

BAB 5

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

5.1 Pendahuluan

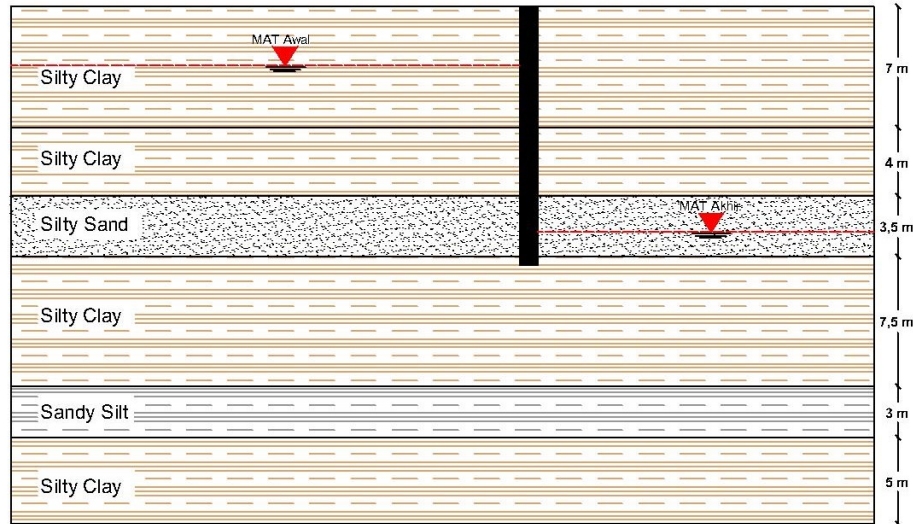
Proyek JHL S8 *Office* mempunyai 2 *basement*, dengan masing-masing elevasi yaitu 4,15 m dan 3,45 m. Pekerjaan galian dilakukan sebanyak 3 tahap. Tahap pertama yaitu *general excavation* dimana tanah digali sedalam 1 m. Tahap kedua yaitu galian *safety* yang ketinggian galiannya adalah 3,35 m, sehingga kedalaman galian sudah mencapai -4,35 m dari lantai dasar. Dan tahap galian yang ketiga yaitu *reduce level* atau galian dasar. Pada tahap ketiga pekerjaan galian sudah mencapai dasar yang sudah direncanakan yaitu sebesar -8,65 m dari lantai dasar.

Untuk memudahkan pekerjaan galian, proyek ini melakukan *dewatering* untuk menurunkan muka air tanah dari elevasi -3,4 m menjadi -12,93 m. Penelitian ini hendak menganalisis deformasi lateral yang terjadi pada *contiguous bored pile* menggunakan bantuan aplikasi Plaxis 2D V8.2 dengan pemodelan *Mohr Coulomb* dan *Hardening Soil* lalu dibandingkan hasil tersebut dengan hasil pengamatan di lapangan menggunakan *inclinometer*. Dikarenakan tersedianya data triaxial *Unconsolidated Undrained* dan jenis tanah yang mendominasi adalah tanah lempung, maka analisis ini menggunakan metode *Undrained B* (tegangan efektif) untuk pemodelan *Mohr Coulomb* dan *Hardening Soil* serta metode *Undrained C* (tegangan total) untuk pemodelan *Mohr Coulomb*. Pemodelan *Hardening Soil* ini tidak melibatkan analisis dalam kondisi tegangan total, karena hal tersebut menghasilkan nilai indeks kompresibilitas yang tidak rasional untuk tanah lunak. Selain menganalisis deformasi, penulis juga menganalisis *safety factor* yang didapat dari aplikasi Plaxis dengan perhitungan manual.

5.2 Deformasi Lateral Dinding Penahan Tanah

Dalam studi ini, analisis dilakukan terhadap penggalian dengan dua pendekatan, yaitu analisis jangka pendek dan analisis jangka panjang. Fokus penelitian ini adalah hasil deformasi lateral maksimum pada dinding penahan tanah akibat pekerjaan galian. Pada pemodelan ini, tidak ditambahkan beban karena keterbatasan data beban struktur yang tidak diketahui dan juga data pondasi yang

spesifik sehingga pola keruntuhannya yang mempengaruhi *retaining wall* tidak bisa diperhitungkan. Hasil analisis menunjukkan bahwa deformasi terbesar terjadi pada penggalian ketiga.



Gambar 5.1 Pemodelan Tanah

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

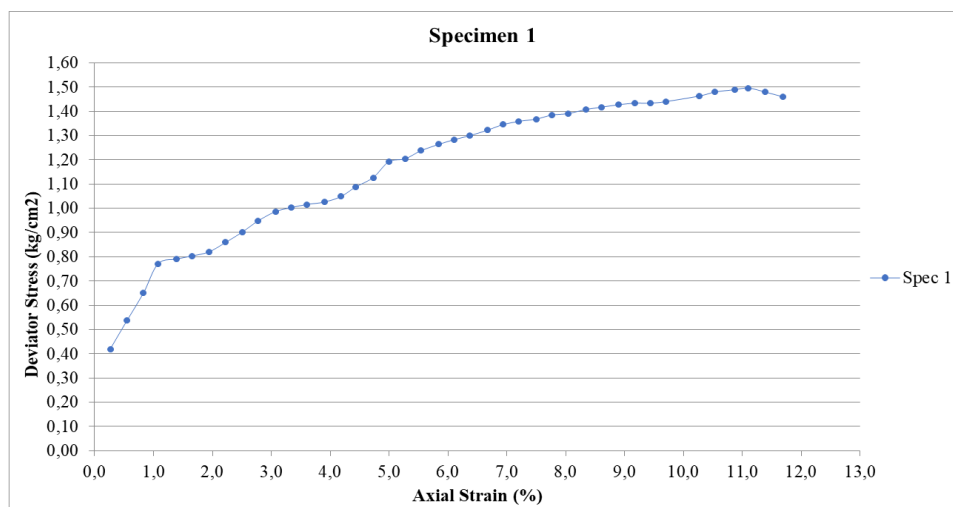
5.2.1 Parameter Tanah

Parameter tanah diperoleh melalui hasil pengujian laboratorium pada lapisan tanah dengan pengambilan *Undisturbed Sample* (USD). Untuk lapisan tanah yang tidak termasuk *undisturbed sample*, parameter tanah ditentukan berdasarkan hasil korelasi terhadap nilai tes penetrasi standar (N-SPT) atau dikaitkan dengan data yang tersedia. Nilai N-SPT yang tersedia mencapai kedalaman 30 meter. Selain N-SPT, data pengujian *triaxial* bisa dijadikan acuan parameter dalam penelitian ini. Dikarenakan adanya data *triaxial unconsolidated undrained*, maka analisa yang dilakukan merupakan *undrained analysis*. Pengujian ini dilakukan dengan membuat pemodelan *Mohr Coulomb Undrained B*, *Mohr Coulomb Undrained C*, dan *Hardening Soil Undrained B*. Berikut adalah parameter-parameter tanah yang digunakan dalam analisa:

- Mohr Coulomb Undrained B*: γ_{unsat} , γ_{sat} , k_x , k_y , E' , ν' , C_u , $\phi = 0$, $\psi = 0$
- Mohr Coulomb Undrained C*: γ_{unsat} , γ_{sat} , k_x , k_y , E_u , $\nu_u = 0,495$, C_u , $\phi = 0$, $\psi = 0$
- Hardening Soil Undrained B*: γ_{unsat} , γ_{sat} , k_x , k_y , E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} , E_{ur}^{ref} , m , C_u , $\phi = 0$, $\psi = 0$

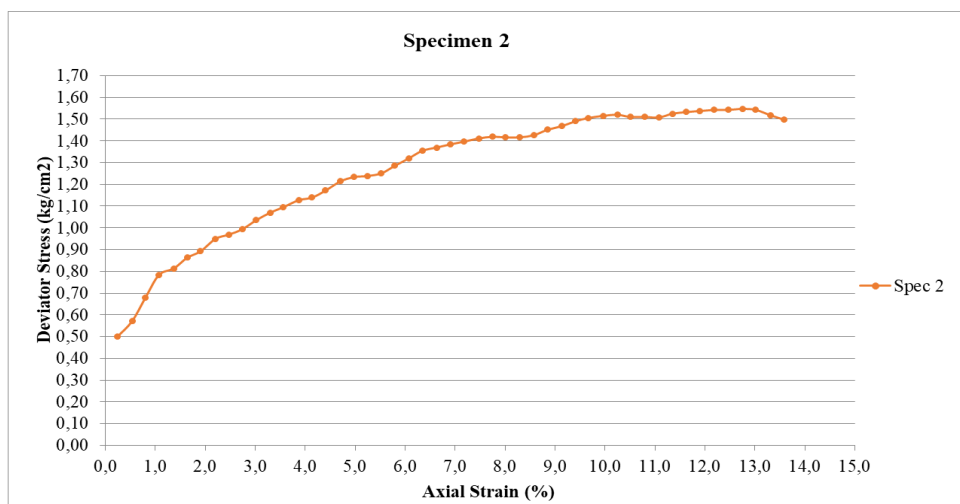
Untuk lapisan tanah pertama dan keenam, nilai modulus (E' , E_u , dan E_{50}^{ref}) didapatkan dari data triaxial *test* dan sisanya menggunakan asumsi yang digunakan pada umumnya. Adapun tahapan mencari nilai ketiga modulus pada salah satu lapisan (*layer* pertama) yaitu:

- a. Pada data triaxial *test* lapisan pertama dilakukan menggunakan tiga sampel tanah. Dari hasil uji triaxial didapatkan grafik *stress-strain* dari ketiga *specimen* tersebut. Masing-masing ketiga *specimen* itu dicari nilai modulusnya. Langkah awal, memisahkan garis grafik *stress-strain* dari ketiga *specimen* yang mana awalnya dijadikan satu grafik.



