

Analisis Balik Galian Dalam dengan Metode Konstruksi *Top-Down* Menggunakan Analisis Elemen Hingga 2-Dimensi dan 3-Dimensi

Vinna Fransiska Chou^(*)

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung, E-mail: vinnafc@gmail.com

Paulus Pramono Rahardjo

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung, E-mail: paulus.rahardjo@unpar.ac.id

Aswin Lim

Program Studi Magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan,
Jalan Ciumbuleuit 94, Bandung, E-mail: aswinlim@unpar.ac.id

Abstrak

Kasus galian dalam perlu mendapat perhatian khusus terkait defleksi dinding dan deformasi tanah yang dipicu akibat galian dalam itu sendiri. Defleksi dinding maupun deformasi tanah yang berlebihan dapat menyebabkan kerusakan pada struktur sekitarnya. Untuk memverifikasi performa maupun keamanan pekerjaan galian dalam dapat dilakukan analisis balik. Penelitian ini berfokus pada analisis balik terhadap pekerjaan galian dalam pada salah satu bangunan perkantoran tersohor di Indonesia. Galian ini menggunakan metode konstruksi *top-down* dengan dinding diafragma berdiameter 0,8m sebagai sistem penahan. Melalui penelitian ini, diketahui bagaimana jika parameter hasil analisis balik dengan metode elemen hingga 2-Dimensi digunakan dalam analisis 3-Dimensi. Analisis menggunakan model material *Hardening Soil* dan analisis balik mengacu kepada hasil pengukuran inklinometer. Berdasarkan hasil analisis diperoleh bahwa analisis 3-Dimensi memberikan hasil defleksi dinding dan deformasi tanah yang *underestimated* dibandingkan dengan analisis 2-Dimensi. Hal ini disebabkan oleh efek 3-Dimensi yang berperan signifikan. Jika dilakukan iterasi parameter agar diperoleh hasil defleksi dinding yang sesuai antara analisis 3-Dimensi dengan hasil pengukuran lapangan, nilai modulus tanah perlu direduksi hingga 80% pada kasus ini. Artinya, nilai modulus tanah menjadi parameter yang berperan penting dalam memprediksi besarnya defleksi dinding akibat galian. Selain itu, besarnya defleksi dinding dan deformasi tanah juga dipengaruhi oleh faktor kedalaman galian.

Kata-kata Kunci: Analisis balik, defleksi dinding, deformasi tanah, galian dalam, metode elemen hingga, metode konstruksi *top-down*

Abstract

Deep excavation needs special attention regarding wall deflection and soil deformation induced by the excavation work itself because excessive one can cause damage to the vicinity structure. Back analysis can be carried out to verify the performance and the safety of excavation. This research focuses on the back analysis of deep excavation in a famous office building construction in Indonesia. The excavation was executed using *top-down* construction method with diameter 0.8m of diaphragm wall as a retaining system. Through this research, it can be known how the parameter of back analysis using 2-Dimensional finite element method is modeled in 3-Dimensional analysis. Soils were modeled as a *Hardening Soil* model and back analysis was referred to inclinometer measurements. Based on the analysis results, it was found that 3-Dimensional analysis gave *underestimated* wall deflection compared to 2-Dimensional analysis. It is due to the 3D effect that performed significantly. If the soil parameter was iterated to obtain relevant wall deflection between 3-Dimensional analysis and field measurement, soil modulus needs to be reduced by 80% in this case. It means that soil modulus becomes an essential parameter in predicting wall deflection induced by excavation. Besides, excavation depth also affected wall deflection and soil deformation.

Keywords: Back analysis, deep excavation, finite element method, soil deformation, *top-down* construction method, wall deflection

* Penulis Korespondensi

1. Pendahuluan

Pekerjaan galian dalam seringkali mendapat perhatian yang khusus dalam kaitannya dengan defleksi dinding dan deformasi tanah. Terutama jika pekerjaan galian dalam tersebut berlokasi di kawasan perkotaan yang padat akan bangunan, maka kajian prapelaksanaan pekerjaan perlu dilakukan secara seksama. Hal ini mengingat bahwa deformasi tanah yang berlebihan sering sekali merusak struktur di sekitarnya (Wang dkk., 2010; Ou dkk., 2000). Untuk mengukur performa pekerjaan galian dalam secara keseluruhan, dapat dilakukan *monitoring* dengan memasang instrumentasi pada lokasi pekerjaan. Melalui *monitoring* tersebut, menurut Ou (2006) salah satunya dapat digunakan untuk mengkonfirmasi kondisi desain. Selain itu, hasil *monitoring* juga dapat dijadikan referensi untuk desain dengan kondisi tanah tipikal di kemudian hari.

Melakukan konfirmasi kondisi desain artinya melakukan analisis balik. Analisis balik dapat dilakukan salah satunya dengan menggunakan metode elemen hingga (MEH). Sejatinya, menurut Ou dkk. (1996), galian secara alamiah merupakan persoalan 3-Dimensi (3D). Akan tetapi, ada kalanya persoalan galian cukup dimodelkan secara 2D untuk membedakan antara efek pengakuan pada bagian sudut galian dan respon tanah konstitutif (Finno dkk., 2007). Beberapa publikasi terbaru membahas mengenai pemodelan galian dalam secara 3D pada berbagai jenis kondisi tanah dan membandingkan hasilnya dengan analisis 2D (Ou dkk., 1996; Ou dan Shiau, 1998; Moormann dan Katzenbach, 2002).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis balik berdasarkan hasil pengukuran inklinometer di dalam dinding diafragma. Analisis balik dilakukan dengan memodelkan galian menggunakan metode elemen hingga 2D dengan bantuan program komputer PLAXIS. Parameter yang diperoleh berdasarkan hasil analisis balik secara 2D tersebut kemudian digunakan dalam analisis secara 3D. Melalui kajian ini, akan diketahui bagaimana perbedaan defleksi dinding dan deformasi tanah jika parameter hasil analisis 2D digunakan dalam analisis secara 3D.

2. Studi Kasus Galian Dalam

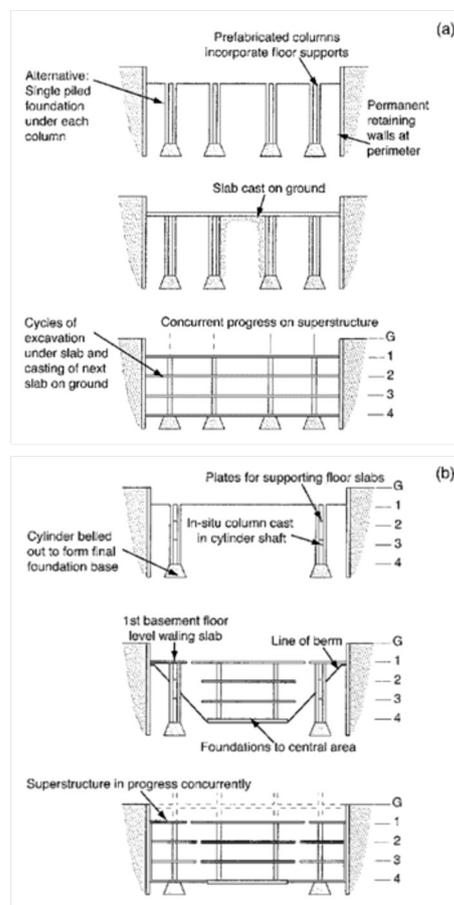
Sebuah studi kasus galian dalam yang berlokasi di kawasan Jakarta Pusat digunakan sebagai objek kajian pada penelitian ini. Galian dalam tersebut merupakan *basement* 6 lantai dengan struktur di atasnya berupa menara yang terdiri dari *tower* 50 lantai dan *annex* 5 lantai.

