

**PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIX* (DSM) 15%
FLY ASH DIAMETER 3 CM BERPOLA *PANELS* TERHADAP DAYA DUKUNG
TANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Disusun Oleh:

ICHVAN DANNY KURNIAWAN

115060107111002

KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN TEKNIK SIPIL

MALANG

2015

LEMBAR PERSETUJUAN

**PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIX* (DSM) 15%
FLY ASH DIAMETER 3 CM BERPOLA *PANELS* TERHADAP DAYA DUKUNG
TANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh:

ICHVAN DANNY KURNIAWAN
115060107111002

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST., MT.

NIP. 19680707 199403 2 002

Ir. Harimurti, MT.

NIP. 19641207 199002 1 001

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIX* (DSM) 15%
FLY ASH DIAMETER 3 CM BERPOLA *PANELS* TERHADAP DAYA DUKUNG
TANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO**

SKRIPSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun oleh :

ICHVAN DANNY KURNIAWAN

115060107111002

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 6 Agustus 2015

Penguji

Penguji

Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST., MT.

NIP. 19680707 199403 2 002

Ir. Harimurti, MT.

NIP. 19641207 199002 1 001

Penguji

Dr. Ir. As'ad Munawir, MT.

NIP. 195931111 198601 1 003

Mengetahui

Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

Dr.Eng. Indradi W., ST., M.Eng. (Prac.)

NIP.19810220 200604 1 002

**PERNYATAAN
ORISINALITAS SKRIPSI**

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Ichvan Danny Kurniawan

NIM : 115060107111002

Judul Skripsi : **PENGARUH VARIASI JARAK DAN PANJANG *DEEP SOIL MIX* (DSM) 15% *FLY ASH* DIAMETER 3 CM BERPOLA *PANELS* TERHADAP DAYA DUKUNG TANAH EKSPANSIF DI BOJONEGORO**

Menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa penulisan laporan skripsi ini berdasarkan hasil penelitian, pemikiran, dan pemaparan asli dari penulis sendiri, baik untuk naskah laporan maupun hasil dari penelitian yang tercantum dalam penulisan laporan skripsi ini. Jika terdapat karya orang lain, penulis akan mencantumkan sumber secara jelas.

Demikian surat pernyataan ini saya buat, semua informasi yang dimuat di dalam skripsi ini yang berasal dari hasil karya penulis lain, baik yang dipublikasikan maupun tidak, telah diberikan penghargaan dengan mengutip nama sumber penulis secara benar dan semua isi dari karya tulis ilmiah/skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab bagi penulis.

Malang, 6 Agustus 2015

Yang membuat pernyataan

Ichvan Danny Kurniawan

115060107111002

KATA PENGANTAR

Puji Syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT karena berkat Rahmat dan Karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini. Shalawat serta salam semoga senantiasa terlimpah curahkan kepada Nabi Muhammad SAW, kepada keluarganya, para sahabatnya, hingga kepada umatnya hingga akhir zaman, amin.

Penulisan skripsi ini disusun untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil Universitas Brawijaya, diharapkan dapat menjadi sumbangsih bagi ilmu pengetahuan khususnya pengembangan dalam bidang Mekanika Tanah dan Geologi Teknik. Selain itu, Dalam penyusunan dan penulisan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan, bimbingan serta dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu dalam kesempatan ini penulis dengan senang hati menyampaikan terima kasih kepada yang terhormat :

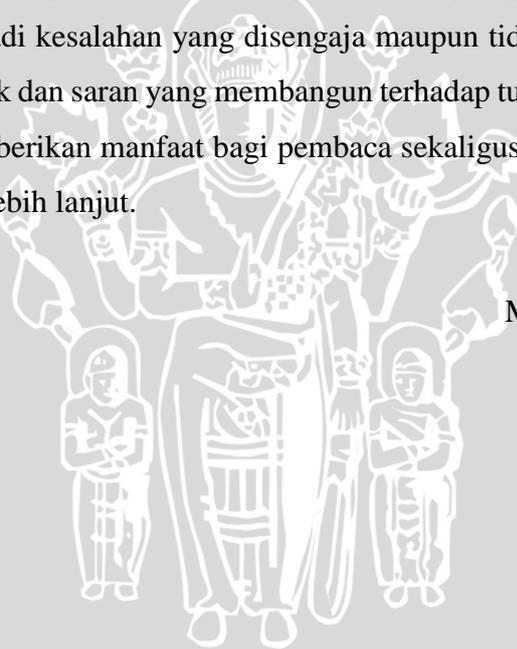
1. Ir. Sugeng P. Budio, MS. dan Ir. Siti Nurlina, MT. selaku Ketua Jurusan dan Sekretaris Jurusan yang membantu kelancaran skripsi ini.
2. Dr. Eng. Indradi Wijatmiko ST., M. Eng (Prac) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil yang membantu dan memberikan izin kepada penulis untuk melakukan kegiatan penelitian.
3. Dr. Eng. Yulvi Zaika, ST., MT. dan Ir. Harimurti, MT., sebagai dosen pembimbing atas segala arahan, masukan dan bimbingan yang telah diberikan pada pelaksanaan penelitian maupun penulisan skripsi.
4. Eko Andi Suryo, ST., MT. selaku Kepala Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi yang telah memberikan izin dalam pelaksanaan penelitian di Laboratorium.
5. Eko Andi Suryo, ST., MT., Ph.D., Ir. Suroso Dipl. HE., M. Eng., MT., Dr. Ir. Rer. Nat. Arief Rachmansyah, dan Ir. As'ad Munawir, MT., sebagai dosen Geoteknik yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
6. Bapak Ibu Dosen Teknik Sipil yang telah memberikan saran dan masukan pada skripsi ini.
7. Bapak, Ibu dan kedua kakak saya yang memberikan do'a dan dukungan moral serta materi yang membantu saya dalam penyelesaian skripsi ini.
8. Ika Meisy Putri Rahmawati, sebagai orang terkasih yang selalu memberi dukungan dan do'a untuk melancarkan penelitian ini.
9. Kepala Desa Ngasem Kabupaten Bojonegoro yang memberikan izin pengambilan sampel tanah sehingga melancarkan penelitian.

10. Mbak Indah dan Mbak Asmi sebagai Admin Laboratorium Mekanika Tanah yang telah memberi bantuan untuk kelancaran pengerjaan skripsi ini.
11. Pak Ketut sebagai Teknisi Mekanika Tanah yang telah membantu pada penelitian ini.
12. Keluarga RAMLI, Rahman, Ahya, Meisy dan Luqman yang bahu membahu dan saling menyemangati sehingga melancarkan pelaksanaan penelitian dan penulisan skripsi.
13. Warrior 11 Team, Atok, Rifqi dan Luqman yang memberi dukungan untuk penulis.
14. Keluarga Besar Mahasiswa Sipil dan Mahasiswa Teknik Sipil Angkatan 2011 serta pihak-pihak lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa proses maupun hasil dari tugas akhir ini tidak luput dari kesalahan dan jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis mengucapkan permintaan maaf sebesar-besarnya jika terjadi kesalahan yang disengaja maupun tidak disengaja. Penulis juga menerima segala kritik dan saran yang membangun terhadap tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca sekaligus dapat menjadi acuan jika dilakukan penelitian lebih lanjut.

Malang, Agustus 2015

Penyusun



RINGKASAN

Ichvan Danny Kurniawan, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2015, *Pengaruh Variasi Jarak dan Panjang Deep Soil Mix (DSM) 15% Fly Ash Diameter 3cm Berpola Panels terhadap Daya Dukung Tanah Ekspansif di Bojonegoro*, Dosen Pembimbing: Yulvi Zaika dan Harimurti

Tanah merupakan media utama dalam pembangunan konstruksi bangunan gedung maupun konstruksi jalan. Kondisi tanah di lapangan sangat mempengaruhi jenis pondasi yang digunakan oleh konstruksi di atasnya. Untuk itu mempelajari kondisi tanah yang ada sangat diperlukan, khususnya bagi seorang insinyur Teknik Sipil. Kebanyakan masalah dalam bidang keteknikan adalah tanah lempung yang merupakan tanah kohesif seperti pada tanah ekspansif. Tanah ekspansif merupakan jenis tanah yang berbahaya apabila didirikan struktur bangunan di atasnya. Tanah ekspansif memiliki sifat tanah yang kurang baik seperti plastisitas yang tinggi, kekuatan geser yang rendah, kemampatan atau perubahan volume yang tinggi, dan potensi kembang susut yang besar. Berdasarkan penelitian pendahuluan, tanah ekspansif terdeteksi di wilayah Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.

Upaya memperbaiki sifat kembang susut dan meningkatkan daya dukung tanah ekspansif dapat dilakukan dengan metode stabilitas tanah mekanik dan kimiawi. Dalam penelitian ini menggunakan stabilitas kimiawi yaitu dengan cara mencampurkan bahan *additive (fly ash)* pada tanah dengan metode *deep soil mix (DSM)*. DSM merupakan upaya perbaikan tanah dalam yang dilakukan dengan cara membuat kolom-kolom tanah dengan campuran bahan *fly ash* pada lokasi tanah yang diperbaiki.

Dalam penelitian ini dilakukan pengujian dalam *box* dengan volume sampel tanah asli $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$. Pada pengujian tanah Stabilisasi diberikan DSM diameter 3cm dengan variasi jarak (3cm; 3,75cm dan 4,5cm) dan panjang (5cm, 10cm dan 15cm) berpola *panels*. Proses pembebanan dilakukan pada tanah asli dan tanah stabilisasi. Proses pembebanan menggunakan beban vertikal dengan pelat ukuran permukaan $5 \times 5 \text{ cm}^2$. Untuk mendapatkan beban maksimum dilakukan pembacaan beban hingga tiga kali sama sehingga didapatkan daya dukung tanah. Berdasarkan hasil analisis, Jarak DSM (L) yang semakin dekat dan panjang DSM (Df) yang semakin panjang dapat meningkatkan daya dukung tanah. Berdasarkan Nilai *Bearing Capacity Improvement (BCI)*, Jarak dan panjang DSM dengan daya dukung maksimum terjadi pada L terdekat (L= 3cm) dan Df terpanjang (Df= 15cm) yang meningkatkan daya dukung sebesar 179% dari tanah asli.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengaruh panjang terlihat lebih dominan dibanding pengaruh jarak. Dibuktikan dengan rata-rata peningkatan BCI panjang lebih tinggi dibanding rata-rata peningkatan BCI jarak. Selain itu rasio volume DSM dalam tanah dapat mempengaruhi pengembangan (*swelling*) tanah. Rasio volume DSM yang semakin besar dapat mengurangi potensi pengembangan. Pada rasio volume DSM paling tinggi yaitu 19,870% memiliki persentase pengembangan (*Swelling*) paling kecil yaitu sebesar 2,892%.

Kata-kata kunci: Tanah Ekspansif, Stabilisasi Tanah, *Fly Ash*, *Deep Soil Mix*, Jarak, Panjang, Daya Dukung, *Swelling*

DAFTAR ISI

| | |
|---|-----|
| KATA PENGANTAR | i |
| RINGKASAN | iii |
| DAFTAR ISI | iv |
| DAFTAR TABEL | vi |
| DAFTAR GAMBAR | vii |
| BAB I | 1 |
| PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1. Latar Belakang | 1 |
| 1.2. Identifikasi Masalah | 4 |
| 1.3. Rumusan Masalah | 4 |
| 1.4. Pembatasan Masalah | 5 |
| 1.5. Tujuan Penelitian | 6 |
| 1.6. Manfaat Penelitian | 7 |
| BAB II | 8 |
| TINJAUAN PUSTAKA | 8 |
| 2.1. Tanah Lempung dan Mineral Lempung | 8 |
| 2.2. Tanah Lempung Ekspansif | 8 |
| 2.3. Sistem Klasifikasi Tanah | 9 |
| 2.3.1. <i>Unified Soil Classification System (USCS)</i> | 10 |
| 2.3.2. American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO) | 12 |
| 2.4. Identifikasi Lempung Berpotensi Enspansif | 14 |
| 2.4.1. Identifikasi Mineralogi | 14 |
| 2.4.2. Cara Tidak langsung (<i>single index method</i>) | 14 |
| 2.4.3. Cara Langsung | 19 |
| 2.5. Stabilisasi Tanah | 20 |
| 2.6. Metode Pencampuran Tanah dengan <i>Additive</i> untuk Stabilisasi Tanah | 25 |
| 2.6.1. <i>Shallow Soil Mix (SSM)</i> | 25 |
| 2.6.2. <i>Deep Soil Mix (DSM)</i> | 26 |
| 2.8. Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan | 31 |
| BAB III | 38 |
| METODE PENELITIAN | 38 |
| 3.1. Waktu dan Tempat | 38 |
| 3.2. Alat dan Bahan Penelitian | 38 |
| 3.3. Metode Penelitian | 39 |



| | |
|--|----|
| 3.3.1. Pengujian Pendahuluan..... | 39 |
| 3.3.2. Persiapan Benda Uji..... | 40 |
| 3.3.3. Uji Pembebanan..... | 43 |
| 3.4. Metode Analisa Data | 45 |
| 3.5. Variabel Penelitian..... | 45 |
| 3.6. Rancangan Penelitian..... | 46 |
| 3.7. Diagram Alir Penelitian..... | 48 |
| BAB IV | 49 |
| HASIL DAN PEMBAHASAN | 49 |
| 4.1. Pengujian Pendahuluan..... | 49 |
| 4.1.1. <i>Specific Gravity</i> | 49 |
| 4.1.2. Klasifikasi Tanah..... | 49 |
| 4.1.3. <i>Atterberg Limit</i> | 50 |
| 4.1.4. Sifat Ekspansifitas..... | 51 |
| 4.1.5. Pemeriksaan Pemadatan Standar | 51 |
| 4.1.6. Kepadatan Tanah Model..... | 53 |
| 4.2. Pengujian Model Test..... | 53 |
| 4.3. Hasil Pengujian | 54 |
| 4.3.1. Uji Tanah Asli..... | 54 |
| 4.3.2. Uji Tanah Stabilisasi 15% <i>Fly Ash</i> | 54 |
| 4.4. Analisis Daya Dukung Tanah..... | 56 |
| 4.4.1. Tanah Asli (tanpa stabilisasi)..... | 56 |
| 4.4.2. Tanah Stabilisasi <i>Deep Soil Mix</i> (DSM)..... | 56 |
| 4.5. Analisis <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) Berdasarkan Daya Dukung ultimit..... | 65 |
| 4.5.1. Analisis BCI pada Variasi Jarak DSM (L) | 65 |
| 4.5.2. Analisis BCI pada Variasi Panjang DSM (Df) | 67 |
| 4.5. Analisis Pengembangan (<i>Swelling</i>) | 68 |
| BAB V | 70 |
| KESIMPULAN DAN SARAN | 70 |
| 4.1. Kesimpulan | 70 |
| 4.2. Saran | 70 |
| DAFTAR PUSTAKA | 72 |



DAFTAR TABEL

| | |
|---|----|
| Tabel 2.1. Simbol untuk Klasifikasi USCS..... | 10 |
| Tabel 2.2. Unified Soil Classification System (USCS)..... | 11 |
| Tabel 2.3. <i>American Association Of State Highway and Transportation Official</i> (AASHTO)..... | 13 |
| Tabel 2.4. Hubungan potensial mengembang dengan indeks plastisitas | 15 |
| Tabel 2.5. Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP | 16 |
| Tabel 2.6. Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI..... | 16 |
| Tabel 2.7. Klasifikasi potensi mengembang didasarkan pada <i>Atteberg Limit</i> | 17 |
| Tabel 2.8. Hubungan potensi mengembang dengan tekanan mengembang | 18 |
| Tabel 2.9. Hasil pengujian stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan <i>fly ash</i> | 23 |
| Tabel 2.10. Hasil pemeriksaan pemadatan standar | 25 |
| Tabel 3.1. Pembacaan Load Cell dan Dial LVDT | 44 |
| Tabel 3.2. Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM | 46 |
| Tabel 3.3. <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) untuk variasi jarak | 47 |
| Tabel 3.4. <i>Bearing Capacity Improvement</i> (BCI) untuk variasi jarak | 47 |
| Tabel 4.1. Specific gravity tanah Kabupaten Bojonegoro | 49 |
| Tabel 4.2. Berat kebutuhan kolom DSM | 54 |
| Tabel 4.3. Beban dan penurunan hasil pengujian berdasarkan variasi jarak DSM..... | 55 |
| Tabel 4.4. Beban dan penurunan hasil pengujian berdasarkan variasi panjang DSM ... | 55 |
| Tabel 4.5. Daya dukung variasi jarak DSM dengan panjang DSM 1B= 5 cm | 57 |
| Tabel 4.6. Daya dukung variasi jarak DSM dengan panjang DSM 2B= 10 cm | 58 |
| Tabel 4.7. Daya dukung variasi jarak DSM dengan panjang DSM 3B= 15 cm | 59 |
| Tabel 4.8. Daya dukung variasi panjang DSM dengan jarak DSM 1D= 3 cm | 61 |
| Tabel 4.9. Daya dukung variasi panjang DSM dengan jarak DSM 1,25D= 3,75 cm | 62 |
| Tabel 4.10. Daya dukung variasi panjang DSM dengan jarak DSM 1,5D= 4,5 cm | 64 |
| Tabel 4.11. Nilai BCI untuk variasi jarak DSM (L) | 66 |
| Tabel 4.12. Nilai BCI untuk variasi panjang DSM (Df) | 67 |
| Tabel 4.13. Rasio volume <i>deep soil mix</i> (DSM) dalam <i>box</i> | 68 |
| Tabel 4.14. Potensi pengembangan (<i>Swelling</i>) berdasarkan rasio volume <i>deep soil mix</i> (DSM) dalam mold | 68 |
| Tabel 4.15. Potensi pengembangan (<i>Swelling</i>) berdasarkan rasio volume <i>deep soil mix</i> (DSM) dalam <i>box</i> | 69 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|--|----|
| Gambar 2.1. Struktur penyusun lempung | 8 |
| Gambar 2.2. Kondisi tanah lempung ekspansif | 9 |
| Gambar 2.3. Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) | 14 |
| Gambar 2.4. Batas-batas Atterberg | 15 |
| Gambar 2.5. Grafik klasifikasi potensi mengembang | 19 |
| Gambar 2.6. Pengaruh penambahan fly ash terhadap kekuatan tanah (qu) tanpa curing | 22 |
| Gambar 2.7. Pengaruh penambahan fly ash terhadap kekuatan tanah (qu) pada curing 7 hari | 22 |
| Gambar 2.8. Pengaruh penambahan fly ash terhadap kekuatan tanah (qu) pada curing 28 hari | 22 |
| Gambar 2.9. Grafik hubungan antara nilai CBR dan waktu perawatan | 24 |
| Gambar 2.10. Grafik perbandingan hasil pemadatan tiap persentase <i>fly ash</i> | 24 |
| Gambar 2.11. Alat Shallow Soil Mix (SSM) | 26 |
| Gambar 2.12. Alat <i>Deep Soil mix</i> (DSM) | 28 |
| Gambar 2.13. Pola <i>deep soil mix</i> (DSM) | 28 |
| Gambar 2.14. Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM | 29 |
| Gambar 2.15. (a) & (b) Grafik Kuat Dukung Tanah dan (c) Grafik Tegangan-Regangan Tanah dari Hasil Uji UCS | 30 |
| Gambar 2.16. Grafik Hubungan Kadar PFA Terhadap Nilai Tegangan..... | 31 |
| Gambar 2.17. Pengaruh pemadatan pada struktur tanah lempung..... | 31 |
| Gambar 2.18. Pengaruh pemadatan pada daya rembes tanah lempung | 33 |
| Gambar 2.19. Pengaruh pemadatan pada daya rembes tanah lempung | 33 |
| Gambar 2.20. Pengaruh pemadatan pada kekuatan tanah lempung..... | 34 |
| Gambar 2.21. Daya dukung batas tanah untuk kondisi dangkal | 35 |
| Gambar 2.22. Macam Keruntuhan Pondasi | 36 |
| Gambar 2.23. Isobar tegangan untuk beban terbagi rata berbetuk bujur sangkar teori Boussinesq | 37 |
| Gambar 3.1. Pemodelan DSM Pola <i>Panels</i> | 41 |
| Gambar 3.2. Skema Uji Pembebanan..... | 43 |
| | 48 |
| Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian..... | 48 |
| Gambar 4.1. Analisis saringan dan Hidrometer | 50 |
| Gambar 4.2. Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang | 51 |
| Gambar 4.3 Grafik hasil pemadatan tanah asli | 52 |
| Gambar 4.4. Grafik hasil pemadatan tanah asli + 15% <i>fly ash</i> | 52 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.5. Grafik hubungan tegangan dan penurunan tanah asli | 56 |
| Gambar 4.6. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang $1B= 5$ cm | 57 |
| Gambar 4.7. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang $2B= 10$ cm | 58 |
| Gambar 4.8. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang $3B= 15$ cm | 60 |
| Gambar 4.9. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM $1B= 3$ cm | 62 |
| Gambar 4.10. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM $1,25B= 3,75$ cm | 63 |
| Gambar 4.11. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM $1,5B= 4,5$ cm | 64 |
| Gambar 4.12. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi jarak DSM (L)..... | 66 |
| Gambar 4.13. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df) | 67 |
| Gambar 4.14. Perbandingan hasil <i>swelling</i> terhadap rasio volume <i>deep soil mix</i> dan volume total | 69 |



BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tanah merupakan media utama dalam pembangunan konstruksi bangunan gedung maupun konstruksi jalan. Kondisi tanah di lapangan sangat mempengaruhi jenis pondasi yang digunakan oleh konstruksi di atasnya. Untuk itu mempelajari kondisi tanah yang ada sangat diperlukan, khususnya bagi seorang insinyur Teknik Sipil. Kebanyakan masalah dalam bidang keteknikan adalah tanah lempung yang merupakan tanah kohesif. Tanah kohesif dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari partikel mineral yang mempunyai tingkat sensitifitas yang tinggi terhadap kadar air sehingga perilaku tanah sangat tergantung pada komposisi mineral, unsur kimia, tekstur dan partikel serta pengaruh lingkungan sekitarnya.

Di Indonesia kurang lebih 25% wilayahnya merupakan tanah berjenis lempung dan 20% luasan pulau jawa teridentifikasi tanah berjenis lempung ekspansif. Seiring dengan berkembangnya Indonesia menghadapi permasalahan baru, yaitu meningkatnya pertumbuhan penduduk yang diikuti semakin bertambahnya kebutuhan lahan untuk pemukiman. Semakin terbatasnya lahan menghadapi kita untuk mendirikan bangunan pada lokasi tanah yang kurang menguntungkan bila ditinjau dari sifat geoteknisnya, seperti yang terlihat pada tanah lempung ekspansif.

Tanah ekspansif merupakan jenis tanah yang berbahaya apabila didirikan struktur bangunan di atasnya. Tanah lempung ekspansif memiliki sifat tanah yang kurang baik seperti plastisitas yang tinggi, kekuatan geser yang rendah, kemampatan atau perubahan volume yang tinggi, dan potensi kembang susut yang besar. Tanah ekspansif merupakan jenis tanah yang sangat sensitif dengan perubahan kadar air. Perubahan kadar air pada tanah ekspansif dapat menyebabkan tanah mengembang dan menurunkan daya dukung pada tanah. Sifat kembang susut pada tanah ekspansif dapat dilihat dengan kasat mata yaitu ketika musim kemarau tanah mengalami retak-retak poligonal yang tak beraturan pada permukaan tanah dan retakan tersebut menyebabkan rongga yang cukup dalam dan sebaliknya apabila pada musim penghujan tanah menjadi mengembang dan sangat kohesif seperti yang terlihat pada tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Probolinggo, Jawa-Timur.

Tanah di Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa-Timur sebagian besar merupakan tanah berbutir halus yang teridentifikasi sebagai lempung ekspansif.

Tanah jenis ekspansif sangat merugikan apabila didirikan konstruksi bangunan seperti rumah, gedung atau pun jalan seperti yang terlihat di Kabupaten Bojonegoro. Kerusakan yang terlihat adalah retak-retak pada rumah dan gedung karena perbedaan penurunan pada pondasi. Selain itu kerusakan juga terjadi pada jalan-jalan yang terlihat bergelombang karena penurunan pada lapisan tanah dasar yang tidak sama. Hal tersebut jelas sangat merugikan bagi pemilik rumah maupun pengguna jalan karena sangat mengganggu dan membahayakan.

Untuk mengatasi permasalahan pada tanah, dapat dilakukan beberapa upaya untuk mengurangi sifat buruk pada tanah seperti pada tanah lempung ekspansif. Upaya memperbaiki sifat kembang susut tanah lempung ekspansif dapat dilakukan dengan metode stabilitas tanah mekanik dan kimiawi. Dalam penelitian ini menggunakan stabilitas kimiawi yaitu dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada tanah yang fungsinya untuk mengurangi sifat buruk pada tanah sehingga meningkatkan daya dukung pada tanah. Ada beberapa bahan *additive* yang biasa digunakan dalam upaya stabilitas tanah, diantaranya semen, kapur, abu batubara (*fly ash*), abu sekam padi, slag baja dan lain-lain. Pada penelitian kali ini digunakan abu batubara (*fly ash*) sebagai bahan *additive* pada tanah lempung ekspansive.

Di Indonesia sudah banyak pemanfaatan abu batubara (*fly ash*) sebagai bagian dari konstruksi bangunan maupun bahan stabilisasi tanah untuk keperluan teknik sipil. Pemanfaatan limbah batubara (*fly ash*) akan sangat membantu program pemerintah dalam mengatasi pencemaran lingkungan. Abu batubara (*fly ash*) dapat dikategorikan sebagai limbah B3. Yang dimaksud limbah B3 adalah bahan berbahaya dan beracun. Menurut Pasal 2 Peraturan Pemerintah Republik Indonesia no 18 tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun menyebutkan bahwa pengelolaan limbah B3 bertujuan untuk mencegah dan menanggulangi pencemaran atau kerusakan lingkungan hidup yang diakibatkan oleh limbah B3 serta melakukan pemulihan kualitas lingkungan yang dapat tercemar sehingga sesuai fungsinya kembali. Seperti yang diketahui masalah umum yang diakibatkan oleh *fly ash* adalah pencemaran terhadap udara sehingga dapat mengganggu kesehatan utamanya pada saluran pernapasan. Untuk itu, Penanganan serius pada *fly ash* perlu dilakukan untuk mengurangi kerusakan alam yang dapat terjadi.

Penelitian mengenai pemanfaatan abu batubara (*fly ash*) sudah banyak dilakukan di Indonesia. Pada tahun 2003 Gogot Setyo Budi melakukan penelitian tanah ekspansif yang dicampur dengan menggunakan *fly ash*. Pada penelitian tersesut terbukti bahwa *fly*

ash dapat mengubah sifat mekanis tanah menjadi lebih baik dan meningkatkan kekuatan hingga 300%. Pada tahun 2006 Tri Sulistyowati melakukan penelitian mengenai peningkatan nilai CBR akibat pencampuran *fly ash* pada tanah lempung ekspansif menunjukkan bahwa pada kadar 15% *fly ash* terhadap berat kering tanah dengan waktu perawatan 7 hari dapat meningkatkan nilai CBR hingga 840,67% dari nilai CBR tanah asli. Selain itu dari penambahan *fly ash* terbukti dapat mengubah sifat karakteristik lempung ekspansif secara signifikan. Pada tahun 2014 Beny Christian L. Tobing dkk melakukan penelitian mengenai pengaruh waktu perawatan (*curing*) terhadap nilai CBR dan Swelling Test dengan kadar pencampuran 15% *fly ash*, pada penelitian ini menunjukkan nilai CBR naik hingga 433,6% dari nilai tanah dan nilai *swelling* 1045,1% dari kondisi tanah asli dengan hasil waktu *curing* selama 28 hari. Dari ketiga penelitian yang sudah dilakukan tersebut menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* dapat memperbaiki sifat mekanis yang dimiliki tanah sehingga dapat meningkatkan daya dukung yang dimiliki tanah. Untuk itu dalam penelitian ini digunakan *fly ash* dengan kadar 15% terhadap berat isi kering tanah (γ_d).

Pada Penelitian sebelumnya, penelitian dilakukan dengan mencampurkan semua tanah ekspansif dengan bahan *additive* abu batubara (*fly ash*). Metode pencampuran jenis ini di lapangan dikenal sebagai pencampuran permukaan (*shallow soil mix*). Pada pencampuran permukaan dilakukan pada seluruh wilayah lokasi tanah yang akan dibangun konstruksi di atasnya pada panjang yang terbatas oleh *backhoe*, sehingga membutuhkan biaya yang besar dan waktu yang lama untuk mencampur seluruh tanah. Untuk itu jenis metode yang lebih efektif dan efisien diperlukan untuk mengurangi biaya konstruksi pada suatu bangunan gedung maupun jalan.

Deep Soil Mix (DSM) merupakan upaya perbaikan tanah dalam yang dilakukan dengan cara mencampurkan bahan *additive* pada lokasi tanah tanah yang ingin diperbaiki kualitasnya dengan panjang yang diinginkan menggunakan bantuan *crane* dilengkapi alat hidrolik dan auger. *Deep soil mix* (DSM) sudah diaplikasikan sejak tahun 1990 an di Amerika, China, Jepang dan Eropa Barat. Metode pelaksanaan stabilisasi tanah jenis ini masih belum banyak diterapkan di Indonesia. Walaupun dalam pelaksanaannya metode ini lebih sederhana dibanding dengan metode pencampuran permukaan, metode *Deep Soil Mix* membutuhkan alat yang lebih canggih karena dalam waktu yang bersamaan alat harus dapat mengebor dan mencampur tanah dengan bahan *additive* secara rata.

Permasalahan mengenai *deep soil mix* (DSM) masih belum banyak diteliti di Indonesia, walaupun penelitian mengenai bahan *additive*/campuran untuk memperbaiki sifat mekanis tanah sudah banyak dilakukan. Hal tersebut mungkin terjadi karena terbatasnya informasi mengenai stabilisasi tanah dengan menggunakan *deep soil mix* (DSM) yang masih belum banyak diaplikasikan di Indonesia. Untuk itu, penulis tertarik untuk melakukan penelitian mengenai pengaruh jarak dan panjang dengan menggunakan konfigurasi pola *panels* pada *deep soil mix* (DSM) terhadap daya dukung tanah akibat dari beban vertikal yang bekerja.

1.2. Identifikasi Masalah

Lempung ekspansif merupakan salah satu jenis tanah yang paling dihindari dalam pembangunan suatu bangunan atau jalan karena lempung ekspansif memiliki banyak masalah. Dari hal tersebut dapat dijelaskan beberapa masalah yang dapat diidentifikasi yaitu:

1. Lempung ekspansif memiliki sifat kembang susut yang tinggi yaitu volumenya akan bertambah jika kadar airnya naik dan akan menyusut apabila kadar airnya turun sehingga berbahaya jika didirikan bangunan di atasnya.
2. Lempung ekspansif memiliki kekuatan daya dukung tanah yang rendah ketika terjadi peningkatan kadar air sehingga diperlukan upaya perbaikan tanah seperti pencampuran tanah dengan zat *additive* salah satunya dengan abu batubara (*fly ash*).
3. Di Indonesia umumnya pencampuran zat *additive* hanya dilakukan dipermukaan, padahal pencampuran tanah dan bahan *additive* pada permukaan (*shallow soil mix*) membutuhkan biaya yang relatif besar karena semua tanah pada lokasi pembangunan dicampur dengan bahan *additive* sehingga meningkatkan biaya konstruksi.
4. Di Indonesia penelitian mengenai perbaikan tanah dalam masih belum ada yang meneliti walaupun penelitian tentang penambahan bahan *additive* sudah banyak dilakukan.

1.3. Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) 15% *fly ash* diameter 3 cm konfigurasi pola *panels* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro?

2. Berapa jarak dan panjang optimum *Deep Soil Mix* (DSM) 15% *fly ash* diameter 3 cm konfigurasi pola *panels* untuk meningkatkan daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro?

1.4. Pembatasan Masalah

Untuk memperjelas ruang lingkup penelitian maka diberikan pembatasan masalah sebagai berikut:

1. Sampel yang digunakan merupakan tanah lempung ekspansif dari Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro, Jawa-Timur, sesuai dengan lokasi lahan yang diambil sampel pada penelitian Beny Christian L. Tobing (2014).
2. Seluruh pengujian dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya Malang.
3. *Fly ash* yang digunakan merupakan *fly ash* yang dijual di toko kawasan Kota Malang.
4. Digunakan kadar *fly ash* 15% terhadap berat isi kering tanah sesuai penelitian yang dilakukan Beny Christian L. Tobing (2014).
5. Waktu perawatan yang dilakukan selama 4 hari.
6. Kadar air yang digunakan pada tanah asli yaitu 27,9% dengan berat isi kering tanah (γ_d) 1,28 gr/cm³.
7. Kadar air yang digunakan untuk campuran 15% *fly ash* yaitu 25,824% dengan berat isi kering tanah (γ_d) 1,488 gr/cm³, dimana data tersebut diperoleh dari penelitian Benny C.L.T. (2014).
8. Pada penelitian ini, analisa kimia dan ekonomi tidak dianalisa secara khusus.
9. Pada penelitian ini digunakan konfigurasi pola *panels* pada *Deep Soil Mix* (DSM).
10. Sampel yang dicampur dengan *fly ash* (DSM) memiliki diameter 3 cm.
11. Tidak dilakukan analisa pengaruh *fly ash* secara mendetail.
12. Variasi jarak DSM (L) yang digunakan yaitu 1xD; 1,25xD; 1,5xD; D merupakan diameter *deep soil mix* (DSM) yaitu 3 cm.
13. Variasi panjang DSM (Df) yang digunakan dalam pencampuran *fly ash* yaitu 1 B, 2B, 3B dengan B merupakan lebar pondasi yang digunakan yaitu 5cm.
14. Jarak antar *panel* kolom adalah 2D= 6 cm.
15. Metode pencampuran yang digunakan *dry mixing*.
16. Jumlah sampel *deep soil mix* (DSM) untuk stabilisasi tanah sebanyak 15 buah.

17. Pencampuran sampel tanah dengan *fly ash* dianggap homogen dan dilakukan diluar *box*.
18. Tanah dasar yang distabilisasi hanya mencakup pada area yang terpengaruh tegangan vertikal di bawah luasan pelat yang menerima beban merata, yaitu hingga jarak $2 \times B$ arah horizontal dan $3 \times B$ arah vertikal dari titik pusat beban bekerja.
19. *Box* yang digunakan memiliki dimensi $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$.
20. Volume tanah dalam *box* $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$.
21. Uji pembebanan dilakukan dengan beban hidrolik vertikal.
22. Ukuran pelat yang digunakan sebagai model pondasi yaitu $5 \times 5 \text{ cm}^2$.
23. Pembebanan dihentikan ketika pembacaan *load cell* menunjukkan 3 kali sama dan penurunan masih berlanjut.
24. Alat pemadat yang digunakan untuk memadatkan tanah asli berbentuk persegi dengan ukuran luas $12,5 \times 12,5 \text{ cm}$ dengan berat 9,56 kg.
25. Alat pemadat untuk *Deep Soil Mix* merupakan pejal dengan berat 2,56 kg dengan diameter 2,9 cm.
26. Jumlah layer pada sampel pemadatan sebanyak 4 layer.
27. Jarak dan panjang optimum DSM merupakan jarak dan panjang yang menghasilkan pengaruh daya dukung terbesar pada penelitian, dibuktikan dengan nilai *Bearing Capacity Improvement* (BCI).
28. Pengujian potensi pengembangan (*Swelling*) yang dilakukan dalam mold diteliti oleh Rahmawati (2015).
29. Volume tanah yang diperbaiki untuk analisis pengembangan berukuran $20 \times 20 \times 20 \text{ cm}^3$.

1.5. Tujuan Penelitian

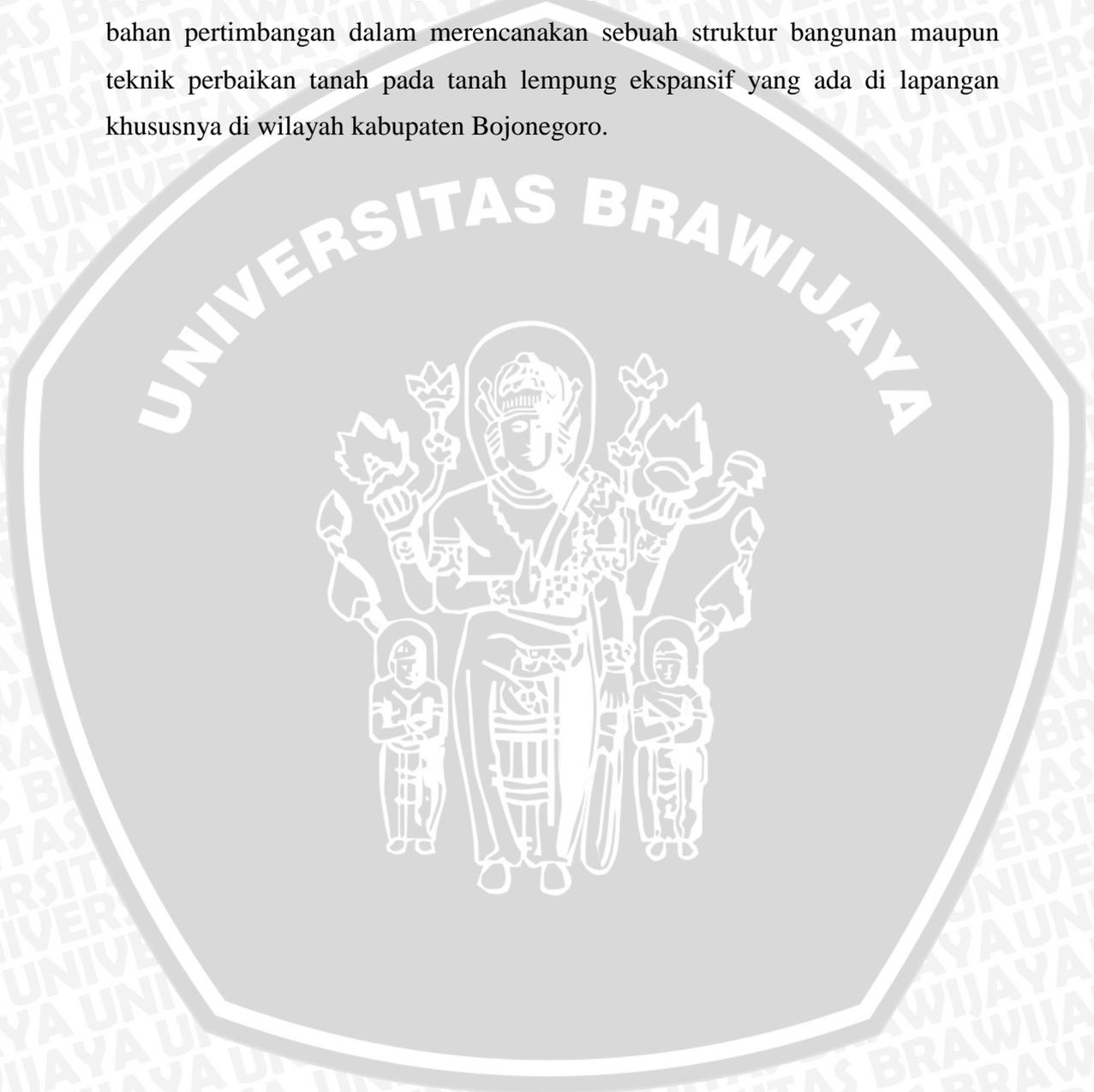
Penelitian ini memiliki beberapa tujuan yaitu:

1. Untuk mengetahui adanya pengaruh variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) 15% *fly ash* diameter 3 cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.
2. Untuk mengetahui jarak dan panjang optimum *Deep Soil Mix* (DSM) 15% *fly ash* diameter 3 cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah lempung ekspansif Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro.

1.6. Manfaat Penelitian

Penelitian ini memiliki manfaat yaitu:

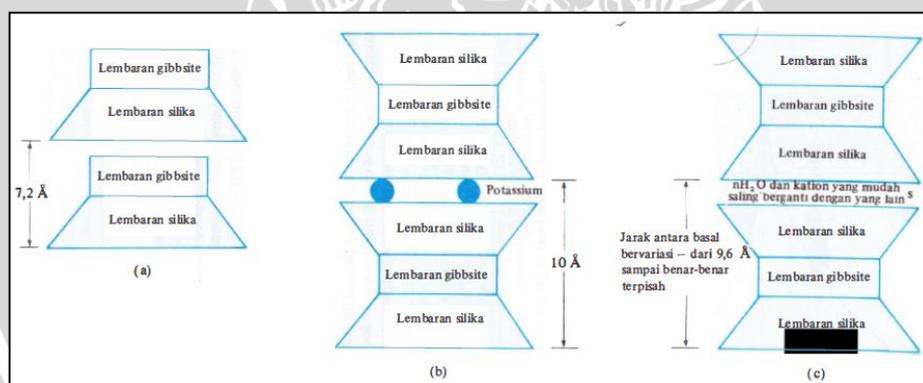
1. Bagi kalangan akademis hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai rujukan untuk penelitian pengembangan teknologi stabilisasi tanah lempung ekspansif menggunakan bahan *additive* dengan metode *Deep Soil Mix* (DSM).
2. Bagi kalangan praktisi hasil penelitian ini dapat menjadi sumber informasi sebagai bahan pertimbangan dalam merencanakan sebuah struktur bangunan maupun teknik perbaikan tanah pada tanah lempung ekspansif yang ada di lapangan khususnya di wilayah kabupaten Bojonegoro.



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Tanah Lempung dan Mineral Lempung

Sebagian besar tanah lempung terdiri dari partikel mikroskopis dan submikroskopis yang berbentuk lempengan-lempengan pipih dan merupakan partikel mika, mineral-mineral lempung, dan mineral-mineral halus lainnya. Mineral lempung (*clay mineral*) merupakan hasil dari pelapukan kimia dari *feldspar*, *ferromagnesium*, dan jenis-jenis mika yang membentuk sifat-sifat plastis dari tanah. Tanah lempung dapat didefinisikan sebagai butiran tanah berukuran kurang dari 0,002 mm namun dalam beberapa kasus partikel berukuran 0,002 mm sampai 0,005 mm masih dapat digolongkan sebagai lempung (ASTM D-653). Lempung tidak dapat digolongkan berdasarkan ukuran butiran saja. Berdasarkan segi mineral tanah lempung mempunyai partikel-partikel mineral tertentu yang “ Menghasilkan sifat-sifat plastis pada tanah bila dicampur dengan air” (Grim, 1953). Menurut Das (1995) terdapat tiga jenis kelompok mineral penyusun lempung, diantaranya *kaolinite*, *illite* dan *montmorillite*.



Gambar 2.1. Struktur penyusun lempung (a) *kaolite*, (b) *illite*, dan (c) *montmorillite*

Sumber: Das (1995)

2.2. Tanah Lempung Ekspansif

Tanah lempung dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis tergantung pada komposisi serta mineral pembentuknya. Ditinjau dari mineral pembentuk butiran lempung, dapat dibagi menjadi dua kelompok, yaitu lempung ekspansif dan lempung non ekspansif. Lempung ekspansif merupakan jenis tanah yang memiliki sifat kembang susut tanah yang tinggi yang disebabkan oleh kandungan mineral ekspansif sehingga memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi. Apabila terjadi peningkatan kadar air, lempung

ekspansif akan mengembangkan disertai dengan meningkatnya tekanan air pori dan timbulnya tekanan pengembangan. Namun ketika kadar air berkurang sampai batas susutnya akan terjadi penyusutan. Menurut Bowles (1986) tanah lempung diperkirakan akan mempunyai perubahan volume yang besar (ekspansif) apabila indeks plastisitas melebihi 20 ($IP > 20$).

Tanah ekspansive merupakan tanah yang memiliki kandungan monmorillite yang tinggi. Montmorillite merupakan jenis lempung yang mempunyai potensial mengembang yang tinggi karena mineral *montmorillite* memiliki kapasitas pertukaran ion yang tinggi dibanding mineral yang lain. Mineral *montmorillite* merupakan mineral yang bermuatan negatif besar, menyerap air yang banyak dengan mengisi rongga pori sehingga tanahnya mengembang dan akibatnya kekuatan tanah akan menurun drastis



(a)



(b)

Gambar 2.2. Kondisi tanah lempung ekspansif, (a) kondisi basah, (b) kondisi kering
Sumber: Kumor (2008)

2.3. Sistem Klasifikasi Tanah

Untuk menentukan jenis-jenis tanah pada suatu daerah dapat digunakan sistem klasifikasi tanah. Sistem klasifikasi tanah dapat didasarkan pada tekstur yang relatif

sederhana karena hanya berdasarkan distribusi ukuran butir tanah (Das, 1995). Umumnya dalam pekerjaan konstruksi bangunan dipakai dua sistem klasifikasi tanah yaitu sistem klasifikasi *Unified Soil Classification System* (USCS) dan sistem klasifikasi *American Association Of State Highway and Transportation Official* (AASHTO).

