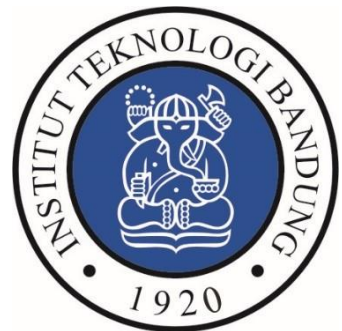




Rekayasa Geoteknik

Konferensi Nasional Pascasarjana Teknik Sipil (KNPTS) 2017

3 Oktober 2017

ANALISIS DEFORMASI DAN PENURUNAN TANAH PADA GALIAN DALAM DENGAN METODE ELEMEN HINGGA MELALUI STUDI EVALUASI MODEL TANAH

Hadiani Muhdinar Pasaribu¹, Bigman Marihat Hutapea²

¹Staf Pengajar, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara,
Email: hadiantimp@gmail.com

²Staf Pengajar, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung,
Email: bigmanhttp@gmail.com

ABSTRAK

Pembangunan MRT (*Mass Rapid Transit*) Jakarta yang merupakan salah satu alternatif transportasi untuk mengurangi kemacetan di Jakarta menjadi topik utama dalam penelitian ini. Proses konstruksi MRT melibatkan konstruksi *tunneling*, *elevating* dan *excavating*. Fokus utama penelitian mengarah pada stasiun Senayan MRT Jakarta dengan tipe perkuatan dinding diafragma (D-Wall) dan sistem pelaksanaan konstruksi menggunakan metode konstruksi *top down*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis deformasi horizontal pada dinding penahan tanah dan penurunan tanah yang terjadi disekitar galian dalam, dengan membandingkan 2 pendekatan model tanah yaitu Mohr-Coulomb dan Hardening Soil kemudian divalidasi dengan hasil monitoring lapangan. Pengerjaan penelitian ini menggunakan metode deskriptif analitis dengan melibatkan *software* Plaxis 3D dan 2D. Hasil deformasi horizontal pada tahap akhir galian di titik P#23 (ditengah dinding diafragma) tercatat pada *monitoring inclinometer* sebesar 9.79 mm, sedangkan menggunakan model Hardening Soil sebesar 11.11 mm dan model Mohr-Coulomb sebesar 19.41 mm. Penurunan tanah maksimum yang terjadi disekitar galian dalam berdasarkan *monitoring settlement plate* adalah sebesar 6 mm, sedangkan menggunakan model Hardening Soil sebesar 24.10 mm dan model Mohr-Coulomb sebesar 25.42 mm. Hasil deformasi horizontal yang diperoleh menggunakan model tanah Hardening Soil lebih mendekati *monitoring* dilapangan dibandingkan dengan model tanah Mohr-Coulomb meskipun hasil yang diperoleh cukup jauh dari *monitoring* dilapangan.

Kata kunci: galian dalam, deformasi, penurunan tanah

1. PENDAHULUAN

Banyaknya pembangunan infrastruktur yang merupakan salah satu tolak ukur kemajuan suatu daerah menyebabkan terjadinya penyempitan lahan didaerah tersebut. Sehingga pemanfaatan ruang dan lahan sangat dibutuhkan untuk menunjang kemajuan pesatnya pembangunan infrastruktur. Salah satu inovasi terbaik dalam mengatasi masalah keterbatasan lahan adalah membuat bangunan bawah tanah sehingga memberi ruang yang lebih untuk pembangunan. Salah satu pembangunan yang sedang marak saat ini di Indonesia adalah pembangunan MRT (*Mass Rapid Transit*) yang dilakukan di Jakarta. Konstruksi pembangunan ini dalam pelaksanaannya membutuhkan proses konstruksi terowongan (*tunneling*), *elevating* dan galian dalam (*excavating*) untuk tiap stasiunnya. Pada penelitian ini, penulis terpusat terhadap masalah galian dalam pada stasiun Senayan dari proyek konstruksi MRT Jakarta dengan tipe perkuatan dinding diafragma (D-Wall). Konstruksi D-Wall ini memiliki kedalaman desain galian berada di level -17.208 m dengan panjang stasiun 200 m dan lebar 21.3 m untuk bagian tepi dan 19.3 m untuk bagian tengah. Permasalahan terbesar dalam suatu pekerjaan galian dalam terletak pada besarnya deformasi lateral pada dinding bangunan bawah tanah dan juga penurunan tanah disekitar galian yang dapat menyebabkan keruntuhan pada dinding diafragma. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengecekan agar tidak terjadi keruntuhan.

