

# Studi Komparasi Analisis Numerik 2D dan 3D pada Kasus Galian Dalam di Jakarta Pusat dengan Metode Elemen Hingga

Comparative Study of 2D and 3D Numerical Analysis of Deep Excavation Cases in Central Jakarta using the Finite Element Method

Muhammad Dwiyanto Agung Prakasa<sup>1,a)</sup>, Muh. Sucitra Amansah<sup>2)</sup>, Istiawati Darwis<sup>3)</sup>

<sup>1,2,3)</sup> Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Ujung Pandang

Koresponden: <sup>a)</sup> [dwiyantoagung@poliupg.ac.id](mailto:dwiyantoagung@poliupg.ac.id)

## ABSTRAK

Penelitian ini menyajikan sebuah kasus galian dalam di Jakarta Pusat dengan metode konstruksi *top-down* dengan kedalaman galian 24,85 m, lebar galian 21 m, dan panjang area galian adalah 190 m. Dinding diafragma dengan tebal 1,2 m dan panjang 33,7 m digunakan sebagai dinding penahan tanah yang didukung dengan 4 tingkat plat lantai beton. Simulasi numerik dengan metode elemen hingga 3D menggunakan model MC Undrained B dilakukan pada kasus ini. Hasil yang diperoleh kemudian divalidasi dengan data pengukuran deformasi dinding di lapangan yang kemudian dibandingkan dengan hasil analisis 2D yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya untuk mengetahui pengaruh 3D pada kasus galian dalam di Jakarta. Dalam rangka memperoleh satu set parameter tanah yang memiliki performa yang andal, sebuah evaluasi parameter tanah dilakukan dengan metode *back-analysis* terhadap data monitoring lapangan untuk menghasilkan parameter tanah yang dapat digunakan sebagai referensi dalam merencanakan kasus galian dalam pada tanah lunak di Jakarta Pusat.

**Kata kunci :** Galian Dalam, 2D, 3D, Jakarta, Metode Elemen Hingga

## PENDAHULUAN

Sebagai ibukota negara yang berkembang dengan jumlah penduduk hingga 10 juta, Jakarta saat ini mengalami kemacetan yang sangat parah. Minimnya lahan yang tersedia mengakibatkan peningkatan fasilitas transportasi umum di darat juga terbatas sehingga pembangunan infrastruktur ruang bawah tanah dilakukan. Masifnya konstruksi infrastruktur bawah tanah saat ini menjadikan studi di area galian dalam di Jakarta sedang dilakukan oleh beberapa peneliti. Dalam kasus galian dalam di daerah urban, deformasi dinding merupakan salah satu aspek penting yang mampu mengganggu bangunan di sekitar

jika nilai deformasi dinding akibat galian yang dihasilkan melebihi nilai yang diizinkan. Pengaruh galian dalam terhadap deformasi dinding telah diteliti oleh beberapa peneliti di dunia (Abdi & Ou, 2022; Finno et al., 2015; Hsieh & Ou, 1998; Ou et al., 1996). Ada beberapa faktor yang dapat memengaruhi deformasi dinding akibat galian seperti kedalaman galian, lebar galian, jenis tanah, panjang dinding, kekakuan dinding, jenis support yang digunakan hingga pengaruh sudut (Ou, 2022). Di Jakarta, penelitian pada kasus galian dalam telah dilakukan dalam beberapa tahun terakhir (Agung et al., 2019; Kosasi et al., 2018; Lim et al., 2019; Rus & Soeparlan, 2021; F. Teng et al., 2023; F. C. Teng et al., 2019). Minimnya data

pengamatan terhadap deformasi dinding, penurunan tanah, hingga data tanah dengan kualitas dan kuantitas yang baik menjadikan riset pada bidang ini terus dilakukan agar mendapatkan temuan yang dapat diandalkan sehingga dapat menjadi referensi untuk penelitian ataupun perencanaan kedepannya.

Metode elemen hingga atau lebih dikenal dengan istilah *finite element method* (FEM) merupakan salah satu pendekatan numerik yang sering digunakan dalam menganalisis kasus – kasus geoteknik khususnya kasus galian dalam. Metode ini sangat membantu dalam mengestimasi serta menganalisis deformasi dinding yang terjadi pada setiap tahapan konstruksi, karena mampu menghemat waktu dan biaya dalam proses analisis. Beberapa peneliti telah menggunakan FEM dalam menganalisis galian pada beberapa tahun terakhir (Agung et al., 2019; Harahap & Ou, 2020; F. Teng et al., 2023) dan mendapatkan hasil yang dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan desain ataupun penelitian selanjutnya.

Pada praktik perencanaan, pendekatan 2D (dua dimensi) FEM lebih sering dilakukan karena keterbatasan biaya dan waktu. Akan tetapi, pendekatan 3D (tiga dimensi) FEM telah dilakukan untuk menganalisis pengaruh 3D pada kasus galian dalam. Efek sudut atau disebut *corner effect* pada kasus galian dalam mampu memengaruhi deformasi dinding yang dihasilkan, perilaku dinding penahan yang terletak dekat sudut menghasilkan defleksi yang jauh lebih kecil daripada bagian tengah (Hsiung et al., 2018; Ou & Shiau, 1998) dan efek tersebut hanya mampu dianalisis dengan pendekatan 3D.

