klasifikasi Tanah Berdasarkan Unified Soil Classification System (USCS)

Dalam sistem ini, tanah diklasifikasikan ke dalam dua jenis utama yaitu:

1. Tanah berbutir kasar (*coarse – grained soils*) yang terdiri atas kerikil dan pasir yang mana kurang dari 50% tanah yang lolos saringan No. 200.
2. Tanah berbutir halus (*fine-grained soils*) yang mana lebih dari 50% tanah lolos saringan No.200.



**Gambar 1** Grafik Plastisitas untuk klasifikasi tanah USCS

#### Mineral Tanah lempung Ekspansif

Menurut Chen (1975), mineral lempung terdiri dari tiga komponen penting yaitu *montmorillonite*, *illite*, dan *kaolinte*. Mineral *montmorillonite* mempunyai luas permukaan lebih besar dan sangat mudah menyerap air dalam jumlah banyak bila dibandingkan dengan mineral lainnya, sehingga tanah yang mempunyai kepekaan terhadap pengaruh air ini sangat mudah mengembang.

#### Identifikasi Tanah Lempung Ekspansif

Potensi pengembangan tanah ekspansif dapat diklasifikasikan berdasarkan indeks plastisitasnya serta batas-batas *atterberg*.

**Tabel 1** Hubungan Potensial Mengembang Dengan Indeks Plastisitas (Chen,1975)

| Potensi Mengembang | Indeks Plastisitas (IP) |
|--------------------|-------------------------|
| Rendah             | 0 - 15                  |
| Sedang             | 10 - 35                 |
| Tinggi             | 20 - 55                 |
| Sangat Tinggi      | 35 <                    |

**Tabel 2** Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI (Altmeyer, 1955)

| Batas susut Atterberg (%) | Susut linier (%) | Derajat mengembang |
|---------------------------|------------------|--------------------|
| <10                       | 8 <              | Kritis             |
| 10-12                     | 5-8              | Sedang             |
| >12                       | 0-8              | Tidak kritis       |

Skempton (1953), mendefinisikan sebuah besaran yang dinamakan aktivitas dalam rumus sebagai berikut:

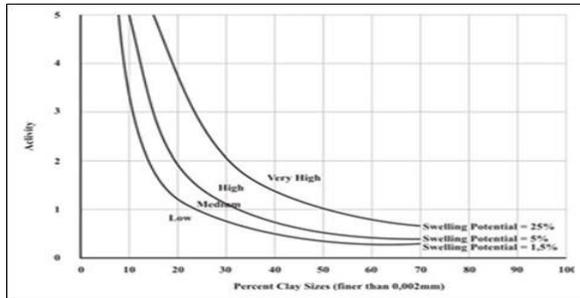
$$\text{Activity (A)} = \frac{PI}{C} \quad (1)$$

Dimana :

A = Aktivitas

PI = Indeks Plastisitas

C = Prosentase lempung <0,002mm



**Gambar 2** Grafik klasifikasi potensi mengembang (Seed et al., 1962)

**Tabel 3** Klasifikasi Tanah Ekspansif Berdasarkan Kadar Koloid

| Data Indeks Properties |                  |                      | % Total Volume Change | Degree of Ekspansion |
|------------------------|------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|
| Colloid (< 0,00 mm)    | Liquid Limit (%) | Standart Penetration |                       |                      |
| > 28                   | > 35             | < 11                 | > 30                  | Very High            |
| 20 - 13                | 25 - 41          | 7 - 12               | 20 - 30               | High                 |
| 13 - 23                | 15 - 28          | 10 - 16              | 10 - 20               | Medium               |
| < 15                   | < 28             | > 15                 | < 10                  | Low                  |

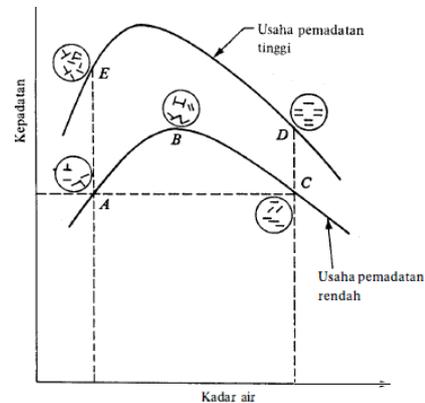
Sumber: Holtz dan Gibbs (1956)

#### Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan

Lambe (1958) mengutip dari Das (1995) mengatakan bahwa sifat-sifat tanah lempung setelah dipadatkan akan bergantung pada cara atau usaha pemadatan, macam tanah, kadar air pada saat dipadatkan. Lambe (1958) telah menyelidiki pengaruh pemadatan terhadap struktur tanah

lempung dan hasil penyelidikan seperti terlihat pada Gambar 3.

Kekuatan tanah lempung yang dipadatkan umumnya berkurang dengan bertambahnya kadar air. Hal ini dapat diperhatikan bahwa pada kadar air optimum, terjadi penurunan kekuatan tanah yang besar. Ini berarti bahwa pada dua contoh tanah yang dipadatkan pada berat volume kering yang sama, yang satu dipadatkan pada sisi kering dan yang lainnya pada sisi basah dari kadar air optimum (yang memiliki struktur terfokulasi) akan mempunyai kekuatan yang lebih besar



**Gambar 3** Pengaruh Pemadatan pada Struktur Tanah Lempung (Das, 1995)

#### Daya Dukung Tanah

Menurut Hardiyatmo (2011), daya dukung tanah (*bearing capacity*) adalah kemampuan tanah untuk mendukung beban pondasi dari struktur yang terletak di atasnya. Kapasitas dukung ultimit (*ultimit bearing capacity*) ( $q_u$ ) didefinisikan sebagai beban maksimum per satuan luas dimana tanah masih dapat mendukung beban tanpa mengalami keruntuhan. Bila dinyatakan dalam persamaan, maka:

$$q_u = \frac{P_u}{A} \quad (2)$$

dengan,  $q_u$  = kapasitas dukung ultimit ( $\text{kN/m}^2$ )

$P_u$  = beban ultimit (kN)

$A$  = luas pondasi ( $\text{m}^2$ )

Berdasarkan hasil uji model, menurut Vesic (1963) sebagaimana yang dikutip Hardiyatmo (2011), membagi mekanisme keruntuhan pondasi menjadi 3 macam:

1. Keruntuhan geser umum (*general shear failure*),
2. Keruntuhan geser lokal (*local shear failure*), dan
3. Keruntuhan penetrasi (*penetration failure atau punching shear failure*).