2. DASAR TEORI

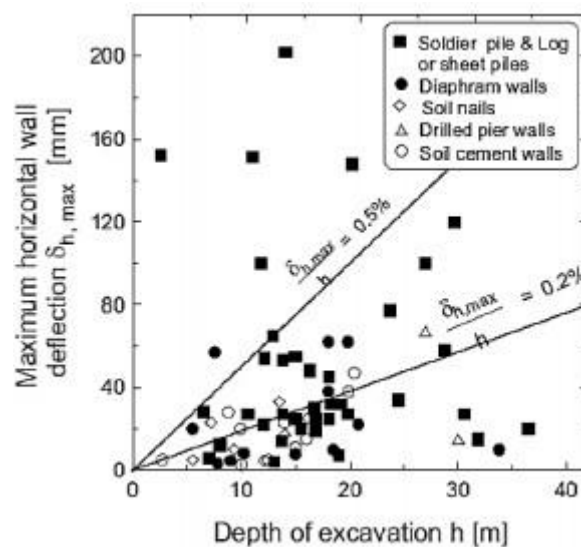
Perilaku Galian Dalam

Galian akan menjadi stabil jika kuat geser tanah lebih besar dibandingkan dengan nilai kuat geser yang diperlukan. Dalam mekanika tanah terdapat dua hal penting yang perlu dianalisis yaitu keruntuhan geser tanah

yang dapat menyebabkan gangguan pada struktur dan deformasi yang dapat mendorong tekanan yang sangat besar pada struktur. Secara umum desain struktur penahan seharusnya mempertimbangkan hal sebagai berikut: keseimbangan momen pada sistem (*overturning*), keseimbangan gaya horizontal (*sliding*), keseimbangan arah vertikal (*bearing capacity*), *overstress* dari struktur (*bending* atau *shearing*) dan stabilitas tanah disekitar struktur (*slope failure*, *overall stability*, *basal stability*).

Pergerakan Horizontal

Kekakuan sistem support yang terdiri dari sistem dukungan arah lateral (*strut*, *anchor*), sistem dukungan arah vertikal (*wall system*, *anchor*) dan sistem dukungan untuk menahan lentur (*wall system*). Setiap sistem support tersebut memiliki komponen yang menentukan bentuk dan besarnya lendutan yang terjadi. Menurut Clough dan O'Rourke (1990), rata-rata defleksi horisontal maksimum dinding pada lempung kaku (*stiff clay*), tanah residual dan pasir adalah sekitar 0,2% dari kedalaman galian, tetapi ada kasus dimana besarnya adalah sekitar 0,5% atau lebih. Tidak ada perbedaan yang signifikan diantara tipe dinding yang ditunjukkan pada gambar 1 dibawah ini.



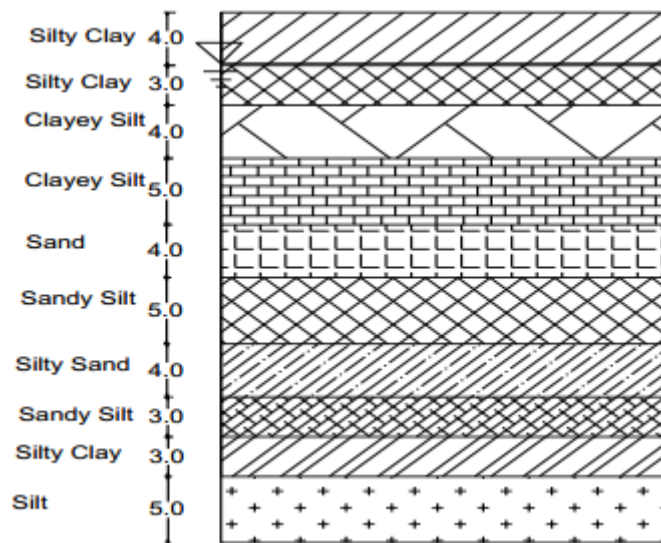
Gambar 1. Pengamatan defleksi horisontal maksimum dinding untuk tipe-tipe dinding pada tanah lempung kaku (*stiff clay*), tanah residual, dan pasir (Clough et al, 1990)