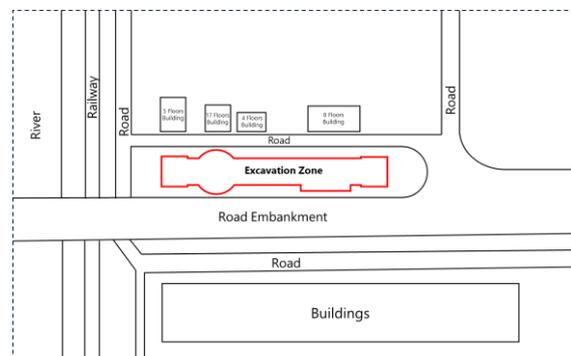
Studi ini menampilkan analisis 3D dengan pendekatan metode elemen hingga pada sebuah kasus galian dalam di Jakarta Pusat untuk mengetahui pengaruh 3D pada kasus galian dalam. Selanjutnya, hasil model numerik yang dihasilkan kemudian divalidasi dengan data monitoring deformasi dinding yang terjadi dan dibandingkan dengan hasil 2D yang telah

dilakukan oleh Kosasi et al. (2018) dan F. C. Teng et al. (2019). Pada akhirnya, pengaruh 3D, referensi model numerik, dan parameter tanah untuk memodelkan kasus galian di Jakarta akan dihasilkan dan dapat digunakan sebagai referensi maupun acuan dalam merencanakan ataupun mengevaluasi desain galian dalam di Jakarta maupun di Indonesia.

## METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode penelitian komputasi atau metode numerik dengan pendekatan elemen hingga 3D untuk menganalisis perilaku deformasi dinding pada kasus galian dalam dan membandingkan hasil yang diperoleh dengan pendekatan 2D yang telah diteliti sebelumnya oleh Kosasi (2018), Kosasi et al. (2018), dan F. C. Teng et al. (2019). Analisis numerik yang dilaksanakan menggunakan data sekunder dan menerapkan metode *back analysis* terhadap data deformasi dinding di lapangan. Data sekunder yang digunakan adalah data kondisi geologis tanah pada kasus yang ditinjau, profil struktur galian dalam, tahapan konstruksi struktur galian dalam dan data monitoring lapangan mengenai deformasi dinding penahan tanah.

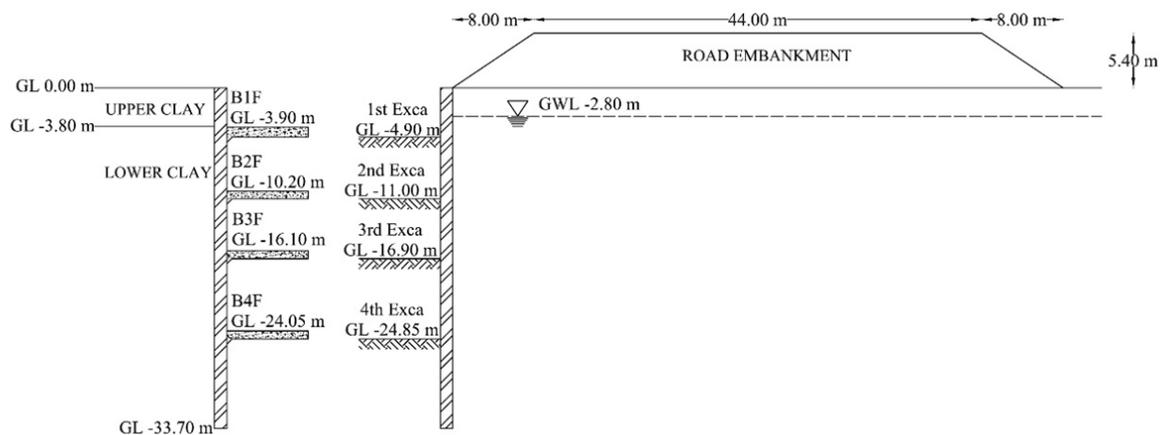
### Deskripsi Proyek



**Gambar 1.** Denah Lokasi Kasus Galian Dalam di Jakarta Pusat

Sebuah kasus galian dalam yang tidak simetris di Jakarta Pusat digunakan pada studi ini. Gambar 1 menunjukkan denah lokasi dari kasus galian dalam yang ditinjau. Sebuah timbunan jalan dengan tinggi 3,1 m dan total lebar 60 m terletak

disamping kasus galian dalam yang ditinjau. Kedalaman galian adalah 24,85 m, lebar galian adalah 21 m, dan panjang area galian adalah 190 m. Proyek galian dalam yang ditinjau menggunakan dinding diafragma sebagai dinding penahan tanah. Tebal dinding diafragma adalah 1,2 m dan total panjang dinding adalah 33,7 m. Kasus galian dalam ini didukung oleh 4 buah plat lantai beton. Gambar 2 menampilkan detail konstruksi kasus galian dalam yang ditinjau.



**Gambar 2.** Detail Konstruksi Kasus Galian Dalam yang Ditinjau (Agung et al., 2019)

**Tabel 1.** Tahapan Konstruksi Pada Kasus Galian Dalam yang Ditinjau

No	Tahapan Konstruksi
1	Instalasi dinding penahan tanah
2	Galian tahap pertama hingga kedalaman El. -4,90 m
3	Konstruksi plat lantai B1F El. -3,90 m
4	Galian tahap kedua hingga kedalaman El. -11,00 m
5	Konstruksi plat lantai B2F El. -10,20 m
6	Galian tahap ketiga hingga kedalaman El. -16,90 m
7	Konstruksi plat lantai B3F El. -16,10 m
8	Galian tahap keempat hingga kedalaman El. -24,85 m
9	Konstruksi plat lantai B4F El. -24,05 m