#### Stabilisasi Tanah Lempung dengan Fly Ash

*Fly ash* merupakan material yang memiliki butiran yang halus, berwarna keabu-abuan, dan diperoleh dari hasil pembakaran batu bara pada pembangkit tenaga listrik.

Menurut ASTM C618, *fly ash* dibagi menjadi 2 kelas yaitu *fly ash* kelas F ( $\text{CaO} < 10\%$ ) dan *fly ash* kelas C ( $\text{CaO} > 10\%$ ). Perbedaan utama dari kedua *fly ash* tersebut adalah banyaknya unsur kalsium, silika, aluminium, dan kadar besi dalam *ash*.

Penambahan *fly ash* pada tanah ekspansif dimaksudkan agar terjadi reaksi *pozzolanic*, yaitu reaksi antara kalsium yang terdapat dalam *fly ash* dengan alumina dan silikat yang terdapat dalam tanah, sehingga menghasilkan masa yang keras dan kaku. Penambahan *fly ash* selain memperkaya kandungan alumina dan silika tanah, juga memperbaiki gradasi tanah. (Budi et al., 2005:21)

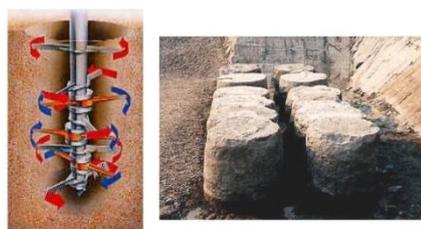
Ria (2010) melakukan penelitian dengan melakukan variasi penambahan *fly ash* dengan kadar 5%, 10%, 15%, dan 20% pada tanah ekspansif di Lubuk Pakam, Sumatra Utara. Dengan adanya penambahan kadar *fly ash* serta variasi waktu perawatan (*curing*) dapat meningkatkan nilai CBR. Peningkatan terjadi secara signifikan pada penambahan kadar *fly ash* 15% dengan waktu perawatan 4 -7 hari.

Benny (2014), dengan menambahkan campuran 15% *fly ash* sebagai kadar optimum pada tanah ekspansif di Bojonegoro, Jawa Timur dengan variasi

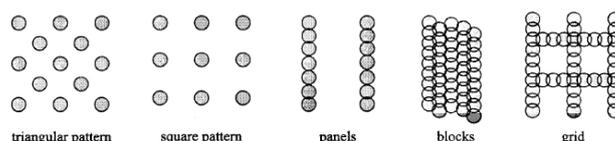
perawatan 0, 7, 14, dan 28 hari. Dengan penambahan 15% *fly ash* serta semakin lamanya waktu perawatan, nilai CBR terus mengalami peningkatan. Dengan waktu perawatan selama 28 hari, diperoleh nilai CBR terbesar yaitu 16,948% (meningkat sebesar 433,6%) dan nilai *swelling* terkecil yaitu 0,381% (menurun hingga 1045,1%). Namun, waktu efektif yang dibutuhkan untuk perawatan adalah 14 hari dimana nilai CBR meningkat secara signifikan.

#### Metode Deep Soil Mix

*Deep Soil Mixing* (DSM) berguna untuk stabilisasi tanah pada lapisan dalam dan merupakan stabilisasi *in-situ* dimana pengikat basah atau kering dimasukkan ke dalam tanah dan dicampur dengan tanah lunak dengan cara mekanik atau dengan alat pencampur berupa bor atau *auger*. Pengikat tersebut bisa berupa bahan aditif seperti semen, kapur, campuran semen-kapur dan/atau bahan aditif lainnya. Limbah industri termasuk *slag* dan *ash* juga dapat digunakan sebagai bahan aditif untuk meningkatkan sifat-sifat tanah. Mirja Kosche (2004) mengatakan bahwa metode ini berguna untuk mengurangi penurunan dan/atau meningkatkan stabilitas tanah.



**Gambar 4** Proses Deep Soil Mixing (DSM) dan Hasil Kolom DSM (Annad et al., 2008)



**Gambar 5** Konfigurasi Kolom DSM (Mirja, 2004)

Agus (2009) telah melakukan penelitian mengenai kekuatan kolom-kapur

pada tanah lunak di daerah Bantul-Yogyakarta dengan menggunakan kolom kapur tunggal berdiameter 50 mm dengan panjang 200 mm dan diletakkan di dalam kotak baja berukuran (1,2×1,2×1) m. Hasil pengujian menyatakan bahwa seiring dengan penambahan kadar kapur, kuat dukung tanah meningkat dari 0,23 kN menjadi 5,2 kN setelah diperkuat dengan kolom-kapur. Pemasangan kolom-kapur meningkatkan kekuatan tanah disekitarnya hingga mencapai 3×D dari pusat kolom-kapur.