Penurunan Tanah

Penurunan tanah (*ground settlement*) di belakang dinding secara umum disebabkan oleh beberapa hal, yaitu akibat defleksi dinding selama galian, pemasangan dinding, pemasangan anchor, dan proses dewatering. Selama konstruksi galian, kehilangan tegangan horizontal pada tanah menghasilkan pergerakan besar ke arah galian tanah pada dinding penahan tanah (DPT). Pergerakan horizontal DPT menyebabkan penurunan tanah (*ground settlement*) di daerah belakang dinding. Besarnya penurunan tanah dibelakang DPT faktanya tergantung pada tipe dan kekakuan *support*, posisi *support* dan kekakuan dinding yang digunakan.

3. STUDI KASUS

Studi kasus penelitian ini berada di Stasiun Senayan MRT Jakarta. Pada penelitian ini dilakukan simulasi numerik dengan software Plaxis 3D dan 2D dengan model konstitutif tanah Mohr Coulomb dan Hardening Soil. Data tanah didapatkan dari hasil pengeboran uji SPT pada titik BH E-480. Profil tanah pada penelitian ini dapat dilihat pada gambar 2 dibawah ini.



Gambar 2. Profil tanah yang mewakili

4. PEMODELAN PADA PLAXIS 3D DAN 2D

Metode analisis yang digunakan dalam studi kasus ini dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Metode analisis *Drained* dan *Undrained*

Material Model	Metode	Parameter	
		Strength	Stiffness
Mohr-Coulomb	Undrained A	c' dan ϕ'	E' dan ν'
	Drained	c' dan ϕ'	E' dan ν'
Hardening Soil	Undrained A	c' dan ϕ'	E' dan ν'
	Drained	c' dan ϕ'	E' dan ν'

Tahapan konstruksi yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Pemasangan konstruksi D-Wall sedalam 22.927 m
2. Pemasangan *pressure relief well* (PRW)
3. Galian tahap 1
4. Pengecoran *roof slab* setebal 0.8 m dan penimbunan *backfill* setebal 0.75 m
5. Pemasangan *kingpost* 1
6. Galian tahap 2
7. Pengecoran *concourse slab* dengan tebal 0.4 m
8. Pemasangan *kingpost* 2
9. Galian tahap 3
10. Pengecoran *base slab* dengan tebal 1 m.
11. Penimbunan kembali *backfill* hingga level muka tanah.

Berikut tabel resume parameter tanah dan struktur yang digunakan:

Tabel 2. Resume parameter model tanah Mohr-Coulomb

Layer	Kedalaman			Tipe Tanah	N _{rata-rata}	Konsistensi	γ_{unsat}	γ_{sat}	c_u	ϕ	c'	ϕ'	PI	k_x	k_y	β	v'	v_u	Eu	E'	R _{inter}
	(m)						(kN/m ³)	(kN/m ³)	(kPa)	(°)	kN/m ²	(°)	%	(m/s)	(m/s)	(-)			(kN/m ²)	(kN/m ²)	
1	0	-	4	Silty Clay	8	Soft to Medium	15.2	16.2	48.0	0	9.6	20	48	1.00E-07	1.00E-07	180	0.35	0.45	8640	7776	0.85
2	4	-	7	Silty Clay	9	Medium	15.5	16.5	54.0	0	10.8	21	47	1.00E-07	1.00E-07	200	0.35	0.45	10800	9720	0.85
3	7	-	11	Clayey Silt	11	Medium to Stiff	16.5	17.5	66.0	0	13.2	21	45	1.00E-07	1.00E-07	300	0.35	0.45	19800	17820	0.84
4	11	-	16	Clayey Silt	19	Stiff	17.0	18.0	114.0	0	22.8	22	39	1.00E-07	1.00E-07	250	0.35	0.45	28500	25650	0.83
5	16	-	20	Sand	35	Dense	18.0	19.0	-	-	0	37	0	1.00E-05	1.00E-05	-	0.3	0.3	-	70000	0.5
6	20	-	25	Sandy Silt	50	Very Hard	17.9	18.9	300.0	0	60	23	34	1.00E-07	1.00E-07	400	0.35	0.45	120000	108000	0.82
7	25	-	29	Silty Sand	40	Very Dense	18.0	19.0	-	-	5	37	0	1.00E-06	1.00E-06	-	0.3	0.3	-	80000	0.55
8	29	-	32	Sandy Silt	48	Hard	17.3	18.3	288.0	0	57.6	24	28	1.00E-07	1.00E-07	400	0.35	0.45	115200	103680	0.79
9	32	-	35	Silty Clay	31	Very Stiff	17.0	18.0	186.0	0	37.2	23	30	1.00E-07	1.00E-07	330	0.35	0.45	61380	55242	0.8
10	35	-	40	Silt	33	Very Stiff	17.5	18.5	198.0	0	39.6	23	30	1.00E-07	1.00E-07	350	0.35	0.45	69300	62370	0.8

