

Analisis Galian Dalam Dengan Perkuatan Angkur dan Strut Menggunakan Model 3D di Jakarta Utara

Pio Kefas¹⁾, Paulus Pramono Rahardjo²⁾, Aswin Lim³⁾

^{1, 2, 3)}Universitas Katolik Parahyangan, Bandung 40141, Indonesia

Email: piokefas@gmail.com¹⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v12i2.725>

(Received: February 2022 / Revised: July 2022 / Accepted: August 2022)

Abstrak

Penelitian ini dilakukan untuk meninjau performa galian pada tanah lunak yang diperkuat dua jenis sistem perkuatan, yaitu strut dan angkur. Galian dilakukan sedalam 8,5 m menggunakan metode full open cut dengan dua tipe diaphragm wall. Sisi galian dengan perkuatan strut dalam konfigurasi menyudut menghasilkan deformasi yang sangat besar dibandingkan dengan sisi galian dengan perkuatan angkur. Berdasarkan hasil monitoring yang dilakukan, deformasi sebesar 15 cm pada sisi galian dengan strut yang berbatasan dengan Hotel tidak menyebabkan kegagalan pada galian. Sementara sisi galian dengan angkur menunjukkan nilai deformasi sebesar 3.5cm pada tahap akhir galian. Analisa balik pemodelan 3D dilakukan untuk mengetahui performa aktual dari galian dan kedua jenis sistem perkuatan. Berdasarkan hasil analisis galian, pemodelan 3D dengan model konstitutif tanah Hardening Soil dapat memodelkan karakteristik galian dengan baik. Deformasi pada sisi dinding galian dengan tebal 80 cm dan perkuatan strut menghasilkan deformasi dinding yang lebih besar disbanding dinding galian dengan tebal 60 cm dan perkuatan 2 level angkur. Deformasi pada sudut galian jauh lebih kecil dibandingkan sepanjang dinding galian.

Kata kunci: *Galian Dalam, Strut, Angkur, Model 3D*

Abstract

This study aims to analyze the performance of excavation on soft soil reinforced by two types of supports; the strut and anchor. Excavation depth was 8.5 meters using full open cut method with two types of diaphragm walls. Excavation sides supported by struts in angular configuration resulted in a significantly larger deformation compared with sides supported by anchors. Anchor-supported sides produced 3.5 centimeters of deformation. Meanwhile, although the strut-supported sides adjacent to hotel produced a large, 15-centimeters deformation, it did not result in excavation failure. Three-dimensional model back analysis was carried out to analyze the actual performance of the two types of excavation supports. Based on the results of the excavation analysis, 3D modelling with soil constitutive model of Hardening Soil can model the characteristics of the excavation well. Deformation on the excavation wall with a thickness of 80cm and strut reinforcement resulted in greater wall deformation than the excavation wall with a thickness of 60cm and 2-level anchor reinforcement. The deformation at the excavation corner is much smaller than along the excavation wall.

Keywords: *Deep Excavation, Strut, Anchor, 3D Modelling*

1. Latar Belakang

Galian pada tanah lunak dapat menyebabkan pergerakan yang besar dari dinding galian akibat dari rendahnya *passive resistance* dari terjadi *ground settlement* akibat kompresibilitas dari tanah lunak yang tinggi (Ou, 2006). Berdasarkan penelitian Ou et al. (1993) dari berbagai kasus galian dalam, besarnya defleksi dinding galian berada pada rentang 0.2 – 0.5% dari kedalaman galian Mana and Clough (1981) dan Ou et al. (1993) menyebutkan bahwa *settlement* yang terjadi di permukaan belakang dinding galian sangat dipengaruhi oleh besarnya defleksi dinding galian. Penelitian yang dilakukan pada kasus galian di Taipei, Chicago, San Francisco dan Oslo (Mana and Clough, 1981; Ou et al., 1993) menunjukkan bahwa $\delta_{vm} = (0.5 - 0.75) \delta_{hm}$ dengan batas bawah untuk tanah pasir dan batas atas untuk tanah lempung. Pada tanah lempung sangat lunak, δ_{vm} dapat melebihi 1.0 δ_{hm} .

Pada studi kasus galian yang dilakukan di Jakarta Utara, terdapat 2 jenis perkuatan yaitu strut dan angkur. Penelitian yang dilakukan oleh Hashash dan Whittle (2002) yang membandingkan metode APD konvensional Peck dengan hasil *finite element* menemukan bahwa gaya yang dihasilkan dari metode APD lebih kecil dibanding hasil dari *finite element*. Goh et al. (2017) melakukan penelitian tentang gaya yang bekerja pada strut dan menemukan bahwa metode APD oleh Peck menunjukkan besar gaya tekanan tanah yang terjadi kecil, terutama pada kasus galian yang dalam dan *diaphragm wall*. Sehingga dalam desain strut sebaiknya didukung oleh analisa metode elemen hingga.

