

Analisa Penurunan Tanah Akibat Struktur Galian Dalam Menggunakan Parameter Kuat Geser Efektif Berdasarkan Metode Elemen Hingga 3d Di Jakarta Pusat

Tatag Yufitra Rus^{1*}, Ali Arifin Soeparlan²

^{1,2}*Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Balikpapan*

Jl. Soekarno Hatta Km. 8, Balikpapan, Indonesia

Email : tatag.yufitra@poltekba.ac.id

Received : 21-01-2021 Revised : 13-02-2021 Accepted : 13-02-2021

Abstract

The paper presents an analysis to determine the ground vertical movement caused by a deep excavation project in Central Jakarta. This analysis used numerical analysis with a 3D Finite Element method using effective shear strength parameters and compares the results with the empirical equation method proposed by various methods using the simulation of the results of the horizontal wall movement in previous studies. It was found that the empirical equation to predict the vertical movement in Central Jakarta is $\delta_{vm} = 0.55 \delta_{hm}$.

Keywords : settlement, deep excavation, 3D Finite Element, empirical equation

Abstrak

Penelitian ini mengajukan suatu analisa untuk menentukan besarnya penurunan tanah akibat pekerjaan galian dalam di Jakarta Pusat. Perhitungan dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga 3D dengan parameter kuat geser tanah efektif sebagai parameter input. Hasil yang diperoleh akan digunakan sebagai bahan komparasi atau perbandingan dengan beberapa metode perhitungan pendekatan empiris oleh penelitian sebelumnya berdasarkan hasil simulasi pergerakan dinding penahan galian dalam secara horizontal. Didapatkan dari hasil simulasi, nilai pendekatan empiris sebesar $\delta_{vm} = 0.55 \delta_{hm}$ yang dapat digunakan untuk menganalisa penurunan tanah pada proyek galian di Jakarta Pusat dengan kondisi karakteristik tanah yang serupa.

Kata kunci : penurunan, galian dalam, metode elemen hingga 3D, pendekatan empiris

1. PENDAHULUAN

Jakarta adalah Ibu Kota Negara Indonesia dengan luas total sekitar 48.13 km² dan memiliki peningkatan populasi tertinggi dengan sekitar 0,7% setiap tahun. Sebagai Ibu Kota dan pusat kota bisnis di Indonesia, Jakarta Pusat memiliki tantangan geoteknis untuk struktur dan infrastruktur besar seperti proyek galian dalam untuk basemen, stasiun MRT, dan lain sebagainya. Dinding penahan dan sistem pendukung dalam proyek galian dalam mungkin memiliki masalah kompleks terhadap dampak penurunan tanah bangunan sekitar yang disebabkan oleh pergerakan horizontal dinding penahan tanah proyek tersebut. Saat ini banyak kasus penurunan tanah terjadi karena prediksi penurunan tanah yang tidak akurat yang berdampak pada bangunan di sekitar area proyek galian dalam tanah. Penurunan ini terjadi disebabkan oleh pergerakan dinding penahan tanah

yang besar dari proyek galian dalam sehingga menyebabkan terjadi pergeseran tanah di sekitar dinding penahan dan mengakibatkan penurunan tanah pada tanah tersebut. Selain itu, informasi yang terbatas tentang data properti tanah berkualitas tinggi di Jakarta Pusat yang menyebabkan tantangan geoteknis untuk memprediksi dengan akurat besaran pergerakan horizontal dinding penahan dan penurunan tanah. Rus (2018) telah mengusulkan hasil data parameter tanah dan analisa pergerakan dinding penahan tanah horizontal akibat galian dalam di Jakarta Pusat menggunakan parameter kuat geser total dan efektif. Melalui hasil penelitian tersebut dikatakan bahwa dengan menggunakan data parameter tanah yang tepat, dapat diperoleh hasil perbandingan nilai yang tepat antara hasil prediksi menggunakan analisis numerik dan data monitoring secara aktual pergerakan dinding di lapangan. Studi sebelumnya

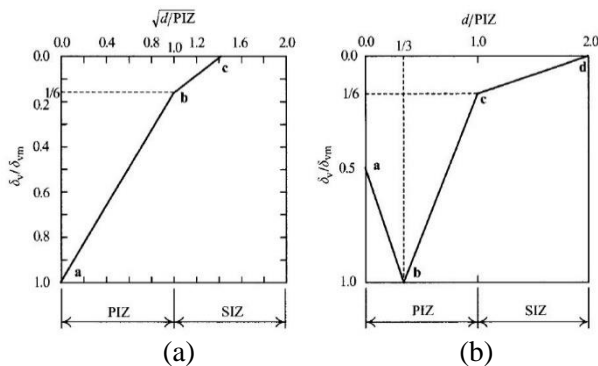
tersebut dapat diadaptasi untuk menganalisis pergerakan tanah secara vertikal atau penurunan tanah akibat pergerakan tanah secara horizontal dengan analisis numerik menggunakan perangkat lunak Plaxis 3D dan persamaan empiris yang dilakukan oleh Ou & Hsieh (2000) dan Clough & O'Rourke (1990).