Tabel 3. Resume parameter model tanah Hardening Soil

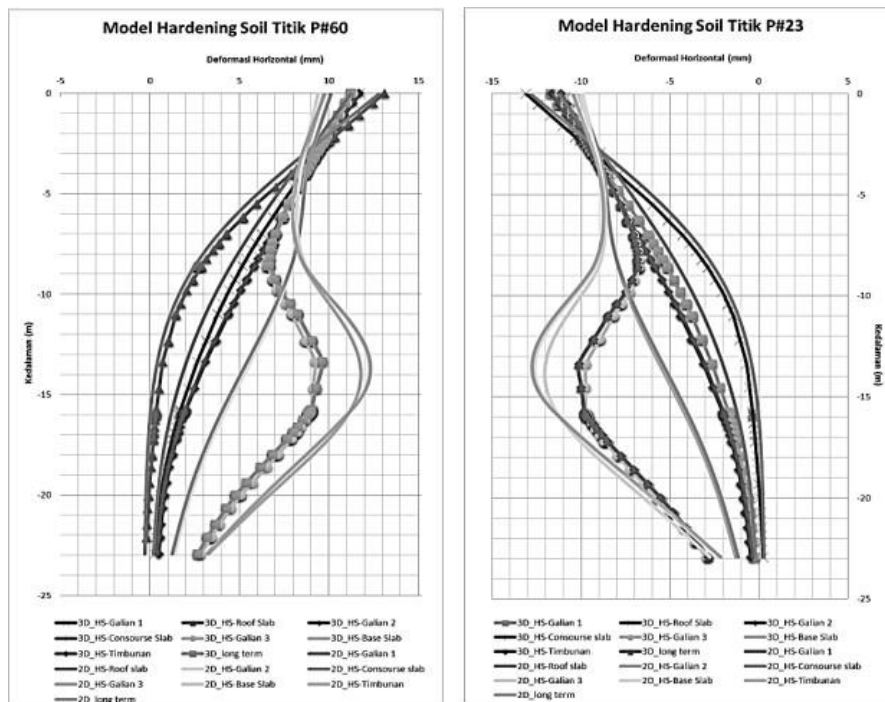
Layer	Kedalaman			Tipe Tanah	N _{rata-rata}	Konsistensi	c _u	ϕ	c'	ϕ	v _u	v'	β	E ₅₀ ^{ref}	E _{oed} ^{ref}	E _{ur} ^{ref}	m	R _{inter}
	(m)						(kN/m ²)	(°)	(kN/m ²)	(°)			(-)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(kN/m ²)	(power)	
1	0	-	4	Silty Clay	8	Soft to Medium	48.0	0	9.6	20	0.45	0.35	180	7776	6221	23328	0.85	0.85
2	4	-	7	Silty Clay	9	Medium	54.0	0	10.8	21	0.45	0.35	200	9720	7776	29160	0.85	0.85
3	7	-	11	Clayey Silt	11	Medium to Stiff	66.0	0	13.2	21	0.45	0.35	300	17820	14256	53460	0.84	0.84
4	11	-	16	Clayey Silt	19	Stiff	114.0	0	22.8	22	0.45	0.35	250	25650	20520	76950	0.83	0.83
5	16	-	20	Sand	35	Dense	-	-	0	37	0.3	0.3	-	70000	56000	210000	0.5	0.5
6	20	-	25	Sandy Silt	50	Very Hard	300.0	0	60	23	0.45	0.35	400	108000	86400	324000	0.82	0.82
7	25	-	29	Silty Sand	40	Very Dense	-	-	5	37	0.3	0.3	-	80000	64000	240000	0.55	0.55
8	29	-	32	Sandy Silt	48	Hard	288.0	0	57.6	24	0.45	0.35	400	103680	82944	311040	0.79	0.79
9	32	-	35	Silty Clay	31	Very Stiff	186.0	0	37.2	23	0.45	0.35	330	55242	44194	165726	0.8	0.8
10	35	-	40	Silty Clay	33	Very Stiff	198.0	0	39.6	23	0.45	0.35	350	62370	49896	187110	0.8	0.8