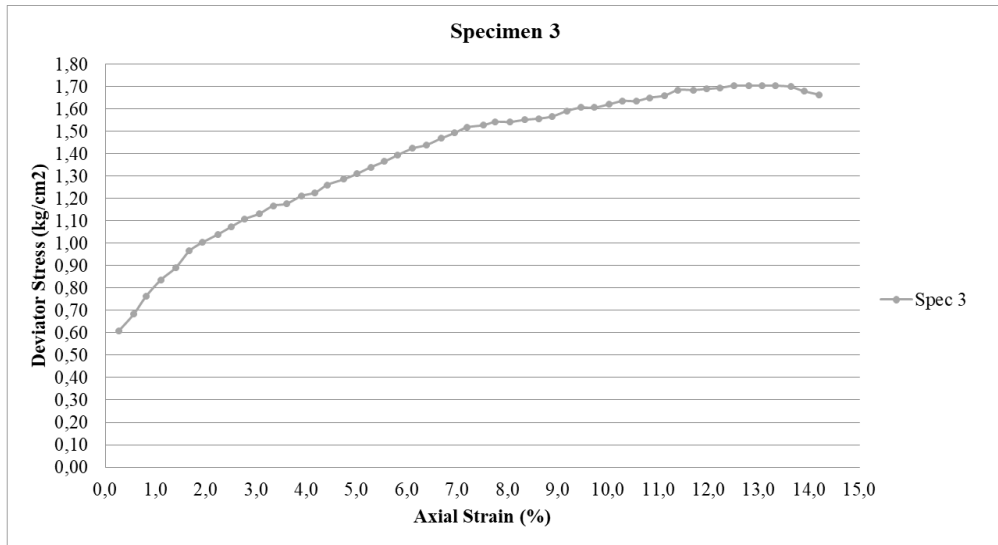
Gambar 5.2 Grafik *Stress-Strain Specimen 1*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)



Gambar 5. 3 Grafik *Stress-Strain Specimen 2*

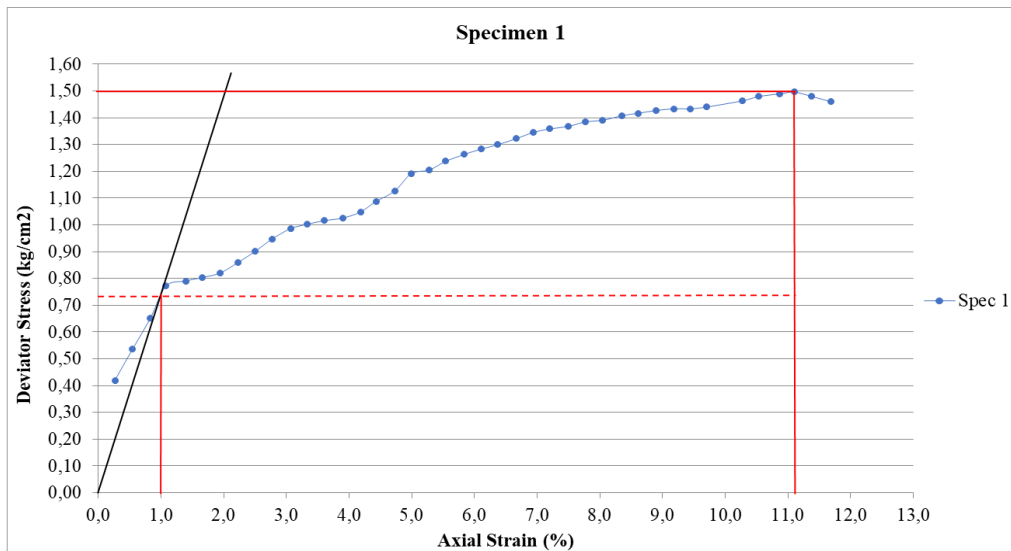
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)



Gambar 5.4 Grafik *Stress-Strain Specimen 3*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

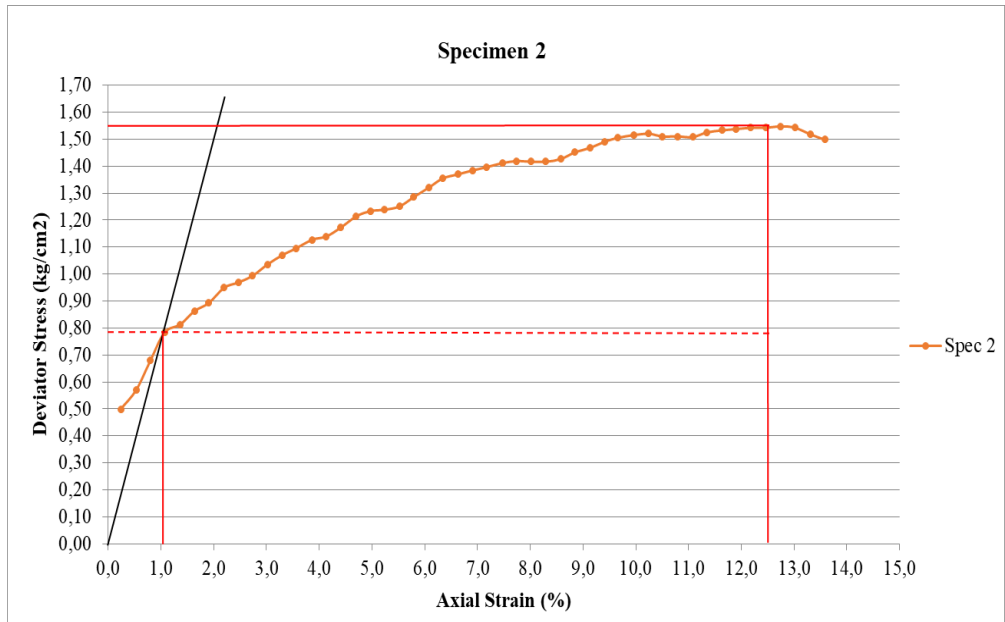
- b. Langkah selanjutnya yaitu mencari nilai maksimum *stress* pada masing-masing *specimen* kemudian nilai tersebut dibagi dua. Nilai *stress* tersebut ditarik sampai menyinggung grafik *stress-strain*, didapatlah nilai *strain* dari titik singgung tersebut. Nilai modulus yaitu membagi nilai 50% maksimum *stress* tadi dengan *strain* yang didapat dari garis singgung.



Gambar 5.5 Grafik Modulus *Specimen 1*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

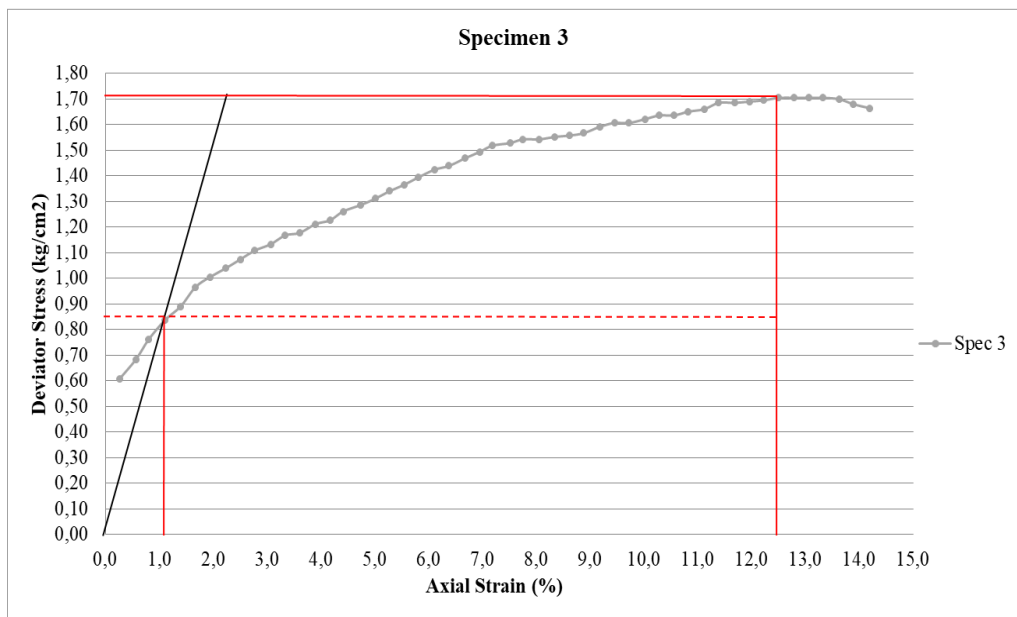
$$\text{Modulus specimen 1} = \frac{0,7424}{1,05\%} = 70,70476 \text{ kg/cm}^2 = 7070,476 \text{ kN/m}^2$$



