

Analisis Stabilitas Galian dengan Menggunakan Metode *Secant Pile*

Tammy Flafiana Nabillah^{1),*)}, Iman Handiman²⁾, Zakwan Gusnadi³⁾, Fitriana Sarifah⁴⁾, dan Yusep Ramdani⁵⁾

^{1), 2), 3), 4), 5), *)}Jurusan Teknik Sipil, Universitas Siliwangi, Tasikmalaya, INDONESIA

*Corresponding authors: tflafiana@gmail.com

Diserahkan 10 Desember 2025. Direvisi 20 Desember 2025. Diterima 08 Januari 2026

ABSTRAK Penelitian ini dilakukan pada galian untuk *basement* gedung di kawasan padat penduduk daerah Bandung, Jawa Barat. Galian diperkuat menggunakan *secant pile* karena sifatnya yang fleksibel, minim getaran dan tidak membutuhkan lahan luas, sesuai dengan kondisi dengan bangunan eksisting terdekat pada jarak 24,3 m. Analisis difokuskan pada faktor keamanan, deformasi lateral dan deformasi aksial. Metode elemen hingga digunakan melalui perangkat lunak berbasis elemen hingga dengan peninjauan pada dua potongan, yaitu potongan melintang (potongan 1) dan potongan memanjang (potongan 2). Parameter tanah yang digunakan diperoleh dari uji lapangan SPT dan uji laboratorium pada empat titik bor log dengan kedalaman muka air tanah bervariasi, yaitu 1,2 m, 3,3 m, 0,8 m dan 2 m pada masing-masing titik bor log. Kondisi tanah sekitar galian hingga kedalaman *secant pile* berdiameter 60 didominasi oleh tanah lunak, dengan kedalaman galian 4,5 m dan panjang *secant pile* 9 m. Hasil analisis menunjukkan nilai faktor keamanan pada galian potongan 1 sebesar 1,934 ($\geq 1,5$) dan pada potongan 2 sebesar 1,946 ($\geq 1,5$) serta FK terhadap *heave*, *blow-in* dan *piping* berturut-turut sebesar 1,6 ($\geq 1,25$), 1,274 ($\geq 1,25$) dan 1,66 ($\geq 1,5$). Deformasi lateral yang terjadi pada dinding *secant pile* sebesar 4,16 cm ($\geq 4,5$ cm) pada potongan 1 dan 4,22 cm ($\geq 4,5$ cm) pada potongan 2 serta deformasi aksial (penurunan tanah di area sekitar galian) potongan 1 sebesar 0,03 cm dan 0,27 cm pada potongan 2. Keseluruhan hasil analisis menunjukkan galian dengan perkuatan *secant pile* aman sesuai dengan batas izin geoteknik.

KATA KUNCI Deformasi, Faktor Keamanan, Galian, *Secant Pile*, Stabilitas.

ABSTRACT This research investigates an excavation for a building basement in a densely populated area of Bandung, West Java. The excavation was stabilized using a *secant pile* wall due to its flexibility, minimal vibration, and small footprint, which is ideal given the closest existing structure is only 24.3 meters away. The analysis focused on the Factor of Safety (FoS), lateral deformation, and axial deformation. The Finite Element Method (FEM) was employed using FEM-based software, examining a cross-section (Section 1) and a longitudinal section (Section 2). Soil parameters were derived from SPT field tests and laboratory tests conducted at four borehole locations, where the groundwater table varied: 1.2 m, 3.3 m, 0.8 m, and 2 m, respectively. The soil surrounding the excavation is predominantly soft soil, with an excavation depth of 4.5 m and a *secant pile* length of 9 m (diameter 60). The analysis results show a global stability FoS of 1.934 (≥ 1.5) for Section 1 and 1.946 (≥ 1.5) for Section 2. Furthermore, the FoS against *heave*, *blow-in*, and *piping* are 1.6 (≥ 1.25), 1.274 (≥ 1.25), and 1.66 (≥ 1.5), respectively. The maximum lateral deformation of the *secant pile* wall was calculated as 4.16 cm (≥ 4.5 cm) in Section 1 and 4.22 cm (≥ 4.5 cm) in Section 2. The axial deformation (ground settlement) was 0.03 cm in Section 1 and 0.27 cm in Section 2. The overall results indicate that the excavation, reinforced with the *secant pile* wall, is safe and complies with geotechnical permissible limits.