Tabel 4. Parameter struktur yang digunakan pada Plaxis 3D

Nama Plate	Tipe	d	γ	E_1	v_{12}	G_{12}
		(m)	(kN/m ³)	(kN/m ²)		(kN/m ²)
D-Wall	Elastic	1	24	2.80E+07	0.2	1.17E+07
Roof Slab	Elastic	0.8	24	2.80E+07	0.2	1.17E+07
Concourse Slab	Elastic	0.4	24	2.80E+07	0.2	1.17E+07
Base Slab	Elastic	1	24	2.80E+07	0.2	1.17E+07

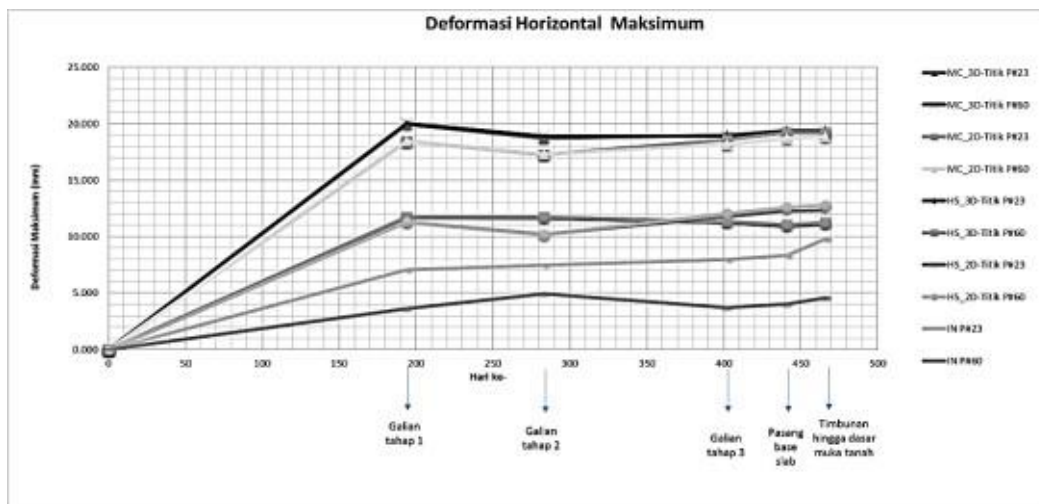
Tabel 5. Parameter struktur yang digunakan pada Plaxis 2D

Nama Plate	d	EA	EI	w	v
	(m)	(kN/m)	(kNm ² /m)	(kN/m ²)	
D-Wall	1	2.80E+07	2.33E+06	24	0.2
Roof Slab	0.8	2.24E+07	1.20E+06	19.2	0.2
Concourse Slab	0.4	1.12E+07	1.49E+05	9.6	0.2
Base Slab	1	2.80E+07	2.33E+06	24	0.2



Gambar 5. Perbandingan deformasi horizontal Plaxis 3D dengan Plaxis 2D model Hardening Soil di P#23 dan P#60

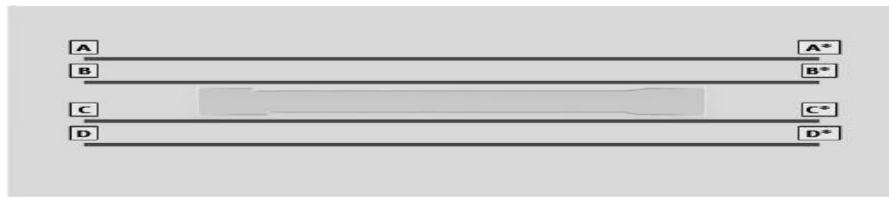
Besarnya deformasi horizontal maksimum yang terjadi pada tahapan konstruksi galian dalam pada permodelan tanah Mohr-Coulomb dan Hardening Soil dapat dilihat pada gambar 9 berikut.



