

PERBANDINGAN KINERJA STRUKTUR STEEL SHEET PILE DAN SOLDIER PILE H-BEAM SEBAGAI SISTEM PENAHAN TANAH SEMENTARA PADA GALIAN BASEMENT MENGGUNAKAN ANALISIS ELEMEN HINGGA

Merdy Evalina Silaban* , Irvan Azis Febriansyah

Teknologi Konstruksi Bangunan Gedung, Jurusan Teknik Sipil dan Infrastruktur, Politeknik Astra, Jalan Gaharu Blok F-3 Delta Silicon 2 Lippo Cikarang, Kel. Cibatu, Kec. Cikarang Selatan, Bekasi, Jawa Barat, 17530, Indonesia
E-mail : merdy.silaban@polytechnic.astra.ac.id*

Abstract – The construction project of a high-rise apartment with three basement levels in the densely built area of Alam Sutera, Tangerang City, requires a temporary earth retaining system that meets both stability and deformation criteria. This study compares steel sheet pile and soldier pile H-Beam systems as temporary retaining structures for an excavation depth of approximately ± 9.45 meters. The analysis was performed using the finite element method through PLAXIS 2D software, considering both short-term (undrained) and long-term (drained) conditions. The applied loads included active earth pressure and a surface surcharge of 10 kPa. The results show that under short-term conditions, both systems satisfy stability requirements, with safety factors (SF) of 1.771 for the steel sheet pile and 1.781 for the soldier pile H-Beam. The maximum lateral deflections recorded were 24 mm and 18.72 mm, respectively, both within the allowable limit of 0.5% of the excavation depth. In the long-term condition, both systems exhibited safety factors below the minimum requirement of 1.3, indicating the need for additional reinforcement—struts for the steel sheet pile and tieback anchors for the soldier pile system. From a flexural capacity standpoint, both systems were confirmed to safely withstand the maximum induced moment. This study concludes that both systems are viable as temporary retaining solutions under short-term conditions, with the need for reinforcement in long-term applications.

Keywords: Steel Sheet Pile, Soldier Pile H-Beam, PLAXIS Analysis, Retaining Wall, Temporary Excavation

Abstrak-- Proyek pembangunan apartemen dengan tiga lantai basement di kawasan padat bangunan Alam Sutera, Kota Tangerang, memerlukan sistem penahan tanah sementara yang mampu memenuhi kriteria stabilitas dan deformasi. Penelitian ini membandingkan steel sheet pile dan soldier pile H-Beam sebagai sistem penahan tanah sementara untuk galian sedalam $\pm 9,45$ meter. Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan perangkat lunak PLAXIS 2D, mencakup dua kondisi yaitu jangka pendek (short term, undrained) dan jangka panjang (long term, drained). Pembebanan yang digunakan meliputi tekanan tanah aktif dan beban permukaan (surcharge) sebesar 10 kPa. Hasil analisis menunjukkan bahwa pada kondisi jangka pendek, kedua sistem memenuhi persyaratan stabilitas dengan faktor keamanan (FK) masing-masing sebesar 1,771 untuk steel sheet pile dan 1,781 untuk soldier pile H-Beam. Defleksi maksimum yang terjadi adalah 24 mm dan 18,72 mm, keduanya masih berada di bawah batas izin sebesar 0,5% dari kedalaman galian. Pada kondisi jangka panjang, kedua sistem memiliki nilai faktor keamanan di bawah batas minimum 1,3, sehingga diperlukan perkuatan tambahan berupa strut untuk steel sheet pile dan tieback anchor untuk soldier pile. Dari aspek kapasitas lentur, kedua sistem dinyatakan aman dalam memikul momen maksimum yang terjadi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa kedua sistem layak digunakan sebagai penahan tanah sementara dalam kondisi jangka pendek, dengan catatan memerlukan perkuatan tambahan pada kondisi jangka panjang.

Kata Kunci: Steel Sheet Pile, Soldier Pile H-Beam, Analisis PLAXIS, Dinding Penahan Tanah, Galian Sementara

I. PENDAHULUAN

Basement merujuk pada bagian dari bangunan yang terletak di bawah permukaan tanah, baik seluruhnya maupun sebagian [1]. Saat ini, pembangunan *basement* semakin banyak dipilih sebagai solusi untuk masalah keterbatasan lahan yang tersedia [2], dan juga dapat berfungsi sebagai ruang utilitas dalam gedung bertingkat [3].

Tantangan utama dalam konstruksi *basement* adalah lokasi proyek yang terbatas dan kedekatannya

dengan bangunan lainnya. Metode konstruksi untuk *basement* biasanya dimulai dengan penggalian tanah dari bawah ke atas. Berbagai teknik penggalian digunakan, termasuk sistem *open cut*. Namun, penggunaan metode ini dapat menimbulkan risiko apabila menggali terlalu dalam, yang dapat menyebabkan ketidakstabilan lereng dan longsor. Jika tidak diatasi, hal ini dapat mempengaruhi stabilitas bangunan sekitar dan menyebabkan kerusakan struktural atau non-struktural. Beberapa faktor yang

berkontribusi terhadap longsor meliputi kemiringan lereng yang terlalu curam, kondisi iklim, pemadatan yang kurang memadai, pengaruh air tanah, gempa bumi, dan faktor manusia [4].