2.1 Galian dalam menggunakan metode konstruksi *top-down*

Galian dalam pada studi kasus ini menggunakan metode konstruksi *top-down*. Metode konstruksi *top-down* adalah metode konstruksi yang mana pekerjaan struktur atas dilakukan secara simultan dengan pekerjaan struktur bawah sehingga masa konstruksinya menjadi lebih singkat. Metode ini telah terbukti hampir merupakan satu-satunya metode yang paling tepat untuk konstruksi *basement* dalam skala besar pada area

perkotaan (Xie, 2006). **Gambar 1** menunjukkan ilustrasi tahapan konstruksi menggunakan metode konstruksi *top-down* yang pada umumnya sebagai berikut:

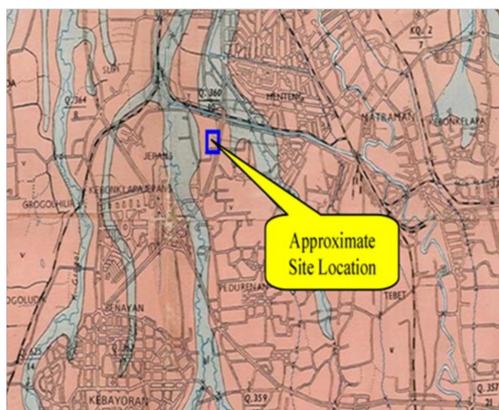
- Pemasangan dinding penahan
- Instalasi pondasi tiang dan kolom baja
- Penggalian pertama
- Pengecoran pelat lantai pertama
- Pembangunan superstruktur
- Penggalian kedua dan pengecoran pelat lantai kedua
- Penggalian dan pengecoran pelat lantai sampai kedalaman desain
- Pemasangan pelat pondasi dan selesaikan pekerjaan struktur bawah
- Dilanjutkan dengan pembangunan struktur atas hingga selesai



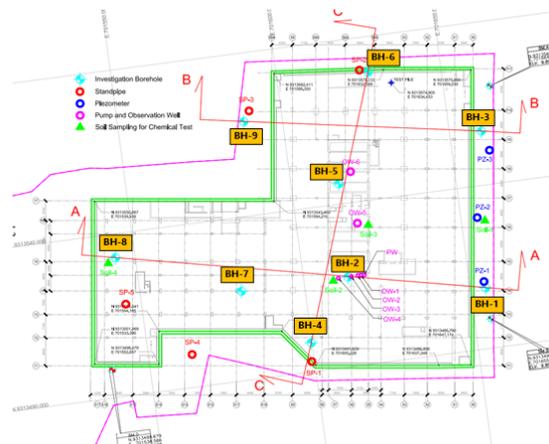
Gambar 1. Tahapan konstruksi *top down* (IStructE, 2004)

2.2 Kondisi geologi dan kondisi tanah

Berdasarkan peta geologi (**Gambar 2**) yang dipublikasikan oleh Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi (1992), diketahui bahwa lokasi pekerjaan galian ini berada pada area yang terdiri dari *quarter alluvium deposit* pada lapisan dasar dan *volcanic rock* yang dilapisi oleh *tertiary sediment*. Kondisi tanahnya didominasi oleh *young volcanic rock*. Tanah ini terdiri dari lempung bertufa dan pasir bertufa, konglomerat, dan deposit *mudflow*.



Gambar 2. Peta geologi lokasi tinjauan (Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1992)



Gambar 3. Persebaran titik pengeboran dalam

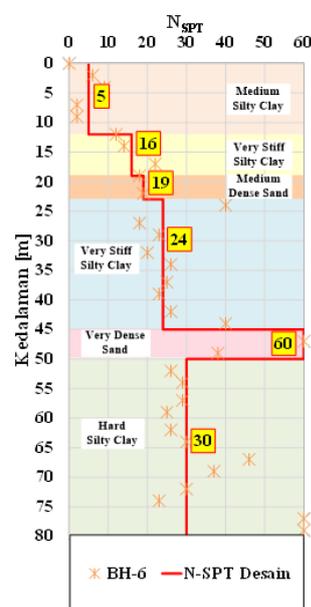
Pada lokasi ini dilakukan pengeboran dalam sebanyak 9 titik yang tersebar pada area galian yang dapat dilihat pada Gambar 3. Pengeboran dilakukan dengan menggunakan *automatic free-fall hammer* dengan berat standar 63,5 kg. Berdasarkan hasil pengeboran dalam tersebut, diketahui kondisi tanah didominasi oleh lapisan lempung kelanauan dengan konsistensi *medium-very stiff* dan diselingi oleh lapisan pasir *medium dense*. BH-6 digunakan sebagai acuan dalam memodelkan pelapisan tanah karena berada paling dekat dengan potongan yang digunakan sebagai acuan. Profil data N_{SPT} sepanjang kedalaman pengeboran ditampilkan pada Gambar 4.

Berdasarkan profil tersebut, terlihat bahwa lapisan tanah diawali oleh lapisan tanah *silty clay* berkonsistensi *medium* setebal 12 m. Kemudian, pelapisan tanah dilanjutkan oleh lapisan tanah *silty clay* berkonsistensi sangat teguh. Pada kedalaman -23 m dan -50 m lapisan tanah diselingi dengan lapisan tanah *sand*. Konsistensi tanah cenderung meningkat terhadap kedalaman.

2.3 Hasil pengujian laboratorium

Pengujian laboratorium dilakukan terhadap sampel-sampel tanah yang diambil pada saat pengeboran dalam. Pengujian laboratorium dilakukan untuk memperoleh informasi mengenai *index properties* dan *engineering properties* dari tanah. Pada Gambar 5, ditampilkan hasil uji *index properties* tanah terhadap kedalaman. Berat isi tanah diambil antara rentang 16 – 19 kN/m³ dalam melakukan analisis. Kadar air yang diperoleh berkisar 15 – 88%, sedangkan angka pori berkisar 0,36 – 2,16. Berat jenis tanah diperoleh berkisar 2,5 – 2,69. Kadar air dan angka pori tanah menunjukkan kecenderungan menurun seiring bertambahnya kedalaman. Sementara itu, derajat kejenuhan tanah cenderung stabil di angka 100% hampir di sepanjang kedalaman. Hal ini mengindikasikan tanah berada pada kondisi jenuh.

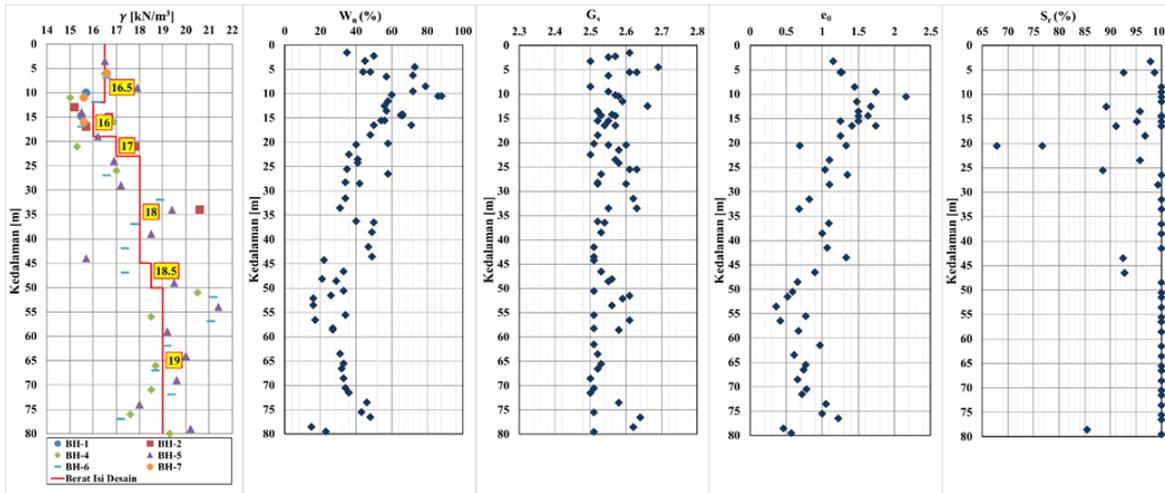
Rentang nilai batas-batas Atterberg ditampilkan pada Gambar 6. Berdasarkan gambar tersebut, dapat dilihat bahwa pada kedalaman bawah, kadar air tanah kurang lebih mencapai batas plastis. Artinya, kondisi tanah lapisan bawah berada pada kondisi plastis. Indeks plastisitas tanah berkisar antara 10 – 60, sedangkan indeks likuiditasnya berkisar antara 0 – 1,17. Pada