2.3.1. *Unified Soil Classification System* (USCS)

Dalam sistem ini, *Cassagrande* membagi tanah atas 3 (tiga) kelompok (Sukirman, 1992) yaitu :

1. Tanah berbutir kasar, < 50% lolos saringan No. 200.
2. Tanah berbutir halus, > 50% lolos saringan No. 200.
3. Tanah organik yang dapat dikenal dari warna, bau dan sisa-sisa tumbuh-tumbuhan yang terkandung di dalamnya.

Tabel 2.1. Simbol untuk Klasifikasi USCS

| Jenis Tanah | <i>Prefiks</i> | Sub Kelompok | <i>Sufiks</i> |
|-------------|----------------|---------------|---------------|
| | | Gradasi Baik | W |
| Kerikil | G | Gradasi Buruk | P |
| Pasir | S | Berlanau | M |
| | | Berlempung | C |
| Lanau | M | | |
| Lempung | C | wL < 50% | L |
| Organik | O | wL > 50% | H |
| Gambut | Pt | | |

Sumber: Bowles (1989).

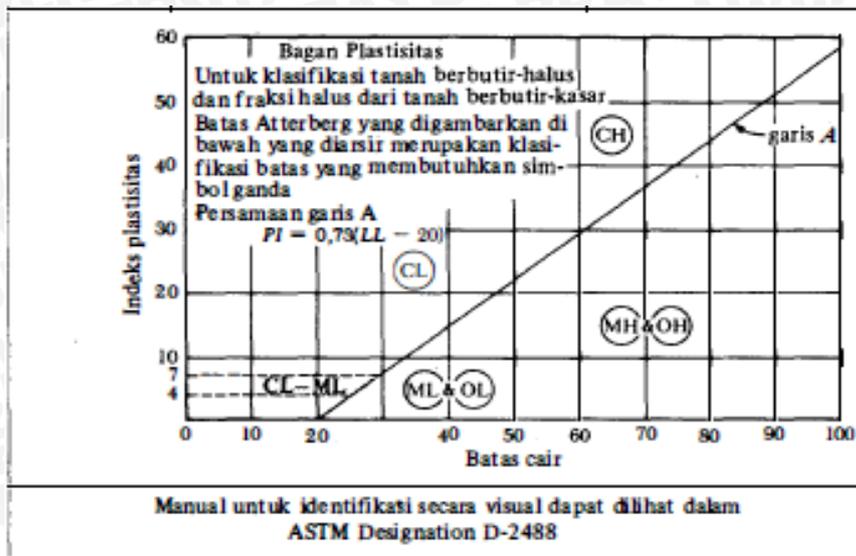
Tabel 2.2. Unified Soil Classification System (USCS)

| Divisi utama | | Simbol kelompok | Nama umum |
|--|---|---|--|
| Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200* | Kerikil 50% atau lebih dari fraksi kasar tertahan pada ayakan No. 4 | Kerikil berbah (jaya kerikil) | GW Kerikil bergradasi-baik dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | Kerikil dengan butiran halus | GP Kerikil bergradasi-buruk dan campuran kerikil-pasir, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | | GM Kerikil berlanau, campuran kerikil-pasir-lanau |
| | | | GC Kerikil berlempung, campuran kerikil-pasir-lempung |
| | Pasir lebih dari 50% (fraksi kasar lolos ayakan No. 4) | Pasir berbah (hanya pasir) | SW Pasir bergradasi-baik, pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | | SP Pasir bergradasi-buruk dan pasir berkerikil, sedikit atau sama sekali tidak mengandung butiran halus |
| | | Pasir dengan butiran halus | SM Pasir berlanau, campuran pasir-lanau |
| | | | SC Pasir berlempung, campuran pasir - lempung |
| Tanah Berbutir Halus , 50% atau lebih lolos ayakan No. 200 | Lanau dan Lempung Batas cair 50% atau kurang | ML Lanau anorganik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung | |
| | | CL Lempung anorganik dengan plastisitas rendah sampai dengan sedang lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (lean clays) | |
| | | OL Lanau - organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah | |
| | Lanau dan Lempung Batas cair lebih dari 50% | MH Lanau anorganik atau pasir halus diatomae, atau lanau diatomae, lanau yang elastis. | |
| | | CH Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi, lempung "gemuk" (fat clays) | |
| | | OH Lempung organik dengan plastisitas sedang sampai dengan tinggi | |
| Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi | | PT | Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi |

*Menurut ASTM (1982)

†Berdasarkan tanah yang lolos ayakan 75 mm (3 in)

| | Kriteria klasifikasi | |
|--|---|---|
| Klasifikasi berdasarkan persentase butir halus Kurang dari 5% lolos ayakan No. 200 Lebih dari 12% lolos ayakan No. 200 5% sampai 12% lolos ayakan No. 200 Klasifikasi perbatasan yang memerlukan penggunaan dua simbol | $C_u = D_{60}/D_{10}$ Lebih besar dari 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3. | |
| | Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW | |
| | Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ | Batas-batas Atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda |
| | Batas-batas Atterberg di atas garis A dengan $PI > 7$ | |
| | $C_u = D_{60}/D_{10}$ Lebih besar dari 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ Antara 1 dan 3 | |
| | Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW | |
| Batas-batas Atterberg di bawah garis A atau $PI < 4$ | Batas-batas Atterberg yang digambar dalam daerah yang diarsir merupakan klasifikasi batas yang membutuhkan simbol ganda | |
| Batas-batas atterberg di atas garis A dengan $PI > 7$ | | |



Sumber: Das (1995)

2.3.2. American Association of State Highway and Transportation Official (AASHTO).

Sistem ini pertama kali diperkenalkan oleh Hoentogler dan Terzaghi, yang akhirnya diambil oleh *Bureau Of Public Roads*. Sistem ini membedakan tanah dalam 8 kelompok yang diberi nama dari A-1 sampai A-8. A-8 adalah kelompok tanah organik yang bersifat tidak stabil sebagai bahan lapisan struktur jalan raya, maka pada revisi terakhir oleh AASHTO diabaikan (Sukirman, 1992).

Pada sistem klasifikasi AASHTO tanah bebutir lolos saringan no. 200 kurang dari 35% maka tanah diklasifikasikan ke dalam A-1, A-2, dan A3. Tanah dengan persentase lolos saringan no. 200 lebih dari 35% diklasifikasikan ke dalam kelompok A4, A-5, A-6 dan A-7.

Sistem klasifikasi didasarkan pada kriteria di bawah ini (Das, 1995):

a. Ukuran butir:

Kerikil: bagian tanah yang lolos ayakan dengan diameter 75 mm (3 in) dan yang tertahan pada ayakan No. 20 (2 mm)

Pasir: bagian tanah yang lolos ayakan No.10 (2 mm) dan yang tertahan pada ayakan No. 200 (0,075 mm)

Lanau dan lempung: bagian tanah yang lolos ayakan No.200

b. Plastisitas:

Nama berlanau dipakai apabila bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastisitas [*plasticity index* (PI)] sebesar 10 atau kurang. Nama berlempung

dipakai bilamana bagian-bagian yang halus dari tanah mempunyai indeks plastis sebesar 11 atau lebih

- c. Apabila batuan (ukuran lebih besar dari 75 mm) ditemukan di dalam contoh tanah yang akan ditentukan klasifikasi tanahnya, maka batuan-batuan tersebut harus dikeluarkan terlebih dahulu. Tetapi, persentase dari batuan yang dikeluarkan tersebut harus dicatat.

Tabel 2.3. American Association Of State Highway and Transportation Official (AASHTO)

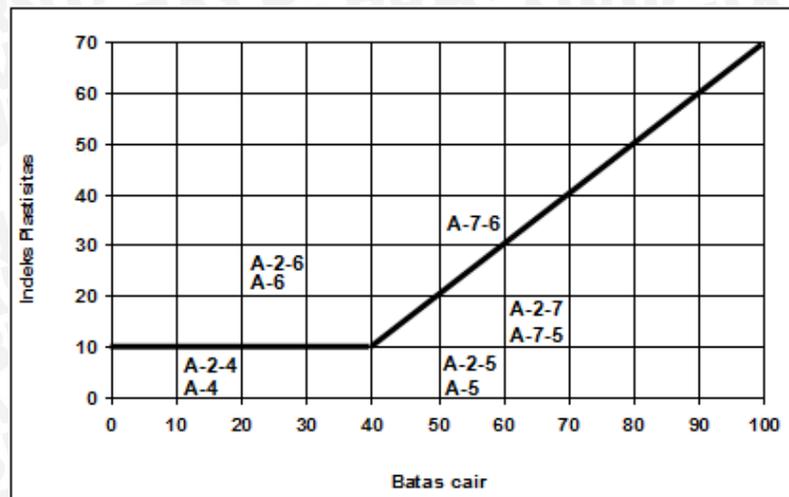
| Klasifikasi umum | Tanah berbutir (35 % atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200) | | | | | | |
|---|---|--------------------|------------------|---|-------------------|-------------------|------------------|
| | A-1 | | A-3 | A-2 | | | |
| | A-1-a | A-1-b | | A-2-4 | A-2-5 | A-2-6 | A-2-7 |
| Analisa ayakan (% lolos) NO. 10 NO. 40 NO. 200 | Maks 50 Maks 30 Maks 15 | Maks 50 Maks 25 | Min 51 Min 25 | Maks 35 | Maks 35 | Maks 35 | Maks 35 |
| Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair Batas plastis | Maks 6 | | NP | Maks 40 Maks 10 | Min 41 Maks 10 | Maks 40 Min 11 | Min 41 Min 11 |
| Tipe material yang paling domonan | Batu pecah, kerikil dan pasir | | Pasir halus | Kerikil dan pasir yang berlanau atau berlempung | | | |
| Penilaian sebagai tanah dasar | Baik sekali sampai baik | | | | | | |

| Klasifikasi umum | Tanah lanau - lempung (Lebih dari 35 % atau kurang dari seluruh contoh tanah lolos ayakan No. 200) | | | |
|---|---|--------------------|-------------------|-------------------------|
| | A-4 | A-5 | A-6 | A-7 A-7-5* A-7-6" |
| Analisa ayakan (% lolos) NO. 10 NO. 40 NO. 200 | Min 36 | Min 36 | Min 36 | Min 36 |
| Sifat fraksi yang lolos ayakan No. 40 Batas cair Batas plastis | Maks 40 Maks 10 | Maks 41 Maks 10 | Maks 40 Min 11 | Min 41 Min 11 |
| Tipe material yang paling domonan | Tanah berlanau | | Tanah berlempung | |
| Penilaian sebagai tanah dasar | Biasa sampai jelek | | | |

* Untuk A-7-5, $PL \leq LL - 30$

" Untuk A-7-6, $PL > LL - 30$

Sumber: Das (1995)



Gambar 2.3. Rentang (range) dari batas cair (LL) dan indeks plastisitas (PI) untuk tanah dalam kelompok A-2, A-4, A-5, A-6, dan A-7.

Sumber: Das (1995)

2.4. Identifikasi Lempung Berpotensi Enspansif

Identifikasi tanah ekspansif dapat dilakukan dengan 3 cara (Chen, 1975), yaitu:

1. Identifikasi Mineralogi
2. Cara Tidak Langsung (*single index method*)
3. Cara Langsung

2.4.1. Identifikasi Mineralogi

Analisa mineralogi sangat berguna untuk mengidentifikasi potensi kembang susut lempung. Identifikasi mineralogi dapat dilakukan dengan cara:

1. Difraksi Sinar X (*X-Ray Diffraction*).
2. Penyerapan terbilas (*Dye Absorbption*).
3. Penurunan Panas (*Differential Thermal Analysis*).
4. Analisa Kimia (*Chemical Analysis*).
5. *Electron Microscope Resolution*.

2.4.2. Cara Tidak langsung (*single index method*)

Hasil sejumlah indeks dasar tanah dapat digunakan untuk evaluasi tanah yang berpotensi ekspansif. Uji indeks dasar adalah uji batas-batas Atteberg, Linier shrinkage test (uji susut linier), uji pengembangan (*swelling test*).

2.4.2.1. Atteberg Limit

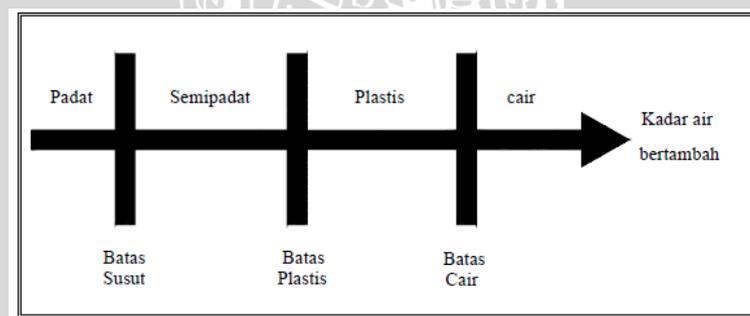
Menurut Holtz dan Gibbs (1956) sebagaimana yang dikutip Chen (1975), secara empiris menunjukkan hubungan nilai potensial mengembang dengan indeks plastisitas dari hasil uji Atteberg. Potensi pengembangan tanah ekspansif sangat erat hubungannya dengan indeks plastisitas sehingga potensi pengembangan tanah dapat diklasifikasikan berdasarkan indeks plastisitas (Chen, 1975), seperti pada tabel berikut:

Tabel 2.4. Hubungan potensial mengembang dengan indeks plastisitas

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

Sumber: Chen (1975)

Menurut Atteberg tanah dapat dipisahkan dalam empat keadaan dasar yaitu padat, semi padat, plastis dan cair seperti yang ditunjukkan gambar berikut:



Gambar 2.4. Batas-batas Atterberg
Sumber: Das (1995)

1. Batas Cair (*Liquid Limit*)

Batas cair (*Liquid Limit*) didefinisikan sebagai kadar air tanah pada batas antara keadaan cair dan keadaan plastis, yaitu batas atas dari daerah plastis. Batas cair ditentukan dari pengujian Casagrande (1948).

2. Batas Plastis (*Plastic Limit*)

Batas Plastis (*Plastic Limit*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah plastis dan semi padat, yaitu persentase kadar air dimana tanah dengan silinder sekitar 3 mm mulai retak-retak ketika dipilin-pilin.

Tabel 2.5. Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP

| Plasticity Index (%) | Swelling Potensial |
|-----------------------------|---------------------------|
| 0 - 15 | Low |
| 10 - 35 | Medium |
| 35 - 55 | High |
| > 55 | Very High |

Sumber: Chen (1975)

3. Batas Susut (*Shrinkage Limit*)

Suatu tanah akan mengalami penyusutan bila kadar air secara perlahan-lahan hilang dari dalam tanah. Dengan kehilangan air terus menerus akan mencapai suatu tingkat keseimbangan atau telah mencapai batas susutnya. Batas susut (*Shrinkage Limit*) didefinisikan sebagai kadar air pada kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu prosentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah.

Tabel 2.6. Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI

| Plasticity Index (%) | Shrinkage Index (%) | Degree of Expansion |
|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| <12 | <15 | Low |
| 12 - 30 | 15 - 30 | Medium |
| 23 - 30 | 30 - 40 | High |
| >30 | > 40 | Very High |

Sumber: Raman (1967)

2.4.2.2. Linier Shrinkage

Altmeyer (1955) dalam Chen (1975), membuat acuan mengenai hubungan derajat mengembang tanah lempung dengan nilai presentasi susut linier dan persentase batas susut Atteberg, seperti yang ditunjukkan tabel berikut:

Tabel 2.7. Klasifikasi potensi mengembang didasarkan pada *Atteberg Limit*

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

Sumber: Altmeyer (1955) dalam hartosukma (2005)

Susut linier (*linier shrinkage*) didefinisikan sebagai pengurangan massa tanah pada satu ukuran yang dinyatakan dalam persentase terhadap keadaan sebelum terjadi pengurangan.

2.4.2.3. Uji *Swelling*

Swelling adalah bertambahnya volume tanah secara perlahan-lahan akibat tekanan air pori berlebih negatif. Tanah yang banyak mengandung lempung khususnya tanah lempung ekspansif mengalami perubahan volume yang ekstrim ketika kadar air berubah. Perubahan itulah yang dapat membahayakan konstruksi di atasnya. Tingkat pengembangan secara umum bergantung pada beberapa faktor, yaitu:

1. Tipe dan jumlah mineral di dalam tanah
2. Kadar air
3. Susunan tanah
4. Konsentrasi garam dalam air pori
5. Sementasi
6. Adanya bahan organik, dll.

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.

Tekanan ke tanah sangat mempengaruhi proses terjadinya pengembangan pada tanah. Tekanan pengembangan yang mencegah tanah mengembang disebut tekanan pengembangan (*swelling pressure*). Chen (1998), menyatakan bahwa tekanan pengembangan tidak tergantung pada kadar air awal, derajat kejenuhan awal, tingkat ketebalan tanah, dan variasi berat volume kering, dan oleh karena ini merupakan fundamental sifat-sifat tanah ekspansif.

Tekanan pengembangan sebagai tekanan yang dibutuhkan untuk mencegah tanah untuk mengembang pada berat volume kering di tempat, hal ini berlaku untuk tanah asli (*undisturbed*) (Chen, 1988). Sedangkan untuk tanah yang dibentuk kembali (*remolded*) pada tanah 100% kepadatan relatif, tekanan pengembangan adalah tekanan yang diperlukan untuk menjaga berat volume kering tersebut (Hardiyatmo, 2010).

Tabel 2.8. Hubungan potensi mengembang dengan tekanan mengembang

| Swelling potential | Swelling pressure |
|--------------------|-------------------|
| Low | < 2 |
| Medium | 2-4 |
| High | 4-7 |
| Very high | >7 |

Sumber: Garcia-Iturbe dalam Tobing (2014)

Dapat dilihat bagaimana potensi pengembangan suatu sampel tanah berdasarkan tekanan mengembang. Untuk nilai *swelling pressure* kurang dari 2 memiliki *swelling potential* yang rendah sedangkan untuk *swelling pressure* yang memiliki nilai lebih dari 7 memiliki *swelling potential* yang sangat tinggi.

Secara umum sifat kembang susut tanah lempung tergantung pada sifat plastisitasnya, semakin plastis mineral lempung semakin potensial untuk menyusut dan mengembang. Berdasarkan hasil penyelidikan yang dilakukan oleh Fandy Chandra (Yuliet, 2011) tentang studi perbandingan berbagai macam metode pengukuran *swelling pressure* untuk tanah ekspansif, disimpulkan bahwa:

1. Metoda *free swelling test* merupakan metoda yang paling mudah dan aman digunakan dibandingkan dua metode lain, karena memasukkan beban *overburden* ke dalam perhitungan *swelling pressure*.
2. Metoda *free swelling test* membutuhkan waktu paling lama untuk menyelesaikan tes dibandingkan metoda lainnya.

Metode *free swelling test* memberikan nilai *swelling pressure* paling tinggi dibandingkan dua metoda lainnya.

2.4.2.4. Activity Method

Menurut Skempton (1953) yang disebut aktivitas dapat diketahui berdasarkan rumus berikut:

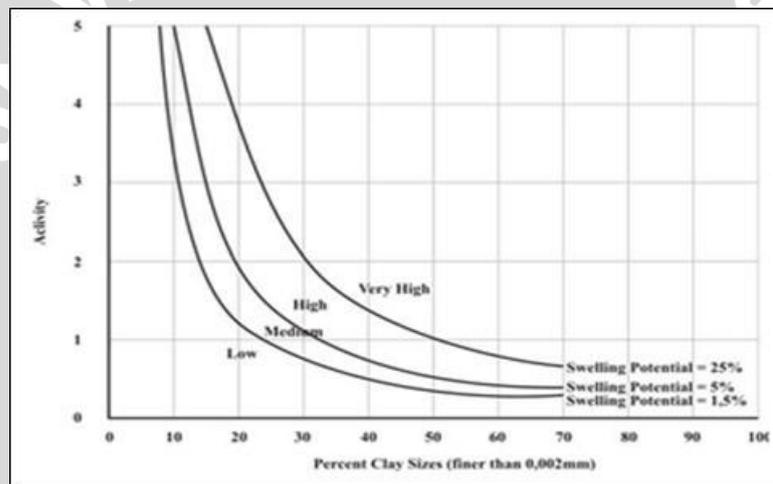
$$Activity (A) = \frac{PI}{C} \quad (2.1)$$

Keterangan: PI= Indeks Plastisitas

C= Presentase lempung lolos saringan 0,002 mm

Dari rumus tersebut kategori tanah terbagi dalam tiga golongan yaitu:

- $A < 0,75$ (Tidak Aktif)
- $0,75 < A < 1,25$ (Normal)
- $A > 1,25$ (Aktif)



Gambar 2.5. Grafik klasifikasi potensi mengembang

Sumber: Seed dkk. (1962)

2.4.3. Cara Langsung

Metode pengukuran langsung merupakan suatu cara yang digunakan untuk menentukan potensi pengembangan dan tekanan pengembangan dari tanah ekspansif dengan menggunakan *Oedometer Terzaghi*. Terdapat dua cara dalam pengukuran tekanan pengembangan secara langsung yaitu pengukuran dengan beban tetap sehingga mencapai persentase mengembang tertinggi, kemudian contoh tanah diberi tekanan untuk kembali ke tanah semula. Cara yang kedua yaitu dengan merendam tanah dalam air dengan mempertahankan volume atau mencegah terjadinya pengembangan dengan cara menambah beban di atasnya setiap saat. Metode ini biasanya disebut *constan volume method*.

2.5. Stabilisasi Tanah

Stabilisasi tanah adalah usaha untuk memperbaiki sifat-sifat tanah yang tidak baik atau meningkatkan mutu tanah sehingga tidak membahayakan dalam pembangunan suatu proyek. Tujuan dari stabilisasi tanah adalah meningkatkan daya dukung tanah dalam menahan beban serta meningkatkan kestabilan tanah. Stabilisasi tanah dapat terdiri dari salah satu dari kombinasi pekerjaan-pekerjaan berikut (Bowles, 1986):

- a) Mekanis: pemadatan secara mekanis dilakukan dengan berbagai jenis peralatan mekanis seperti mesin gilas (roller), benda berat yang dijatuhkan, ledakan, tekanan statis, tekstur, pembekuan, pemanasan dan sebagainya.
- b) Bahan campuran (addiver): tanah yang buruk dapat diperbaiki dengan cara ditambahkan campuran seperti kerikil untuk tanah kohesif, lempung untuk tanah berbutir, dan pencampuran secara kimia seperti semen, gamping, *fly ash*, dsb.

Pada penelitian ini digunakan abu batubara (*fly ash*) sebagai bahan *additive* stabilisasi tanah. Abu batubara atau yang sering disebut *fly ash* merupakan bahan *additive* yang dapat digunakan untuk stabilisasi tanah. *Fly ash* merupakan sisa dari pembakaran batubara yang sangat halus yang berasal dari unit pembangkit uap (*boiler*). Dipilih campuran yang digunakan adalah *fly ash* karena bahan ini mudah didapat, limbah yang tidak terpakai namun juga bisa mencemari lingkungan. Pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah juga dapat membantu program pemerintah dalam menanggulangi pencemaran pada lingkungan yang dapat terjadi karena peningkatan aktivitas PLTU. *Fly ash* ini dapat dikategorikan sebagai limbah B3 yaitu bahan berbahaya dan beracun. Menurut Pasal 2 Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 18 tahun 1999 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun menyebutkan bahwa pengelolaan limbah B3 bertujuan untuk mencegah dan menanggulangi pencemaran atau kerusakan lingkungan hidup yang diakibatkan oleh limbah B3 serta melakukan pemulihan kualitas lingkungan yang dapat tercemar sehingga sesuai fungsinya kembali. Salah satu contoh yang menjadi masalah umum adalah *fly ash* dapat mencemari udara sehingga dapat mengganggu kesehatan utamanya pada saluran pernapasan. Oleh karena itu, perlu adanya pemanfaatan *fly ash*.

Pemanfaatan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah karena sifat *pozzolanik* yang dapat mengurangi *shrinkage* dan *cracking problem* yang biasa timbul pada penggunaan semen sebagai bahan stabilisasi tanah. Pada intinya *fly ash* mengandung unsur kimia antara lain silika (SiO_2), alumina (Al_2O_3), fero oksida (Fe_2O_3) dan kalsium oksida (CaO), juga mengandung unsur tambahan lain yaitu magnesium oksida (MgO), titanium

oksida (TiO_2), alkalin (Na_2O dan K_2O), sulfur trioksida (SO_3), pospor oksida (P_2O_5) dan carbon (Hartosukma, 2005).

Menurut ASTM C618 dalam Wardani (2008) *fly ash* dibagi menjadi dua kelas yaitu:

1. **Fly ash kelas F:** merupakan *fly ash* yang diproduksi dari pembakaran batubara anthracite atau bituminous, mempunyai sifat pozzolanic dan untuk mendapatkan sifat cementitious harus diberi penambahan *quick lime*, *hydrated lime*, atau semen. *fly ash* kelas F ini kadar kapurnya rendah ($\text{CaO} < 10\%$).
2. **Fly ash kelas C:** diproduksi dari pembakaran batubara lignite atau sub-bituminous selain mempunyai sifat pozzolanic juga mempunyai sifat self-cementing (kemampuan untuk mengeras dan menambah strength apabila bereaksi dengan air) dan sifat ini timbul tanpa penambahan kapur. Biasanya mengandung kapur ($\text{CaO} > 20\%$).

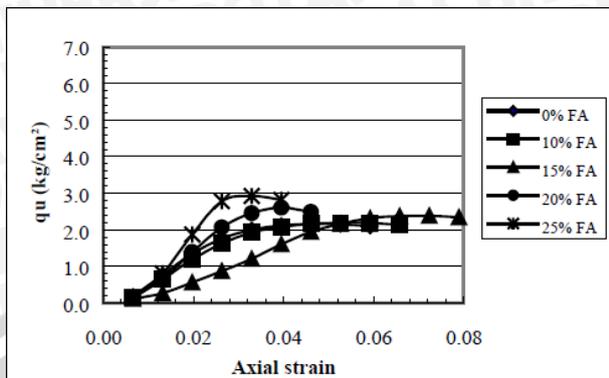
Perbedaan utama dari kedua *ash* kelas F dan *fly ash kelas C* terdapat pada banyaknya calcium, silika, aluminium dan kadar besi di *ash* tersebut. Walaupun kelas F dan kelas C sangat ketat ditandai untuk digunakan *fly ash* yang memenuhi spesifikasi ASTM C618, namun istilah ini lebih umum digunakan berdasarkan asal produksi batubara atau kadar CaO . Yang penting diketahui, bahwa tidak semua *fly ash* dapat memenuhi persyaratan ASTM C618, kecuali pada aplikasi untuk beton, persyaratan tersebut harus dipenuhi.

Menurut wardani (2008) stabilisasi tanah menggunakan *fly ash* biasanya digunakan untuk tanah lunak, subgrade tanah kelembungan dibawah jalan yang mengalami beban pengulangan (*repeated loading*). Perbaikan tanah dapat menggunakan *fly ash* kelas C dan kelas F. Pada *fly ash* kelas F diperlukan bahan tambahan kapur atau semen, sedangkan jika menggunakan *fly ash* kelas C tidak diperlukan bahan tambahan semen atau kapur karena *fly ash* kelas C mempunyai sifat *self cementing*.

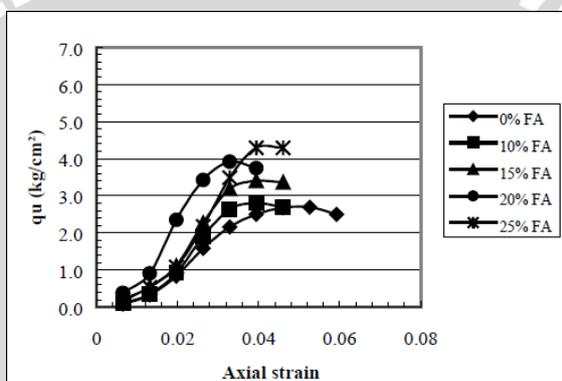
Penggunaan *fly ash* sebagai bahan stabilisasi tanah didasarkan pada sumber-sumber penelitian yang sudah dilakukan diantara lain:

1. Gogot Setyo Budi dkk (2003) dengan judul “Pengaruh *Fly Ash* Terhadap Sifat Pengembangan Tanah Ekspansif”. Pada Penelitian tersebut digunakan kadar *fly ash* sebesar 10%, 15%, 20%, dan 25% dengan waktu *curing* 0 hari, 7 hari dan 28 hari. Hasil penelitian Gogot Setyo Budi menunjukkan bahwa penambahan *fly ash* 25% dengan waktu *curing* 28 hari dapat menurunkan *specific gravity*, menurunkan *Indeks Plastisitas* (IP), meningkatkan berat isi kering (*dry density*),

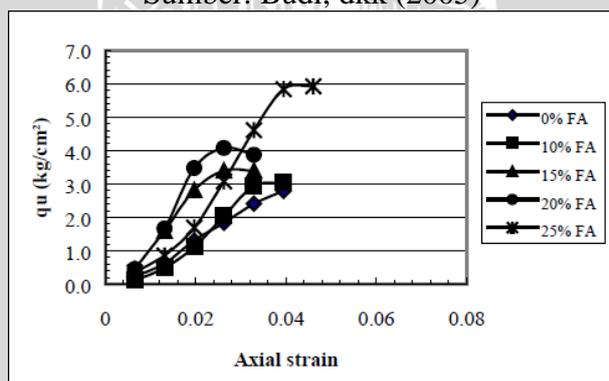
menurunkan potensi pengembangan (*swelling potential*), dan menaikkan kekuatan tanah hingga 300%.



Gambar 2.6. Pengaruh penambahan fly ash terhadap kekuatan tanah (q_u) tanpa curing
 Sumber: Budi, dkk (2005)



Gambar 2.7. Pengaruh penambahan fly ash terhadap kekuatan tanah (q_u) pada curing 7 hari
 Sumber: Budi, dkk (2005)



Gambar 2.8. Pengaruh penambahan fly ash terhadap kekuatan tanah (q_u) pada curing 28 hari
 Sumber: Budi, dkk (2005).

- Tri Sulistyowati (2006) dengan judul “Pengaruh Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif Dengan *fly ash* Terhadap Nilai Daya Dukung CBR”. *Fly Ash* yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah sebesar 0%, 5%, 15%, dan 25%.

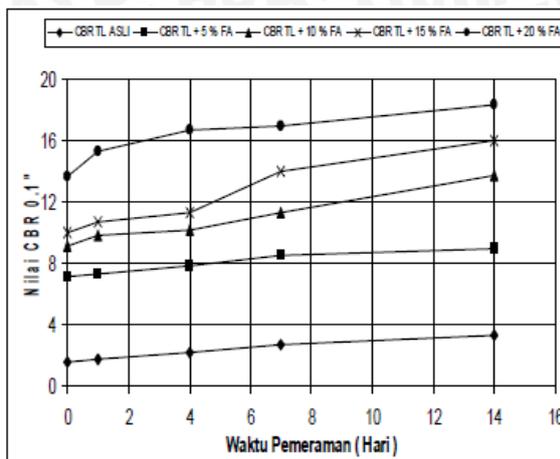
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Tri Sulistiowati menunjukkan bahwa penambahan kadar *fly ash* sebesar 15% merupakan presentase yang paling efektif dengan waktu perawatan 7 – 14 hari, karena penambahan *fly ash* dengan persentase 25% tidak menunjukkan perubahan yang signifikan pada sifat karakteristik tanah lempung ekspansif. Pada pencampuran *fly ash* dengan persentase 15% dengan waktu perawatan 7 hari menunjukkan penurunan Indeks Plastisitas (IP) sebesar 70,99% dari nilai Indeks Plastisitas (IP) kondisi tanah asli. Selain itu pada kondisi stabilisasi 5% untuk waktu perawatan 7 hari dapat meningkatkan nilai CBR sampai 840,67% dari nilai CBR tanah asli.

Tabel 2.9. Hasil pengujian stabilisasi tanah lempung ekspansif dengan *fly ash*.

| Stabilisasi | Masa Pemeraman (hari) | Nilai (%) | | | |
|------------------------|-----------------------|-----------|-------|-------|-------|
| | | LL | PL | IP | CBR |
| Tanpa stabilisasi (0%) | 0 | 82.00 | 30.30 | 51.70 | 2.07 |
| | 7 | 60.00 | 21.20 | 38.80 | 19.50 |
| | 14 | 56.10 | 23.20 | 32.90 | 18.94 |
| 5% <i>Fly Ash</i> | 21 | 48.00 | 23.20 | 24.80 | 15.70 |
| | 7 | 37.10 | 18.80 | 18.30 | 19.20 |
| | 14 | 42.10 | 20.50 | 21.60 | 19.00 |
| 15% <i>Fly Ash</i> | 21 | 39.80 | 20.20 | 19.60 | 18.75 |
| | 7 | 33.20 | 18.00 | 15.20 | 18.76 |
| | 14 | 37.40 | 19.40 | 18.00 | 18.80 |
| 25% <i>Fly Ash</i> | 21 | 39.20 | 20.00 | 19.20 | 18.94 |

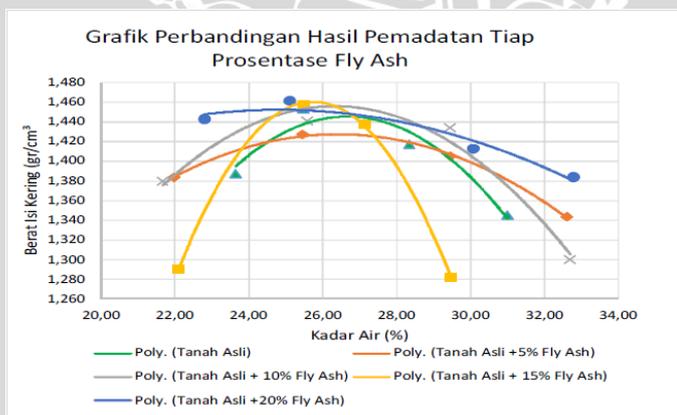
Sumber: Sulistyowati (2006)

- Surta Ria N.P. (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 dapat meningkatkan nilai CBR. Peningkatan terjadi secara signifikan pada penambahan kadar *fly ash* 15% dengan waktu perawatan 4 -7 hari. Grafik hubungan antara nilai CBR dengan waktu perawatan dapat dilihat pada **gambar 2.9**.



Gambar 2.9. Grafik hubungan antara nilai CBR dan waktu perawatan
Sumber: Panjaitan (2010)

- Beny Christian L. Tobing dkk dengan judul “Pengaruh Lama Waktu Curing Terhadap Nilai CBR dan Swelling Lempung Ekspansif di Bojonegoro dengan Campuran 15% *Fly Ash*”. Hasil penelitian yang dilakukan Beny Christian L. Tobing dkk menunjukkan bahwa dengan penambahan *fly ash* dengan persentase 15% waktu curing yang menghasilkan nilai CBR terbesar dan *swelling* terkecil terjadi pada waktu 28 hari. Pada waktu curing 28 hari dapat meningkatkan nilai CBR hingga 433,6% dari nilai CBR tanah asli dan nilai *swelling* turun hingga 1045,1% dari nilai *swelling* tanah asli.



Gambar 2.10. Grafik perbandingan hasil pemasatan tiap persentase *fly ash*
Sumber: Tobing (2014)

Tabel 2.10. Hasil pemeriksaan pemadatan standar.

| KOMPOSISI TANAH | KADAR AIR OPTIMUM | BERAT ISI KERING MAKSIMUM |
|--------------------------|-------------------|---------------------------|
| | (%) | (gr/cm ³) |
| Tanah Asli | 26,891 | 1,479 |
| Tanah Asli + 5% Fly Ash | 26,523 | 1,434 |
| Tanah Asli + 10% Fly Ash | 26,446 | 1,473 |
| Tanah Asli + 15% Fly Ash | 25,824 | 1,488 |
| Tanah Asli + 20% Fly Ash | 25,636 | 1,476 |

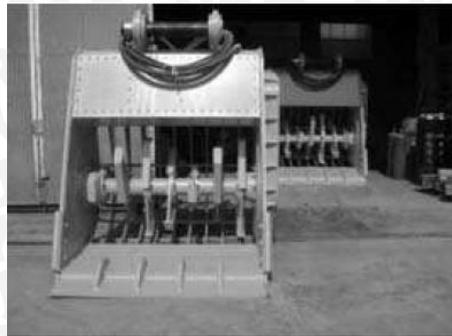
Sumber: Tobing (2014)

2.6. Metode Pencampuran Tanah dengan *Additive* untuk Stabilisasi Tanah

Stabilisasi dengan menggunakan bahan tambah (*additive*) yang bertujuan untuk memperbaiki sifat-sifat teknis tanah dilakukan dengan mencampur tanah kondisi asli dengan bahan *additive* seperti *fly ash* pada kadar tertentu. Untuk meningkatkan daya dukung tanah dengan bahan *additive* dapat dilakukan dengan dua metode sesuai kebutuhan yaitu dengan metode pencampuran permukaan (*shallow soil mix*) dan metode pencampuran dalam (*deep soil mix*).

2.6.1. Shallow Soil Mix (SSM)

Shallow Soil Mix (SSM) merupakan metode pencampuran bahan *additive* dengan tanah pada permukaan saja yang biasanya hanya untuk panjang maksimum 10 m. Pada *Shallow Soil Mix* (SSM) digunakan backhoe besar dengan lengan ayun yang panjang dengan perangkat hidrolis dinamis yang digunakan untuk proses pencampuran bahan *additive* pada ujung lengan ayun. Pada SSM proses pencampuran *additive* diawali dengan pembuatan kolam dengan menggunakan backhoe sesuai dengan dimensi yang direncanakan, kemudian dilanjutkan dengan pencampuran kolam tanah dengan bahan *additive* yang digunakan dengan menggunakan backhoe custom yang dilengkapi dengan auger untuk alat pencampur dan *nozel* injeksi untuk menyuntikkan bahan campuran pada tanah. Setelah bahan *additive* tercampur sesuai dengan kadar tertentu dilanjutkan dengan proses pemadatan untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diinginkan (Arias dkk, tanpa tahun).



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.11. Alat Shallow Soil Mix (SSM), (a) *Bucket mixing type*, (b) *Rotary blender type*, (c) *Trencer type*

Sumber: Kitazume (2014)

2.6.2. Deep Soil Mix (DSM)

Deep Soil Mix (DSM) merupakan metode pencampuran tanah dengan bahan *additive* dengan panjang melebihi 30 m. pada metode DSM digunakan bantuan *crane* yang dilengkapi *auger* hidrolik yang dapat menyemprotkan bahan *additive* pada ujung dan sisi *auger*. Proses pencampuran diawali dengan pengeboran pada titik yang telah direncanakan pada panjang tertentu, setelah panjang yang diinginkan tercapai dilanjutkan dengan proses penyampuran bahan *additive* dengan cara menyemprotkan bahan *additive*

pada *auger* dengan putaran terbalik dengan kecepatan yang lebih tinggi sambil menarik *auger* ke atas. Setelah proses pencampuran selesai dilanjutkan dengan proses pemadatan pada titik tanah daerah yang diperbaiki kondisinya. Pada perbaikan tanah menggunakan *Deep Soil Mix* (DSM) tanah tidak seluruhnya lokasi tanah yang diperbaiki sifat mekanisnya dicampur menggunakan bahan *additive* tetapi hanya pada titik-titik pengeboran sehingga biaya dapat dikurangi sesuai kebutuhan perbaikan tanah.

Dalam pelaksanaan *Deep Soil Mix* (DSM) terbagi menjadi dua yaitu metode basah (*Deep wet mixing*) dan metode kering (*Deep dry mixing*). Pada metode basah (*Deep wet mixing*) bahan *additive* dicampurkan dalam keadaan basah seperti bubur kemudian diinjeksikan pada tanah untuk dicampur. Metode pencampuran basah merupakan metode yang paling umum digunakan untuk pencampuran tanah dalam (*Deep Soil Mix*). Pada metode basah kondisi muka air tanah tidak berpengaruh sehingga metode ini cocok untuk berbagai kondisi tanah. Agar tanah tidak melekat pada pisau poros berputar (*auger*) maka alat pencampurnya biasanya dilengkapi dengan baling-baling anti-rotasi.

Selain metode basah dalam teknik perbaikan tanah dalam juga dikenal metode kering (*Deep dry mixing*). Pada metode kering tanah dicampur dengan bahan *additive* dalam kondisi kering (berbentuk bubuk) dengan menggunakan tekanan udara. Teknik pencampuran kering biasanya digunakan untuk meningkatkan kekuatan tanah dan mengurangi kompresibilitas tanah lempung yang sangat lembut. Pada pencampuran metode kering harus diperhatikan kondisi kadar air tanah asli yaitu minimal 20% karena tidak ditambahkan air pada bahan *additive* untuk reaksi hidrasi. Namun karena pencampuran metode kering menggunakan tekanan udara metode ini rentan mengalami masalah munculnya lubang kawat akibat proses dispersi yang rumit dan kurang efektifnya pengikat sehingga metode kering memiliki kedalaman yang terbatas yaitu hanya kedalaman maksimum 33 m (Fiorotto, 2014).



(a)

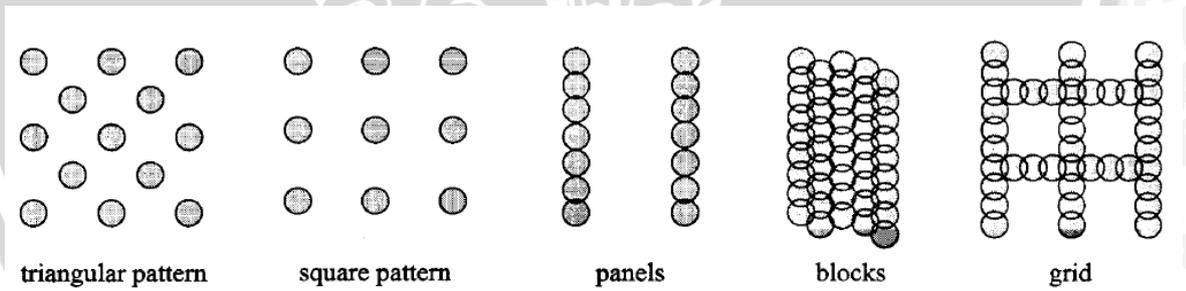


(b)

Gambar 2.12. Alat *Deep Soil mix* (DSM), (a) *Deep dry mixing*, (b) *Wet dry mixing*

Sumber: Bruce, dkk (2013)

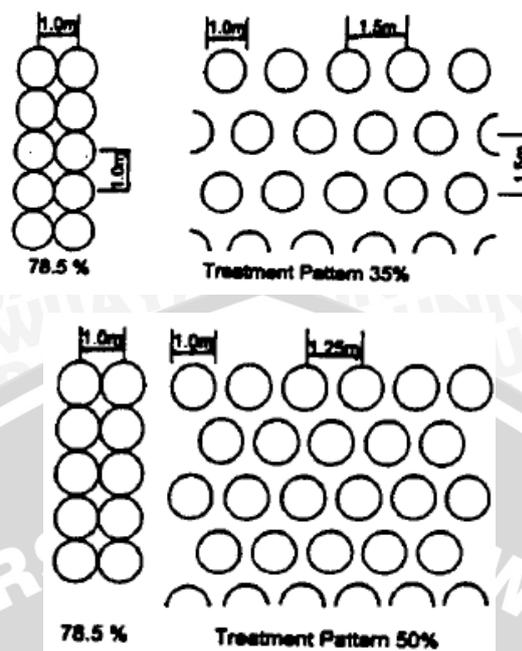
Dalam metode pelaksanaan *Deep soil mix* (DSM) terdapat beberapa pola yang sering diterapkan. Pola-pola tersebut diantaranya pola *triangular pattern*, pola *square pattern*, pola *panels*, pola *blocks*, dan pola *grid*. Gambar pola *deep soil mix* dapat dilihat pada **gambar 2.13** (Kosche, 2004).