Salah satu solusi teknis yang banyak digunakan dalam sistem penahan tanah sementara adalah *steel sheet pile*, yaitu dinding baja yang ditanam secara vertikal untuk menahan tekanan tanah dan air. Sistem ini populer karena proses instalasinya yang cepat serta efektivitasnya dalam menahan tekanan lateral, khususnya pada proyek-proyek dengan batasan waktu pengerjaan [5]. Namun, *sheet pile* memiliki keterbatasan terutama dalam menghadapi tekanan lateral yang besar pada kondisi jangka panjang, serta potensi defleksi yang tinggi pada tanah lunak dan galian dalam [6]. Selain itu, struktur ini membutuhkan perkuatan tambahan seperti *strut* atau *anchor* jika digunakan untuk kedalaman lebih dari 6 meter [7].

Alternatif lain yang mulai banyak digunakan adalah sistem *soldier pile* dengan profil baja H-Beam. Sistem ini terdiri dari tiang-tiang vertikal (*pile*) yang ditanam pada jarak tertentu, biasanya dikombinasikan dengan *lagging* (penutup di antara *pile*) dari material kayu, beton, atau baja. Keunggulan utama dari *soldier pile* H-Beam adalah kemampuannya untuk menyesuaikan dengan kondisi lapangan dan fleksibilitas desain yang tinggi [8]. Beberapa studi menyatakan bahwa sistem ini memberikan kontrol deformasi lateral yang lebih baik, terutama pada tanah kohesif dengan kuat geser rendah [9]. PLAXIS mampu memodelkan kondisi tanah dan struktur dengan akurasi tinggi, serta mempertimbangkan perubahan sifat tanah pada kondisi jangka pendek (*undrained*) dan jangka panjang (*drained*) [10], [11].

Sejumlah penelitian mendukung pentingnya pendekatan ini. Wahyudi et al. [12] menyatakan bahwa simulasi PLAXIS dapat memprediksi deformasi dinding penahan lebih baik dibandingkan metode Rankine atau Coulomb klasik. Santoso et al. [13] juga menemukan bahwa validasi hasil analisis numerik menunjukkan korelasi tinggi terhadap hasil monitoring lapangan. Hal ini memperkuat keyakinan bahwa PLAXIS adalah alat yang tepat untuk mengevaluasi stabilitas, deformasi, dan distribusi momen dalam elemen struktur penahan tanah.

Dalam konteks sistem *sheet pile*, Fadilah et al. [14] mengungkapkan bahwa defleksi lateral pada kedalaman galian lebih dari 9 meter berpotensi melampaui batas aman apabila tidak diperkuat. Rachman dan Syahputra [15] menekankan pentingnya memilih sistem *anchored sheet pile* dibandingkan *cantilever* untuk mendapatkan faktor keamanan lebih dari 1,3 pada kondisi *long term*. Sementara itu, Lestari dan Pranoto [16] menunjukkan bahwa penggunaan *tieback anchor* pada sistem *soldier pile* dapat

meningkatkan kestabilan struktur secara signifikan, khususnya pada tanah berlempung.

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh kondisi proyek pembangunan Apartemen bertingkat dengan tiga basement di Alam Sutera, Tangerang. Sistem pengamanan galian awalnya direncanakan menggunakan metode *open-cut slope*. Namun, hasil evaluasi menunjukkan bahwa lereng yang dibutuhkan untuk stabilitas ternyata melampaui batas lahan dan bahkan memotong hingga ke area jalan. Kondisi ini tidak hanya menimbulkan risiko terhadap keselamatan publik, tetapi juga tidak memungkinkan secara teknis dalam ruang terbatas proyek. Sebagai respons terhadap hal tersebut, kontraktor pelaksana mengusulkan penggunaan sistem penahan tanah alternatif berupa kombinasi *open-cut slope* dan *steel sheet pile* pada sisi selatan. Untuk memperkaya kajian teknis dan mengevaluasi pilihan yang paling tepat dari segi kestabilan dan efisiensi, penelitian ini juga mempertimbangkan *soldier pile H-Beam* sebagai sistem pembanding. Dengan kondisi lapangan dan pembebanan yang sama, dilakukan analisis komprehensif terhadap kedua sistem menggunakan perangkat lunak PLAXIS berbasis metode elemen hingga.

Sehingga berdasarkan latar belakang dan temuan studi sebelumnya, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis dan membandingkan kinerja sistem penahan tanah sementara berupa *steel sheet pile* dan *soldier pile H-Beam* pada galian basement sedalam $\pm 9,45$ meter.
2. Menilai kestabilan lereng dan deformasi lateral dari masing-masing sistem menggunakan metode elemen hingga dengan perangkat lunak PLAXIS. Menentukan kelayakan teknis penggunaan masing-masing sistem dalam kondisi jangka pendek (*short term*) dan jangka panjang (*long term*).

II. METODOLOGI PENELITIAN

Tujuan utama dari metodologi ini adalah untuk mengevaluasi dan membandingkan kinerja dua jenis sistem penahan tanah sementara, yaitu *steel sheet pile* dan *soldier pile H-Beam*, dalam kondisi galian basement sedalam $\pm 9,45$ meter di lokasi proyek pembangunan apartemen bertingkat di Alam Sutera, Tangerang. Flowchart metodologi penelitian bisa dilihat di gambar 1.