Selain sistem strut sebagai penahan gaya lateral dinding galian, terdapat sistem angkur yang menjadi alternatif penahan gaya lateral dinding galian. Dalam mendesain panjang *free section* dan *fixed section* dari angkur, penting untuk memperhatikan letak bidang potensi kegagalan dari galian. *Fixed section* angkur tidak boleh berada di dalam dan memotong bidang kegagalan. *Fixed section* harus berada minimum 1.5 m atau 0.2 H di luar bidang kegagalan di mana H adalah kedalaman galian. Spasi horisontal dari angkur tidak boleh kurang dari 1.2 m untuk meminimalisir *group effect* antar angkur, sementara spasi maksimum antar angkur ditentukan dari beban ijin individual angkur dan kapasitas flexural dari dinding galian (FWHA, 1999). Penelitian yang dilakukan oleh Finno and Roboski (2005) pada kasus galian di Chicago di tanah lunak menunjukkan bahwa galian dengan perkuatan angkur memiliki deformasi terbesar berada di dekat dasar galian.

Respon tanah terhadap galian pada area sudut galian memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan dengan sepanjang dinding galian. Beberapa faktor utama yang memengaruhi respon tanah akibat galian adalah dimensi galian, kedalaman galian dan panjang dinding galian. Hasil observasi dari Bono et al. (1992), (Wong and Patron, 1993), Ou et al. (1993; 1996; 2000a; 2000b;) (Chew et al., 1997), (Lee et al., 1998), (Finno and Bryson, 2002), dan (Finno and Roboski, 2005) menunjukkan beberapa hal terkait pergerakan dinding galian pada sudut galian, yaitu: dalam semua kasus, rasio gerakan sudut ke tengah dinding ($\delta_{\text{Corner}}/\delta_{\text{Center}}$), kurang dari 1,0 menunjukkan bahwa pergerakan mengecil di dekat sudut galian karena efek kekakuan sudut. Secara umum, semakin pendek dimensi rencana galian dinding, semakin kecil gerakan yang akan diukur dekat bagian tengah dinding galian karena efek kekakuan sudut. Galian yang lebih dalam memiliki rasio $\delta_{\text{Corner}}/\delta_{\text{Center}}$ yang lebih kecil dibandingkan dengan kasus galian yang lebih dangkal di kondisi tanah dengan sistem proteksi serupa.

Dalam analisa perencanaan galian, deformasi dinding menjadi hal yang krusial dalam menentukan sistem proteksi dari galian. Analisa 2D yang dilakukan secara plane strain seringkali tidak dapat memodelkan secara aktual geometri galian yang terjadi di lapangan. Oleh karena itu, pendekatan dengan 3D perlu dilakukan. Beberapa studi terkait perbandingan performa dan deformasi dinding galian berdasarkan pemodelan 2D dan 3D yang dilakukan oleh (Ou et al., 1993), Ou et al., (1996), Lee et al. (1998) dan Lin et al. (2003). Berdasarkan studi *finite element* yang telah dilakukan: berdasarkan data lapangan, semua studi menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi di sudut lebih kecil dibandingkan deformasi di tengah dinding galian. Selain itu, gerakan yang terjadi di tengah galian dapat memberikan nilai yang berbeda pada analisa 2D dibandingkan dengan 3D. Apabila jarak antara lapisan tanah keras dan dasar galian cukup jauh, deformasi pada analisa 2D di bagian tengah dinding galian jauh lebih besar dibanding pengukuran lapangan. Hasil analisis 3D lebih mendekati hasil pengukuran lapangan. Analisa deformasi 2D dan 3D di tengah dinding yang panjang, menunjukan nilai yang sama pada kasus galian dengan lapisan tanah keras di bawah dasar galian. Ketika rasio kedalaman dinding terhadap kedalaman galian (L/H_e) lebih kecil, analisis 2D memberikan hasil deformasi yang *overestimate*, sedangkan hasil analisis 3D lebih mendekati deformasi terukur.

Penelitian ini bertujuan untuk memahami karakteristik galian yang dilakukan pada tanah lempung lunak dengan proteksi galian berupa strut dan angkur serta pengaruh dari masing-masing sistem perkuatan terhadap bangunan di sekitar area galian melalui model 3D dengan metode elemen hingga

2. Metode Penelitian

Pada penelitian ini, analisa dilakukan dengan metode *back analysis* terhadap hasil monitoring berupa inklinometer pada 2 sisi galian yang memiliki perkuatan yang berbeda. Pemodelan *Finite Element* dilakukan dengan bantuan PLAXIS 3D dan galian dimodelkan setengah dari dimensi total galian.