Dalam penelitian ini nantinya akan memberikan besaran nilai prediksi penurunan tanah yang disebabkan oleh proyek galian dalam di Jakarta Pusat menggunakan analisis numerik dengan metode elemen hingga 3D menggunakan parameter kuat geser efektif dan membandingkan hasilnya dengan metode persamaan empiris yang diusulkan oleh berbagai metode menggunakan simulasi hasil pergerakan dinding pada penelitian sebelumnya. Pemilihan penggunaan kuat geser efektif didasarkan pada hasil simulasi penelitian sebelumnya, bahwa hasil perbandingan analisa terhadap pengukuran di lapangan, kuat geser efektif lebih akurat ketimbang kuat geser total (Rus, 2018). Studi ini juga akan memberikan nilai pendekatan empiris yang cocok digunakan pada tanah di Jakarta Pusat yang dapat digunakan untuk memprediksi besaran nilai penurunan tanah kedepan jika ada proyek konstruksi serupa di lokasi sekitar dan dapat digunakan untuk pengembangan inovasi penelitian kedepan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Landasan Teori

Metode Ou dan Hsieh



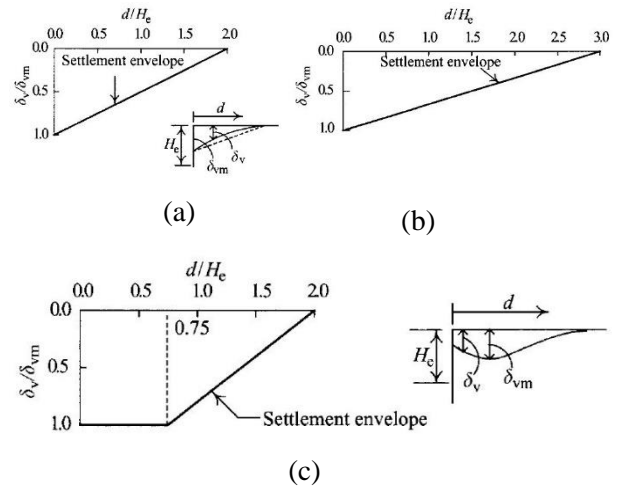
Gambar 1. Metode Ou dan Hsieh (2000) dalam Menentukan Besaran Penurunan Tanah; (a) Tanah Pasir; (b) Tanah Lempung

Ou dan Hsieh (2000) mengembangkan metode untuk memprediksi penurunan tanah berdasarkan pada nilai pergerakan dinding horizontal. Terdapat dua jenis tipe pergerakan tanah secara vertikal

akibat penurunan tanah pada lokasi galian, yaitu tipe segitiga (*spandrel*) untuk tanah kepasiran dan cekung (*concave*) untuk tanah lempung/lanau seperti tertera pada Gambar 3. Untuk menentukan besaran penurunan tanah, diperlukan parameter H_e (kedalaman galian) dan δ_{hm} (pergerakan dinding maksimum).

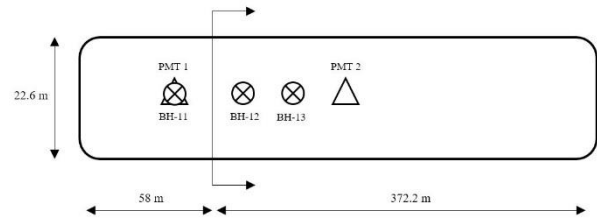
Metode Clough dan O'Rourke

Clough dan O'Rourke (1998) mengusulkan berbagai jenis bentuk penurunan tanah didasarkan pada galian dalam pada berbagai jenis kondisi tanah. Galian dalam pada tanah pasir atau lempung kaku, cenderung menghasilkan bentuk segitiga dengan penurunan maksimum terletak di dekat galian seperti tertera pada Gambar 2 (a). Sedangkan Gambar 2 (b) dan (c), didasarkan pada hasil penurunan tanah dengan kondisi tanah lempung lunak sampai sedang hingga kaku.



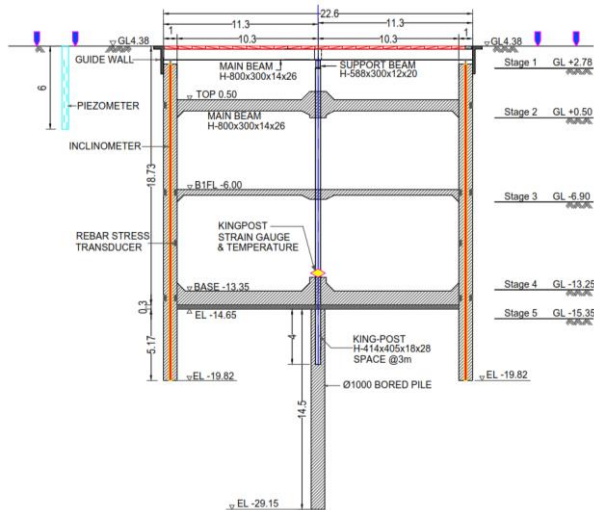
Gambar 2. Metode Clough dan O'Rourke (1998) dalam Menentukan Besaran Penurunan Tanah; (a) Tanah Pasir (b) Tanah Lempung Kaku ke Kaku Sekali; (c) Tanah Lempung Lunak ke Lempung Sedang

2.2. Detail Konstruksi



Gambar 3. Denah Layout pada Proyek Galian Dalam

Penggalian dalam pada studi kali ini menggunakan salah satu proyek galian dalam di Bundaran HI Jakarta Pusat untuk memprediksi penurunan tanah melalui analisa numerik. Gambar 3. menunjukkan denah layout dari lokasi proyek galian dalam yang ditinjau sedangkan desain galian dalam terdapat pada Gambar 4.