Gambar 5.6 Grafik Modulus *Specimen 2*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

$$\text{Modulus specimen 2} = \frac{0,7716}{1,1\%} = 70,15 \text{ kg/cm}^2 = 7014,55 \text{ kN/m}^2$$



Gambar 5.7 Grafik Modulus *Specimen 3*

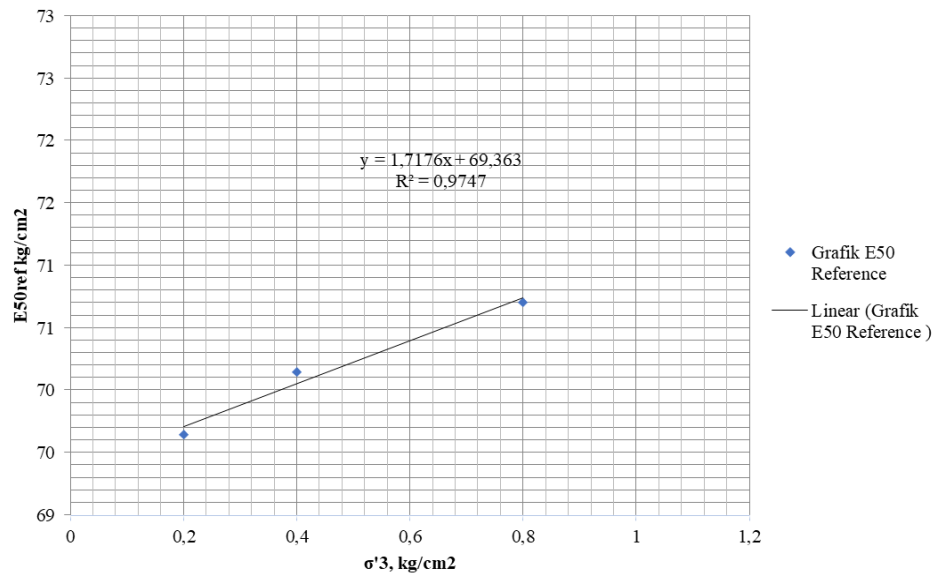
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

$$\text{Modulus specimen 3} = \frac{0,8566}{1,23\%} = 69,642 \text{ kg/cm}^2 = 6964,2 \text{ kN/m}^2$$

Nilai E_u pada pemodelan *Mohr Coulomb Undrained C*, diambil dari nilai modulus paling besar dari ketiga *specimen* yaitu $7070,476 \text{ kN/m}^3$. Sedangkan nilai E' pada pemodelan *Mohr Coulomb Undrained B* menggunakan rumus empiris sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 E' &= \frac{2 \times (1+\nu') \times E_u}{2 \times (1+\nu_u)} \\
 &= \frac{2 \times (1+0,45) \times 7070,476}{2 \times (1+0,495)} \\
 &= 6834,794 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

- c. Untuk menentukan modulus E_{50}^{ref} dibuat grafik nilai modulus dengan nilai lateral *pressure* atau tegangan utama minor efektif (σ'_3) masing-masing *specimen* yang didapat dari lingkaran *Mohr*. Kemudian dibuatlah garis linear dari grafik tersebut sehingga menghasilkan sebuah persamaan. E_{50}^{ref} diambil ketika $P_{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$ atau 1 kg/cm^2 .



Gambar 5.8 Grafik E_{50}^{ref}

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

$$\begin{aligned}
 E_{50}^{\text{ref}} &= 1,7176 (1) + 69,363 \\
 &= 71,081 \text{ kg/cm}^2 = 7108,06 \text{ kN/m}^2
 \end{aligned}$$

Adapun rekapitulasi semua parameter per-lapisan tanah yaitu:

Tabel 5.1 Parameter Tanah

Layer	1	2	3	4	5	6
Kedalaman (m)	0 – 7	7 - 11	11 – 14,5	14,5 - 22	22 - 25	25 - 30
Jenis Tanah	<i>Silty Clay</i>	<i>Silty Clay</i>	<i>Silty Sand</i>	<i>Silty Clay</i>	<i>Sandy Sily</i>	<i>Silty Clay</i>
N-SPT	11	30	60	40	29	22
Konsistensi	<i>Stiff</i>	<i>Very Stiff</i>	<i>Very Dense</i>	<i>Hard</i>	<i>Very Stiff</i>	<i>Very Stiff</i>
γ_{unsat} (kN/m ³)	14,15	20,67	22	20,67	20,67	14
γ_{sat} (kN/m ³)	16,7	22	23	22	22	16,8
K (m/day)	0,000864	0,000864	0,864	0,000864	0,000864	0,000864
Cu (kN/m ²)	58,84	151,667	0	201	142,5	122,583
v'	0,45	0,4	0,3	0,35	0,4	0,4
E' (kN/m ²)	6834,794	56811,594	104347,826	72602,007	53377,926	52046,667
Eu (kN/m ²)	7070,476	60666,667	120000	80400	57000	55764,286
E ₅₀ ^{ref} (kN/m ²)	7108,06	56811,594	104347,826	72602,007	53377,926	42325
E _{oed} ^{ref} (kN/m ²)	7108,06	56811,594	104347,826	72602,007	53377,926	42325
E _{ur} ^{ref} (kN/m ²)	21324,18	170434,783	313043,478	217806,02	160133,779	126975
Power / m	1	1	0,5	1	0,7	1

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

5.2.2 Parameter Dinding Penahan Tanah

Jenis dinding penahan tanah yang digunakan yaitu *contiguous bored pile* dengan kedalaman 15 m. Berikut adalah parameter dinding penahan tanah yang digunakan:

- a. Diameter (b) : 1 m
- b. Mutu beton (fc) : 25 MPa
- c. Mutu baja (fy) : 420 MPa
- d. Modulus elastisitas (E) : $4700 \times \sqrt{fc}$
: $4700 \times \sqrt{25}$
: 23500 MPa
: $2,35 \times 10^7$ kN/m³
- e. Kekakuan aksial (EA) : E x b x h
: $2,35 \times 10^7 \times 1 \times 1$
: $2,35 \times 10^7$ kN/m

f. Kekakuan lentur (EI) : $\frac{E \times h^3 \times b}{12}$
: $\frac{2,35 \times 10^7 \times 1^3 \times 1}{12}$
: $1,9583 \times 10^6 \text{ kN/m}^2/\text{m}$

g. W : Luas DPT x Berat jenis beton
: $\frac{1}{4} \times \pi \times 1^2 \times 24$
: $18,84 \text{ kN/m/m}$

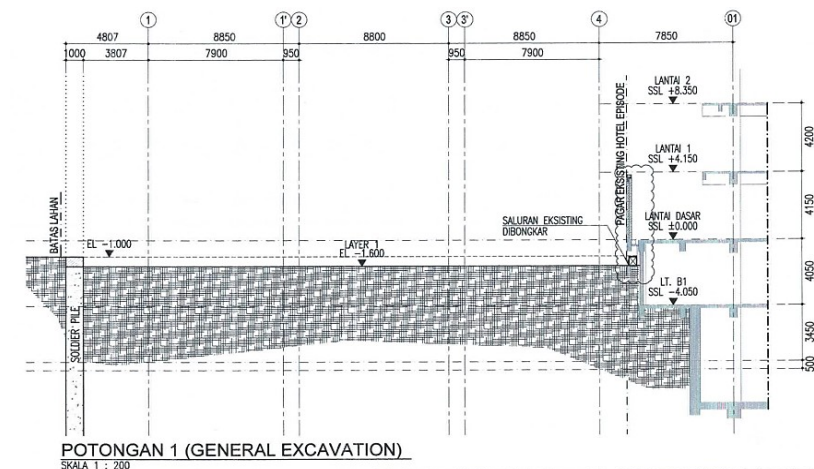
h. v : 0,15

5.2.3 Analisis Deformasi Lateral *Contiguous Bored Pile* menggunakan Plaxis

Pekerjaan galian untuk *basement* mengakibatkan deformasi lateral pada dinding penahan tanah. Pekerjaan galian ini melalui tiga tahap yaitu:

a. Galian 1 atau *General Excavation*

Pada tahapan ini, pekerjaan galian dilakukan hingga elevasi -1 m.