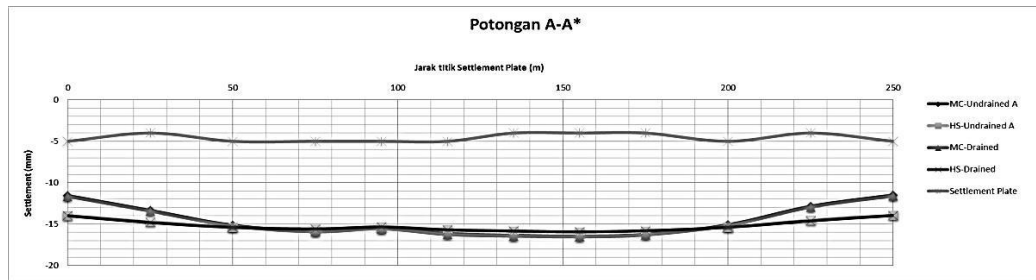
Gambar 6. Deformasi horizontal maksimum

B. Penurunan Tanah

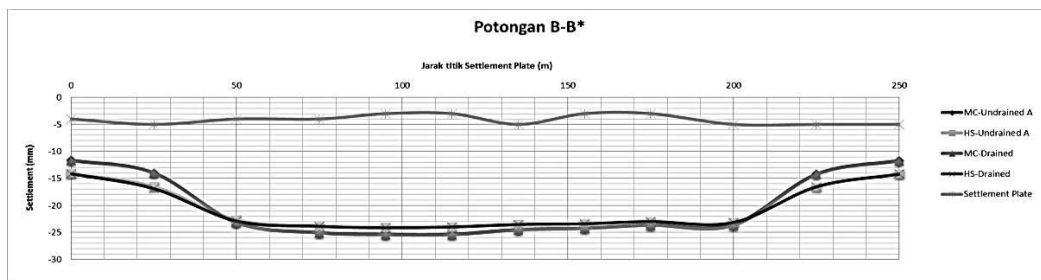
Deformasi vertikal atau penurunan tanah hasil permodelan tanah menggunakan model Mohr Coulomb dan Hardening Soil kemudian dibandingkan dengan monitoring lapangan dengan posisi tinjau monitoring yang dilakukan dapat dilihat pada gambar 7 dibawah ini.



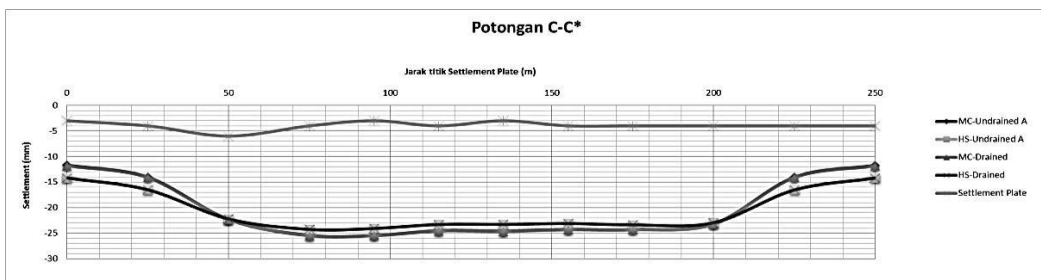
Gambar 7. Tampak atas monitoring *settlement plate* yang dipilih



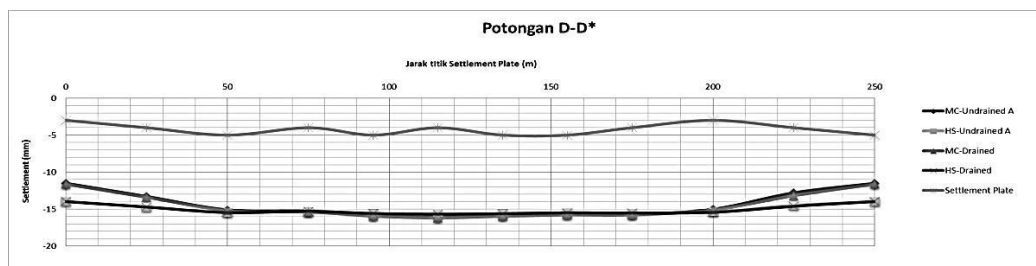
Gambar 8. Grafik penurunan tanah potongan A-A*