KEYWORDS Deformation, Excavation, Factor of Safety, *Secant Pile*, Stability.

1. PENDAHULUAN

Lahan kosong yang semakin langka serta nilai jual lahan yang semakin tinggi diakibatkan banyaknya pembangunan dan meningkatnya populasi manusia, mengakibatkan tidak memungkinkannya memperluas bangunan secara horizontal. Banyak dari pengembang mencari inovasi lain agar penggunaan lahan lebih optimal, salah satunya yaitu pembangunan *basement*, di mana *basement* ini menjadi salah satu pilihan yang sangat populer untuk menambah ruang fungsional, salah satunya untuk parkir ataupun untuk tempat utilitas bangunan (Hardjasaputra dalam Roejanto & Hardjasaputra, 2021). Tahap awal Pembangunan *basement* gedung yaitu konstruksi galian. Stabilitas masa tanah pada sekitar area galian serta penurunan fondasi pada struktur di sekitar galian tanah menjadi permasalahan utama dalam pelaksanaan konstruksi galian (Hashash and Whittle, 1996). Meninjau kemungkinan terjadinya keruntuhan dan untuk menjamin keamanan konstruksi galian, diperlukannya analisis stabilitas galian salah satunya menggunakan dinding penahan tanah (DPT). Dinding penahan tanah adalah struktur yang direncanakan untuk menjaga dan mempertahankan dua muka elevasi tanah yang berbeda (Coduto, 2001). Salah satu perkuatan galian yang banyak digunakan yaitu *secant pile wall*. *Secant pile*

merupakan salah satu jenis DPT dimana jarak antara *pile* saling berdempetan maupun saling bersinggungan satu sama lain yang berguna untuk mendapatkan daya tanah terhadap tekanan tanah lateral (Putrato *et al.*, 2022). *Secant pile* dikenal efektif untuk menahan tekanan tanah, mengurangi perembesan air tanah dan menjaga stabilitas galian di area terbatas (Wang, Cheng and Zheng, 2024).

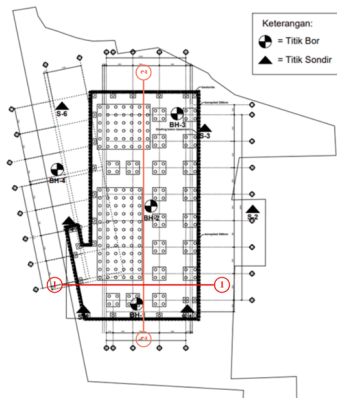
Dalam analisis stabilitas galian, faktor keamanan (FK), deformasi lateral dan deformasi aksial menjadi parameter untuk menilai kelayakan desain sistem penahan tanah. Faktor keamanan menunjukkan sejauh mana struktur perkuatan mampu menahan gaya dorong tanah dan air terhadap potensi keruntuhan. Perhitungan FK umumnya dilakukan dengan metode keseimbangan batas (*limit equilibrium method*). Namun, perkembangan metode numerik berbasis metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM) memungkinkan evaluasi FK yang lebih komprehensif, dengan mempertimbangkan interaksi tanah-struktur dan pengaruh konstruksi bertahap (Sivapriya *et al.*, 2024). Deformasi lateral yang berlebihan berpotensi menimbulkan pergeseran tanah lateral yang dapat merusak bangunan atau utilitas di sekitar galian. Sedangkan deformasi lateral atau penurunan terjadi akibat pelepasan tegangan tanah yang dapat berpengaruh terhadap kestabilan galian maupun fondasi bangunan di atasnya.

Berdasarkan hal tersebut, penelitian mengenai analisis stabilitas dengan menggunakan metode *secant pile* dengan bantuan aplikasi berbasis metode elemen hingga atau FEM, memiliki tujuan untuk menganalisis serta mengevaluasi faktor keamanan, deformasi lateral dan deformasi aksial. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi pada pengembangan metode desain yang lebih andal, serta memberikan pemahaman yang lebih baik terhadap perilaku tanah-struktur dalam konteks stabilitas galian.