1. Pengumpulan Data

Data yang digunakan dalam penelitian terdiri dari:

a. Data Primer

- Laporan hasil penyelidikan tanah berupa data bor dan sondir yang dilaksanakan oleh PT. Tarumanegara Bumiayasa (2020).
- Gambar kerja (*shop drawing*) struktur penahan tanah pada proyek yang dianalisis.

b. Data Sekunder

Referensi dari buku teknik geoteknik, standar perencanaan seperti SNI 8460:2017, serta hasil penelitian terdahulu yang relevan mengenai sistem penahan tanah dan analisis PLAXIS.

2. Desain Sistem Penahan Tanah

Dua jenis sistem penahan tanah dirancang dan disimulasikan berdasarkan parameter desain sebagai berikut:

a. *Steel Sheet Pile*

Menggunakan profil dengan panjang 6 meter, lebar efektif 400 mm, ketebalan 13 mm, dan *yield strength* 390 MPa.

b. *Soldier Pile H-Beam*

Menggunakan profil H-Beam 125×125×6.5× 9 dengan panjang total 11 meter, terdiri atas kedalaman galian 8,6 meter dan penetrasi 2,4 meter. *Yield strength* sebesar 410 MPa.

3. Simulasi PLAXIS 2D

Pemodelan dilakukan dalam dua kondisi utama yaitu *Short Term (Undrained)* dan *Long Term (Drained)*. Kedua kondisi tersebut dianalisis untuk:

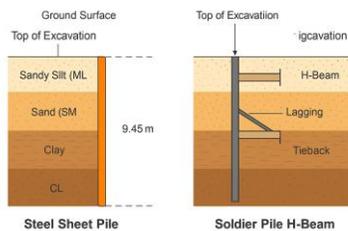
- a. Faktor keamanan (FK) terhadap kestabilan global.
- b. Momen internal maksimum yang terjadi pada sistem.
- c. Defleksi lateral maksimum sebagai indikator deformasi.

4. Kriteria Evaluasi

Penilaian performa sistem penahan tanah dilakukan berdasarkan:

- a. Faktor Keamanan Minimum
Mengacu pada SNI 8460:2017, nilai FK minimum untuk galian temporer adalah 1,3.
- b. Batas Defleksi Lateral Maksimum
Batas deformasi lateral yang diperbolehkan adalah 0,5% dari tinggi galian, yaitu ±47 mm untuk kedalaman 9,45 meter.
- c. Kapasitas Lentur Struktur
Dinyatakan aman apabila momen maksimum dari hasil simulasi tidak melebihi momen izin berdasarkan *yield strength* dan modulus elastis penampang.

Skema Sistem Penahan Tanah dengan *Steel Sheet Pile* dan *Soldier Pile H-Beam* beserta Lapisan Tanah dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Skema Sistem Penahan Tanah

5. Deskripsi Proyek

Berikut informasi proyek yang dapat dilihat pada tabel 1.

Tabel 1. Deskripsi Proyek

| Nama Proyek | Proyek Apartment X |
|---------------------|---|
| <i>Project Size</i> | Luas Lahan : 172.325 m ² |
| | Tower 1: Luas Bangunan: 38.355 m ² |
| | Tower 2: Luas Bangunan: 49.592 m ² |
| | Tower 3: Luas Bangunan: 33.599 m ² |

6. Lokasi Proyek

Terlampir lebih jelas mengenai lokasi proyek pada gambar 2, proyek ini berbatasan dengan pedestrian dan jalan lokal di sisi selatan dan lahan kosong di sisi-sisi lainnya.

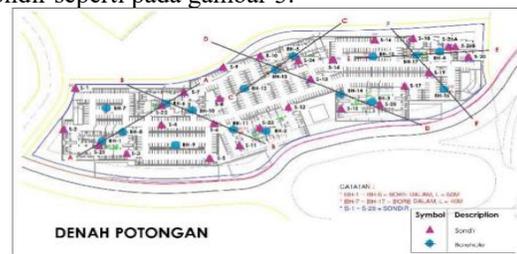


Gambar 2. Lokasi Proyek Apartemen X, Alam Sutera

III. HASIL DAN PERANCANGAN

1. Data Tanah

Data tanah yang digunakan berasal dari penyelidikan geoteknik yang telah dilakukan dengan penyelidikan tanah berupa 17 titik bor dalam dan 26 sondir seperti pada gambar 3.



Gambar 3. Titik Penyelidikan Data Tanah

Pelapisan tanah yang akan digunakan dalam analisa disimpulkan pada tabel 2 berikut:

Tabel 2. Resume Parameter Desain Tanah

| Elevasi [m] | Deskripsi Tanah | γ [kN/m ³] | Undrained | | | Drained | | | E [MPa] | | |
|------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------|------------|-------------|---------|------|------|---------|--|--|
| | | | S_u [kPa] | c' [kPa] | ϕ' [°] | UD | D | UD | D | | |
| -1.6 s.d. -4.0 | Medium Stiff Clay | 16.50 | 20 | 12 | 20 | 6.0 | 4.8 | 0.45 | 0.40 | | |
| -4.0 s.d. -7.0 | Stiff Clay | 16.50 | 68 | 16 | 20 | 13.6 | 10.9 | 0.45 | 0.40 | | |
| -7.0 s.d. -10.0 | V. Stiff Clay | 16.50 | 184 | 20 | 20 | 36.8 | 29.4 | 0.45 | 0.40 | | |
| -10.0 s.d. -25.0 | V. Dense Silty Sand & Hard Silt | 18.00 | - | 40 | 30 | - | 80.0 | - | 0.30 | | |