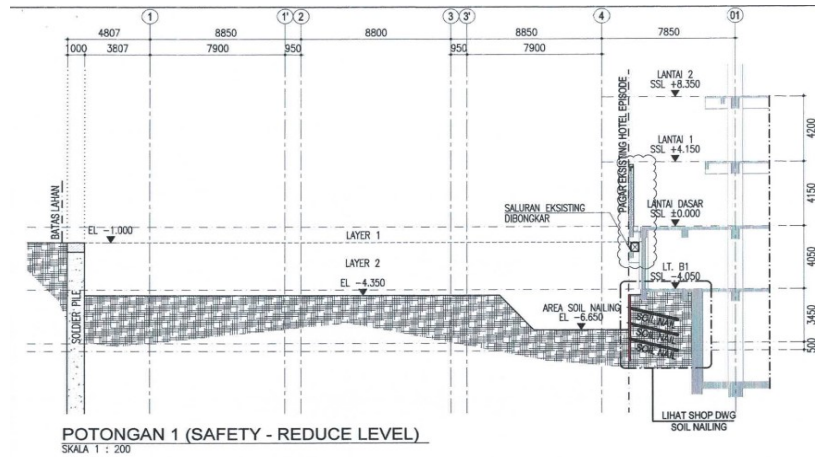


Gambar 5.9 Potongan *General Excavation*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

b. Galian 2 atau Galian *Safety*

Sebelum dilakukan pekerjaan galian tahap ini, muka air tanah diturunkan menjadi -12,93 m kemudian baru dilakukan pekerjaan galian yang dilakukan hingga elevasi -4,35 m.

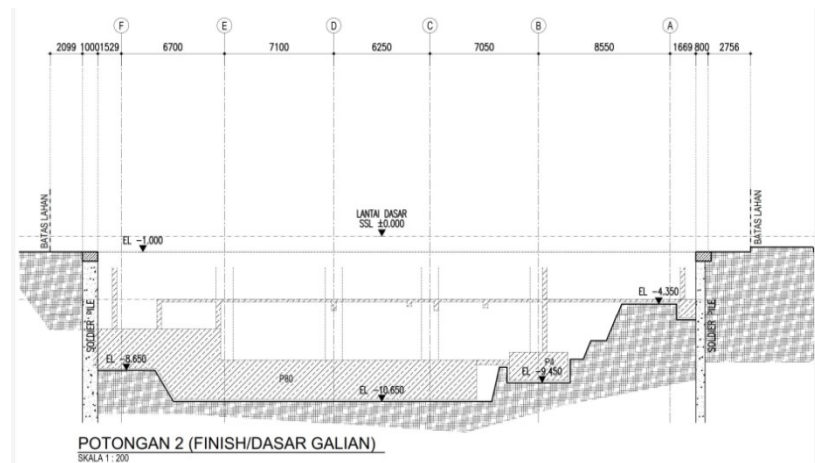


Gambar 5.10 Potongan Galian *Safety*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

c. Galian 3 atau *Reduce Level*

Pada tahap ini merupakan tahapan pekerjaan galian dasar dimana kedalaman galian dasar yaitu -8,65 m.



Gambar 5.11 Potongan Dasar Galian

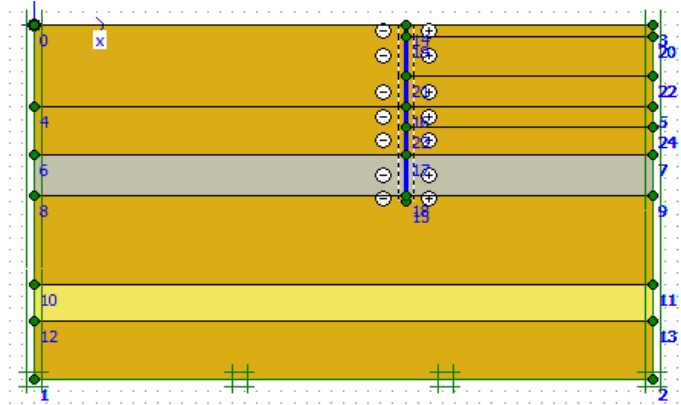
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Analisis galian dengan perkuatan dinding penahan tanah menggunakan Plaxis dilakukan dalam kondisi tahap galian terakhir atau galian dasar. Penjelasan mengenai tahapan konstruksi yang dimodelkan pada Plaxis 2D diuraikan sebagai berikut:

a. Tahapan Input

- 1) Merancang geometri sesuai kondisi lapangan. Pemodelan penampang melintang galian yang dilengkapi dengan dinding penahan tanah dalam

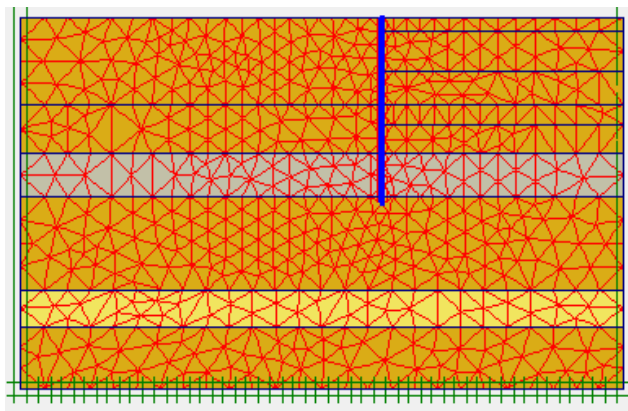
program Plaxis dilakukan dalam dua dimensi, dengan mempertimbangkan semua parameter data geoteknik. Langkah berikutnya adalah penerapan kondisi batas pada pemodelan agar perilaku pemodelan serealistis mungkin.



Gambar 5.12 Pemodelan pada Plaxis

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

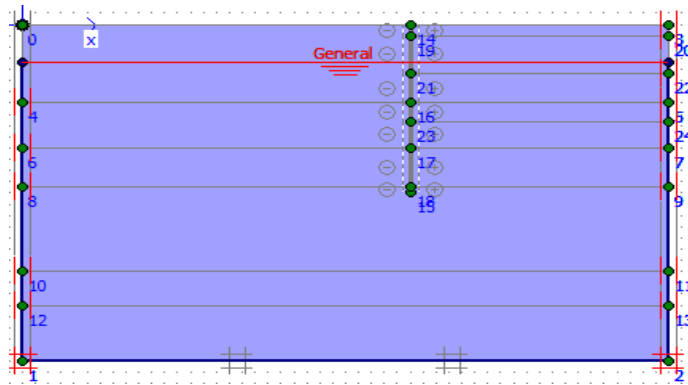
- 2) Langkah selanjutnya adalah membagi geometri model menjadi elemen-elemen imajiner yang biasanya disebut *meshing*.



Gambar 5.13 *Meshing*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

- 3) Tahap berikutnya yaitu melakukan penetapan *initial condition*. Dalam tahap ini, tegangan air pori (*initial pore pressure*) dan tegangan awal (*initial stress*) didefinisikan. Perhitungan tegangan air pori dimulai dengan pemodelan muka air tanah awal dengan menggunakan garis *phreatic*.

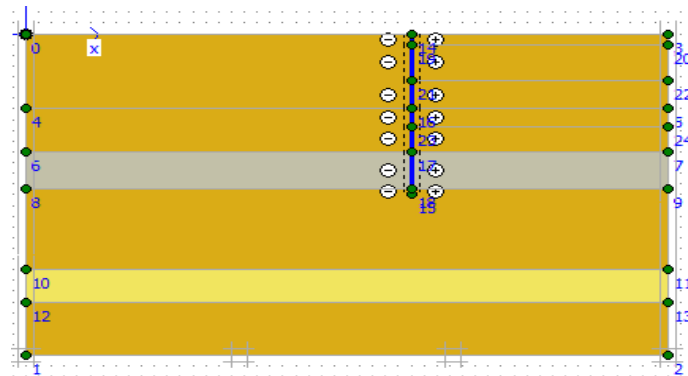


Gambar 5.14 *Initial Condition*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

b. Tahapan *Calculation*

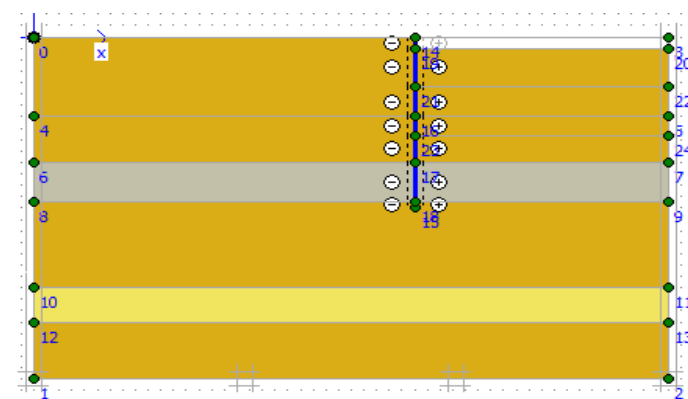
- 1) Mengaktifkan dinding penahan tanah yang dilakukan sebelum pekerjaan galian. Dinding penahan tanah dipasang sampai kedalaman 15 m.



Gambar 5.15 *Pemasangan Contiguous Bored Pile*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

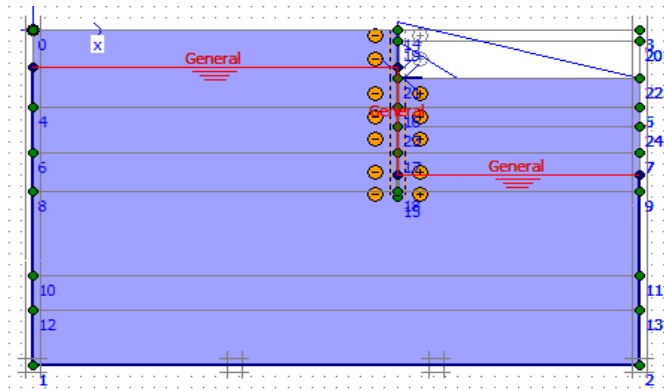
- 2) Pekerjaan galian tanah pertama hingga elevasi -1 m.