Ailin Nur et al. (2011) yang meneliti tentang daya dukung tanah yang distabilisasi dengan kolom kapur-semen yang ditambahkan *Pulverized Fuel Ash* (PFA) di Malaysia dengan model laboratorium dengan tipe *square column*. Diperoleh hasil bahwa setelah *curing* 28 hari dengan menambahkan 40% PFA dan 15% kapur dapat meningkatkan kekuatannya 2 sampai 3 kali dari tanah asli. Namun, ketika kapur diganti dengan semen, peningkatan kekuatan tanah terjadi secara signifikan yaitu hingga 5 kali dari tanah asli. Penggunaan PFA dengan kadar lebih dari 50% dan menurunkan kekuatan tanah.

#### Uji Beban (Load Test)

Das (1995) menyatakan bahwa dalam beberapa keadaan, uji beban (*load test*) dilakukan untuk menentukan daya dukung batas pondasi yang bersangkutan. Metode yang baku mengenai uji beban di lapangan diatur oleh ASTM (*American Society for Testing and Materials*) nomor D-1194. Diperlukan adanya pelat dukung (*bearing plate*) untuk mendukung pelaksanaan uji beban pada pondasi.

Apabila digunakan hasil uji beban (*load test*), maka daya dukung batas tanah ( $q_u$ ) yang bersangkutan untuk pondasi dangkal dapat dihitung dengan metode pendekatan berikut:

$$\begin{aligned} &\text{Untuk tanah lempung:} \\ &q_{u(\text{pondasi})} = q_{u(\text{pelat})} \quad (3) \\ &\text{Untuk tanah pasir:} \end{aligned}$$

$$q_{u(\text{pondasi})} = q_{u(\text{pelat})} \frac{B_{(\text{pondasi})}}{B_{(\text{pelat})}} \quad (4)$$

#### Uji Kembang Susut (Swelling)

*Swelling* adalah bertambahnya volume tanah secara perlahan-lahan akibat tekanan air pori berlebih negatif. Pengujian ini bertujuan untuk menentukan nilai *swell* akibat adanya beban vertikal. Hal ini terjadi akibat air yang masuk ke pori-pori tanah dan menyebabkan perubahan isi pori tanah sehingga tekanan vertikal bekerja pada tanah tersebut. Secara umum sifat kembang susut tanah lempung tergantung pada sifat plastisitasnya, semakin plastis mineral lempung semakin potensial untuk menyusut dan mengembang.

#### Metode Penelitian

Metode penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 6 berikut ini:



**Gambar 6** Diagram Alir Penelitian

Pemodelan benda uji dilakukan di dalam box ukuran (50×50×30) cm dengan kedalaman tanah dasar 20 cm. Pada pemodelan benda uji yang distabilisasi kolom DSM, dilakukan variasi jarak dan panjang kolom dimana masing-masing variasi tersebut dilakukan uji beban. Variasi jarak antar kolom yaitu 1×D, 1,25×D, dan 1,5×D, sedangkan variasi panjang kolom adalah 1×B, 2×B, dan 3×B, dimana D adalah diameter kolom (D) = 2 cm dan B adalah lebar pelat beban dengan B = 5 cm.

### Hasil dan Pembahasan

#### Pemeriksaan Specific Gravity

Dari hasil pengujian, diperoleh nilai *specific gravity* ( $G_s$ ) tanah asli sebesar 2,73. Dengan besar nilai tersebut, maka tanah di Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro tergolong dalam klasifikasi tanah lempung anorganik dengan kandungan dominan mineral yaitu *montmorillonite*.

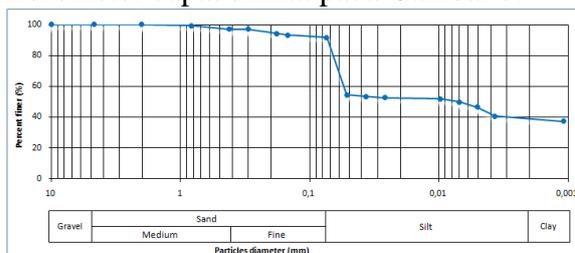
**Tabel 4** Hasil Pengujian *Specific Gravity* Tanah Asli

| Labu Ukur                         | A     | B     | C     |
|-----------------------------------|-------|-------|-------|
| <i>Specific gravity</i> ( $G_s$ ) | 2,713 | 2,753 | 2,724 |
| Rata-rata ( $G_s$ )               | 2,730 |       |       |

#### Klasifikasi Tanah

##### Analisis Mekanis Tanah

Analisis saringan dilakukan untuk ukuran buiran tanah berdiameter lebih besar dari 0,075 mm (tertahan saringan no.200). Sedangkan analisis hidrometer dilakukan untuk ukuran buiran tanah berdiameter lebih kecil dari 0,075 mm (lolos saringan no.200). Hasil analisis saringan dan hidrometer dapat dilihat pada Gambar 7.



**Gambar 7** Grafik Hasil Analisis Saringan dan Hidrometer

Dari hasil analisis, tanah di Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro memiliki prosentase lolos saringan no.200 sebesar 91,83% dan menurut sistem klasifikasi USCS (*Unified Soil Classification System*) termasuk jenis tanah berbutir halus.

#### Pemeriksaan Batas-batas Atterberg (*Atterberg Limit*)

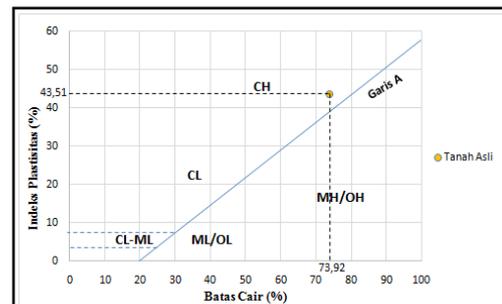
Pengujian batas-batas *atterberg* bertujuan untuk mengetahui keadaan konsistensi tanah berbutir halus pada kadar air yang berbeda-beda dan juga bertujuan untuk menentukan jenis tanah. Hasil dari pengujian batas-batas *Atterberg* ditampilkan pada Tabel 5.