2.1 Pemodelan Tanah Pada Program Finite Element

Dalam penelitian ini, model *Hardening Soil* (HS) digunakan untuk memodelkan kondisi tanah in situ. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Calvello and Finno (2004), Lim et al. (2010), model HS dapat menghasilkan deformasi dan defleksi yang mendekati hasil pengukuran lapangan. Model HS adalah model elasto-plastik, *multi-yield surface, effective stress soil model* yang dikembangkan oleh Schanz et al. (1999). Ketika mengalami pembebanan deviatorik primer, tanah menunjukkan penurunan kekakuan dan secara bersamaan terbentuk regangan plastis. Kegagalan didefinisikan oleh kriteria kegagalan Mohr-Coulomb dan menggunakan pendekatan model hiperbolik oleh Duncan and Chang (1970). Model tersebut melibatkan karakteristik *frictional hardening* untuk memodelkan regangan geser plastis pada pembebanan deviatorik, dan karakteristik *cap hardening* untuk memodelkan regangan volumetrik plastis pada kompresi primer

Pada kasus galian, parameter unloading menjadi fokus utama di mana pada model tanah *Hardening Soil*, terdapat input *modulus unloading* E_{ur} . Input parameter dengan program PLAXIS dilakukan dengan 3 nilai modulus dan parameter *power* (m) yaitu: E_{50}^{ref} adalah *Secant stiffness modulus* pada 50% dari *deviatoric stress* ketika p^{ref} adalah 100 kPa; E_{oed}^{ref} adalah *Tangent stiffness modulus* dari *oedometer*

test ketika p^{ref} adalah 100 kPa; E_{ur}^{ref} adalah *Unloading/reloading stiffness* ketika p^{ref} adalah 100 kPa; m adalah *Power for stress dependency of stiffness*

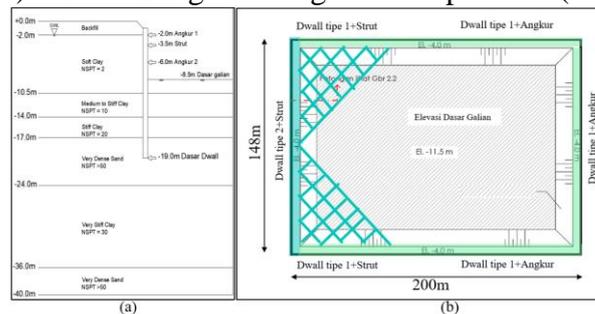
PLAXIS membutuhkan modulus input pada tekanan referensi 1atm (100 kPa). Hubungan modulus dengan *stress dependency* pada tekanan referensi dapat dilihat dengan persamaan:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi' - \sigma_3' \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + \sigma_3^{ref} \sin \varphi'} \right)^m \tag{1}$$

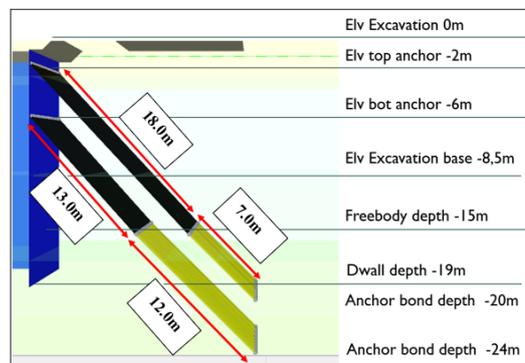
Pada pengaturan *default* PLAXIS, $E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref}$ and $E_{ur}^{ref} = 3 E_{50}^{ref}$ (PLAXIS, 2019). Namun pada studi ini digunakan $E_{50}^{ref} = 0.8 E_{oed}^{ref}$.

2.2 Deskripsi Data untuk Analisa

Penelitian ini dilakukan berdasarkan data galian dalam yang terletak di Jakarta Utara. Data yang digunakan adalah sebuah kompleks gedung kantor yang terdiri dari 4 tower dengan 3 *basement* memiliki galian sedalam 8.5 m dari permukaan galian. Galian berbentuk persegi panjang dan memiliki dimensi 200 m x 148 m. Galian dilakukan dengan *diaphragm wall* (dwall) dengan 2 jenis dwall yang memiliki tebal 60 cm (dwall tipe 1) dan tebal 80cm (dwall tipe 2). Pada sisi barat galian, dwall tipe 2 dengan tebal 80 cm diperkuat oleh strut dengan konfigurasi menyudut. Instalasi strut dilakukan pada kedalaman 3.5 m dari permukaan galian. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi profil tanah dan konstruksi galian (Gambar 1a) serta denah geometri galian tampak atas (Gambar 1b).



Gambar 1 (a) Ilustrasi profil tanah dan galian; (b) Denah geometri galian dan perkuatan



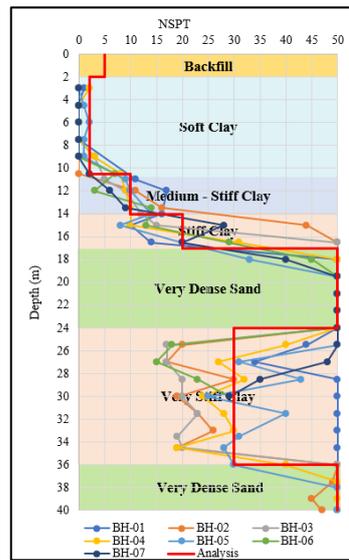
Gambar 2 Konfigurasi angkur

Pada sisi utara, selatan dan timur galian, digunakan dwall tipe 1 dengan tebal 60 cm diperkuat oleh 2 level angkur. Instalasi angkur pada kedalaman 2 m dan 6 m dari permukaan galian. Konfigurasi perkuatan angkur seperti pada Gambar 2