Gambar 5.16 *Pekerjaan Galian Tahap 1*

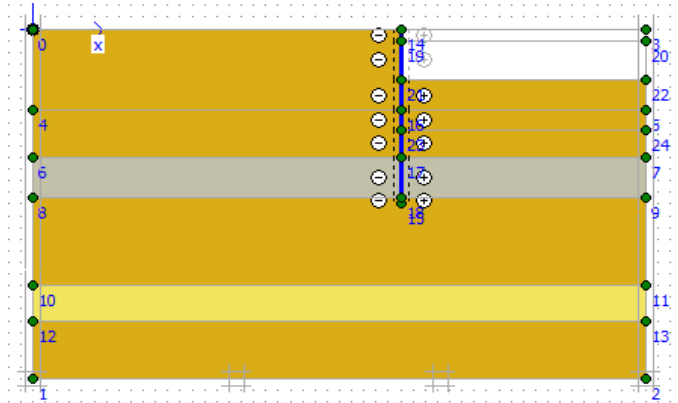
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

- 3) Pekerjaan galian tanah kedua hingga elevasi -4,35. Sebelum pekerjaan galian, diturunkan terlebih dahulu muka air tanah sedalam -12,93 m.



Gambar 5.17 Penurunan Muka Air Tanah

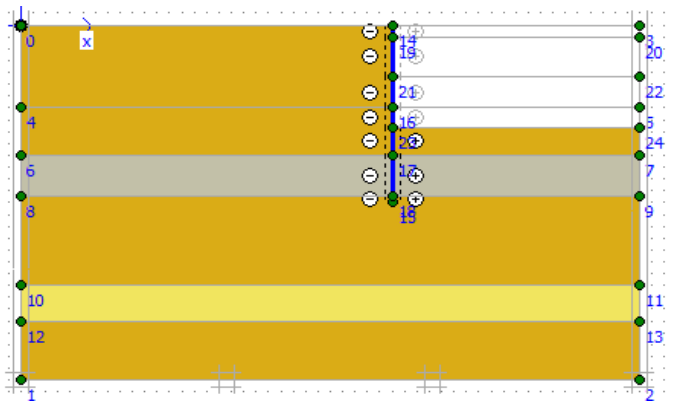
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)



Gambar 5.18 Pekerjaan Galian Tahap 2

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

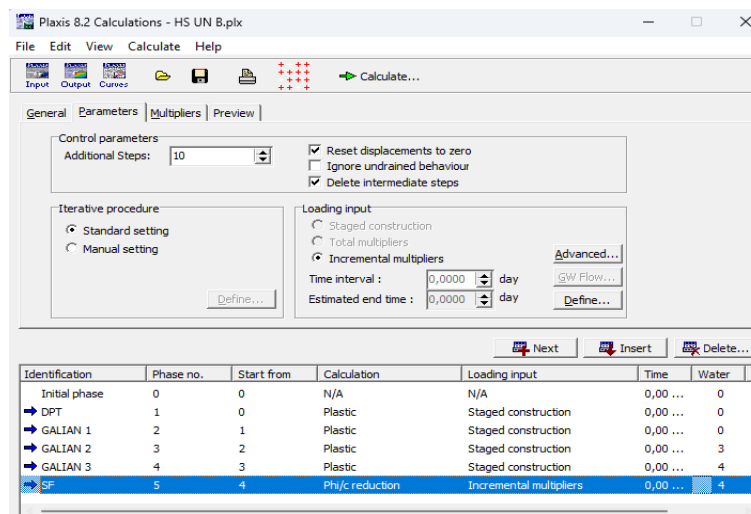
- 4) Pekerjaan galian tanah ketiga atau galian dasar hingga elevasi -8,65 m.



Gambar 5.19 Pekerjaan Galian Tahap 3

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

- 5) Perhitungan *safety factor* pada dinding penahan tanah. Tipe perhitungan fase ini didasarkan pada perhitungan *safety* dengan *output* berupa angka keamanan (*safety factor*) pada kondisi galian terakhir.
- 6) Melakukan proses kalkulasi. Setelah membuat pemodelan dan analisis, tahap selanjutnya adalah menghasilkan keluaran dari hasil pemodelan tersebut dalam bentuk perhitungan. Hasil perhitungan mencakup nilai total penurunan tanah (*displacement*), tekanan air pori berlebih (*excess pore pressure*), dan faktor keamanan (*safety factor*).



Gambar 5.20 Jendela *Calculation* Plaxis

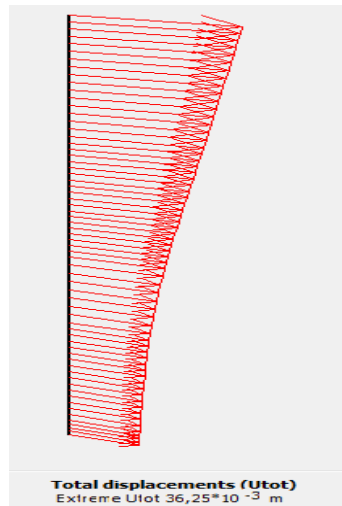
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

c. Hasil Analisis Deformasi Lateral menggunakan Plaxis 2D

Analisis yang dikaji berupa kondisi jangka pendek (*total stress analysis*) dan jangka panjang (*effective stress analysis*). Untuk kedua analisis tersebut memiliki tahapan konstruksi yang sama, yang membedakan kedua analisis tersebut adalah parameterinya. Berikut hasil yang didapatkan dari analisa deformasi lateral pada setiap pemodelan.

1) Deformasi lateral pemodelan *Mohr Coulomb Undrained B*

Pada pemodelan ini dilakukan analisis *long term* atau jangka panjang. Deformasi dinding penahan tanah yang didapatkan sebesar $36,25 \times 10^{-3}$ m.

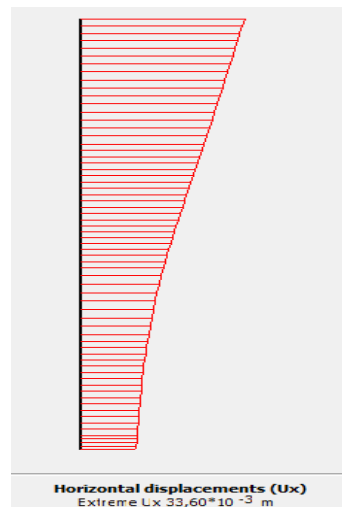


Gambar 5.21 Deformasi Lateral Pemodelan *Mohr Coulomb Undrained B*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

2) Deformasi lateral pemodelan *Mohr Coulomb Undrained C*

Pada pemodelan ini dilakukan analisis *short term* atau jangka pendek. Deformasi dinding penahan tanah yang didapatkan sebesar $33,6 \times 10^{-3}$ m.

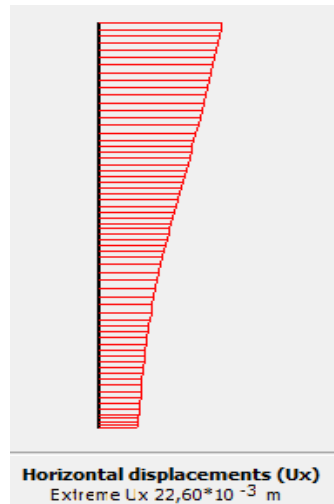


Gambar 5.22 Deformasi Lateral Pemodelan *Mohr Coulomb Undrained C*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

3) Deformasi lateral pemodelan *Hardening Soil Undrained B*

Pada pemodelan ini dilakukan analisis *short term* atau jangka panjang. Deformasi dinding penahan tanah yang didapatkan sebesar $22,6 \times 10^{-3}$ m.



Gambar 5.23 Deformasi Lateral Pemodelan *Hardening Soil*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

4) Deformasi izin

Nilai syarat deformasi lateral izin dinding penahan tanah mengikuti peraturan SNI 8460-2017 Pasal 11.5 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik.

Tabel 5.2 Batasan Deformasi Lateral Dinding Penahan Tanah

Batas Maksimum Deformasi Lateral Dinding	Lokasi Gedung dan Infrastruktur Terdekat			
	Zona 1 (x/H < 1)	Zona 2 (1 < x/H < 2)	Zona 3 (x/H > 2)	
			Tanah Tipe A	Tanah Tipe B
Batas izin maksimum deformasi lateral ($\delta w/H$)	0,50 %	0,70 %	0,70 %	1,00 %

(Sumber: SNI 8460-2017)

Keterangan:

x : Jarak dari batas galian (m)

H : Kedalaman galian (m)

δw : Defleksi dinding (m)

Tipe tanah A : Tanah lempung dan lanau *overconsolidated* (*overconsolidated stiff clays* dan *silt*), tanah residual (*residual soils*), dan tanah pasir dengan kepadatan sedang sampai dengan padat (*medium to dense sands*).