Gambar 2.13. Pola *deep soil mix* (DSM)

Sumber: Kosche (2004)

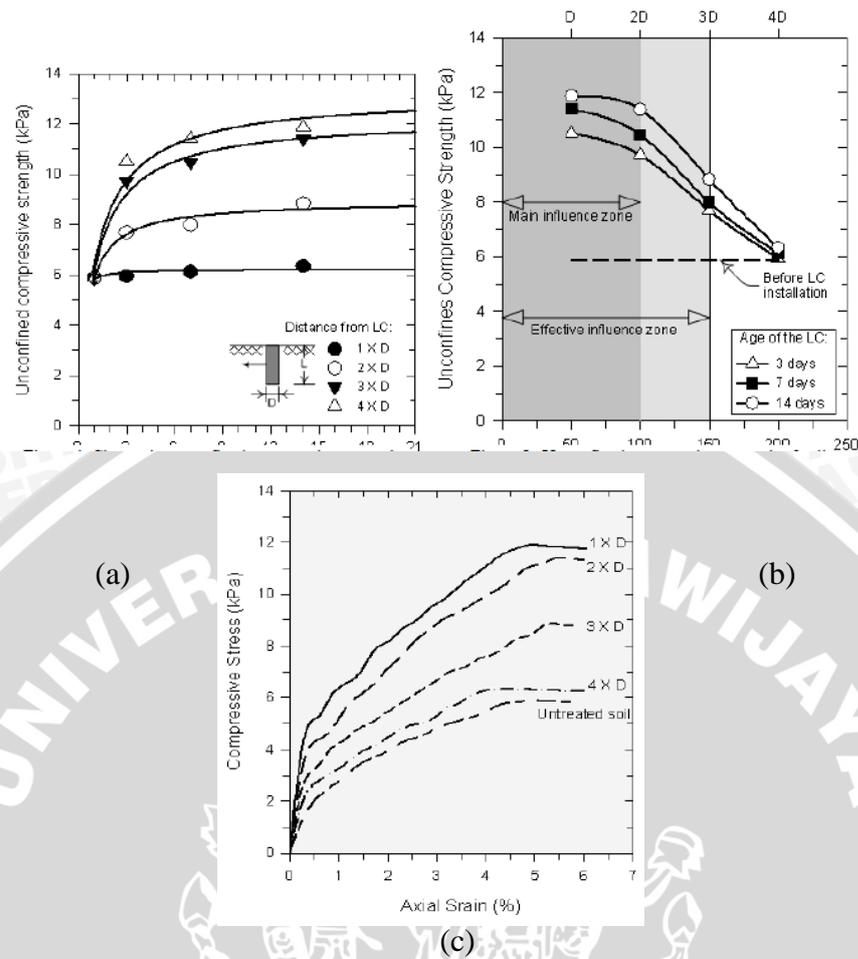
Dalam beberapa kasus di lapangan, variasi konfigurasi dan jarak antar kolom dilakukan guna mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap peningkatan stabilitas tanah. Variasi ini pernah dilakukan pada proyek *Tomei Freeway* di Jepang, seperti yang terlihat pada **gambar 2.14**.



Gambar 2.14. Variasi Konfigurasi dan Jarak Kolom DSM
 Sumber: Bruce (2000)

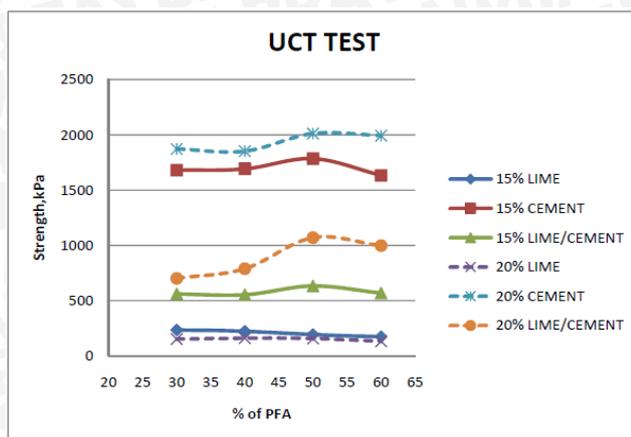
Ada beberapa penelitian *Deep Soil Mix* (DSM) yang pernah dilakukan sebelumnya, diantaranya:

1. Pada tahun 2009 Agus Setyo M. telah melakukan penilaian mengenai perkuatan kolom kapur pada tanah lunak Bantul-Yogyakarta di laboratorium. Pada penelitian tersebut bertujuan untuk mengkaji sebaran daya dukung tanah di sekitar kolom kapur dan karakteristik hubungan beban dan penurunannya. Dalam penelitian Setyo M. (2009) kolom kapur yang digunakan merupakan kolom tunggal dengan diameter 50 mm dengan kedalaman 200 mm dan diletakkan dalam kotak baja berukuran 1,2 m x 1,2 m dan tinggi 1 m. Hasil dari penelitian tersebut yaitu seiring dengan penambahan kadar kapur, daya dukung tanah meningkat sebesar 0,23 kN tanpa menggunakan kolom kapur menjadi 5,2 kN dengan kolom kapur. Penambahan kolom kapur meningkatkan daya dukung tanah baik pada arah vertikal maupun arah radial hingga mencapai 3 kali ukuran diameter dari pusat kolom kapur. Berikut ini adalah grafik hasil pengujian pembebanan kolom kapur dan kurva tegangan-regangan tanah dapat:



Gambar 2.15. (a) & (b) Grafik Kuat Dukung Tanah dan (c) Grafik Tegangan-Regangan Tanah dari Hasil Uji UCS
 Sumber: Muntohar (2009)

2. Pada tahun 2011 Ailin dkk. Telah melakukan penelitian tentang daya dukung tanah yang di stabilisasi dengan kolom kapur-semen yang diberikan tambahan *Pulverized Fuel Ash* (PFA) di Malaysia dengan model laboratorium. Pada penelitian ini digunakan kolom kapur-semen dengan tambahan PFA diameter 25 mm dan tinggi 200 mm yang dimasukkan dalam tanah yang dilubangi terlebih dahulu dengan pipa PVC. Pengujian tanah dilakukan dengan menggunakan uji *Unconfined Compressive Strength*. Pada pengujian setelah curing 28 hari dengan penambahan 40% PFA dan 15% kapur dapat meningkatkan kekuatan tanah hingga 2 sampai 3 kali lipat dari kondisi tanah asli. Namun, ketika kapur diganti dengan semen, peningkatan kekuatan tanah meningkat secara signifikan hingga 5 kali dari kondisi tanah asli. Berikut ini adalah gambar grafik uji UCT test antar penambahan kadar PFA dengan peningkatan kekuatan tanah:

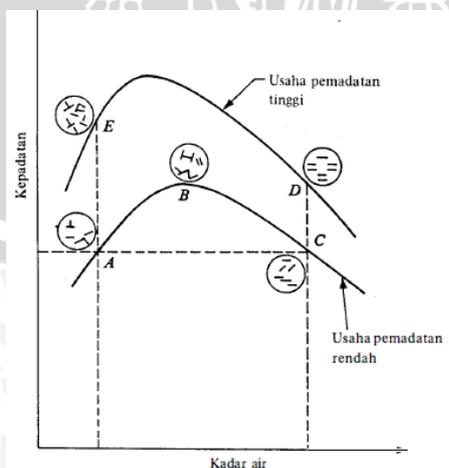


Gambar 2.16. Grafik Hubungan Kadar PFA Terhadap Nilai Tegangan
 Sumber: Ailin, dkk. (2011)

2.8. Sifat Tanah Lempung yang Dipadatkan

Menurut Lambe (1958) dalam Das (1995) 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 2.17**.

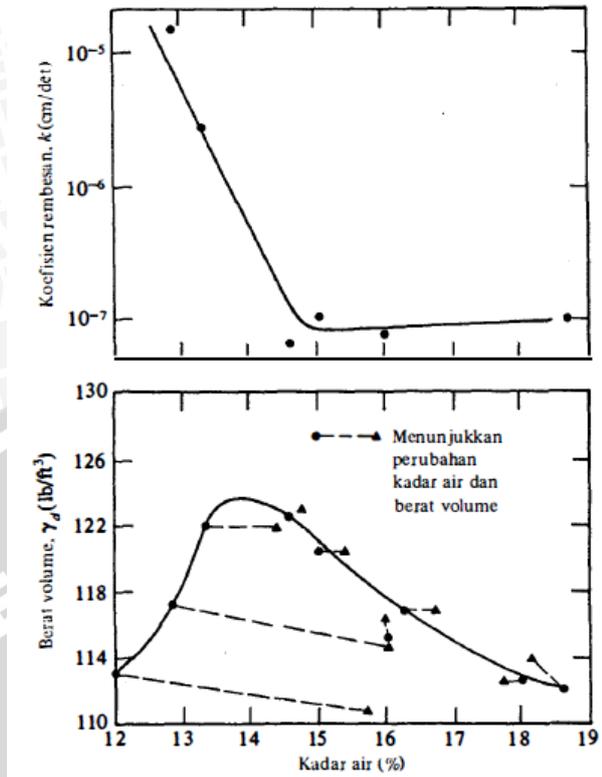
Hasil penyelidikan pada tanah lempung yang dipadatkan memperlihatkan bahwa jika lempung dipadatkan pada keadaan kering optimum, susunan tanahnya tidak bergantung pada macam pemadatan (Seed dan Chan dalam Das, 1995). Pemadatan tanah dengan kadar air pada basah optimum akan mempengaruhi, susunan, kuat geser, serta sifat kemampatan tanahnya. Pada usaha pemadatan yang sama, dengan penambahan kadar air, penyesuaian susunan butiran menjadi bertambah. Pada kering optimum, tanah selalu terflokulasi. Sebaliknya pada basah optimum susunan tanah menjadi terdispersi beraturan.



Gambar 2.17. Pengaruh pemadatan pada struktur tanah lempung
 Sumber: Lambe dalam Das (1995)

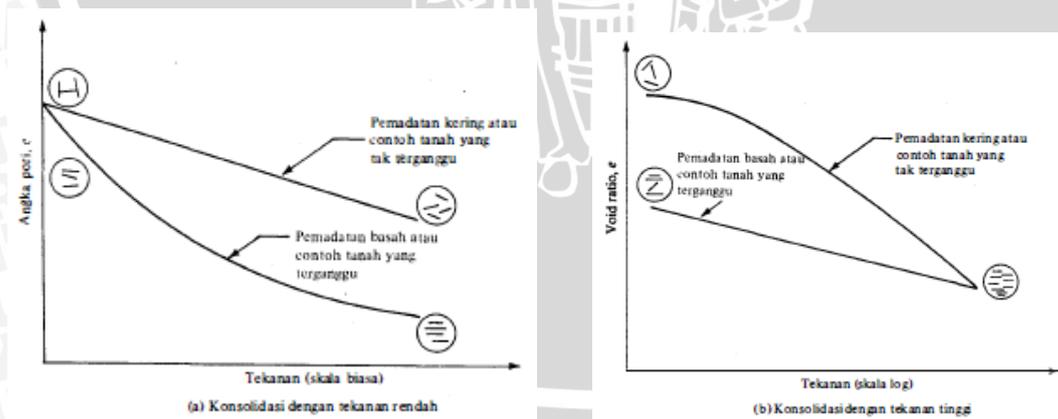
Pada suatu kadar air tertentu, usaha pemadatan yang lebih tinggi cenderung menghasilkan lebih banyak partikel-partikel lempung dengan orientasi yang sejajar, sehingga lebih banyak struktur tanah yang terdispersi. Partikel-partikel tanah lebih dekat satu sama lain dan dipadatkan berat volume yang lebih tinggi. Hal ini dapat dilihat dengan membandingkan antara titik A dan E pada gambar. Susunan tanah pada titik E lebih teratur daripada titik A. Jika Usaha pemadatan ditambah, susunan tanah cenderung untuk lebih beraturan penyesuaiannya, bahkan berlaku juga pada kondisi kering optimum. Susunan tanah pada titik E lebih teratur daripada titik A. sedang pada kondisi basah optimum, susunan pada titik D akan lebih teratur daripada titik C.

Pemadatan menimbulkan perubahan-perubahan pada struktur tanah berkoheisi. Perubahan-perubahan tersebut meliputi perubahan pada daya rembes (*permeability*), Kemampumampatan (*compressibility*), dan kekuatan dari tanah. Contoh tanah dalam pemadatan dipadatkan pada berbagai kadar air dengan usaha pemadatan yang sama. Harga koefisien rembesan yang menunjukkan ukuran mudah-sukarnya air merembes melewati suatu tanah, akan berkurang dengan bertambahnya kadar air. Harga koefisien rembesan tersebut mencapai minimum pada kadar air optimum. Sesudah kadar air optimum, koefisien rembesan akan sedikit bertambah. Jika usaha pemadatan ditambah, koefisien permeabilitas akan berkurang, sebab angka pori berkurang, sebab angka pori berkurang. Dari gambar pengaruh pemadatan pada daya rembes tanah (**Gambar 2.18**), terlihat bahwa permeabilitas kira-kira lebih tinggi bila tanah dipadatkan pada kering optimum, daripada basah optimum.



Gambar 2.18. Pengaruh pemadatan pada daya rembes tanah lempung
 Sumber: Lambe dalam Das (1995)

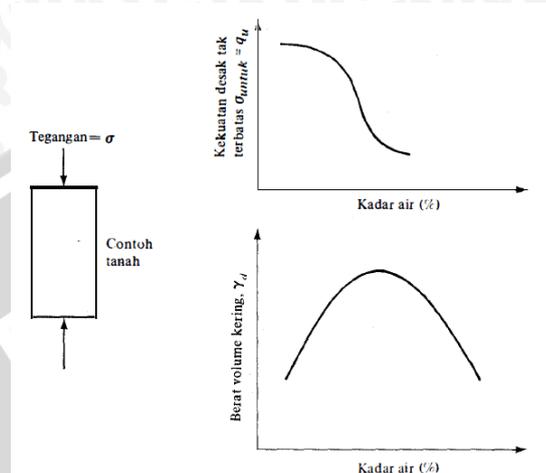
Pada tekanan yang rendah, suatu tanah yang dipadatkan pada sisi basah dari kadar air optimum akan lebih mudah memampat dibandingkan pada tanah yang dipadatkan pada kondisi kadar air minimum. Hal tersebut dapat dilihat pada **gambar 2.19**. berikut ini:



Gambar 2.19. Pengaruh pemadatan pada daya rembes tanah lempung
 Sumber: Lambe dalam Das (1995)

Kekuatan tanah lempung yang dipadatkan umumnya berkurang dengan bertambahnya kadar air. Hal ini dapat diperhatikan bahwa pada kadar air optimum, terjadi

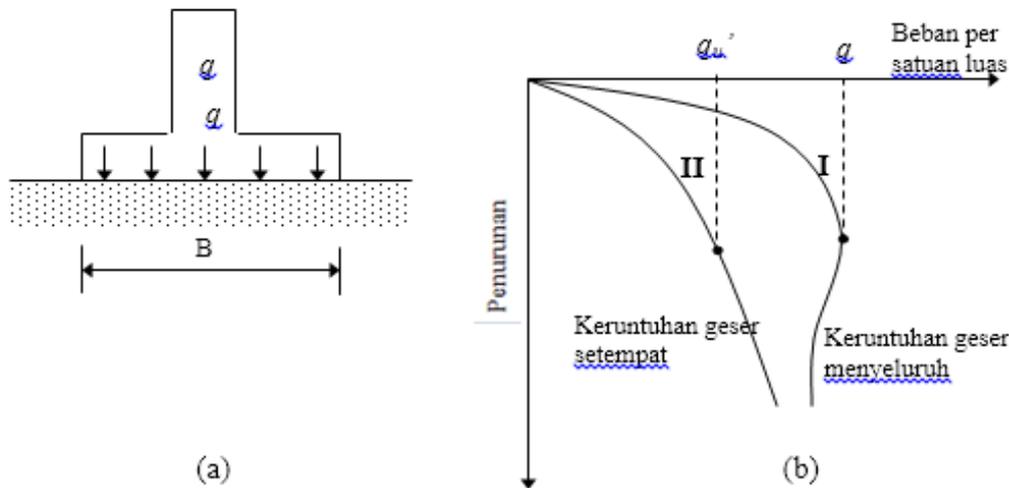
penurunan kekuatan tanah yang besar. Ini berarti bahwa pada dua contoh tanah yang dipadatkan pada berat volume kering yang sama, yang satu dipadatkan pada sisi kering dan yang lainnya pada sisi basah dari kadar air optimum (yang memiliki struktur terfokulasi) akan mempunyai kekuatan yang lebih besar seperti yang ditunjukkan **gambar 2.20**. berikut ini:



Gambar 2.20. Pengaruh pemadatan pada kekuatan tanah lempung
Sumber: Das (1995)

2.8 Daya Dukung Tanah

Kapasitas/daya dukung tanah (*bearing capacity*) adalah kekuatan tanah untuk menahan suatu beban yang bekerja padanya yang biasanya disalurkan melalui pondasi. Kapasitas/daya dukung tanah batas ($q_u = q_{ult} = \textit{ultimate bearing capacity}$) adalah tekanan maksimum yang dapat diterima oleh tanah akibat beban yang bekerja tanpa menimbulkan kelongsoran geser pada tanah pendukung tepat di bawah dan sekeliling pondasi. Konsep perhitungan daya dukung batas tanah dan bentuk keruntuhan geser dalam tanah dapat dilihat dalam model pondasi menerus dengan lebar (B) yang diletakkan pada permukaan lapisan tanah pasir padat (tanah yang kaku) seperti pada **gambar 2.21a**. Apabila beban terbagi rata (q) tersebut ditambah, maka penurunan pondasi akan bertambah pula. Bila besar beban terbagi rata $q = q_u$ ($q_u = \textit{daya dukung tanah batas}$) telah dicapai, maka keruntuhan daya dukung akan terjadi, yang berarti pondasi akan mengalami penurunan yang sangat besar tanpa penambahan beban q lebih lanjut seperti **gambar 2.21b**. Hubungan antara beban dan penurunan ditunjukkan pada kurva I pada **gambar 2.21b**. Untuk keadaan ini, q_u didefinisikan sebagai daya dukung batas dari tanah (Das, 1995)



Gambar 2.21. Daya dukung batas tanah untuk kondisi dangkal
 (a) Model pondasi
 (b) Grafik hubungan antara beban dan penurunan

Menurut Vesic (1963) dalam Hardiyatmo (2011), mekanisme keruntuhan dapat dibagi menjadi 3 macam, yaitu:

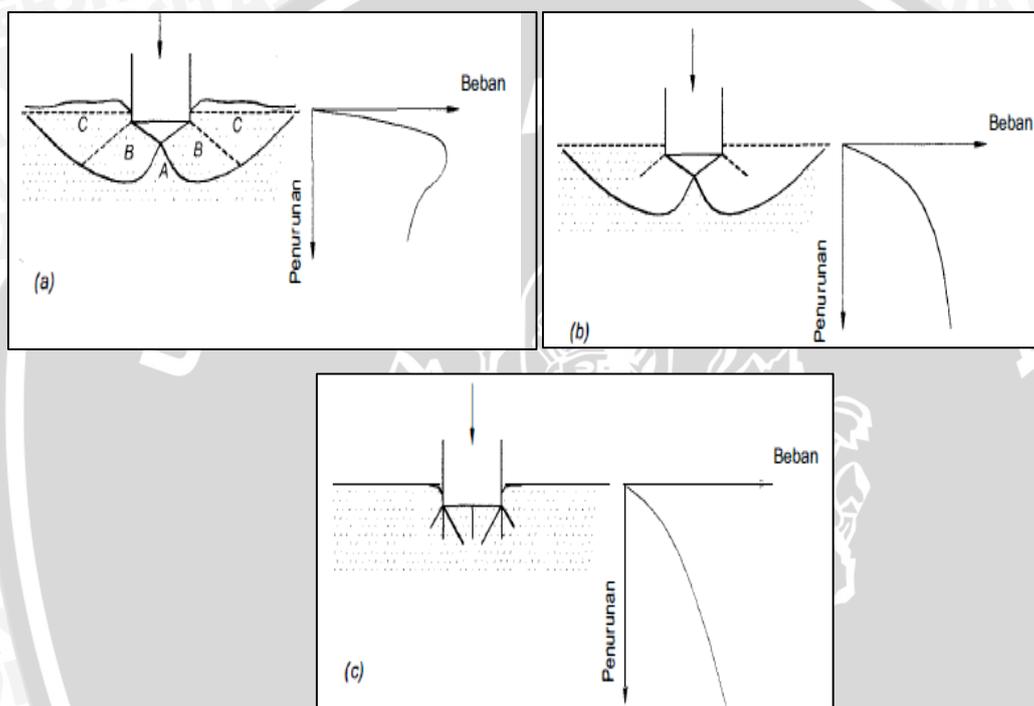
1. Keruntuhan geser umum (*general shear failure*),
2. Keruntuhan geser lokal (*local shear failure*), dan
3. Keruntuhan penetrasi (*penetration failure atau punching shear failure*).

Keruntuhan geser umum terjadi menurut bidang runtuh yang dapat diidentifikasi secara jelas yaitu terbentuk baji tanah di dasar pondasi ditandai dengan penggembungan tanah di sekitar pondasi. Bidang longsor terbentuk berupa lengkung dan garis lurus yang mengembang hingga permukaan tanah seperti yang tampak pada **gambar 2.22.a**.

Keruntuhan geser lokal hampir sama dengan keruntuhan geser umum namun bidang runtuh yang terjadi tidak sampai ke permukaan tanah. Pondasi tenggelam menyebabkan tanah disekitarnya mampat dan membuat tanah sekitarnya sedikit mengembang seperti pada **gambar 2.22.b**.

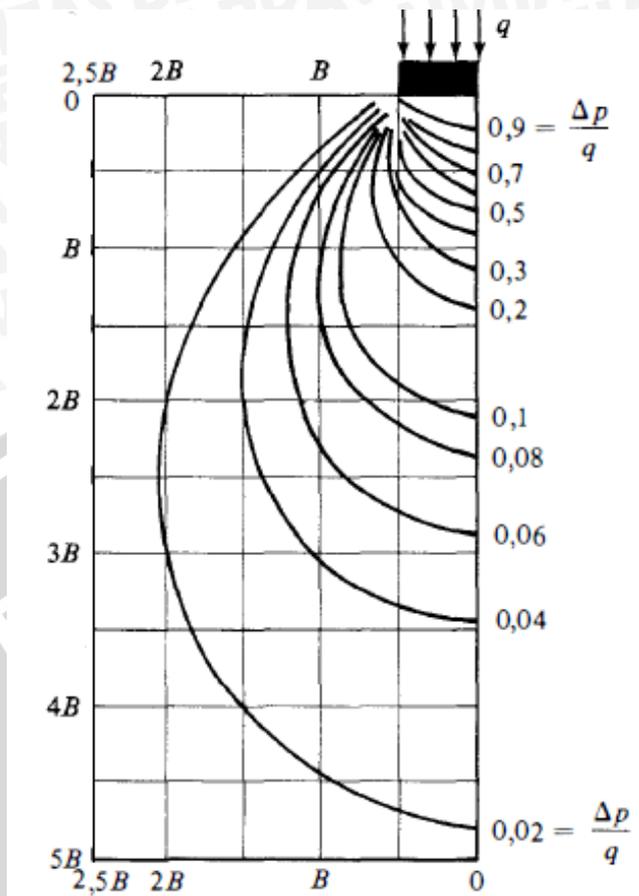
Keruntuhan penetrasi dapat dikatakan keruntuhan geser tanah tidak terjadi. Akibat beban yang bekerja pada tanah lunak, pondasi hanya menembus dan menekan tanah ke samping yang menyebabkan pemampatan tanah di dekat pondasi. Penurunan pondasi bertambah hampir secara linier dengan penambahan beban. Penurunan yang terjadi tidak mengakibatkan gerakan arah lateral yang menuju kedudukan kritis keruntuhan tanah, sehingga kuat geser ultimit tanah tidak dapat berkembang. Saat keruntuhan, bidang runtuh tidak terlihat sama sekali (**Gambar 2.22. c**).

Jika tanah tidak mudah mampat dan kuat gesernya tinggi, maka keruntuhan geser umum akan terjadi. Tipe keruntuhan penetrasi biasanya terjadi terutama pada tanah-tanah yang mudah mampat, seperti pasir tidak padat dan lempung lunak, dan banyak terjadi pula jika panjang pondasi (D_f) sangat besar bila dibandingkan dengan lebarnya (B). Akan tetapi, model keruntuhan pondasi hanya akan terjadi pada tipe pondasi tertentu tergantung dari banyak faktor, seperti pada tipe tanah tertentu tidak dapat menunjukkan tipe model keruntuhan pondasi.



Gambar 2.22. Macam Keruntuhan Pondasi; (a) Keruntuhan geser umum; (b) Keruntuhan geser lokal; (c) Keruntuhan penetrasi
 Sumber: Vesic (1963) dalam Hrdiyatmo (2011)

Daya dukung merupakan tegangan maksimum yang mampu ditahan oleh tanah. Boussines membuat permodelan distribusi tegangan pada tanah, sesuai dengan panjang tanah, menjadi garis-garis isobar. Menurut Boussinesq kenaikan tegangan (ΔP) disebabkan beban garis (q) akan semakin kecil pada panjang tanah yang semakin dalam seperti yang tampak pada **gambar 2.23**. Berikut ini adalah garis isobar tegangan vertikal yang dimodelkan oleh Bousinesq.



Gambar 2.23. Isobar tegangan untuk beban terbagi rata berbentuk bujur sangkar teori Boussinesq

BAB III METODE PENELITIAN

3.1. Waktu dan Tempat

Waktu: Maret 2015 sampai selesai penelitian.

Tempat: Laboratorium Mekanika Tanah dan Geologi Fakultas Teknik Jurusan Sipil Universitas Brawijaya

3.2. Alat dan Bahan Penelitian

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Tanah lempung ekspansif yang berasal dari Kecamatan Ngasem, Bojonegoro, Jawa Timur.
2. *Fly ash* yang diperoleh dari toko bangunan di Malang.

Untuk mendukung terlaksananya penelitian ini, digunakan peralatan sebagai berikut:

1. Kotak (*box*) dengan ukuran $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$ yang terbuat dari *fiberglass*. *Box* dibuat kaku dengan diperkuat menggunakan profil siku 30.30.3 pada ujung-ujung sisinya. Selain itu juga, penggunaan *fiberglass* berfungsi agar perilaku benda uji dapat diamati saat pelaksanaan;
2. Pipa besi dengan diameter 30 mm yang digunakan untuk instalasi kolom *Deep Soil Mixing* (DSM);
3. Saringan No. 4;
4. Gelas ukur;
5. Bak pencampur;
6. Sendok;
7. Timbangan digital;
8. Alat pemadat untuk sampel tanah asli memiliki berat 9,56 kg dengan luas permukaan $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$;
9. Alat pemadat *Deep Soil Mix* memiliki berat 2,56 kg dan diameter 3 cm.
10. Ring *density*;
11. Palu;
12. Penggaris;
13. Waterpass;



14. Plastik kresek;
15. Karung goni;
16. Alat uji beban vertikal berupa pompa hidrolis, dongkrak hidrolis;
17. Pelat baja 5x5 cm² dan tebal 1,5 cm;
18. Dial LVDT;
19. Load cell;
20. Frame pembebanan (Portal).

3.3. Metode Penelitian

3.3.1. Pengujian Pendahuluan

Untuk mendukung penelitian ini maka dilakukan penelitian pendahuluan untuk memastikan kondisi tanah yang akan di uji merupakan jenis tanah lempung ekspansif. Dalam penelitian pendahuluan terdiri dari beberapa macam pengujian yaitu:

1. Pemeriksaan *specific gravity* (**ASTM 1992 D 854-92**);
2. Pemeriksaan batas cair, batas plastis indeks plastisitas tanah (**ASTM 1984 D 4318-84**);
3. Pemeriksaan batas susut (**ASTM D 427-04**);
4. Pengujian klasifikasi tanah metode USCS (**ASTM 1992 D 2487-92**);
5. Pengujian proktor standar (**ASTM D-698 (Metode B)**).

Tujuan dari pengujian *specific gravity*, Indeks plastisitas, batas susut dan klasifikasi tanah digunakan untuk memastikan kondisi tanah merupakan jenis tanah lempung ekspansif. Setelah tanah yang diuji diketahui merupakan tanah lempung ekspansif maka penelitian dilanjutkan dengan pengujian proktor standar.

Sebelum persiapan benda uji dilaksanakan peneliti sebelumnya melakukan pengujian proktor standar untuk mendapatkan nilai kadar optimum (OMC) dan berat isi kering maksimum (γ_d) yang selanjutnya akan di aplikasikan ke dalam *box* benda uji. Dalam pengujian proktor standart didapatkan berat isi kering (γ_d) sebesar 1,407 gr/cm³ dan kadar air optimum (OMC) 27,9%. Namun setelah diaplikasikan ke dalam *box* benda uji, berat isi kering tanah relatif yang dapat dilaksanakan sebesar 1,28 gr/cm³ dan kadar air 27,9% (OMC), sehingga digunakan berat isi kering 91%. Percobaan pemadatan dalam *box* dilakukan dengan menggunakan alat dengan berat 9,56 kg dan ukuran permukaan 12,5x12,5 cm² dengan jumlah tumbukan sebanyak 64 kali. Untuk mendapatkan jumlah tumbukan dan berat isi relatif, dalam percobaan ini dilakukan dengan metode *trial error* yaitu dengan melakukan percobaan berulang-ulang hingga didapat berat isi kering relatif

dalam *box* yang dapat dilaksanakan hingga ditetapkan jumlah tumbukan yang diperlukan. Setelah berat isi kering relatif dan jumlah tumbukan diperoleh dapat dilanjutkan dengan pembuatan sampel pada *box* uji.

Selain kepadatan tanah dalam *box* ditentukan, kepadatan tanah *deep soil mix* juga ditentukan yaitu $1,488 \text{ gr/cm}^3$ berdasarkan penelitian yang telah dilakukan Benny C.L.T.(2014). Selanjutnya peneliti melakukan uji coba untuk mendapatkan jumlah tumbukan sehingga berat isi kering tanah campuran 15% *fly ash* untuk *deep soil mix* (DSM) yang diharapkan dapat terpenuhi. Percobaan dilakukan dengan cara memasukkan tanah dengan berat tanah campuran 39,68 gr dan kadar air 25,8% ke dalam silinder dengan diameter dalam 3 cm kemudian ditumbuk dengan alat penumbuk dengan berat 2,56 kg dengan diameter 2,9 cm. Setelah dilakukan berulang-ulang maka untuk mendapatkan berat isi kering tanah campuran 15% *fly ash* $1,488 \text{ gr/cm}^3$ digunakan penumbuk seberat 2,56 kg diameter 2,9 cm dengan tinggi jatuh 30 cm dan jumlah tumbukan sebanyak 2 kali.

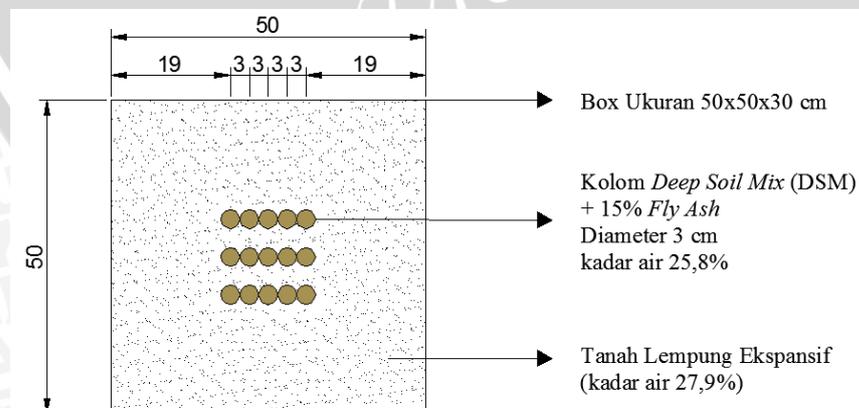
3.3.2. Persiapan Benda Uji

Sampel tanah merupakan tanah lempung ekspansif bojonegoro dengan kondisi basah. Untuk itu diperlukan persiapan benda uji untuk menyamakan kondisi tanah lempung ekspansif yang akan di uji sehingga di didapatkan data yang valid sehingga terhindar dari kesalahan pada saat pengujian. Adapun persiapan benda uji meliputi kegiatan sebagai berikut:

1. Sampel tanah dikeringkan dengan dijemur di bawah terik matahari hingga mudah dihancurkan.
2. Setelah tanah ditumbuk, sampel tanah di ayak lolos saringan No. 4.
3. Tanah lolos saringan No. 4 ditambahkan air dengan kadar air 27,9% terhadap berat kering tanah. Pencampuran dilakukan selama 2 sampai 5 menit kemudian sampel di jenuhkan dalam plastik kresek selama sehari sehingga homogen.
4. Pembuatan benda uji dalam penelitian di bagi menjadi dua jenis yaitu kondisi tanah asli tanpa stabilisasi *deep soil mix* dan kondisi tanah dengan stabilisasi *deep soil mix*.
5. Tanah dasar atau asli dimasukkan ke dalam *box* berukuran $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$ hingga ketinggian (H) 20 cm. Sampel dibagi menjadi 4 lapisan dimana setiap lapisan dipadatkan menggunakan alat pemadat dengan ukuran permukaan $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ dan berat 9,56 kg. Untuk kontrol kepadatan pada setiap lapisan tanah dilakukan

- pengujian *density* setelah tanah dipadatkan. Jumlah tumbukan yang digunakan untuk mendapatkan berat isi kering tanah asli $1,28 \text{ gr/cm}^3$ adalah 64 kali per layer.
6. Namun untuk kondisi tanah dengan stabilisasi *deep soil mix* (DSM), setelah tanah dipadatkan, dilanjutkan dengan pembuatan lubang kolom untuk tanah sesuai dengan instalasi jarak dan panjang yang sudah ditentukan dengan bantuan pipa besi. Dilanjutkan dengan proses pencampuran tanah yang dicampur dengan 15% *fly ash*. Tanah pada *deep soil mix* (DSM) memiliki kepadatan $1,488 \text{ gr/cm}^3$ dengan kadar air 25,8% dari berat isi kering tanah campuran.
 7. Sampel tanah yang sudah dicampur 15% *fly ash* dimasukkan ke dalam instalasi kolom yang sudah ditentukan jarak dan panjangnya (lihat **Tabel 3.1**). proses instalasi dilakukan dengan tahap sebagai berikut :
 - a. Tanah campuran *fly ash* dimasukkan ke dalam lubang dengan beberapa lapisan sesuai dengan tinggi variasi. Setiap lapisan memiliki tebal 3 cm.
 - b. Tiap lapisan dilakukan penumbukan dengan alat yang memiliki diameter 2,9 cm yang dipukul proktor dengan berat 2,56 kg .
 - c. Jumlah tumbukan yang digunakan untuk mendapatkan berat isi tanah $1,488 \text{ gr/cm}^3$ pada *deep soil mix* (DSM) adalah 2 kali tumbukan.
 8. Setelah proses instalasi selesai dilanjutkan proses waktu perawatan selama 4 hari.
 9. Setelah proses waktu perawatan mencapai 4 hari dilanjutkan uji pembebanan dengan model podasi dengan ukuran $5 \times 5 \times 1,5 \text{ cm}^3$.

Dalam pemodelan benda uji, dilakukan variasi jarak dan panjang pada konfigurasi kolom DSM yang digunakan. Hal ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh variasi tersebut terhadap daya dukung tanah. Konfigurasi yang digunakan adalah konfigurasi pola *panels* dengan diameter (D) 3 cm yang ditampilkan pada **gambar 3.1**.



Gambar 3.1. Pemodelan DSM Pola *Panels*

Adapun variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) Pola *Panels* akan ditabelkan sebagai berikut:

Tabel 3.1. Variasi jarak dan panjang *Deep Soil Mix* (DSM) dengan diameter (D) 3 cm pola *panels*

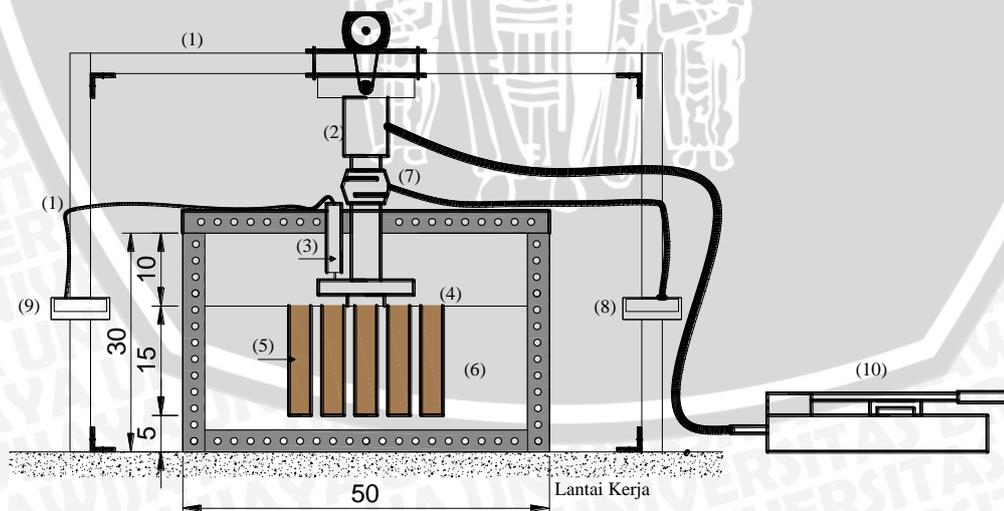
| | Jarak <i>Deep Soil Mix</i> (DSM) $L = 1 D$ | Jarak <i>Deep Soil Mix</i> (DSM) $L = 1,25 D$ | Jarak <i>Deep Soil Mix</i> (DSM) $L = 1,5 D$ |
|--------------------------------|---|--|---|
| Konfigurasi Pola <i>Panels</i> | | | |
| Panjang DF= 18 | | | |
| Panjang DF= 28 | | | |
| Panjang DF= 38 | | | |

3.3.3. Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan dilakukan dengan menggunakan *hydraulic jack* atau dongkrak hidrolis. Sebagai pengukur besarnya beban yang terjadi, digunakan *load cell* dengan kapasitas 5 ton dan dapat langsung dibaca besarnya beban yang terjadi pada model pondasi. Digunakan *dial LVDT* untuk mengetahui besarnya penurunan tanah yang terjadi pada permukaan tanah karena uji beban pada pondasi.

Pada proses uji beban diawali dengan persiapan alat uji beban dengan meletakkan frame uji beban di tengah *box* sampel tanah agar model pondasi berada tepat di tengah benda uji. Setelah frame dipasang dilanjutkan dengan meletakkan alat pemberat pada frame dengan tujuan agar frame uji beban tidak terangkat ketika uji beban berlangsung. Selanjutnya dilakukan pemasangan dongkrak hidrolis, *load cell*, piston dan pelat model pondasi.

Pada uji beban vertikal model pondasi, ujung atas dari dongkrak hidrolis dihubungkan dengan *frame* pembebanan yang terbuat dari baja profil. Sedangkan ujung bawah dongkrak hidrolis dihubungkan pada *load cell* dilanjutkan dengan *piston* untuk meneruskan beban pada pelat baja. Pelat baja berfungsi untuk mendistribusikan beban terpusat dari *piston* dongkrak hidrolis menjadi beban merata yang digunakan sebagai model pondasi pada proses pembebanan. Letak dongkrak hidrolis diatur sedemikian rupa sehingga terpasang pada pusat pelat baja dan pelat baja terpasang tepat di atas benda uji (lihat **gambar 3.2**). Hasil akhir dari uji pembebanan akan diperoleh kurva Beban-penurunan tanah sehingga di dapatkan daya dukung tanah ekspansif.



- Keterangan :
- | | | |
|-------------------------|--------------------------------|--------------------|
| 1. Portal baja | 5. Deep Soil Mix + 15% fly ash | 9. Digital LVDT |
| 2. Piston hidrolis | 6. Sampel lempung ekspansif | 10. Pompa Hidrolis |
| 3. Dial LVDT | 7. Load cell | |
| 4. Pelat baja 20x20x2cm | 8. Digital load cell | |

Gambar 3.2. Skema Uji Pembebanan

Pengujian pembebanan yang pertama dilakukan terhadap benda uji tanah asli yang belum distabilisasi menggunakan kolom *fly ash*. Hal ini dilakukan guna mengetahui kurva daya dukung tanah asli yang nantinya akan dibandingkan dengan tanah yang telah distabilisasi. Pengujian pembebanan selanjutnya dilakukan terhadap benda uji yang telah distabilisasi menggunakan kolom *fly ash*. Pengujian dilakukan sebanyak 9 kali sesuai dengan variasi jarak dan panjang yang telah ditentukan sebelumnya. Dari pengujian ini diharapkan akan memberikan perilaku terhadap daya dukung tanah dari seluruh benda uji dan diperoleh jarak dan panjang optimum kolom *fly ash* yang memberikan pengaruh terbesar pada daya dukung tanah.

Langkah-langkah pengujian pembebanan adalah sebagai berikut:

1. Menyiapkan model benda uji.
2. Meletakkan pelat baja di tengah permukaan benda uji yang sudah diratakan dengan batuan *waterpass*, penggaris dan benang.
3. Menyiapkan dan memasang satu set alat uji pembebanan serta *dial LVDT* seperti pada **gambar 3.2**.
4. Melakukan uji pembebanan dengan menggunakan dongkrak hidrolik statis.
5. Pembebanan dilakukan bertahap dengan interval pembacaan dial LVDT 50.
6. Mencatat penurunan dari hasil pembacaan pada *dial LVDT* yang terjadi akibat beban vertikal .
7. Beban dihentikan ketika pembacaan menunjukkan 3 kali sama namun penurunan terus berjalan.

Tabel 3.1. Pembacaan Load Cell dan Dial LVDT

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | |
| | 50 | 0.0025 | 0.25 | | |
| | 100 | 0.0025 | | | |
| | 150 | | | | |
| | 200 | | | | |
| | 250 | | | | |
| | 300 | | | | |

3.4. Metode Analisa Data

Data yang telah dicatat dari hasil pembacaan uji pembebanan, kemudian diolah dengan persamaan yang telah ada dengan bantuan *Software Microsoft Excel*. Dari penelitian yang dilakukan akan didapatkan nilai beban dan penurunan yang terjadi akibat beban vertikal. Dari beban tersebut maka dapat diketahui berapa daya dukung dari tanah yang diuji berdasarkan luas pondasi model. Kemudian akan dibuat grafik perilaku tegangan dan penurunan tanah lempung ekspansif asli maupun distabilisasi dengan 15% *fly ash* metode *Deep Soil Mixing* (DSM) untuk mendapatkan nilai daya dukung tanah hasil pengujian beban vertikal pondasi. Dengan memberikan variasi jarak dan panjang kolom *fly ash* akan diketahui peningkatan daya dukung tanah tersebut. Perhitungan daya dukung digunakan rumus sebagai berikut:

$$q_u = \frac{P_u}{A} \quad (3.1)$$

dengan, q_u = kapasitas dukung ultimit (kN/m^2)

P_u = beban ultimit (kN)

A = luas pondasi (m^2)

Dari hasil uji beban vertikal (*load test*), maka daya dukung batas tanah (q_u) pada pondasi bujur sangkar di atas tanah lempung ekspansif dapat dihitung dengan metode pendekatan berikut:

$$Q_u(\text{pondasi}) = Q_u(\text{pelat})$$

Berdasarkan grafik hubungan antara tegangan dan penurunan tanah lempung ekspansif yang distabilisasi dengan 15% *fly ash* menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM) diameter 3 cm dengan variasi jarak dan panjang, daya dukung tanah ekspansif pada penelitian ini merupakan tegangan kontak maksimum antara tanah lempung ekspansif dengan pondasi model. Dari adanya variasi jarak dan panjang kolom *fly ash* akan diketahui bagaimana pengaruhnya terhadap nilai daya dukung tanah. Selain pengaruh dari *deep soil mix* (DSM) maka juga akan didapatkan jarak dan panjang optimum dari variasi jarak dan panjang *deep soil mix* (DSM).

3.5. Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan dua variabel, yaitu variabel terikat dan variabel bebas. Pembagian dua variabel tersebut adalah sebagai berikut:

a. Variabel bebas, terdiri dari:

- Jarak antar kolom

- Panjang kolom
- b. Variabel terikat , terdiri dari:
 - Beban yang bekerja
 - Penurunan yang terjadi akibat beban vertikal yang bekerja
 - Daya dukung tanah

3.6. Rancangan Penelitian

Pada penelitian ini dibuat dua jenis benda uji, yaitu benda uji berupa tanah asli dan tanah yang telah distabilisasi dengan campuran 15% *fly ash* menggunakan metode *Deep Soil Mixing* (DSM). Pengujian pembebanan dilakukan terlebih dahulu terhadap tanah asli dan kemudian terhadap tanah yang telah distabilisasi. Nantinya akan diperoleh perilaku tegangan-penurunan tanah sebelum dan sesudah stabilisasi yang diberi variasi jarak dan panjang kolom *fly ash* dilakukan. Rancangan penelitian ditampilkan dalam Tabel 3.2.

