

## BAB 9

### KESIMPULAN

Pada disertasi ini, karakteristik kuat geser tanah lempung ekspansif Cikarang telah diteliti. Baik dengan uji laboratorium maupun uji in-situ. Tujuan utama dari semua studi karakterisasi adalah menetapkan parameter tanah yang meyakinkan untuk dapat digunakan para engineer dalam desain. Uji laboratorium telah membuktikan bahwa untuk tanah ekspansif, proses penjenuhan/saturasi pada uji triaxial pada prakteknya “mendegradasi” kualitas sample dan secara signifikan menurunkan kuat geser tanah. Dari uji in-situ, 24 uji pressuremeter telah dilaksanakan pada titik pengambilan sample uji triaxial. Diagram tegangan – regangan hasil uji kemudian dianalisis dengan menggunakan *cavity expansion theory* (CET). Hasilnya membuktikan bahwa kombinasi uji pressuremeter dan analisis CET dapat digunakan untuk mendapatkan parameter kuat geser tanah secara lebih cepat dan terpercaya untuk merepresentasikan kuat geser in-situ karena ukur secara in-situ dan diinterpretasi dengan pendekatan teoritis. Rekonstruksi diagram tegangan – regangan PMT dengan CET selanjutnya membuktikan bahwa hasil uji triaxial ‘dengan penjenuhan’ tidak dapat merepresentasikan kuat geser in-situ.

Bab ini merangkum beberapa kesimpulan yang dapat ditarik dari penelitian ini. Beberapa saran juga disampaikan guna penelitian lebih lanjut dimasa datang.

## 9. 1 Kesimpulan

### 9. 1.1 Karakteristik Tanah Lempung Ekspansif Cikarang

#### A. Stratigrafi

1. Studi literatur dan pengeboran menunjukkan bahwa tanah lempung yang distudi merupakan tanah residual tropis hasil pelapukan batuan sedimen yang terbentuk dari endapan laut dangkal pada Sunda/Asri basin. Secara geologis, endapan-endapan tersebut mengalami pelipatan dan pengangkatan akibat aktifitas tektonik subduksi lempeng benua sehingga saat ini berada pada elevasi  $\pm 40$  m dpl.
2. Hasil pengeboran menunjukkan bahwa lapisan tanah didominasi perselingan lapisan lempung dengan konsistensi teguh hingga sangat teguh dengan lapisan pasir tipis. Semakin dalam warna tanah umumnya semakin gelap hingga kehitaman dan semakin padat, yang erat terkait dengan derajat pelapukan kemas terhadap efek *aging*, sementasi atau *hardening* yang mengikat butir tanah.
3. Karena secara genetis berbeda dari tanah sedimen, perilaku tanah yang diteliti menunjukkan perilaku yang berbeda dibandingkan dengan tanah sedimen. Jika pada tanah sedimen perilaku mekanis tanah di kontrol oleh sejarah tegangan prakonsolidasi masa lalu, perilaku tanah residual lempung Cikarang sangat ditentukan oleh kekuatan ikatan antar butir tanah dimana air dan *stress release* memegang peranan penting.
4. Kedalaman zona pengaruh rembesan air dan *stress release* tersebut secara umum dapat diprediksi dengan kedalaman zona aktif. Sehingga karakteristik kuat geser tanah lempung dapat dibedakan menjadi dua zona pelapukan. Yakni: (i) zona aktif dimana ikatan antar butir yang terbangun dari efek *aging* telah terdegradasi akibat pelapukan dan (ii) zona tidak aktif dimana ikatan antar butir yang terbangun dari efek *aging* belum terpengaruh pelapukan akibat infiltrasi

## B. Profile Properties

5. Analisis butiran menunjukkan adanya kecenderungan bahwa semakin dalam, jumlah fraksi lempung ( $<2\mu\text{m}$ ) semakin sedikit. Dengan kata lain, semakin dekat ke permukaan tanah, jumlah fraksi lempung semakin banyak. Hal ini sejalan dengan perilaku mikroskopik mineral penyusun sedimen. Semakin dekat ke permukaan, “pelapukan” tanah sedimen semakin intens akibat kembang susut, rembesan air dan *stress release* di zona aktif. Dengan demikian *layer* mineral lempung semakin “terbebaskan” dan ikatan antar layer mineral yang terbentuk dari sementasi maupun faktor *aging* lainnya semakin lemah sehingga fraksi lempung semakin banyak.
6. Analisis *swelling potensial* (Seed et. al, 1962) dan William (1957) mengklasifikasi tanah yang studi memiliki potensial pengembangan tinggi hingga sangat tinggi. Demikian pula analisis dengan diagram klasifikasi Yudbhir dan Sahu (1988) mengklasifikasikan tanah studi sebagai *Normal Active Soil* sampai *Active Soil*.