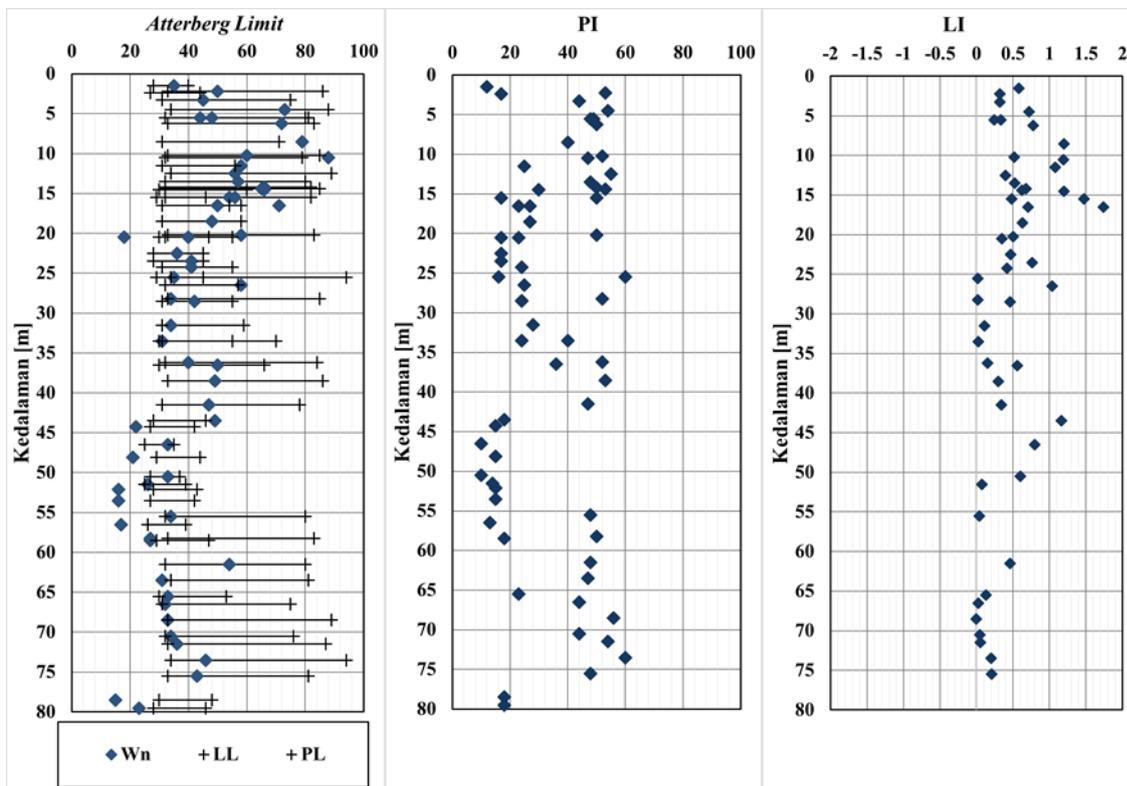
Gambar 4. Profil data N_{SPT} terhadap kedalaman berdasarkan BH-6

kedalaman sekitar 8,5 -16,5 m terlihat bahwa nilai indeks likuiditas lebih besar dari 1. Namun, data tersebut diabaikan karena dianggap kurang relevan dengan konsistensi tanah pada kedalaman tersebut. Dari *Cassagrande plasticity chart* yang ditampilkan pada Gambar 7, klasifikasi sampel tanah menurut *Unified Soil Classification System (USCS)* yaitu didominasi oleh tanah lempungan berplastisitas tinggi.

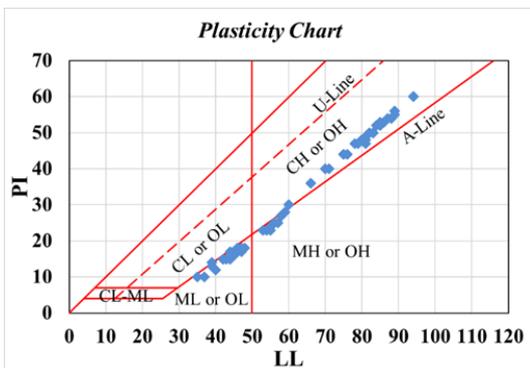
Pada penelitian ini, parameter kuat geser tanah diperoleh dari hasil uji Triaksial CU. Uji ini menghasilkan distribusi nilai kuat geser tak teralir (S_u) terhadap nilai N_{SPT} seperti yang dapat dilihat pada Gambar 8. Besarnya nilai S_u berada pada kisaran 2,5N – 10N, namun dalam analisis digunakan $S_u = 6N$. Berdasarkan studi yang telah dilakukan oleh Sorensen dan Okkels (2013), diperoleh korelasi antara kuat geser teralir dengan kuat geser tak teralir seperti yang dapat dilihat pada Gambar 9. Sampel tanah yang diuji cenderung berada pada area di atas rata-rata 0,2 C_u