### Hasil Penyelidikan Tanah

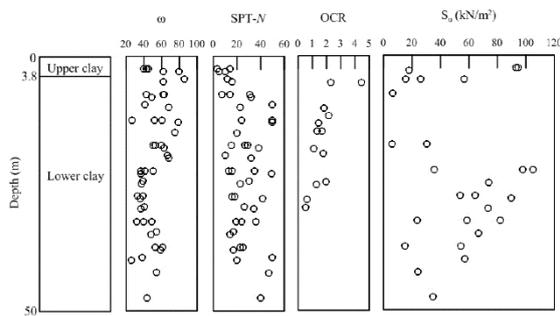
Terdapat 9 titik bor untuk *standard penetration test* (SPT) yang dilakukan pada lokasi ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Untuk layer tanah pada kedalaman 0 – 4 m memiliki nilai N-SPT mulai dari 4 hingga 12. Layer tersebut dapat dikategorikan sebagai tanah lempung sedang hingga lempung kaku (Terzaghi et

Metode konstruksi yang diterapkan adalah metode konstruksi *top-down* dengan melakukan konstruksi dinding penahan tanah terlebih kemudian melakukan penggalian tanah tahap pertama. Setelah galian tahap pertama, pekerjaan konstruksi plat lantai beton dilakukan. Kegiatan ini dilakukan berulang hingga mencapai kedalaman galian yang direncanakan dan pengecoran plat lantai beton di bagian dasar telah dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1.

al., 1996). Selanjutnya, pada layer tanah dibawah kedalaman 4 m dari permukaan tanah, nilai N-SPT dari borlog yang telah dilakukan memiliki nilai yang variatif dari 10 hingga 50, sehingga dapat dikategorikan sebagai tanah lempung kaku hingga lempung keras.

Beberapa hasil uji laboratorium seperti kadar air, OCR, dan *undrained shear strength* ( $S_u$ ) juga ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai OCR pada lapisan yang terletak 5 m di bawah permukaan tanah yaitu pada rentang 2 – 5. Kemudian nilai OCR akan menurun seiring dengan meningkatnya kedalaman tanah yaitu 1 – 2 pada lapisan tanah di kedalaman 10 m hingga 25 m. Nilai OCR didapatkan lebih rendah daripada 1 pada lapisan tanah dibawah kedalaman 25 m. Selanjutnya, berdasarkan Gambar 3, dapat diperhatikan bahwa nilai  $S_u$  meningkat secara linear dengan kedalaman pada kedalaman 15 m hingga 30 m. Nilai tersebut meningkat sekitar  $0,32\sigma'_v$  (dimana  $\sigma'_v$  adalah tegangan

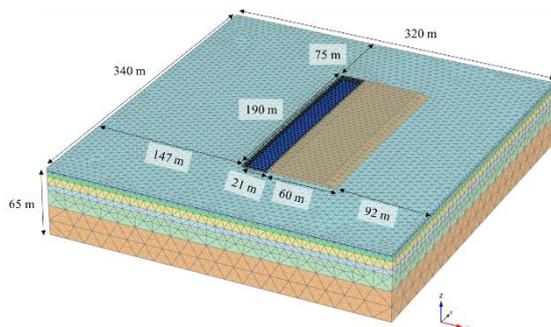
efektif tanah). Muka air tanah pada lokasi ini terletak di kedalaman 2,8 m dari permukaan tanah.



**Gambar 3.** Properti Tanah pada Lokasi Galian Dalam

### Model Numerik

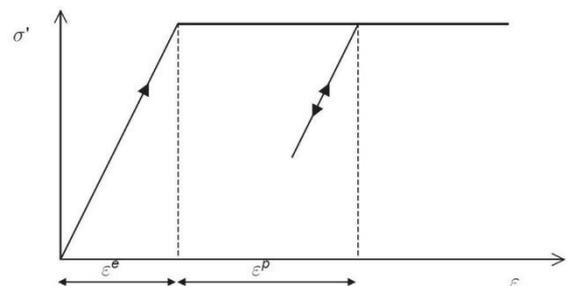
Simulasi numerik dilakukan dengan pendekatan 3D menggunakan metode elemen hingga. Model konstitutif tanah Mohr-Coulomb (MC) Undrained B digunakan pada analisis ini. Model ini menerapkan prinsip analisis tegangan *undrained effective* yang menggunakan parameter tanah *undrained*. Dinding diafragma dan plat lantai beton dimodelkan sebagai elemen plat (*plate*). Dimensi dari model yang digunakan adalah 320 m × 340 m × 65 m. Batas (*Boundary*) pada arah x adalah enam kali dari kedalaman galian ( $H_e$ ), yaitu 147 m dari dinding diafragma pada sisi tanpa timbunan dan 92 m dari ujung timbunan pada sisi timbunan. Pada arah y ditentukan  $3H_e$  yaitu 75 m dari dinding diafragma. Kondisi *mesh* dipilih untuk halus secara seragam (*uniformly fine*). Gambar 4 menunjukkan model numerik yang digunakan pada studi ini.



**Gambar 4.** Model Numerik pada Kasus Galian Dalam yang Ditinjau

### Penentuan Parameter Tanah dan Struktur

Model MC adalah model konstitutif dasar dan dikenal sebagai model *linear elastic perfectly-plastic*. MC model merupakan model konstitutif tanah yang paling sering dan umum digunakan dalam praktik desain khususnya galian dalam karena parameter input yang dibutuhkan paling sedikit jika dibandingkan dengan model konstitutif tanah yang lain seperti hardening soil (HS) model. Respon tanah pada model ini terdiri dari 2 bagian, yaitu bagian *linear elastic* dan *perfectly-plastic* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5. Untuk bagian *linear elastic*, hal tersebut mengadopsi hukum elastisitas isotropis dari Hooke's dan menggunakan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb untuk menentukan bagian *perfectly-plastic*. Modulus Young tanah dapat diperoleh dari kemiringan dari bagian *linear elastic* dalam konteks kurva hubungan tegangan-regangan dan sisa dari kurva tersebut dapat diperoleh setelah mencapai kriteria Mohr-Coulomb. Kekakuan tanah dari model ini adalah modulus kekakuan konstan, sehingga waktu komputasi relative lebih cepat.