Gambar 4. Detail Konstruksi Galian Dalam

Tabel 1. Tahapan Pelaksanaan Metode Top-Down pada Lokasi Konstruksi

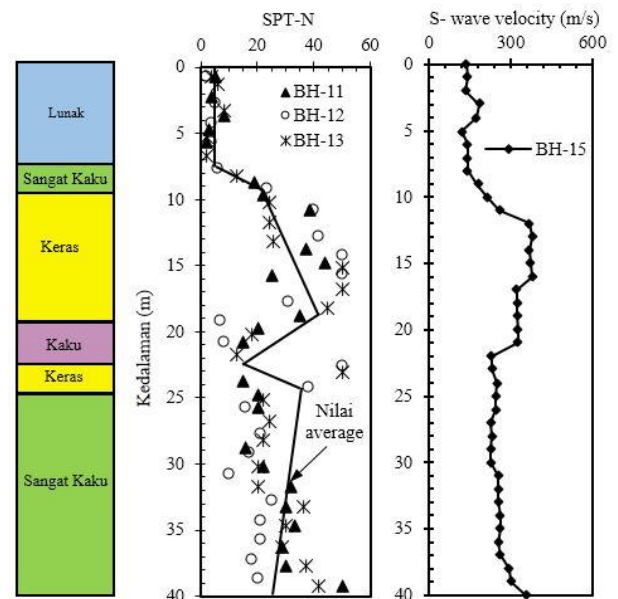
No	Tahapan Pelaksanaan
1	Pelaksanaan konstruksi dinding penahan
2	Galian pertama dilakukan hingga kedalaman 1,5 m dari permukaan tanah
3	Pengerjaan konstruksi pelat lantai 1 di permukaan tanah
4	Galian kedua dilakukan hingga kedalaman 5,08 m dari permukaan tanah
5	Pengerjaan konstruksi pelat lantai 2 pada kedalaman 4,18 m dari permukaan tanah
6	Galian ketiga dilakukan hingga kedalaman 11,8 m dari permukaan tanah
7	Pengerjaan konstruksi pelat lantai 3 pada kedalaman 10,48 m dari permukaan tanah
8	Galian keempat dilakukan hingga kedalaman 17,53 m dari permukaan tanah
9	Galian ketiga dilakukan hingga kedalaman 18,13 m dari permukaan tanah
10	Pengerjaan konstruksi pelat lantai 4 pada kedalaman 18,13 m dari permukaan tanah

Proyek galian dalam ini dilaksanakan melalui metode *top-down* dengan 5 tahap galian dan kedalaman total galian adalah 19,03 m diukur dari permukaan tanah seperti tertera pada Tabel 1.

Konstruksi tersebut diperkuat dengan supporting system menggunakan pelat lantai sebagai bangunan permanen dan penahan beban horizontal dari tanah di setiap tahapan galian. Galian dalam ini menggunakan dinding penahan tanah tipe *slurry* atau *diaphragm wall* dengan tebal 1 m dan ditanam hingga kedalaman 24,2 m. Selisih tinggi dari dasar galian ke ujung dinding penahan tanah tersebut sebesar 5,17 m. Lebar dari galian yang digunakan adalah sepanjang 22,6 m dan kedalaman air dalam tanah berada di 2 m diukur dari permukaan tanah.

2.3. Hasil Penyelidikan Tanah

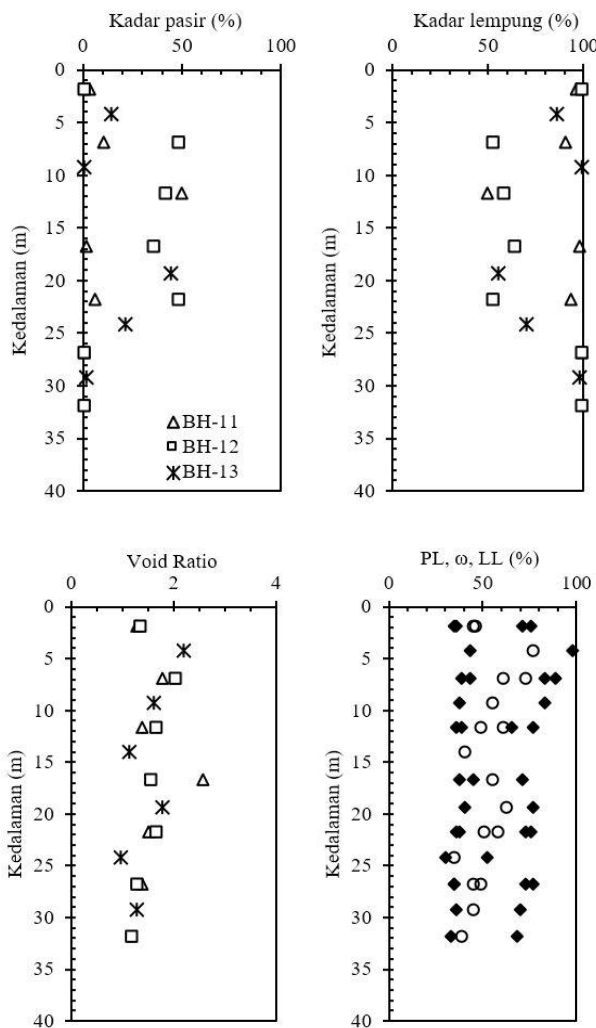
Data tanah pada studi kali ini adalah data berupa data lapangan dan laboratorium. Data uji lapangan yang digunakan adalah data N-SPT atau Borehole dan data uji laboratorium yang digunakan adalah data butiran tanah, angka pori, Atterberg Limit serta Triaxial CU Test.