**Tabel 5** Hasil Pengujian Batas-batas *Atterberg*

| Bahan      | LL (%) | PL (%) | SL (%) | PI (%) |
|------------|--------|--------|--------|--------|
| Tanah Asli | 73,92  | 30,41  | 2,8    | 43,51  |

#### Sistem Klasifikasi Tanah *Unified*

Berdasarkan sistem klasifikasi tanah *unified*, melihat dari hasil analisis butiran dan dari batas-batas *atterberg*, maka tanah sampel tergolong sebagai tanah CH (lempung anorganik dengan plastisitas tinggi).

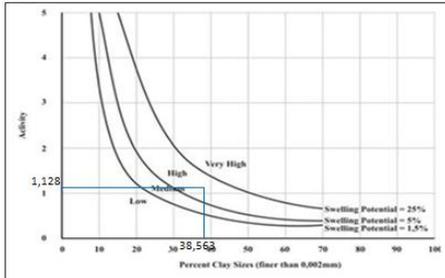


**Gambar 8** Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Sistem *Unified*

#### Sifat Ekspansifitas

Berdasarkan rumus 1, nilai aktivitas tanah (A) dapat dihitung. Diketahui nilai PI sebesar 43,51% dan prosentase tanah dengan ukuran 0,002 mm adalah 38,563%. Sehingga diperoleh nilai aktivitas tanah asli adalah 1,128. Setelah itu, nilai aktivitas dan

prosentase ukuran tanah diplotkan ke dalam Gambar 2. Dari grafik tersebut dapat diketahui bahwa tanah tergolong klasifikasi tanah dengan potensi pengembangan tinggi.

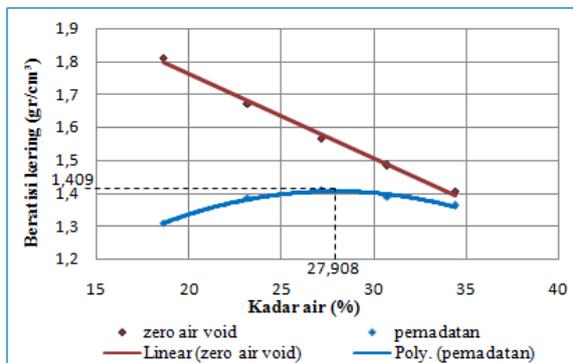


**Gambar 9** Grafik Klasifikasi Tanah Berdasarkan Potensi Mengembang

Jika mengacu pada nilai batas-batas *atterberg*, tanah dapat diklasifikasikan sifat ekspansifitasnya menurut Tabel 1, Tabel 2, dan Tabel 3. Sehingga dapat diketahui bahwa tanah di Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro tergolong ke dalam tanah yang memiliki potensi pengembangan sangat tinggi/kritis.

*Pemeriksaan Pemadatan Tanah  
Kepadatan Tanah Standar (Proctor Test)*

Hasil pengujian pemadatan standar pada tanah asli dapat dilihat pada Gambar 8, sedangkan yang telah dicampur dengan 15% *fly ash* didapat dari penelitian terdahulu oleh Benny (2014).



**Gambar 10** Grafik Perbandingan Hasil Pemadatan

**Tabel 6** Berat Isi kering dan Kadar Air Optimum

| Komposisi Tanah                 | Berat Isi Kering Maksimum (gr/cm <sup>3</sup> ) | Kadar Air Optimum (%) |
|---------------------------------|-------------------------------------------------|-----------------------|
| Tanah Asli                      | 1,409                                           | 27,908                |
| Tanah Asli + 15% <i>Fly Ash</i> | 1,488                                           | 25,824                |

Data pada Tabel 6 di atas akan digunakan sebagai data acuan untuk pemadatan benda uji tanah asli yang akan dimodelkan di dalam *box* berukuran (50×50×30) cm dan benda uji tanah yang distabilisasi dengan kolom *Deep Soil Mix* (DSM) dengan bahan aditif 15% *fly ash*.

*Kepadatan Tanah Model*

Pemeriksaan kepadatan dilakukan dengan alat *density ring* pada benda uji model yang terdiri dari 2 jenis, yaitu kepadatan untuk tanah dasar dan kepadatan untuk kolom DSM. Untuk tanah dasar, diperoleh berat isi kering sebesar 1,28 gr/cm<sup>3</sup> dan nilai ini tidak mencapai berat isi kering yang direncanakan. Sehingga untuk kepadatan tanah dasar digunakan kepadatan relatif ( $R_c$ ) sebesar 90,954%. Sedangkan untuk kepadatan kolom DSM, diperoleh berat isi kering yang besarnya masih pada kisaran 1,488 gr/cm<sup>3</sup> dan nilai ini mencapai berat isi kering yang direncanakan.

*Uji Beban pada Model Benda Uji*

Uji beban (*load test*) dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui nilai daya dukung batas (*ultimite bearing capacity*)( $q_u$ ) pada pondasi. *Bearing plate* ukuran (5×5×2) cm diletakkan di atas 2 jenis benda uji, yaitu benda uji tanah asli/dasar dan benda uji tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM dengan bahan aditif berupa 15% *fly ash* yang diberi variasi jarak (L) dan panjang kolom ( $D_f$ ). *Bearing plat* berfungsi untuk mendistribusikan beban yang diterima dari piston hidrolik.