## C. Mineralogi

7. Fotomikrograf SEM dan uji XRD membuktikan bahwa terdapat kandungan mineral lempung yang menyebabkan tanah bersifat “aktif” seiring peningkatan kadar air. Uji SEM menunjukkan dibagian bawah permukaan sample menunjukkan tekstur lembaran mineral menggumpal (*floccutale*), seperti lembaran kertas yang tertumpuk rapat, membentuk struktur mineral padat dengan ikatan adhesi yang relatif kuat. Namun di bagian permukaan, tekstur lembaran mineral tersebut tampak menyebar (*dispersion*) dengan ikatan antar lembaran yang lemah. Sedangkan uji XRD mengidentifikasi keberadaan beberapa mineral lempung sensitif seperti *montmorillonite*, *illite-smectite* yang dikenal sebagai penyebab perilaku kembang susut tanah.

### C. Kedalaman Zona Aktif

8. Analisis  $w_n/IP$  dan  $(LL-w_n)/IP$  terhadap kedalaman (Nelson & Miller, 1992) menunjukkan kedalaman zona aktif lokasi yang distudi diperkirakan mencapai 12 m. Kedalaman ini merupakan kedalaman indikatif maksimal untuk luasan kawasan studi didasarkan kompilasi data kawasan studi dengan variasi jenis lapisan dan tingkat pelapukan yang berbeda. Untuk keperluan khusus, pengujian dan analisis lokal penentuan kedalaman zona aktif harus dilakukan untuk mengakomodasi jenis tanah, stratigrafi dan derajat pelapukan yang sangat bervariasi antar lokasi.
9. Lebih jauh, metoda perkiraan zona aktif diatas didasarkan pada konsistensi hasil uji indeks properties laboratorium yang tergantung pada banyak faktor dari *sampling* hingga keahlian teknisi penguji. Untuk itu, metoda perkiraan kedalaman zona aktif baru diusulkan, yakni dengan menggunakan uji Dilatometer. Usulan ini didasarkan atas hipotesis karakteristik tegangan leleh ( $p_l$ ) atau parameter indeks tekanan horisontal,  $E_D$ .

### D. Potensial dan Tekanan Pengembangan

10. Hasil uji pengembangan 1-D menunjukkan bahwa hampir semua sampel uji menunjukkan perilaku pengembangan ketika sampel direndam dengan nilai potensial pengembangan,  $Sp$  yang bervariasi dari 0.21 ~ 8.65% dengan nilai tekanan pengembangan,  $Ps$  bervariasi antara 0.34 ~ 5.00 ton/m<sup>2</sup>. Analisis lebih lanjut mendapatkan adanya korelasi linier antara kedua parameter yakni:

$$Ps = 1.0808.Sp. \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$

11. *Liquidity index*,  $LI$  merupakan parameter yang paling baik untuk memprediksi derajat pengembangan tanah. Semakin padat/kompak massa tanah ( $LI$  semakin kecil), maka derajat pengembangan yang terjadi akan semakin besar. Untuk tanah yang diteliti, pengembangan tanah menjadi sangat signifikan untuk tanah pada  $LI < 0.15$ .

### 9.1.2 Karakteristik Kuat Geser dan Kompresibilitas Tanah Ekspansif

#### A. Karakteristik Kuat Geser uji Triaxial

1. Dari tiga metoda uji triaxial yang dilakukan, nilai maksimum dan minimum parameter kuat geser yang didapat adalah sebagai berikut (lihat Tabel 6.3 dan gambar 6.18):

**Tabel 9.1.** Nilai maksimum dan minimum parameter kuat geser dari uji Triaxial

| Triaxial | TX - CU (multi-stages)    |                       | TX - CD                  |                      | TX - CD <i>Unsoaked</i>  |                      |
|----------|---------------------------|-----------------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|----------------------|
|          | $\phi'$<br>( $^{\circ}$ ) | $c'$<br>(kg/cm $^2$ ) | $\phi$<br>( $^{\circ}$ ) | $c$<br>(kg/cm $^2$ ) | $\phi$<br>( $^{\circ}$ ) | $c$<br>(kg/cm $^2$ ) |
| Min      | 20.20                     | 0.08                  | 7.90                     | 0.16                 | 26.79                    | 0.00                 |
| Max      | 36.00                     | 0.71                  | 25.52                    | 0.94                 | 57.74                    | 0.45                 |