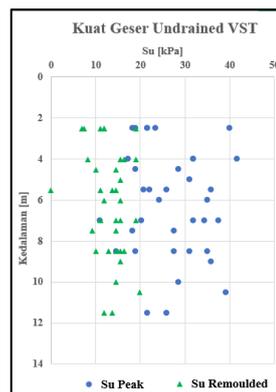
Angkur terdiri dari 2 jenis material yaitu *freelength* dan *fixedlength*. Material dari *freelength* adalah tendon baja dengan EA sebesar 4.295.146 kN/m. Material dari *fixedlength* adalah grout beton dengan f_c' sebesar 20 MPa dengan EA sebesar 1.031.770 kN/m.

2.3 Data Tanah

Terdapat 7 titik pengeboran dalam diikuti uji SPT tiap 2 m dan 36 titik uji VST yang tersebar di area galian. Gambar 3 menunjukkan rangkuman nilai pengujian *standard penetration test* (SPT) terhadap kedalaman tanah pengujian. Dari data nilai pukulan SPT, dari permukaan hingga kedalaman -10 m tanah didominasi nilai NSPT 5 dan 2 di mana berdasarkan Ameratunga et al. (2016) tanah lempung berada pada konsistensi *soft to medium*.



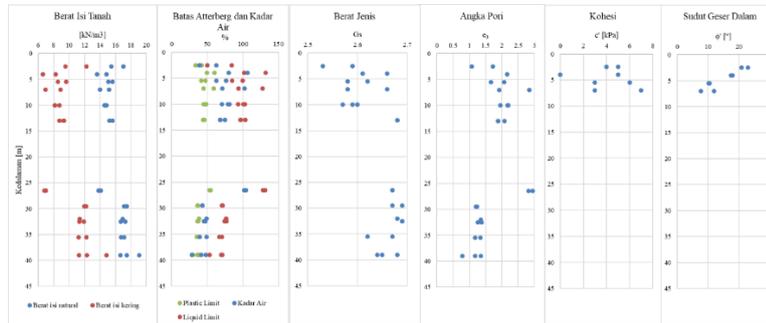
Gambar 3 Profil uji nilai SPT terhadap kedalaman



Gambar 4 Hasil pengukuran Su menggunakan vane shear test

Gambar 4 menunjukkan rangkuman nilai pengujian vane shear test (VST) terhadap kedalaman pengujian. Nilai pengujian VST berupa nilai kuat geser tak terdrainase dari tanah. Dari data yang terukur, persebaran nilai S_u peak dari 20 – 40 kPa dan S_u remoulded dari 8 – 18 kPa di mana menurut Ameratunga et al. (2016) tanah termasuk dalam kriteria *soft to medium clay* dan memiliki nilai aktivasi antara 2 – 2.5 yang termasuk dalam kriteria *low sensitivity*.

Selain uji lapangan, terdapat beberapa uji lab yang dilakukan pada kasus galian ini. Rangkuman pengujian lab terhadap kedalaman dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5 Profil parameter hasil uji laboratorium terhadap kedalaman

Hasil uji Triaxial CU pada lapisan tanah lempung lunak menunjukkan nilai kohesi efektif (c') pada rentang 3 kPa – 7 kPa. Sedangkan nilai sudut geser efektif (ϕ') pada rentang 8° - 24° . Pada kedalaman 15 – 25m tidak terdapat uji laboratorium karena merupakan lapisan pasir.

2.4 Dinding Diafragma dan Perkuatan Dinding

Dinding diafragma terdiri dari 2 tipe yaitu tipe 1 dengan ketebalan 60 cm pada sisi utara, selatan dan timur. Dinding tipe 2 tebalnya 80 cm di sisi barat. Mutu beton yang digunakan pada dinding dwall adalah $f_c'=20\text{MPa}$. Menurut kode ACI Committee 318 (2011), nilai nominal modulus Young beton dapat diperkirakan dengan:

$$E_c = 4700\sqrt{f_c'} ; (f_c' \text{ satuan: MPa}) \tag{2}$$

di mana f_c' adalah kuat tekan beton. Dinding diafragma dimodelkan dengan *Plate Element* di PLAXIS dengan *interface* di kedua sisi untuk mewakili friksi antara tanah dan beton. Parameter untuk dwall dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1 Input parameter dinding diaphragma

| Elemen | Model | d [m] | γ [kN/m ³] | E [kPa] |
|-------------|---------|-------|-------------------------------|------------|
| D-wall 80cm | Elastis | 0.8 | 24 | 21.019.039 |
| D-wall 60cm | Elastis | 0.6 | 24 | 21.019.039 |

Sistem strut yang digunakan pada galian ini terbentang dari sudut galian hingga ke tengah galian. Dinding galian sisi barat merupakan bagian dengan sistem strutting. Input parameter yang digunakan untuk strut dengan model *node-to-node anchor* sesuai dengan dokumen perencana adalah $EA = 480,000 \text{ kN}$.