Keruntuhan daya dukung yang terjadi yaitu keruntuhan penetrasi, karena tanah lempung ekspansif tergolong jenis tanah

lunak dan mudah mampat, sehingga pola keruntuhan pada pengujian ini tidak dapat terlihat dengan jelas.

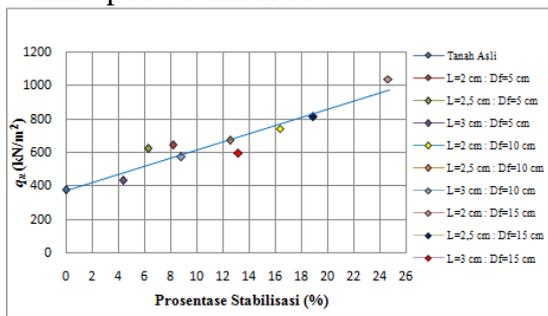
*Hasil Uji Beban (Load Test)*

*Analisis Daya Dukung Tanah*

Pada penelitian ini, metode analisis daya dukung yang digunakan adalah metode eksperimen yang diperoleh langsung dari data hasil uji pembebanan. Metode analitik tidak dilakukan karena percobaan laboratorium yang menghasilkan data-data pendukung perencanaan seperti kohesi (C) dan sudut geser ( $\phi$ ) tidak dilakukan. Analisis daya dukung dilakukan pada masing-masing variasi jarak antar kolom dan panjang kolom. Hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui variasi manakah yang paling berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah.

*a. Nilai daya dukung tanah terhadap prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM*

Prosentase tanah yang distabilisasi dengan kolom DSM dihitung pada area tanah yang menerima uji beban atau seluas *bearing plate*, yaitu 25 cm<sup>2</sup> dengan kedalaman 20 cm. Hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 11.



**Gambar 11** Grafik Daya Dukung terhadap Prosentase tanah Stabilisasi

Dari Gambar 11, dapat diketahui bahwa hubungan nilai daya dukung dengan prosentase stabilisasi tanah dengan kolom DSM adalah berbanding lurus. Semakin besar prosentase tanah yang

distabilisasi, semakin besar pula nilai daya dukung yang didapatkan.

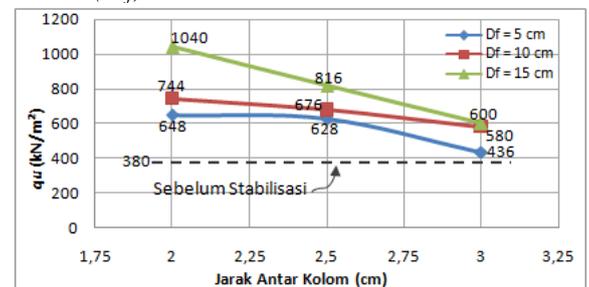
*b. Nilai daya Dukung Tanah pada Variasi Panjang Kolom (Df) Terhadap Jarak Antar Kolom (L)*



**Gambar 12** Perbandingan Nilai Daya Dukung terhadap Variasi Panjang Kolom

Dari Gambar 12, dapat dilihat bahwa nilai  $q_u$  tanah asli adalah 380 kN/m<sup>2</sup>. Setelah tanah distabilisasi dengan kolom DSM, nilai  $q_u$  terus mengalami peningkatan seiring dengan penambahan panjang kolom ( $D_f$ ) pada jarak antar kolom (L) yang sama. Hal ini terjadi karena prosentase tanah yang distabilisasi menjadi lebih besar dan juga kepadatan tanah di sekitar kolom meningkat, sehingga nilai daya dukungnya menjadi lebih besar. Nilai daya dukung maksimum terletak pada panjang kolom terbesar ( $D_f = 15$  cm).

*c. Nilai daya dukung tanah pada variasi jarak antar kolom (L) terhadap panjang kolom (Df)*



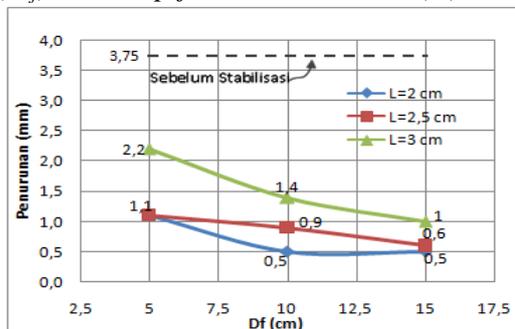
**Gambar 13** Perbandingan Nilai Daya Dukung terhadap Variasi Jarak Antar Kolom

Dari Gambar 13, dapat dilihat bahwa nilai  $q_u$  mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom pada panjang kolom yang sama. Semakin besar jarak antar kolom, prosentase tanah yang distabilisasi menjadi semakin kecil. Namun, peningkatan nilai daya dukung sangat signifikan terjadi pada kolom dengan jarak antar kolom 2 cm (antar kolom bersinggungan). Agus (2009) menjelaskan bahwa pemasangan kolom tunggal DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah di sekitarnya hingga jarak  $3 \times D$  dari pusat kolom. Dengan demikian, kolom DSM dalam bentuk kelompok tentunya akan meningkatkan nilai daya dukung tanah, terlebih jika jarak antar kolomnya semakin berdekatan. Nilai daya dukung maksimum terletak pada jarak antar kolom terkecil ( $L = 2$  cm).

#### Analisis Penurunan Tanah

Besarnya penurunan (*settlement*) dapat langsung didapatkan dari grafik hubungan daya dukung dengan penurunan dari hasil uji beban. Untuk tanah asli, diperoleh besarnya penurunan yaitu 3,75 mm dengan nilai daya dukung  $380 \text{ kN/m}^2$ . Besarnya penurunan pada masing-masing variasi jarak dan panjang kolom ditinjau dari daya dukung yang sama yaitu  $380 \text{ kN/m}^2$ .