Tipe tanah B : Tanah lempung dan lanau lunak (*soft clays, silt*), tanah organic (*organic soils*) dan tanah timbunan tidak terdapatkan (*loose fill*).

Lokasi gedung JHL S8 *Office* ini menurut Pasal 11.5 termasuk zona 1, yaitu rasio jarak dari batas galian ke gedung terdekat proyek dengan kedalaman galian kurang dari 1.

$$\begin{aligned}
 0,5 \% H &= 0,5 \% \times 8,65 \text{ m} \\
 &= 0,04325 \text{ m} \\
 &= 43,25 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Sehingga deformasi izin dinding penahan tanah *contiguous bored pile* adalah 43,25 mm.

Tabel 5.3 Rekapitulasi Hasil Analisa Deformasi Lateral

Pemodelan	Deformasi Lateral (mm)	Keterangan
<i>Mohr Coulomb Undrained B</i>	36,25	Memenuhi
<i>Mohr Coulomb Undrained C</i>	33,6	Memenuhi
<i>Hardening Soil Undrained B</i>	22,6	Memenuhi

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Berdasarkan Tabel 5.3, hasil deformasi lateral maksimum pada ketiga pemodelan terjadi pada galian ketiga. *Mohr Coulomb* pada kondisi tegangan efektif (analisis jangka panjang) memiliki deformasi lateral dinding penahan tanah yaitu 36,25 mm, *Mohr Coulomb* pada kondisi tegangan total (analisis jangka pendek) memiliki deformasi lateral sebesar 33,6 mm, sedangkan pada pemodelan *Hardening Soil* pada kondisi tegangan efektif (analisis jangka panjang) memiliki deformasi sebesar 22,6 mm.

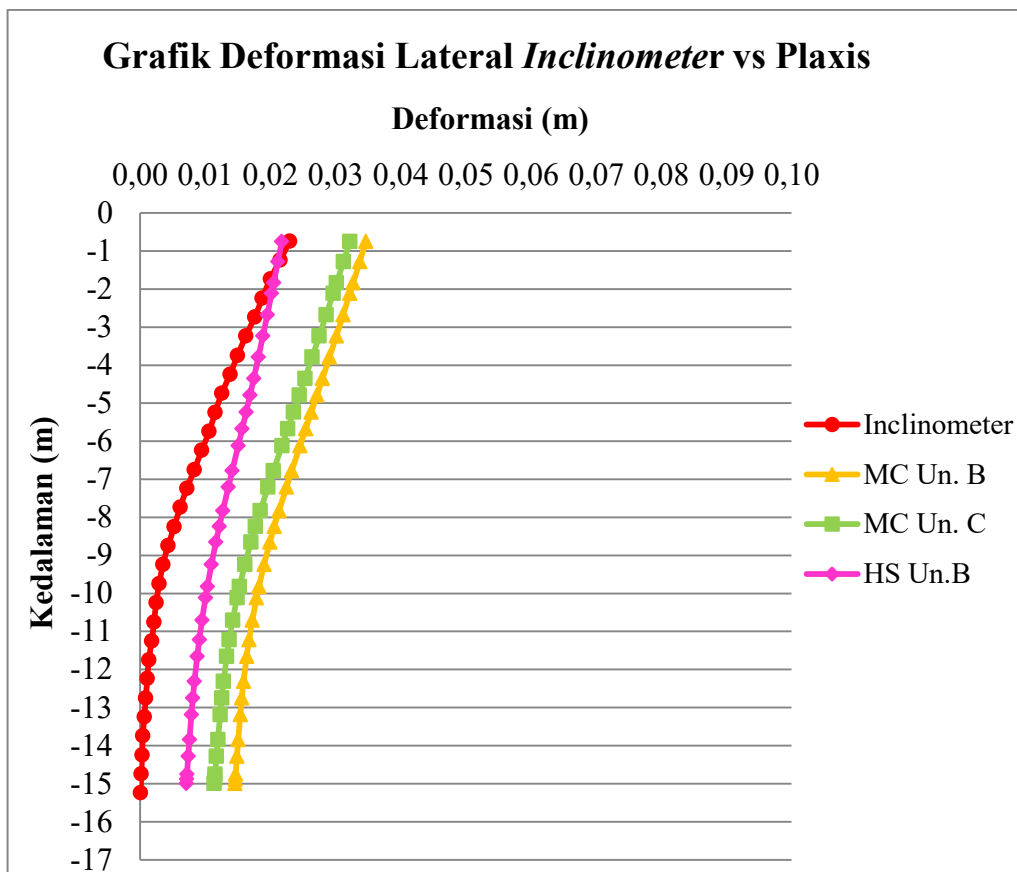
Dari ketiga pemodelan *output* deformasi lateral tidak melampaui batas izin yaitu 43,25 mm, maka pekerjaan galian yang dilakukan dinyatakan aman. Hasil dari deformasi lateral maksimum *contiguous bored pile* yang berada di galian ketiga lalu dibandingkan hasil monitoring *inclinometer*.

Tabel 5.4 Hasil Deformasi Lateral *Inclinometer* dan Plaxis

Kedalaman (m)	Deformasi (m)	Kedalaman (m)	Deformasi MC B (m)	Deformasi MC C (m)	Deformasi HS (m)
-0,75	0,02297	-0,75	0,03467	0,03220	0,02175
-1,24	0,02148	-1,28	0,03371	0,03120	0,02114

-1,73	0,01999	-1,84	0,03269	0,03015	0,02050
-2,24	0,01873	-2,12	0,03218	0,02962	0,02018
-2,74	0,01759	-2,68	0,03115	0,02856	0,01952
-3,23	0,01621	-3,23	0,03011	0,02749	0,01884
-3,74	0,01495	-3,79	0,02906	0,02640	0,01815
-4,24	0,01381	-4,35	0,02799	0,02530	0,01743
-4,74	0,01255	-4,79	0,02713	0,02442	0,01685
-5,25	0,01152	-5,23	0,02627	0,02354	0,01626
-5,74	0,01060	-5,68	0,02541	0,02265	0,01566
-6,24	0,00945	-6,12	0,02455	0,02177	0,01505
-6,75	0,00831	-6,78	0,02326	0,02045	0,01413
-7,24	0,00716	-7,21	0,02245	0,01962	0,01353
-7,74	0,00613	-7,83	0,02132	0,01846	0,01269
-8,25	0,00522	-8,24	0,02061	0,01772	0,01215
-8,74	0,00430	-8,65	0,01992	0,01701	0,01163
-9,24	0,00350	-9,24	0,01903	0,01608	0,01094
-9,75	0,00293	-9,83	0,01823	0,01526	0,01031
-10,24	0,00247	-10,12	0,01787	0,01488	0,01002
-10,75	0,00212	-10,71	0,01722	0,01420	0,00949
-11,25	0,00178	-11,22	0,01672	0,01368	0,00908
-11,74	0,00132	-11,66	0,01635	0,01330	0,00876
-12,24	0,00109	-12,31	0,01588	0,01281	0,00834
-12,75	0,00086	-12,75	0,01561	0,01253	0,00809
-13,25	0,00063	-13,19	0,01537	0,01228	0,00787
-13,74	0,00041	-13,84	0,01505	0,01194	0,00757
-14,25	0,00029	-14,28	0,01486	0,01173	0,00738
-14,75	0,00018	-14,75	0,01466	0,01150	0,00718
-15,24	0,00006	-14,88	0,01461	0,01144	0,00713
-15,75	0,00006	-15,00	0,01456	0,01138	0,00708

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)



Gambar 5.24 Grafik Deformasi Lateral *Inclinometer* dengan Plaxis

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Tabel 5.5 Perbandingan Hasil Deformasi Lateral *Inclinometer* dan Plaxis

Deformasi (Kedalaman)	<i>Inclinometer</i> (mm)	MC Un. B (mm)	MC Un. C (mm)	HS (mm)
-0,75 m)	22,969	34,668	32,198	21,749
Persentase <i>Error</i>		33,74%	28,66%	5,61%

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Pada penelitian ini dilakukan dua kondisi yaitu jangka panjang (*long term*) dan (*short term*). Jangka panjang dimodelkan dengan pemodelan *Mohr Coulomb Undrained B* dan *Hardening Soil Undrained B*, sedangkan kondisi jangka pendek dimodelkan dengan *Mohr Coulomb Undrained C*. Ditinjau dari pemodelan *Mohr Coulomb*, berdasarkan hasil *output* deformasi lateral dinding penahan tanah, *Mohr Coulomb Undrained C* lebih mendekati hasil pembacaan di lapangan menggunakan *inclinometer* daripada *Mohr Coulomb Undrained B*.

Hal ini dikarenakan parameter kekakuan dari *Mohr Coulomb Undrained C* lebih besar. Sehingga bisa disimpulkan, perilaku jangka pendek lebih kritis dibandingkan jangka panjang.