**Gambar 5.** Ide Dasar dari Model Elastic Perfect Plastic (Brinkgreve et al., 2021)

Pada kasus ini, pengujian lapangan dilakukan menggunakan SPT. Dalam rangka menentukan parameter tanah untuk model MC Undrained B, nilai  $S_u$  dan undrained young's modulus ( $E$ ) ditentukan berdasarkan nilai  $N$ -SPT. Tabel 2 menunjukkan parameter input tanah yang digunakan dalam simulasi numerik. Hsiung et al. (2018) membuat persamaan antara  $S_u$  dan kedalaman berdasarkan hasil tes triaxial

UC yang dibandingkan dengan beberapa persamaan empiris. Sehingga, nilai  $S_u$  sama dengan 6N akan digunakan pada analisis. Kemudian, perbandingan antara modulus tanah dari hasil tes PMT (*pressuremeter test*), tes triaxial, dan beberapa pendekatan empiris juga disajikan oleh (Hsiung et al., 2018). Berdasarkan hasil tersebut, persamaan dari Japanese Road Association (2002) untuk menentukan nilai  $E$  pada model analisis ini sebagai berikut:

$$E = 2800N \text{ (kPa)} \quad \dots(1)$$

**Tabel 2.** Parameter Tanah yang Digunakan dalam Permodelan

Kedalaman (m)	N	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$s_u$ (kPa)	E (kPa)
0 – 3.80	4	14	24	11200
3.80 – 8.20	20	18	120	56000
8.20 – 16.00	25	18	150	70000
16.00 – 21.30	15	18	90	42000
21.30 – 36.40	19	18	114	53200
36.40 – 65.00	30	18	180	84000

Berdasarkan ACI 318-95 nilai young's modulus dari beton dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut:

$$E = 15000\sqrt{f'_c} \text{ kg/cm}^2 \quad \dots(2)$$

Dimana  $f'_c$  didefinisikan sebagai kuat tekan beton. Ou (2022) mengusulkan agar nilai kekakuan beton diturunkan sebanyak 20 – 40% untuk mempertimbangkan faktor keretakan pada dinding penahan tanah. Oleh karena itu, nilai kekakuan dari dinding diafragma pada analisis ini diturunkan sebanyak 20%. Berdasarkan Ou (2022) kekakuan aksial dari plat lantai beton oada metode konstruksi *top-down* juga diturunkan sebanyak 20% dengan pertimbangan kualitas kuat tekan beton di lapangan mungkin berbeda dengan kekuatan pada desain dan juga pengaruh retakan. Selanjutnya, *interface element* ( $R_{inter}$ ) digunakan pada model ini untuk memodelkan interaksi antara tanah dan struktur khususnya pada secant pile wall. Nilai  $R_{inter}$  pada kasus ini adalah 0,67 berdasarkan tipikal kekasaran dari beton dan lempung (Ou, 2022). Rekapitulasi parameter input struktur untuk dinding diafragma dan plat beton ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4.

**Tabel 3.** Parameter Input untuk Dinding Diafragma

Parameter	Simbol	Nilai	Unit
Kuat tekan beton	$f'_c$	21	MPa
Ketebalan ekuivalen	$d$	1.2	m
Young's modulus	$E$	$21.7 \times 10^6$	kPa
Normal stiffness	$0.8EA$	20640000	MPa
Bending stiffness	$0.8EI$	2470000	
Berat jenis	$\omega$	9.522	kN/m <sup>3</sup>
Poisson's ratio	$\nu$	0.15	-

**Tabel 4.** Parameter Input untuk Plat Beton

Plat	$d$ (m)	$\nu$	80%E (MPa)
B1F	0.8	0.15	$13.4 \times 10^6$
B2F	0.4	0.15	$6.72 \times 10^6$
B3F	0.4	0.15	$6.72 \times 10^6$
B4F	1	0.15	$16.8 \times 10^6$