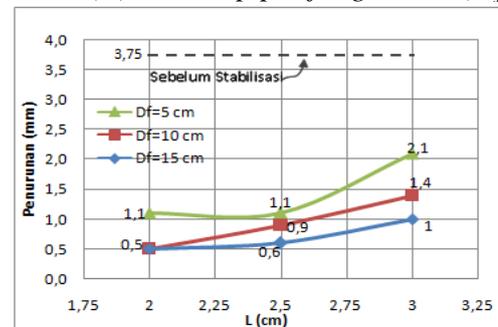
#### a. Penurunan tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi panjang kolom ( $D_f$ ) terhadap jarak antar kolom ( $L$ )



**Gambar 14** Perbandingan Penurunan terhadap Variasi Panjang Kolom

Dari Gambar 14, dapat dilihat bahwa besarnya *settlement* berbanding terbalik dengan panjang kolom, dimana besarnya *settlement* akan semakin menurun seiring dengan bertambahnya panjang kolom. Hal ini terjadi karena bertambahnya panjang kolom, nilai daya dukung juga meningkat yang menyebabkan besarnya *settlement* akan menjadi berkurang. Panjang kolom terbesar ( $D_f = 15$  cm) memberikan nilai *settlement* terkecil.

#### b. Penurunan tanah yang distabilisasi kolom DSM pada variasi jarak antar kolom ( $L$ ) terhadap panjang kolom ( $D_f$ )



**Gambar 15** Perbandingan Penurunan terhadap Variasi Jarak Antar Kolom

Dari Gambar 15, dapat dilihat bahwa besarnya *settlement* berbanding lurus dengan jarak antar kolom, dimana besarnya *settlement* akan semakin meningkat seiring dengan bertambahnya jarak antar kolom. Hal ini terjadi karena jarak antar kolom yang semakin jauh, nilai daya dukungnya akan menurun yang menyebabkan bertambahnya nilai *settlement*.

Faktor pengaruh pelaksanaan uji beban dan pemadatan kolom DSM berpengaruh terhadap besar-kecilnya *settlement*. Karena uji beban dilakukan secara manual menggunakan menggunakan *hydraulic pump*, penetrasi beban yang diberikan mungkin tidak konstan (lebih cepat atau lebih lambat) karena faktor *human error* sehingga *settlement* yang

terjadi pun bisa lebih besar atau lebih kecil. Selain itu, sebelum uji beban dilakukan, kelebihan kolom DSM akan diratakan terlebih dahulu, sehingga hal ini lah yang menyebabkan kepadatan pada permukaan kolom berkurang yang menyebabkan *settlement* menjadi konstan atau bahkan lebih besar jika dibandingkan dengan kolom yang menghasilkan nilai *settlement* yang lebih besar. Jarak antar kolom terkecil ( $L = 2$  cm) memberikan nilai *settlement* terkecil.

*Analisis Bearing Capacity Improvement (BCI<sub>u</sub>) Berdasarkan pada Daya Dukung Batas*

Analisis ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar peningkatan nilai daya dukung yang terjadi akibat adanya stabilisasi dengan kolom DSM yang diberi variasi jarak antar kolom dan panjang kolom. Selain itu juga, dari analisis BCI<sub>u</sub> ini dapat diketahui manakah variasi yang lebih berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah.

*a. Perbandingan BCI<sub>u</sub> pada Variasi Panjang Kolom (D<sub>f</sub>) Terhadap Jarak Antar Kolom (L)*

**Tabel 7** Hasil Analisis BCI<sub>u</sub> pada Variasi Panjang Kolom

| (L) | (D <sub>f</sub> ) | q <sub>u</sub>    | q <sub>u</sub> tanah sebelum distabilisasi | BCI <sub>u</sub> | Peningkatan BCI <sub>u</sub> |
|-----|-------------------|-------------------|--------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| cm  | cm                | kN/m <sup>2</sup> | kN/m <sup>2</sup>                          | (%)              | (%)                          |
| 2   | 5                 | 648               | 380                                        | 170,526          | 25,263                       |
|     | 10                | 744               | 380                                        | 195,789          |                              |
|     | 15                | 1040              | 380                                        | 273,684          |                              |
| 2,5 | 5                 | 628               | 380                                        | 165,263          | 12,632                       |
|     | 10                | 676               | 380                                        | 177,895          |                              |
|     | 15                | 816               | 380                                        | 214,737          |                              |
| 3   | 5                 | 436               | 380                                        | 114,737          | 37,895                       |
|     | 10                | 580               | 380                                        | 152,632          |                              |
|     | 15                | 600               | 380                                        | 157,895          |                              |

Berdasarkan pada Tabel 7, dapat diketahui bahwa bertambahnya panjang kolom (D<sub>f</sub>) akan meningkatkan nilai daya dukung dan BCI<sub>u</sub>. Peningkatan nilai daya dukung terjadi sangat signifikan pada kolom D<sub>f</sub> = 15 cm dengan L = 2 cm,

yaitu meningkat sebesar 173,648% dari tanah sebelum distabilisasi.