2. METODE

2.1. Tinjauan Penelitian

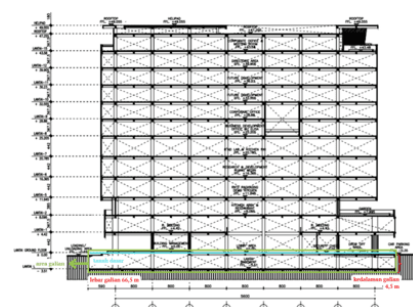
Penelitian ini menganalisis stabilitas galian dari dua penampang, yaitu potongan 1 sebagai potongan melintang dan potongan 2 sebagai potongan memanjang. Kedua potongan ini digunakan sebagai dasar acuan dalam analisis galian, salah satunya sebagai penentuan kondisi tanah.



Gambar 1. Layout potongan analisis galian



a. Potongan 1 (melintang)



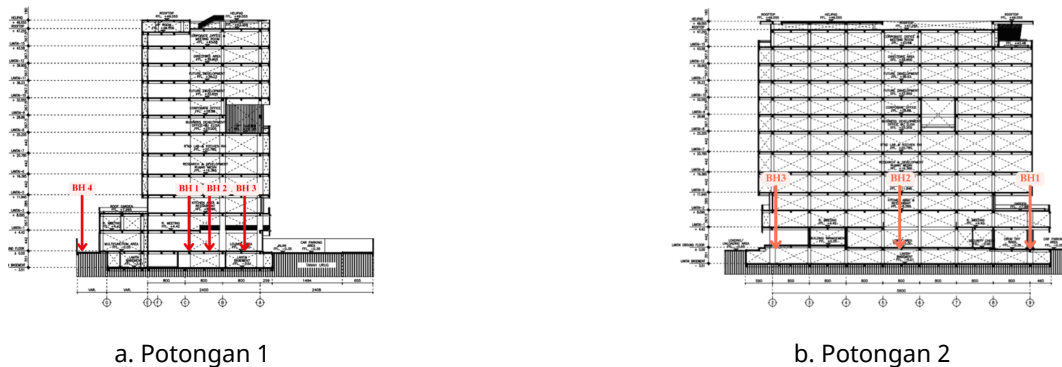
b. Potongan 2 (memanjang)

Gambar 2. Titik tinjauan penampang potongan 1 dan potongan 2

Gambar 2 menunjukkan tinjauan penelitian untuk 2 penampang, yaitu potongan 1 sebagai potongan melintang dan potongan 2 sebagai potongan memanjang yang merupakan area untuk konstruksi *basement* pada sebuah gedung. Area galian yang ditinjau pada potongan 1 memiliki lebar 35,5 m dan kedalaman galian 4,5 m. Sedangkan untuk potongan 2 memiliki lebar area galian sebesar 66,5 m dengan kedalaman galian 4,5 m dari dasar atau permukaan tanah.

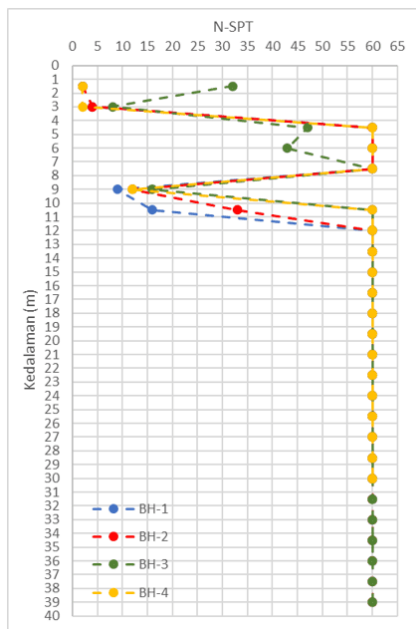
2.2. Kondisi Tanah Dasar dan Parameter Tanah

Kondisi tanah pada masing-masing potongan ditinjau dari titik bor *standard penetration test* (SPT) yang didapat berdasarkan denah pada Gambar 1. Data titik penyelidikan tanah lapangan tersebut kemudian diproyeksikan ke dalam tinjauan potongan 1 dan 2 untuk keperluan analisis. Titik bor SPT yang digunakan pada masing-masing potongan dapat dilihat pada Gambar 3.