Tabel 3.2. Rancangan Penelitian Variasi Jarak dan Panjang Kolom DSM

| Jenis Sampel | Jarak DSM (cm) | Panjang DSM (cm) | Penurunan (mm) | Beban maksimum (kg) | Daya Dukung (kN/m ²) |
|----------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Tanah Asli | - | - | | | |
| Tanah + 15% <i>Fly Ash</i> | 1 D = 3 cm | 1 B = 5 cm | | | |
| | | 2 B = 10 cm | | | |
| | | 3 B = 15 cm | | | |
| | 1,25 D = 3,75 cm | 1 B = 5 cm | | | |
| | | 2 B = 10 cm | | | |
| | | 3 B = 15 cm | | | |
| | 1,5 D = 4,5 cm | 1 B = 5 cm | | | |
| | | 2 B = 10 cm | | | |
| | | 3 B = 15 cm | | | |

Untuk mengetahui pengaruh jarak dan panjang *deep soil mix* (DSM) untuk meningkatkan daya dukung tanah dilakukan analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI). Nilai BCI dapat diperoleh dengan rumus:

$$BCI = \frac{q_u \text{ tanah dengan DSM}}{q_u \text{ tanah asli}} \times 100\% \quad (3.2)$$

Hasil analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) kemudian disajikan dalam tabel berikut:

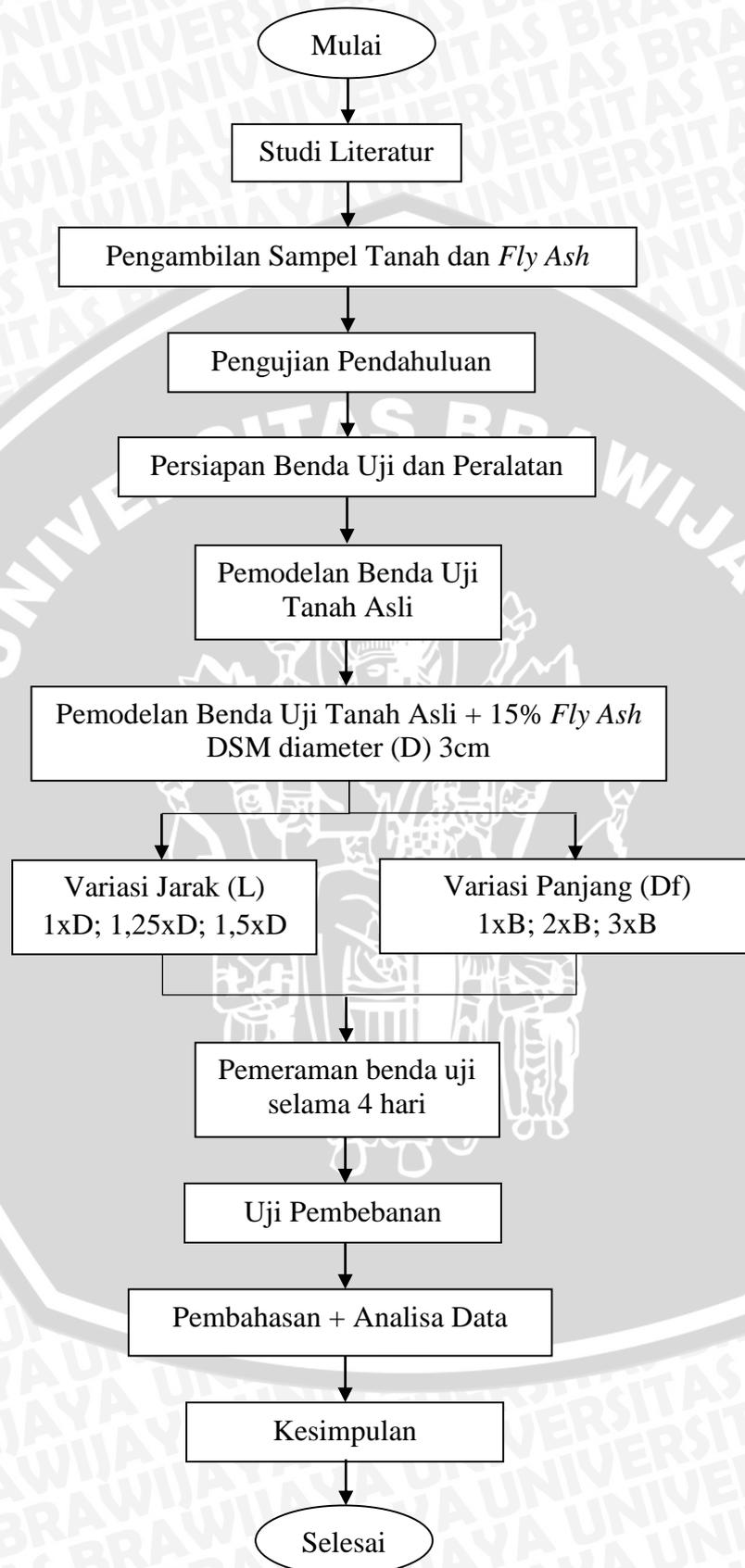
Tabel 3.3. *Bearing Capacity Improvement* (BCI) untuk variasi jarak

| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | qu tanah asli (kN/m ²) | qu dengan DSM (kN/m ²) | BCI (%) |
|----|---------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| 1 | 1B= 5cm | 1D= 3cm | 380 | 512 | 135 |
| 2 | | 1,25D= 3,75cm | | 620 | 163 |
| 3 | | 1,5D= 4,5cm | | 1060 | 279 |
| 4 | 2B= 10cm | 1D= 3cm | | 490 | 129 |
| 5 | | 1,25D= 3,75cm | | 528 | 139 |
| 6 | | 1,5D= 4,5cm | | 736 | 194 |
| 7 | 3B= 15cm | 1D= 3cm | | 484 | 127 |
| 8 | | 1,25D= 3,75cm | | 500 | 132 |
| 9 | | 1,5D= 4,5cm | | 606 | 159 |

Tabel 3.4. *Bearing Capacity Improvement* (BCI) untuk variasi jarak

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | qu tanah asli (kN/m ²) | qu dengan DSM (kN/m ²) | BCI (%) |
|----|------------------|---------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------|
| 1 | 1D= 3cm | 1B= 5cm | 380 | 512 | 135 |
| 2 | | 2B= 10cm | | 620 | 163 |
| 3 | | 3B= 15cm | | 1060 | 279 |
| 4 | 1,25D= 3,75cm | 1B= 5cm | | 490 | 129 |
| 5 | | 2B= 10cm | | 528 | 139 |
| 6 | | 3B= 15cm | | 736 | 194 |
| 7 | 1,5D= 4,5cm | 1B= 5cm | | 484 | 127 |
| 8 | | 2B= 10cm | | 500 | 132 |
| 9 | | 3B= 15cm | | 606 | 159 |

3.7. Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3. Diagram Alir Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. Pengujian Pendahuluan

Pengujian pendahuluan merupakan pengujian yang bertujuan untuk menentukan jenis tanah dan sifat tanah yang digunakan sebagai benda uji. Pengujian pendahuluan terdiri dari uji *specific gravity*, uji klasifikasi tanah, uji Indeks plastisitas, uji batas susut dan uji proktor standar.

4.1.1. *Specific Gravity*

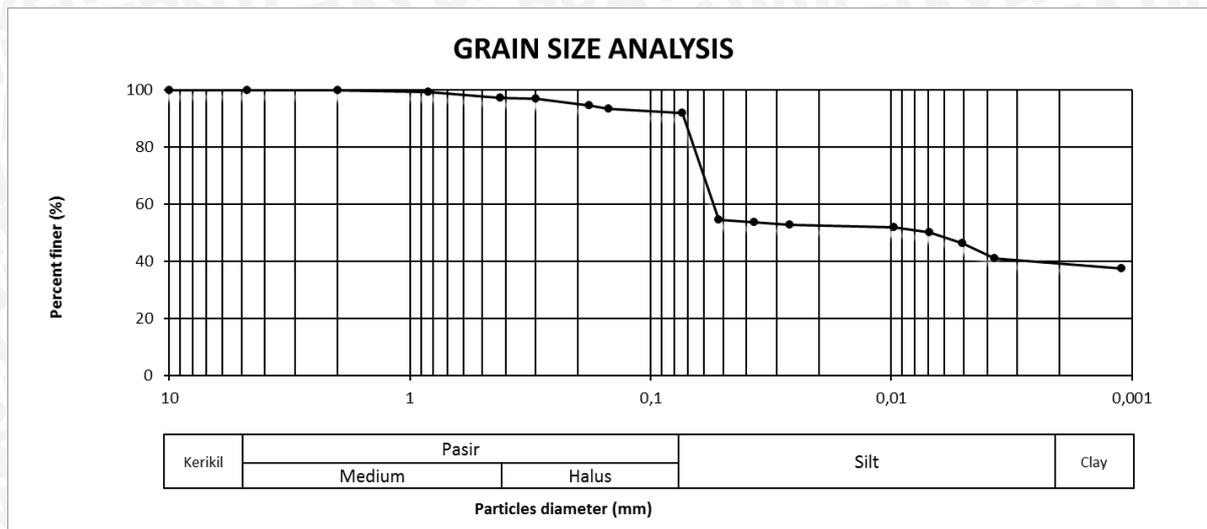
Specific gravity (Gs) atau berat spesifik merupakan perbandingan kerapatan suatu benda yang dibandingkan dengan kerapan benda yang digunakan sebagai acuan. Dalam penelitian ini benda yang digunakan sebagai acuan adalah kerapatan air. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan didapatkan nilai *specific gravity* rata-rata tanah yang digunakan adalah 2,73, sehingga Gs tanah Kabupaten Bojonegoro termasuk lempung anorganik (Gs antara 2,68 - 2,75)

Tabel 4.1. Specific gravity tanah Kabupaten Bojonegoro

| Labu Ukur | Gs | rata-rata |
|-----------|-------|-----------|
| 1 | 2.713 | 2.730 |
| 2 | 2.754 | |
| 3 | 2.724 | |

4.1.2. Klasifikasi Tanah

Pada uji klasifikasi tanah dilakukan dua jenis pengujian yaitu analisis saringan dan analisis hidrometer. Analisis saringan (*mechanical grain size*) untuk menentukan butiran kasar dan butiran halus yang tertahan pada saringan no. 200. Analisis hidrometer digunakan untuk mengetahui distribusi ukuran butiran untuk tanah yang berada di pan atau lolos saringan no. 200. Hasil analisis yang dilakukan ditampilkan pada **gambar 4.1.** berikut ini:



Gambar 4.1. Analisis saringan dan Hidrometer

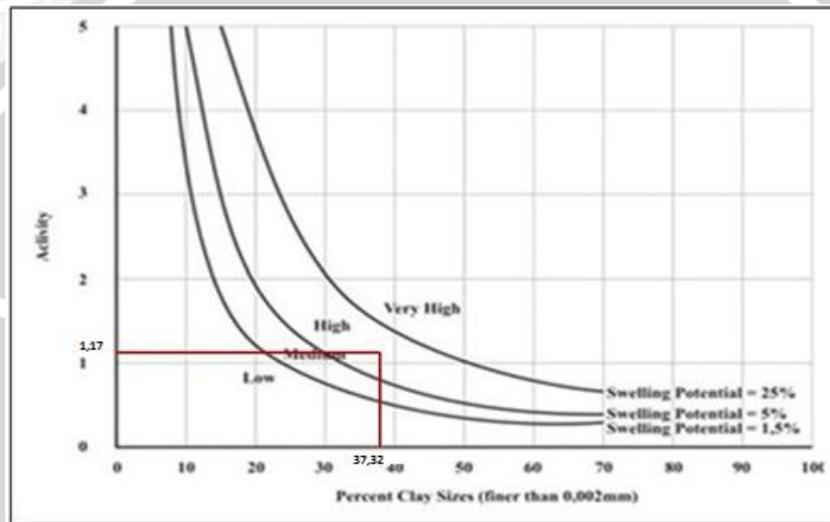
Dari **gambar 4.1** di atas dapat dilihat bahwa tanah dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro ini memiliki persentase distribusi lolos saringan no. 200 sebesar 91,83% dan menurut sistem klasifikasi tanah USCS (*Unified Soil Classification System*) termasuk jenis tanah berbutir halus. Namun berdasarkan data yang didapat masih diperlukan data pendukung untuk menentukan jenis tanah menurut USCS yaitu Indeks Plastisitas (PI)

4.1.3. Atterberg Limit

Karena benda uji merupakan tanah berbutir halus, penting untuk mengetahui sifat plastisitas dari benda uji karena kandungan lempung. Pengujian terdiri dari uji batas cair (*Liquid limit*), uji batas plastis (*Plastic limit*) dan uji batas susut (*Shrinkage limit*). Batas cair dan batas plastis digunakan untuk mengetahui indeks plastisitas. Indeks plastisitas digunakan sebagai data pendukung untuk menentukan jenis tanah yang di uji. Pengujian batas susut digunakan untuk mengetahui kedudukan antara daerah semi padat dan padat, yaitu prosentase kadar air dimana pengurangan kadar air selanjutnya tidak mengakibatkan perubahan volume tanah. Hasil pemeriksaan batas-batas *Attreberg* didapatkan nilai batas cair (*liquid limit*) 73,92%, batas plastis (*plastic limit*) 30,41%, batas susut (*Shrinkage limit*) 2,8%, sehingga didapatkan Indeks Plastisitas sebesar 43,51%. Berdasarkan klasifikasi tanah sistem *Unified* (USCS) dan kriteria *specific gravity* (Gs), tanah lempung dari Desa Ngasem, Kecamatan Ngasem, Kabupaten Bojonegoro ini tergolong sebagai tanah CH (lempung dengan plastisitas tinggi).

4.1.4. Sifat Ekspansifitas

Dalam penelitian ini, untuk mengetahui potensi pengembangan dan derajat mengembang tanah digunakan metode tidak langsung (*single index method*) yaitu dengan menggunakan nilai-nilai dari batas *Atterberg*. Berdasarkan rumus 2.1 nilai aktivitas dapat dihitung sehingga didapatkan nilai aktivitas sebesar 1,17 dan persentase tanah ukuran 0,002 adalah 37,32%. Dari nilai aktivitas dan persentase lolos saringan no. 200 diplotkan pada **gambar 2.5** maka dapat diketahui bahwa tanah Kabupaten Bojonegoro termasuk klasifikasi tanah dengan potensi pengembangan yang tinggi seperti yang ditunjukkan **gambar 4.2.** berikut:



Gambar 4.2. Grafik Klasifikasi Potensi Mengembang

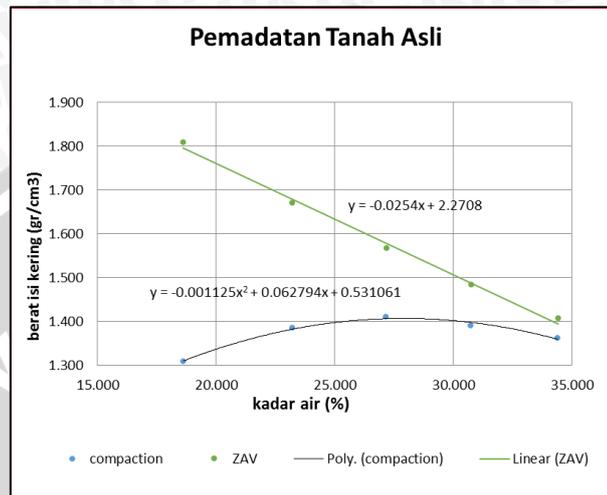
Dari nilai batas-batas Atterberg dan nilai aktivitas juga dapat diklasifikasikan sifat ekspansif berdasarkan **tabel 2.5**; **tabel 2.6** dan **tabel 2.7**. Berdasarkan kriteria Chen (1975) tanah yang diuji memiliki derajat ekspansifitas tinggi. Dalam tabel Raman (1967) sampel memiliki derajat ekspansifitas sangat tinggi. Menurut Altmeyer (1955) tanah yang digunakan sebagai benda uji memiliki derajat ekspansifitas kritis. Dari ketiga kriteria yang ada dapat disimpulkan bahwa tanah yang digunakan sebagai benda uji merupakan tanah ekspansif dan dapat dilanjutkan pada proses pembuatan benda uji.

4.1.5. Pemeriksaan Pemadatan Standar

Dalam penelitian ini, pemadatan standar digunakan untuk mengetahui nilai kadar air optimum (OMC) ketika tanah memiliki berat isi kering maksimum (γ_d maks) sesuai dengan metode **ASTM D-698** Metode B. Pengujian pemadatan standar dilakukan dengan metode B dengan spesifikasi alat sebagai berikut

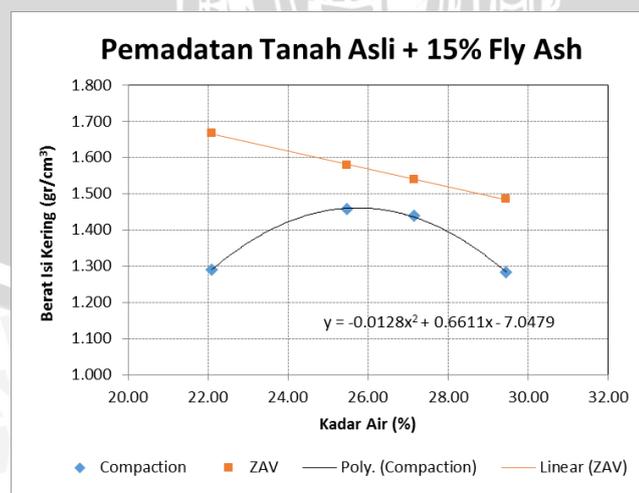
- Diameter cetakan (*mold*) 152 mm (6")
- Bahan lolos saringan no.4 (4,75 mm)
- Berat alat pemukul (*proctor*) 2,5 kg dengan tinggi jatuh 30,48 cm (12")

Grafik hasil pengujian pemadatan standar pada tanah asli dapat dilihat pada **gambar 4.3** berikut ini:



Gambar 4.3 Grafik hasil pemadatan tanah asli

Dalam uji pemadatan standar yang dilakukan, didapatkan kadar air optimum (OMC) sebesar 27,9% dan berat isi kering maksimum (γ_d maks) sebesar 1,407 gr/cm³, selanjutnya data tersebut digunakan untuk pembuatan benda uji dalam *box*. Untuk data pemadatan tanah yang dicampur 15% *fly ash* merupakan data yang diperoleh dari penelitian Tobing (2014) yang nantinya digunakan sebagai bahan stabilisasi DSM. Grafik hasil pemadatan tanah ditambah 15% *fly ash* dapat dilihat pada **gambar 4.4**.



Gambar 4.4. Grafik hasil pemadatan tanah asli + 15% *fly ash*

Dari penelitian yang dilakukan Tobing (2014) didapatkan berat isi kering maksimum tanah dengan stabilisasi 15% *fly ash* (γ_d maks) sebesar $1,488 \text{ gr/cm}^3$ dengan kadar air optimum (OMC) adalah 25,8%.

4.1.6. Kepadatan Tanah Model

Dalam penelitian digunakan *box* ukuran $50 \times 50 \times 30 \text{ cm}^3$ sehingga untuk mencapai kepadatan maksimum seperti yang dilakukan pada pemadatan standar sangatlah sulit. Agar setiap benda uji memiliki kepadatan yang seragam digunakan kepadatan relatif 91% dari kepadatan standar. Kepadatan relatif di dapatkan dengan cara memadatkan benda uji dalam *box* dengan bantuan alat pemadat dengan ukuran permukaan permukaan $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ dengan berat 9,56 kg dan tinggi jatuh 21,5 cm. Setelah dilakukan percobaan pemadatan berulang-ulang, maka didapatkan lintasan dengan jumlah tumbukan sebanyak 64 kali untuk mencapai berat isi kering rata-rata tanah model $1,28 \text{ gr/cm}^3$. Metode pemadatan dilakukan dengan cara membagi tinggi sampel menjadi 4 layer dengan tinggi 5 cm untuk dipadatkan, sehingga kepadatan tanah dalam setiap layer menjadi seragam.

4.2. Pengujian Model Test

Kadar air yang digunakan dalam pembuatan model dalam *box* adalah 27,9% dengan berat isi kering relatif $1,28 \text{ gr/cm}^3$. Pembuatan benda uji dilakukan dengan cara mencampur tanah sudah dikeringkan dan lolos saringan no. 4 dicampur dengan air yang keduanya sudah ditimbang sesuai perhitungan yang sudah dilakukan, sehingga di dapatkan kadar air 27,9% (OMC) dan mencapai berat isi kering $1,28 \text{ gr/cm}^3$ sesuai ukuran *box*. Berat total campuran tanah dengan air memiliki berat 82,37 kg dengan ukuran volume $50 \times 50 \times 20 \text{ cm}^3$. Setelah tanah dicampur, tanah dibiarkan selama sehari dengan tujuan air tercampur rata sehingga tanah menjadi homogen.

Dalam pembuatan benda uji dalam *box* tanah dibagi menjadi 4 layer beserta dengan berat tanah yang dimasukkan. Berat tanah yang dimasukkan setiap layer memiliki berat 20,59 kg. Setelah benda uji selesai dipadatkan, pada pengujian tanah asli langsung dilanjutkan pada uji beban vertikal. Namun untuk tanah yang di stabilisasi dilanjutkan dengan pembuatan kolom DSM. Volume DSM tergantung pada panjang tanah yang diperbaiki namun memiliki kepadatan tanah yang sama yaitu $1,488 \text{ gr/cm}^3$. Jumlah DSM pada setiap benda uji berjumlah 15 buah dengan variasi panjang dan jarak yang sudah ditentukan. Berikut ini berat tanah yang dibutuhkan sebuah kolom DSM sesuai dengan variasi jarak dan panjang dengan berat isi kering $1,488 \text{ gr/cm}^3$:

Tabel 4.2. Berat kebutuhan kolom DSM

| Berat Tanah+15% fly ash (gr) | Panjang (Df) | Jarak DSM (L) | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|-------------------|--------------|
| | | 1D = 3cm | 1,25D = 3,75cm | 1,5D = 4,5cm |
| | 1B =5cm | 66.13 gr | 66.13 gr | 66.13 gr |
| | 2B = 10cm | 132.25 gr | 132.25 gr | 132.25 gr |
| | 3B = 15 cm | 198.38 gr | 198.38 gr | 198.38 gr |

Instalasi DSM diawali dengan pembuatan lubang DSM dengan diameter 3 cm dengan panjang dan jarak sesuai dengan variasi yang telah ditentukan. Setelah DSM dipadatkan dengan alat seberat 2,5 kg dan diameter 2,9 cm maka dilanjutkan dengan meratakan permukaan tanah yang masih bergelombang. Setelah benda uji diratakan dilanjutkan dengan proses waktu perawatan selama 4 hari sebelum dilakukan pengujian pembebanan. Setelah proses waktu perawatan berlangsung selama 4 hari, dilakukan pembebanan vertikal pada titik tengah dari benda uji menggunakan pelat ukuran 5x5 cm² yang ditekan oleh dongkrak hidrolik dengan interval penurunan 50 skala dial LVDT. Setiap penurunan 50 skala LVDT dilakukan pembacaan beban. Beban dihentikan ketika penurunan terus bertambah namun pembacaan beban 3 kali sama berturut-turut.

4.3. Hasil Pengujian

4.3.1. Uji Tanah Asli

Pengujian benda uji diawali dengan pengujian tanah asli. Yang dimaksud tanah asli dalam penelitian ini adalah tanah lempung ekspansif tanpa stabilisasi DSM. Tanah ekspansif yang diuji memiliki data sebagai berikut:

$$\text{Berat isi kering tanah } (\gamma_d) \text{ rata-rata} = 1,280 \text{ gr/cm}^3$$

$$\text{Kadar air tanah rata-rata} = 29,34 \%$$

$$\text{Luas pelat beban uji} = 25 \text{ cm}^2$$

Dari data tersebut didapatkan hasil pengujian besar beban maksimum yang dapat ditahan tanah (P_u) sebesar 95 kg dengan penurunan maksimum yang terjadi 3,75mm.

4.3.2. Uji Tanah Stabilisasi 15% Fly Ash

Dalam penelitian ini, benda uji dibuat berdasarkan variasi jarak (L) dan panjang kolom (Df) DSM pola *panels* yang sudah ditentukan. Jumlah benda uji pada tanah yang distabilisasi berjumlah 9 benda uji. Pada uji tanah yang distabilisasi dilakukan waktu perawatan selama 4 hari dengan tujuan *fly ash* dapat bereaksi dengan tanah seperti yang

ditunjukkan pada penelitian Budi dkk (2003), Sulistyowati (2006), Panjaitan (2010) dan Tobing (2014) bahwa waktu perawatan *fly ash* dapat meningkatkan kekuatan tanah. Pelat yang digunakan sebagai beban uji memiliki luas 25 cm². Jarak antar *panel* pada DSM adalah 2D atau 6 cm. Berikut ini adalah hasil pengujian pembebanan tanah dengan campuran 15% *fly ash* setelah waktu perawatan selama 4 hari:

Tabel 4.3. Beban dan penurunan hasil pengujian berdasarkan variasi jarak DSM

| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) |
|----|---------------------|------------------|----------------------|-------------------------------|
| 1 | 1B= 5cm | 1D= 3cm | 3.5 | 128 |
| 2 | | 1,25D= 3,75cm | 3.25 | 122.5 |
| 3 | | 1,5D= 4,5cm | 3 | 121 |
| 4 | 2B= 10cm | 1D= 3cm | 3.5 | 155 |
| 5 | | 1,25D= 3,75cm | 3.5 | 132 |
| 6 | | 1,5D= 4,5cm | 3 | 125 |
| 7 | 3B= 15cm | 1D= 3cm | 4.5 | 265 |
| 8 | | 1,25D= 3,75cm | 4 | 184 |
| 9 | | 1,5D= 4,5cm | 3.25 | 151.5 |

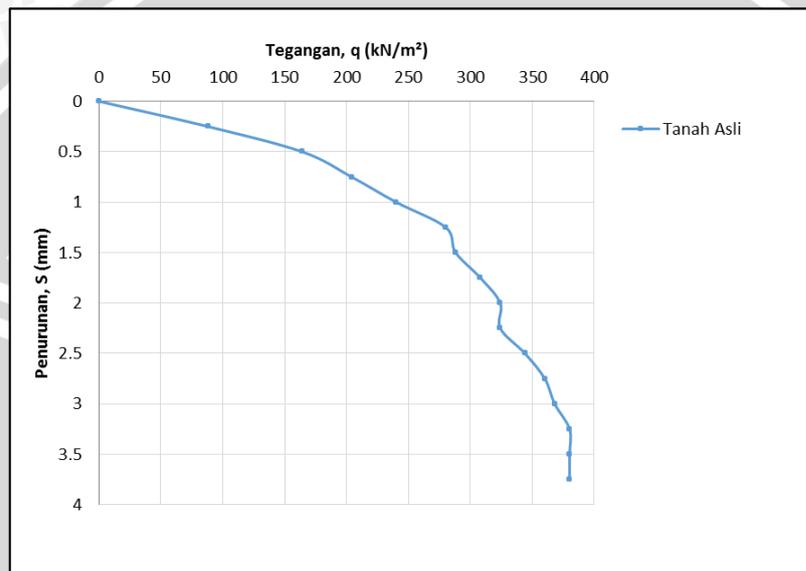
Tabel 4.4. Beban dan penurunan hasil pengujian berdasarkan variasi panjang DSM

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) |
|----|------------------|---------------------|----------------------|-------------------------------|
| 1 | 1D= 3cm | 1B= 5cm | 3.5 | 128 |
| 2 | | 2B= 10cm | 3.5 | 155 |
| 3 | | 3B= 15cm | 4.5 | 265 |
| 4 | 1,25D= 3,75cm | 1B= 5cm | 3.25 | 122.5 |
| 5 | | 2B= 10cm | 3.5 | 132 |
| 6 | | 3B= 15cm | 4 | 184 |
| 7 | 1,5D= 4,5cm | 1B= 5cm | 3 | 121 |
| 8 | | 2B= 10cm | 3 | 125 |
| 9 | | 3B= 15cm | 3.25 | 151.5 |

4.4. Analisis Daya Dukung Tanah

4.4.1. Tanah Asli (tanpa stabilisasi)

Uji pembebanan tanah asli yang telah dilakukan menghasilkan data penurunan dari pembacaan digital LVDT dan beban dari pembacaan digital *Load Cell*. Setelah data dianalisis didapatkan nilai daya dukung tanah. Dari pengujian yang telah dilakukan didapatkan nilai beban maksimum (P_u) sebesar 95 kg dengan penurunan sebesar 3,75. Dengan menggunakan rumus 3.1. maka didapatkan nilai daya dukung ultimate (q_u) sebesar 380 kN/m². Nilai Beban persatuan luas dan penurunan tanah asli disajikan pada gambar 4.5 berikut ini:



Gambar 4.5. Grafik hubungan tegangan dan penurunan tanah asli

4.4.2. Tanah Stabilisasi *Deep Soil Mix* (DSM)

Analisis pada tanah Stabilisasi dilakukan berdasarkan variasi jarak dan panjang *deep soil mix* (DSM) pola *panels* sehingga dapat diketahui pengaruh jarak dan panjang stabilisasi (DSM) yang telah diberikan. Pengujian beban dilakukan dengan pelat memiliki luas 25 cm² sebagai pendistribusi beban pada tanah. Jarak antar *panel* DSM yang digunakan adalah 2D atau 6 cm.

4.4.2.1. Daya dukung tanah dengan variasi jarak (L)

1. Daya dukung tanah dengan panjang DSM 1B= 5 cm

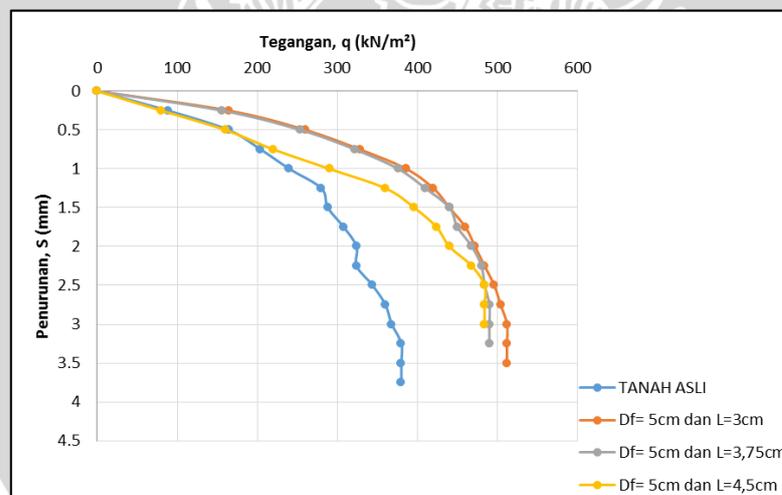
Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 5 cm dengan variasi jarak (L) 1D= 3 cm; 1,25D= 3,75 cm dan 1,5D= 4,5 cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah.

Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus 3.1 untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada **tabel 4.4**.

Tabel 4.5. Daya dukung variasi jarak DSM dengan panjang DSM $1B= 5\text{ cm}$

| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) | Daya dukung, qu (kN/m ²) |
|----|------------------|---------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1B= 5cm | 1D= 3cm | 3.5 | 128 | 512 |
| 2 | | 1,25D= 3,75cm | 3.25 | 122.5 | 490 |
| 3 | | 1,5D= 4,5cm | 3 | 121 | 484 |

Dari **tabel 4.5** dapat diketahui bahwa variasi panjang stabilisasi DSM memberikan pengaruh terhadap tanah asli. Pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Pada **tabel 4.5** terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada gambar 4.6.



Gambar 4.6. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang $1B= 5\text{ cm}$

Dari **gambar 4.6** menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $1B= 5\text{ cm}$ selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 3 cm selalu berada di atas variasi jarak 3,75 cm dan diikuti 4,5 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang di uji walaupun pada grafik tersebut pengaruh jarak DSM terlihat kecil. Pada jarak DSM 3 cm memiliki daya dukung terbesar

yaitu 512 kN/m² dengan penurunan yang terjadi 3,5mm dan jarak DSM 1,5D= 4,5 cm memiliki daya dukung terkecil yaitu 484 kN/m² dengan penurunan 3mm.

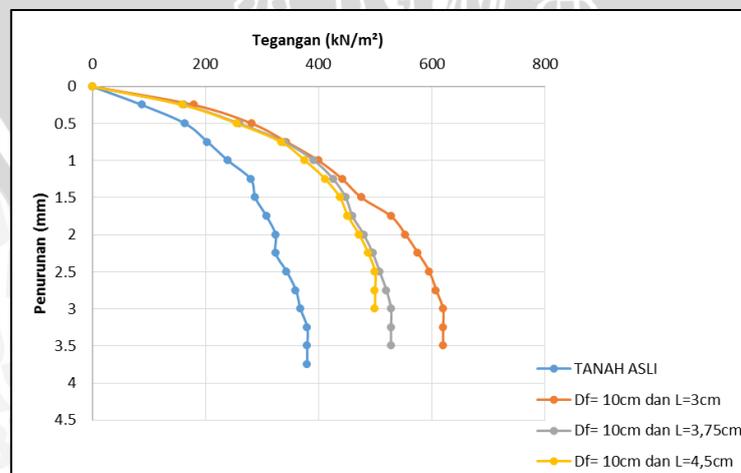
2. Daya dukung tanah dengan panjang DSM 2B= 10 cm

Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 10 cm dengan variasi jarak (L) 1D= 3 cm; 1,25D= 3,75 cm dan 1,5D= 4,5 cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus 3.1 untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada **tabel 4.6**.

Tabel 4.6. Daya dukung variasi jarak DSM dengan panjang DSM 2B= 10 cm

| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) | Daya dukung, qu (kN/m ²) |
|----|------------------|---------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 2B= 10cm | 1D= 3cm | 3.5 | 155 | 620 |
| 2 | | 1,25D= 3,75cm | 3.5 | 132 | 528 |
| 3 | | 1,5D= 4,5cm | 3 | 125 | 500 |

Dari **tabel 4.6** dapat diketahui bahwa variasi panjang stabilisasi DSM juga memberikan pengaruh terhadap tanah asli. Pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan seperti halnya pada panjang DSM 1B=5 cm. Pada **tabel 4.6**, terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada gambar 4.7.



Gambar 4.7. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang 2B= 10 cm

Dari **gambar 4.7** menunjukkan bahwa tanah yang distabilisasi DSM dengan panjang $1B = 10$ cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 3 cm selalu berada di atas variasi jarak 3,75 cm dan diikuti jarak 4,5 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang di uji. Pada jarak DSM $1D = 3$ cm memiliki daya dukung terbesar yaitu 620 kN/m^2 dengan penurunan 3,5mm dan jarak DSM $1,5D = 4,5$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu 500 kN/m^2 dengan penurunan 3mm. Dari **gambar 4.7** terlihat bahwa selisih daya dukung antara DSM jarak 3 cm dengan 3,75 cm dan DSM jarak 3,75 dengan 4,5 cm berbeda. Selisih daya dukung DSM jarak 3 cm dengan 3,75 cm memiliki rentang yang lebih lebar dibanding dengan selisih DSM jarak 3,75 cm dengan 4,5 cm. Hal tersebut menunjukkan stabilisasi pada jarak DSM $1D$ memberikan pengaruh yang lebih signifikan dibanding dengan jarak DSM $1,25D$ dan $1,5D$.

3. Daya dukung tanah dengan panjang DSM $3B = 15$ cm

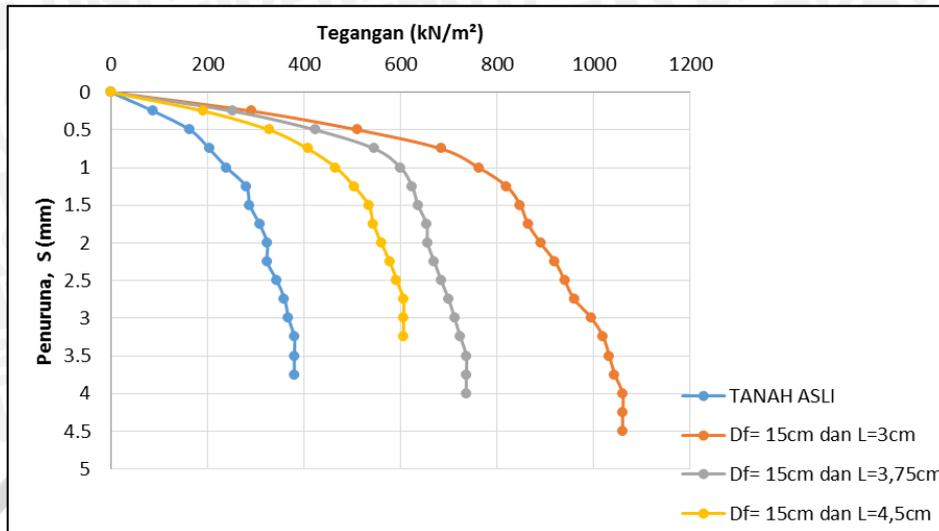
Hasil pengujian stabilisasi DSM panjang 15 cm dengan variasi jarak (L) $1D = 3$ cm; $1,25D = 3,75$ cm dan $1,5D = 4,5$ cm; D merupakan diameter DSM dengan ukuran 3 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh variasi jarak DSM terhadap daya dukung tanah. Data hasil pengujian dianalisis menggunakan rumus 3.1 untuk mendapatkan daya dukung dengan hasil pada **tabel 4.7**.

Tabel 4.7. Daya dukung variasi jarak DSM dengan panjang DSM $3B = 15$ cm

| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) | Daya dukung, qu (kN/m ²) |
|----|------------------|----------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 3B = 15cm | 1D = 3cm | 4.5 | 265 | 1060 |
| 2 | | 1,25D = 3,75cm | 4 | 184 | 736 |
| 3 | | 1,5D = 4,5cm | 3.25 | 151.5 | 606 |

Dari **tabel 4.7** dapat diketahui bahwa variasi panjang stabilisasi DSM memberikan pengaruh terhadap tanah asli. Pada jarak DSM paling dekat memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan daya dukung DSM yang letaknya berjauhan. Pada **tabel 4.7** terlihat bahwa jarak DSM yang semakin berjauhan juga menurunkan daya

dukung *ultimit* tanah. Grafik perbandingan daya dukung di setiap penurunan dapat dilihat pada gambar 4.8.



Gambar 4.8. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi jarak dengan panjang $3B= 15$ cm

Dari gambar 4.8 menunjukkan bahwa tanah yang yang distabilisasi DSM dengan panjang $3B= 15$ cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dari tanah yang tidak distabilisasi (tanah asli). Selain itu grafik dengan variasi jarak 3 cm selalu berada di atas variasi jarak 3,75 cm dan diikuti 4,5 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa jarak antar DSM mempengaruhi daya dukung dari tanah yang di uji. Pada jarak DSM $1D= 3$ cm memiliki daya dukung terbesar yaitu 1060 kN/m^2 dan jarak DSM $1,5D= 4,5$ cm memiliki daya dukung terkecil yaitu 606 kN/m^2 dengan penurunan 4,5mm. Dari gambar 4.8 pengaruh dari variasi jarak DSM terlihat sangat jelas, hal tersebut terlihat dari rentang daya dukung antara jarak DSM 3 cm dengan jarak DSM 3,75 cm lebih lebar dibanding rentang daya dukung antara jarak DSM 3,75 cm dengan jarak DSM 4,5 cm.

Dari ketiga hasil analisis yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa jarak DSM (L) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Berdasarkan hasil pengolahan data, terjadi peningkatan daya dukung yang terlihat dari rentang daya dukung yang semakin lebar pada variasi jarak DSM antara $1D$ dengan $1,25D$ dibanding rentang daya dukung antara variasi jarak $1,25D$ dan $1,5D$. Hal tersebut menunjukkan jarak DSM (L) yang semakin dekat memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding jarak DSM yang semakin jauh. Pada analisis variasi jarak, nilai daya dukung tertinggi terjadi pada jarak DSM $1D= 3$ cm pada panjang DSM 15 cm yaitu sebesar 1060 kN/m^2 dengan penurunan 4,5 cm. Pengaruh jarak DSM 3 cm dapat terjadi karena DSM dapat mengurangi penyebaran distribusi tegangan pada tanah asli dan

ditahan oleh DSM, seperti teori Beussinesq distribusi tegangan digambarkan sebagai isobar yang menyebar hingga $2B$ ke arah horisontal. Tegangan yang menyebar pada tanah dapat ditahan oleh DSM yang semakin rapat, sehingga akan meningkatkan daya dukung dukung pada tanah.

4.4.2.2. Daya dukung tanah dengan variasi Panjang (Df) DSM

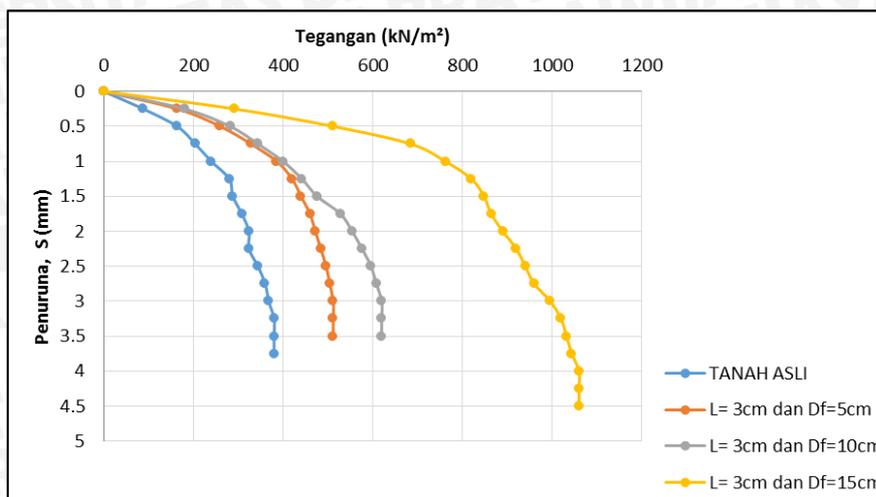
1. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1D = 3 \text{ cm}$

Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3 cm dengan variasi panjang $1B = 5 \text{ cm}$; $2B = 10 \text{ cm}$ dan $3B = 15 \text{ cm}$; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm , dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus 3.1 sehingga didapatkan hasil pada **tabel 4.8**.

Tabel 4.8. Daya dukung variasi panjang DSM dengan jarak DSM $1D = 3 \text{ cm}$

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) | Daya dukung, qu (kN/m ²) |
|----|------------------|---------------------|----------------------|----------------------------|---|
| 1 | 1D= 3cm | 1B= 5cm | 3.5 | 128 | 512 |
| 2 | | 2B= 10cm | 3.5 | 155 | 620 |
| 3 | | 3B= 15cm | 4.5 | 265 | 1060 |

Dari **tabel 4.8** terlihat bahwa panjang DSM 15 cm memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 10 cm dan yang terakhir panjang DSM 5 cm . Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 15 cm yaitu 1060 kN/m^2 dengan penurunan $4,5 \text{ mm}$. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada **gambar 4.9**.



Gambar 4.9. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM 1B= 3 cm

Dari **gambar 4.9** terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 15 cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 5 cm dan 10 cm. Pada **gambar 4.9** juga terlihat bahwa rentang daya dukung yang dihasilkan antara panjang 15 cm dengan 10 cm lebih lebar dibanding dengan rentang antara panjang 10 cm dan 5 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Selain itu, peningkatan signifikan daya dukung tanah terlihat pada variasi panjang 3B= 15 cm yang menghasilkan daya dukung sebesar 1060kN/m² dengan penurunan 4,5mm.

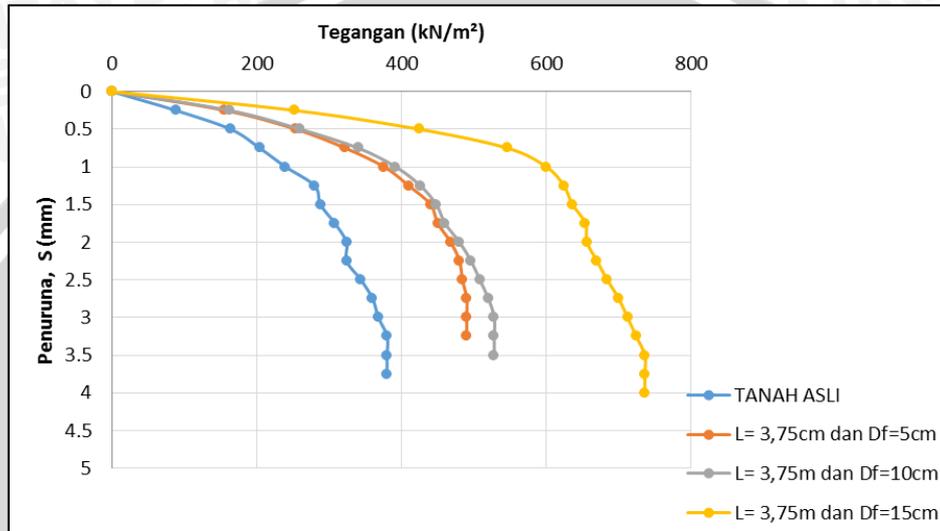
2. Daya dukung tanah dengan jarak DSM 1,25D= 3,75 cm

Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3 cm dengan variasi panjang 1B= 5 cm; 2B= 10 cm dan 3B=15 cm ; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus 3.1 sehingga didapatkan hasil pada **tabel 4.9**.

Tabel 4.9. Daya dukung variasi panjang DSM dengan jarak DSM 1,25D= 3,75 cm

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) | Daya dukung, qu (kN/m ²) |
|----|---------------|------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1,25D= 3,75cm | 1B= 5cm | 3.25 | 122.5 | 490 |
| 2 | | 2B= 10cm | 3.5 | 132 | 528 |
| 3 | | 3B= 15cm | 4 | 184 | 736 |

Dari **tabel 4.9** terlihat bahwa panjang DSM 15 cm memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 10 cm dan yang terakhir panjang DSM 5 cm. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 3B yaitu 736 kN/m^2 dengan penurunan 4 mm. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada **gambar 4.10**.