2. Perencanaan Dinding Penahan Tanah

2.1 Perencanaan *Steel Sheet Pile*

- Data *Steel Sheet Pile*

Pada perencanaan *steel sheet pile*, kedalaman dinding berdasarkan panjang dari *steel sheet pile* yang digunakan yaitu 6 meter. Kemudian dilakukan perencanaan awal/*preliminary design* untuk parameter-parameter lainnya sebagai berikut: *Effective Width* = 400 mm, *Effective Height* = 125 mm, *Thickness* = 13 mm, *Sectional Area* = 76,42 cm², *Moment of Inertia* = 2.220 cm⁴, *Elastic Section Modulus* = 223 cm³, dan *Yield Strength* = 390 Mpa

a. Kriteria Desain

Pada analisa stabilitas dinding penahan tanah diperlukan batasan atau kriteria desain yang nantinya digunakan sebagai acuan khususnya pada nilai defleksi dinding *steel sheet pile* dan berlaku juga pada *soldier pile*. Batas maksimum deformasi lateral dinding dapat dilihat pada gambar 4. Batas maksimum deformasi lateral dinding dikarenakan proyek berada pada lokasi yang terdapat banyak bangunan di sekitar dan berdekatan, direncanakan untuk batas deformasi dinding sebesar 0,5% H. Maka, batas deformasi dinding penahan tanah steel sheet pile ini adalah 0,5% × 9,45 m = 0,043 m = 43 mm.

| Batas maksimum deformasi lateral pada dinding | Lokasi gedung dan infrastruktur eksisting 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 (δw/H) | 0,5% | 0,7% | 0,7% | 1,0% |

Keterangan:
x = jarak dari batas galian,
H = Kedalaman galian,
δw = defleksi dinding

Gambar 4. Batas Maksimum Deformasi Lateral Dinding

Tahapan Kalkulasi Basement:

- Tahap 0 : Initial Condition, muka tanah @ Elev. 0,85 m;
- Tahap 1 : Pengaktifan beban *surcharge* = 20 kPa;
- Tahap 2 : Penggalian ke-1 s/d Elev. -4,85 m;
- Tahap 3 : Pemasangan dinding penahan tanah;
- Tahap 4 : Penggalian ke-2 s/d Elev. -9,45 m.

b. Analisa Elemen Hingga

Galian pada proyek ini bersifat temporer, maka hasil analisa pengaman galian harus memenuhi nilai faktor keamanan 1,3 untuk dua macam kondisi di atas, dimana kriteria faktor keamanan berdasarkan pada persyaratan yang berlaku sebagai berikut:

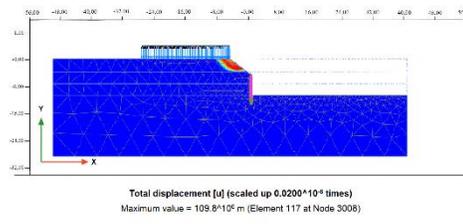
Tabel 3. Nilai Minimum Faktor Keamanan Statik Lereng Galian

| Kondisi Lingkungan dan Risiko | Keandalan Parameter Tanah | | | |
|--|---------------------------|-------|-----------|-------|
| | Kurang | | Cukup | |
| Sifat Galian | Sementara | Tetap | Sementara | Tetap |
| Tidak ada Hunian Manusia atau Bangunan Sekitar | 1.30 | 1.50 | 1.25 | 1.30 |
| Banyak bangunan disekitar | 1.50 | 2.00 | 1.30 | 1.50 |

Tabel 4. Nilai Minimum Faktor Keamanan Statik Lereng

| | |
|-------------|--|
| FK ≥ 1.5 | Safety factor no less than 1.5 for permanent or sustained loading condition |
| FK ≥ 2 | For foundation of structure |
| 1.25 - 1.3 | For temporary loading condition or where stability reaches a minimum during construction |
| 1.15 - 1.25 | For transient loads, such as earthquake |

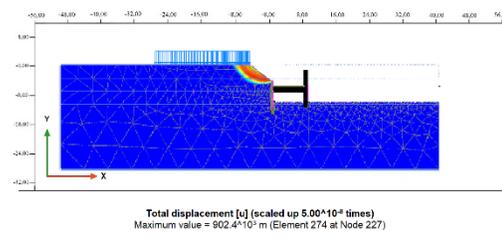
Berdasarkan parameter pada tabel 2. dan syarat faktor keamanan pada tabel 3. dan tabel 4. dilakukan Analisa PLAXIS berdasarkan potongan A-A' s.d. D-D' untuk kondisi *drained* dan *undrained*. Beban yang diperbolehkan bekerja di luar galian maksimum sebesar 10 kPa.