## ANALISIS PENELITIAN

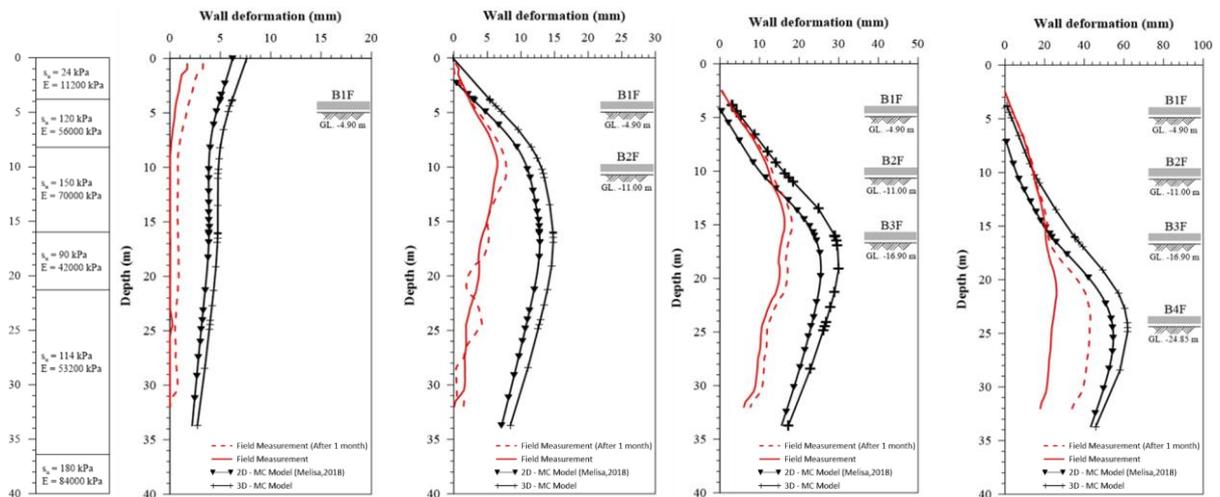
### Hasil Numerik 3D vs 2D

Penelitian dengan menggunakan model konstitutif MC Undrained B untuk simulasi 2D telah dilakukan oleh Kosasi (2018). Selanjutnya hasil dari model simulasi numerik 3D akan dibandingkan dengan hasil simulasi 2D dan juga hasil pengamatan deformasi dinding di lapangan. Gambar 6 dan 7 menampilkan deformasi dinding yang dihasilkan pada sisi timbunan dan sisi tanpa timbunan.

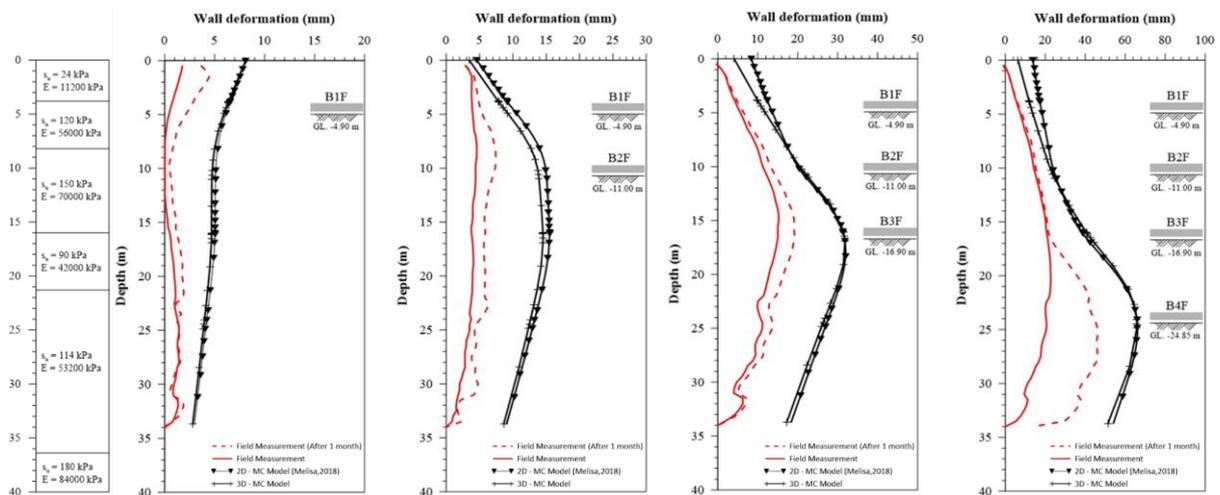
Pada sisi timbunan, deformasi dinding yang dihasilkan dari analisis 3D pada keseluruhan tahap sedikit lebih kecil dibandingkan hasil dari analisis 2D. Hal ini disebabkan karena kondisi elemen *mesh* dari masing – masing pendekatan. Pada analisis 2D menggunakan elemen segitiga, sedangkan pada analisis 3D menggunakan elemen tetrahedral 10-node. Selanjutnya simulasi 2D menggunakan kondisi *plane strain* atau atau kondisi dimana tanah hanya mengalami deformasi dalam dua dimensi, sementara dimensi ketiganya tetap konstan, artinya panjang timbunan menjadi tidak terhingga dibandingkan simulasi 3D dengan panjang timbunan yang terbatas. Selain itu, deformasi dinding pada simulasi 3D juga dipengaruhi oleh efek sudut (*corner effect*). Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, bahwa analisis 2D berada pada kondisi *plane strain* sehingga

tidak mampu menangkap efek sudut seperti pada analisis 3D. Ou & Shiau (1998) menyebutkan bahwa deformasi dinding yang dihasilkan akan semakin kecil jika semakin dekat dengan sudut karena jenis

dinding penahan tanah diafragma memiliki kekakuan lateral yang dapat memberikan dukungan tambahan agar deformasi yang dihasilkan semakin kecil karena adanya efek sudut.



Gambar 6. Deformasi dinding pada sisi tanpa timbunan.



Gambar 7. Deformasi Dinding pada Sisi Timbunan.

Selanjutnya pada sisi tanpa timbunan, hasil yang berbeda terjadi di sisi tanpa timbunan. Analisis 3D menghasilkan defleksi dinding yang sedikit lebih besar dibandingkan 2D tapi kecenderungan antara analisis ini sangat mirip. Akan tetapi, analisis 2D dan 3D dengan menggunakan parameter tanah yang diturunkan dari hasil pengujian di laboratorium masih belum memiliki hasil yang optimal dalam rangka merepresentasikan perilaku tanah di lapangan sehingga belum cocok dengan pengukuran deformasi dinding di lapangan. Sebuah analisis lebih lanjut perlu dilakukan

untuk mengevaluasi performa parameter tanah tersebut agar sesuai dengan hasil pengukuran lapangan.