Gambar 4.10. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM $1,25B = 3,75 \text{ cm}$

Dari **gambar 4.10** terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 3B atau 15 cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 5 cm dan 10 cm. Pada **gambar 4.10** juga terlihat bahwa rentang daya dukung yang dihasilkan antara panjang 15 cm dengan 10 cm lebih lebar dibanding dengan panjang 10 cm dan 5 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro.

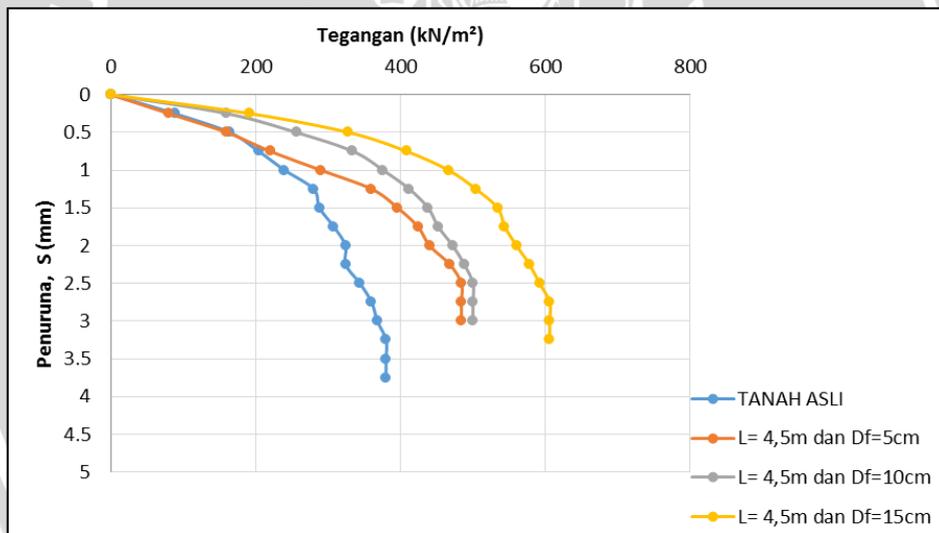
3. Daya dukung tanah dengan jarak DSM $1,5D = 4,5 \text{ cm}$

Hasil pengujian stabilisasi tanah jarak DSM 3 cm dengan variasi panjang $1B = 5 \text{ cm}$; $2B = 10 \text{ cm}$ dan $3B = 15 \text{ cm}$; B merupakan lebar pelat uji dengan lebar 5 cm, dianalisis untuk mengetahui pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah. Untuk mendapatkan daya dukung tanah yang diuji digunakan rumus 3.1 sehingga didapatkan hasil pada **tabel 4.10**.

Tabel 4.10. Daya dukung variasi panjang DSM dengan jarak DSM $1,5D = 4,5$ cm

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | Penurunan, S (mm) | Beban Maksimum, Pu (kg) | Daya dukung, qu (kN/m ²) |
|----|---------------|------------------|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 1 | 1,5D= 4,5cm | 1B= 5cm | 3 | 121 | 484 |
| 2 | | 2B= 10cm | 3 | 125 | 500 |
| 3 | | 3B= 15cm | 3.25 | 151.5 | 606 |

Dari **tabel 4.10** terlihat bahwa panjang DSM 15 cm memiliki daya dukung yang paling tinggi diikuti oleh panjang DSM 10 cm dan yang terakhir panjang DSM 5 cm. Dari hasil analisis tersebut terlihat bahwa semakin panjang DSM maka daya dukung akan meningkat. Daya dukung terbesar terjadi pada panjang DSM 3B yaitu 606 kN/m^2 dengan penurunan maksimum 3,25 mm. Grafik daya dukung tanah di setiap penurunan disajikan pada **gambar 4.11**.



Gambar 4.11. Grafik hubungan daya dukung dan penurunan DSM pada variasi panjang dengan jarak DSM $1,5B = 4,5$ cm

Dari **gambar 4.11** terlihat bahwa di setiap penurunan stabilisasi DSM pada panjang 3B atau 15 cm selalu memiliki daya dukung yang lebih tinggi dibanding dengan panjang DSM 5 cm dan 10 cm. Pada **gambar 4.11**, juga terlihat bahwa rentang daya dukung yang dihasilkan antara panjang 15 cm dengan 10 cm lebih lebar dibanding dengan panjang 10 cm dan 5 cm. Hal tersebut menunjukkan bahwa panjang DSM memberikan pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro.

Dari ketiga hasil analisis yang sudah dilakukan menunjukkan bahwa Panjang DSM (Df) memiliki pengaruh terhadap daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Berdasarkan hasil pengolahan data, terjadi peningkatan daya dukung yang terlihat dari rentang daya dukung yang semakin lebar pada variasi panjang DSM antara 3B dengan 2B dibanding rentang daya dukung antara variasi jarak 2B dan 1B. Hal tersebut menunjukkan bahwa semakin panjang DSM (Df) akan memberikan pengaruh yang lebih besar terhadap daya dukung tanah dibanding panjang DSM yang lebih pendek. Pada analisis variasi panjang, daya dukung terbesar terjadi pada panjang 3B atau 15 cm dengan jarak DSM 3 cm yaitu sebesar 1060kN/m^2 dengan penurunan 4,5mm. Pengaruh panjang DSM terhadap daya dukung tanah dapat disebabkan karena kepadatan tanah DSM lebih padat dibanding tanah asli di sekitar DSM karena pada panjang DSM yang lebih panjang memiliki volume DSM dan kepadatan yang lebih besar dari tanah asli. Seperti pada teori Lambe dalam Das (1995) bahwa peningkatan kepadatan tanah dapat menimbulkan perubahan-perubahan pada struktur tanah berkoheisi. Perubahan-perubahan tersebut meliputi perubahan pada daya rembes (*permeability*), Kemampumampatan (*compressibility*), dan kekuatan dari tanah. Selain itu pengaruh panjang DSM juga dapat disebabkan karena distribusi tegangan pada panjang 3B masih besar, seperti yang dijelaskan Beussinesq bahwa tegangan akan turun sesuai dengan panjang yang digambarkan pada garis-garis isobar dalam grafik *Bulb Pressure*.

4.5. Analisis *Bearing Capacity Improvement* (BCI) Berdasarkan Daya Dukung ultimit

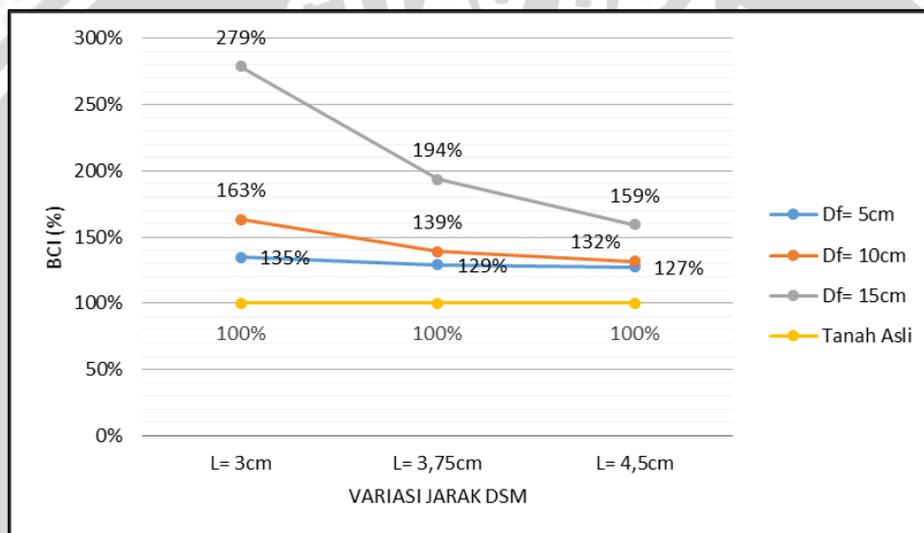
Analisis BCI adalah analisa yang digunakan untuk mengetahui jarak dan panjang maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro. Hasil Analisis BCI juga dapat mengetahui nilai peningkatan daya dukung tanah akibat stabilisasi dengan menggunakan *deep soil mix* (DSM).

4.5.1. Analisis BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

Untuk analisis BCI digunakan rumus 3.2. untuk mengetahui besar peningkatan daya dukung akibat variasi jarak DSM (L). Jarak DSM yang digunakan adalah $1D= 5\text{ cm}$; $1,25D= 3,75\text{ cm}$; dan $1,5D= 4,4\text{ cm}$, D merupakan diameter DSM yaitu 3 cm. Hasil analisis dapat dilihat pada **tabel 4.11** dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan daya dukung tanah dapat dilihat pada **gambar 4.11**.

Tabel 4.11. Nilai BCI untuk variasi jarak DSM (L)

| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | qu tanah asli (kN/m ²) | qu dengan DSM (kN/m ²) | BCI (%) | Peningkatan Daya Dukung (%) | Peningkatan BCI (%) |
|----|------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | 1B= 5cm | 1D= 3cm | 380 | 512 | 135% | 35% | 4% |
| 2 | | 1,25D= 3,75cm | | 490 | 129% | 29% | |
| 3 | | 1,5D= 4,5cm | | 484 | 127% | 27% | |
| 4 | 2B= 10cm | 1D= 3cm | | 620 | 163% | 63% | 17% |
| 5 | | 1,25D= 3,75cm | | 528 | 139% | 39% | |
| 6 | | 1,5D= 4,5cm | | 500 | 132% | 32% | |
| 7 | 3B= 15cm | 1D= 3cm | | 1060 | 279% | 179% | 44% |
| 8 | | 1,25D= 3,75cm | | 736 | 194% | 94% | |
| 9 | | 1,5D= 4,5cm | | 606 | 159% | 59% | |



Gambar 4.12. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi jarak DSM (L)

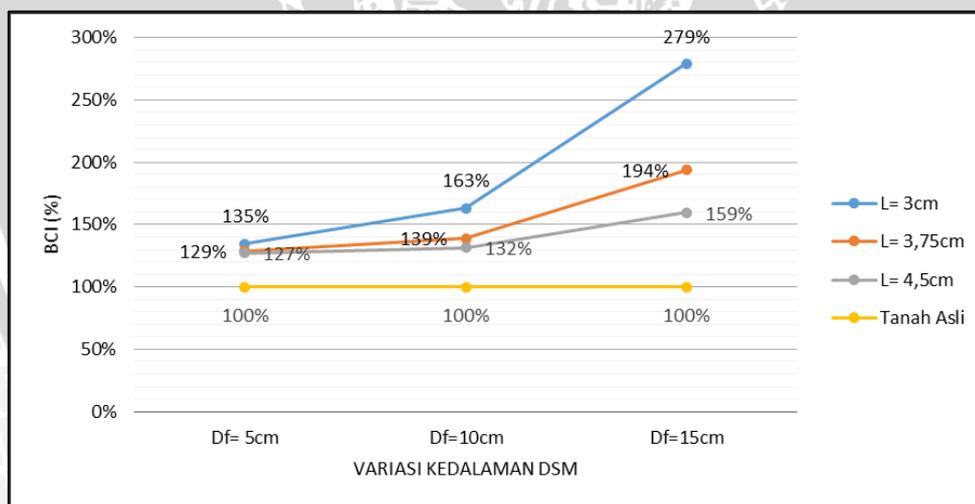
Dari **tabel 4.11** dan **gambar 4.12** terlihat bahwa terjadi penurunan daya dukung pada tanah ketika DSM terletak semakin jauh. Pada jarak DSM yang semakin dekat terjadi peningkatan nilai BCI, seperti yang tampak pada panjang DSM 15 cm. Pada jarak 4,5 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 59% dari tanah asli, data tersebut meningkat pada variasi 3,75 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 94% dari tanah asli. Hasil BCI maksimum terjadi pada variasi jarak 3 cm, yaitu terjadi peningkatan daya dukung sebesar 179% dari tanah asli. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, jarak DSM yang semakin dekat dapat meningkatkan daya dukung tanah lebih besar dibanding dengan jarak DSM yang terletak berjauhan dan jarak DSM maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro dalam penelitian ini terjadi terletak pada jarak DSM 3 cm, dengan peningkatan daya dukung terbesar yaitu 179% dari tanah asli.

4.5.2. Analisis BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)

Untuk analisis BCI digunakan rumus 3.2. untuk mengetahui besar peningkatan daya dukung akibat variasi Panjang DSM (Df). Jarak DSM yang digunakan adalah $1B=5\text{ cm}$; $2B=10\text{ cm}$; dan $3B=15\text{ cm}$, B lebar pelat uji yaitu 5 cm . Hasil analisis dapat dilihat pada **tabel 4.12** dan untuk melihat pengaruh jarak DSM terhadap peningkatan daya dukung tanah dapat dilihat pada **gambar 4.13**.

Tabel 4.12. Nilai BCI untuk variasi panjang DSM (Df)

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | q_u tanah asli (kN/m^2) | q_u dengan DSM (kN/m^2) | BCI (%) | Peningkatan Daya Dukung (%) | Peningkatan BCI (%) |
|----|---------------|------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------|-----------------------------|---------------------|
| 1 | 1D= 3cm | 1B= 5cm | 380 | 512 | 135% | 35% | 21% |
| 2 | | 2B= 10cm | | 620 | 163% | 63% | |
| 3 | | 3B= 15cm | | 1060 | 279% | 179% | |
| 4 | 1,25D= 3,75cm | 1B= 5cm | | 490 | 129% | 29% | 8% |
| 5 | | 2B= 10cm | | 528 | 139% | 39% | |
| 6 | | 3B= 15cm | | 736 | 194% | 94% | |
| 7 | 1,5D= 4,5cm | 1B= 5cm | | 484 | 127% | 27% | 3% |
| 8 | | 2B= 10cm | | 500 | 132% | 32% | |
| 9 | | 3B= 15cm | | 606 | 159% | 59% | |



Gambar 4.13. Grafik perbandingan peningkatan BCI pada variasi panjang DSM (Df)

Dari **tabel 4.12** dan **gambar 4.13** terlihat bahwa terjadi peningkatan daya dukung pada tanah ketika DSM semakin panjang. Pada panjang DSM yang semakin panjang terjadi peningkatan nilai BCI, seperti yang tampak pada jarak DSM 3 cm. Pada variasi panjang 5 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 35% dari tanah asli, data tersebut meningkat pada variasi panjang 10 cm terjadi peningkatan daya dukung sebesar 63% dari tanah asli. Hasil BCI terbesar terjadi pada variasi panjang 15 cm, yaitu terjadi peningkatan

daya dukung sebesar 179% dari tanah asli. Sehingga dapat disimpulkan bahwa, semakin panjang DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah lebih besar dibanding dengan panjang DSM yang lebih pendek dan panjang DSM maksimum untuk meningkatkan daya dukung tanah Kabupaten Bojonegoro dalam penelitian ini terjadi terletak pada panjang 15 cm dengan peningkatan daya dukung terbesar yaitu 179% dari tanah asli.

4.5. Analisis Pengembangan (*Swelling*)

Walaupun dalam penelitian ini tidak dilakukan uji pengembangan, namun pengembangan tanah dalam *box* dapat diperkirakan berdasarkan rasio volume tanah yang distabilisasi dengan DSM dalam *box*. Setelah persentase diketahui, data dapat diplot pada grafik pengaruh *deep soil mix* (DSM) terhadap potensi pengembangan **gambar 4.14**. Uji pengembangan tidak dilakukan di dalam *box*, melainkan dilakukan dalam mold sesuai dengan variasi persentase volume DSM dalam mold. Berikut ini adalah persentase *deep soil mix* (DSM) dalam *box*:

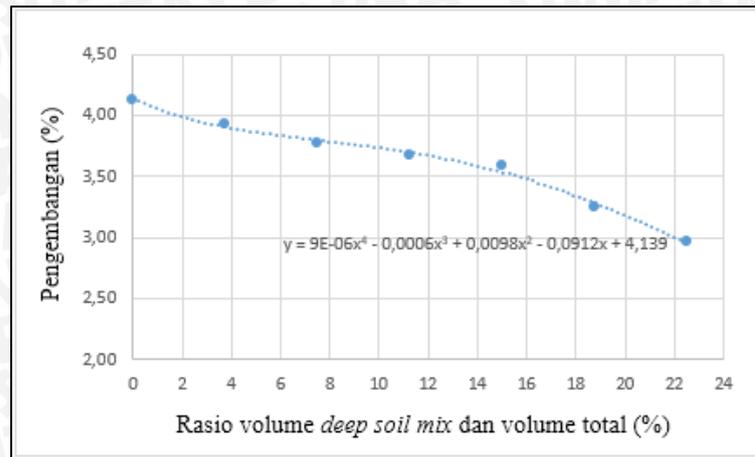
Tabel 4.13. Rasio volume *deep soil mix* (DSM) dalam *box*

| Panjang DSM (Df) | | 1B= 5cm | | | 2B= 10cm | | | 3B= 15cm | | |
|----------------------|-----------------|---------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| Jarak DSM (L) | | 1D= 3cm | 1,25D=3,75cm | 1,5D= 4,5cm | 1D= 3cm | 1,25D=3,75cm | 1,5D= 4,5cm | 1D= 3cm | 1,25D=3,75cm | 1,5D= 4,5cm |
| Luas DSM | cm ² | 105.975 | 105.975 | 101.383 | 105.975 | 105.975 | 101.383 | 105.975 | 105.975 | 101.383 |
| Tinggi DSM | cm | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 15 | 15 | 15 |
| Volume DSM | cm ³ | 529.88 | 529.88 | 506.92 | 1059.75 | 1059.75 | 1013.83 | 1589.63 | 1589.63 | 1520.75 |
| Volume Box | cm ³ | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 |
| Persen DSM dalam Box | % | 6.62 | 6.62 | 6.34 | 13.25 | 13.25 | 12.67 | 19.87 | 19.87 | 19.01 |

Tabel 4.14. Potensi pengembangan (*Swelling*) berdasarkan rasio volume *deep soil mix* (DSM) dalam mold

| Sampel | Volume sampel (cm ³) | Volumme DSM (cm ³) | Rasio volume DSM (%) | Pengembangan (%) | Penurunan nilai pengembangan (%) |
|------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------|----------------------------------|
| tanah asli | 2131,138 | 0 | 0 | 4,133 | - |
| dsm 1 | | 79,835 | 3,746 | 3,929 | -5 |
| dsm 2 | | 159,669 | 7,492 | 3,779 | -9 |
| dsm 3 | | 239,504 | 11,238 | 3,673 | -11 |
| dsm 4 | | 319,338 | 14,984 | 3,593 | -13 |
| dsm 5 | | 399,173 | 18,730 | 3,248 | -21 |
| dsm 6 | | 479,007 | 22,477 | 2,965 | -28 |

Sumber: Rahmawati (2015)



Gambar 4.14. Perbandingan hasil *swelling* terhadap rasio volume *deep soil mix* dan volume total
 Sumber: Rahmawati (2015)

Tabel 4.15. Potensi pengembangan (Swelling) berdasarkan rasio volume *deep soil mix* (DSM) dalam *box*

| Jarak | Panjang | Rasio Volume DSM | Pengembangan |
|-------|---------|------------------|--------------|
| cm | cm | % | % |
| 3 | 5 | 6.623 | 3.80785 |
| | 10 | 13.247 | 3.53299 |
| | 15 | 19.870 | 2.89194 |
| 3,75 | 5 | 6.623 | 3.80785 |
| | 10 | 13.247 | 3.53299 |
| | 15 | 19.870 | 2.89194 |
| 4,5 | 5 | 6.336 | 3.81645 |
| | 10 | 12.673 | 3.56810 |
| | 15 | 19.009 | 3.00036 |

Dari **gambar 4.14** dapat diperkirakan besar potensi pengembangan (*Swelling*) pada rasio volume DSM terkecil atau 6,336% memiliki potensi pengembangan sebesar 3,816% dan pada rasio volume DSM terbesar atau 19,870% terjadi pengembangan sebesar 2,892%. Dari hasil analisis dapat diketahui bahwa persentase volume DSM dapat mempengaruhi potensi pengembangan walaupun perubahannya sangatlah kecil. Hal tersebut dapat terjadi karena kepadatan pada tanah yang memiliki volume DSM lebih besar memiliki kepadatan yang tinggi dan volume kadar *fly ash* juga lebih tinggi sehingga dapat mengurangi potensi pengembangan. Jadi, semakin besar rasio volume DSM dalam tanah mengurangi potensi pengembangan.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

4.1. Kesimpulan

Deep soil mix (DSM) merupakan metode stabilisasi yang dilakukan dengan cara membuat kolom campuran tanah dengan bahan *additive* yang dipadatkan dengan harapan meningkatkan daya dukung tanah pada lokasi yang diperbaiki. Berdasarkan hasil penelitian pengaruh variasi jarak dan panjang *deep soil mix* (DSM) 15% *fly ash* diameter 3 cm pola *panels* terhadap daya dukung tanah ekspansif Kabupaten Bojonegoro dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin dekat jarak dan semakin panjang DSM dapat meningkatkan daya dukung tanah.
2. Berdasarkan nilai BCI, jarak dan panjang dengan daya dukung maksimum terjadi pada DSM terdekat ($L= 3$ cm) dan terpanjang ($D_f= 15$ cm). Pada penelitian ini pengaruh panjang DSM terlihat lebih dominan dibanding pengaruh jarak DSM.
3. Kenaikan rasio volume DSM dalam tanah dapat mengurangi potensi pengembangan (*Swelling*).

4.2. Saran

Berdasarkan pengujian yang sudah dilakukan dalam penelitian ini, masih terdapat banyak kelemahan yang perlu diperhatikan. Untuk itu agar penelitian selanjutnya kelemahan-kelemahan yang terjadi dapat diminimalisir maka diperlukan beberapa upaya untuk menghindari kesalahan dalam penelitian, diantaranya:

1. Untuk mendapatkan data yang akurat, penelitian harus dilakukan dengan hati-hati, teliti dan tidak terburu-buru. Setiap pekerjaan harus dikontrol dengan baik dan selalu memperhatikan perubahan yang ada.
2. Perlu dilakukan analisis lebih detail mengenai usaha pemadatan dalam *box* sehingga berat isi kering maksimum dalam *box* dapat memenuhi kriteria berat isi kering maksimum berdasarkan uji proktor standar.
3. Operator pembebanan vertikal harus selalu membawa *stopwatch*, agar penurunan yang dihasilkan dari pembacaan beban dapat berjalan konstan, karena dalam penelitian ini pembebanan masih dilakukan secara manual.
4. Karena tanah yang diuji merupakan jenis tanah ekspansif, perlu dilakukan penelitian lanjutan untuk mengetahui pengaruh DSM terhadap kembang susut-tanah dalam *box*.

5. Memperbanyak variasi jarak dan panjang untuk mengetahui jarak dan panjang paling optimum pada DSM diameter 3cm pola *panel*. Dalam penelitian ini pengaruh jarak dan panjang masih terlihat signifikan sehingga diperlukan tambahan variasi jarak dan panjang untuk mengetahui batas pengaruh jarak dan panjang DSM sehingga didapatkan grafik di titik puncak kurva.
6. Diperlukan penelitian lanjutan untuk mendapatkan nilai kohesi (c) dan sudut geser (ϕ) pada tanah yang di stabilisasi *deep soil mix* (DSM), sehingga dapat dibandingkan nilai daya dukung hasil pengujian dengan daya dukung hasil perhitungan matematis.
7. Dapat dilakukan penelitian lanjutan dengan menggunakan variasi bahan *additive* jenis lain untuk mengetahui pengaruh campuran bahan pada *deep soil mix* (DSM).
8. Menggunakan alat dengan kondisi yang baik, keakuratan pembacaan alat sangat mempengaruhi hasil dari pengujian. Untuk itu diperlukan kontrol untuk menjaga kondisi alat yang digunakan.



DAFTAR PUSTAKA

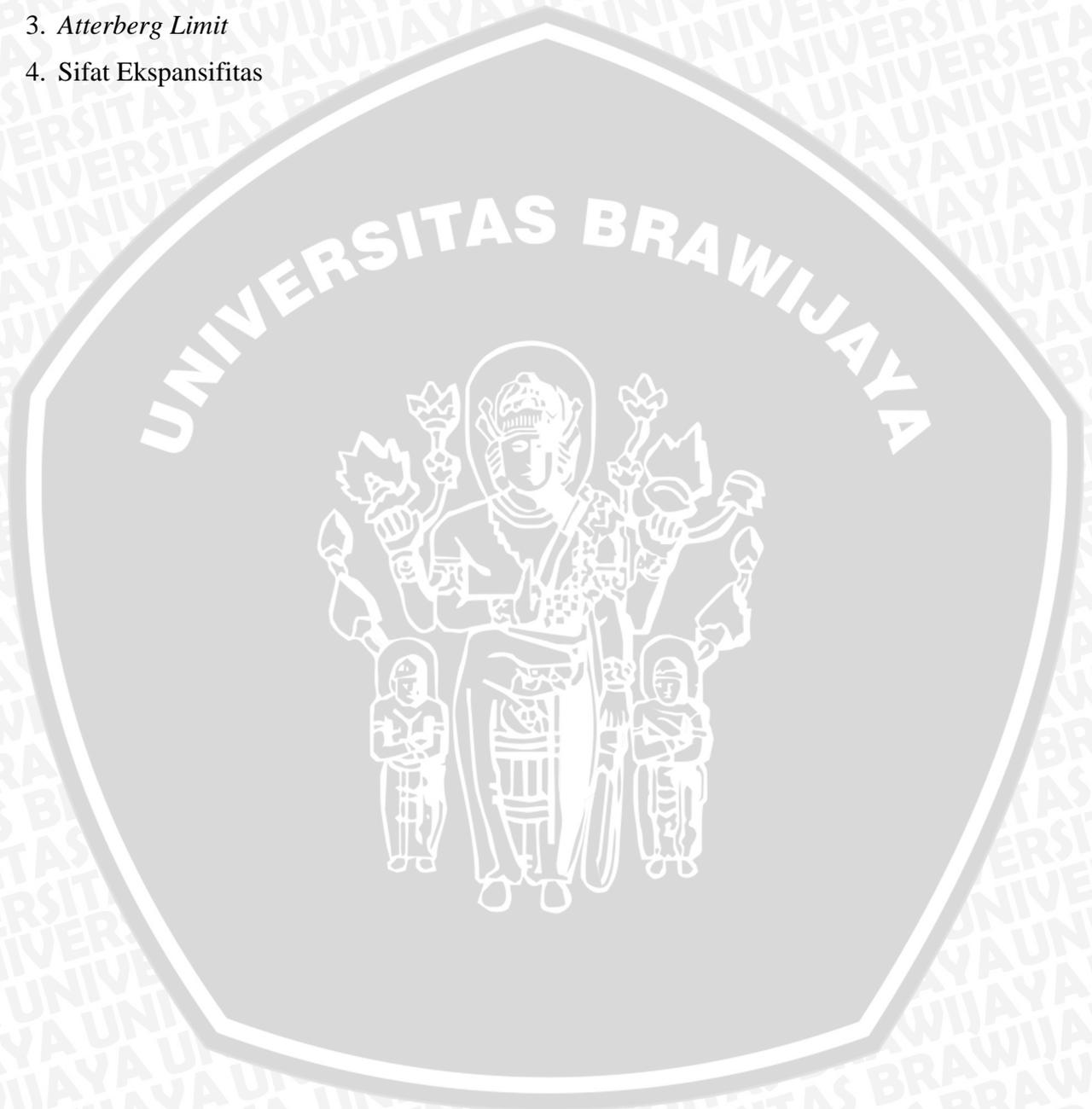
- Bowles, Joseph E. 1986. *Analisis dan Desain Pondasi*. Jakarta: Erlangga.
- Bowles, Joseph E. 1989. *Sifat-sifat Fisis dan Geoteknis Tanah*. Jakarta: Erlangga.
- Bruce, Marry Ellen C., dkk. 2013. "Deep Mixing for Embankment and Foundation Support" dalam *Federal Highway Administration Design Manual*. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Bruce, Donald A. 2000. Introduction to the Deep Soil Mixing Methods as Used in Geotechnical Application. *Report Document No. FHWA-RD-99-138*. Virginia: U.S. Department of Commerce
- Budi, Gogot Setyo, dkk. 2003. Pengaruh Fly Ash terhadap Sifat Pengembangan Tanah Ekspansif. *Journal of Civil Engineering Dimension Volume 5 Nomor 1*. Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Kristen Petra.
- Chen, F. H. 1975. *Foundation on Expansive Soil*. Amsterdam: Elsevier Scientific
- Das, Braja M. 1995. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Erlangga.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 1992. *Mekanika Tanah 1*. Jakarta: PT. Gramedia Pustaka Umum.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2010. *Mekanika Tanah 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hardiyatmo, Hary Christady. 2011. *Analisis dan Perancangan Fondasi 1*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hartosukma, Endang Widorowati. 2005. Perilaku Tanah Lempung Ekspansif Karangawen Demak Akibat Penambahan Semen dan Fly Ash sebagai Stabilizing Agents. *Tesis Terpublikasi Program Pasca Sarjana*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Kitazume, Masaki dan Masaki Terashi. 2013. *The Deep Mixing Method*. London: CRC Press.
- Kosche, Mirja. 2004. *A Laboratory Model Study on the Transition Zone and the Boundary Layer Around Lime-Cement Columns in Kaolin Clay*. Msc Thesis Division of Soil and Rock Mechanics. Royal Institute of Technology (KTH) Stockholm.
- Kumor, Maciej Kordian. Selected Geotechnical Problems of Ekspansive Clays in the Area of Poland. *Jurnal*. Faculty Civil and Environmental Engineering University of Technology and Life Sciences in Bydgoszcz.
- Munawir, As'ad. 2014. *Buku Ajar Perbaikan Tanah*. Hand Out: Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
- Muntohar, Agus Setyo. 2010. Uji Model Kuat dan Karakteristik Beban-Penurunan Tanah Lunak dengan Perkuatan Kolom Kapur di Laboratorium. *Jurnal Dinamika Teknik Sipil Vol. 10/No. 3*. Universitas Muhammadiyah Yogyakarta.

- Nur, Ailin J.O., dkk. 2011. *Study of Bearing Capacity of Lime-Cemen Columns with Pulverized Fuel Ash for Soil Stabilization Using Laboratory Model*. Bund. H, Vol. 16 (2011). Universitas Teknologi MARA Malaysia.
- Panjaitan, Surta Ria N. 2010. Pengaruh Pemeraman Terhadap Nilai CBR Tanah Mengembang yang Distabilisasi dengan Fly Ash. *Seminar Nasional ISBN No. 978-602-96473-0-3*. Institut Teknologi Medan.
- Rahmawati, Ika Meisy P. 2015. *Pengaruh Kadar Air Terhadap Kuat Geser Tanah Ekspansif Bojonegoro dengan Stabilisasi Menggunakan 15% Fly Ash dengan Metode Deep Soil Mix*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Sulistyowati, Tri. 2006. Pengaruh Stabilisasi Tanah Lempung Ekspansif dengan Fly Ash Terhadap Nilai Daya Dukung CBR. *Jurnal Volume 2 Nomor 1*. Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Mataram.
- Tobing, Benny Christian L. 2014. *Pengaruh Lama Waktu Curing Terhadap Nilai CBR dan Swelling pada Tanah Lempung Ekspansif di Bojonegoro dengan Campuran 15% Fly Ash*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Wardani, Sri Pribandiyani Retno. 2008. Pemanfaatan Limbah Batubara (fly ash) untuk Stabilisasi Tanah maupun Keperluan Teknik Sipil Lainnya dalam Mengurangi Pencemaran Lingkungan. *Pidato pengukuhan Upacara penerimaan Guru Besar Fakultas Teknik*. Universitas Diponegoro.
- Yuliet, Rina, dkk. 2011. Uji Potensi Mengembang pada Tanah Lempung dengan Metoda Free Swelling Test. *Jurnal Rekayasa Sipil Volume 7 Nomor 1*. Teknik Sipil Universitas Andalas.



LAMPIRAN 1
SIFAT FISIK TANAH

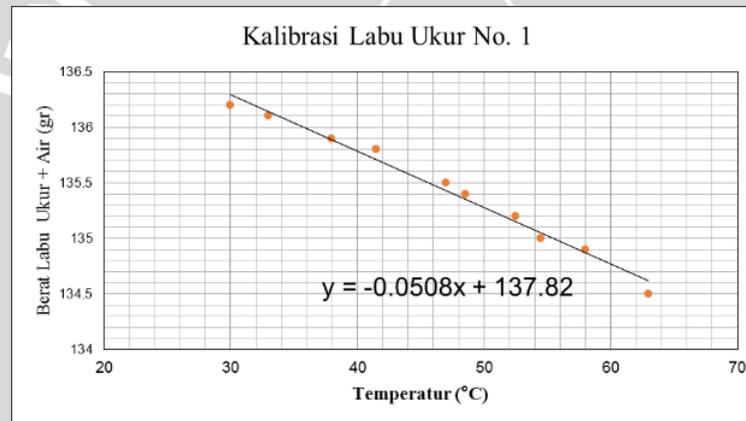
1. *Specific Gravity* (Gs)
2. Analisa Saringan dan Hidrometer
3. *Atterberg Limit*
4. Sifat Ekspansifitas



1. *Specific Gravity*

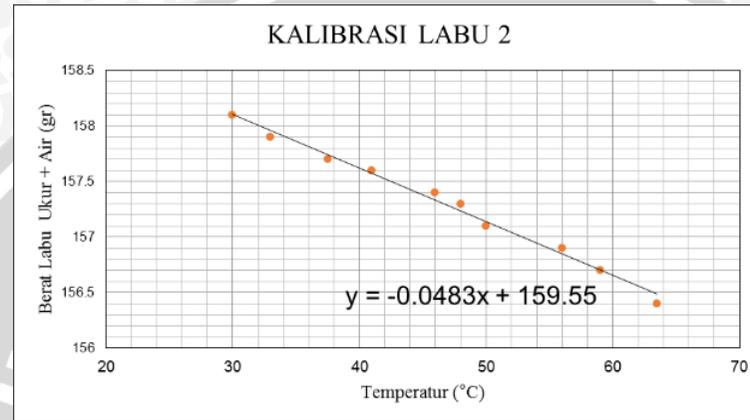
Tabel Kalibrasi Labu Ukur No. 1

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Berat Labu Ukur + Air (gr) | 134.5 | 134.9 | 135 | 135.2 | 135.4 | 135.5 | 135.8 | 135.9 | 136.1 | 136.2 |
| Temperatur °C | 63 | 58 | 54.5 | 52.5 | 48.5 | 47 | 41.5 | 38 | 33 | 30 |



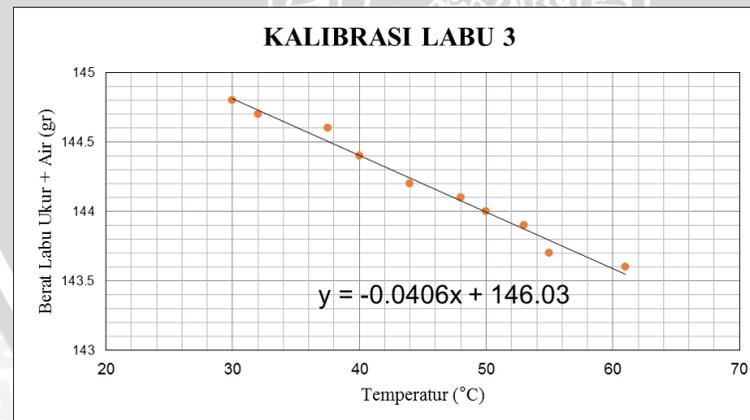
Tabel Kalibrasi Labu Ukur No. 2

| | | | | | | | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| NO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Berat Labu Ukur + Air (gr) | 156.4 | 156.7 | 156.9 | 157.1 | 157.3 | 157.4 | 157.6 | 157.7 | 157.9 | 158.1 |
| Temperatur °C | 63.5 | 59 | 56 | 50 | 48 | 46 | 41 | 37.5 | 33 | 30 |



Tabel Kalibrasi Labu Ukur No. 3

| NO | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----------------------------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Berat Labu Ukur + Air (gr) | 143.6 | 143.7 | 143.9 | 144 | 144.1 | 144.2 | 144.4 | 144.6 | 144.7 | 144.8 |
| Temperatur °C | 61 | 55 | 53 | 50 | 48 | 44 | 40 | 37.5 | 32 | 30 |



Tabel Specific Gravity Labu 1

| Labu Ukur | Satuan | 1 | | | | | | | | | |
|---|----------------------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|
| Berat Tanah Kering (Ws) | gram | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Berat Labu Ukur + Air + Tanah Kering (W1) | gram | 147.2 | 147.6 | 147.9 | 148.1 | 148.3 | 148.5 | 148.6 | 148.8 | 148.9 | 149.1 |
| Suhu (°C) | °C | 65 | 50 | 47 | 43 | 40 | 39 | 37 | 36 | 35 | 30 |
| Berat Labu Ukur + Air (W2) | gram | 134.518 | 135.28 | 135.432 | 135.636 | 135.788 | 135.839 | 135.94 | 135.991 | 136.042 | 136.296 |
| Berat Jenis Tanah (Gs) | gram/cm ³ | 2.733 | 2.604 | 2.655 | 2.654 | 2.671 | 2.725 | 2.725 | 2.781 | 2.800 | 2.779 |
| Rata-rata Berat Jenis | gram/cm ³ | 2.713 | | | | | | | | | |

Tabel Specific Gravity Labu 2

| Labu Ukur | Satuan | 2 | | | | | | | | | |
|---|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Berat Tanah Kering (Ws) | gram | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Berat Labu Ukur + Air + Tanah Kering (W1) | gram | 169.3 | 169.6 | 169.7 | 169.9 | 170.1 | 170.3 | 170.4 | 170.6 | 170.7 | 170.9 |
| Suhu (°C) | °C | 62 | 58 | 51 | 46 | 42 | 40.5 | 39 | 37.5 | 36 | 30 |
| Berat Labu Ukur + Air (W2) | gram | 156.555 | 156.749 | 157.087 | 157.328 | 157.521 | 157.594 | 157.666 | 157.739 | 157.811 | 158.101 |
| Berat Jenis Tanah (Gs) | gram/cm ³ | 2.757 | 2.798 | 2.708 | 2.692 | 2.695 | 2.742 | 2.752 | 2.802 | 2.812 | 2.777 |
| Rata-rata Berat Jenis | gram/cm ³ | 2.754 | | | | | | | | | |

Tabel Specific Gravity Labu 3

| Labu Ukur | Satuan | 3 | | | | | | | | | |
|---|----------------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Berat Tanah Kering (Ws) | gram | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Berat Labu Ukur + Air + Tanah Kering (W1) | gram | 156.2 | 156.4 | 156.6 | 156.8 | 156.9 | 157 | 157.1 | 157.2 | 157.4 | 157.5 |
| Suhu (°C) | °C | 60 | 57 | 50.5 | 45.5 | 42 | 40.5 | 39 | 37.5 | 36 | 30 |
| Berat Labu Ukur + Air (W2) | gram | 143.594 | 143.716 | 143.98 | 144.183 | 144.325 | 144.386 | 144.447 | 144.508 | 144.568 | 144.812 |
| Berat Jenis Tanah (Gs) | gram/cm ³ | 2.705 | 2.734 | 2.710 | 2.709 | 2.694 | 2.708 | 2.722 | 2.737 | 2.790 | 2.735 |
| Rata-rata Berat Jenis | gram/cm ³ | 2.724 | | | | | | | | | |

Rata-rata Specific Gravity (Gs)

| Labu Ukur | Gs | rata-rata |
|-----------|-------|-----------|
| 1 | 2.713 | 2.730 |
| 2 | 2.754 | |
| 3 | 2.724 | |

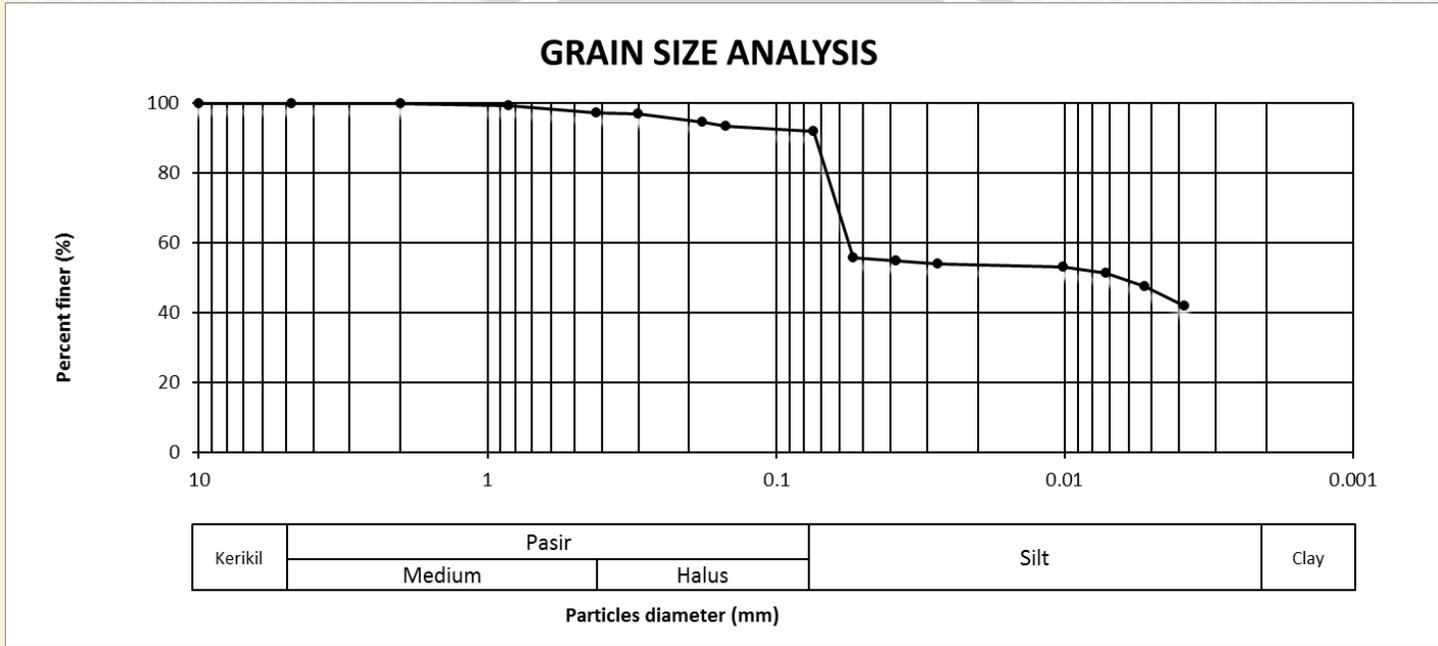
2. Analisa Grainsize dan Hidrometer

Tabel Analisis Grainsize

| No | D | Tertahan | Jumlah | % | % Kumulatif |
|----------|------|----------|----------|-----------|-------------|
| Saringan | (mm) | Saringan | Tertahan | Kumulatif | Lolos |
| | | (gram) | | Tertahan | Saringan |
| No. 4 | 4.75 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| No. 10 | 2.00 | 0 | 0.00 | 0.00 | 100.00 |
| No. 20 | 0.84 | 1.7 | 1.70 | 0.57 | 99.43 |
| No. 40 | 0.42 | 6.8 | 8.50 | 2.83 | 97.17 |
| No. 50 | 0.30 | 0.7 | 9.20 | 3.07 | 96.93 |
| No. 80 | 0.18 | 7.4 | 16.60 | 5.53 | 94.47 |
| No. 100 | 0.15 | 2.8 | 19.40 | 6.47 | 93.53 |
| No. 200 | 0.07 | 5.1 | 24.50 | 8.17 | 91.83 |
| PAN | | 275.50 | 300.00 | 100.00 | 0.00 |

Tabel Analisis Hidrometer

| Waktu (t) | T | Bacaan Hydrometer (Ra) | Bacaan Terkoreksi (Rc) | % Lolos | Terkoreksi meniskus (R) | Effektive Depth (L) | V= L/t | Nilai K | Diameter Butiran (D) (mm) | % kumulatif lolos |
|-----------|----|------------------------|------------------------|---------|-------------------------|---------------------|--------|---------|---------------------------|-------------------|
| menit | C | | | | | | | | | |
| 0 | 26 | 29 | 30,65 | 60,32 | 30 | 8,6 | 0,00 | 0,0124 | 0,0000 | 55,3931 |
| 0,5 | 26 | 28,5 | 30,15 | 59,34 | 29,5 | 8,75 | 17,50 | 0,0124 | 0,0520 | 54,4895 |
| 1 | 26 | 28 | 29,65 | 58,35 | 29 | 8,9 | 8,90 | 0,0124 | 0,0371 | 53,5859 |
| 2 | 26 | 27,5 | 29,15 | 57,37 | 28,5 | 9,05 | 4,53 | 0,0124 | 0,0265 | 52,6822 |
| 15 | 26 | 27 | 28,65 | 56,38 | 28 | 9,2 | 0,61 | 0,0124 | 0,0097 | 51,7786 |
| 30 | 26 | 26 | 27,65 | 54,42 | 27 | 9,4 | 0,31 | 0,0124 | 0,0070 | 49,9713 |
| 60 | 26 | 24 | 25,65 | 50,48 | 25 | 10 | 0,17 | 0,0124 | 0,0051 | 46,3567 |
| 120 | 26 | 21 | 22,65 | 44,58 | 22 | 10,7 | 0,09 | 0,0124 | 0,0037 | 40,9349 |
| 1440 | 26 | 19 | 20,65 | 40,64 | 20 | 11,3 | 0,01 | 0,0124 | 0,0011 | 37,3203 |