2. Untuk tanah lempung ekspansif Cikarang, proses penjenuhan pada uji triaxial sangat signifikan mereduksi sudut geser dalam. Membandingkan  $\phi_{TX\ CD}$  dan  $\phi_{TX\ CD}$  "tanpa penjenuhan" proses penjenuhan pada uji triaxial TX CD mereduksi hampir separuh sudut geser dalam,  $\phi$  'tanpa penjenuhan', yakni antara 43 ~ 55%. Proses penjenuhan mengakibatkan tanah ekspansif mengalami perubahan kadar air dan dikombinasi perbedaan tekanan *cell pressure* dan *back pressure* yang diaplikasikan sangat mungkin mengakibatkan rusaknya struktur ikatan (*bonding*) mineral tanah, sehingga karakteristik kuat geser sample tanah berubah secara signifikan.
3. Untuk tanah ekspansif yang diteliti, uji triaxial (dengan proses penjenuhan) sulit merepresentasikan kuat geser tanah insitu. Uji triaxial, mungkin mewakili kondisi tanah ekspansif 'paling lemah' pada zona aktif dimana struktur tanah yang dibangun dari *bonding* mineral tanah dan efek *aging* telah terurai dan saturasi penuh dapat tercapai akibat kembang susut tanah. Namun untuk tanah tidak terganggu di kedalaman di luar zona aktif, kondisi 'paling lemah' tersebut tidak akan tercapai karena ketiadaan *stress release* akibat beban *overburden* yang tidak memungkinkan tanah untuk mengembang

sehingga proses pelapukan tidak terjadi dan struktur ikatan mineral tanah tidak terganggu.

#### B. Karakteristik Kompresibilitas

4. Uji kompresibilitas menggunakan sampel direndam dan tidak direndam tidak menunjukkan perbedaan nilai koefisien kompresibilitas,  $C_c$  secara signifikan. Hal ini mungkin disebabkan penggunaan sample “tak terganggu” yang diambil dari kedalaman zona tidak aktif. Sample dalam kondisi padat dan teguh dengan mineral lempung dalam kondisi *flocculate*. Terkekang oleh cincin oedometer dan pembebanan awal, perendaman tidak mengakibatkan dispersi struktur mineral lempung yang pada gilirannya tidak menyebabkan perubahan volume pori secara berarti.
5. Sebaran data uji konsolidasi mengkonfirmasi hubungan  $C_c$  dan  $LL$  yang dilaporkan Paulus PP (2002) yang menunjukkan bahwa  $C_c$  tanah lempung ekspansif Cikarang lebih kecil untuk  $LL$  yang sama dari yang diusulkan Terzaghi & Peck (1967) untuk tanah sedimen.
6. Perilaku pemampatan tanah ekspansif yang diteliti menunjukkan kesamaan dengan tanah residual tropik yang dilaporkan Wesley 2011, dimana hubungan tegangan – regangan kompresibilitas ( $P - e$ ) dapat dimodelkan secara linier. Bahkan penelitian ini juga mendapatkan hubungan yang lebih baik dengan model polinomial derajat 2, untuk rentang tegangan yang diteliti.

### 9.1.3 Interpretasi parameter kuat geser PMT dengan CET

#### A. Karakteristik Kuat Geser Uji Pressuremeter

1. Hasil uji pressuremeter menunjukkan bahwa kedalaman zona aktif (< 12m) menghasilkan parameter  $p_o$  dan  $p_y$  yang rendah. Rendahnya kuat geser ini, diakibatkan rusaknya struktur tanah akibat hilangnya ikatan / *bonding* mineral tanah seperti sementasi atau efek *aging* lainnya akibat pelapukan oleh rembesan air, kembang susut tanah dan *stress release* pada zona aktif. Diluar zona aktif, kuat geser yang didapat lebih tinggi bahkan beberapa sample dapat

diklasifikasikan sebagai batuan lunak menurut diagram Pressiorama (r) (Baud, 2005)