Gambar 5. Hasil Penyelidikan Tanah di Lapangan

Data penyelidikan tanah melalui N-SPT atau Borehole memilih data pada titik BH-11, BH-12, dan BH-13 karena merupakan titik terdekat pada lokasi galian seperti tertera pada Gambar 5. Pada hasil penyelidikan tanah dapat disimpulkan terdapat 6 lapisan tanah pada galian dalam tersebut. Pada permukaan tanah hingga kedalaman 7,95 m, nilai N-SPT tidak lebih dari 5 sehingga pada kedalaman tersebut tanah dapat dikategorikan sebagai tanah lunak. Sedangkan pada kedalaman 7,95 m hingga 40 m dari permukaan tanah dapat digolongkan sebagai tanah sedang-keras. Tinjauan

inih yang digunakan untuk menentukan parameter kuat geser tanah terbagi menjadi dua yang disebut lapisan atas dan lapisan bawah sesuai pada hasil pengujian laboratorium CU Test.



Gambar 6. Hasil Uji Laboratorium pada Lokasi Galian

Pada hasil uji laboratorium untuk analisa butiran tanah dan plastisitas tanah, tanah secara garis besar diklasifikasikan sebagai tanah lanau MH atau lempung CH dengan plastisitas tinggi dengan kadar tanah lempung lebih dari 50%, nilai batas cair sekitar 60-90% dan nilai batas plastis sekitar 30-45% seperti tertera pada Gambar 6. Nilai angka pori menunjukkan nilai yang cukup tinggi didukung oleh nilai kadar air yang secara rata-rata melebihi 50%. Ini disebabkan tanah tersebut dalam kondisi tanah jenuh karena muka air tanah berada pada kedalaman 2 m dari permukaan tanah.

Nilai *Triaxial CU test* yang digunakan ialah untuk lapisan atas nilai kohesi tanah efektif sebesar 6

kN/m² dan sudut geser tanah efektif sebesar 38°, sedangkan untuk lapisan bawah nilai kohesi tanah efektif sebesar 46 kN/m² dan sudut geser tanah efektif sebesar 41°.

2.4. Permodelan Desain Analisa Numerik

Analisa numerik pada studi kali ini menggunakan Plaxis 3D yang mana perangkat lunak tersebut menggunakan metode elemen hingga dalam melakukan analisa atau perhitungan. Input desain konstruksi galian dalam menggunakan Plaxis 3D dapat dilihat pada Gambar 7.

Pada input desain tersebut, dimensi dari galian yang digunakan dalam permodelan adalah 182 m x 100 m x 40 m. Input desain tersebut mengambil panjang 40 m ke arah koordinat sumbu Y dikarenakan hasil analisa dari galian dalam setelah 40 m tersebut berada pada posisi *Plain-Strain* dimana nilai dari deformasi dinding penahan tanah akan relatif sama. Total panjang *boundary* dari permodelan ke konstruksi galian sepanjang 80 m dan panjang total model adalah 100 m digunakan sebagai standar kondisi umum dari *benchmark* dari permodelan desain menggunakan Plaxis 3D.

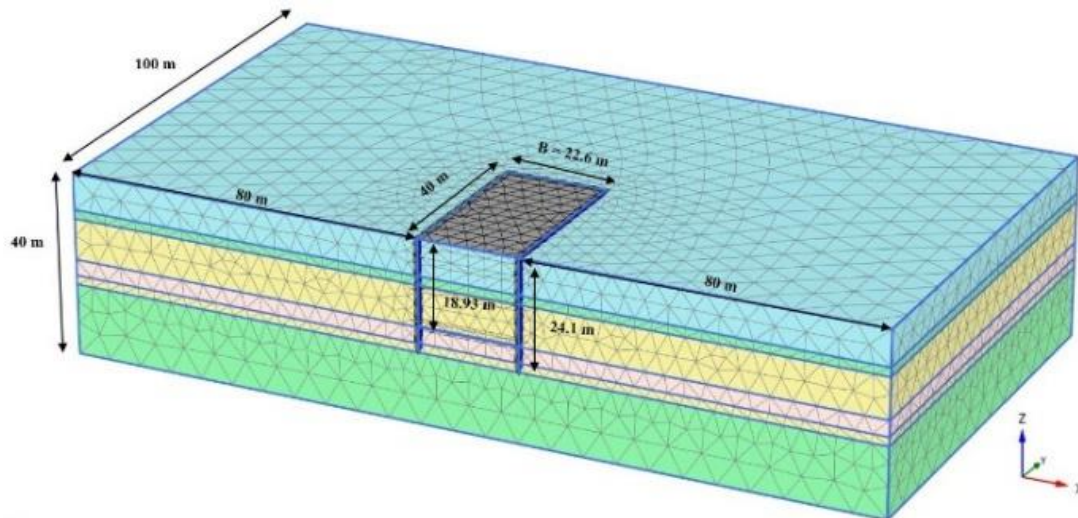
2.5. Parameter Tanah dan Struktur

Penentuan parameter tanah yang digunakan pada studi kali ini menggunakan model parameter *Hardening Soil Undrained A* dalam analisa menggunakan metode numerik seperti terlihat pada Tabel 2.