Gambar 5. Hasil uji *index properties* terhadap kedalaman

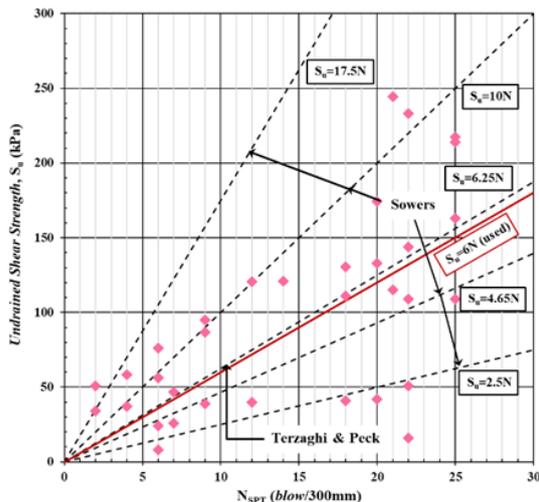


Gambar 6. Batas-batas atterberg terhadap kedalaman

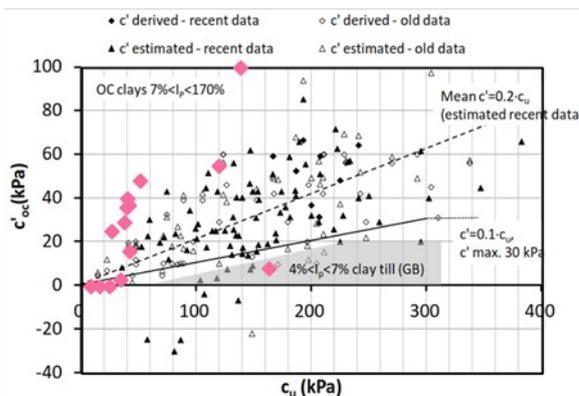


Gambar 7. Cassagrande plasticity chart

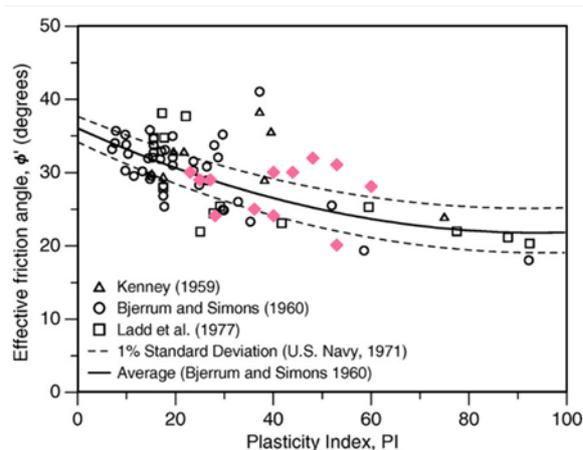
sehingga dalam analisis digunakan korelasi $c' = 0,2 C_u$. Besaran sudut geser efektif erat kaitannya dengan indeks plastisitas tanah karena sudut geser efektif merupakan fungsi dari indeks plastisitas tanah. Telah banyak peneliti yang mengumpulkan data terkait distribusi sudut geser efektif terhadap indeks plastisitas tanah. Setelah diplotkan pada kumpulan data hasil studi terdahulu tersebut (**Gambar 10**), diperoleh bahwa sampel tanah yang diuji memiliki sudut geser efektif dengan rentang $20^\circ - 34^\circ$. Namun, khusus untuk tanah pasir, nilai sudut geser efektif dapat digunakan lebih besar.



Gambar 8. Distribusi kuat geser tak teralir terhadap N_{SPT}



Gambar 9. Korelasi kuat geser teralir dengan kuat geser tanah tak teralir



Gambar 10. Distribusi sudut geser efektif terhadap indeks plastisitas

3. Analisis dengan Metode Elemen Hingga

Metode Elemen Hingga (MEH) merupakan salah satu metode yang banyak digunakan dalam pemodelan numerik. Pemodelan numerik sendiri lazim dipilih sebagai pendekatan dalam memodelkan permasalahan

geoteknik, terlebih lagi jika permasalahannya berkaitan erat dengan urutan konstruksi dan bersifat kompleks. Untuk saat ini, analisis elemen hingga telah berkembang tidak hanya sebatas pada model 2-Dimensi (2D), melainkan dapat juga dimodelkan secara 3-Dimensi (3D). Pemilihan model 2D ataupun 3D disesuaikan dengan kebutuhan permasalahan yang akan dikaji.

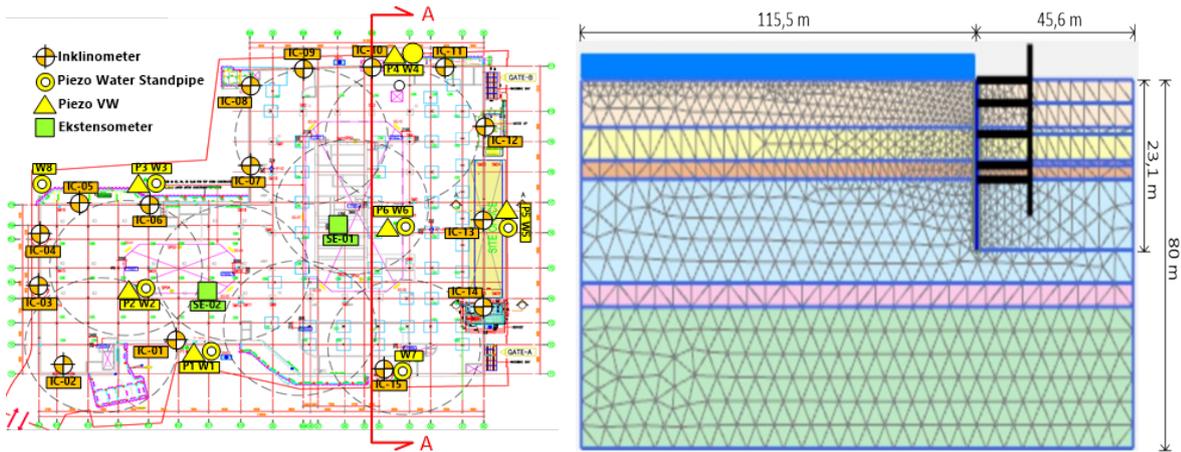
Pada kasus galian dalam, ada kalanya pemodelan cukup dilakukan secara 2D. Namun, ada kalanya juga perlu dilakukan analisis 3D untuk meminimalisir pergerakan tanah maksimum. Menurut Ou dkk. (1996), analisis 3D dapat memodelkan perilaku defleksi pada dinding pada saat masa penggalian secara lebih akurat dibandingkan dengan analisis 2D. Terdapat suatu istilah *plane strain ratio* (PSR) yang merepresentasikan hubungan antara hasil analisis 3D dengan 2D. PSR ini merupakan rasio antara defleksi maksimum dinding pada kondisi 3D dengan defleksi maksimum pada kondisi 2D. Nilai PSR ini mengindikasikan seberapa efek 3D berpengaruh terhadap suatu pemodelan galian. Jika nilai PSR tinggi, maka hal itu mengindikasikan bahwa efek 3D tidak terlalu berpengaruh. Sebaliknya, jika nilai PSR rendah, maka efek 3D sangat signifikan pada pemodelan galian tersebut.

3.1 Pemodelan geometri galian dan urutan konstruksi

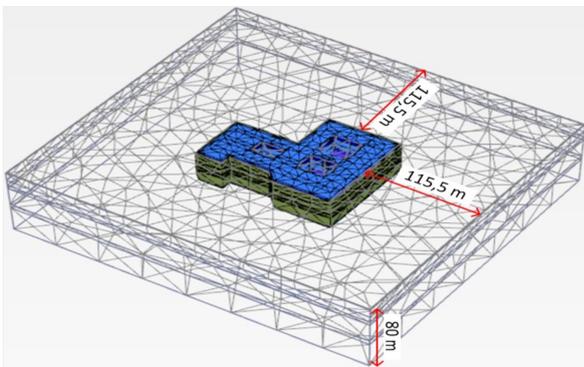
Pada PLAXIS 2D, pemodelan menggunakan tipe elemen *15-node triangular elements*, sedangkan pada pemodelan pada PLAXIS 3D menggunakan tipe elemen *10-node quadratic tetrahedral elements*. Pemodelan geometri galian pada analisis 2D menggunakan potongan A-A seperti yang ditunjukkan pada Gambar 11. Lebar galian dimodelkan setengah dari lebar total galian, yaitu 45,6 m. Kedalaman tanah dimodelkan hingga 80 m. Lebar area di luar galian (di belakang dinding) dimodelkan selebar 5 kali kedalaman galian (23,1 m), yaitu 115,5 m. Gambar 12 memperlihatkan pemodelan galian secara 3D. Geometri galian pada analisis 3D dimodelkan secara keseluruhan.

Galian sedalam -23.1 m ini dibagi menjadi 4 tahap galian. Instalasi pelat lantai pada basement 1, 3, dan 5 diabaikan. Hal ini dilakukan karena pertimbangan demi kemudahan akses pada saat pekerjaan berlangsung. Elevasi tanah dasar berada pada -2,00 m, sedangkan elevasi muka air tanah berada pada kedalaman -6.00 m. Pada area luar galian terdapat beban timbunan setinggi 2 m yang dimodelkan sebesar 30 kPa. Profil urutan galian dan kondisi pelapisan tanah ditunjukkan pada Gambar 13.