B. Pendekatan *Cavity Expansion Theory* dalam intpretasi parameter kuat geser

2. Pendekatan matematis *Cavity Expansion Theory* dapat digunakan untuk menghitung dan merekonstruksi kurva tegangan – regangan uji PMT tanah dengan menghasilkan kombinasi parameter kuat geser,  $c$  dan  $\phi$ , *rigidity index* ( $a$ ) dan modulus deformasi ( $E$ ) yang lebih merepresentasikan kondisi aktual dan lebih terpercaya karena ukur secara in-situ dan dihitung dengan pendekatan teoritis. Disamping itu, dengan metoda ini, parameter  $c$  dan  $\phi$  dapat ditentukan secara bersamaan.
3. Analisis hasil uji PMT dengan CET pada zona aktif sulit dilakukan karena titik sampel antara  $p_o$  dan  $p_y$  (rentang pseudo elastik) yang didapat terbatas, yakni antara 3 ~ 5 titik. Mempertimbangkan bahwa kuat geser pada zona aktif tersebut akan selalu berubah seiring dengan perubahan kadar air tanah akibat perubahan musim dan/atau sebab lainnya, maka parameter yang akan di dapat juga akan berubah seiring waktu. Sehingga untuk keperluan desain, parameter kuat geser sebaiknya menggunakan uji triaxial dengan penjenuhan yang mewakili kuat geser paling in-situ pada kondisi jenuh air.
4. Hasil perhitungan CET (Tabel 8.2) menunjukkan bahwa parameter kuat geser dari uji TX CU maupun TX CD (dengan penjenuhan) tidak dapat digunakan untuk merekonstruksi kurva tegangan – regangan PMT tanah ekspansif. Dilain pihak, penggunaan parameter dari uji TX-CD ‘tanpa penjenuhan’ menghasilkan kurva rekonstruksi yang sangat mendekati kurva hasil pengukuran in-situ. Hal ini menunjukkan uji TX-CD ‘tanpa penjenuhan’ lebih merepresentasikan parameter kuat geser in-situ. Khususnya untuk sample tanah dari zona tidak aktif.

### 9.1.4 Uji Insitu

1. Dari analisis data CPT dan DMT dan prediksi kedalaman zona aktif, dapat dicatat bahwa dengan *rigs* kapasitas 2,5 ~ 5,0 ton yang umumnya digunakan pada uji lapangan, kedua uji tidak dapat menembus lapisan dibawah zona aktif, sehingga pengujian hanya mampu mengukur kuat geser tanah di zona aktif. Sehingga secara praktis, aplikasi uji CPT dan DMT hanya dapat digunakan untuk penyelidikan tanah hingga kedalaman zona aktif. Untuk struktur yang lebih “berat” dengan pondasi dibawah zona aktif, perlu dipertimbangkan metoda penyelidikan tanah yang lebih sesuai yakni dengan pengeboran.
2. Korelasi-korelasi empiris yang didapat penelitian ini dibangun dari pengujian dan analisis serta ditujukan untuk tanah yang diteliti. Hasil analisis memverifikasi kesesuaian terhadap beberapa persamaan empiris dari literatur dapat digunakan untuk tanah ekspansif yang diteliti. Namun beberapa persamaan empirisnya menunjukkan trend yang sama sekali berbeda. Hal ini dikarenakan korelasi yang umumnya terdapat pada literatur dibangun dari penelitian pada tanah sedimen.

### 9.1.5 Korelasi Empiris antar Parameter Uji In-situ

1. Penelitian mendapatkan bahwa korelasi umum antara  $q_c$  dan  $N_{SPT}$  untuk tanah lempung yang umum digunakan  $n = (q_c/N_{SPT})$  antara 0.1 ~ 0.25 ( $q_c$  dalam MPa) juga berlaku untuk tanah yang diteliti. Secara khusus penelitian mendapatkan rentang data  $n = (q_c/N)$  antara 0.15 ~ 0.33 dengan trendline (Gambar 7.14) :

$$q_c = 0.22 \cdot N_{SPT} \text{ (MPa)}$$

2. Penelitian juga mendapatkan hubungan yang baik antara peningkatan rasio  $q_c/N_{SPT}$  terhadap  $q_c$  (Gambar 7.15). Dengan persamaan ini  $N_{SPT}$  ekuivalen lapisan dapat diperkirakan dari data  $q_c$ .

$$q_c/N = 0.04 \cdot q_c + 1.10 \text{ (Kg/cm}^2\text{)}$$



3. Meski dengan data yang terbatas ( $N=13$ ), penelitian mendapatkan korelasi yang cukup baik juga didapat antara parameter Modulus Dilatometer,  $E_D$  terhadap  $N_{SPT}$  dengan persamaan empiris (Gambar 7.16);

$$E_D = 17.31.N_{SPT} \text{ (Kg/cm}^2\text{)}.$$

4. Untuk tanah ekspansif yang diteliti, menggunakan kapasitas *rig* 2.5 ton yang umumnya digunakan di lapangan, uji in-situ yang dapat menembus kedalaman dibawah zona aktif adalah uji SPT dan PMT. SPT merupakan uji yang rutin dilaksanakan, sedang uji PMT merupakan uji terbaik untuk mendapatkan parameter kuat geser meski belum populer di Indonesia. Penelitian ini menghasilkan beberapa persamaan korelasi empirik antara kedua parameter uji untuk keperluan interpretasi praktis. Baik khusus untuk tanah lempung maupun pasir lempungan. Persamaan empirik juga dibangun dengan mengkombinasikan data pasir dan lempung, untuk dapat digunakan bila ada keraguan dalam menentukan jenis lapisan tanah.