Dalam penentuan nilai kuat geser tanah, tanah dibagi menjadi dua lapisan berdasarkan nilai N-SPT yaitu tanah lapisan atas dan bawah. Namun pada penentuan parameter tanah untuk modulus tanah ditinjau per lapisan sebanyak 6 lapisan.

Menentukan nilai modulus tanah pada kondisi tegangan (stress level) sebesar 50% (E_{50}) menggunakan rumus empiris pada tabel kuat geser kondisi *undrained* seperti terlihat pada Tabel 2. Dalam penentuan rumus empiris dari E_{50} menggunakan nilai dari hasil uji *Pressuremeter Test* dengan melakukan perbandingan nilai pada hasil *CU test* dan rekomendasi dari *Architectural Institute of Japan* (2001) untuk tanah lempung yaitu untuk nilai minimum $E = 2800$ N dan nilai maksimum $E = 4000$ N. Sehingga rumus empiris nilai modulus tanah E_{50} ialah sebagai berikut dengan z adalah kedalaman.

$$E_{50} = 833 (z+76) \text{ (kN/m}^2\text{)}$$



Gambar 7. Benchmark dari Desain Konstruksi dengan Simulasi Plaxis 3D

Tabel 2. Input Parameter menggunakan Hardening Soil *Undrained A*

Kedalaman (m)	Konsistensi Tanah	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ'	N	E_{50} (kPa)	E'_{50} (kPa)	E_{50}^{ref} (kPa)	E_{oed}^{ref} (kPa)	E_{ur}^{ref} (kPa)
0-7.95	Soft	14	6	38	4	66619	57759	287650	201355	862949
7.95-9.95	Very stiff	18	46	41	21	70763	61352	126885	88820	380655
9.95-19	Hard	18	46	41	39	75366	65342	111639	78147	334917
19-22.5	Stiff	18	46	41	12	80592	69874	99693	69785	299079
22.5-24.5	Hard	18	46	41	34	82883	71860	95616	66931	286848
24.5-40	Very Stiff	18	46	41	22	90172	78179	85654	59958	256963

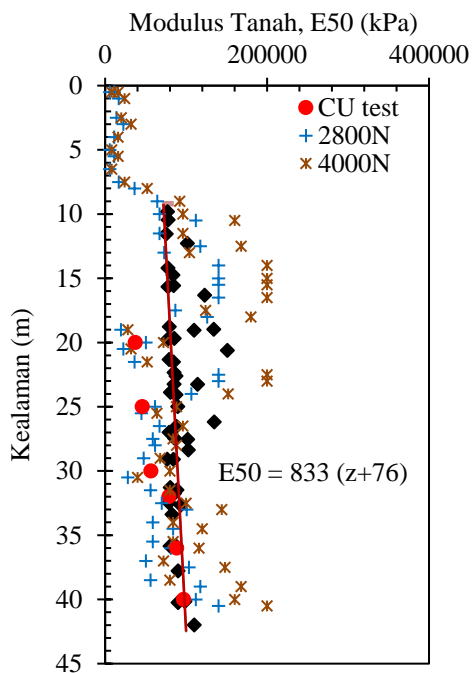
Nilai K_0 yang digunakan pada analisa berdasarkan pada rumus Jaky (1994) yang mana sesuai dengan rumus *default* dari Plaxis 3D yaitu:

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

Paramater struktur dinding penahan tanah dan pelat lantai yang digunakan dalam analisa numerik menggunakan Plaxis 3D dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4. Dinding penahan dengan tebal 1 m dan kedalaman 24,2 m. Modulus elastisitas beton untuk dinding penahan dan pelat lantai di lokasi galian didesain dengan standar *American Concrete Institute* rumus sebagai berikut:

$$E = 4700 f_c' \text{ (Mpa)}$$

Pelat lantai dalam perencanaan desain dimaksudkan sebagai bangunan permanen dan juga sebagai bangunan pendukung untuk menahan beban horizontal dari tanah yang bersifat seperti strut. Ada 4 pelat lantai yang didesain dalam struktur galian dalam tersebut dengan diameter yang bervariasi.



Gambar 8. Kuat Geser Tanah *Undrained* pada Lokasi Sekitar Galian (Sumber: Hsiung, 2018)

Tabel 3. Parameter Struktur Dinding Penahan

No	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Kuat tekan beton	f_c	21	Mpa
2	Tebal	d	1	m
3	Modulus elastisitas	E	21700	Mpa
4	Modulus elastisitas 70%	$70\%E$	15200	Mpa
5	Berat volume	γ	6	(kN/m^3)
6	Raiso Poisson	ν	0.15	-

Ou (2006) menyarankan bahwa nilai dari modulus elastisitas tersebut harus dikurangi sekitar 20-40% dikarenakan kemungkinan terdapat retakan atau susut pada rangka dan beton. Ou (2006) juga mengusulkan untuk koneksi antara tanah terhadap struktur dinding penahan $R_{inter} = 0,67$ dikarenakan jenis tanah adalah tanah lempung.