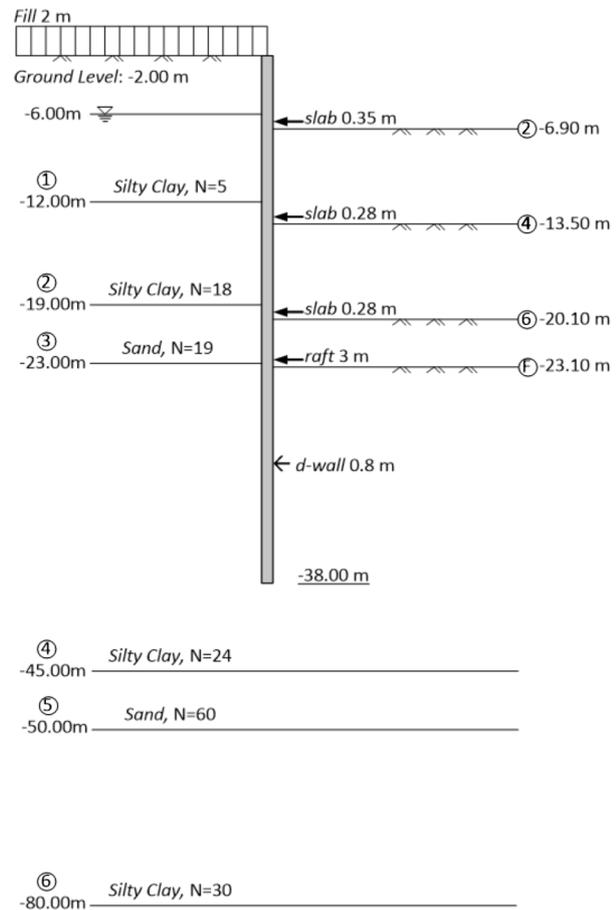
Sebelum dilakukan galian, terlebih dahulu dilakukan *dewatering*. Pemodelan *dewatering* dilakukan dengan menggunakan *-z-method*. Dengan menggunakan metode ini, *phreatic line* digambarkan secara manual dari area luar galian hingga area galian dengan elevasi muka air di area galian diturunkan 1 m di bawah elevasi galian. Dengan demikian, volume tanah yang hendak digali telah berada pada kondisi *dry*. Setelah itu, baru dilakukan tahap galian disertai pemasangan pelat lantai sampai kedalaman galian yang didesain.



Gambar 11. Geometri galian dan pemodelan 2D menggunakan potongan A-A



Gambar 12. Pemodelan geometri galian secara 3D



Gambar 13. Profil urutan galian dan kondisi pelapisan tanah

3.2 Parameter input tanah

Analisis dilakukan dengan menggunakan model material *Hardening Soil*. Parameter yang digunakan diperoleh dari hasil pengujian laboratorium yang telah dijabarkan pada subbab sebelumnya. Pada analisis balik kemudian dilakukan iterasi parameter untuk memperoleh hasil defleksi dinding sesuai dengan hasil pengukuran inclinometer. Pada pemodelan menggunakan model *Hardening Soil*, parameter kekakuan tanah terdiri dari 3 jenis modulus, yaitu E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , dan E_{ur}^{ref} . Hubungan antara ketiga nilai modulus tersebut, dijabarkan pada **Persamaan (1)** dan **Persamaan (2)**.

$$E_{oed}^{ref} = 0,7E_{50}^{ref}$$

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$$

Nilai koefisien tanah at rest (K_0) diperoleh dengan menggunakan persamaan empirik dari Mayne dan Kulhawy (1982) seperti yang dijabarkan pada **Persamaan (3)**.

$$K_0 = (1 - \sin \phi') OCR \sin \phi'$$

Resume parameter input tanah yang digunakan dirangkumkan pada **Tabel 1**.

3.3 Parameter input elemen struktur

Elemen struktur dimodelkan sebagai material linear elastik. Pada analisis 2D dan 3D, dinding dimodelkan menggunakan *plate elements*. Slab lantai dimodelkan menggunakan *fixed-end anchor* pada analisis 2D, sedangkan pada analisis 3D dimodelkan menggunakan *plate elements*. Dinding diafragma yang digunakan sebagai sistem penahan berdiameter 0,8 m. Instalasi

Tabel 1. Parameter input tanah

Depth	Soil Type	Consistency	N _{SPT}	g	c'	f'	ψ'	E ₅₀ ^{ref}	E _{oed} ^{ref}	E _{ur} ^{ref}	v _{ur}	m	OCR	K ₀	R _f	R _{inter}
m				kN/m ³	kN/m ²	°	°	kPa	kPa	kPa						
0 - 12	Silty Clay	Medium	5	16,5	6,0	27	0	7500	5250	22500	0,2	1	2,4	0,81	0,9	0,7
12 - 19	Silty Clay	Very Stiff	18	16	21,6	28	0	27000	18900	81000	0,2	0,75	2	0,73	0,9	0,7
19 - 23	Sand	Medium Dense	19	17	15,0	32	2	14250	9975	42750	0,2	0,5	1,85	0,65	0,9	0,7
23 - 45	Silty Clay	Very Stiff	24	18	28,8	28	0	105600	73920	316800	0,2	0,75	1,5	0,64	0,9	0,7
45 - 50	Sand	Very Dense	60	18,5	50,0	42	12	300000	210000	900000	0,2	0,5	1,45	0,42	0,9	0,7
50 - 80	Silty Clay	Hard	30	19	36,0	30	0	150000	105000	450000	0,2	0,75	1,4	0,59	0,9	0,7

Tabel 2. Parameter input dinding diafragma pada PLAXIS 2D

d	EA	EI	v
m	kN/m	kNm ² /m	
0,8	1,34x10 ⁷	7,17x10 ⁵	0,20

Tabel 3. Parameter input slab lantai pada PLAXIS 2D

Structure	d	EA	L _{spacing}
	m	kN/m	m
Slab B0	0,28	4,70x10 ⁶	1
Slab B2	0,35	5,88x10 ⁶	1
Slab B4, B6	0,28	4,70x10 ⁶	1
Raft	3	5,04x10 ⁷	1

Tabel 4. Parameter input dinding diafragma pada PLAXIS 3D

d	E _c	G
m	kN/m ²	kN/m ²
0,8	1,68x10 ⁷	7,00x10 ⁶

dinding dilakukan hingga kedalaman -38 m, yaitu duduk pada lapisan *silty clay* dengan konsistensi sangat teguh. Parameter input dinding yang digunakan dalam analisis 2D dan 3D masing-masing dijabarkan pada Tabel 2 dan Tabel 4.

Ketebalan slab lantai pada kasus galian ini cenderung lebih tebal dibandingkan dengan tebal slab lantai pada umumnya. Hal ini dikarenakan beban yang dipikul slab lantai lebih besar akibat adanya konstruksi slab lantai yang diabaikan, yaitu slab lantai 1, 3, dan 5 seperti yang telah disebutkan sebelumnya. Ketebalan setiap slab lantai dan parameter input slab lantai pada analisis 2D dan 3D dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 5. Pada analisis, parameter kekakuan baik dinding maupun slab lantai direduksi sebesar 20% untuk mengakomodir adanya keretakan beton pada saat pekerjaan galian.