- $N_{60}$  terhadap Modulus Menard,  $E_M$  : Tabel 7.7 dan Gambar 7.18

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| Lempung        | $E_M = 8.00.(N_{60})^{1.1738}$ |
| Pasir          | $E_M = 0.16.(N_{60})^{2.2469}$ |
| Kombinasi data | $E_M = 5.77.(N_{60})^{1.2779}$ |

- $N_{60}$  terhadap Tegangan Batas,  $p_L$  : Tabel 7.8 dan Gambar 7.19

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| Lempung        | $p_L = 0.30.(N_{60})^{1.3254}$ |
| Pasir          | $p_L = 0.55.(N_{60})^{1.209}$  |
| Kombinasi data | $p_L = 0.25.(N_{60})^{1.3992}$ |

- $N_{60}$  terhadap Kuat geser tak teralir,  $c_u$  : Tabel 7.9 dan Gambar 7.20

|                |                                |
|----------------|--------------------------------|
| Lempung        | $c_u = 0.07.(N_{60})^{1.218}$  |
| Pasir          | $c_u = 0.10.(N_{60})^{1.1775}$ |
| Kombinasi data | $c_u = 0.05.(N_{60})^{1.3107}$ |

- $N_{60}$  terhadap rentang pseudo elastik ( $p_Y - p_o$ ): Tabel 7.10 dan Gambar 7.21

|                |  |
|----------------|--|
| Lempung        | $(p_Y - p_o) = 0.0526.(N_{60})^{1.4829}$ |
| Pasir          | $(p_Y - p_o) = 0.0221.(N_{60})^{1.6851}$ |
| Kombinasi data | $(p_Y - p_o) = 0.0577.(N_{60})^{1.4439}$ |

- $E_M$  terhadap  $p_0$ : Tabel 7.11 dan Gambar 7.24

|                |                               |
|----------------|-------------------------------|
| Lempung        | $E_M = 200.26.(p_0)^{0.7066}$ |
| Pasir          | $E_M = 206.22.(p_0)^{0.7497}$ |
| Kombinasi data | $E_M = 205.28.(p_0)^{0.7276}$ |

Meski tidak terlalu spesifik, penelitian juga mendapatkan bahwa kecenderungan antar parameter, sebagai berikut:

- $N_{60}$  terhadap rasio  $p_L/p_0$  : Gambar 7.20 menunjukkan bahwa semakin tinggi  $N_{60}$  tanah akan semakin rendah nilai rasio  $p_L/p_0$ .
  - $N_{60}$  terhadap rasio  $p_V/p_0$  : Demikian pula Gambar 7.21 menunjukkan kecenderungan bahwa semakin tinggi  $N_{60}$  maka rasio tegangan leleh terhadap tekanan awal  $p_V/p_0$  akan semakin rendah.
5. Analisis data CPT dan DMT menunjukkan bahwa, untuk lokasi DS8 korelasi sebaran data  $q_c$  dan  $E_D$  berada sedikit diatas grafik korelasi Marchetti (1980) (Gambar 7.24) yang berarti kekakuan tanah DS8 yang ditunjukkan modulus DMT,  $E_D$  sedikit lebih tinggi untuk nilai  $q_c$  yang sama. Secara umum nilai rentang  $E_D$  berkisar diantara  $E_D = 2.5 \sim 9.2 q_c$  (Kg/cm<sup>2</sup>) dengan *trendline*:
- $$E_D = 5.07 \cdot q_c \text{ (Kg/cm}^2\text{)}.$$
6. Analisis dengan data terbatas juga mendapatkan bahwa persamaan empiris antara CPT dan PMT yang diajukan oleh Briaud (1985) dan Baguelin et. al, (1978) baik untuk tanah lempung maupun pasir memberikan hasil yang terlalu rendah untuk digunakan pada tanah yang diteliti. (Gambar 7.25, Gambar 7.26 dan Table 7.15).