Tabel 4. Parameter Struktur Pelat Lantai

No	Pelat Lantai	d (m)	ν	80% E (MPa)
1	Pelat 1	0.4	0.15	17400
2	Pelat 2	0.8	0.15	17400
3	Pelat 3	0.4	0.15	17400
4	Pelat 4	1	0.15	17400

3. HASIL PENELITIAN

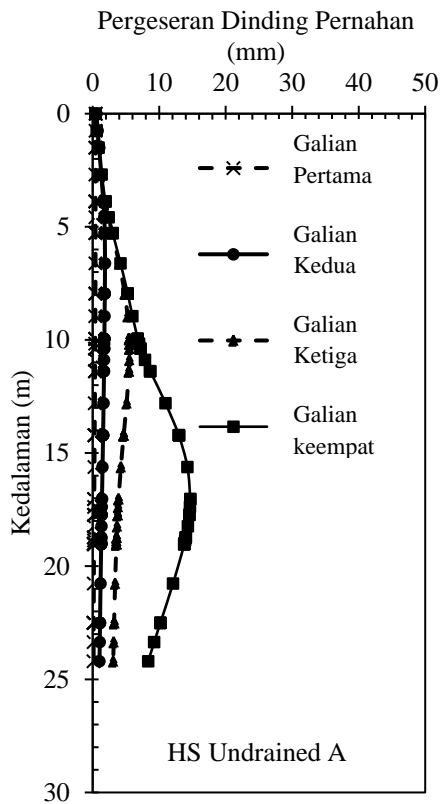
3.1. Pergerakan Dinding Penahan secara Horizontal

Hasil pergerakan dinding penahan secara horizontal didapatkan melalui analisa numerik yang disimulasi melalui metode elemen hingga 3D menggunakan *Undrained A* sebagai kuat geser efektif tanah. Rus (2018) menyimpulkan bahwa hasil nilai perbandingan pergerakan dinding penahan secara horizontal antara metode numerik dan hasil monitoring di lapangan menggunakan inclinometer menunjukkan nilai yang konsisten serupa. Gambar 9 menunjukkan nilai pergerakan dinding menggunakan *HS Undrained A* pada penelitian sebelumnya dengan 5 tahapan galian Rus (2018).

Pada tahapan galian pertama, dapat dilihat pada Gambar 9 bahwa nilai pergerakan dinding secara maksimum sekitar 0,465 mm seperti yang ditunjukkan pada Tabel 5. Pada tahapan galian kedua dan ketiga dari pekerjaan galian menunjukkan peningkatan pada pergerakan dinding yaitu untuk galian kedua sebesar 1,858 mm dan galian ketiga sebesar 5,523 mm dikarenakan kedalaman galian yang meningkat. Pada tahapan galian terakhir, nilai maksimum pergerakan dinding mencapai 14,678 mm.

Tabel 5. Nilai Pergerakan Dinding pada Semua Tahapan Galian

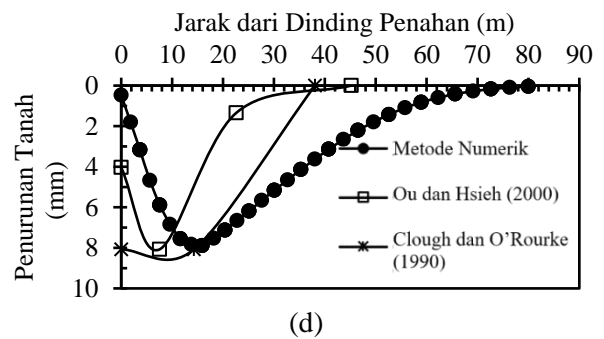
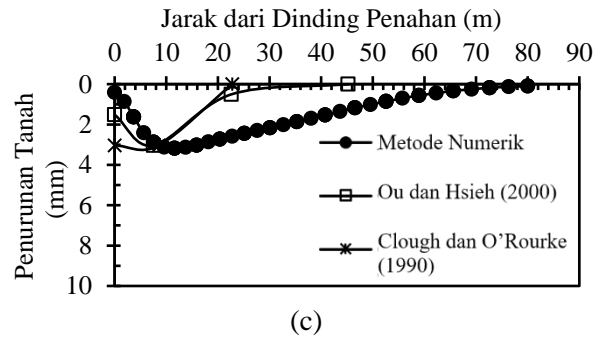
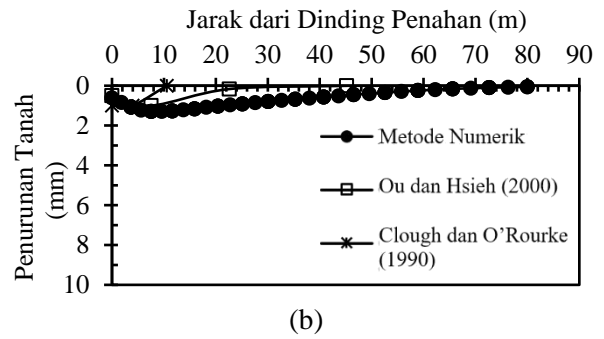
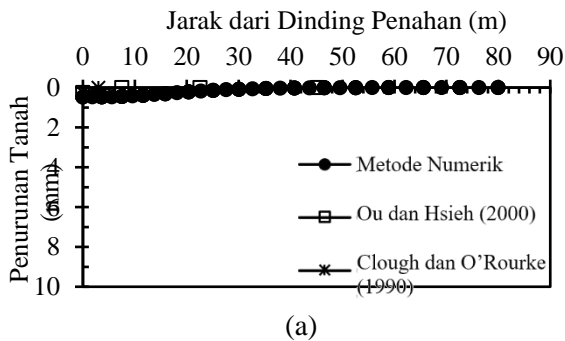
Tahapan Galian	Pergerakan Horizontal Maksimum (mm)
1	0.465
2	1.858
3	5.523
5	14.678



Gambar 9. Pergerakan Dinding Maksimum dari Pekerjaan Galian menggunakan HS Undrained A