Tabel 6. Perbandingan parameter tanah setelah dilakukan iterasi

Depth	Soil Type	Consistency	N _{SPT}	Hasil Back Analysis 2D			Hasil Iterasi 3D		
				E ₅₀ ^{ref}	E _{oed} ^{ref}	E _{ur} ^{ref}	E ₅₀ ^{ref}	E _{oed} ^{ref}	E _{ur} ^{ref}
m				kPa	kPa	kPa	kPa	kPa	kPa
0 - 12	Silty Clay	Medium	5	7500	5250	22500	1500	1050	4500
12 - 19	Silty Clay	Very Stiff	18	27000	18900	81000	5400	3780	16200
19 - 23	Sand	Medium Dense	19	14250	9975	42750	2850	1995	8550

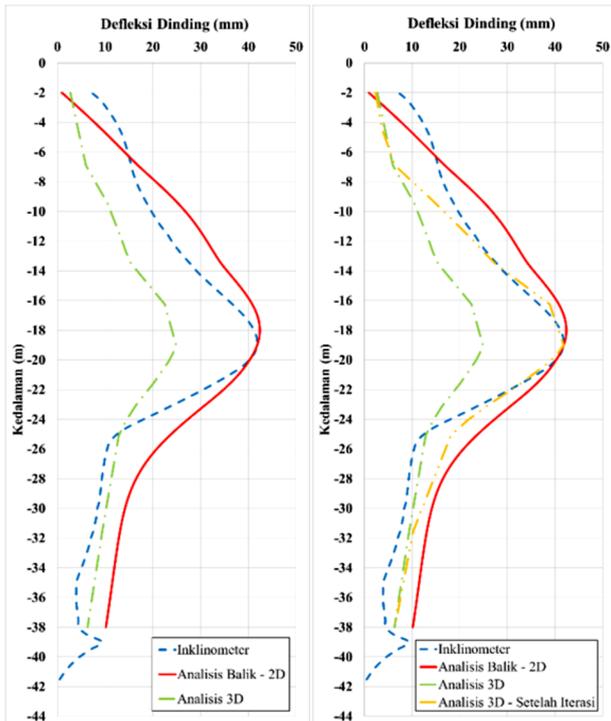
Tabel 5. Parameter input slab lantai pada PLAXIS 3D

Structure	d	g	E _c	G
	m	kN/m ³	kN/m ²	kN/m ²
Slab B0	0,28	24	1,68x10 ⁷	7,00x10 ⁶
Slab B2	0,35	24	1,68x10 ⁷	7,00x10 ⁶
Slab B4, B6	0,28	24	1,68x10 ⁷	7,00x10 ⁶
Raft	3	24	1,68x10 ⁷	7,00x10 ⁶

4. Hasil dan Diskusi

Berdasarkan hasil analisis balik (analisis 2D) dengan mengacu kepada hasil inklinometer, diperoleh parameter tanah seperti yang dirangkum pada Tabel 1. Parameter hasil analisis balik 2D tersebut telah menghasilkan kurva defleksi yang mendekati hasil inklinometer. Parameter tersebut kemudian digunakan sebagai parameter input pada analisis 3D. Gambar 14 (a) menunjukkan perbandingan defleksi dinding antara hasil analisis balik 2D, hasil pengukuran di lapangan, dan hasil analisis 3D. Berdasarkan perbandingan tersebut, terlihat bahwa dengan menggunakan parameter input yang sama, analisis 3D menghasilkan defleksi dinding diafragma yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan hasil analisis balik maupun hasil pengukuran pada kedalaman -2 m hingga -23 m. Defleksi maksimum hasil pengukuran inklinometer mencapai 41,8 mm dan analisis balik menghasilkan defleksi maksimum 42,4 mm. Sementara itu, analisis 3D menghasilkan defleksi maksimum sebesar 24,8 mm. Analisis ini menghasilkan nilai *plane strain ratio* (PSR) sebesar 0,59 yang tergolong kecil sehingga pada kasus ini, dapat dikatakan efek 3D cukup signifikan.

Untuk memperoleh defleksi dinding diafragma yang sesuai dengan hasil pengukuran inklinometer, pada analisis 3D dilakukan iterasi parameter tanah pada sepanjang kedalaman yang menghasilkan defleksi yang *underestimated*. Gambar 14(b) memperlihatkan defleksi



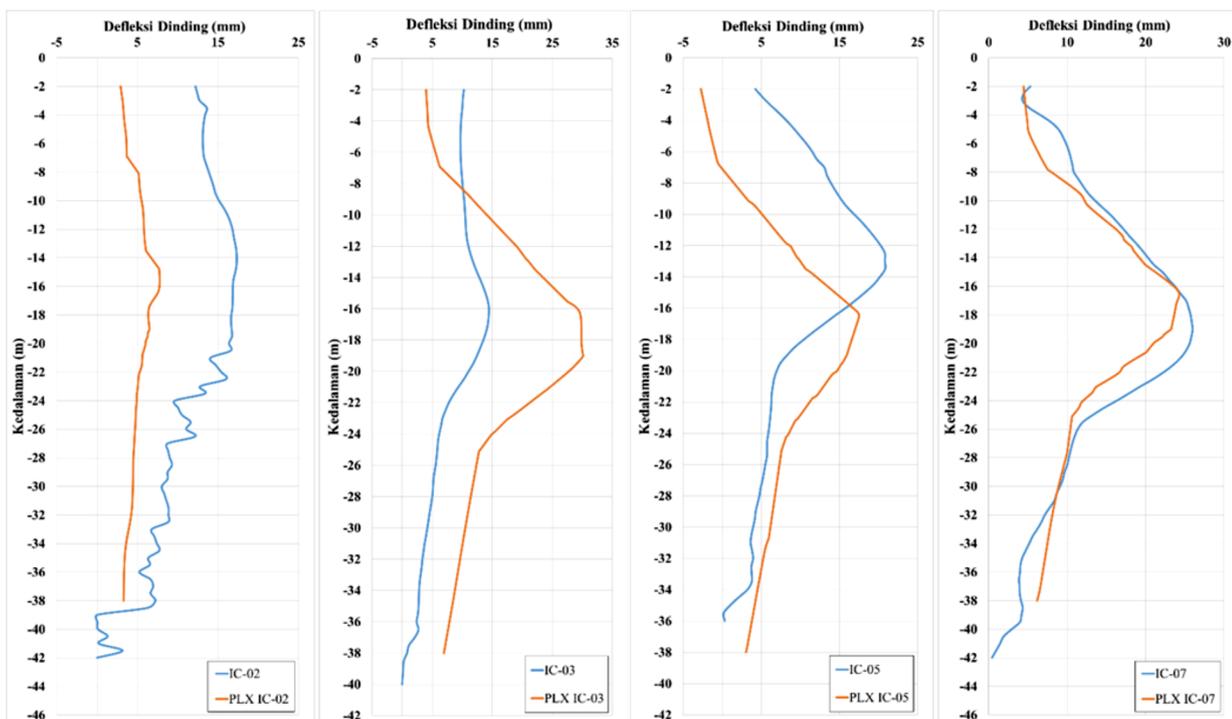
Gambar 14. Defleksi dinding (a) hasil analisis 3D (b) hasil analisis 3D setelah dilakukan iterasi

dinding diafragma setelah dilakukannya iterasi parameter. Perbandingan parameter modulus tanah hasil analisis balik dengan hasil setelah dilakukannya iterasi ditunjukkan pada Tabel 6. Berdasarkan hasil iterasi tersebut, terlihat bahwa nilai modulus tanah pada analisis 3D perlu direduksi hingga mencapai 80% agar diperoleh defleksi dinding diafragma yang sesuai dengan hasil pengukuran inclinometer. Defleksi