## 9. 2 Saran

1. Pada penelitian ini uji pressuremeter tegak lurus permukaan sehingga kekakuan dan kuat geser yang didapat adalah horisontal, sejajar dengan permukaan tanah. Dalam prakteknya, beban pondasi bekerja secara vertikal. Meskipun beberapa literatur seperti Clarke, 1995; Lee dan Rowe, 1989

menunjukkan bahwa efek anisotropi yang kecil terhadap *settlement*, penelitian efek anisotropi tersebut perlu dilakukan untuk jenis tanah ekspansif di Indonesia karena perbedaan struktur, jenis dan proses pembentukan.

2. Penelitian ini tidak melakukan uji CPTu pada program uji in-situ. Sedangkan uji CPT hanya mampu menembus zona aktif yang erat kaitannya dengan perubahan kadar air dan *matric suction* karena secara teoritis tanah pada zona ini bukan zona jenuh air. Tapi dalam kondisi jenuh, kuat geser pada zona ini akan sangat terpengaruh tekanan air pori. Sehingga pengukuran tekanan air pori sangat penting dalam mempelajari perilaku kuat geser tanah ekspansif.
3. Degradasi kuat geser pada zona aktif erat kaitannya dengan pelapukan batuan sedimen dimana ikatan struktur tanah yang terbangun akibat efek *aging* telah terlepas. Penelitian ini menduga bahwa untuk tanah lapukan *clayshale*, nilai uji CPT dapat digunakan untuk memprediksi derajat pelapukan pada lapisan zona aktif. Diperlukan penelitian lebih untuk memastikan dugaan ini.
4. Penelitian menduga bahwa uji DMT dapat menunjukkan zona aktif tanah lempung ekspansif secara lebih baik, lebih cepat dan lebih akurat dibandingkan dengan metoda konvensional menggunakan uji indeks properties yang saat ini umum digunakan. Dugaan ini didasarkan atas hipotesa peluruhan sementasi dan efek *aging* lain pada tanah zona aktif yang menyebabkan rendahnya tegangan leleh yang ditunjukkan dengan parameter  $p_1$  atau modulus dilatometer,  $E_D$ . Untuk memastikan hipotesa ini diperlukan penelitian yang lebih mendalam.
5. Material indeks,  $I_D$  tidak sesuai untuk mendeskripsikan tanah ekspansif (Gambar 7.6, 7.7, 7.9 dan 7.11) dimana material *clay* didefinisikan sebagai *silt* bahkan *sand*. Hal ini dikarekan perkiraan parameter didasarkan atas perilaku mekanis (Marchetti, 2001). Pada tanah ekspansif,  $p_o$  cenderung rendah karena struktur tanah yang telah di"rusak" oleh pisau DMT sedangkan  $p_1$  cenderung tinggi karena *bonding* mineral akibat *aging* dan sementasi. Perlu penelitian lebih lanjut untuk menyesuaikan nilai  $I_D$  khususnya untuk tanah ekspansif di Indonesia.
6. Untuk tanah ekspansif, alih-alih menunjukkan derajat konsolidasi tingginya nilai  $K_D$  lebih mengindikasikan adanya efek *aging*, struktur lempung atau

sementasi. Sehingga untuk tanah ekspansif, definisi parameter  $K_D$  perlu disesuaikan, termasuk parameter turunannya,  $K_0$  ( $DMT$ ). Lebih jauh, pada lempung ekspansif, parameter  $OCR_{(DMT)}$  tidak berkorelasi dengan sejarah tegangan sehingga lebih cocok disebut sebagai *Yield Stress Ratio (YSR)*, karena lebih merepresentasikan rasio tegangan leleh horisontal terhadap tekanan tanah efektif sebelum penetrasi pisau/*blade* DMT. Semua ini merupakan bidang penelitian menarik dimasa datang.

7. Dalam penelitian ini, ditemukan lapisan *clay shale* Cikarang, yakni pada BH 2A OC d=12 m atau BH 2B OC d=3.5m. Perilaku potensial dan tekanan pengembangan pada sample ini jauh lebih tinggi dari sample lainnya dengan trend yang tidak menunjukkan penurunan pengembangan setelah dipantau 1 minggu. Sebagaimana diketahui, *clay shale* merupakan “induk” dari tanah ekspansif. Pemahaman atas perilaku pelapukan dan kaitannya dengan pengembangan, kuat geser dan kompresibilitas akan berguna untuk menyelesaikan permasalahan yang diakibatkan tanah ekspansif sehingga perlu penelitian khusus secara lebih mendalam.
8. Parameter eksponen *rigidity index*,  $a$  pada perhitungan CET merupakan salah satu parameter penting yang dalam perhitungan didapatkan secara *trial and error*. Mecsi, 2013 menghubungkan parameter ini dengan derajat konsolidasi dan sudut geser dalam,  $\emptyset$ . Mecsi berpendapat bahwa pada kasus tanah terkonsolidasi normal, nilai  $a$  dapat dihitung antara 0.35 ~ 0.7, sedangkan pada kasus tanah terkonsolidasi berlebih atau mengalami *preload* nilai  $a = 0$ . Untuk tanah ekspansif yang kuat gesernya lebih berkorelasi dengan struktur tanah daripada sejarah tegangan, kriteria parameter  $a$  dan kaitannya dengan sudut geser dalam,  $\emptyset$  maupun parameter lainnya perlu diteliti dan didefinisikan lebih lanjut.