3.2. Perbandingan Nilai Penurunan Tanah

Nilai penurunan tanah yang didapatkan melalui simulasi metode elemen hingga 3D menggunakan kuat geser tanah efektif dibandingkan dengan perhitungan dengan metode empiris menggunakan metode Clough dan O'Rourke, dan Ou dan Hsieh. Gambar 10 menunjukkan hasil dari analisa perbandingan nilai penurunan tanah diukur dari



Gambar 10. Hasil Perbandingan Penurunan Tanah menggunakan metode elemen hingga 3D dengan beberapa Metode Rumus Empiris: (a) Tahapan Galian Pertama; (b) Tahapan Galian Kedua; (c) Tahapan Galian Ketiga; (d) Tahapan Galian Kelima

dinding penahan ke luar galian di sekitar dinding penahan untuk tahapan galian pertama dan terakhir. Garis grafik penurunan berbentuk cekung pada Gambar 10 tersebut dikarenakan secara teknis kondisi tanah pada Jakarta Pusat ialah dominan lempung/lanau.

Nilai penurunan tersebut menunjukkan bahwa hasil perbandingan cukup serupa dilihat pada besaran nilai penurunan dan jarak area yang berpotensi mengalami penurunan pada lokasi sekitar galian diukur dari lokasi dinding penahan tanah. Hal tersebut diperoleh dikarenakan pada penelitian

sebelumnya, nilai dari perbandingan pergerakan dinding secara horizontal menunjukkan perbandingan yang signifikan serupa.

Gambar 10 menampilkan hasil perbandingan pada tahapan galian pertama hingga terakhir. Pada galian pertama, baik melalui prediksi dengan metode numerik maupun dengan rumus empiris dari beberapa metode menyimpulkan hasil yang seragam. Pada galian berikutnya hingga terakhir, diperoleh perbedaan yang terus meningkat antar ketiga metode ditinjau dari jarak penurunan dari lokasi dinding penahan tanah.

Pada Gambar 10, hasil perbandingan hanya menampilkan nilai yang serupa, yang terjadi pada besaran maksimum nilai penurunan. Namun pada jarak area yang berpotensi terjadi penurunan diukur dari dinding penahan mengalami perbedaan. Hal ini diperoleh karena pada rumus empiris tersebut, ditemukan penelitian yang dilakukan pada tahun dan lokasi penelitian yang berbeda seperti yang terlihat dari grafik perbandingan antara nilai hasil dari metode elemen hingga 3D, Ou dan Hsieh, dan Clough dan O'Rourke. Nilai pada metode numerik yang lebih besar seperti terlihat pada Gambar 10 juga disebabkan karena *constitutive model* pada pekerjaan tersebut tidak melibatkan parameter nilai *small-strain* dalam penentuan nilai karakteristik pada tanah.

Dari hasil analisa perbandingan keseluruhan metode tersebut, dapat disimpulkan jika semua metode bisa digunakan sebagai rujukan untuk menentukan nilai penurunan tanah di Jakarta Pusat akibat galian dalam dengan kondisi tanah yang serupa. Besaran nilai penurunan tanah dengan menggunakan metode numerik dengan Plaxis 3D dapat dilihat pada Gambar 10 untuk semua tahapan galian. Namun, perlu dipertimbangkan untuk besaran nilai jarak area yang terdampak penurunan akibat pekerjaan galian dalam yang diukur dari dinding penahan tanah.

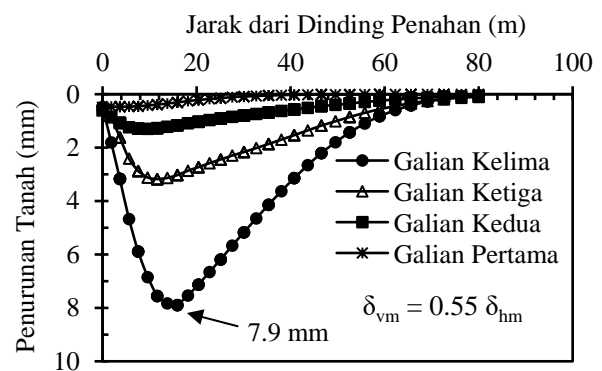
Hal tersebut dikarenakan terdapat besaran nilai dari ke semua metode perhitungan hingga sebesar ± 40 m antara hasil prediksi menggunakan metode numerik dengan hasil dari rumus empiris.

3.3. Pendekatan Empiris berdasarkan Analisa Numerik

Pendekatan empiris berdasarkan perhitungan menggunakan analisa metode elemen hingga 3D berdasarkan nilai dari pergerakan dinding secara horizontal. Metode pendekatan empiris ini sudah pernah ditemukan oleh Ou and Hsieh (2000) and

Clough and O'Rourke (1990). Namun, dikarenakan kondisi dan karakteristik yang berbeda antara penelitian sebelumnya dengan tanah di Jakarta Pusat, perlu ditinjau kembali nilai rumus empiris yang cocok digunakan pada kondisi tanah tersebut.

Nilai penurunan tanah terbesar terjadi pada galian terakhir dianalisa menggunakan metode numerik dengan Plaxis 3D. Besaran nilai penurunan tanah yaitu 7,9 mm terletak pada 15,9 m diukur dari dinding penahan tanah. Nilai penurunan tanah di area dinding penahan tanah menunjukkan nilai yang seragam yaitu sebesar 0,48 mm. Penurunan tanah terus terjadi hingga sejauh 70 m jika diukur jarak dari dinding penahan tanah.