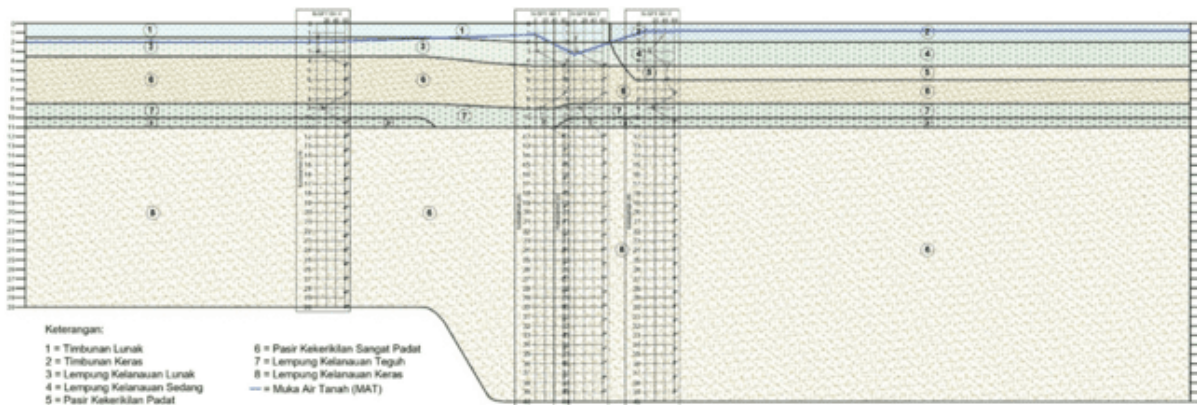
Gambar 3 Titik borlog yang digunakan pada masing-masing penampang

Kondisi tanah pada lokasi penelitian didapatkan berdasarkan hasil penyelidikan tanah *standard penetration test* (SPT) sebanyak 4 titik yaitu BH-1, BH-2, BH-3 dan BH-4. Pada potongan 1 digunakan sebanyak 4 titik yaitu BH-4, BH-1, BH-2 dan BH-3. Sedangkan potongan 2 hanya memakai 3 titik saja, yaitu BH-3, BH-2 dan BH-1.

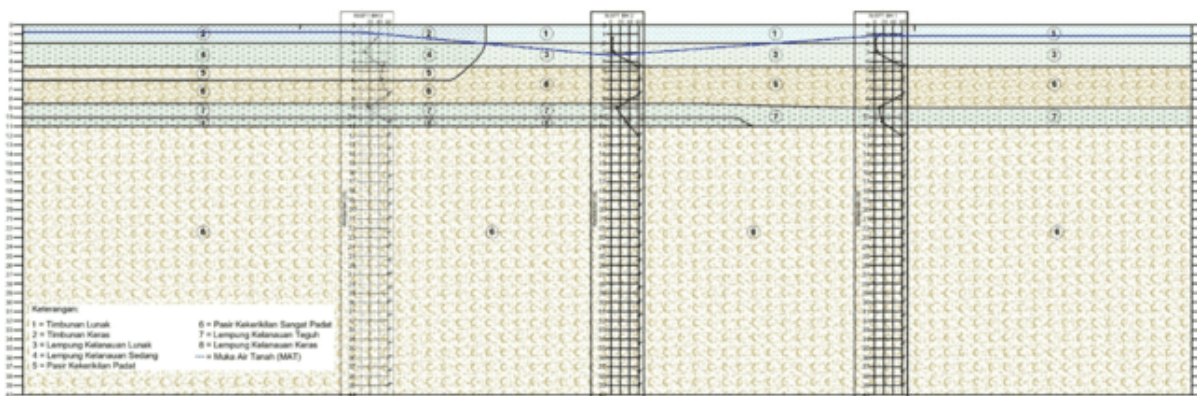


Gambar 4. Hasil uji penetrasi (SPT)

Berdasarkan hasil SPT pada Gambar 4, kedalaman area sekitar galian dan area pembenaman *secant pile* yaitu 0 m – 9 m di dominasi oleh tanah lempung kelanauan lunak dan pada kedalaman 10 m – 40 m di dominasi oleh tanah teguh, keras dan sangat padat yang didominasi oleh tanah pasir. Hasil uji penetrasi digunakan untuk menentukan stratifikasi tanah pada masing-masing potongan dengan mengacu pada dua penampang yang telah ditetapkan. Tanah dengan nilai N yang sama serta karakteristik serupa pada setiap titik bor log dapat digabungkan menjadi satu lapisan yang sama.