Gambar 9. Grafik penurunan tanah potongan B-B*



Gambar 10. Grafik penurunan tanah potongan C-C*

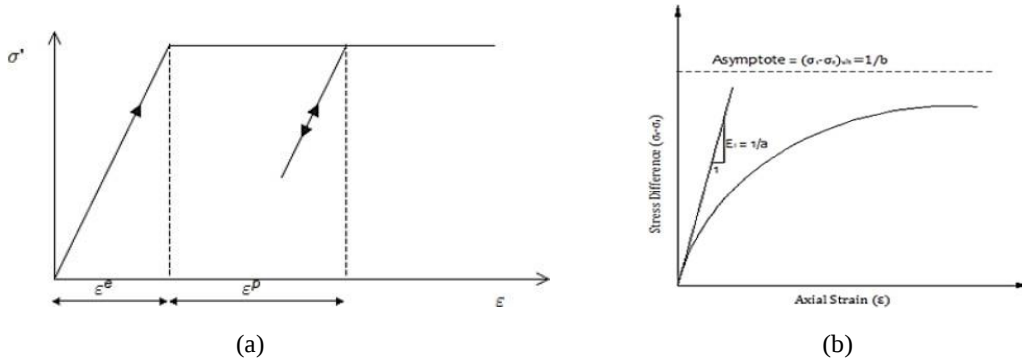


Gambar 11. Grafik penurunan tanah potongan D-D*

6. PEMBAHASAN

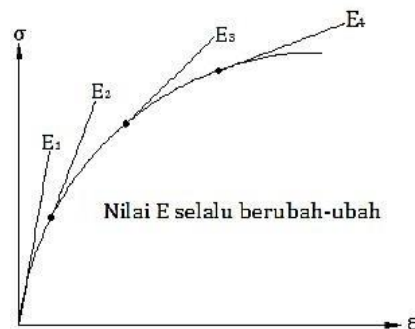
A. Analisis Deformasi Horizontal

Nilai deformasi horizontal yang dihasilkan menggunakan permodelan tanah Hardening Soil lebih kecil dan mendekati hasil monitoring di lapangan daripada menggunakan model tanah Mohr-Coulomb.



Gambar 12. Hubungan tegangan-regangan (a) model Mohr Coulomb (Manual Plaxis) (b) model Hardening Soil (Duncan & Chang, 1970)

Hal ini sesuai dengan kondisi pendekatan model Hardening Soil yang lebih mendekati perilaku tanah dilapangan dibandingkan dengan model Mohr Coulomb. Kurva hubungan *stress-strain* pada model Hardening Soil membentuk kurva hiperbolik yang menunjukkan perubahan nilai modulus elastisitasnya yang berbeda dan cenderung mengecil seiring dengan perubahan tegangan yang diberikan pada tanah. Keadaan ini lebih mendeskripsikan kondisi sebenarnya di lapangan.



Gambar 13. Perilaku tanah sesungguhnya (Liong, 2013)

Akibat metode konstruksi yang digunakan pada pekerjaan galian dalam adalah metode *top down*, sehingga menyebabkan deformasi yang terjadi saat kondisi *drained* tidak jauh berbeda daripada saat akhir tahapan konstruksi. Hal ini terjadi karena metode *top down* menggunakan langsung *slab* permanen saat konstruksi berlangsung sehingga mengunci pergerakan dinding diafragma. Selain itu, karena jenis tanah disekitar galian cukup kuat dengan nilai N-spt yang cukup tinggi maka deformasi yang terjadi juga tidak terlalu besar.