Angkur yang digunakan pada galian ini digunakan sepanjang dinding galian sisi utara, timur dan selatan. Angkur yang digunakan memiliki diameter 250mm dengan mutu beton grout f_c' sebesar 20 MPa. Angkur dimodelkan dengan 2 komponen. *Free length* dari angkur dimodelkan dengan *node to node anchor* sedangkan pada bagian *fixed length* dari angkur dimodelkan dengan *embedded beam*. Parameter dari masing-masing komponen angkur dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2 Input parameter angkur

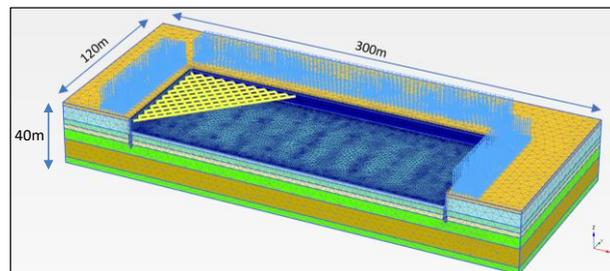
| Elemen | Model | EA [kN/m] |
|---------------------|---------------------|--------------|
| <i>Free Length</i> | Node to node anchor | 4.295.146 |
| <i>Fixed Length</i> | Embedded beam | 1.031.770 |

2.5 Tahapan Galian

Tahapan konstruksi dimodelkan dalam analisa balik dengan model 3D. Tahapan konstruksi pada penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 3. Pemodelan galian dilakukan dengan asumsi beban permukaan di sekitar galian sebesar 10 kPa yang merupakan beban jalan setempat. Pada kasus ini, muka air tanah berada -2 m dari permukaan galian di mana *dewatering* dilakukan selama proses galian. Pemodelan *dewatering* dilakukan pada tiap tahapan galian sehingga area galian pada pemodelan selalu pada kondisi kering. Pemodelan galian dapat dilihat pada Gambar 6.

Tabel 3 Tahapan Konstruksi Galian

| Fase | Konstruksi |
|------|---|
| 1 | Penggalian ke elevasi -1.0 m |
| 2 | Instalasi <i>D-wall</i> |
| 3 | Penggalian ke elevasi -3.0 m & instalasi angkur pertama |
| 4 | Penggalian ke elevasi -4.0 m & instalasi strut |
| 5 | Penggalian ke elevasi -6.0 m & instalasi angkur kedua |
| 6 | Penggalian ke elevasi -7.0 m |
| 7 | Penggalian ke elevasi -8.0 m |
| 8 | Penggalian ke elevasi -8.5 m |



Gambar 6 Pemodelan galian dengan model 3d

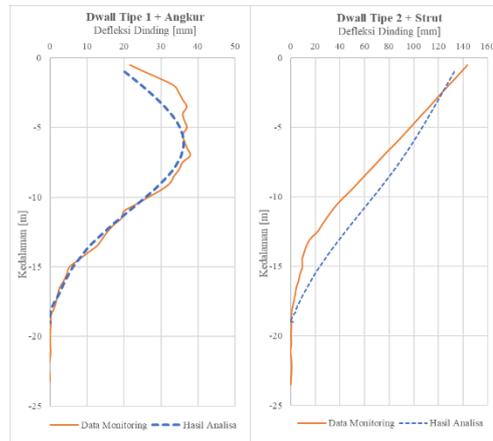
3. Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan hasil *back analysis*, pemodelan galian dengan PLAXIS 3D dengan model tanah *Hardening Soil* dapat menghasilkan *output* deformasi yang mendekati hasil pengukuran lapangan. Hasil analisa yang menjadi tinjauan dalam penelitian ini berupa defleksi dinding, *settlement* permukaan, *corner effect*, dan faktor keamanan pada akhir tahapan galian.

3.1 Defleksi Dinding Galian

Sesuai dengan hasil monitoring lapangan, defleksi terbesar dari dinding galian berada pada galian sisi barat dan utara bagian strut. Hasil defleksi dinding

galian sisi utara dengan angkur dan sisi barat dengan strut diplotkan dengan hasil monitoring dan dapat dilihat pada Gambar 7.



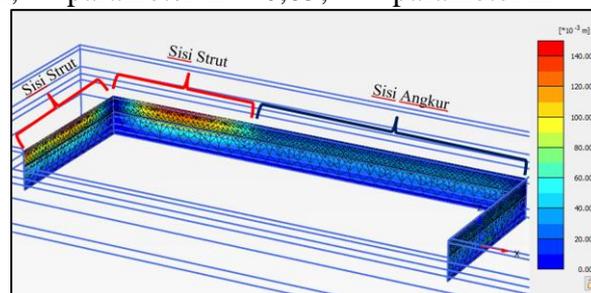
Gambar 7 Hasil *back analysis* terhadap data monitoring