Gambar 5. Total Displacement (Analisa Stabilitas Global); Kondisi *Short Term*



Gambar 6. Faktor Keamanan (Analisa Stabilitas Global); Kondisi *Short Term*



Gambar 7. Total Displacement (Analisa Stabilitas Global); Kondisi *Long Term*



Gambar 8. Faktor Keamanan (Analisa Stabilitas Global); Kondisi *Long Term*

c. Sistem Pengaman Galian

Dari hasil analisa PLAXIS, untuk kondisi jangka pendek (*short term*), pengaman galian masih bisa menggunakan kombinasi *open-cut slope* dan *steel sheet pile cantilever*. Faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1.771 (>1.3) dapat dilihat pada gambar 6 dengan hasil *total displacement* yang dapat dilihat pada gambar 5. Namun untuk kondisi jangka panjang (*long term*), pengaman galian sudah tidak bisa lagi menggunakan *steel sheet pile cantilever*. Analisa menunjukkan bahwa nilai faktor keamanannya <1.3 sehingga tidak aman pada kondisi tersebut bila berupa struktur tetap kegagalan (*failure*). Maka dimodelkan sistem pengaman galian menggunakan *sheet pile* berlapis *strut* yang dipasang pada lantai B2. Diperoleh faktor keamanan sebesar 1.660 (>1.3) dapat dilihat pada gambar 8 dengan hasil *total displacement* yang dapat dilihat pada gambar 7.

Rangkuman analisa sistem pengaman galian:

1) Kondisi Jangka Pendek (*Short Term*)

- Muka tanah eksisting berada pada sekitar elevasi -0.85 m dan dasar galian akan berada pada Elev. -9.25 s.d. -9.45 m.
- *Open-cut slope* dengan kemiringan 1V:1,5H dibuat hingga level *top sheet pile*.
- Untuk menghindari erosi permukaan, muka lereng *open-cut* harus dilapisi dengan mortar dan kawat ayam serta diberi *weep hole* untuk drainase air permukaan.
- Top *steel sheet pile* direncanakan berada pada Elev. -4.85 m.
- Tip *steel sheet pile* diperkirakan akan berada pada Elev. -10.85 s.d. 11.35 m (masuk ke dalam lapisan tanah keras ± 1 s.d. 1,5 m).
- *Surcharge* yang diijinkan bekerja maksimum sebesar 10 kPa.
- Dari hasil analisa PLAXIS, didapatkan maximum *yield stress* yang terjadi pada *steel sheet pile* sebesar 159,1 kN/mm². Di proyek ini digunakan JIS Tipe III dari *Oriental Sheet Piling*. Dengan *yield strength* sebesar 390 MPa, *Elastic Section Modulus* sebesar 1,340 cm³/dm dan faktor keamanan 1,5, maka diperoleh *allowable moment* = 391,3 kNm, nilai ini masih lebih besar dibandingkan momen maksimum yang terjadi pada *sheet pile* (OK).
- Dengan defleksi maksimum sekitar 24 mm di tengah *sheet pile* dan pergeseran horizontal maksimum terhadap kedalaman galian = 0.28% (nilai ini masih lebih kecil dari 0.5%, sesuai ketentuan dalam BSN SNI 8460:2017).
- *Smart drainage* akan dipasang pada ujung *sheet pile* (*bottom*) terhadap stabilitas kondisi air tanah.

- Global stabilitas galian didapatkan nilai faktor keamanan terhadap stabilitas global sebesar 1.771. Nilai ini berarti masih aman terhadap kondisi galian temporer (OK).
- Kondisi jangka pendek (*undrained*) ini berlaku sampai 2 minggu setelah penggalian hingga level elevasi yang disesuaikan kurang lebih sekitar 1 minggu dari level elevasi tersebut, kondisi ini belum mengalami perubahan kuat geser tanah jangka panjang (*drained condition*).
- Defleksi pada *sheet pile* ini juga harus terus dimonitor saat dan sesudah pekerjaan galian. Apabila terjadi kenaikan defleksi yang mendekati nilai rencana, maka dilakukan tindakan perkuatan *strutting* pada elevasi yang sesuai.

2) Kondisi Jangka Panjang (*Long Term*)

Apabila tanah sudah memasuki kondisi *drained*, maka perlu dipasang 1 lapis strut baja (HWF 300x300) pada Elev. -6.45 m yang dipasang pada lantai B2 dengan tahapan galian sebagai berikut:

- Gali hingga Elev. -7.45 m
- Gali hingga Elev. -9.45 m, dengan menyisakan berm tanah di dekat *sheet pile*
- Konstruksi struktur *Basement* (B2)
- Pasang *strut* pada Elev. -6.45 m ke struktur *Basement* (B2)
- Gali berm tanah di dekat *sheet pile*
- Konstruksi struktur *Basement* di dekat *sheet pile*

Dari hasil analisa PLAXIS, didapatkan momen maksimum yang terjadi pada *sheet pile* sebesar 37.56 kN.m/m². Pada proyek ini menggunakan *sheet pile* JIS Tipe III dari *Oriental Sheet Piling*. Dengan *yield strength* sebesar 390 MPa, *Elastic Section Modulus* sebesar 1,340 cm³/dm dan faktor keamanan 1.5, maka diperoleh $M_{yield} = 384$ kN.m/m². Nilai ini masih lebih besar dibandingkan momen maksimum yang terjadi pada *sheet pile* (OK). Dengan defleksi maksimum sekitar 32 mm dan kedalaman galian sekitar 8.6 m, maka nilai defleksi maksimum terhadap kedalaman galian = 0.37%. Nilai ini masih lebih kecil dari 0.5%, sesuai persyaratan dalam BSN SNI 8460:2017. *Strut* harus didesain untuk menahan gaya horizontal sebesar 55 ton/m¹. Hasil perhitungan gaya strut dapat dilihat pada Lampiran B. Dari hasil analisa menggunakan program PLAXIS, didapatkan faktor keamanan terhadap stabilitas global sebesar 1.660. Nilai ini lebih besar dari nilai minimum 1.3 untuk kondisi temporer (OK).