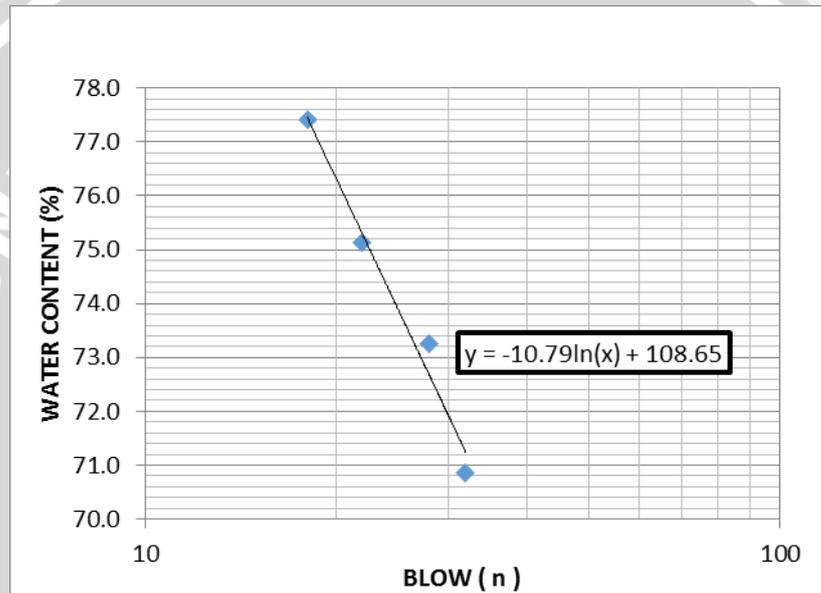


Gambar distribusi butiran tanah Desa Ngasem, Kab. Bojonegoro

3. Atterberg Limit

a. Liquid Limit (Batas cair)

| Can no. | I | II | III | IV |
|------------------------|------|------|------|------|
| Mass of wet soil + can | 33.2 | 35.9 | 35.5 | 35.7 |
| Mass of dry soil + can | 21.2 | 22.3 | 22.9 | 23.3 |
| Mass of can | 5.7 | 4.2 | 5.7 | 5.8 |
| Mass of dry soil | 15.5 | 18.1 | 17.2 | 17.5 |
| Mass of moisture | 12.0 | 13.6 | 12.6 | 12.4 |
| Water content, w % | 77.4 | 75.1 | 73.3 | 70.9 |
| No. of blows N | 18 | 22 | 28 | 32 |



$$LL(25) = -10,79 \ln(25) + 108,65 = 73,92\%$$

b. Plastic Limit (Batas plastis)

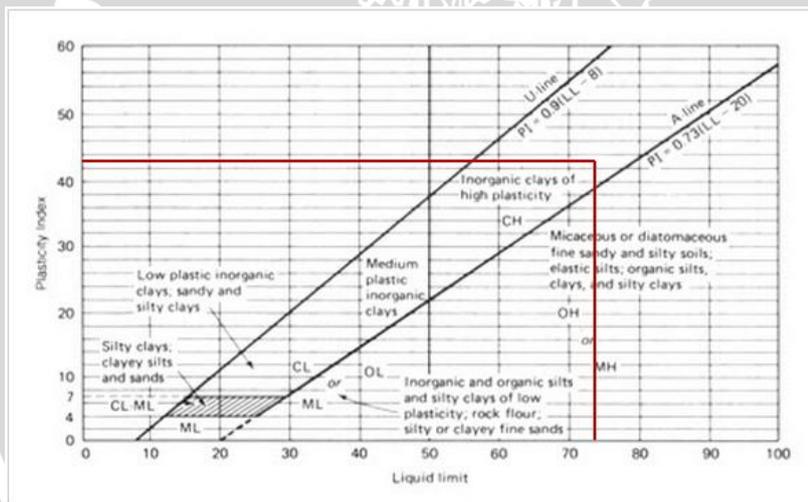
| Can no. | I | II | III |
|--------------------------|-------|------|------|
| Mass of wet soil + can | 12.5 | 12.2 | 11.5 |
| Mass of dry soil + can | 10.9 | 10.7 | 10.1 |
| Mass of can | 5.6 | 5.9 | 5.4 |
| Mass of dry soil | 5.3 | 4.8 | 4.7 |
| Mass of moisture | 1.6 | 1.5 | 1.4 |
| Water content, w % | 30.2 | 31.3 | 29.8 |
| Average of water content | 30.41 | | |

$$\begin{aligned}
 PI &= LL - PL \\
 &= 73,92 - 30,41 \\
 &= 43,51\%
 \end{aligned}$$

c. *Shrinkage Limit* (Batas susut)

| BATAS SUSUT (SL) | | |
|---|----|------|
| Nomor Cetakan | 1 | |
| Berat Cetakan | gr | 19.2 |
| Berat Cawan + Tanah Basah | gr | 58.2 |
| Berat Cawan + Tanah Kering | gr | 44.0 |
| Berat Tanah Basah (m_1) | gr | 39.0 |
| Berat Air | gr | 14.2 |
| Berat Tanah Kering (m_2) | gr | 24.8 |
| Volume Tanah Basah (V) | ml | 25.5 |
| Volume Tanah Kering (V_s) | ml | 12.0 |
| Kadar Air (Wc) | % | 57.3 |
| $SL = (Wc - ((V - V_s) / m_2)) * 100\%$ | % | 2.8 |

d. Klasifikasi Tanah *Unified Soil Classification System* (USCS) tanah berbutir halus



Gambar klasifikasi butiran halus USCS

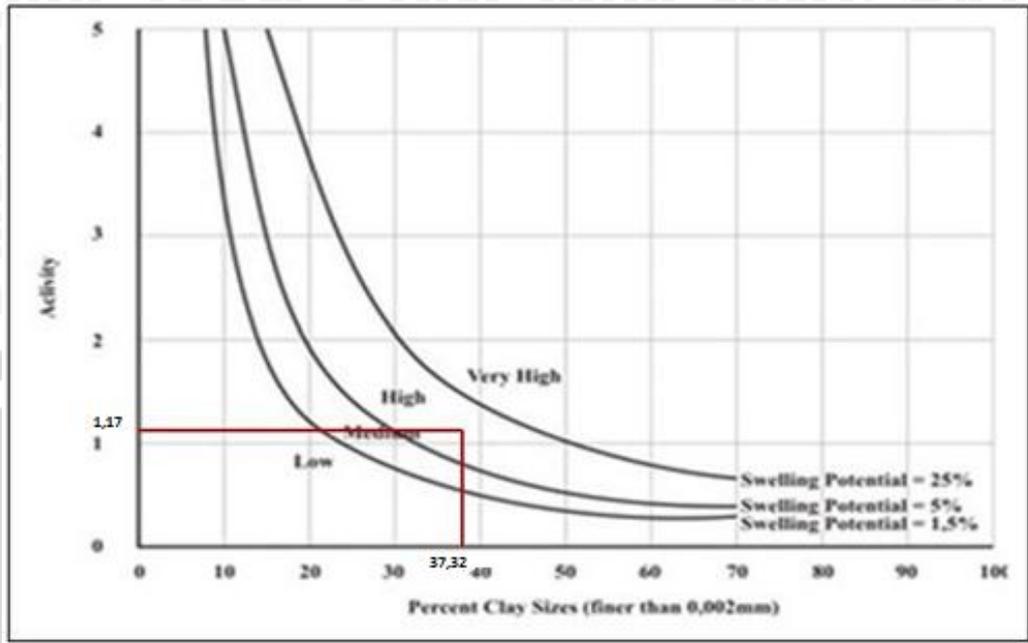
Dari grafik diatas tanah Desa ngasem Kab. Bojonegoro termasuk kategori CH (Lempung anorganik dengan plastisitas tinggi)

4. Sifat Ekspansifitas

Nilai Aktivitas

$$Activity (A) = \frac{PI}{c} = \frac{43,51}{37,32} = 1,17$$

Diameter 0,002= 37,32%



Gambar klasifikasi potensi mengembang

Dari grafik tanah Desa Ngasem, Kab. Bojonegoro, memiliki potensi mengembang tinggi.

Tabel Kriteria Pengembangan Berdasarkan IP (Chen, 1975)

| Plasticity Index (%) | Swelling Potensial |
|----------------------|--------------------|
| 0 - 15 | Low |
| 10 - 35 | Medium |
| 35 - 55 | High |
| > 55 | Very High |

IP= 43,51% tanah Desa Ngasem, Kab. Bojonegoro memiliki *Swelling Potential* Tinggi

Tabel Kriteria Tanah Ekspansif Berdasarkan IP dan SI (Raman, 1967)

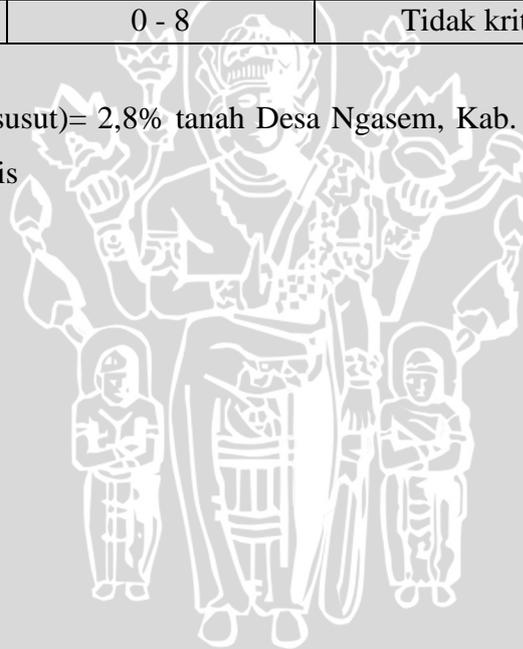
| Plasticity Index (%) | Shrinkage Index (%) | Degree of Expansion |
|----------------------|---------------------|---------------------|
| <12 | <15 | Low |
| 12 - 30 | 15 - 30 | Medium |
| 23 - 30 | 30 - 40 | High |
| >30 | > 40 | Very High |

IP= 43,51% tanah Desa Ngasem, Kab. Bojonegoro memiliki derajat ekspansifitas tinggi

Tabel Klasifikasi potensi mengembang didasarkan pada *Atteberg Limit* (Altmeyer, 1955)

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

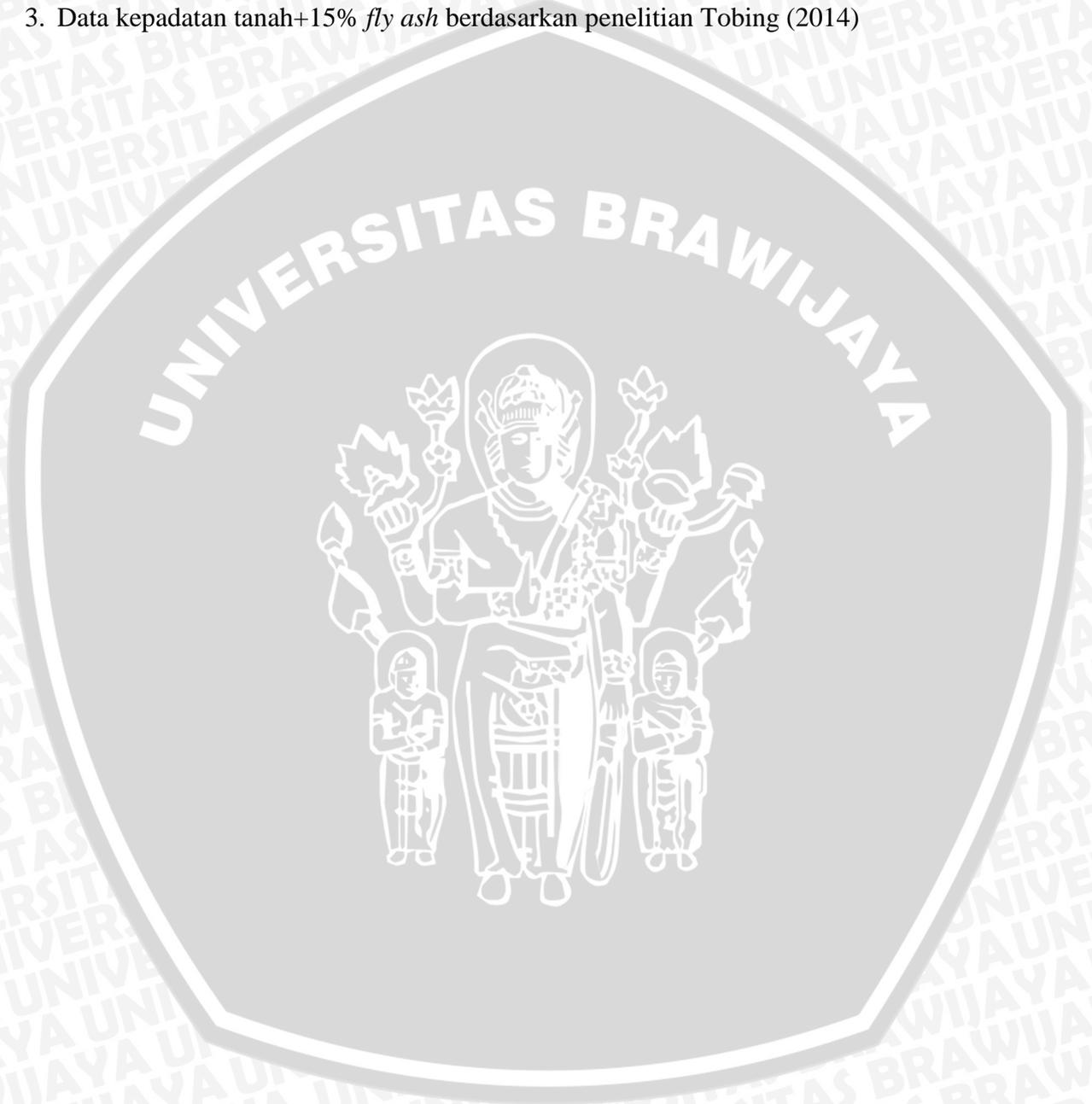
Shrinkage Limit (batas susut)= 2,8% tanah Desa Ngasem, Kab. Bojonegoro memiliki derajat mengembang kritis



LAMPIRAN 2

PEMERIKSAAN KEPADATAN

1. Pemeriksaan kepadatan standar
2. Pemeriksaan kepadatan model
3. Data kepadatan tanah+15% *fly ash* berdasarkan penelitian Tobing (2014)



1. **Tabel** Kepadatan proktor standar

kadar air

| Penambahan Air | ml | 400 | | | 550 | | | 700 | | | 850 | | | 1000 | | |
|----------------------------|----|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|---------------|--------|--------|
| | | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah | Atas | Tengah | Bawah |
| berat cawan | gr | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 3.90 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 4.10 | 8.20 | 4.00 | 7.80 | 4.00 | 3.90 | 4.10 | 8.10 |
| berat tanah basah + cawan | gr | 18.10 | 14.70 | 18.10 | 21.30 | 26.90 | 20.70 | 30.60 | 36.30 | 37.00 | 48.90 | 42.60 | 28.50 | 34.90 | 34.70 | 37.10 |
| berat tanah kering + cawan | gr | 15.90 | 13.00 | 15.90 | 18.10 | 22.70 | 17.40 | 24.80 | 29.50 | 30.90 | 38.30 | 34.50 | 22.70 | 27.00 | 26.80 | 29.70 |
| berat air (Ww) | gr | 2.2 | 1.7 | 2.2 | 3.2 | 4.2 | 3.3 | 5.8 | 6.8 | 6.1 | 10.6 | 8.1 | 5.8 | 7.9 | 7.9 | 7.4 |
| berat tanah kering (Ws) | gr | 11.9 | 9 | 11.9 | 14.2 | 18.7 | 13.4 | 20.8 | 25.4 | 22.7 | 34.3 | 26.7 | 18.7 | 23.1 | 22.7 | 21.6 |
| kadar air | % | 18.487 | 18.889 | 18.487 | 22.535 | 22.460 | 24.627 | 27.885 | 26.772 | 26.872 | 30.904 | 30.337 | 31.016 | 34.199 | 34.802 | 34.259 |
| kadar air rata-rata | % | 18.621 | | | 23.207 | | | 27.176 | | | 30.752 | | | 34.420 | | |

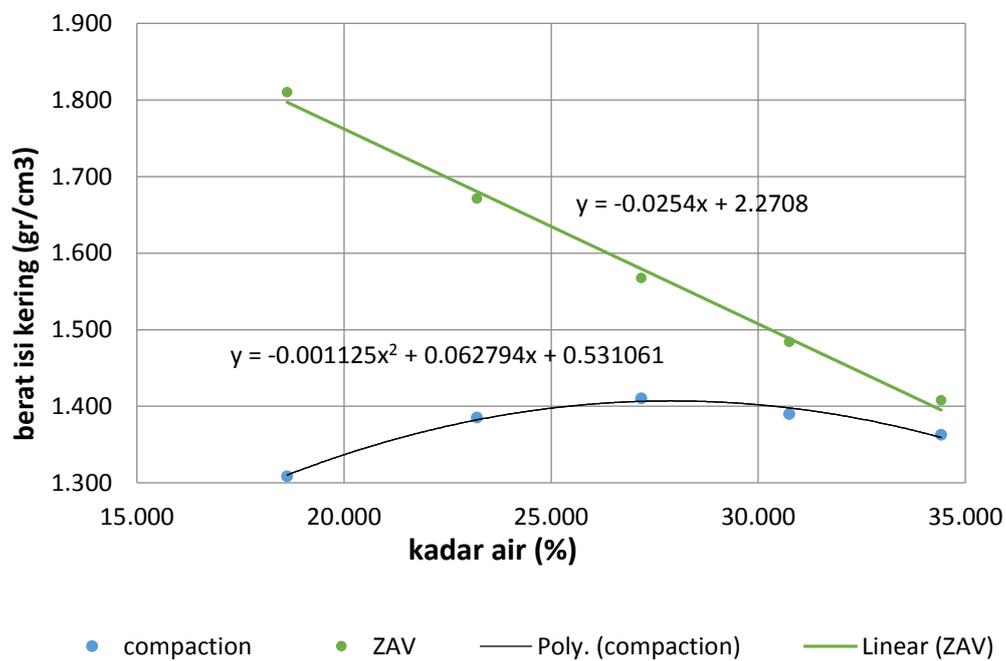
berat isi

| Penambahan Air | ml | 400 | 550 | 700 | 850 | 1000 |
|---------------------------------|--------------------|----------|-----------|-----------|----------|----------|
| berat cetakan | gr | 2580 | 2580 | 2580 | 2580 | 2580 |
| berat tanah basah + cetakan | gr | 5800 | 6120 | 6300 | 6350 | 6380 |
| berat tanah basah | gr | 3220 | 3540 | 3720 | 3770 | 3800 |
| isi cetakan | cm ³ | 2074.559 | 2074.5588 | 2074.5588 | 2074.559 | 2074.559 |
| berat isi basah (γ_w) | gr/cm ³ | 1.552 | 1.706 | 1.793 | 1.817 | 1.832 |
| berat isi kering (γ_d) | gr/cm ³ | 1.308 | 1.385 | 1.410 | 1.390 | 1.363 |

zero air void

| Penambahan Air | ml | 400 | 550 | 700 | 850 | 1000 |
|--|--------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| kadar air (w) | % | 18.621 | 23.207 | 27.176 | 30.752 | 34.420 |
| GS | gr/cm ³ | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 2.730 | 2.730 |
| berat jenis air (γ_w) | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| berat jenis zero air void (γ_{zav}) | | 1.810 | 1.671 | 1.567 | 1.484 | 1.408 |

Pemadatan Tanah Asli



Menghitung kadar air optimum (OMC)

$$y = -0,001125 x^2 + 0,062794 x + 0,531061$$

$$dy/dx = -0,00225 x + 0,062794 = 0$$

$$x = 27,9\% \text{ (OMC)}$$

Menghitung berat isi maksimum (γ_d maks)

$$y = -0,001125 x^2 + 0,062794 x + 0,531061$$

$$y = -0,001125 (27,9)^2 + 0,062794 (27,9) + 0,531061$$

$$y = 1,407 \text{ gr/cm}^3 \text{ (}\gamma_d \text{ maks)}$$

2. **Tabel** Kepadatan tanah model (*box*)

Kepadatan pengujian tanah asli

| Lapisan Tanah Dasar | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 | 1.90 |
| Diameter of Ring | cm | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 | 2.50 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 30.00 | 30.00 | 30.10 | 30.00 | 30.10 | 30.00 | 30.10 | 30.20 | 30.00 | 30.00 | 30.00 | 29.90 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 15.40 | 15.40 | 15.50 | 15.40 | 15.50 | 15.40 | 15.50 | 15.60 | 15.40 | 15.40 | 15.40 | 15.30 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 | 9.32 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 26.50 | 26.70 | 26.50 | 26.60 | 26.80 | 26.60 | 26.70 | 26.40 | 26.60 | 26.50 | 26.80 | 26.60 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 11.90 | 12.10 | 11.90 | 11.90 | 12.00 | 11.80 | 12.10 | 11.80 | 12.00 | 11.90 | 11.80 | 12.00 |
| 8. Mass of Water | gr | 3.50 | 3.30 | 3.60 | 3.50 | 3.50 | 3.60 | 3.40 | 3.80 | 3.40 | 3.50 | 3.60 | 3.30 |
| 9. Water Content | % | 29.41 | 27.27 | 30.25 | 29.41 | 29.17 | 30.51 | 28.10 | 32.20 | 28.33 | 29.41 | 30.51 | 27.50 |
| 10. Average of Water Content | % | 28.98 | | | 29.70 | | | 29.55 | | | 29.14 | | |
| 11. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.277 | 1.298 | 1.277 | 1.277 | 1.287 | 1.266 | 1.298 | 1.266 | 1.287 | 1.277 | 1.266 | 1.287 |
| 12. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.284 | | | 1.277 | | | 1.284 | | | 1.277 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.280 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 5cm; L= 3cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 34.00 | 33.70 | 33.70 | 33.90 | 33.90 | 34.00 | 33.90 | 33.70 | 33.70 | 33.70 | 34.00 | 33.70 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.40 | 19.10 | 19.10 | 19.30 | 19.30 | 19.40 | 19.30 | 19.10 | 19.10 | 19.10 | 19.40 | 19.10 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 30.00 | 29.60 | 29.60 | 29.70 | 29.70 | 30.00 | 29.70 | 29.60 | 29.60 | 29.60 | 30.00 | 29.50 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 15.40 | 15.00 | 15.00 | 15.10 | 15.10 | 15.40 | 15.10 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.40 | 14.90 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.00 | 4.10 | 4.10 | 4.20 | 4.20 | 4.00 | 4.20 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.00 | 4.20 |
| 9. Water Content | % | 25.97 | 27.33 | 27.33 | 27.81 | 27.81 | 25.97 | 27.81 | 27.33 | 27.33 | 27.33 | 25.97 | 28.19 |
| 10. Average of Water Content | % | 26.88 | | | 27.20 | | | 27.49 | | | 27.17 | | |
| 11. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.308 | 1.274 | 1.274 | 1.282 | 1.282 | 1.308 | 1.282 | 1.274 | 1.274 | 1.274 | 1.308 | 1.265 |
| 12. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.285 | | | 1.291 | | | 1.276 | | | 1.282 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.283 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 5cm; L= 3,75cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 33.90 | 33.70 | 34.00 | 33.70 | 33.90 | 33.70 | 34.00 | 33.90 | 33.70 | 33.70 | 33.70 | 34.00 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.30 | 19.10 | 19.40 | 19.10 | 19.30 | 19.10 | 19.40 | 19.30 | 19.10 | 19.10 | 19.10 | 19.40 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 29.70 | 29.60 | 30.00 | 29.60 | 29.70 | 29.50 | 30.00 | 29.70 | 29.60 | 29.50 | 29.60 | 30.00 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 15.10 | 15.00 | 15.40 | 15.00 | 15.10 | 14.90 | 15.40 | 15.10 | 15.00 | 14.90 | 15.00 | 15.40 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.20 | 4.10 | 4.00 | 4.10 | 4.20 | 4.20 | 4.00 | 4.20 | 4.10 | 4.20 | 4.10 | 4.00 |
| 9. Water Content | % | 27.81 | 27.33 | 25.97 | 27.33 | 27.81 | 28.19 | 25.97 | 27.81 | 27.33 | 28.19 | 27.33 | 25.97 |
| 10. Average of Water Content | % | 27.04 | | | 27.78 | | | 27.04 | | | 27.17 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.282 | 1.274 | 1.308 | 1.274 | 1.282 | 1.265 | 1.308 | 1.282 | 1.274 | 1.265 | 1.274 | 1.308 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.288 | | | 1.274 | | | 1.288 | | | 1.282 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.283 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 5cm; L= 4,5cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 33.70 | 33.70 | 34.00 | 33.70 | 33.70 | 34.00 | 33.70 | 34.00 | 33.90 | 34.00 | 33.70 | 33.90 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.10 | 19.10 | 19.40 | 19.10 | 19.10 | 19.40 | 19.10 | 19.40 | 19.30 | 19.40 | 19.10 | 19.30 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 29.50 | 29.60 | 30.00 | 29.60 | 29.50 | 30.00 | 29.60 | 30.00 | 29.70 | 30.00 | 29.60 | 29.70 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 14.90 | 15.00 | 15.40 | 15.00 | 14.90 | 15.40 | 15.00 | 15.40 | 15.10 | 15.40 | 15.00 | 15.10 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.20 | 4.10 | 4.00 | 4.10 | 4.20 | 4.00 | 4.10 | 4.00 | 4.20 | 4.00 | 4.10 | 4.20 |
| 9. Water Content | % | 28.19 | 27.33 | 25.97 | 27.33 | 28.19 | 25.97 | 27.33 | 25.97 | 27.81 | 25.97 | 27.33 | 27.81 |
| 10. Average of Water Content | % | 27.17 | | | 27.17 | | | 27.04 | | | 27.04 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.265 | 1.274 | 1.308 | 1.274 | 1.265 | 1.308 | 1.274 | 1.308 | 1.282 | 1.308 | 1.274 | 1.282 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.282 | | | 1.282 | | | 1.288 | | | 1.288 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.285 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 10cm; L= 3cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 33.90 | 33.90 | 33.90 | 33.90 | 33.70 | 33.70 | 33.90 | 33.90 | 33.90 | 33.90 | 33.70 | 33.70 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.30 | 19.30 | 19.30 | 19.30 | 19.10 | 19.10 | 19.30 | 19.30 | 19.30 | 19.30 | 19.10 | 19.10 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 29.80 | 29.80 | 29.80 | 29.80 | 29.50 | 29.50 | 29.90 | 29.80 | 29.80 | 29.80 | 29.60 | 29.60 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 15.20 | 15.20 | 15.20 | 15.20 | 14.90 | 14.90 | 15.30 | 15.20 | 15.20 | 15.20 | 15.00 | 15.00 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.20 | 4.20 | 4.00 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.10 |
| 9. Water Content | % | 26.97 | 26.97 | 26.97 | 26.97 | 28.19 | 28.19 | 26.14 | 26.97 | 26.97 | 26.97 | 27.33 | 27.33 |
| 10. Average of Water Content | % | 26.97 | | | 27.78 | | | 26.70 | | | 27.21 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.291 | 1.291 | 1.291 | 1.291 | 1.265 | 1.265 | 1.299 | 1.291 | 1.291 | 1.291 | 1.274 | 1.274 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.291 | | | 1.274 | | | 1.293 | | | 1.279 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.284 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 10cm; L= 3,75cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 33.70 | 33.70 | 33.90 | 33.70 | 33.70 | 33.90 | 33.90 | 33.90 | 33.70 | 33.70 | 33.70 | 33.90 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.10 | 19.10 | 19.30 | 19.10 | 19.10 | 19.30 | 19.30 | 19.30 | 19.10 | 19.10 | 19.10 | 19.30 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 29.90 | 29.50 | 29.70 | 29.50 | 29.60 | 29.70 | 29.70 | 29.70 | 29.50 | 30.00 | 29.60 | 29.70 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 15.30 | 14.90 | 15.10 | 14.90 | 15.00 | 15.10 | 15.10 | 15.10 | 14.90 | 15.40 | 15.00 | 15.10 |
| 8. Mass of Water | gr | 3.80 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.10 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 3.70 | 4.10 | 4.20 |
| 9. Water Content | % | 24.84 | 28.19 | 27.81 | 28.19 | 27.33 | 27.81 | 27.81 | 27.81 | 28.19 | 24.03 | 27.33 | 27.81 |
| 10. Average of Water Content | % | 26.95 | | | 27.78 | | | 27.94 | | | 26.39 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.299 | 1.265 | 1.282 | 1.265 | 1.274 | 1.282 | 1.282 | 1.282 | 1.265 | 1.308 | 1.274 | 1.282 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.282 | | | 1.274 | | | 1.276 | | | 1.288 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.280 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 10cm; L= 4,5cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 33.70 | 33.90 | 34.00 | 33.70 | 34.00 | 33.90 | 33.70 | 34.00 | 33.70 | 34.00 | 33.70 | 33.70 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.10 | 19.30 | 19.40 | 19.10 | 19.40 | 19.30 | 19.10 | 19.40 | 19.10 | 19.40 | 19.10 | 19.10 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 29.50 | 29.70 | 30.00 | 29.50 | 30.00 | 29.70 | 29.50 | 30.00 | 29.50 | 30.00 | 29.60 | 29.60 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 14.90 | 15.10 | 15.40 | 14.90 | 15.40 | 15.10 | 14.90 | 15.40 | 14.90 | 15.40 | 15.00 | 15.00 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.20 | 4.20 | 4.00 | 4.20 | 4.00 | 4.20 | 4.20 | 4.00 | 4.20 | 4.00 | 4.10 | 4.10 |
| 9. Water Content | % | 28.19 | 27.81 | 25.97 | 28.19 | 25.97 | 27.81 | 28.19 | 25.97 | 28.19 | 25.97 | 27.33 | 27.33 |
| 10. Average of Water Content | % | 27.33 | | | 27.33 | | | 27.45 | | | 26.88 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.265 | 1.282 | 1.308 | 1.265 | 1.308 | 1.282 | 1.265 | 1.308 | 1.265 | 1.308 | 1.274 | 1.274 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.285 | | | 1.285 | | | 1.279 | | | 1.285 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.283 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 15cm; L= 3cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 34.00 | 33.70 | 33.90 | 33.70 | 33.70 | 33.90 | 34.00 | 33.70 | 33.90 | 34.00 | 34.00 | 33.70 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.40 | 19.10 | 19.30 | 19.10 | 19.10 | 19.30 | 19.40 | 19.10 | 19.30 | 19.40 | 19.40 | 19.10 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 29.80 | 29.60 | 29.50 | 29.60 | 29.60 | 29.70 | 30.00 | 29.60 | 29.70 | 29.70 | 29.80 | 29.50 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 15.20 | 15.00 | 14.90 | 15.00 | 15.00 | 15.10 | 15.40 | 15.00 | 15.10 | 15.10 | 15.20 | 14.90 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.20 | 4.10 | 4.40 | 4.10 | 4.10 | 4.20 | 4.00 | 4.10 | 4.20 | 4.30 | 4.20 | 4.20 |
| 9. Water Content | % | 27.63 | 27.33 | 29.53 | 27.33 | 27.33 | 27.81 | 25.97 | 27.33 | 27.81 | 28.48 | 27.63 | 28.19 |
| 10. Average of Water Content | % | 28.17 | | | 27.49 | | | 27.04 | | | 28.10 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.291 | 1.274 | 1.265 | 1.274 | 1.274 | 1.282 | 1.308 | 1.274 | 1.282 | 1.282 | 1.291 | 1.265 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.276 | | | 1.276 | | | 1.288 | | | 1.279 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.280 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 15cm; L= 3,75cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 34.00 | 33.90 | 34.00 | 33.70 | 33.90 | 33.70 | 33.70 | 33.90 | 34.00 | 33.70 | 33.90 | 33.70 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.40 | 19.30 | 19.40 | 19.10 | 19.30 | 19.10 | 19.10 | 19.30 | 19.40 | 19.10 | 19.30 | 19.10 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 30.00 | 29.70 | 29.60 | 29.60 | 29.70 | 29.60 | 29.60 | 29.70 | 30.00 | 29.60 | 29.70 | 29.60 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 15.40 | 15.10 | 15.00 | 15.00 | 15.10 | 15.00 | 15.00 | 15.10 | 15.40 | 15.00 | 15.10 | 15.00 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.00 | 4.20 | 4.40 | 4.10 | 4.20 | 4.10 | 4.10 | 4.20 | 4.00 | 4.10 | 4.20 | 4.10 |
| 9. Water Content | % | 25.97 | 27.81 | 29.33 | 27.33 | 27.81 | 27.33 | 27.33 | 27.81 | 25.97 | 27.33 | 27.81 | 27.33 |
| 10. Average of Water Content | % | 27.71 | | | 27.49 | | | 27.04 | | | 27.49 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.308 | 1.282 | 1.274 | 1.274 | 1.282 | 1.274 | 1.274 | 1.282 | 1.308 | 1.274 | 1.282 | 1.274 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.288 | | | 1.276 | | | 1.288 | | | 1.276 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.282 | | | | | | | | | | | |

Tabel Kepadatan tanah asli pada DSM Df= 15cm; L= 4,5cm

| Lapisan Tanah Ke- | | 1 | | | 2 | | | 3 | | | 4 | | |
|---|--------------------|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ring No. | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Height of Ring | cm | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 | 3.10 |
| Diameter of Ring | cm | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 | 2.20 |
| 1. Mass of Ring | gr | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 | 14.60 |
| 2. Mass of Wet Soil + Ring | gr | 34.00 | 33.70 | 33.70 | 34.00 | 33.70 | 33.70 | 33.70 | 33.70 | 33.90 | 33.90 | 33.90 | 33.70 |
| 3. Mass of Wet Soil | gr | 19.40 | 19.10 | 19.10 | 19.40 | 19.10 | 19.10 | 19.10 | 19.10 | 19.30 | 19.30 | 19.30 | 19.10 |
| 4. Volume of Soil | cm ³ | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 | 11.78 |
| 6. Mass of Dry Soil + Ring | gr | 30.00 | 29.60 | 29.60 | 30.00 | 29.60 | 29.60 | 29.60 | 29.60 | 29.70 | 29.70 | 29.70 | 29.60 |
| 7. Mass of Dry Soil | gr | 15.40 | 15.00 | 15.00 | 15.40 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.00 | 15.10 | 15.10 | 15.10 | 15.00 |
| 8. Mass of Water | gr | 4.00 | 4.10 | 4.10 | 4.00 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.10 | 4.20 | 4.20 | 4.20 | 4.10 |
| 9. Water Content | % | 25.97 | 27.33 | 27.33 | 25.97 | 27.33 | 27.33 | 27.33 | 27.33 | 27.81 | 27.81 | 27.81 | 27.33 |
| 10. Average of Water Content | % | 26.88 | | | 26.88 | | | 27.49 | | | 27.65 | | |
| 10. Dry Density of Soil (γ_d) | gr/cm ³ | 1.308 | 1.274 | 1.274 | 1.308 | 1.274 | 1.274 | 1.274 | 1.274 | 1.282 | 1.282 | 1.282 | 1.274 |
| 11. Average of γ_d per layer | gr/cm ³ | 1.285 | | | 1.285 | | | 1.276 | | | 1.279 | | |
| Average of γ_d Total | gr/cm ³ | 1.281 | | | | | | | | | | | |

3. **Tabel** Kepadatan tanah+15% *fly ash* pada penelitian Tobing (2014)

Water Content

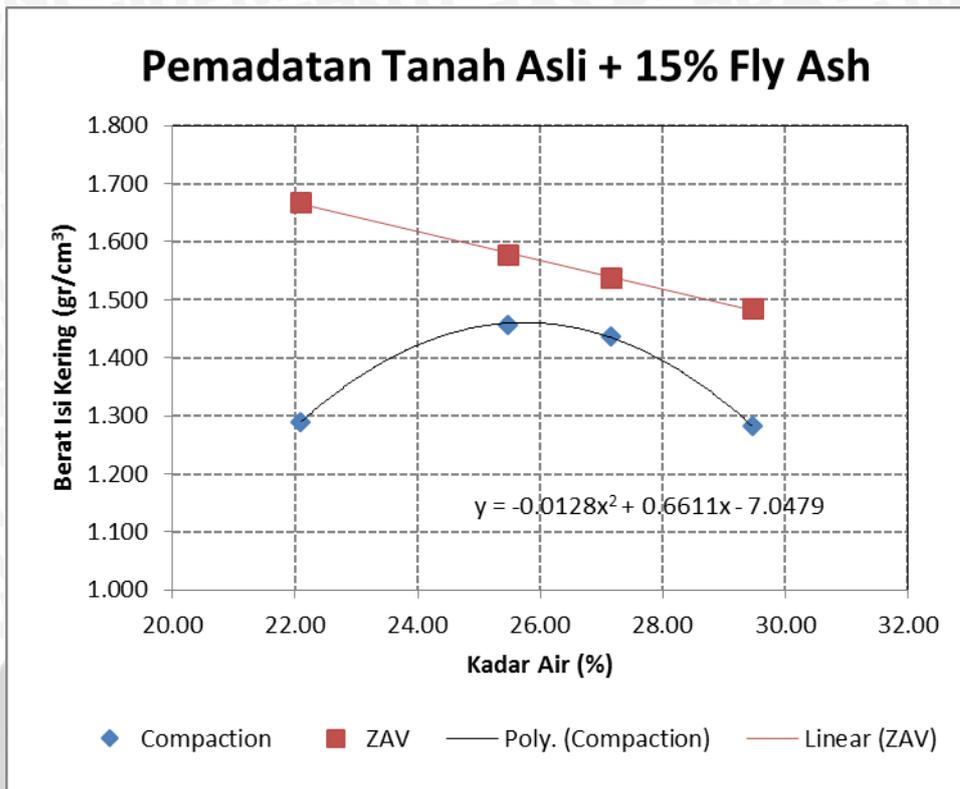
| Penambahan Air | ml | 21% | | | 24% | | | 27% | | | 30% | | |
|----------------------------|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Berat Cawan | gr | 7.9 | 7.8 | 8.2 | 8.2 | 8.1 | 8.5 | 8.3 | 8.2 | 7.8 | 8.2 | 8.2 | 8.1 |
| Berat Tanah Basah + Cawan | gr | 38.8 | 31.4 | 46.1 | 39.8 | 45.9 | 27.8 | 24.2 | 34.6 | 28.2 | 25.3 | 31.2 | 28 |
| Berat Tanah Kering + Cawan | gr | 33.2 | 27.1 | 39.3 | 33.3 | 38.1 | 24 | 20.8 | 28.9 | 23.9 | 21.5 | 25.7 | 23.6 |
| Berat Air | gr | 5.6 | 4.3 | 6.8 | 6.5 | 7.8 | 3.8 | 3.4 | 5.7 | 4.3 | 3.8 | 5.5 | 4.4 |
| Berat Tanah Kering | gr | 25.3 | 19.3 | 31.1 | 25.1 | 30 | 15.5 | 12.5 | 20.7 | 16.1 | 13.3 | 17.5 | 15.5 |
| Kadar Air | % | 22.13 | 22.28 | 21.86 | 25.90 | 26.00 | 24.52 | 27.20 | 27.54 | 26.71 | 28.57 | 31.43 | 28.39 |
| Kadar Air Rata-rata | % | 22.09 | | | 25.47 | | | 27.15 | | | 29.46 | | |

Density

| Penambahan Air | ml | 21% | 24% | 27% | 30% |
|-----------------------------|--------|---------|---------|---------|---------|
| Berat Cetakan | gr | 2680 | 2680 | 2680 | 2680 |
| Berat Tanah Basah + Cetakan | gr | 6040 | 6580 | 6580 | 6220 |
| Berat Tanah Basah | gr | 3360 | 3900 | 3900 | 3540 |
| Isi Cetakan | cm3 | 2133.08 | 2133.08 | 2133.08 | 2133.08 |
| Berat Isi Basah | gr/cm3 | 1.575 | 1.828 | 1.828 | 1.660 |
| Berat Isi Kering | gr/cm3 | 1.290 | 1.457 | 1.438 | 1.282 |

Zero Air Void

| Penambahan Air | ml | 21% | 24% | 27% | 30% |
|---------------------|----|-------|-------|-------|-------|
| Kadar Air | % | 22.09 | 25.47 | 27.15 | 29.46 |
| Gs | - | 2.64 | 2.64 | 2.64 | 2.64 |
| Berat Jenis Air | - | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Zero Air Void (ZAV) | - | 1.668 | 1.579 | 1.538 | 1.485 |



Menghitung kadar air optimum (OMC)

$$y = -0,001128 x^2 + 0,6611 x + 7,0479$$

$$dy/dx = -0,0256 x + 0,6611 = 0$$

$$x = 25,824\% \text{ (OMC)}$$

Menghitung berat isi maksimum (γ_d maks)

$$y = -0,001128 x^2 + 0,6611 x + 7,0479$$

$$y = -0,001128 (25,824)^2 + 0,6611 (25,824) + 7,0479$$

$$y = 1,488 \text{ gr/cm}^3 \text{ (}\gamma_d \text{ maks)}$$

LAMPIRAN 3

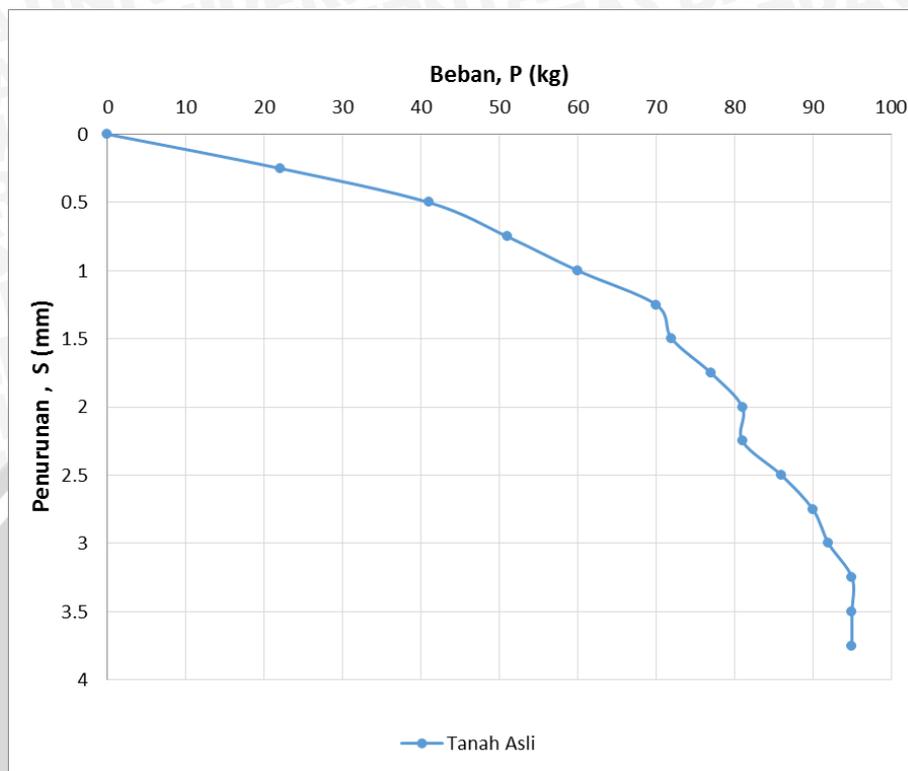
PEMBACAAN BEBAN DAN PENURUNAN

1. Beban dan Penurunan Tanah Asli
2. Beban dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 3cm
3. Beban dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 3,75cm
4. Beban dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 4,5cm
5. Beban dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 3cm
6. Beban dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 3,75cm
7. Beban dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 4,5cm
8. Beban dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 3cm
9. Beban dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 3,75cm
10. Beban dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 4,5cm
11. Tegangan dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm
12. Tegangan dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm
13. Tegangan dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm
14. Tegangan dan Penurunan DSM L= 3cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm
15. Tegangan dan Penurunan DSM L= 3,75cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm
16. Tegangan dan Penurunan DSM L= 4,5cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm
17. BCI Variasi Jarak (L)
18. BCI Variasi Panjang (Df)
19. Persentase DSM dan Persentase Pengembangan (*Swelling*) Penelitian Rahmawati (2015)
20. Gambar Pelaksanaan Penelitian