Gambar 11. Nilai Penurunan Tanah menggunakan metode elemen hingga 3D

Berdasarkan nilai yang diperoleh tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa nilai pendekatan empiris untuk penurunan tanah yang terjadi pada proyek galian dalam tersebut ialah:

$$\delta_{vm} = 0.55 \delta_{hm}$$

Dimana δ_{vm} adalah nilai penurunan tanah dan δ_{hm} adalah nilai pergeseran dinding secara horizontal.

4. KESIMPULAN

Penelitian kali ini berupa prediksi nilai penurunan tanah yang terjadi pada proyek galian dalam di Jakarta Pusat. Prediksi nilai penurunan tanah tersebut menggunakan analisa numerik 3D dengan HS *Undrained A* sebagai parameter input sebagai kuat geser efektif tanah. Secara keseluruhan, kesimpulan yang didapatkan ialah sebagai berikut:

1. Kondisi karakteristik tanah di Jakarta Pusat ialah didominasi oleh lempung/lanau dengan konsistensi tanah dari lempung lunak ke lempung sangat keras pada kedalaman 25 m.

Kadar air pada tanah berada pada rasio antara 34,6%-89,3% dimana nilai LI berada antara 0,19-0,65. Lalu nilai N-SPT kurang dari 10 pada kedalaman 0 m-7 m (lempung lunak) dan meningkat hingga mencapai nilai 30 pada kedalaman 20 m (lempung keras).

2. Pada permodelan desain menggunakan Plaxis 3D, lapisan tanah dibagi menjadi 2 jenis yaitu tanah lapisan atas dan tanah lapisan bawah. Pada tanah lapisan atas menggunakan nilai $C' = 6$ kPa dan $\phi' = 38^\circ$. Selanjutnya pada tanah lapisan bawah menggunakan nilai $C' = 46$ kPa dan $\phi' = 41^\circ$.
3. Secara umum, nilai prediksi penurunan tanah yang didapatkan melalui analisa numerik 3D tersebut memberikan nilai yang relatif sama pada besaran penurunan tanah jika dibandingkan pada metode lain dari Ou dan Hsieh (2000) dan Clough dan O'Rourke (1990) sebesar $\pm 7,9$ mm. Namun terdapat perbedaan pada jarak penurunan yang terdampak dari dinding penahan akibat pekerjaan galian dikarenakan perbedaan pada jenis tanah dan permodelan yang digunakan pada analisa penelitian sebelumnya.
4. Hasil dari rumus empiris yang didapatkan untuk besaran penurunan tanah berdasarkan analisa numerik pada pekerjaan galian di Jakarta Pusat ialah $0,55 \delta_{hm}$.

5. SARAN

Beberapa saran pada penelitian kali ini diantaranya ialah:

1. Pada penelitian kali ini, perbandingan nilai penurunan tanah berdasarkan pada metode pendekatan empiris pada penelitian sebelumnya. Diperlukan data lapangan mengenai besaran penurunan tanah yang terjadi secara aktual pada lokasi sekitar galian sebagai tambahan perbandingan nilai penurunan tanah tersebut.
2. Diperlukan data dengan kualitas yang tinggi pada nilai kuat geser tanah efektif sehingga analisa ke depan bisa ditinjau lebih dari dua layer seperti yang digunakan pada kali ini sehingga hasil yang didapatkan lebih optimal.

6. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dr. Bin-Chen Benson Hsiung (Department of Civil Engineering, National Kaohsiung University of Science and Technology, Kaohsiung, Taiwan) atas

dukungan baik dalam memperoleh data dan referensi yang digunakan pada penelitian kali ini.

7. DAFTAR PUSTAKA

- Architectural Institute of Japan, 2001. Recommendations of Design of Building Foundation. Japan (in Japanese).
- Hsiung, B.C.B., Hwang, R.N., 2009. Evaluating Performance of Diaphragm Walls by Wall Deflection Path. SEAGS. Special Issue on Excavation and Tunneling in Geotechnical Engineering, pp. 81–90.
- Hsiung, B.C.B., Yang, K.H., Aila, W., Ge, L., 2018. Evaluation of the wall deflection of a deep excavation in Central Jakarta using three-dimensional modeling. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 72 (2018) 84-96.
- Hsiung, B.C.B., Yang, K.H., Aila, W., Hung, C., 2016. Three-dimensional effects of a deep excavation on wall deflections in loose to medium dense sands. *Comput. Geotechn.* 80, 138–151.
- Jaky, J., 1944. The coefficient of earth pressure at rest. *J. Soc. Hungarian Archit. Eng. Budapest Hungary* 355–358.
- Ou, C.Y., 2006. *Deep Excavation: Theory and Practice*. Taylor & Francis, Netherlands.
- Rus, T. Y., Hsiung, B. C. B., Yang, K. H., 2018. 3D Finite Element Analysis of Deep Excavation in Central Jakarta using Total and Effective Shear Strength Properties. In *Proceedings of 20th SEAGC- 3rd AGGSSEA conference in conjunction with 22nd Annual Indonesian National Conference on Geotechnical Engineering*, pp. 204-212.
- Surarak, C., Likitlersuang, S., Wanatowski, D., Balasubramaniam, A., Oh, E., Guan, H., 2012. Stiffness and strength parameters for hardening soil model of soil and stiff Bangkok clays. *Soils Foundat.* 52 (4), 682–697.