2.2 Perencanaan *Soldier Pile H-Beam*

- Data *Soldier Pile H-Beam*

Panjang total dinding *soldier pile* adalah 11 meter, terdiri dari kedalaman galian 8,6 meter

ditambah kedalaman penetrasi 2,4 meter. Selanjutnya dilakukan perencanaan awal/*preliminary design* untuk parameter-parameter lainnya sebagai berikut: Profil Baja: H-Beam 125×125×6.5×9, Tinggi Profil (d) = 125 mm, Lebar Sayap (b) = 125 mm, Tebal Badan (tw) = 6,5 mm, Tebal Sayap (tf) = 9 mm, Luas Penampang (A) = 3031 mm², Inersia Penampang (Ix) = 847 cm⁴, Modulus Penampang Elastis (Sx) = 136 cm³ dan *Yield Strength* = 410 Mpa

a. Kriteria Design

Batas maksimum deformasi lateral dinding dapat dilihat pada gambar 5. Dikarenakan proyek berada pada lokasi yang terdapat banyak bangunan di sekitar dan berdekatan, direncanakan untuk batas deformasi dinding sebesar 0,5% H. Maka, batas deformasi dinding penahan tanah *soldier pile* ini adalah: Dikarenakan proyek berada pada lokasi yang terdapat banyak bangunan di sekitar dan berdekatan, direncanakan untuk batas deformasi dinding sebesar 0,5% H. Maka, batas deformasi dinding penahan tanah steel *sheet pile* ini adalah 0,5% × 9,45 m = 0,043 m = 43 mm.

Tahapan Kalkulasi Basement

- Tahap 0 – Initial Condition (Penentuan kondisi awal muka tanah @ Elev. -0,85 m) dan Inisialisasi tegangan geostatik (K₀).
 - Tahap 1: Instalasi Dinding Soldier Pile (Pemasangan *soldier pile* secara "*wished-in-place*" tanpa gangguan tanah).
 - Tahap 2 : Pengaktifan *Surcharge* (Beban permukaan eksternal sebesar 20 kPa diaktifkan).
 - Tahap 3 : Penggalian ke-1 sampai Elev. -4,85 m
 - Tahap 4 : Penggalian ke-2 sampai Elev. -9,45 m
 - Tahap 5 : Pemasangan *Tieback* (Jika *Long Term*)
- Jika simulasi *long term*, pemasangan anchor dilakukan setelah sebagian struktur basement terbentuk.

b. Analisa Elemen Hingga

Galian pada proyek ini bersifat temporer, maka hasil analisa pengaman galian harus memenuhi nilai faktor keamanan 1,3 untuk dua macam kondisi di atas, dimana kriteria faktor keamanan berdasarkan pada persyaratan yang berlaku sebagai berikut:

Tabel 5. Nilai Minimum Faktor Keamanan Statik Lereng Galian

| Kondisi Lingkungan dan Risiko | Keandalan Parameter Tanah | | | |
|--|---------------------------|-------|-----------|-------|
| | Kurang | | Cukup | |
| | Sementara | Tetap | Sementara | Tetap |
| Tidak ada Hunian Manusia atau Bangunan Sekitar | 1.30 | 1.50 | 1.25 | 1.30 |
| Banyak bangunan disekitar | 1.50 | 2.00 | 1.30 | 1.50 |

Tabel 6. Nilai Minimum Faktor Keamanan Statik Lereng

| | |
|-------------|--|
| FK ≥ 1.5 | Safety factor no less than 1.5 for permanent or sustained loading condition |
| FK ≥ 2 | For foundation of structure |
| 1.25 – 1.3 | For temporary loading condition or where stability reaches a minimum during construction |
| 1.15 – 1.25 | For transient loads, such as earthquake |

Berdasarkan parameter pada gambar 1. dan syarat faktor keamanan pada tabel 5. dan tabel 6, dilakukan analisa PLAXIS berdasarkan potongan A-A' s.d. D-D' untuk kondisi drained dan undrained. Beban yang diperbolehkan bekerja di luar galian maksimum sebesar 10 kPa.

c. Analisa Pengamanan Galian

Sistem Pengaman Galian (Alternatif Soldier Pile H-Beam)

Dari hasil analisa PLAXIS, untuk kondisi jangka pendek (*short term*), pengaman galian dianalisis menggunakan sistem kombinasi *open-cut slope* dan soldier pile H-Beam sesuai alternatif desain. Faktor keamanan yang diperoleh sebesar 1.781 (>1.3). Namun untuk kondisi jangka panjang (*long term*), faktor keamanan berada di bawah nilai aman jika hanya mengandalkan *soldier pile* tanpa perkuatan tambahan. Oleh karena itu, untuk kondisi jangka panjang perlu dipertimbangkan penggunaan *tieback anchor* atau sistem perkuatan tambahan. Ringkasan sebagai berikut:

- Kondisi Jangka Pendek (*Short Term*)
- Muka tanah eksisting berada pada elevasi sekitar -0.85 m, dan dasar galian berada pada elevasi -9.25 m s.d. -9.45 m.
- *Open-cut slope* dibuat dengan kemiringan 1V:1.5H hingga mendekati area lagging *soldier pile*.
- Untuk menghindari erosi permukaan, muka lereng *open-cut* dilapisi dengan shotcrete dan kawat ayam, serta diberikan drainase di sela antar *soldier pile*.
- *Top soldier pile* direncanakan berada pada elevasi -0.85 m.
- *Tip soldier pile* diperkirakan berada pada elevasi -12.0 m, dengan penetrasi minimal 2.5 m ke tanah keras untuk memastikan perlawanan terhadap momen guling dan pergeseran lateral.
- *Surcharge* yang diizinkan bekerja maksimum sebesar 10 kPa.

d. Analisa Struktur

Diagram *bending moment, shear*, dan defleksi yang terjadi pada soldier pile dapat dilihat pada gambar 9, gambar 10, gambar 11 dan gambar 12 Hasil analisa PLAXIS menunjukkan momen maksimum sebesar 33.83 kNm terjadi pada kedalaman sekitar -6.2 m. Berdasarkan momen maksimum tersebut, digunakan profil H-Beam 200×200×8×12, dengan parameter sebagai berikut: *Yield Strength* (Fy) = 410 Mpa, *Elastic Modulus* (E) = 200,000 Mpa, *Elastic Section Modulus* (Sx) = 307 cm³ dan *Moment of Inertia* (Ix) = 3078 cm⁴

$$M_{izin} = Fy \times Sx$$

$$= 410,000 \times 0.000307$$

$$= 125.87 \text{ kNm}$$

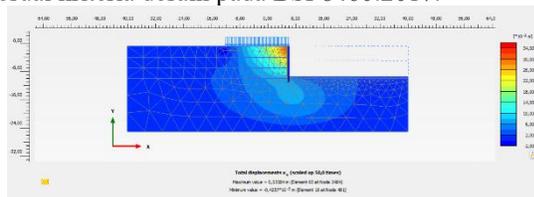
Karena $M_{izin} = 125.87 \text{ kNm} > M_{max} = 33.83 \text{ kNm}$, maka profil *soldier pile* dinyatakan aman terhadap momen lentur.

e. Defleksi

Hasil analisa PLAXIS menunjukkan defleksi lateral maksimum sebesar 18.72 mm pada kedalaman sekitar -5.8 m. Defleksi ini menghasilkan rasio deformasi lateral terhadap tinggi galian sebesar:

$$\begin{aligned} \text{Rasio defleksi terhadap tinggi galian} &= \frac{\Delta_{max}}{H} \\ &= \frac{18.72}{9.45} \\ &= 0.198\% \end{aligned}$$

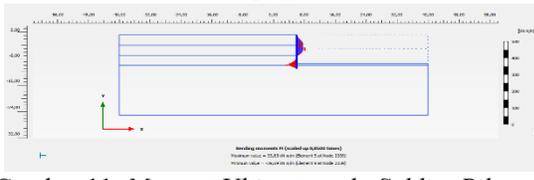
Nilai ini lebih kecil dibandingkan batas deformasi maksimum yang diizinkan sebesar 0.5% H (47 mm), sesuai kriteria desain pada BSI 8460:2017.



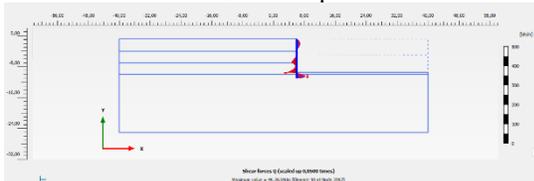
Gambar 9. Total Displacement Soldier Pile



Gambar 10. Horizontal Displacement pada Soldier Pile



Gambar 11. Moment Ultimate pada Soldier Pile wall



Gambar 12. Shear Ultimate pada Soldier Pile Wall

f. Kondisi Jangka Panjang (Long Term)

Apabila tanah sudah memasuki kondisi *drained*, maka diperlukan tambahan sistem perkuatan berupa 1 lapis *tieback anchor* yang dipasang pada elevasi -6.45 m dan dihubungkan ke *soldier pile*, dengan tahapan galian sebagai berikut:

- Gali hingga elevasi -7.45 m
- Gali hingga elevasi -9.45 m, dengan menyisakan berm tanah di dekat *soldier pile*
- Konstruksi struktur basement (B2)

- Pasang *tieback anchor* pada elevasi -6.45 m ke struktur *basement* (B2)
- Gali berm tanah di dekat *soldier pile*
- Konstruksi struktur basement di dekat *soldier pile*
- Lepas strut / *tieback* (jika sudah didukung basement permanen)

Sistem *soldier pile* dengan *tieback anchor* juga menghasilkan faktor keamanan terhadap stabilitas global sebesar $FK = 1,482$, memenuhi syarat minimum $FK \geq 1.3$ untuk kondisi *long term*. Analisa menunjukkan bahwa *tieback anchor* diperlukan untuk meningkatkan kestabilan sistem *soldier pile H-Beam* dalam kondisi *drained*, mengingat tanpa perkuatan tambahan faktor keamanan berada di bawah batas izin.