Berdasarkan hasil *back analysis* galian, parameter tanah yang telah disesuaikan untuk mendapatkan hasil yang sesuai dengan monitoring lapangan. Rangkuman parameter tanah hasil *back analysis* dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Rangkuman input parameter tanah hasil *back analysis*

| Kedalaman | NSPT | Jenis Tanah | γ [kN/m ³] | e_0 | E_{50}^{ref} MPa | E_{oed}^{ref} MPa | E_{ur}^{ref} MPa | Su kPa | c' kPa | ϕ' ° |
|-----------|------|------------------------|----------------------------------|-------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------|-------------|--------------|
| 0 – 2 | - | Backfill* | 16 | 1,0 | 10,5 | 8,4 | 31,5 | 50 | 10 | 30 |
| 2 – 10,5 | 2 | Soft Clay* | 15 | 1,2 | 2,0 | 1,6 | 6,0 | 10 | 1 | 25 |
| 10,5 – 14 | 10 | Medium to Stiff Clay** | 16 | 0,8 | 40,0 | 32,0 | 120,0 | 80 | 8 | 30 |
| 14 – 17 | 20 | Stiff Clay*** | 18 | 0,8 | 80,0 | 64,0 | 240,0 | 160 | 16 | 32 |
| 17 – 24 | 60 | Very Dense Sand*** | 20 | 0,5 | 103,0 | 82,4 | 309,0 | - | 50 | 40 |
| 24 – 36 | 30 | Very Stiff Clay*** | 19 | 0,5 | 120,0 | 96,0 | 360,0 | 240 | 24 | 35 |
| 36 – 40 | 60 | Very Dense Sand*** | 20 | 0,5 | 103,0 | 82,4 | 309,0 | - | 50 | 40 |

* parameter $m = 1$; ** parameter $m = 0,85$; *** parameter $m = 0,5$



Gambar 8 Kontur deformasi dinding diaphragma pada tahap akhir galian

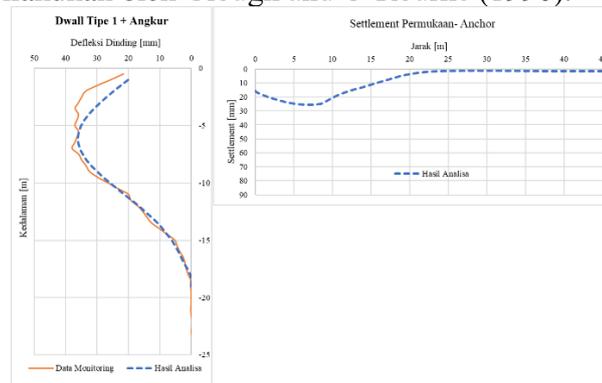
Parameter permeabilitas untuk tanah *backfill* dan *clay* adalah $k = 0,001$ m/day dan untuk tanah *sand* adalah $k = 0,100$ m/day. Gambar 8 menunjukkan defleksi dinding

sepanjang galian. Deformasi dinding dari hasil analisa dan monitoring pada dwall tipe 1 dengan angkur adalah sebesar 0.4% dari kedalaman galian (8.5 m), sedangkan deformasi dinding dari hasil analisa dan monitoring pada dwall tipe 2 dengan strut adalah sebesar 1.6% dari kedalaman galian.

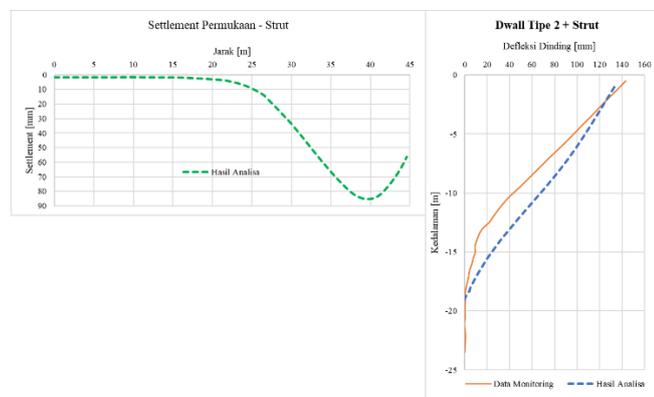
Dinding dwall tipe 1 dengan angkur memiliki bentuk defleksi dinding *deep inward* sedangkan dwall tipe 2 dengan strut memiliki bentuk defleksi dinding *cantilever*. Dari hasil tersebut dapat diketahui bahwa walaupun dwall tipe 2 memiliki ketebalan dinding yang lebih tebal, namun deformasi yang dihasilkan jauh lebih besar dibanding dwall tipe 1.

3.2 Settlement Permukaan dan Heaving Dasar Galian

Hubungan antara *settlement* permukaan dengan defleksi dinding menunjukkan kecenderungan yang sama seperti pada penelitian terdahulu (Mana and Clough, 1981); (Ou et al., 1993) di mana $\delta_{vm} = (0.5 - 0.75)\delta_{hm}$. Berdasarkan hasil analisa deformasi pada penelitian ini, dinding dwall tipe 1 dengan angkur memiliki nilai *settlement* 0.75 dari nilai defleksi dinding sedangkan pada dwall tipe 2 dengan strut memiliki nilai *settlement* 0.6 kali dari defleksi dinding. Hasil analisa *settlement* permukaan dari kedua tipe dwall menunjukkan besaran yang berbeda namun memiliki bentuk *settlement* yang serupa yaitu tipe *concave*. Lokasi *settlement* terbesar dari kedua tipe dwall juga menunjukkan hasil yang serupa, kurang lebih berada pada jarak 6 – 7m di belakang dinding galian di mana sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Clough and O'Rourke (1990).