Gambar 5 Stratifikasi potongan 1 (melintang)



Gambar 6 Stratifikasi potongan 2 (memanjang)

Parameter tanah (Tabel 1, Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4) ditetapkan sesuai stratifikasi pada masing-masing potongan yang ditunjukkan pada Gambar 5 dan Gambar 6 dengan mengambil nilai N-SPT terkecil atau kondisi tanah terlemah untuk keamanan yang lebih kritis. Contohnya, pada lapisan 3 potongan 1, lapisan lempung lunak diambil berdasarkan 3 titik bor log yaitu bor log 4, 1 dan 2 dengan nilai N berturut-turut 2, 4 dan 4. Parameter tanah dari bor log 4 untuk lapisan 3 potongan 1, dengan N terkecil.

Berat isi tanah (normal dan tersaturasi) ditentukan berdasarkan jenis tanah (Ameratunga, Sivakugan and Das, 2016). Kuat geser tak terdrainase diperoleh dari korelasi nilai N-SPT dengan rumus $C_u = 6,5 \times N_{SPT}$ (Bowles, 1988). Parameter kuat geser tanah ditentukan berdasarkan nilai tipikalnya (Ameratunga, Sivakugan and Das, 2016). Nilai angka pori umumnya berkisar antara 0,9 – 1,4 untuk tanah lempung lunak, sekitar 0,6 untuk lempung teguh dan 0,045 untuk tanah pasir (Das and Sobhan, 2014). Nilai kekakuan dasar diperoleh dari korelasi dengan nilai C_u sedangkan nilai kekakuan dasar untuk pasir sangat padat berkisar antara 40.000 – 100.000 kPa (Das and Sobhan, 2014) nilai modulus efektif ditentukan dengan pendekatan empiris, yaitu $E' = 0,6 E'$ (Das and Sobhan, 2014). Modulus *secant* pada 50% q_{max} ditentukan dengan pendekatan $E_{50} = E'$ (Hardiyatmo, 2003) dan nilai modulus *unloading/reloading* digunakan pendekatan $E_{ur} \approx (2 \text{ sampai } 10) E_{50}$ (“Badan Standardisasi Nasional Standar Nasional Indonesia tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik,” 2017).

Tabel 1. Parameter Tanah potongan 1 (melintang)

Lap	Jenis Tanah	Konsistensi	N_{SPT}	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C_u (kN/m ²)	ϕ (°)	c' (kN/m ²)	Φ' (°)	Ψ (°)	μ	e	E (kPa)
1.	Timbunan	Lunak	2	17,00	17,00	13,00	-	2,30	19,00	0,0	0,50	1,41	3900,00
2.	Timbunan	Keras	32	20,00	20,00	208,00	-	6,46	27,76	0,0	0,50	0,60	124800,00
3.	Lempung	Lunak	2	15,90	18,94	13,00	5,5	2,30	19,00	0,0	0,50	1,41	6643,39
4.	Lempung	Sedang	8	16,00	18,85	52,00	12,0	5,00	25,00	0,0	0,50	1,28	26573,56
5.	Pasir	Padat	44	21,00	23,00	-	43,5	3,50	35,00	5,5	0,37	0,45	42500,00
6.	Pasir	Sangat Padat	60	21,00	23,00	-	46,0	33,00	33,00	3,0	0,32	0,45	52000,00
7.	Lempung	Teguh	12	17,00	19,81	78,00	-	26,29	26,29	0,0	0,50	1,1	20159,88

8.	Lempung	Keras	33	20,00	20,00	214,00	-	27,83	27,83	0,0	0,50	0,6	64350,00
----	---------	-------	----	-------	-------	--------	---	-------	-------	-----	------	-----	----------

Tabel 2. Parameter tanah potongan 1 (melintang) (lanjutan)