Sedangkan berdasarkan jenis pemodelan *Mohr Coulomb* dengan *Hardening Soil* dimana kedua pemodelan tersebut dianalisis dengan kondisi jangka panjang, deformasi lateral yang mendekati dengan *inclinometer* yaitu *Hardening Soil*. Penggunaan model konstitutif tingkat lanjut, seperti model *Hardening Soil*, membutuhkan kajian parameter tanah yang lebih lengkap dan komprehensif. Khususnya, variasi nilai E_{50}^{ref} dan E_{ur}^{ref} pada khusus galian harus diperhatikan. E_{ur}^{ref} memperhitungkan kekakuan tanah yang berkurang akibat pengurangan beban tanah atau galian, dengan E_{ur}^{ref} diinput lebih tinggi dibandingkan dengan nilai E yang diterapkan dalam model *Mohr Coulomb*. Oleh karena itu, pemodelan *output Hardening Soil* kerap mendekati hasil uji di lapangan.

5.3 Analisis Faktor Keamanan

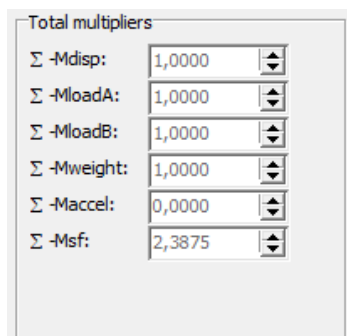
Pada penelitian ini, analisis faktor keamanan dilakukan menggunakan metode elemen hingga yaitu dengan Plaxis dan perhitungan manual. Dari kedua metode tersebut dianalisa sehingga mengetahui dinding penahan tersebut dikatakan aman dan stabil untuk pembangunan *basement* atau tidak. Angka keamanan yang di analisa yaitu pada saat galian terakhir atau ketiga.

5.3.3 Analisis Faktor Keamanan menggunakan Plaxis

Angka keamanan di Plaxis dapat dilihat dengan menambahkan *phase* kemudian mengubah *calculation type* menjadi *phi/c reduction*. Umumnya batas izin faktor keamanan stabilitas dinding penahan tanah pada Plaxis lebih dari 1,5. Berikut adalah hasil *safety factor* dari ketiga pemodelan yang telah dianalisa:

a. *Mohr Coulomb Undrained B*

Pada pemodelan jangka panjang ini dihasilkan *safety factor* pada galian terakhir sebesar 2,3875.

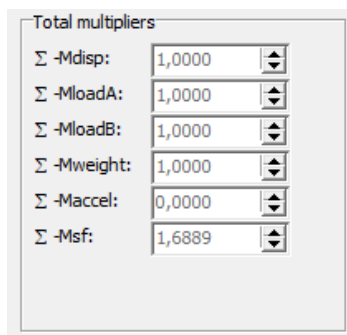


Gambar 5.25 *Safety Factor* Pemodelan *Mohr Coulomb Undrained B*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

b. *Mohr Coulomb Undrained C*

Pada pemodelan jangka pendek ini dihasilkan *safety factor* pada galian terakhir sebesar 1,6889.

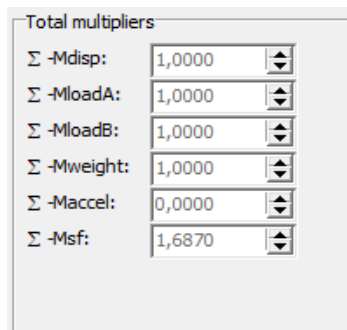


Gambar 5.26 *Safety Factor* Pemodelan *Mohr Coulomb Undrained C*

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

c. *Hardening Soil Undrained B*

Pada pemodelan jangka panjang ini dihasilkan *safety factor* pada galian terakhir sebesar 1,687.



Gambar 5.27 *Safety Factor* Pemodelan *Hardening Soil*

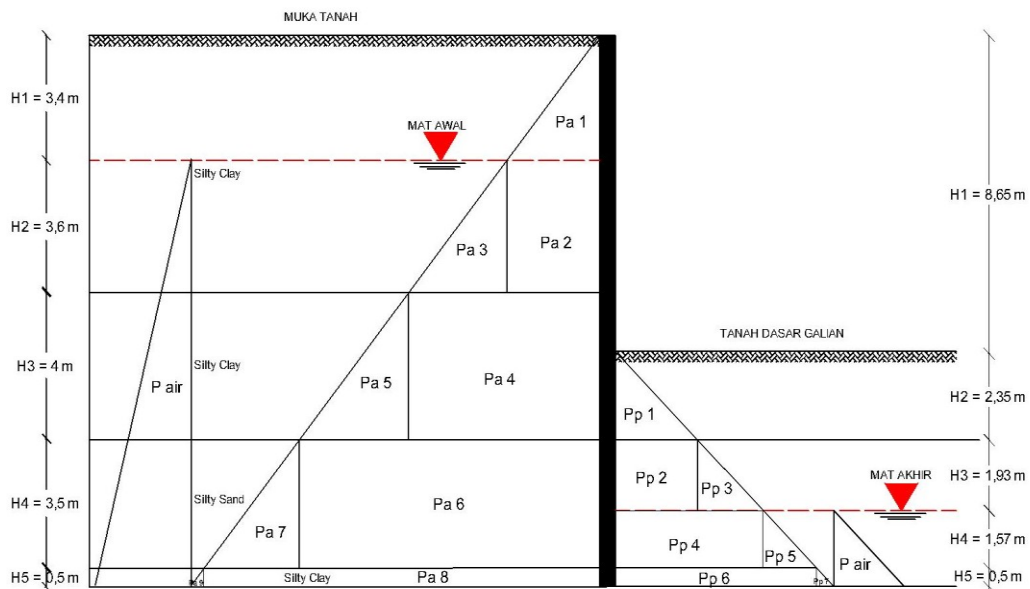
(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Dari ketiga pemodelan, angka kemandan tidak melewati batas syarat pada umumnya yaitu 1,5. Maka dari itu, kondisi tanah pada saat pekerjaan galian untuk pembangunan *basement* masih aman.

5.3.2 Analisis Faktor Keamanan menggunakan Perhitungan Manual

Dalam SNI 8460:2017, persyaratan desain yang diterapkan pada struktur dinding penahan tanah menekankan keamanan yang utama dalam tiga aspek yakni, stabilitas terhadap pergeseran, stabilitas terhadap penggulingan, dan stabilitas terhadap keruntuhan kapasitas daya dukung tanah. Batas nilai angka faktor aman untuk geser yaitu $\geq 1,5$ dan guling ≥ 2 (Badan SNI 8460:2017, 2017). Metode yang dipilih untuk perhitungan faktor keamanan dinding penahan tanah adalah metode Rankine. Langkah-langkah analisis yang dilakukan mencakup:

- Pembuatan diagram tekanan tanah lateral
- Perhitungan tegangan tanah aktif dan tegangan tanah pasif
- Kalkulasi tekanan tanah aktif (P_a) dan tekanan tanah pasif (P_p) menggunakan metode Rankine
- Penentuan titik berat pada setiap diagram tegangan tanah aktif dan pasif
- Perhitungan momen tanah aktif dan pasif
- Menghitung faktor keamanan.



Gambar 5.28 Diagram Tekanan Tanah Aktif dan Pasif

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Dalam perhitungan tekanan tanah lateral ini dibutuhkan data seperti γ_{unsat} , γ_{sat} , γ' , φ , K_a , dan K_p .

$$\gamma' = \gamma_{\text{sat}} - \gamma_w$$

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right)$$

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right)$$

Tabel 5.6 Parameter Tanah untuk Perhitungan Tekanan Tanah Lateral

Layer	Kedalaman (m)	γ_{unsat} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ' (kN/m ²)	φ (°)	C' (kN/m ²)	K_a	K_p
1	0 – 7	14,15	16,7	6,89	21	39,227	0,687	2,117
2	7 – 14,5	20,67	22	12,19	24	101,111	0,662	2,283
3	14,5 – 22	22	23	13,19	40	0	0,466	4,599
4	22 – 25	20,67	22	12,19	25	134	0,647	2,464