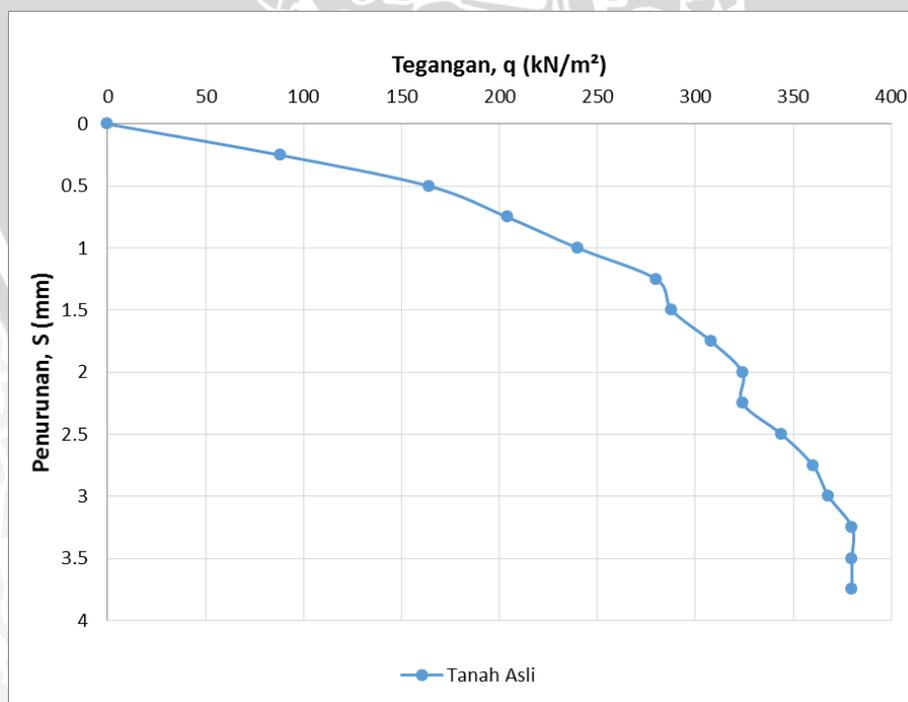
1. **Tabel** Beban dan Penurunan Tanah Asli

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 4525 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 4475 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 22 | 88 |
| 4425 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 41 | 164 |
| 4375 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 51 | 204 |
| 4325 | 200 | 0.0025 | 1 | 60 | 240 |
| 4275 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 70 | 280 |
| 4225 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 72 | 288 |
| 4175 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 77 | 308 |
| 4125 | 400 | 0.0025 | 2 | 81 | 324 |
| 4075 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 81 | 324 |
| 4025 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 86 | 344 |
| 3975 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 90 | 360 |
| 3925 | 600 | 0.0025 | 3 | 92 | 368 |
| 3875 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 95 | 380 |
| 3825 | 700 | 0.0025 | 3.5 | 95 | 380 |
| 3775 | 750 | 0.0025 | 3.75 | 95 | 380 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 95 kg dan daya dukung sebesar 380 kN/m² dengan penurunan sebesar 3,75 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) Tanah Asli

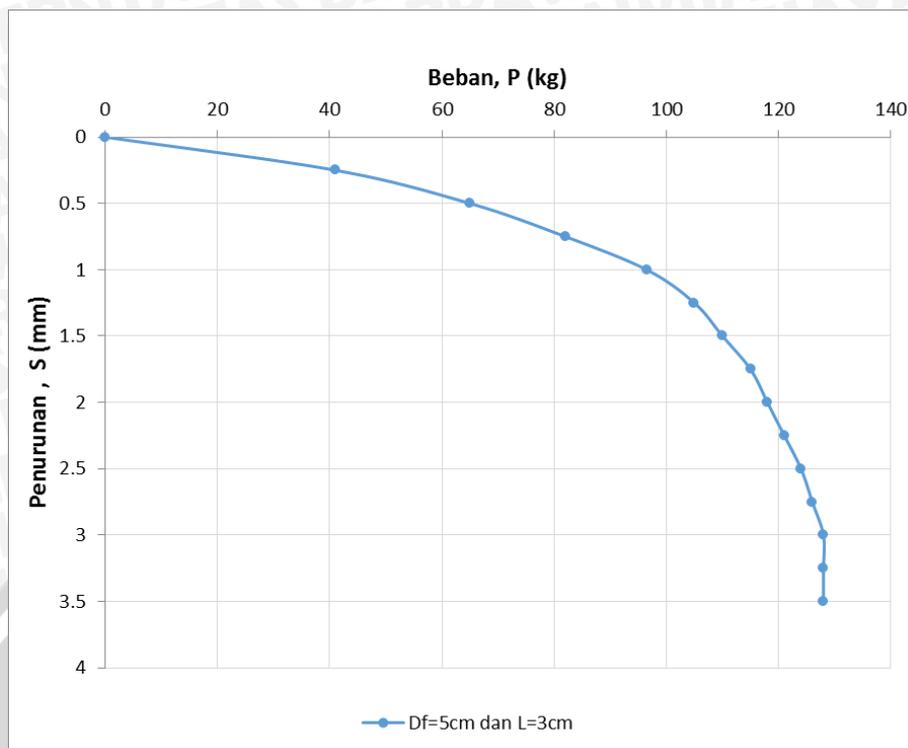


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Tanah Asli

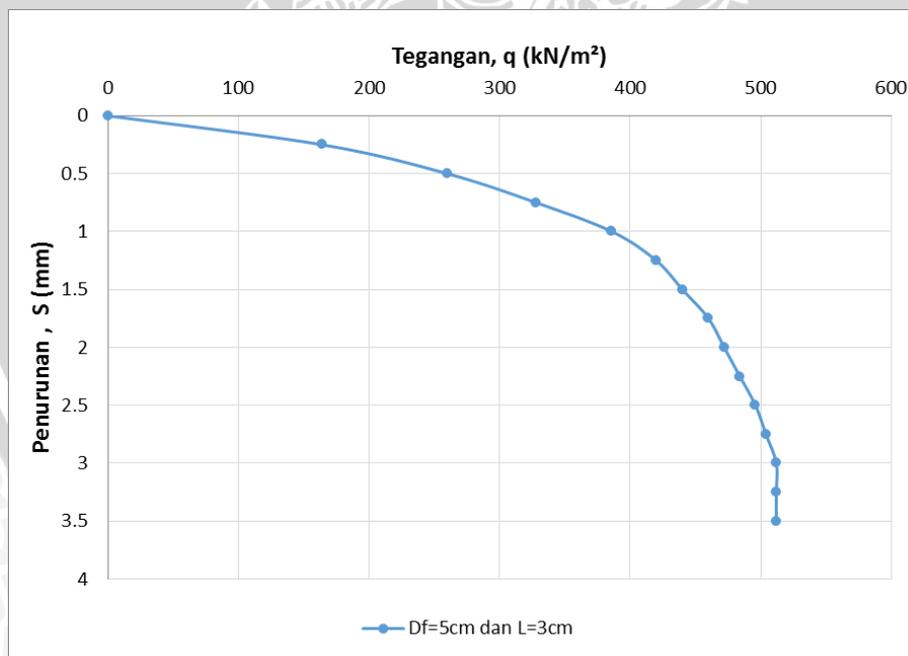
2. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 3cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 1950 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 2000 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 41 | 164 |
| 2050 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 65 | 260 |
| 2100 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 82 | 328 |
| 2150 | 200 | 0.0025 | 1 | 96.5 | 386 |
| 2200 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 105 | 420 |
| 2250 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 110 | 440 |
| 2300 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 115 | 460 |
| 2350 | 400 | 0.0025 | 2 | 118 | 472 |
| 2400 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 121 | 484 |
| 2450 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 124 | 496 |
| 2500 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 126 | 504 |
| 2550 | 600 | 0.0025 | 3 | 128 | 512 |
| 2600 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 128 | 512 |
| 2650 | 700 | 0.0025 | 3.5 | 128 | 512 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 128 kg dan daya dukung sebesar 512 kN/m² dengan penurunan sebesar 3,5 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm dan L=3cm

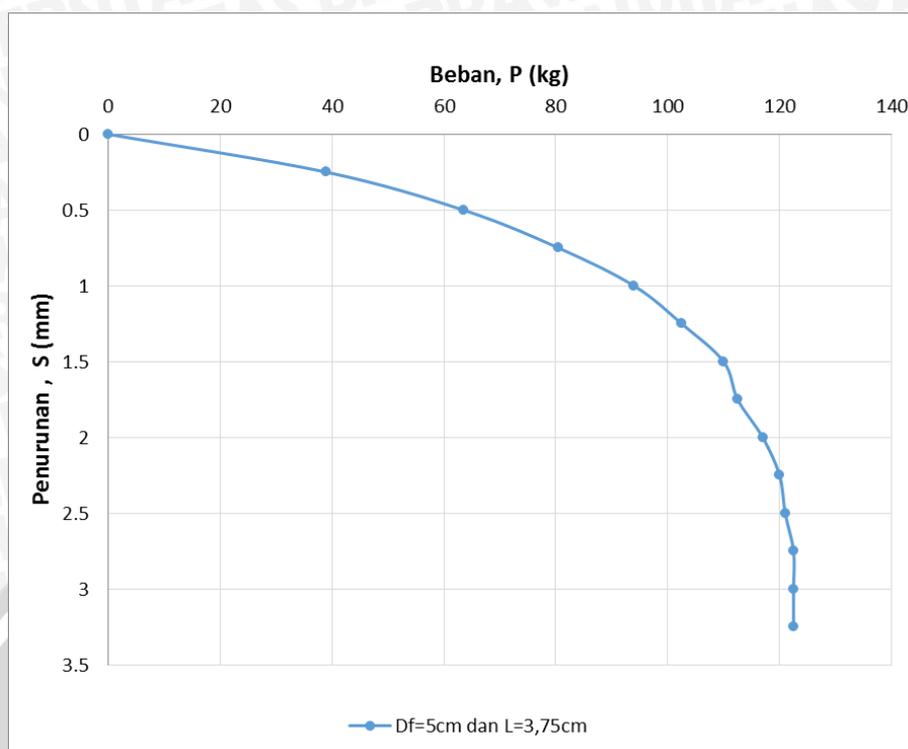


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm dan L=3cm

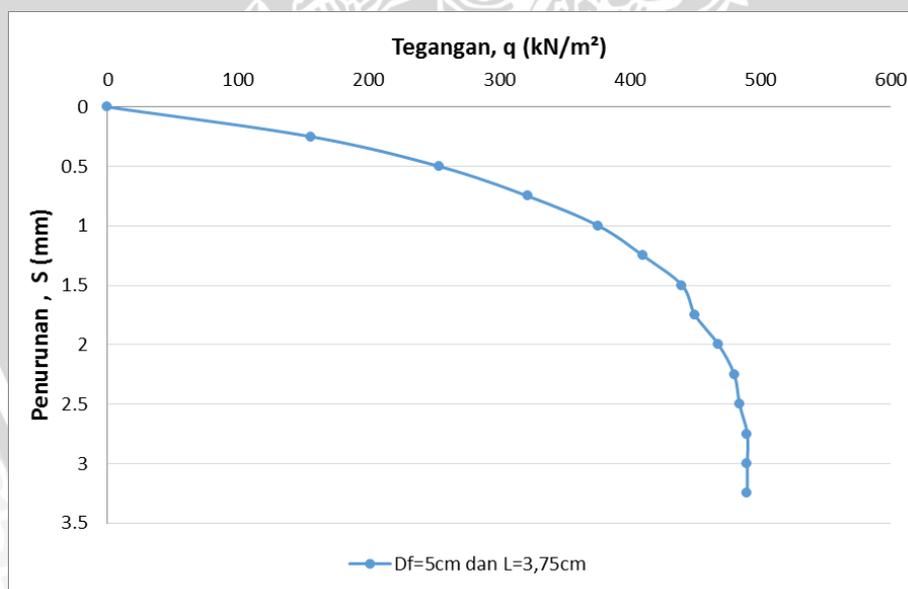
3. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 3,75cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 851 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 901 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 39 | 156 |
| 951 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 63.5 | 254 |
| 1001 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 80.5 | 322 |
| 1051 | 200 | 0.0025 | 1 | 94 | 376 |
| 1101 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 102.5 | 410 |
| 1151 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 110 | 440 |
| 1201 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 112.5 | 450 |
| 1251 | 400 | 0.0025 | 2 | 117 | 468 |
| 1301 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 120 | 480 |
| 1351 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 121 | 484 |
| 1401 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 122.5 | 490 |
| 1451 | 600 | 0.0025 | 3 | 122.5 | 490 |
| 1501 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 122.5 | 490 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 122,5 kg dan daya dukung sebesar 490 kN/m² dengan penurunan sebesar 3,25 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm dan L=3,75cm

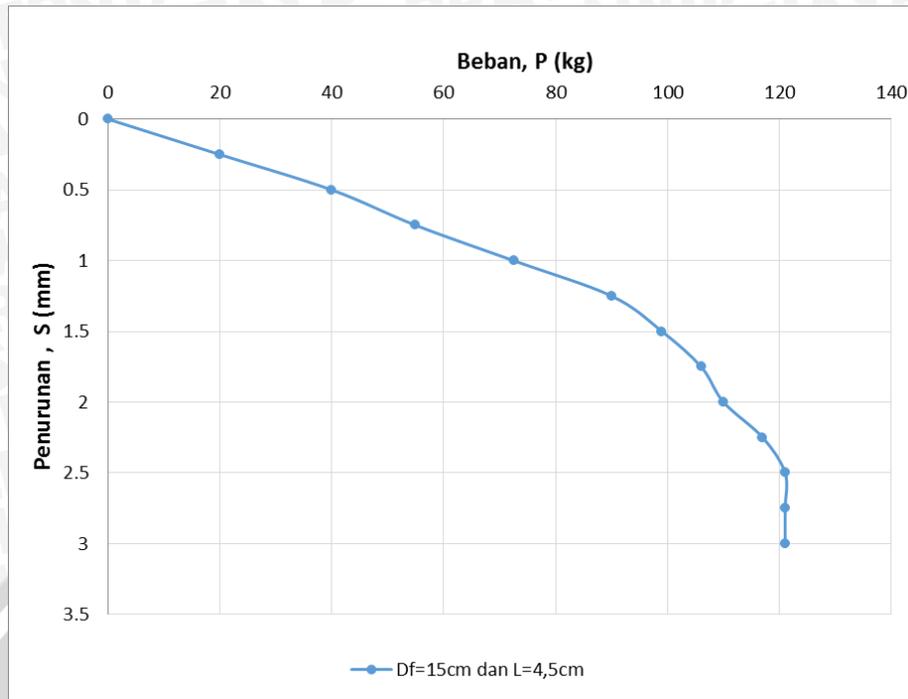


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm dan L=3,75cm

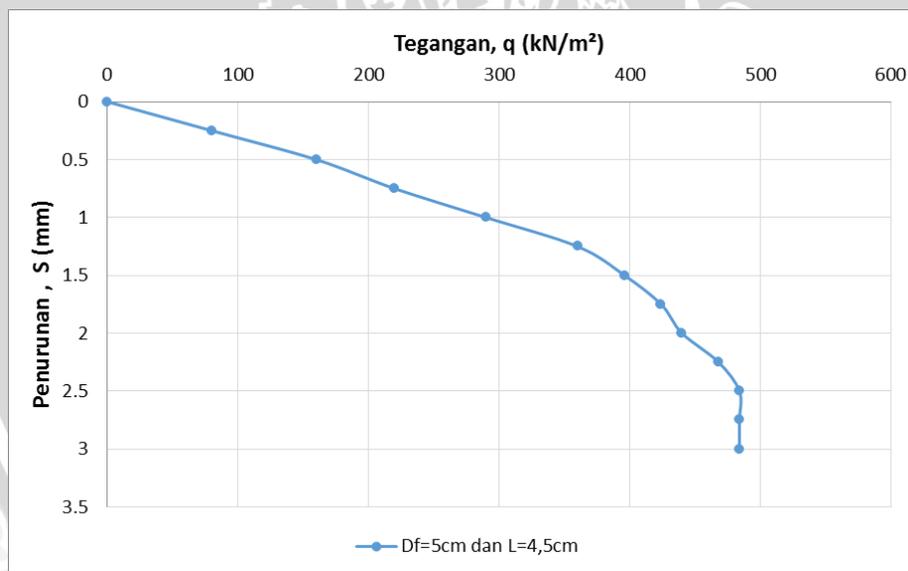
4. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 4,5cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 1450 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 1400 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 20 | 80 |
| 1350 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 40 | 160 |
| 1300 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 55 | 220 |
| 1250 | 200 | 0.0025 | 1 | 72.5 | 290 |
| 1200 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 90 | 360 |
| 1150 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 99 | 396 |
| 1100 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 106 | 424 |
| 1050 | 400 | 0.0025 | 2 | 110 | 440 |
| 1000 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 117 | 468 |
| 950 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 121 | 484 |
| 900 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 121 | 484 |
| 850 | 600 | 0.0025 | 3 | 121 | 484 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 121 kg dan daya dukung sebesar 484 kN/m² dengan penurunan sebesar 3 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm dan L=4,5cm

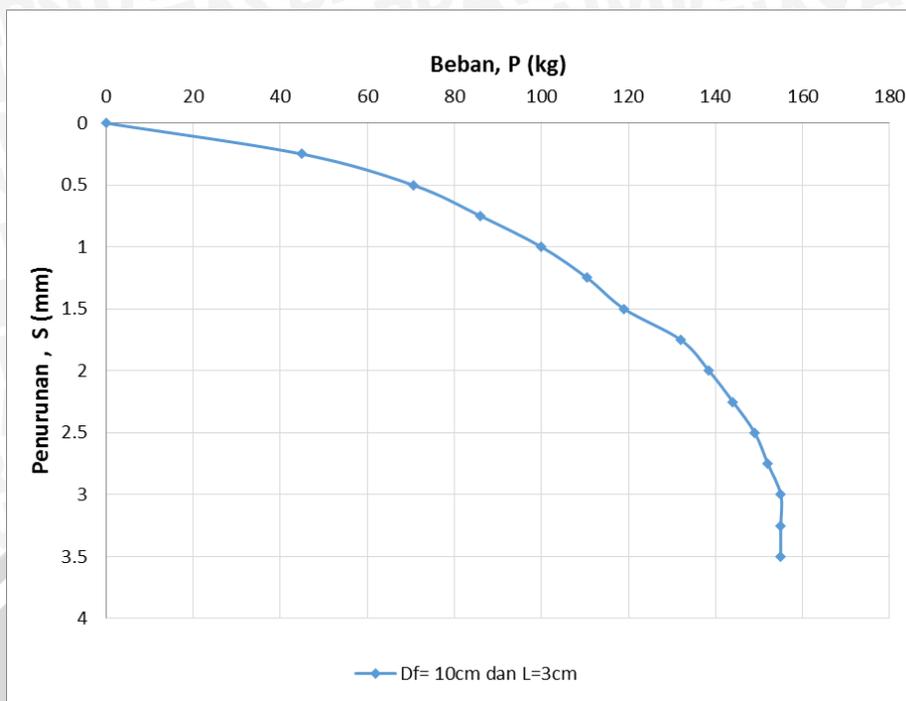


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm dan L=4,5cm

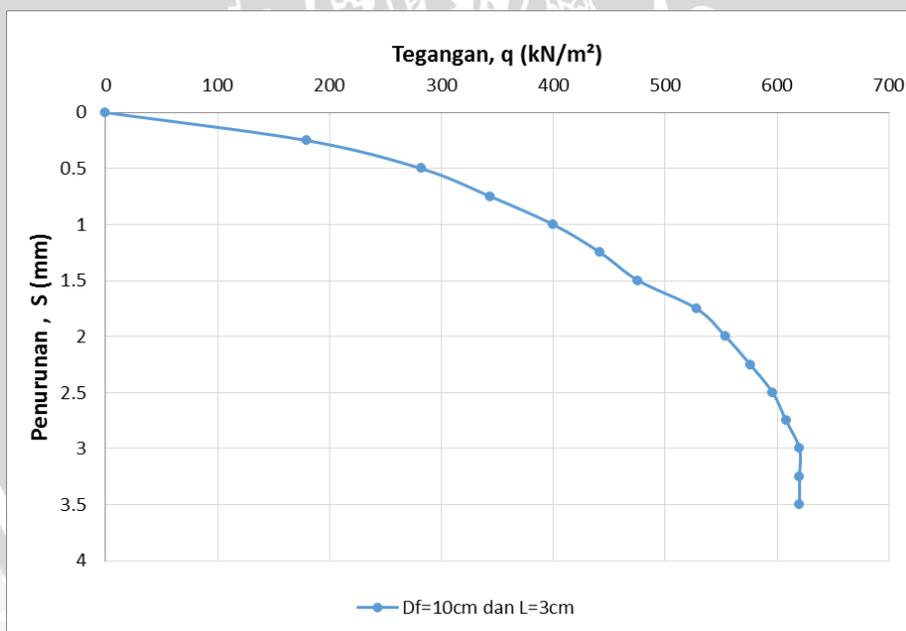
5. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 3cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 3191 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 3141 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 45 | 180 |
| 3091 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 70.5 | 282 |
| 3041 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 86 | 344 |
| 2991 | 200 | 0.0025 | 1 | 100 | 400 |
| 2941 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 110.5 | 442 |
| 2891 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 119 | 476 |
| 2841 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 132 | 528 |
| 2791 | 400 | 0.0025 | 2 | 138.5 | 554 |
| 2741 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 144 | 576 |
| 2691 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 149 | 596 |
| 2641 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 152 | 608 |
| 2591 | 600 | 0.0025 | 3 | 155 | 620 |
| 2541 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 155 | 620 |
| 2491 | 700 | 0.0025 | 3.5 | 155 | 620 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 155 kg dan daya dukung sebesar 620 kN/m² dengan penurunan sebesar 3,5 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm dan L=3cm

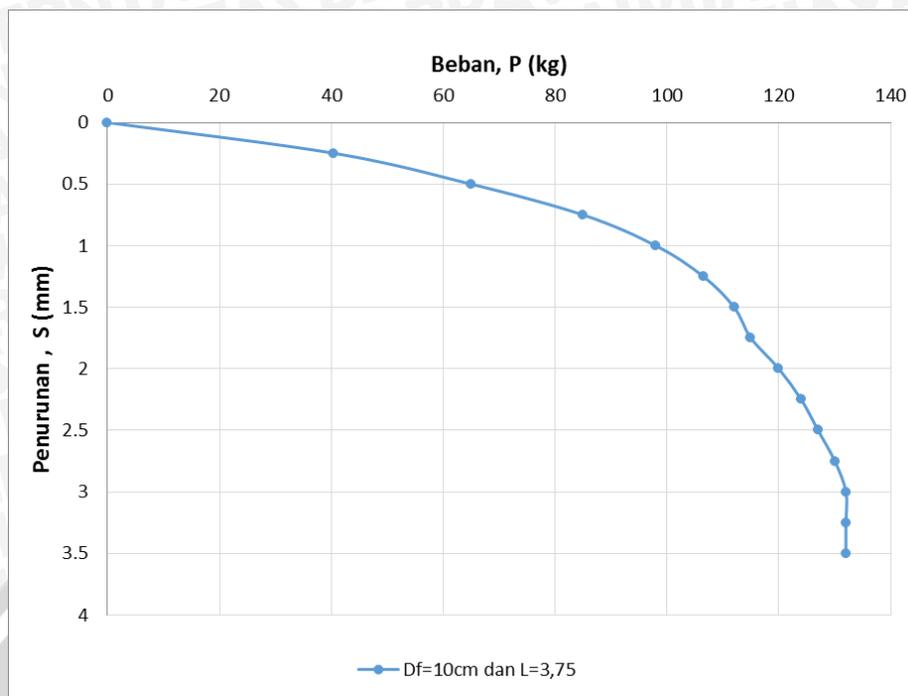


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm dan L=3cm

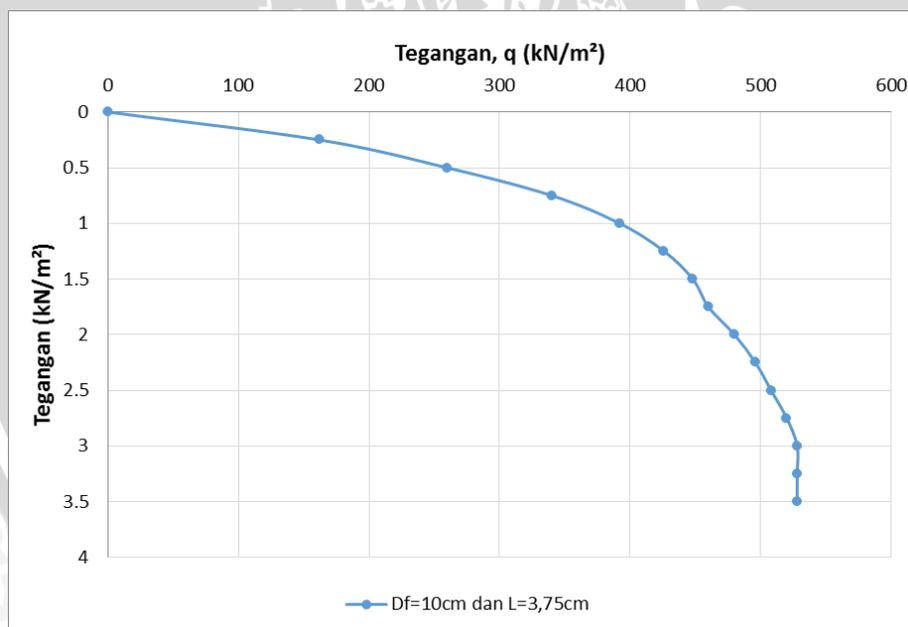
6. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 3,75cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 4405 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 4355 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 40.5 | 162 |
| 4305 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 65 | 260 |
| 4255 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 85 | 340 |
| 4205 | 200 | 0.0025 | 1 | 98 | 392 |
| 4155 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 106.5 | 426 |
| 4105 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 112 | 448 |
| 4055 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 115 | 460 |
| 4005 | 400 | 0.0025 | 2 | 120 | 480 |
| 3955 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 124 | 496 |
| 3905 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 127 | 508 |
| 3855 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 130 | 520 |
| 3805 | 600 | 0.0025 | 3 | 132 | 528 |
| 3755 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 132 | 528 |
| 3705 | 700 | 0.0025 | 3.5 | 132 | 528 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 132 kg dan daya dukung sebesar 528 kN/m² dengan penurunan sebesar 3,5 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm dan L=3,75cm

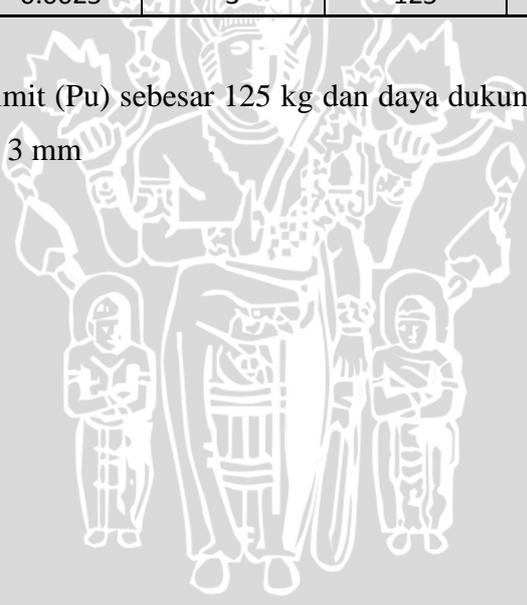


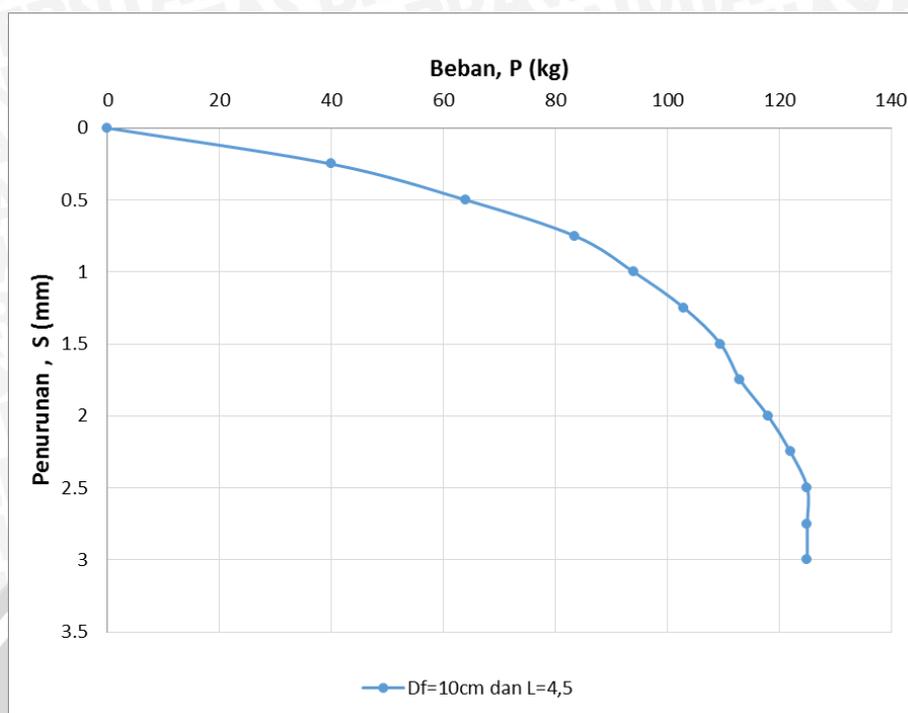
Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm dan L=3,75cm

7. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 4,5cm

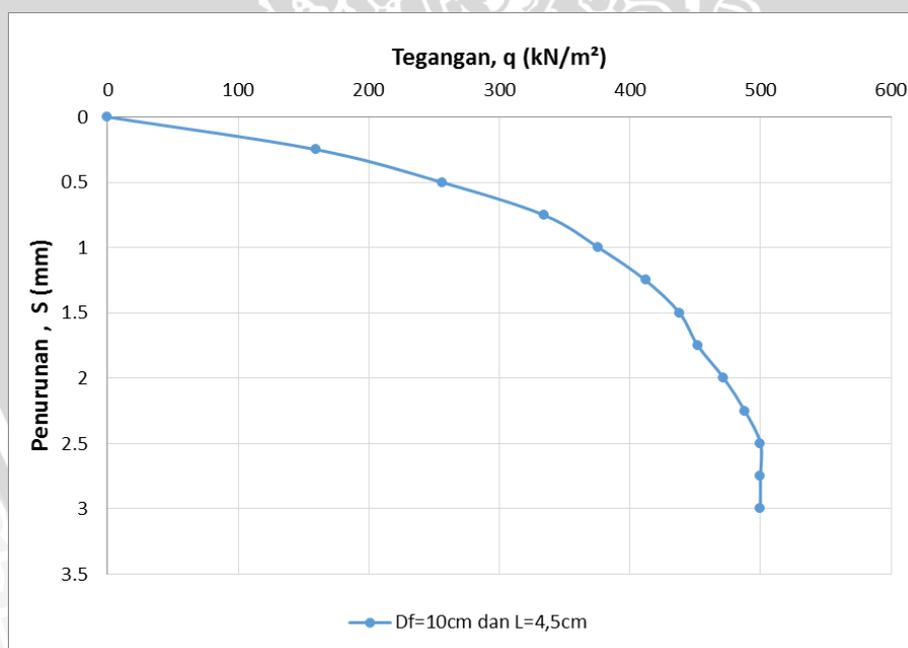
| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 1060 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 1010 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 40 | 160 |
| 960 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 64 | 256 |
| 910 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 83.5 | 334 |
| 860 | 200 | 0.0025 | 1 | 94 | 376 |
| 810 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 103 | 412 |
| 760 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 109.5 | 438 |
| 710 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 113 | 452 |
| 660 | 400 | 0.0025 | 2 | 118 | 472 |
| 610 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 122 | 488 |
| 560 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 125 | 500 |
| 510 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 125 | 500 |
| 460 | 600 | 0.0025 | 3 | 125 | 500 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 125 kg dan daya dukung sebesar 500 kN/m² dengan penurunan sebesar 3 mm





Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm dan L=4,5cm

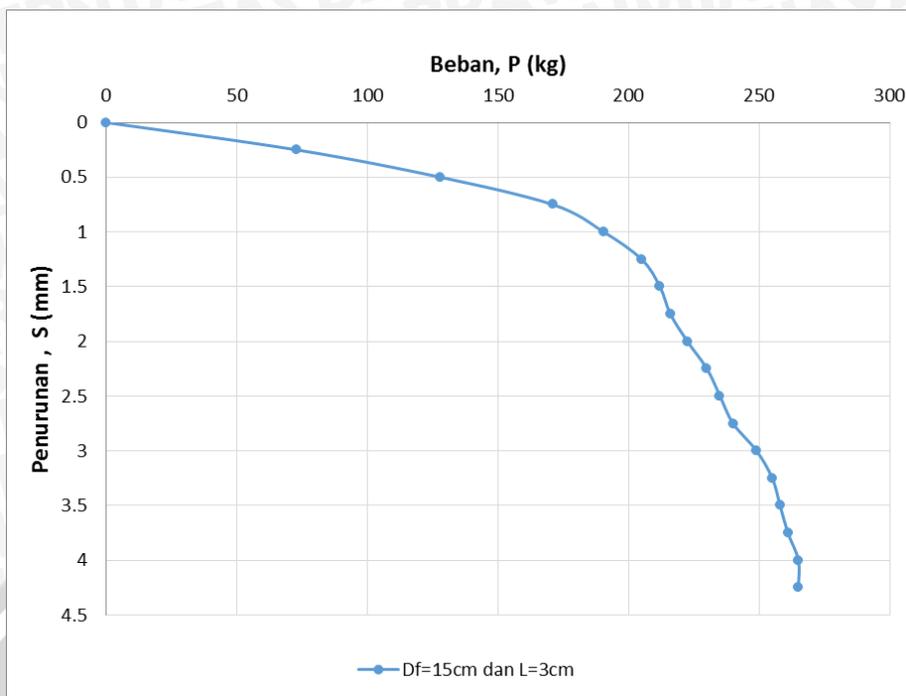


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm dan L=4,5cm

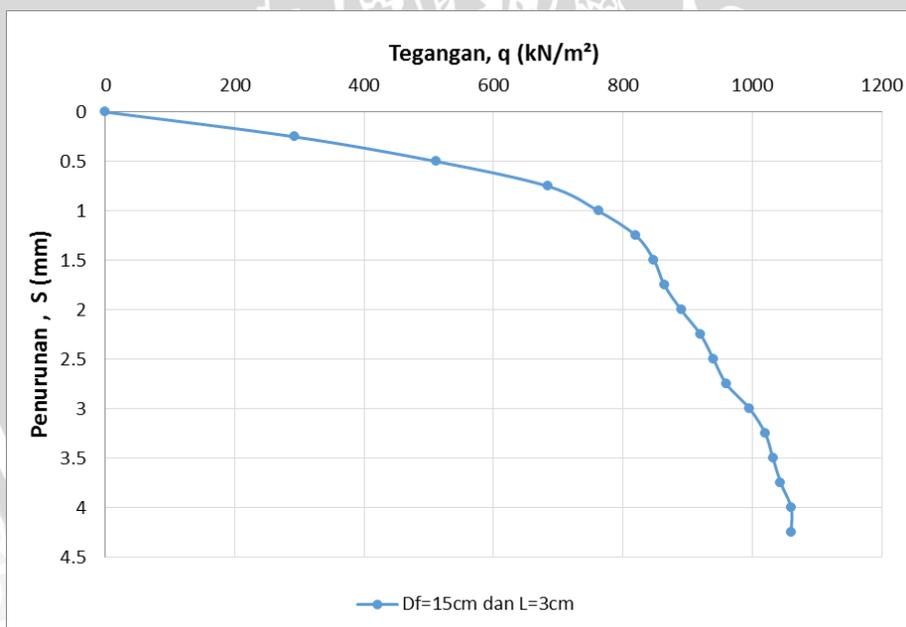
8. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 3cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 2090 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 2040 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 73 | 292 |
| 1990 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 128 | 512 |
| 1940 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 171 | 684 |
| 1890 | 200 | 0.0025 | 1 | 190.5 | 762 |
| 1840 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 205 | 820 |
| 1790 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 212 | 848 |
| 1740 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 216 | 864 |
| 1690 | 400 | 0.0025 | 2 | 222.5 | 890 |
| 1640 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 230 | 920 |
| 1590 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 235 | 940 |
| 1540 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 240 | 960 |
| 1490 | 600 | 0.0025 | 3 | 249 | 996 |
| 1440 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 255 | 1020 |
| 1390 | 700 | 0.0025 | 3.5 | 258 | 1032 |
| 1340 | 750 | 0.0025 | 3.75 | 261 | 1044 |
| 1290 | 800 | 0.0025 | 4 | 265 | 1060 |
| 1240 | 850 | 0.0025 | 4.25 | 265 | 1060 |
| 1190 | 900 | 0.0025 | 4.5 | 265 | 1060 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 265 kg dan daya dukung sebesar 1060 kN/m² dengan penurunan sebesar 4,5 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm dan L=3cm

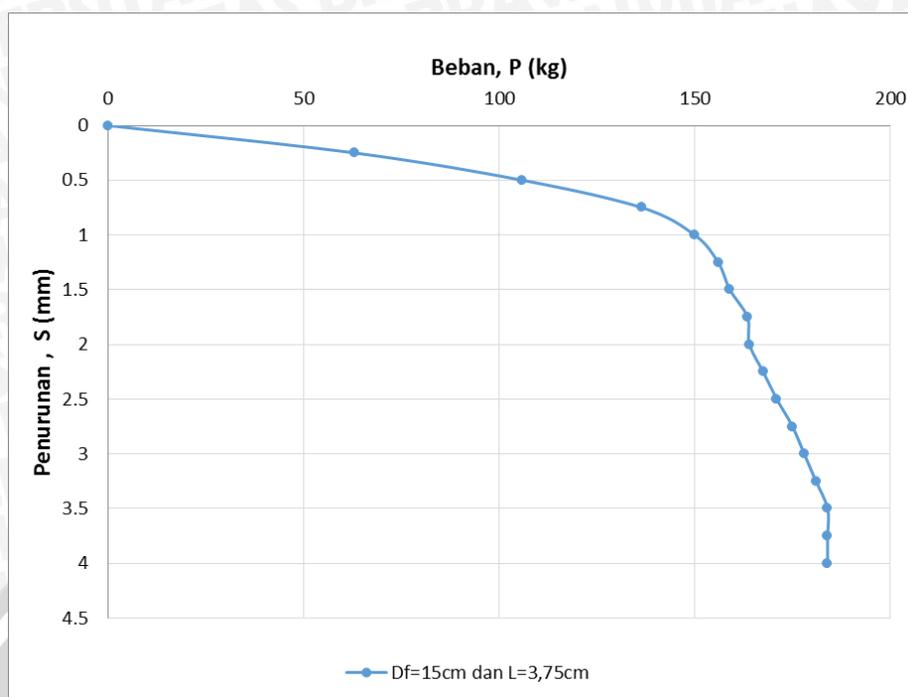


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm dan L=3cm

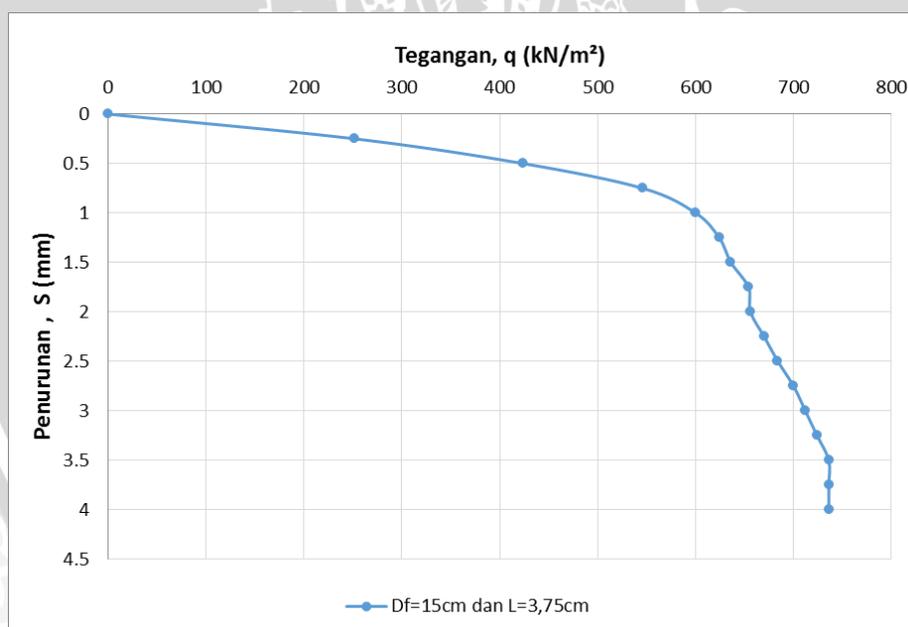
9. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 3,75cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S= \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q= P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|---|----------------------------|---|
| 1298 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 1248 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 63 | 252 |
| 1198 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 106 | 424 |
| 1148 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 136.5 | 546 |
| 1098 | 200 | 0.0025 | 1 | 150 | 600 |
| 1048 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 156 | 624 |
| 998 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 159 | 636 |
| 948 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 163.5 | 654 |
| 898 | 400 | 0.0025 | 2 | 164 | 656 |
| 848 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 167.5 | 670 |
| 798 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 171 | 684 |
| 748 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 175 | 700 |
| 698 | 600 | 0.0025 | 3 | 178 | 712 |
| 648 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 181 | 724 |
| 598 | 700 | 0.0025 | 3.5 | 184 | 736 |
| 548 | 750 | 0.0025 | 3.75 | 184 | 736 |
| 498 | 800 | 0.0025 | 4 | 184 | 736 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 184 kg dan daya dukung sebesar 736 kN/m² dengan penurunan sebesar 4 mm



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm dan L=3,75cm

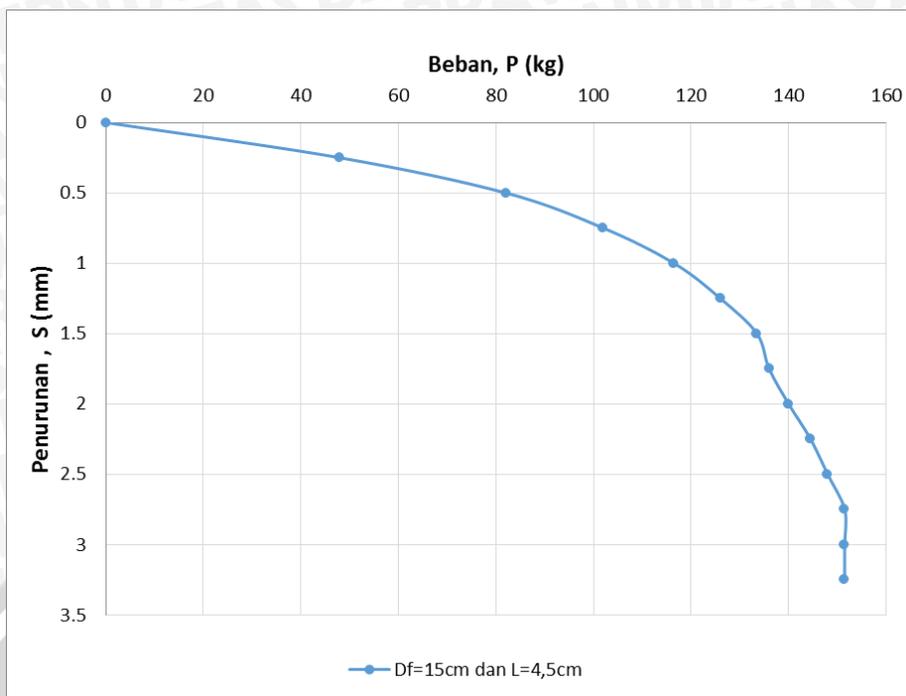


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm dan L=3,75cm

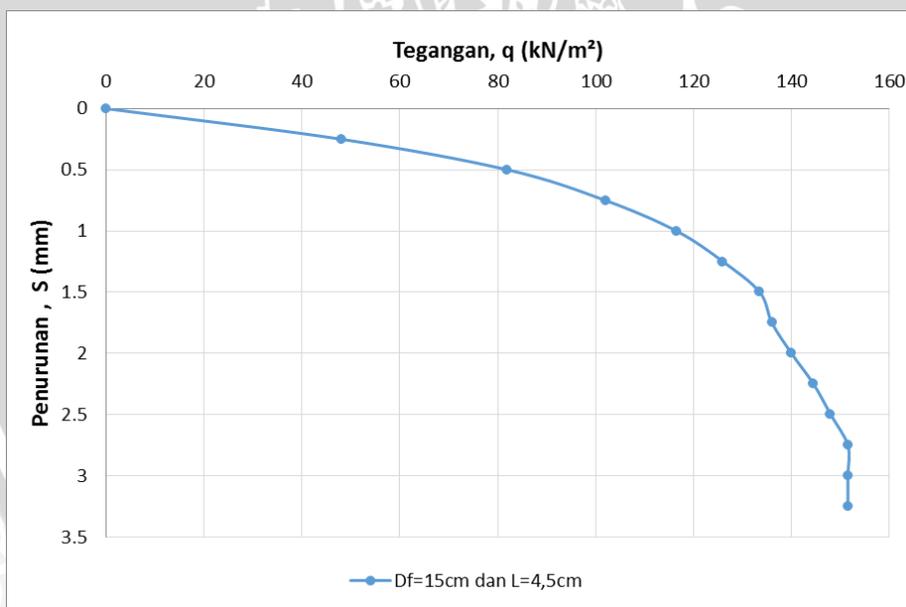
10. **Tabel** Beban dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 4,5cm

| Pembacaan LVDT | Interval Δ | Luas Pelat A m ² | Penurunan $S = \Delta \times 0.005$ mm | Pembacaan Beban P kg | Tegangan $q = P/A$ kN/m ² |
|----------------|----------------------|-----------------------------------|--|----------------------------|--|
| 750 | 0 | 0.0025 | 0 | 0 | 0 |
| 700 | 50 | 0.0025 | 0.25 | 48 | 192 |
| 650 | 100 | 0.0025 | 0.5 | 82 | 328 |
| 600 | 150 | 0.0025 | 0.75 | 102 | 408 |
| 550 | 200 | 0.0025 | 1 | 116.5 | 466 |
| 500 | 250 | 0.0025 | 1.25 | 126 | 504 |
| 450 | 300 | 0.0025 | 1.5 | 133.5 | 534 |
| 400 | 350 | 0.0025 | 1.75 | 136 | 544 |
| 350 | 400 | 0.0025 | 2 | 140 | 560 |
| 300 | 450 | 0.0025 | 2.25 | 144.5 | 578 |
| 250 | 500 | 0.0025 | 2.5 | 148 | 592 |
| 200 | 550 | 0.0025 | 2.75 | 151.5 | 606 |
| 150 | 600 | 0.0025 | 3 | 151.5 | 606 |
| 100 | 650 | 0.0025 | 3.25 | 151.5 | 606 |