## DAFTAR PUSTAKA

### Jurnal dan Majalah

- Baud Jean-Pierre and Gambin Michel (2013) Soil and Rock Classification from High Pressure Borehole Expansion Tests, Geotech Geol Eng, Springerlink.com
- Bozbey, Iknur and Togrol, Ergun (2010) Correlation of standard penetration test and pressuremeter data: A Case Study from Istanbul, Turkey, Bulletin of Engineering Geology and Environment 69: 505-515
- Burland, J. B. 1990. On the compressibility and shear strength of natural clays. Geotechnique 40, No. 3, 329-378
- Carraro, J. Antonio H dan Salgado, Rodrigo. (2004), Mechanical Behaviour of Non-Textbook Soils (Literature Review), Joint Transportation Research Program, Purdue University, West Lafayette, IN
- Kabayasi. A (2011), Prediction of Pressuremeter Modulus and Limit Pressure of Clayey Soils by Simple and Non-linear Multiple Regression Techniques: A Case Study fro Mersin, Turkey. Environment Eart Science Springler-Verlag 2011.
- Lee KM, Rowe RK (1989) Deformation caused by surface loading and tunneling: the role of elastic anisotropy. Geotechnique 39(1):125-140
- Likitlersuang, Suched; Surarak, Chanaton; Wanatowski, Dariusz; Oh, Erwin; Balasubramaniam, Aruugam. (2013), Geotechnical Parameters From Pressuremeter Test for MRT Blue Line Extension in Bangkok, Geomechanics and Engineering Vol. 5, No. 2 (2013) 99-118
- Marchetti S., Monaco P., Totani G. & Calabrese M. (2001) The Flat Dilatometer Test (DMT) in Soil Investigations, Report of the ISSMGE Technical Committee 16 on Ground Property Characterisation from In-situ Testing, Proceedings from the Second International Flat Dilatometer Conference.
- Marchetti, Silvano (2011) Discussion of "CPT – DMT Correlations" by P.K Robertson, November 2009. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE. DOI:
- Mo, Pin-Qiang, Marshall, Alec M. and Yu Hai-Su. (2014), Elastic-Plastic Solutions for Expanding Cavities Embedded in Two Different Cohesive-Frictional Material. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics., www.wileyonline library.com

Robertson, P K, Campanella, R. G., Wightman A., (1983) SPT – CPT Correlations, Journal of Geotechnical Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)

Robertson, P K., CPT – DMT Correlations, Technical Notes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000119. (www.researchgate.com)

Ramdane B, Nassima A, Ourda B (2013) Intepretation of a pressuremeter test in cohesive soils. International Conference on Geotachnical Engineering, Hammamet – Tunisia.

Soleimanbeigi Ali, (2013) Undrained Shear Strenght of Normally Consolidated and Overconsolidated Clays From Pressuremeter Test; A Case Study. Geotechnic and Geology Engineering 31:1511-1524.

Tanaka, H. & Tanaka, M. (1998). "Characterization of Sandy Soils using CPT and DMT". Soils and Foundations, Japanese Geot. Soc., Vol. 38, No. 3, 55-65.

### **Pustaka (Text Book)**

Baguelin, F., Jezequel, J. F., and Shields, D. H. (1978), *The Pressuremeter and Foundation Engineering*, Trans Tech Publications.

Briaud, Jean-Louis. (2013), *Geotechnical Engineering: Saturated and Unsaturated Soils*, John Wiley and Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Chen, Fu Hua. (1975), *Foundations on Expansive Soils*, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, New York, NY

Clarke, B.G. (1995), *Pressuremeter in Geotechnical Design*, Blackie Academic & Proffesional.

Coduto, D.P., Yeung, M.R. and Kitch, W.A. (2011). *Geotechnical Engineering : Principles and Practices*. 2nd Edition. Pearson. New Jersey.

Das, Braja M. (1985), *Advance Soil Mechanics*, McGraw-Hill Book Co – Singapore.