### Evaluasi Parameter Tanah

MC Undrained B masih menjadi model konstitutif tanah yang paling umum digunakan dalam praktik desain galian dalam. Sebelumnya telah dilakukan analisis numerik dengan model MC dengan menggunakan parameter tanah yang diperoleh dari hasil uji laboratorium. Akan tetapi, deformasi dinding penahan tanah yang dihasilkan masih lebih besar dari pengukuran lapangan setelah tahap akhir

konstruksi plat lantai B4F dan tampaknya masih belum optimal dalam merepresentasikan sifat-sifat tanah di lapangan. Oleh karena itu, optimalisasi parameter dilakukan dengan melakukan analisis balik di kasus yang ditinjau dan mengusulkan properti tanah lunak di Jakarta Pusat.

Pada analisis ini, hanya parameter kekuatan yaitu kuat geser *undrained* ( $S_u$ ) dan young's modulus ( $E$ ) yang disesuaikan dengan hasil monitoring deformasi dinding. *Back-analysis* dilakukan dengan membuat beberapa set parameter tanah berdasarkan beberapa referensi. Selanjutnya, defleksi dinding yang dihasilkan dari seluruh set parameter tanah kemudian dibandingkan dengan hasil data pengamatan deformasi dinding horizontal di lapangan setelah tahap akhir konstruksi plat lantai B4F dan diusulkan parameter tanah terbaik untuk referensi desain galian dalam di Jakarta Pusat. Ketiga set parameter tanah tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut:

#### 1. Parameter tanah 1

Merujuk pada penelitian sebelumnya oleh Likitlersuang et al. (2013) pada tanah lempung Bangkok dengan menggunakan model MC mengusulkan rasio antara  $E_u/S_u$  adalah sebesar 500 untuk tanah lempung dan akan digunakan pada set parameter tanah ini. Berdasarkan hasil uji laboratorium di lokasi kasus ini, indeks properti pada area ini menunjukkan bahwa properti tanah di lokasi ini termasuk dalam kategori CH (berdasarkan klasifikasi USCS). Terzaghi et al. (1996) menetapkan korelasi N-SPT dan  $S_u$  berdasarkan klasifikasi USCS. Untuk tanah tipe CH,  $S_u$  berada pada kisaran 10N sampai 18N dan nilai 13N akan digunakan dalam analisis ini untuk set parameter tanah 1. Parameter tanah 1 disajikan secara lengkap pada Tabel 5.

#### 2. Parameter tanah 2

Berdasarkan Rus (2018), untuk tanah lempung Jakarta Pusat pada lapisan pertama dengan nilai N yang sama, yaitu 4, mempunyai nilai  $E'$  sebesar 86638 kPa.

Nilai ini kemudian digunakan untuk mengganti lapisan pertama pada set parameter tanah 1 dan mempertahankan nilai-nilai parameter tanah lainnya seperti pada Tabel 5. Tabel 6 menunjukkan set parameter tanah 2.

**Tabel 5.** Parameter Tanah 1

Kedalaman (m)	N	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_u$ (kPa)	$E_u$ (kPa)
0 – 3.80	4	14	52	26000
3.80 – 8.20	20	18	260	130000
8.20 – 16.00	25	18	325	162500
16.00 – 21.30	15	18	195	97500
21.30 – 36.40	19	18	247	123500
36.40 – 65.00	30	18	390	195000

**Tabel 6.** Parameter Tanah 2

Kedalaman (m)	N	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_u$ (kPa)	$E'$ (kPa)
0 – 3.80	4	14	52	86638
3.80 – 8.20	20	18	260	112710
8.20 – 16.00	25	18	325	140887.5
16.00 – 21.30	15	18	195	84532.5
21.30 – 36.40	19	18	247	107074.5
36.40 – 65.00	30	18	390	169065