B. Analisis Penurunan Tanah

Penurunan tanah yang diukur oleh *settlement plate* adalah penurunan yang terjadi disekitar galian akibat konstruksi pekerjaan galian dalam di stasiun Senayan MRT Jakarta. Dari hasil monitoring lapangan tidak terlihat penurunan tanah yang cukup signifikan dengan nilai penurunan tanah berkisar kurang dari 6 mm saja. Berbeda cukup jauh dari hasil yang diprediksi menggunakan *software* Plaxis 3D dengan model tanah Mohr Coulomb dan Hardening Soil. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan metode elemen hingga jauh lebih besar dari hasil monitoring lapangan. Pada perhitungan deformasi vertikal atau *ground settlement*, model tanah Hardening Soil memberikan prediksi nilai yang hampir sama dengan model tanah Mohr-Coulomb pada kondisi *undrained* (*short term*). Daerah yang berada dekat dengan konstruksi galian dalam menunjukkan penurunan tanah yang cukup besar sekitar 24 mm. Pada kondisi *drained* (*long term*) baik model Mohr-Coulomb maupun Hardening Soil sama-sama menunjukkan nilai yang tidak berbeda jauh dari kondisi *undrained* (*short term*),

perbedaannya hanya berkisar kurang dari 0.1 mm. Dari hasil prediksi kedua model tanah Mohr-Coulomb dan Hardening Soil, *trendline* grafik menunjukkan hasil yang cukup representatif dengan keadaan dilapangan meskipun nilai deformasi yang dihasilkan jauh lebih besar.

7. KESIMPULAN

Dari penelitian yang sudah dilakukan pada stasiun Senayan MRT Jakarta, maka dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Besarnya deformasi horizontal yang diperoleh menggunakan model tanah Hardening Soil secara umum lebih mendekati dengan hasil monitoring dilapangan dibandingkan dengan model tanah Mohr-Coulomb.
2. Besarnya deformasi maksimum yang terjadi pada tiap tahap konstruksi galian dalam dengan menggunakan model Hardening Soil menunjukkan hasil deformasi yang lebih kecil daripada model Mohr-Coulomb baik pada Plaxis 3D maupun Plaxis 2D.
3. Deformasi vertikal atau penurunan tanah yang diperoleh menggunakan model tanah Hardening Soil maupun Mohr-Coulomb pada kondisi undrained (*short term*) memberikan hasil yang cukup masuk akal. Penurunan tanah di area yang lebih dekat dengan konstruksi galian menunjukkan hasil penurunan tanah lebih besar dibandingkan dengan yang lebih jauh dari area konstruksi meskipun nilainya masih jauh lebih besar daripada hasil monitoring dilapangan. Hasil dari analisis *drained* menunjukkan nilai yang lebih besar dari kondisi *undrained* meskipun nilai yang dihasilkan tidak jauh berbeda.

DAFTAR PUSTAKA

- Bishop, A.W. dan Bjerrum, L. (1960). "The Relevance of the Triaxial Test to the Solution of Stability Problems", *ASCE Conference on Strength of Cohesive soils*, 437 - 501.
- Bowles, Joseph E. (1982). *Foundation Analysis and Design, Third Edition*, Mc. Graw-Hill Companies, Inc., New York.
- Das, Braja M. (2011). *Principles of Foundation Engineering, 7th Edition*, Cengage Learning, Inc., USA.
- Holtz, Robert D., William D. Kovacs, Thomas C. Sheahan. (2011). *An Introduction Geotechnical Engineering Second Edition*, Pearson Education, Inc., Upper Saddle River.
- Kempfert, Hans-Georg dan Gebreselassie, Berhane. (2006). *Excavations and Foundations in Soft Soils*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, The Netherlands.
- Lim, A., Ou, C. Y., & Hsieh, P. (2010). "Evaluation of Clay Constitutive Models for Analysis of Deep Excavation Under Undrained Conditions", *Journal of Geoengineering*, 5 (1), 9-20.
- Ou, Chang-Yu. (2006). *Deep Excavation Theory and Practice*, Taylor & Francis Group, London.
- Ou, Chang Yu dan Ching-Her Lai. (1993). "Finite-Element Analysis of Deep Excavation in Layered Sandy and Clayey Soil Deposits", *Can. Geotech. J.*, 31, 204-214.
- Sorensen KK, dan Okkels N. (2013). "Correlation Between Drained Shear Strength and Plasticity Index of Undisturbed Overconsolidated Clays", *Journal of 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Y. M. Hou, J. H. Wang, dan L. L. Zhang. (2009). "Finite-Element Modeling of a Complex Deep Excavation in Shanghai", *Acta Geotechnica*, 4, 7-16.