Maka diperoleh beban ultimit (P_u) sebesar 151,5 kg dan daya dukung sebesar 606 kN/m² dengan penurunan sebesar 3,25 mm



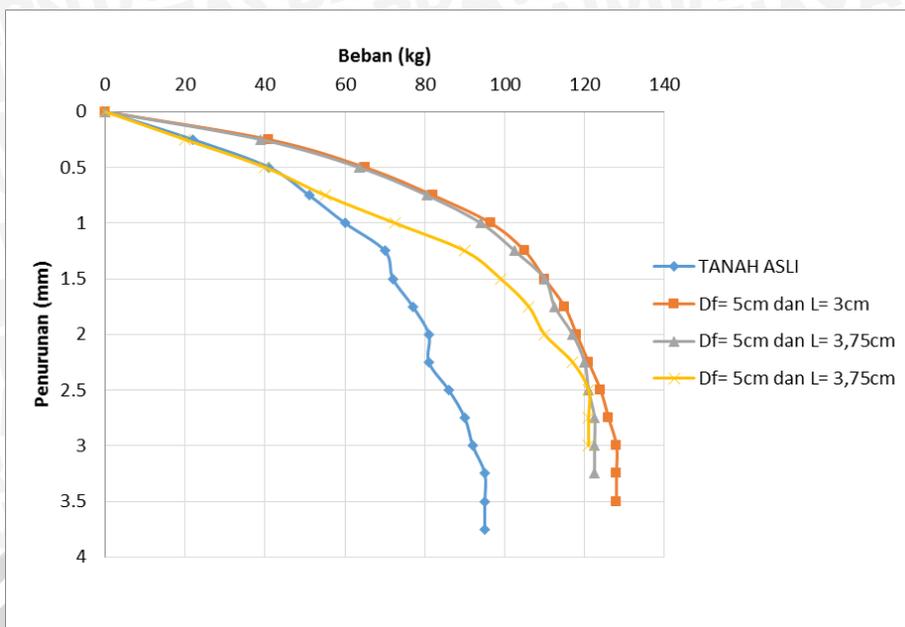
Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm dan L= 4,5cm



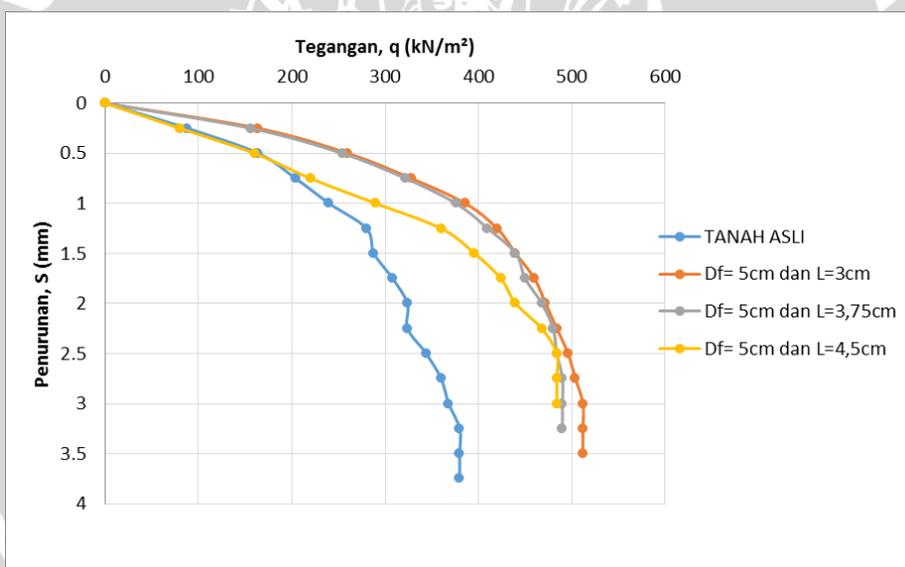
Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm dan L= 4,5cm

11. **Tabel** Tegangan dan Penurunan DSM Df= 5cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm

| Df= 5cm | | | | | | | | |
|----------------|---------------|--------|-----------|----------|----------------------------------|--------|-----------|----------|
| Penurunan (mm) | Beban, P (Kg) | | | | Tegangan, q (kN/m ²) | | | |
| | Tanah Asli | L= 3cm | L= 3,75cm | L= 4,5cm | Tanah Asli | L= 3cm | L= 3,75cm | L= 4,5cm |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.25 | 22 | 41 | 39 | 20 | 88 | 164 | 156 | 80 |
| 0.5 | 41 | 65 | 63.5 | 40 | 164 | 260 | 254 | 160 |
| 0.75 | 51 | 82 | 80.5 | 55 | 204 | 328 | 322 | 220 |
| 1 | 60 | 96.5 | 94 | 72.5 | 240 | 386 | 376 | 290 |
| 1.25 | 70 | 105 | 102.5 | 90 | 280 | 420 | 410 | 360 |
| 1.5 | 72 | 110 | 110 | 99 | 288 | 440 | 440 | 396 |
| 1.75 | 77 | 115 | 112.5 | 106 | 308 | 460 | 450 | 424 |
| 2 | 81 | 118 | 117 | 110 | 324 | 472 | 468 | 440 |
| 2.25 | 81 | 121 | 120 | 117 | 324 | 484 | 480 | 468 |
| 2.5 | 86 | 124 | 121 | 121 | 344 | 496 | 484 | 484 |
| 2.75 | 90 | 126 | 122.5 | 121 | 360 | 504 | 490 | 484 |
| 3 | 92 | 128 | 122.5 | 121 | 368 | 512 | 490 | 484 |
| 3.25 | 95 | 128 | 122.5 | | 380 | 512 | 490 | |
| 3.5 | 95 | 128 | | | 380 | 512 | | |
| 3.75 | 95 | | | | 380 | | | |



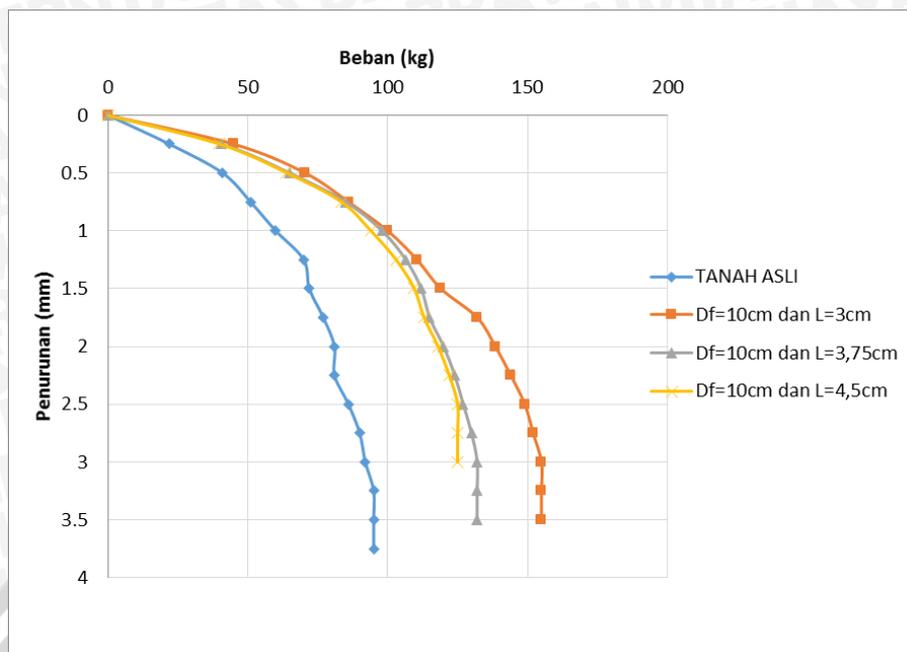
Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm



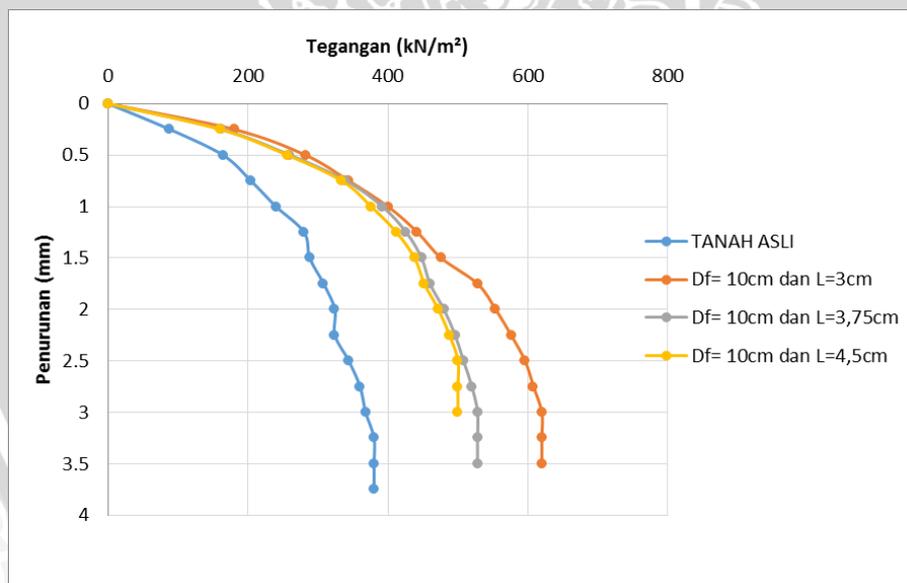
Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 5cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm

12. **Tabel** Tegangan dan Penurunan DSM Df= 10cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm;
Df= 5cm, L= 4,5cm

| Df= 10cm | | | | | | | | |
|-------------------|---------------|--------|-----------|----------|----------------------------------|--------|-----------|----------|
| Penurunan (mm) | Beban, P (Kg) | | | | Tegangan, q (kN/m ²) | | | |
| | Tanah Asli | L= 3cm | L= 3,75cm | L= 4,5cm | Tanah Asli | L= 3cm | L= 3,75cm | L= 4,5cm |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.25 | 22 | 45 | 40.5 | 40 | 88 | 180 | 162 | 160 |
| 0.5 | 41 | 70.5 | 65 | 64 | 164 | 282 | 260 | 256 |
| 0.75 | 51 | 86 | 85 | 83.5 | 204 | 344 | 340 | 334 |
| 1 | 60 | 100 | 98 | 94 | 240 | 400 | 392 | 376 |
| 1.25 | 70 | 110.5 | 106.5 | 103 | 280 | 442 | 426 | 412 |
| 1.5 | 72 | 119 | 112 | 109.5 | 288 | 476 | 448 | 438 |
| 1.75 | 77 | 132 | 115 | 113 | 308 | 528 | 460 | 452 |
| 2 | 81 | 138.5 | 120 | 118 | 324 | 554 | 480 | 472 |
| 2.25 | 81 | 144 | 124 | 122 | 324 | 576 | 496 | 488 |
| 2.5 | 86 | 149 | 127 | 125 | 344 | 596 | 508 | 500 |
| 2.75 | 90 | 152 | 130 | 125 | 360 | 608 | 520 | 500 |
| 3 | 92 | 155 | 132 | 125 | 368 | 620 | 528 | 500 |
| 3.25 | 95 | 155 | 132 | | 380 | 620 | 528 | |
| 3.5 | 95 | 155 | 132 | | 380 | 620 | 528 | |
| 3.75 | 95 | | | | 380 | | | |



Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm

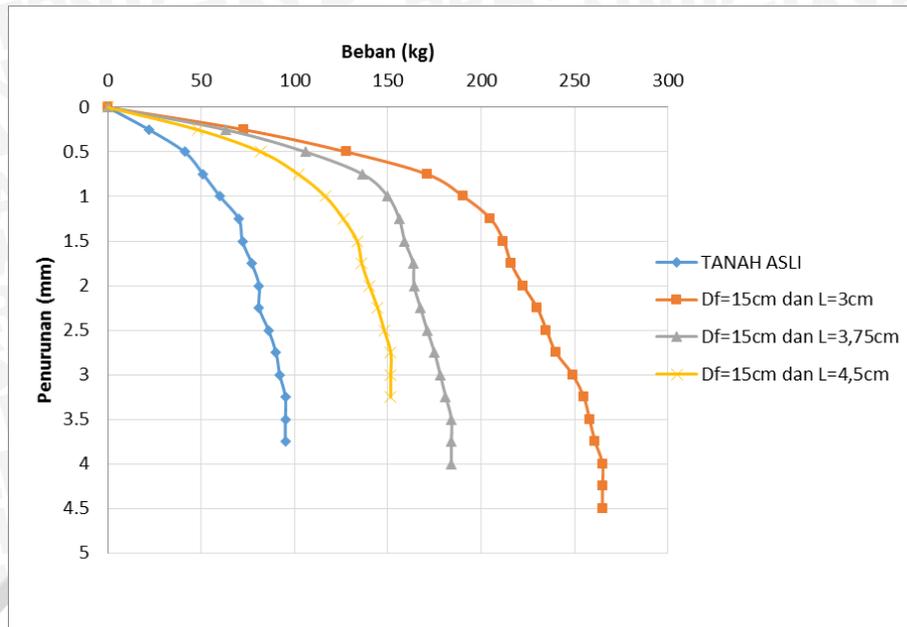


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 10cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm

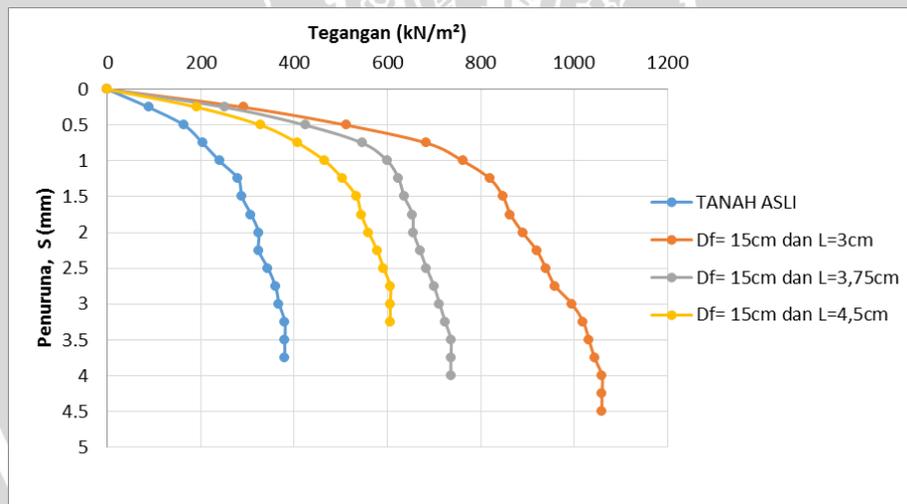
13. **Tabel** Tegangan dan Penurunan DSM Df= 15cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm;
Df= 5cm, L= 4,5cm

| Df= 15cm | | | | | | | | |
|-------------------|---------------|--------|-----------|----------|----------------------------------|--------|-----------|----------|
| Penurunan (mm) | Beban, P (Kg) | | | | Tegangan, q (kN/m ²) | | | |
| | Tanah Asli | L= 3cm | L= 3,75cm | L= 4,5cm | Tanah Asli | L= 3cm | L= 3,75cm | L= 4,5cm |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.25 | 22 | 73 | 63 | 48 | 88 | 292 | 252 | 192 |
| 0.5 | 41 | 128 | 106 | 82 | 164 | 512 | 424 | 328 |
| 0.75 | 51 | 171 | 136.5 | 102 | 204 | 684 | 546 | 408 |
| 1 | 60 | 190.5 | 150 | 116.5 | 240 | 762 | 600 | 466 |
| 1.25 | 70 | 205 | 156 | 126 | 280 | 820 | 624 | 504 |
| 1.5 | 72 | 212 | 159 | 133.5 | 288 | 848 | 636 | 534 |
| 1.75 | 77 | 216 | 163.5 | 136 | 308 | 864 | 654 | 544 |
| 2 | 81 | 222.5 | 164 | 140 | 324 | 890 | 656 | 560 |
| 2.25 | 81 | 230 | 167.5 | 144.5 | 324 | 920 | 670 | 578 |
| 2.5 | 86 | 235 | 171 | 148 | 344 | 940 | 684 | 592 |
| 2.75 | 90 | 240 | 175 | 151.5 | 360 | 960 | 700 | 606 |
| 3 | 92 | 249 | 178 | 151.5 | 368 | 996 | 712 | 606 |
| 3.25 | 95 | 255 | 181 | 151.5 | 380 | 1020 | 724 | 606 |
| 3.5 | 95 | 258 | 184 | | 380 | 1032 | 736 | |
| 3.75 | 95 | 261 | 184 | | 380 | 1044 | 736 | |
| 4 | | 265 | 184 | | | 1060 | 736 | |
| 4.25 | | 265 | | | | 1060 | | |
| 4.5 | | 265 | | | | 1060 | | |





Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm

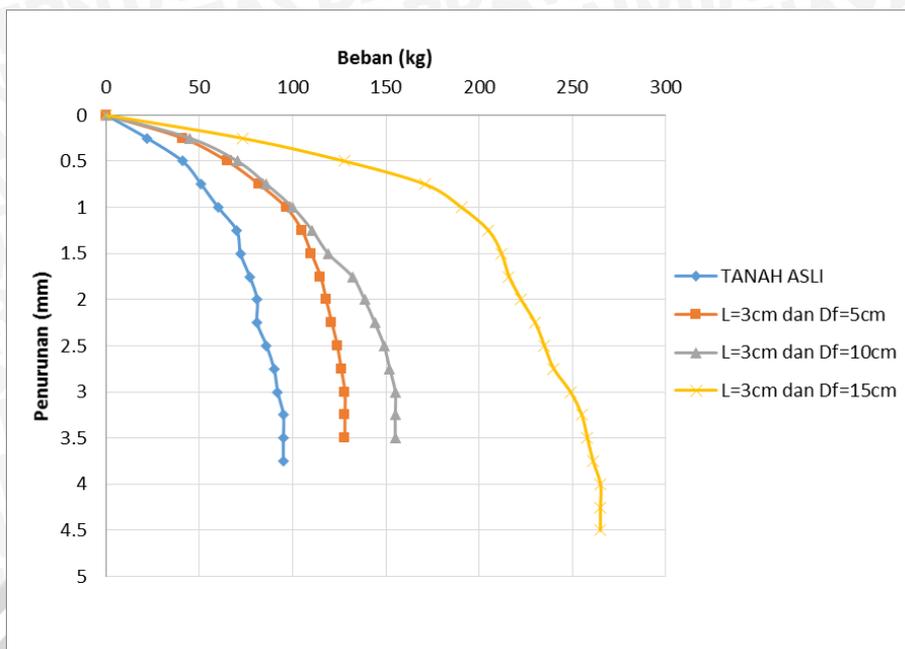


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM Df= 15cm, L= 3cm; Df= 5cm, L= 3,75cm; Df= 5cm, L= 4,5cm

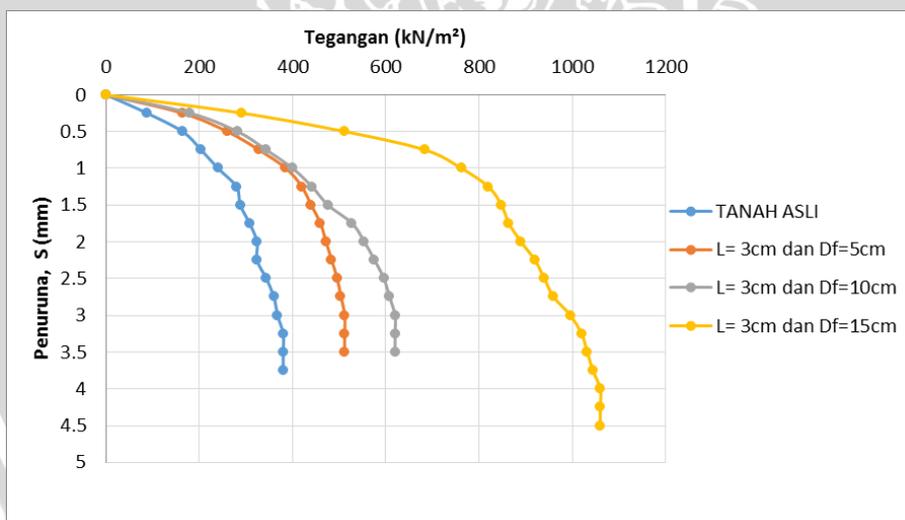
14. **Tabel** Tegangan dan Penurunan DSM L= 3cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm

| L= 3cm | | | | | | | | |
|----------------|---------------|---------|----------|----------|----------------------------------|---------|----------|----------|
| Penurunan (mm) | Beban, P (Kg) | | | | Tegangan, q (kN/m ²) | | | |
| | Tanah Asli | Df= 5cm | Df= 10cm | Df= 15cm | Tanah Asli | Df= 5cm | Df= 10cm | Df= 15cm |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.25 | 22 | 41 | 45 | 73 | 88 | 164 | 180 | 292 |
| 0.5 | 41 | 65 | 70.5 | 128 | 164 | 260 | 282 | 512 |
| 0.75 | 51 | 82 | 86 | 171 | 204 | 328 | 344 | 684 |
| 1 | 60 | 96.5 | 100 | 190.5 | 240 | 386 | 400 | 762 |
| 1.25 | 70 | 105 | 110.5 | 205 | 280 | 420 | 442 | 820 |
| 1.5 | 72 | 110 | 119 | 212 | 288 | 440 | 476 | 848 |
| 1.75 | 77 | 115 | 132 | 216 | 308 | 460 | 528 | 864 |
| 2 | 81 | 118 | 138.5 | 222.5 | 324 | 472 | 554 | 890 |
| 2.25 | 81 | 121 | 144 | 230 | 324 | 484 | 576 | 920 |
| 2.5 | 86 | 124 | 149 | 235 | 344 | 496 | 596 | 940 |
| 2.75 | 90 | 126 | 152 | 240 | 360 | 504 | 608 | 960 |
| 3 | 92 | 128 | 155 | 249 | 368 | 512 | 620 | 996 |
| 3.25 | 95 | 128 | 155 | 255 | 380 | 512 | 620 | 1020 |
| 3.5 | 95 | 128 | 155 | 258 | 380 | 512 | 620 | 1032 |
| 3.75 | 95 | | | 261 | 380 | | | 1044 |
| 4 | | | | 265 | | | | 1060 |
| 4.25 | | | | 265 | | | | 1060 |
| 4.5 | | | | 265 | | | | 1060 |





Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM L= 3cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm

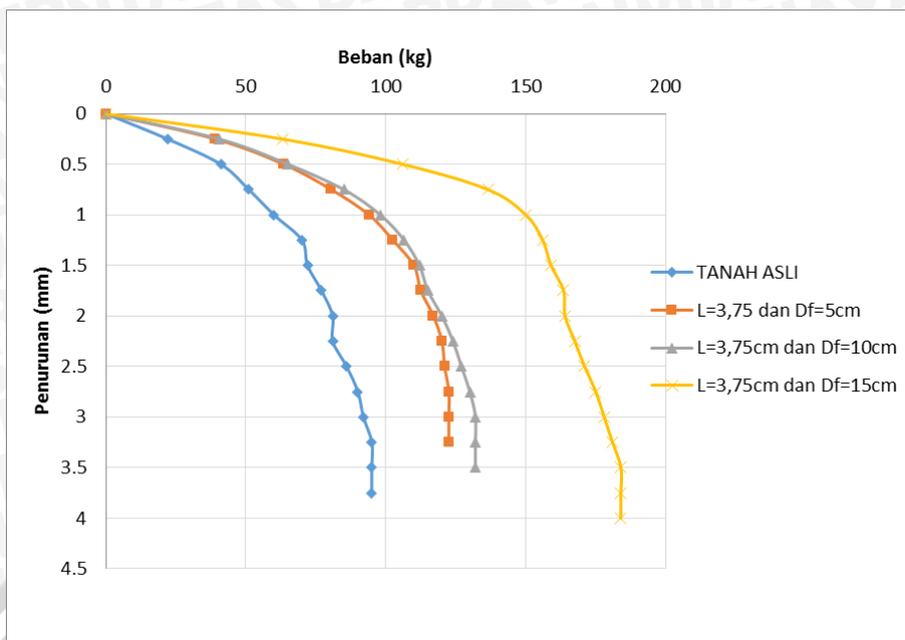


Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM L= 3cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm

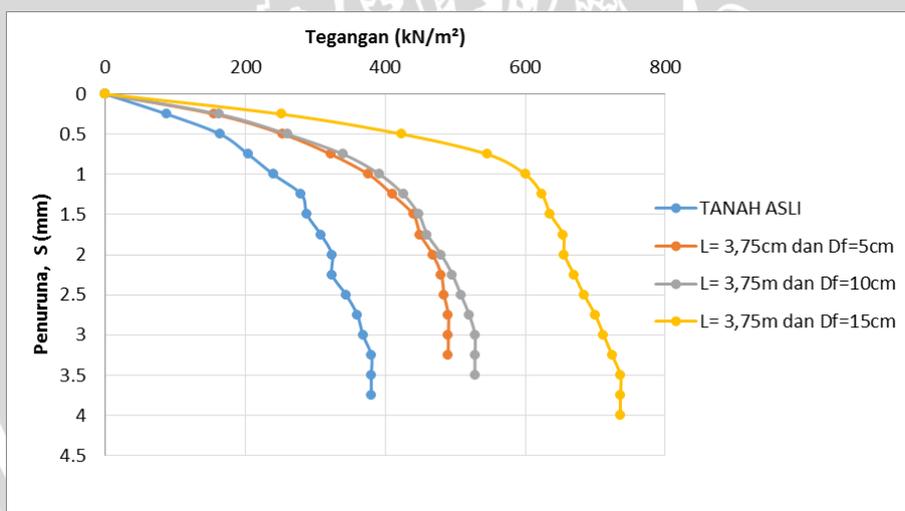
15. **Tabel** Tegangan dan Penurunan DSM L= 3,75cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm

| L= 3,75cm | | | | | | | | |
|----------------|---------------|---------|----------|----------|----------------------------------|---------|----------|----------|
| Penurunan (mm) | Beban, P (Kg) | | | | Tegangan, q (kN/m ²) | | | |
| | Tanah Asli | Df= 5cm | Df= 10cm | Df= 15cm | Tanah Asli | Df= 5cm | Df= 10cm | Df= 15cm |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.25 | 22 | 39 | 40.5 | 63 | 88 | 156 | 162 | 252 |
| 0.5 | 41 | 63.5 | 65 | 106 | 164 | 254 | 260 | 424 |
| 0.75 | 51 | 80.5 | 85 | 136.5 | 204 | 322 | 340 | 546 |
| 1 | 60 | 94 | 98 | 150 | 240 | 376 | 392 | 600 |
| 1.25 | 70 | 102.5 | 106.5 | 156 | 280 | 410 | 426 | 624 |
| 1.5 | 72 | 110 | 112 | 159 | 288 | 440 | 448 | 636 |
| 1.75 | 77 | 112.5 | 115 | 163.5 | 308 | 450 | 460 | 654 |
| 2 | 81 | 117 | 120 | 164 | 324 | 468 | 480 | 656 |
| 2.25 | 81 | 120 | 124 | 167.5 | 324 | 480 | 496 | 670 |
| 2.5 | 86 | 121 | 127 | 171 | 344 | 484 | 508 | 684 |
| 2.75 | 90 | 122.5 | 130 | 175 | 360 | 490 | 520 | 700 |
| 3 | 92 | 122.5 | 132 | 178 | 368 | 490 | 528 | 712 |
| 3.25 | 95 | 122.5 | 132 | 181 | 380 | 490 | 528 | 724 |
| 3.5 | 95 | | 132 | 184 | 380 | | 528 | 736 |
| 3.75 | 95 | | | 184 | 380 | | | 736 |
| 4 | | | | 184 | | | | 736 |





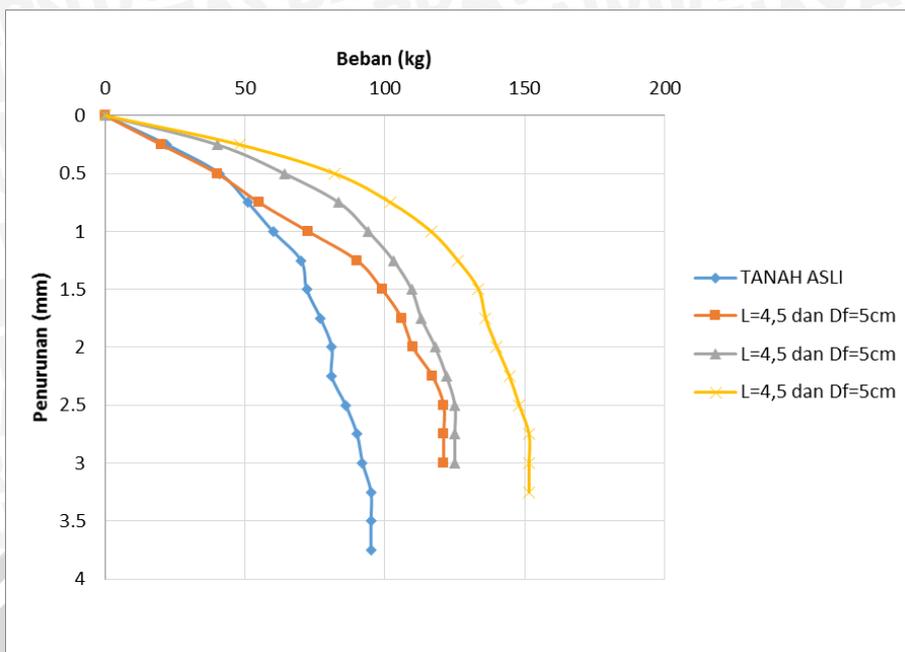
Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM L= 3,75cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm



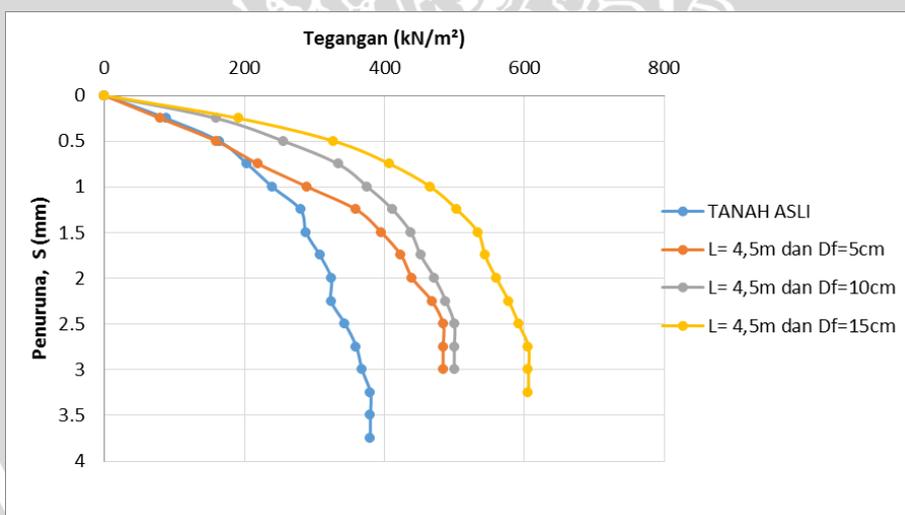
Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM L= 3,75cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm

16. **Tabel** Tegangan dan Penurunan DSM L= 4,5cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm

| L= 4,5cm | | | | | | | | |
|-------------------|---------------|---------|----------|----------|----------------------------------|---------|----------|----------|
| Penurunan (mm) | Beban, P (Kg) | | | | Tegangan, q (kN/m ²) | | | |
| | Tanah Asli | Df= 5cm | Df= 10cm | Df= 15cm | Tanah Asli | Df= 5cm | Df= 10cm | Df= 15cm |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0.25 | 22 | 20 | 40 | 48 | 88 | 80 | 160 | 192 |
| 0.5 | 41 | 40 | 64 | 82 | 164 | 160 | 256 | 328 |
| 0.75 | 51 | 55 | 83.5 | 102 | 204 | 220 | 334 | 408 |
| 1 | 60 | 72.5 | 94 | 116.5 | 240 | 290 | 376 | 466 |
| 1.25 | 70 | 90 | 103 | 126 | 280 | 360 | 412 | 504 |
| 1.5 | 72 | 99 | 109.5 | 133.5 | 288 | 396 | 438 | 534 |
| 1.75 | 77 | 106 | 113 | 136 | 308 | 424 | 452 | 544 |
| 2 | 81 | 110 | 118 | 140 | 324 | 440 | 472 | 560 |
| 2.25 | 81 | 117 | 122 | 144.5 | 324 | 468 | 488 | 578 |
| 2.5 | 86 | 121 | 125 | 148 | 344 | 484 | 500 | 592 |
| 2.75 | 90 | 121 | 125 | 151.5 | 360 | 484 | 500 | 606 |
| 3 | 92 | 121 | 125 | 151.5 | 368 | 484 | 500 | 606 |
| 3.25 | 95 | | | 151.5 | 380 | | | 606 |
| 3.5 | 95 | | | | 380 | | | |
| 3.75 | 95 | | | | 380 | | | |



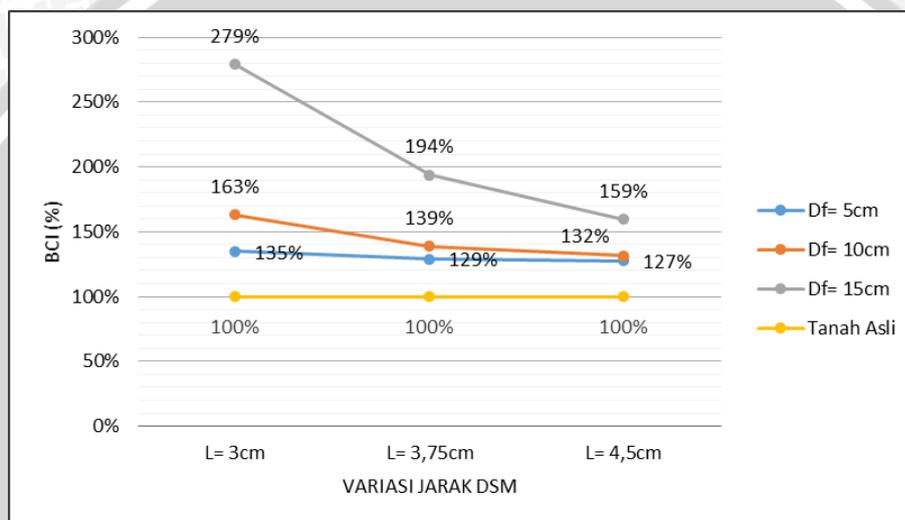
Gambar Hubungan Beban (P) dan Penurunan (S) DSM L= 4,5cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm



Gambar Hubungan Tegangan (q) dan Penurunan (S) DSM L= 4,5cm, Df= 5cm; L= 3cm, Df= 10cm; L= 3cm, Df= 15cm

17. **Tabel** analisis BCI Variasi Jarak (L)

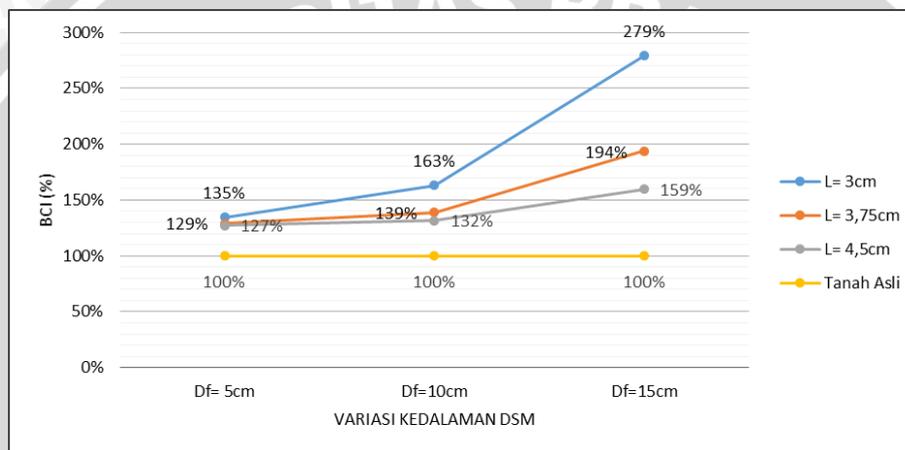
| No | Panjang DSM (Df) | Jarak DSM (L) | qu tanah asli (kN/m ²) | qu dengan DSM (kN/m ²) | BCI (%) | Peningkatan Daya Dukung (%) | Peningkatan BCI (%) | |
|----|------------------|---------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------------|---------------------|-----|
| 1 | 1B= 5cm | 1D= 3cm | 380 | 512 | 135% | 35% | 4% | 1% |
| 2 | | 1,25D= 3,75cm | | 490 | 129% | 29% | | |
| 3 | | 1,5D= 4,5cm | | 484 | 127% | 27% | | |
| 4 | 2B= 10cm | 1D= 3cm | | 620 | 163% | 63% | 17% | 6% |
| 5 | | 1,25D= 3,75cm | | 528 | 139% | 39% | | |
| 6 | | 1,5D= 4,5cm | | 500 | 132% | 32% | | |
| 7 | 3B= 15cm | 1D= 3cm | | 1060 | 279% | 179% | 44% | 21% |
| 8 | | 1,25D= 3,75cm | | 736 | 194% | 94% | | |
| 9 | | 1,5D= 4,5cm | | 606 | 159% | 59% | | |



Gambar hubungan Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Jarak DSM (L)

18. Tabel analisis BCI Variasi Panjang (Df)

| No | Jarak DSM (L) | Panjang DSM (Df) | qu tanah asli (kN/m ²) | qu dengan DSM (kN/m ²) | BCI (%) | Peningkatan Daya Dukung (%) | Peningkatan BCI (%) | |
|----|---------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------------|---------------------|-----|
| 1 | 1D= 3cm | 1B= 5cm | 380 | 512 | 135% | 35% | 21% | 71% |
| 2 | | 2B= 10cm | | 620 | 163% | 63% | | |
| 3 | | 3B= 15cm | | 1060 | 279% | 179% | | |
| 4 | 1,25D= 3,75cm | 1B= 5cm | | 490 | 129% | 29% | 8% | 39% |
| 5 | | 2B= 10cm | | 528 | 139% | 39% | | |
| 6 | | 3B= 15cm | | 736 | 194% | 94% | | |
| 7 | 1,5D= 4,5cm | 1B= 5cm | | 484 | 127% | 27% | 3% | 21% |
| 8 | | 2B= 10cm | | 500 | 132% | 32% | | |
| 9 | | 3B= 15cm | | 606 | 159% | 59% | | |



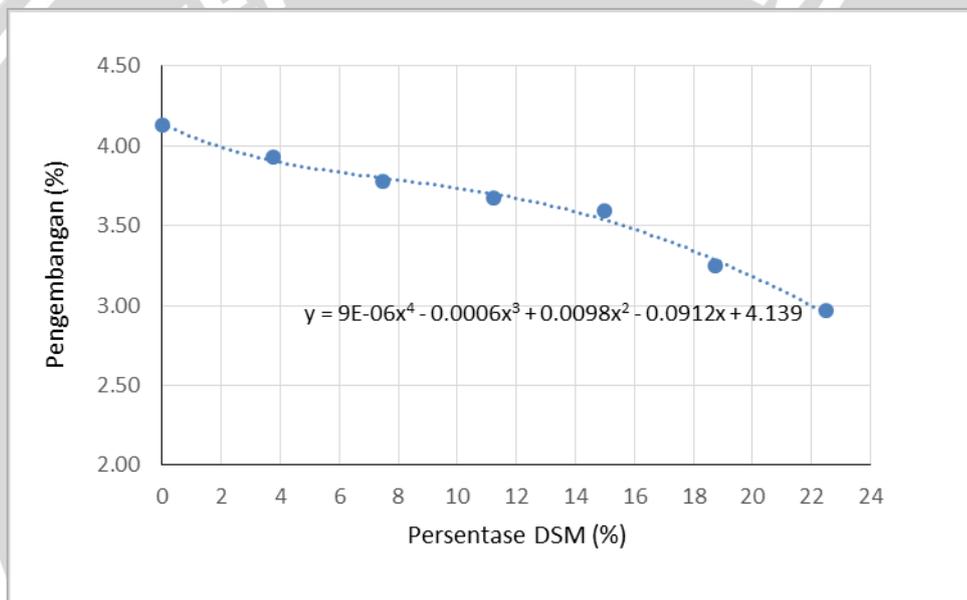
Gambar hubungan Perbandingan Peningkatan BCI pada Variasi Panjang DSM (Df)



19. Hasil uji pengembangan (*swelling*) untuk sampel tanpa DSM dan sampel dengan *deep soil mix*

| Sampel | Volume sampel (cm ³) | Volumme DSM (cm ³) | Rasio volume DSM (%) | Pengembangan (%) | Penurunan nilai pengembangan (%) |
|------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------|----------------------------------|
| tanah asli | 2131,138 | 0 | 0 | 4,133 | - |
| dsm 1 | | 79,835 | 3,746 | 3,929 | -5 |
| dsm 2 | | 159,669 | 7,492 | 3,779 | -9 |
| dsm 3 | | 239,504 | 11,238 | 3,673 | -11 |
| dsm 4 | | 319,338 | 14,984 | 3,593 | -13 |
| dsm 5 | | 399,173 | 18,730 | 3,248 | -21 |
| dsm 6 | | 479,007 | 22,477 | 2,965 | -28 |

Sumber: Rahmawati (2015)



Gambar Perbandingan hasil *swelling* terhadap rasio volume *deep soil mix* dan volume total

Sumber: Rahmawati (2015)

Tabel rasio volume DSM dalam *box*

| Kedalaman (Df) | | 1B= 5cm | | | 2B= 10cm | | | 3B= 15cm | | |
|-----------------------------|-----------------------|---------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|----------|--------------|-------------|
| Jarak DSM (L) | | 1D= 3cm | 1,25D=3,75cm | 1,5D= 4,5cm | 1D= 3cm | 1,25D=3,75cm | 1,5D= 4,5cm | 1D= 3cm | 1,25D=3,75cm | 1,5D= 4,5cm |
| Luas DSM | cm² | 105.975 | 105.975 | 101.383 | 105.975 | 105.975 | 101.383 | 105.975 | 105.975 | 101.383 |
| Tinggi DSM | cm | 5 | 5 | 5 | 10 | 10 | 10 | 15 | 15 | 15 |
| Volume DSM | cm³ | 529.88 | 529.88 | 506.92 | 1059.75 | 1059.75 | 1013.83 | 1589.63 | 1589.63 | 1520.75 |
| Volume Box | cm³ | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 | 8000 |
| Persen DSM dalam Box | % | 6.62 | 6.62 | 6.34 | 13.25 | 13.25 | 12.67 | 19.87 | 19.87 | 19.01 |

Tabel perkiraan pengembangan (*swelling*) berdasarka rasio DSM dalam *box*

| Jarak | Kedalaman | Rasio Volume DSM | Pengembangan |
|-------|-----------|------------------|--------------|
| cm | cm | % | % |
| 3 | 5 | 6.623 | 3.80785 |
| | 10 | 13.247 | 3.53299 |
| | 15 | 19.870 | 2.89194 |
| 3,75 | 5 | 6.623 | 3.80785 |
| | 10 | 13.247 | 3.53299 |
| | 15 | 19.870 | 2.89194 |
| 4,5 | 5 | 6.336 | 3.81645 |
| | 10 | 12.673 | 3.56810 |
| | 15 | 19.009 | 3.00036 |



20. Gambar Pelaksanaan Penelitian





UNIVERSITAS BRAWIJAYA