IV. KESIMPULAN

Hasil analisis menunjukkan perbedaan performa yang signifikan pada masing-masing sistem dalam kondisi jangka pendek dan jangka panjang, sebagaimana kesimpulan berikut:

1. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa baik *steel sheet pile* maupun *soldier pile H-Beam* mampu berfungsi sebagai sistem penahan tanah sementara pada galian sedalam ±9,45 meter. Pada kondisi jangka pendek, keduanya memiliki faktor keamanan yang melebihi nilai minimum (1.771 dan 1.781) serta tidak memerlukan perkuatan tambahan.
2. Evaluasi kestabilan dan deformasi lateral menunjukkan bahwa *soldier pile H-Beam* memberikan defleksi lebih kecil (18.72 mm) dibandingkan *steel sheet pile* (24 mm), dengan rasio deformasi terhadap kedalaman galian juga lebih rendah (0.198% vs. 0.28%). Ini menunjukkan *soldier pile H-Beam* memiliki kontrol deformasi lateral yang lebih baik, meskipun keduanya tetap dalam batas aman < 0.5% H.
3. Pada kondisi jangka panjang, kedua sistem tidak memenuhi syarat faktor keamanan tanpa perkuatan ($FK < 1.3$). Namun setelah diberikan perkuatan (*strut* pada *steel sheet pile* dan *tieback anchor* pada *soldier pile*), keduanya kembali memenuhi persyaratan dengan FK sebesar 1.660 dan 1.482. Oleh karena itu, keduanya secara teknis layak digunakan untuk kondisi jangka panjang dengan perkuatan yang sesuai.

V. DAFTAR PUSTAKA

[1] H. Tanubrata, *Teknik Konstruksi Basement Gedung Bertingkat*, Jakarta: Penerbit Teknik Sipil Indonesia, 2015.

[2] M. Al-Matin, "Pemanfaatan Ruang Basement sebagai Solusi Keterbatasan Lahan Perkotaan," *Jurnal Rekayasa Sipil dan Arsitektur*, vol. 3, no. 1, pp. 45–52, 2018.

- [3] N. Lafiza, “Studi Fungsi Basement sebagai Ruang Utilitas dalam Bangunan Tinggi,” *Jurnal Teknik Bangunan*, vol. 6, no. 2, pp. 61–67, 2017.
- [4] M. Takwin, R. Putra, dan A. Sari, “Analisis Penyebab Longsor pada Lereng Galian Proyek Perkotaan,” *Jurnal Geoteknik Indonesia*, vol. 9, no. 1, pp. 12–19, 2017.
- [5] A. Fadilah *et al.*, “Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Menggunakan Sheet Pile,” *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 15, no. 2, pp. 101–108, 2021.
- [6] D. Mahendra and T. Yusuf, “Evaluasi Performa Sheet Pile pada Tanah Lunak,” *Jurnal Infrastruktur Sipil*, vol. 6, no. 1, pp. 22–29, 2020.
- [7] A. Fadilah *et al.*, “Pengaruh Kedalaman Galian terhadap Kinerja Sheet Pile,” *JTS*, vol. 15, no. 2, pp. 109–115, 2021.
- [8] B. Wulandari and M. Fajar, “Desain Soldier Pile H-Beam pada Galian Dalam,” *Jurnal Konstruksi dan Struktur*, vol. 7, no. 2, pp. 55–62, 2022.
- [9] R. Nugroho and A. Wibowo, “Komparasi Sistem Penahan Tanah pada Tanah Kohesif,” *Media Teknik Sipil*, vol. 12, no. 1, pp. 13–19, 2020.
- [10] R. Wahyudi *et al.*, “Simulasi PLAXIS untuk Evaluasi Dinding Penahan,” *Jurnal Teknologi Konstruksi*, vol. 8, no. 3, pp. 88–94, 2022.
- [11] H. Priatna and A. Siregar, “Modeling Stabilitas Galian dalam PLAXIS 2D,” *Jurnal Mekanika Tanah*, vol. 5, no. 2, pp. 40–47, 2021.
- [12] R. Wahyudi *et al.*, “Validasi Model Numerik untuk Dinding Penahan,” *Jurnal Teknologi Konstruksi*, vol. 8, no. 3, pp. 95–102, 2022.
- [13] D. Santoso *et al.*, “Korelasi Data Monitoring dan Simulasi PLAXIS,” *Jurnal Geoteknik Indonesia*, vol. 9, no. 1, pp. 10–17, 2023.
- [14] A. Fadilah *et al.*, “Studi Defleksi Sheet Pile untuk Galian >9m,” *JTS*, vol. 15, no. 2, pp. 116–122, 2021.
- [15] M. Rachman and A. Syahputra, “Analisis Stabilitas Anchored vs. Cantilever Sheet Pile,” *Geotechnical Review*, vol. 14, no. 1, pp. 33–40, 2021.
- [16] R. Lestari and H. Pranoto, “Efektivitas Tieback Anchor pada Soldier Pile,” *Jurnal Geoteknik Indonesia*, vol. 7, no. 2, pp. 21–28, 2020.