#### 3. Parameter tanah 3

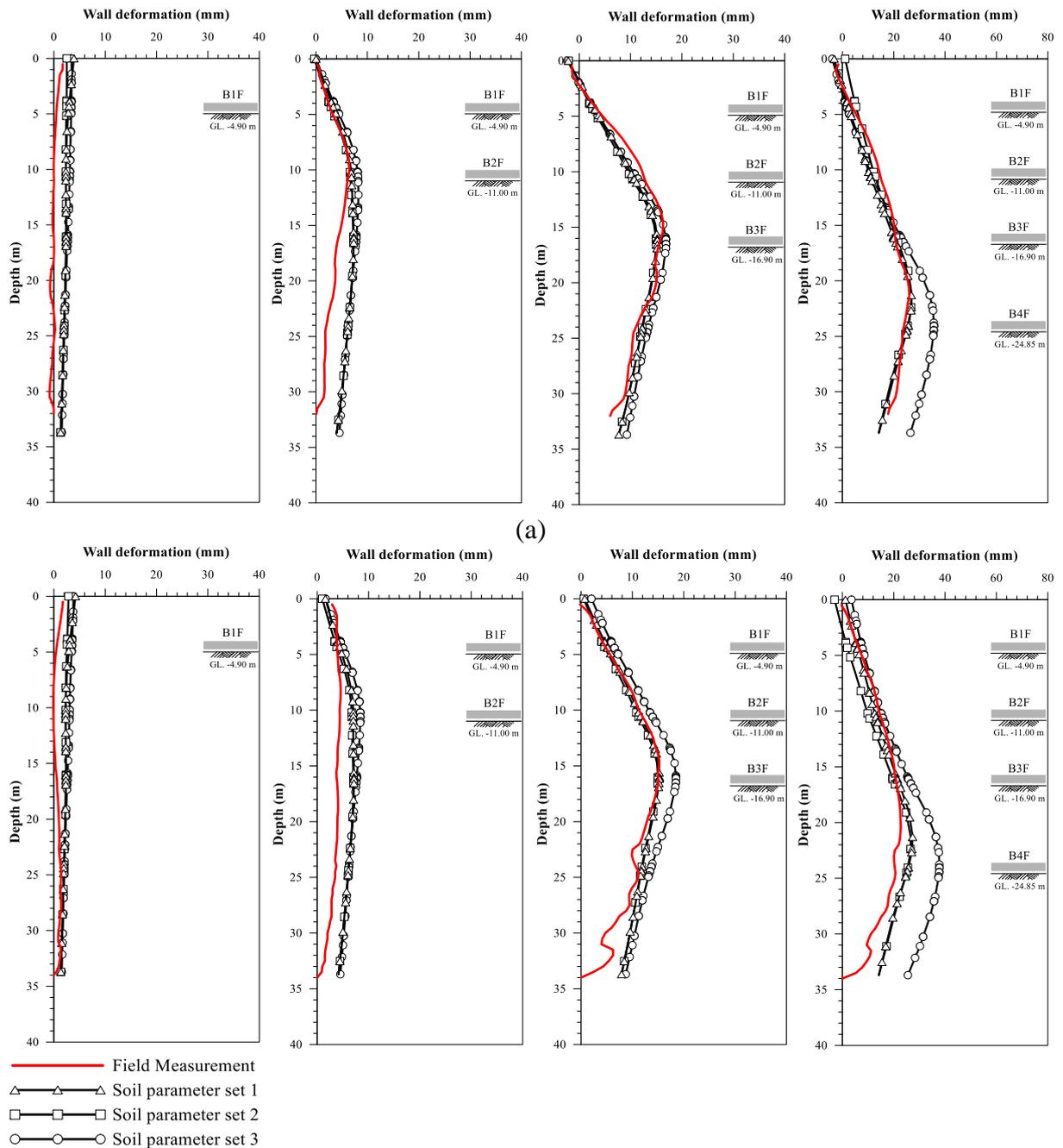
Hsiung et al. (2018) menginterpretasikan nilai modulus tanah pada tingkat tegangan 50% ( $E_{50}$ ) dari hasil uji PMT termasuk uji CU dan berbagai pendekatan. Berdasarkan nilai modulus tanah yang diukur dari PMT, uji triaksial dan berbagai pendekatan empiris, maka dapat disimpulkan persamaan pada regresi linier seperti yang diberikan dalam Persamaan berikut:

$$E_{50} = 833(z + 76)(kPa) \quad \dots(3)$$

Berdasarkan persamaan tersebut dapat digunakan untuk menentukan nilai  $E_{50}$  untuk set parameter 3 dengan  $E'$  sama dengan  $1,3E_{50}$ . Untuk  $S_u$  masih menggunakan nilai 13N yang sama dengan parameter tanah set 1 dan 2. Tabel 7 mencantumkan set parameter tanah 3.

**Tabel 7.** Parameter Tanah 3

Kedalaman (m)	N	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$S_u$ (kPa)	$E'$ (kPa)
0 – 3.80	4	14	52	84390.36
3.80 – 8.20	20	18	260	88831.95
8.20 – 16.00	25	18	325	95440.18
16.00 – 21.30	15	18	195	102535.9
21.30 – 36.40	19	18	247	113585.7
36.40 – 65.00	30	18	390	137256.2



**Gambar 8.** Deformasi Dinding yang Dihasilkan untuk Keseluruhan Set Parameter Tanah. (a) pada Sisi Tanpa Timbunan; (b) pada Sisi Timbunan

Gambar 8 menggambarkan pergerakan lateral dinding penahan yang dihasilkan untuk semua set parameter tanah. Hal ini menunjukkan bahwa parameter tanah 1 dan 2 sesuai dengan hasil pengukuran lapangan pada penggalian tahap ke-3 dan terakhir pada sisi tanpa timbunan. Untuk parameter tanah 3 menghasilkan deformasi dinding yang lebih besar pada tahap akhir penggalian, namun cocok pada tahap ke-3. Pada sisi timbunan,

parameter tanah 1 dan 2 juga menunjukkan performa yang cukup baik pada penggalian tahap ke-3 dan ke-4. Namun parameter tanah 3 menghasilkan defleksi dinding yang lebih besar terhadap data monitoring lapangan. Berdasarkan hasil dari keseluruhan set parameter tanah tersebut, maka parameter - parameter tanah tersebut memiliki performa yang baik dalam merepresentasikan perilaku tanah sehingga menghasilkan deformasi dinding yang

sesuai dengan data monitoring lapangan sehingga dapat digunakan lebih lanjut sebagai acuan dalam merancang kasus galian dalam pada tanah lunak di Jakarta Pusat. Dalam studi ini, dapat disarankan bahwa set parameter tanah 2 memiliki performa yang sangat baik jika dibandingkan dengan set parameter lainnya yaitu dengan mengadopsi hubungan nilai modulus tanah dan kuat geser *undrained*,  $E_u/S_u$  sebesar 500 dan nilai  $S_u$  sama dengan 13N. Nilai young's modulus tanah lapisan pertama pada set parameter ini adalah 86638 kPa yang merujuk pada Rus (2018).