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

a. Perhitungan untuk Tekanan Tanah Aktif

Tabel 5.7 Perhitungan Tekanan Tanah Aktif

Bidang	Rumus	Hasil (kN/m)	
1	$(1/2 \times \gamma_{\text{unsat}1} \times H_2^2 \times K_{a2}) + (2 \times c' \times \sqrt{K_{p2}} \times H_2)$	$(1/2 \times 14,15 \times 3,4^2 \times 0,47) - (2 \times 39,227 \times 0,687 \times 3,4)$	-144,693
2	$\gamma_{\text{unsat}1} \times h_1^2 \times K_{a2}$	$14,15 \times 3,4^2 \times 0,47$	77,265
3	$(1/2 \times \gamma_{\text{sat}1} \times H_2^2 \times K_{a1}) - (2 \times c' \times \sqrt{K_{a1}} \times H_2)$	$(1/2 \times 16,7 \times 3,6^2 \times 0,47) - (2 \times 39,227 \times 0,687 \times 3,6)$	-142,993
4	$((H_1 \times \gamma_{\text{unsat}1} + H_2 \times \gamma_1) \times K_{a2}) \times H_3^2$	$((3,4 \times 14,15 + 3,6 \times 6,89) \times 0,44) \times 4^2$	511,165
5	$(1/2 \times \gamma_2 \times H_3^2 \times K_{a2}) - (2 \times c' \times \sqrt{K_{a2}} \times H_3)$	$(1/2 \times 12,19 \times 4^2 \times 0,44) - (2 \times 101,111 \times 0,662 \times 4)$	-492,659
6	$((H_1 \times \gamma_{\text{unsat}1} + H_2 \times \gamma_1 + H_3 \times \gamma_2) \times K_{a3}) \times H_4^2$	$((3,4 \times 14,15 + 3,6 \times 6,89 + 4 \times 12,19) \times 0,22) \times 3,5^2$	324,161
7	$(1/2 \times \gamma_3 \times H_4^2 \times K_{a3})$	$(1/2 \times 13,19 \times 3,5^2 \times 0,22)$	17,571
8	$((H_1 \times \gamma_{\text{unsat}1} + H_2 \times \gamma_1 + H_3 \times \gamma_2 + H_4 \times \gamma_3) \times K_{a4}) \times H_5^2$	$((3,4 \times 14,15 + 3,6 \times 6,89 + 4 \times 12,19 + 3,5 \times 13,19) \times 0,41) \times 0,5^2$	17,033
9	$(1/2 \times \gamma_4 \times H_5^2 \times K_{a4}) - (2 \times c' \times \sqrt{K_{a4}} \times H_5)$	$(0,5 \times 12,19 \times 4^2 \times 0,41) - (2 \times 134 \times 0,637 \times 0,5)$	-84,749
Air	$1/2 \times H_{\text{air}}^2 \times \gamma_w$	$1/2 \times 11,6^2 \times 9,807$	659,815
ΣPa		741,915	

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Tabel 5.8 Perhitungan Jarak Lengan Tekanan Tanah Aktif

Bidang	Rumus		Hasil (m)
1	$1/3 \times H_1 + H_2 + H_3 + H_4 + H_5$	$1/3 \times 3,4 + 3,6 + 4 + 3,5 + 0,5$	12,73
2	$1/2 \times H_2 + H_3 + H_4 + H_5$	$1/2 \times 3,6 + 4 + 3,5 + 0,5$	9,8
3	$1/3 \times H_2 + H_3 + H_4 + H_5$	$1/3 \times 3,6 + 4 + 3,5 + 0,5$	9,2
4	$1/2 \times H_3 + H_4 + H_5$	$1/2 \times 4 + 3,5 + 0,5$	6
5	$1/3 \times H_3 + H_4 + H_5$	$1/3 \times 4 + 3,5 + 0,5$	5,33
6	$1/2 \times H_4 + H_5$	$1/2 \times 3,5 + 0,5$	2,25
7	$1/3 \times H_4 + H_5$	$1/3 \times 3,5 + 0,5$	1,67
8	$1/2 \times H_5$	$1/2 \times 0,5$	0,25
9	$1/3 \times H_5$	$1/3 \times 0,5$	0,17
Air	$1/3 \times H_{air}$	$1/3 \times 11,6$	3,87

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Tabel 5.9 Perhitungan Momen Tekanan Tanah Aktif

Bidang	Pa (kN/m)	Jarak (m)	Momen (kN)
1	-144,693	12,73	-1842,43
2	77,265	9,8	757,197
3	-142,993	9,2	-1315,54
4	511,165	6	3067,512
5	-492,659	5,33	-2614,961
6	324,161	2,25	729,362
7	17,571	1,67	29,285
8	17,033	0,25	4,258
9	-84,749	0,17	-14,125
Air	659,815	3,87	2551,285
ΣMa			1338,77

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

b. Perhitungan untuk Tekanan Tanah Pasif

Tabel 5.10 Perhitungan Tekanan Tanah Aktif

Bidang	Rumus		Hasil (kN/m)
1	$(1/2 \times \gamma_{unsat2} \times H_2^2 \times Kp_2) + (2 \times c' \times \sqrt{Kp_2} \times H_2)$	$(1/2 \times 20,67 \times 2,35^2 \times 2,283) + (2 \times 101,111 \times 1,51 \times 2,35)$	848,242
2	$\gamma_{unsat2} \times H_2^2 \times Kp_3$	$20,67 \times 2,35^2 \times 4,599$	524,881
3	$(1/2 \times \gamma_{unsat3} \times H_3^2 \times Kp_3)$	$(1/2 \times 22 \times 1,93^2 \times 4,599)$	188,435
4	$((H_2 \times \gamma_{unsat2} + H_3 \times \gamma_{unsat3}) \times Kp_3) \times H_4^2$	$((2,35 \times 20,67 + 1,93 \times 22) \times 1,57) \times 1,57^2$	1031,865
5	$(1/2 \times \gamma_3 \times H_4^2 \times Kp_3)$	$(1/2 \times 12,19 \times 1,57^2 \times 4,599)$	69,109
6	$((H_2 \times \gamma_{unsat2} + H_3 \times \gamma_{unsat3} + H_4 \times \gamma_3) \times Kp_4) \times H_5^2$	$((2,35 \times 20,67 + 1,93 \times 22 + 1,57 \times 12,19) \times 2,464) \times 0,5^2$	67,862
7	$(1/2 \times \gamma_4 \times H_5^2 \times Kp_4) + (2 \times c' \times \sqrt{Kp_4} \times H_5)$	$(1/2 \times 12,19 \times 0,5^2 \times 2,464) + (2 \times 134 \times 1,57 \times 0,5)$	214,093

Air	$\frac{1}{2} \times H_{\text{air}}^2 \times \gamma_w$	$\frac{1}{2} \times 2,07^2 \times 9,807$	21,011
ΣP_p			2965,499

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Tabel 5.11 Perhitungan Jarak Lengan Tekanan Tanah Pasif

Bidang	Rumus		Hasil (m)
1	$\frac{1}{3} \times H_2 + H_3 + H_4 + H_5$	$\frac{1}{3} \times 2,35 + 1,93 + 1,57 + 0,5$	4,78
2	$\frac{1}{2} \times H_3 + H_4 + H_5$	$\frac{1}{2} \times 1,93 + 1,57 + 0,5$	3,04
3	$\frac{1}{3} \times H_3 + H_4 + H_5$	$\frac{1}{3} \times 1,93 + 1,57 + 0,5$	2,71
4	$\frac{1}{2} \times H_4 + H_5$	$\frac{1}{2} \times 1,57 + 0,5$	1,29
5	$\frac{1}{3} \times H_4 + H_5$	$\frac{1}{3} \times 1,57 + 0,5$	1,02
6	$\frac{1}{2} \times H_5$	$\frac{1}{2} \times 0,5$	0,25
7	$\frac{1}{3} \times H_5$	$\frac{1}{3} \times 0,5$	0,17
Air	$\frac{1}{3} \times H_{\text{air}}$	$\frac{1}{3} \times 2,07$	0,69

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Tabel 5.12 Perhitungan Momen Tekanan Tanah Pasif

Bidang	Pa (kN/m)	Jarak (m)	Momen (kN)
1	848,242	4,78	4057,425
2	524,881	3,04	1593,015
3	188,435	2,71	511,288
4	1031,865	1,29	1325,946
5	69,109	1,02	70,722
6	67,862	0,25	16,966
7	214,093	0,17	35,682
Air	21,011	0,69	14,498
ΣM_p			7625,541

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Dalam perencanaan ini, diperoleh hasil berupa tekanan tanah dan momen yang terjadi sebagai berikut:

$$\Sigma Pa = 741,915 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma Ma = 1338,77 \text{ kN}$$

$$\Sigma P_p = 2965,499 \text{ kN/m}$$

$$\Sigma M_p = 7625,541 \text{ kN}$$

c. Stabilitas terhadap Geser

Adapun faktor aman stabilitas terhadap penggeseran untuk dinding penahan tanah yaitu:

$$F_{gs} = \frac{\Sigma P_p}{\Sigma Pa} \geq 1,5$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2965,499}{741,915} \\
 &= 3,997
 \end{aligned}$$

$F_{gs} > 1,5$ maka struktur aman dan stabil terhadap gaya geser.

d. Stabilitas terhadap Guling

Faktor aman terhadap penggulingan (F_{gl}) didefinisikan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 F_{gl} &= \frac{\sum M_p}{\sum M_a} \geq 2 \\
 &= \frac{7625,541}{1358,77} \\
 &= 5,696
 \end{aligned}$$

$F_{gl} > 2$ maka struktur aman dan stabil terhadap gaya guling.

Tabel 5.13 Rekapitulasi SF Perhitungan Manual dan Plaxis

Metode	Plaxis			Perhitungan Manual	
	MC Un.B	MC Un.C	HS Un.B	Geser	Guling
<i>Safety Factor</i>	2,3875	1,6889	1,687	3,997	5,696

(Sumber: Analisa Penulis, 2024)

Terlihat bahwa perhitungan yang dilakukan oleh perangkat lunak (Plaxis) menunjukkan perbedaan nilai faktor keamanan (SF) yang cukup jauh dengan perhitungan manual. Perbedaan ini terjadi karena perhitungan oleh Plaxis lebih mendetail dibandingkan dengan perhitungan manual. Plaxis memiliki lebih banyak parameter *input* tanah sehingga menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih akurat dan lebih rendah.