Gambar 9 *Settlement* permukaan dan defleksi dinding pada dwall tipe 1 dengan angkur

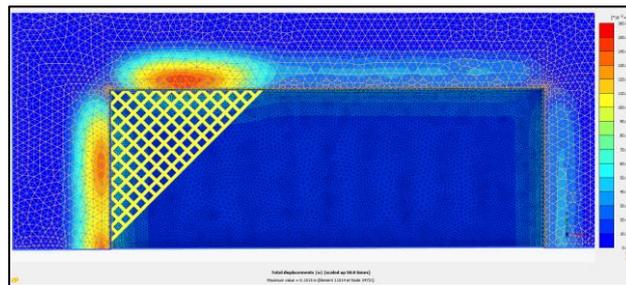


Gambar 10 *Settlement* permukaan dan defleksi dinding pada dwall tipe 2 dengan strut

Heaving yang terjadi pada dasar galian untuk sisi galian dwall tipe 1 adalah sebesar 2.9cm. Sedangkan *heaving* yang terjadi pada dasar galian untuk sisi galian dwall tipe 2 adalah sebesar 4.7cm. Besarnya *settlement* permukaan dan defleksi dinding dari kedua tipe dwall dengan strut dan angkur dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.

3.3 Corner Effect

Berdasarkan hasil analisa, dapat diketahui bahwa pada dwall dengan tipe 1 dan 2, defleksi dinding dan *settlement* permukaan yang terjadi mengecil ke arah sudut galian. Gambar 11 menunjukkan tampak atas hasil deformasi dan menunjukkan *settlement* permukaan di sudut – sudut galian akibat *corner effect*



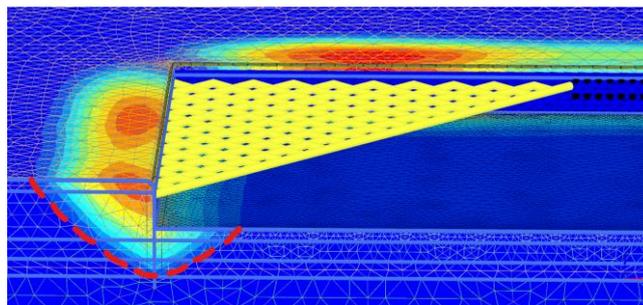
Gambar 11 Tampak atas deformasi tanah tahap akhir galian dan corner effect

Gambar 11 menunjukkan deformasi tanah di area sudut yang menunjukkan bahwa defleksi di sudut galian lebih kecil dibanding defleksi di sepanjang dinding galian. *Corner effect* memungkinkan adanya ruang optimasi perkuatan pada sudut–sudut galian namun tetap memperhatikan kesatuan keseluruhan sistem proteksi dinding yang digunakan.

3.4 Faktor Keamanan Galian

Pada penelitian ini, baik secara aktual di lapangan dan hasil analisa model 3D, tidak terjadi kegagalan selama pekerjaan galian berlangsung. Pada tahap akhir galian, analisa faktor keamanan dilakukan untuk mengetahui besarnya faktor keamanan yang didapat dari hasil analisis balik pada kasus galian di Jakarta Utara.

Berdasarkan hasil analisa faktor keamanan pemodelan 3D, didapatkan hasil FK sebesar 1.7 pada akhir tahap galian dan dapat dilihat pada Gambar 12. Berbeda dengan hasil analisa 2D yang dilakukan oleh konsultan perencana, faktor keamanan dari hasil analisa 2D pada dinding dwall tipe 2 dengan perkuatan strut adalah sebesar FK sebesar 1.3. Sedangkan faktor keamanan dari hasil analisa 2D pada dinding dwall tipe 1 dengan perkuatan angkur adalah sebesar FK sebesar 2.3.



Gambar 12 Hasil analisa profil potensi bidang longsor

4. Kesimpulan dan Saran

4.1 Kesimpulan

Pemodelan 3D dapat memberikan hasil defleksi dinding galian yang mendekati hasil monitoring lapangan. Pemodelan galian dengan model konstitutif tanah yang digunakan dengan hardening soil model, dapat memodelkan galian dengan baik. Hal ini ditunjukkan dengan hasil analisa yang mendekati hasil monitoring. Dinding galian D-wall tipe 2 dengan tebal 80 cm yang diperkuat dengan 1 level strut konfigurasi menyudut menghasilkan deformasi yang jauh lebih besar (15 cm) daripada dinding galian D-wall tipe 1 dengan tebal 60 cm yang diperkuat dengan 2 level angkur (3.5 cm). Hasil analisa *settlement* permukaan dari kedua tipe dwall menunjukkan besaran yang berbeda namun memiliki bentuk *settlement* yang sama yaitu tipe *concave*. Lokasi *settlement* terbesar dari kedua tipe dwall berada pada jarak 6 – 7 m di belakang dinding galian. *Corner effect* dapat dimodelkan dengan baik pada pemodelan 3D dan menunjukkan bahwa defleksi dan *settlement* pada area sudut galian lebih kecil dibanding defleksi dan deformasi di sepanjang dinding galian. Analisa faktor keamanan akhir tahapan galian menunjukkan nilai FK sebesar 1.7 yang mana menunjukkan galian berada pada kondisi yang aman.