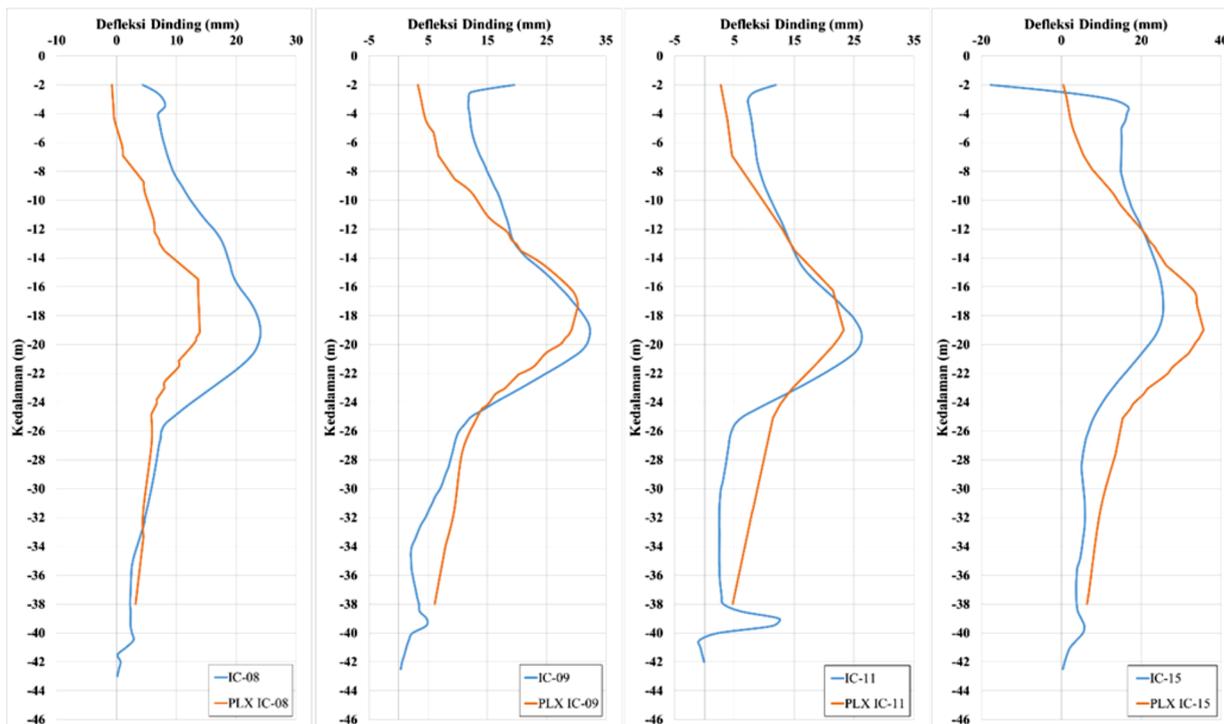
dinding maksimum yang diperoleh setelah dilakukan iterasi yaitu 41,8 mm.

Gambar 15 dan Gambar 16 menunjukkan perbandingan hasil analisis dengan hasil pengukuran lapangan pada area dinding lainnya yang mana pada area tersebut juga dipasang inclinometer. Posisi pemasangan inclinometer pada area dinding diafragma telah ditunjukkan pada Gambar 11. Berdasarkan hasil analisis, dapat dilihat bahwa defleksi dinding pada bagian yang dekat dengan sudut galian cenderung kecil. Contohnya, pada posisi IC-11, defleksi maksimum yang diperoleh dari analisis yaitu 23,3 mm, sedangkan pada posisi IC-10 (Gambar 14(b)) diperoleh defleksi maksimum 41,8 mm. Hal ini menunjukkan adanya efek pengakuan pada sudut galian. Di samping itu, analisis menghasilkan perbedaan defleksi pada beberapa titik tinjauan jika dibandingkan dengan hasil inclinometer pada lokasi tersebut, seperti yang dapat dilihat pada titik IC-02, IC-03, dan IC-05. Perbedaan defleksi pada beberapa titik tinjauan tersebut terjadi karena pelapisan tanah pada seluruh area galian diasumsikan dan dimodelkan homogen dengan pertimbangan kemudahan dalam pemodelan. Penyederhanaan lapisan tanah memberikan dampak terhadap defleksi dinding karena defleksi dinding dipengaruhi oleh salah satunya faktor jenis tanah.

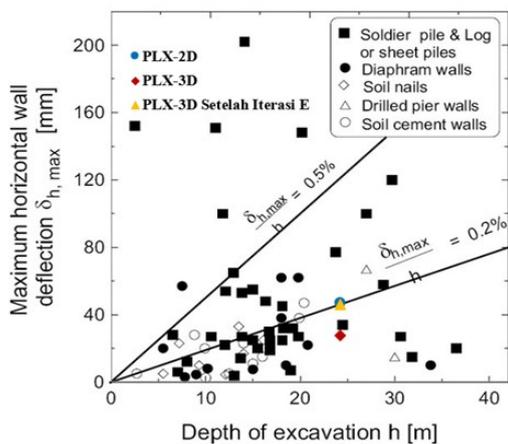
Selain faktor jenis tanah, defleksi dinding juga dipengaruhi oleh faktor kedalaman galian. Terdapat beberapa studi terdahulu yang telah melakukan kajian terkait pengaruh kedalaman galian terhadap defleksi dinding diafragma, di antaranya: Clough & O'Rourke (1990) dan Ou dkk. (1993). Berdasarkan studi tersebut, diketahui bahwa defleksi dinding akan meningkat seiring dengan semakin dalamnya galian. Prediksi besarnya defleksi tanah berdasarkan studi tersebut, yaitu (0,2 – 0,5)% dari kedalaman galian. Analisis 2D,



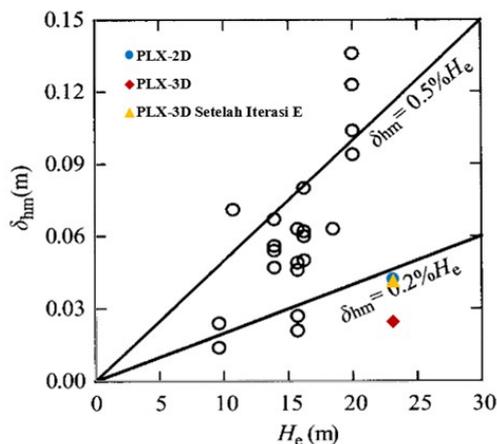
Gambar 15. Perbandingan defleksi hasil analisis dengan hasil pengukuran IC-02, IC-03, IC-05, dan IC-07



Gambar 16. Perbandingan defleksi hasil analisis dengan hasil pengukuran IC-08, IC-09, IC-11, dan IC-15



Gambar 17. Hubungan defleksi dinding dengan kedalaman galian (Clough & O'Rourke, 1990)



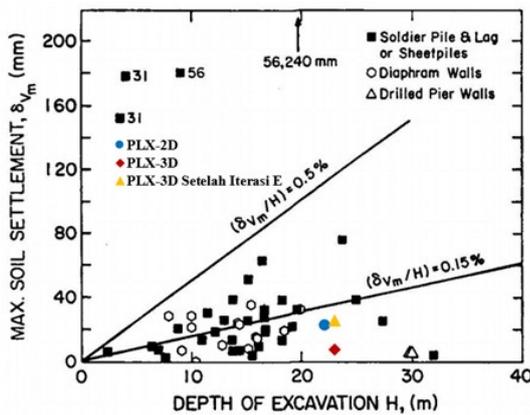
Gambar 18. Hubungan defleksi dinding dengan kedalaman galian (Ou dkk., 1993)

3D, dan 3D setelah dilakukan iterasi pada penelitian ini masing-masing menghasilkan defleksi maksimum 42,4 mm; 24,9 mm; dan 41,8 mm. Hasil analisis tersebut diplotkan pada grafik hubungan defleksi dinding diafragma dan kedalaman galian seperti yang terlihat pada Gambar 17 dan Gambar 18. Berdasarkan kedua gambar tersebut, dapat dilihat bahwa perbandingan defleksi dinding diafragma dengan kedalaman galian (δ_{hm}/H_e) berkisar 0,2%. Hasil ini mengindikasikan bahwa defleksi dinding diafragma hasil analisis berada pada batas bawah yang dikemukakan oleh Clough & O'Rourke (1990) dan Ou dkk. (1993). Di sisi lain, terlihat bahwa analisis 3D sebelum dilakukan iterasi menghasilkan rasio δ_{hm}/H_e yang lebih kecil dari batas bawah yang artinya terjadi *underestimation*.