Mair, R. J. And Wood, D. M. (1987), *Pressuremeter Testing: Methods and Intepretation*, Construction Industri Research and Information Association, Butterworths, London.

Mecsi, Jozsef. (2014), *Geotechnical Engineering Examples and Solutions Using The Cavity Expansion Theory (Pressuremeters, Piles, Grouted Soil Anchors)*, Hungarian Geotechnical Society, Budapest, Hungary.

Nelson, John D. And Debra, Miller J. (1992), *Expansive Soils: Problems and Practice in Foundation and Pavement Engineering.*, John Wiley & Sons, Inc.,

Terzaghi, Karl., Peck, Ralph B., and Mesri, Gholamreza. (1996), *Soil Mechanics in Engineering Practice.* John Wiley & Sons, Inc., New York, NY

Wesley, Laurence D. (2010), *Geotechnical Engineering in Residual Soils.* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Wesley, Laurence D. (2010), *Fundamental of Soil Mechanics for Sedimentary and Residual Soils.* John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

### **Makalah Ilmiah dalam Prosiding Pertemuan Ilmiah**

Indarto dan Alwan, Imam. (2011), Penurunan Daya Dukung Tahanan Selimut Tiang Pada Tanah Ekspansif Yang Mengalami Pembasahan. *Development of Geotechnical Engineering in Civil Works and Geo-environment. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XIV*, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia, Yogyakarta.

Liong, Gouw Tjie (2011) Soil Stiffness for Jakarta Silty and Clayey Soil, *Development of Geotechnical Engineering in Civil Works and Geo-environment. Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan XIV*, Himpunan Ahli Teknik Tanah Indonesia, Yogyakarta

### **Internet**

Cook, Brenton Ryan. (2010), *Numerical Solution Of Cylindrical Cavity Expansion In Sands: Effects of Failure Criteria and Flow Rules*, Thesis Departement of Civil and Environmental Engineering, Washington State University.

Holtz, W. G. and Gibbs, H. J. (1956), Engineering Properties of Expansive Clays, *Transaction ASCE*, 121 pp. 89-125

Kassif, G., Livneh, M., and Wiseman, G. (1969), *Pavement on Expansive Clays*, Jerusalem Academic Press, Jerusalem, Israel.

Yu, Hai-Sui (1990), *Cavity Expansion Theory and Its Application to the Analysis of Pressuremeter*, Doctoral Thesis, St. Anne's Collage, University of Oxford.

### **Standar/Manual**

Suherman, M. (2005) *Pedoman Konstruksi dan Bangunan, Penanganan Tanah Ekspansif untuk Konstruksi Jalan*, Departemen Pekerjaan Umum.

APAGEO (2006) Menard Pressuremeter (Gtype) operating instructions, 2006 Edition.

### **Tesis**

Effendi, Agnes Janet. (2014), *Studi Empirik Stabilisasi Tanah Ekspansif Dengan Kapur pada Proyek Jalan Tol Cipali*, Skripsi/thesis. Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

Meilani, Inge. (1999), *Pengaruh derajat saturasi dan penghisapan air pada kuat geser tanah di daerah Padalarang, Jawa Barat*. Thesis. Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

Suryaman, Donny. (1996), *Karakteristik Pengembangan Tanah Ekspansif di Daerah Cikarang : Studi Laboratorium*, Skripsi, Program Studi Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

Sugiarto, Hanny. (1996), *Korelasi Potensi dan Tekanan Pengembangan Berdasarkan Indeks Properties Tanah dengan Multi Variable Statistics analysis*, Skripsi, Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Katolik Parahyangan, Bandung

Winata, Robin. (2012), *Studi Karakteristik tanah ekspansif di daerah Cikarang dan Surabaya menggunakan analisis regresi berganda dan uji lapangan*, Thesis. Program Pasca Sarjana Magister Teknik Sipil Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung.

### **Laporan Penelitian**

Rahardjo, P. Paulus dan Santosa, T. M. (2002), *Karakteristik Tanah Ekspansif di daerah Cikarang, Jawa Barat*, Geotechnical Engineering Centre, Bandung.



## **Daftar Lampiran**

Lampiran 1 : Boring Log & Hasil Uji SPT

Lampiran 2 : Hasil Uji Mineralogi XRD

Lampiran 3 : Hasil Uji Pengembangan

Lampiran 4 : Hasil Uji Ducth Cone Penetrometer

Lampiran 5 : Hasil Uji Dilatometer

Lampiran 6 : Hasil Uji Triaxial

Lampiran 7 : Hasil Uji Pressuremeter

Lampiran 8 : Perhitungan Parameter Kuat Geser dengan CET