4.2 Saran

Saran yang dapat diberikan dari hasil penelitian ini untuk penelitian berikutnya adalah pemodelan galian sebaiknya dilakukan dengan data yang lebih lengkap sesuai dengan kondisi lapangan. Informasi detail mengenai elemen struktural yang digunakan di lapangan dapat menjadi input yang lebih detail dalam pemodelan. Selain itu, pemodelan lapisan tanah sebaiknya dilakukan sesuai dengan data penyelidikan tanah terdekat dari tiap titik pengujian di lapangan sehingga defleksi dinding dan *settlement* permukaan yang didapatkan lebih akurat. Durasi konstruksi juga dapat menjadi input dalam pemodelan tahapan galian sehingga kondisi aktual lapangan dapat termodelkan dengan baik.

Daftar Kepustakaan

- ACI Committee 318., American Concrete Institute., 2011. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-11) and commentary. American Concrete Institute.
- Ameratunga, J., Sivakugan, N., Das, B.M., 2016. Developments in Geotechnical Engineering Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering.
- Bono, N.A., Liu, T.K., Soydemir, C., 1992. Performance of an internally braced slurry-diaphragm wall for excavation support. ASTM 169–190.
- Calvello, M., Finno, R.J., 2004. Selecting parameters to optimize in model calibration by inverse analysis. Computers and Geotechnics 31, 410–424.
- Chew, S.H., Yong, K.Y., Lim, A.Y.K., 1997. Three-dimensional finite-element analysis of a strutted excavation. Computer methods and advances in geomechanics.
- Clough, G.W., O'Rourke, T.D., 1990. Construction induced movements of Insitu Walls. ASCE 439–470.

- Duncan, J.M., Chang, C.Y., 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soil. ASCE 96, 637–659.
- Finno, R.J., Bryson, L.S., 2002. Response of Building Adjacent to Stiff Excavation Support System in Soft Clay. Perform. Constr. Facil. 16, 10–20.
- Finno, R.J., Roboski, J.F., 2005. Three-Dimensional Responses of a Tied-Back Excavation through Clay. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 131, 273–282.
- FWHA, 1999. Geotechnical Circular No. 4 Ground Anchors and Anchored System.
- Goh, A.T.C., Zhang, F., Zhang, W., Chew, O.Y.S., 2017. Assessment of strut forces for braced excavation in clays from numerical analysis and field measurements. Computers and Geotechnics 86, 141–149.
- Hashash, Y.M.A., Whittle, A.J., 2002. Mechanisms of Load Transfer and Arching for Braced Excavations in Clay. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 128, 187–197.
- Lee, F.H., Yong, K.-Y., N Quan, K.C., Chee, K.-T., 1998. Effect of Corners in Strutted Excavations: Field Monitoring and Case Histories. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 124, 339–349.
- Lim, A., Ou, C.Y., Hsieh, P.G., 2010. Evaluation of clay constitutive models for analysis of deep excavation under undrained conditions. Journal of GeoEngineering 5, 9–20.
- Lin, D.G., Chung, T.C., Phien-wej, N., 2003. Quantitative Evaluation of Corner Effect on Deformation Behavior of Multi-Strutted Deep Excavation in Bangkok Subsoil. Journal of southeast asian geotechnical society .
- Mana, A.I., Clough, G.W., 1981. Prediction of Movements for Braced Cuts in Clay. ASCE 107, 759–777.
- Ou, C.Y., 2006. Deep Excavation Theory and Practice.
- Ou, C.Y., Chiou, D.-C., Wu, T.-S., 1996. Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations. Journal of Geotechnical Engineering 122.
- Ou, C. Y., Hsieh, P., Chiou, D., 1993. Characteristics of ground surface settlement during excavation, Can. Geotech. J.
- Ou, C.Y., Liao, J.T., Cheng, W.L., 2000. Building response and ground movements induced by a deep excavation. Geotechnique 50, 209–220.
- Ou, C.-Y., Shiau, B.-Y., Wang, I.-W., 2000. Three-dimensional deformation behavior of the Taipei National Enterprise Center (TNEC) excavation case history.
- PLAXIS, 2019. PLAXIS Manual.
- Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., 1999. The Hardening Soil Model Formulation and Verification. Computational Geotechnics.
- Wong, L.W., Patron, B.C., 1993. Settlements induced by deep excavations in Taipei.