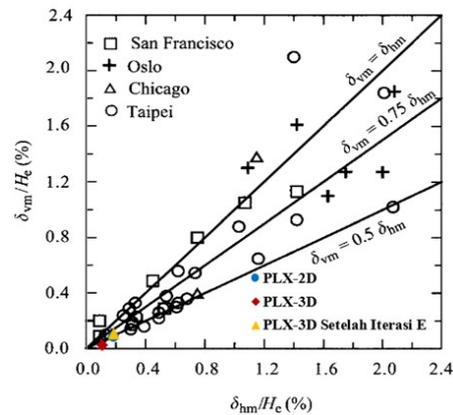
Profil deformasi tanah pada area sekitar dinding diafragma ditunjukkan pada Gambar 19. Analisis balik menghasilkan deformasi maksimum 22,1 mm. Analisis 3D menghasilkan deformasi maksimum 8,4 mm dan setelah dilakukan iterasi analisis 3D menghasilkan deformasi maksimum 26,5 mm. Berdasarkan gambar tersebut juga terlihat bahwa deformasi tanah cenderung menurun seiring dengan bertambahnya jarak dari dinding diafragma. Sama halnya dengan defleksi dinding diafragma, jika deformasi tanah hasil analisis diplotkan pada grafik hubungan antara deformasi tanah dengan kedalaman galian (Gambar 20 dan Gambar 21) juga diperoleh bahwa analisis 3D sebelum dilakukan iterasi menghasilkan rasio deformasi tanah dengan kedalaman galian (δ_{vm}/H_e) lebih kecil daripada rentang yang diusulkan. Hal ini semakin menguatkan kesimpulan bahwa pada kasus galian ini, dengan menggunakan parameter input yang sama, analisis 3D menghasilkan defleksi maupun deformasi tanah yang jauh lebih kecil dibandingkan dengan analisis 2D. Oleh karena itu,



Gambar 19. Profil deformasi tanah di sekitar dinding



Gambar 20. Hubungan deformasi tanah dengan kedalaman galian (Clough & O'Rourke, 1990)



Gambar 21. Hubungan deformasi tanah dengan kedalaman galian (Ou dkk., 1993)

perlu dilakukan penyesuaian parameter jika hendak menggunakan parameter 2D untuk melakukan analisis 3D.

5. Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Hal-hal yang dapat disimpulkan pada penelitian ini:

1. Analisis 3D menghasilkan defleksi dinding diafragma dan deformasi tanah yang *underestimated* dibandingkan dengan analisis 2D dengan menggunakan parameter input yang sama. Hal ini dapat disebabkan akibat *plane strain ratio* (PSR) yang mengindikasikan bahwa efek 3D cukup signifikan pada kasus galian ini.
2. Perlu adanya penyesuaian parameter tanah jika hendak menggunakan parameter input 2D dalam analisis 3D. Berkaca dari kasus galian ini, nilai modulus tanah direduksi hingga mencapai 80% dari parameter 2D agar diperoleh defleksi dinding diafragma yang mirip dengan hasil 2D dan pengukuran inclinometer.
3. Defleksi dinding diafragma dan deformasi tanah di sekitar dinding diafragma berkaitan erat dengan kedalaman galian. Hal ini terbukti dari grafik hubungan defleksi dan deformasi tanah dengan kedalaman galian yang dikemukakan oleh Clough

& O'Rourke (1990) dan Ou dkk. (1993). Hasil analisis yang dilakukan menghasilkan rentang perbandingan yang sesuai.

4. Selain kedalaman galian, defleksi dinding juga dipengaruhi oleh jenis tanah.
5. Deformasi tanah cenderung menurun seiring dengan semakin bertambahnya jarak dari dinding diafragma.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan untuk penelitian lebih lanjut, yaitu:

1. Dalam melakukan analisis balik ataupun verifikasi, sebaiknya dilakukan dengan ketersediaan data pengukuran lapangan (*monitoring*) yang lebih lengkap sehingga dapat memverifikasi secara lebih mendetail.
2. Dalam melakukan pemodelan menggunakan metode elemen hingga, sebaiknya mengikuti urutan konstruksi yang dilengkapi dengan jadwal konstruksi untuk memperoleh hasil yang lebih baik.
3. Kondisi pelapisan tanah sebaiknya dimodelkan sesuai dengan data penyelidikan tanah terdekat pada tiap zona galian agar diperoleh hasil defleksi dinding yang lebih representatif terhadap kondisi lapisan tanah pada tiap zona.

Daftar Pustaka

- Clough, G. W., dan O'Rourke, T. D., 1990, Construction-Induced Movements of Insitu Walls, *Proceedings of Design and Performance of Earth Retaining Structures*, ASCE, 25, 439-470.
- Finno, R. J., Blackburn, J. T., dan Roboski, J. F., 2007, Three-Dimensional Effects for Supported Excavations in Clay, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 133(1), 30-36.
- Mayne, P. dan Kulhawy, F., 1982, K_0 – OCR Relationship in Soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 108(6), 851-872.
- Moormann, C. dan Katzenbach, R., 2002, Three-Dimensional Effects of Deep Excavations with Rectangular Shape, *Proceedings of Second International Conference on Soil-Structure Interaction*, Zurich, 7-8 March 2002, 1, 135-142.
- Ou, C. Y., 2006, *Deep Excavation Theory and Practice*, Netherlands: Taylor & Francis/Balkema.
- Ou, C. Y. dan Shiau, B. Y., 1998, Analysis of the Corner Effect on Excavation Behaviour, *Canadian Geotechnical Journal*, 35, 532-540.
- Ou, C. Y., Chiou, D. C., dan Wu, T. S., 1996, Three-Dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 122(5), 337-345.
- Ou, C. Y., Hsieh, P. G., dan Chiou, D. C., 1993, Characteristics of Ground Surface Settlement During Excavation, *Canadian Geotechnical Journal*, 30, 758-767.
- Ou, C. Y., Liao, J. T., dan Cheng, W. L., 2000, Building Response and Ground Movements Induced by A Deep Excavation, *Geotechnique*, 50(3), 209-220.
- Sorensen, K. K., dan Okkels, N., 2013, Correlation between Drained Shear Strength and Plasticity Index of Undisturbed Overconsolidated Clays, *Proceedings of The 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Paris, 2013.
- The Institution of Structural Engineers (IStructE), 2004, *Design and Construction of Deep Basements Including Cut-and-Cover Structures*, United Kingdom.
- Turkandi, T. dkk., 1992, Peta Geologi Lembar Jakarta dan Kepulauan Seribu, Jawa, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Wang, J. H., Xu, Z. H., dan Wang, W. D., 2010, Wall and Ground Movements Due to Deep Excavations in Shanghai Soft Soils, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 136 (7), 985-994.
- Xie, X. Y., Li, Y. S., dan Huang, H.W., 2006, Settlement Analysis in Deep Excavations by Top-Down Construction in Soft Soils Using FEM, *Proceedings of GeoShanghai International Conference 2006*, Shanghai, 6-8 June 2006, 401-408.