### KESIMPULAN

Simulasi numerik 3D pada kasus galian dalam di Jakarta Pusat telah dilakukan dengan model MC Undrained B yang kemudian hasilnya dibandingkan dengan hasil analisis 2D yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya. Selanjutnya evaluasi parameter tanah untuk menghasilkan suatu set parameter tanah yang memiliki performa yang optimal dalam merepresentasikan perilaku tanah akibat galian dalam juga telah dilaksanakan. Berdasarkan studi yang telah dilakukan maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil analisis 3D dan 2D menunjukkan hasil dengan kecenderungan yang sama. Analisis 3D menghasilkan deformasi dinding yang sedikit lebih kecil dari 2D karena pengaruh kondisi elemen *mesh* pada masing-masing pendekatan, efek sudut pada analisis 3D, dan kondisi *plane strain* pada analisis 2D.
2. Evaluasi parameter tanah menunjukkan bahwa set parameter tanah 2 dengan model MC Undrained B memiliki performa yang paling baik pada kasus galian dalam di Jakarta Pusat. Set parameter tanah ini menggunakan korelasi  $E_u/S_u = 500$ ,  $S_u$  sama dengan 13N, dan menggunakan nilai young's modulus tanah 86638 kPa untuk lapisan pertama berdasarkan Rus (2018).

**UCAPAN TERIMA KASIH.** Penulis mengucapkan terima kasih kepada Fu-Chen Teng, Ph.D. (Civil and Construction Department, National

Taiwan University of Science and Technology) dan Prof. Benson Bin-Chen Hsiung, Ph.D. (Civil Engineering Department, National Chung-Hsing University) yang telah mendukung dengan memberikan data serta rujukan pustaka untuk melakukan penelitian ini.

### DAFTAR PUSTAKA

- 318, A. C. I. C. (n.d.). *Building code requirements for structural concrete : (ACI 318-95) ; and commentary (ACI 318R-95)*. Farmington Hills, MI : American Concrete Institute, [1995] ©1995.  
<https://search.library.wisc.edu/catalog/999777001402121>
- Abdi, A. S., & Ou, C.-Y. (2022). A Study of the Failure Mechanism of Braced Excavations Using 3D Finite-Element Analysis. *International Journal of Geomechanics*, 22(7).  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0002385](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0002385)
- Agung, M. D., Teng, F.-C., Hsiung, B. B.-C., & Wahyudi, H. (2019). Time-dependent behavior of excavations in central Jakarta. *Proceedings of 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2021). *PLAXIS Reference Manual*.
- Finno, R. J., Arboleda-Monsalve, L. G., & Sarabia, F. (2015). Observed Performance of the One Museum Park West Excavation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 141(1).  
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001187](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001187)
- Harahap, S. E., & Ou, C. Y. (2020). Finite element analysis of time-dependent behavior in deep excavations. *Computers and Geotechnics*, 119.  
<https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2019.103300>
- Hsieh, P. G., & Ou, C. Y. (1998). Shape of ground surface settlement profiles caused by excavation. *Canadian*

- Geotechnical Journal*, 35(6), 1004–1017. <https://doi.org/10.1139/t98-056>
- Hsiung, B. C. B., Yang, K. H., Aila, W., & Ge, L. (2018). Evaluation of the wall deflections of a deep excavation in Central Jakarta using three-dimensional modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 72, 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.11.013>
- Japanese Road Association. (2002). *Specification for Highway and Bridges, Part IV*.
- Kosasi, M. (2018). *Numerical Simulations of an Excavation in Central Jakarta by Hypoplasticity Model with Consideration of Recent Stress History*. National Taiwan University of Science and Technology.
- Kosasi, M., Teng, F., & Hsiung, B. B. C. (2018). Numerical Simulations of an Excavation Case in Central Jakarta by Hypoplasticity Model for Clays. *Proceeding 20th SEAGC – 3rd AGSSEA Conference in Conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference on Geotechnical Engineering*.
- Likitlersuang, S., Surarak, C., Wanatowski, D., Oh, E., & Balasubramaniam, A. (2013). Finite element analysis of a deep excavation: A case study from the Bangkok MRT. *Soils and Foundations*, 53(5), 756–773. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.08.013>
- Lim, A., Rahardjo, P. P., & Lyman, R. A. (2019). Performance and modeling of secant pile reinforced by soil nailing for urban excavation in Jakarta. *Proceedings of 16th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Ou, C.-Y. (2022). *Fundamentals of Deep Excavations*. Taylor & Francis Group.
- Ou, C.-Y., Dar-Chang Chiou, & Tzong-Shiann Wu. (1996). Three-dimensional Finite Element Analysis of Deep Excavations. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- Ou, C.-Y., & Shiau, B.-Y. (1998). Analysis of the corner effect on excavation behaviors. *Canadian Geotechnical Journal*, 35(3), 532–540. <https://doi.org/10.1139/t98-013>
- Rus, T. Y. (2018). *3D Finite Element Analysis Of Deep Excavation In Central Jakarta Using Total And Effective Shear Strength Properties*. National Taiwan University of Science and Technology.
- Rus, T. Y., & Soeparlan, A. A. (2021). Analisa Penurunan Tanah Pada Struktur Galian Dalam Menggunakan Parameter Kuat Geser Efektif Melalui Analisis Elemen Hingga 3D di Jakarta Pusat. *Rekayasa Sipil*, 10(1), 17. <https://doi.org/10.22441/jrs.2021.v10.i1.03>
- Teng, F. C., Kosasi, M., & Hsiung, B. B. C. (2019). Deep Excavations in Central Jakarta Area: Case Histories and Numerical Simulations. *Proceedings of the 8th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1061/9780784482087.002>
- Teng, F., Hsiung, B.-C. B., Prakasa, M. D. A., Yang, K.-H., Anthony, & Litanes, R. (2023). Simulations on time-dependent behaviour based on wall deflection of deep excavations in Jakarta. *Arabian Journal of Geosciences*, 16(8), 482. <https://doi.org/10.1007/s12517-023-11597-6>
- Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons, Inc.