*b. Perbandingan BCI<sub>u</sub> pada Variasi Jarak Antar Kolom (L) Terhadap Panjang Kolom (D<sub>f</sub>)*

**Tabel 8** Hasil Analisis BCI<sub>u</sub> pada Variasi Jarak antar Kolom

| (D <sub>f</sub> ) | (L) | q <sub>u</sub>    | q <sub>u</sub> tanah sebelum distabilisasi | BCI <sub>u</sub> | Peningkatan BCI <sub>u</sub> |
|-------------------|-----|-------------------|--------------------------------------------|------------------|------------------------------|
| cm                | cm  | kN/m <sup>2</sup> | kN/m <sup>2</sup>                          | (%)              | (%)                          |
| 5                 | 2   | 648               | 380                                        | 170,526          | 5,263                        |
|                   | 2,5 | 628               | 380                                        | 165,263          |                              |
|                   | 3   | 436               | 380                                        | 114,737          |                              |
| 10                | 2   | 744               | 380                                        | 195,789          | 17,895                       |
|                   | 2,5 | 676               | 380                                        | 177,895          |                              |
|                   | 3   | 580               | 380                                        | 152,632          |                              |
| 15                | 2   | 1040              | 380                                        | 273,684          | 58,947                       |
|                   | 2,5 | 816               | 380                                        | 214,737          |                              |
|                   | 3   | 600               | 380                                        | 157,895          |                              |

Dari Tabel 8, dapat diketahui bahwa bertambahnya jarak antar kolom (D<sub>f</sub>) akan mengakibatkan menurunnya nilai daya dukung dan BCI<sub>u</sub>. Peningkatan nilai daya dukung terjadi sangat signifikan pada jarak antar kolom 2 cm (antar kolom bersinggungan), yaitu meningkat sebesar 173,684% (sama dengan peningkatan panjang kolom 15 cm pada Tabel 7) dari tanah sebelum distabilisasi.

*Pengaruh Variasi Jarak Antar Kolom (L) dan Panjang Kolom (D<sub>f</sub>) Terhadap Nilai Daya Dukung dan Penurunan Tanah*

Secara umum, stabilisasi tanah ekspansif dengan kolom DSM 15% *fly ash* terbukti dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah. Hal ini dapat terjadi karena adanya pengaruh penambahan nilai kepadatan tanah dan bahan aditif 15% *fly ash*. Seperti yang telah diketahui bahwa bahan stabilisasi berupa *fly ash* memiliki sifat *pozzolanic* yaitu sifat yang mampu untuk mengeras sendiri dan menambah kekuatan apabila bereaksi dengan air. Selain itu, rekasi antara kalsium yang terdapat dalam *fly ash* dengan alumina dan silikat yang terdapat dalam tanah dapat menghasilkan massa yang keras dan kaku,

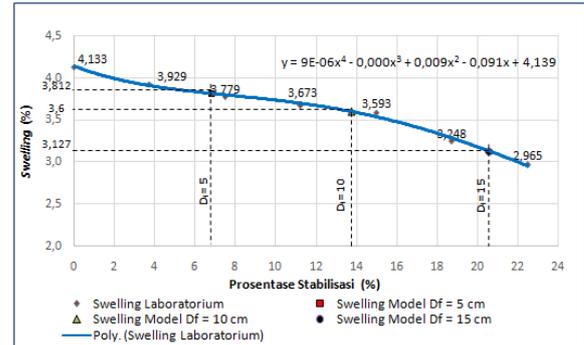
sehingga dapat meningkatkan nilai daya dukung tanah.

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan, diketahui bahwa semakin besar prosentase tanah yang distabilisasi, semakin besar pula nilai daya dukung yang diperoleh. Kemudian, semakin besar jarak antar kolom, maka nilai daya dukung menjadi semakin kecil. Sedangkan, semakin besar panjang kolom, semakin besar pula nilai daya dukung yang didapatkan. Selain itu juga, variasi jarak dan panjang kolom berpengaruh terhadap besarnya penurunan (*settlement*). Nilai *settlement* akan semakin besar seiring bertambahnya jarak antar kolom, namun akan semakin kecil seiring bertambahnya panjang kolom.

Dari hasil eksperimen, diperoleh prosentase terbesar tanah yang distabilisasi yaitu 24,565% dengan nilai daya dukung ( $q_u$ ) sebesar 1040 kN/m<sup>2</sup> yang terletak pada kolom dengan jarak antar kolom terkecil (L) 2 cm dan panjang kolom terbesar ( $D_f$ ) 15 cm. Variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh lebih besar terhadap meningkatnya nilai daya dukung dan berkurangnya *settlement* tanah.

#### Pemeriksaan Pengembangan (*Swelling*)

Uji pengembangan (*swelling*) ini dilakukan dengan kadar air optimum (OMC) dengan memberikan variasi jumlah kolom DSM dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh prosentase tanah yang distabilisasi terhadap nilai *swelling*. Nilai *swelling* pada benda uji yang dimodelkan di dalam *box* dapat diketahui dengan mengplotkan besarnya prosentase stabilisasi dalam *box* pada grafik hasil uji *swelling* laboratorium (Gambar 16).



**Gambar 16** Grafik Persentase Stabilisasi Terhadap Nilai *Swelling*  
Sumber: Rahmawati (2015)

Dari Gambar 16, dapat diketahui bahwa nilai *swelling* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya prosentase tanah yang distabilisasi kolom DSM. Hal ini terjadi karena adanya reaksi *pozzolanic* yang ditimbulkan oleh *fly ash* yang semakin memperkuat ikatan antar butiran tanah sehingga penyerapan air yang terjadi menjadi lebih sedikit. Tanah yang distabilisasi kolom DSM dengan panjang 15 cm memberikan nilai *swelling* yang paling kecil yaitu sebesar 3,127% dan menurun sebesar 24,326% dari tanah sebelum distabilisasi. Dengan demikian, panjang kolom yang paling besar memberikan pengaruh paling besar terhadap penurunan nilai *swelling*.

#### Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisa dan pembahasan hasil penelitian, maka didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Variasi jarak dan panjang kolom tipe *Panels* diameter 2 cm berpengaruh terhadap peningkatan nilai daya dukung tanah. Semakin besar jarak antar kolom, nilai daya dukung semakin menurun. Sedangkan, semakin besar panjang kolom, nilai daya dukung semakin meningkat. Variasi jarak antar kolom memberikan pengaruh lebih besar terhadap

peningkatan nilai daya dukung tanah dari pada variasi panjang kolom.

2. Jarak dan panjang optimum kolom yang dapat menghasilkan nilai daya dukung maksimum yaitu jarak antar kolom terkecil dengan panjang kolom terbesar.
3. Stabilisasi tanah ekspansif di Bojonegoro dengan metode *Deep Soil Mix* dengan bahan aditif 15% *fly ash* dapat menurunkan nilai pengembangan (*swelling*) tanah.

Dari analisis dan pembahasan hasil penelitian yang telah dilakukan, maka muncul saran-saran untuk pengembangan penelitian tentang stabilisasi tanah metode *Deep Soil Mix* lebih lanjut. Saran-saran yang dapat diberikan antara lain:

1. Perlu dilakukan variasi lama waktu pemeraman benda uji untuk mendapatkan waktu yang diperlukan tanah untuk mendapatkan nilai daya dukung optimum.
2. Perlu dilakukan penambahan variasi jarak dan panjang kolom untuk mengetahui jarak dan panjang yang optimum dimana nilai daya dukung tanah tidak mengalami peningkatan lagi.
3. Perlu diadakan penelitian lanjutan dengan bahan aditif yang lebih bervariasi untuk mengetahui besarnya nilai daya dukung tanah yang didapatkan.
4. Perlu diadakan penelitian lanjutan dengan menggunakan benda uji dari jenis tanah yang berbeda selain tanah lempung ekspansif.
5. Pemodelan benda uji sebaiknya dilakukan di dalam *box* yang lebih besar dan *rigid* agar ketika dipadatkan atau dibebani, luasan dan *volume* tanah dapat dipertahankan sesuai dengan yang direncanakan.
6. Perlu dilakukan uji laboratorium sifat mekanis tanah untuk mendapatkan kohesi (C) dan sudut geser ( $\phi$ ) tanah

yang dapat digunakan untuk analisis daya dukung metode analitik.

#### Daftar Pustaka

- Anonim. 2005. *Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan (Pd T-10-2005-B)*. Departemen Pekerjaan Umum.
- ASTM C 618-03. 2003. *Standar Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete*. United States: 100 Barr Harbor Drive.
- Bowles, J.E. 1985. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah) Edisi Kedua*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Braja M. Das. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 1*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Braja M. Das. 1993. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis) Jilid 2*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Budi, G.S., Andy Cristanto & Eddy Setiawan. 2002. Pengaruh Fly Ash Terhadap Sifat Pengembangan Tanah Ekspansif. *Civil Engineering Dimension*. Vol. 5, No. 1,20-24, Maret 2005. ISSN 1410-9550. Universitas Kristen Petra
- Chen, F.H. 1975. *Foundations on Expansive Soils*. New York: Elsevier Scientific Publishing Company.
- Cristian L.T., Benny. 2014. Pengaruh Lama Waktu Terhadap Nilai CBR dan Swelling pada Tanah Lempung Ekspansif di Bojonegoro dengan Campuran 15% Fly Ash. *Skripsi tidak dipublikasikan*. Malang: Universitas Brawijaya.
- EuroSoilStab. 2002. *Design Guide Soft Soil Stabilization*. Project No. BE 96-3177, Ministry of Transport Public Works and Management.
- Hardiyatmo, H.C. 2011. *Analisa dan Perancangan Fondasi Bagian 1*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

- Hardiyatmo, H.C. 1992 dan 2006. *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- J. Puppala, Anand et al. 2008. *Deep Soil Mixing Technology for Mitigation of Pavement Roughness*. Texas: The University of Texas at Arlington.
- Makusa, Gregory P. 2012. *Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice*. Lulea: Lulea University of Technology.
- Muntohar, Agus Setyo. 2009. Uji Model Kuat Dukung dan Karakteristik Beban-Penurunan dengan Perkuatan Kolom Kapur di Laboratorium. *Dinamika Teknik Sipil*. Akreditasi BAN DIKTI No. 110/DIKTI/Kep/2009. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.
- Nur, Ailin J.O., Hafez M.A. dan Norbaya S. 2011. Study of Bearing Capacity of Lime-Cemen Columns with Pulverized Fuel Ash for Soil Stabilization Using Laboratory Model. *Journal EJGE*. Bund. H, Vol. 16 (2011). Universitas Teknologi MARA Malaysia.
- PT Pembangkit Jawa Bali Paiton. 2002. *Material Safety Data Sheet*. Probolinggo: PT Pembangkit Jawa Bali Unit Pembangkit Paiton.
- Ria, Surta N.P. 2010. Pengaruh Pemeraman Terhadap Nilai CBR Tanah Mengembang yang Distabilisasi dengan Fly Ash. Makalah dalam *Seminar Nasional Peran Teknologi di Era Globalisasi*. Institut Teknologi Medan. Medan, 27 Februari 2010.
- Seed, H.B., Woodward R.J, & Lundgren R. 1962. Prediction of Swelling Potential for Compacted Clays. *Journal ASCE*. Soil Mechanics and Foundations Div., Vol.88
- Soedarmono, G. Djatmiko & S.J. Edy Purnomo. 1992. *Mekanika Tanah*. Yogyakarta: Penerbit Kansius (Anggota IKAPI).
- Sosrodarsono, Suyono & K. Nakazawa. 2000. *Mekanika Tanah dan Teknik Pondasi*. Jakarta: PT Pradnya Paramita.