Lap	Jenis Tanah	Konsistensi	N_{SPT}	E' (kPa)	E_{50} (kPa)	E_{ur} (kPa)	C_c	C_v (cm ² /det)	C_s	k_y (m/hari)	k_x (m/hari)	R_{inter}
1.	Timbunan	Lunak	2	2340,00	2340,00	4680,00	0,540	0,000150	0,020	0,0332	0,0665	0,85
2.	Timbunan	Keras	32	74880,00	74880,00	149760,00	0,025	0,000073	0,005	0,0005	0,0010	0,85
3.	Lempung	Lunak	2	3986,03	3986,03	7972,07	0,540	0,000150	0,020	0,0195	0,0390	0,85
4.	Lempung	Sedang	8	15944,14	15944,14	31888,27	0,150	0,000100	0,030	0,0033	0,0065	0,85
5.	Pasir	Padat	44	25500,00	25500,00	51000,00	-	-	-	0,0028	0,0056	0,90
6.	Pasir	Sangat Padat	60	31200,00	31200,00	62400,00	-	-	-	0,0049	0,0097	0,90
7.	Lempung	Teguh	12	12095,93	12095,93	24191,86	0,030	0,000086	0,006	0,0037	0,0074	0,85
8.	Lempung	Keras	33	38610,00	38610,00	77220,00	0,025	0,000073	0,005	0,0010	0,0020	0,85

Tabel 3. Parameter tanah potongan 2 (memanjang)

Lap	Jenis Tanah	Konsistensi	N_{SPT}	γ (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	C_u (kN/m ²)	ϕ (°)	c' (kN/m ²)	ϕ' (°)	Ψ (°)	μ	e	E (kPa)
1.	Timbunan	Lunak	2	17,00	17,00	13,00	-	2,30	19,00	0,00	0,50	1,41	3900,00
2.	Timbunan	Keras	32	20,00	20,00	208,00	-	6,46	27,76	0,00	0,50	0,60	124800,00
3.	Lempung	Lunak	4	15,00	18,11	26,00	-	2,60	22,40	0,00	0,50	1,31	6719,96
4.	Lempung	Sedang	8	16,00	18,85	52,00	12,00	5,00	25,00	0,00	0,50	1,28	26573,56
5.	Pasir	Padat	44	21,00	23,00	-	43,50	3,50	35,00	5,50	0,37	0,45	42500,00
6.	Pasir	Sangat Padat	60	21,00	23,00	-	46,00	1,00	33,00	3,00	0,32	0,45	52000,00
7.	Lempung	Teguh	12	17,00	19,81	78,00	-	5,24	26,29	0,00	0,50	1,1	20159,88
8.	Lempung	Keras	33	20,00	20,00	214,50	-	6,52	27,83	0,00	0,50	0,6	64350,00

Tabel 4. Parameter tanah potongan 2 (memanjang) (lanjutan)

Lap	Jenis Tanah	Konsistensi	N_{SPT}	E' (kPa)	E_{50} (kPa)	E_{ur} (kPa)	C_c	C_v (cm ² /det)	C_s	k_y (m/hari)	k_x (m/hari)	R_{inter}
1.	Timbunan	Lunak	2	2340,00	2340,00	4680,00	0,540	0,000150	0,020	0,03323	0,06646	0,85
2.	Timbunan	Keras	32	74880,00	74880,00	149760,00	0,025	0,000073	0,005	0,00050	0,00101	0,85
3.	Lempung	Lunak	2	4031,98	4031,98	8063,95	0,470	0,000150	0,070	0,01929	0,03857	0,85
4.	Lempung	Sedang	8	15944,14	15944,14	31888,27	0,150	0,000100	0,030	0,00325	0,00650	0,85
5.	Pasir	Padat	44	25500,00	25500,00	51000,00	-	-	-	0,00280	0,00560	0,90
6.	Pasir	Sangat Padat	60	31200,00	31200,00	62400,00	-	-	-	0,00486	0,00971	0,90
7.	Lempung	Teguh	12	12095,93	12095,93	24191,86	0,030	0,000086	0,006	0,00367	0,00735	0,85
8.	Lempung	Keras	33	38610,00	38610,00	77220,00	0,025	0,000073	0,005	0,00098	0,00196	0,85

2.3. Data Galian dan Material yang Digunakan

Galian dengan perkuatan *secant pile* ini dilakukan sedalam 4,5 meter. Jarak galian dengan gedung atau infrastruktur eksisting terdekat berjarak sejauh 24,3 meter. Jarak ini dipakai untuk menentukan batas izin defleksi dinding atau deformasi lateral yang terjadi sesuai dengan SNI 8460:2017 yang dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Batas maksimum deformasi lateral dinding

Batas maksimum deformasi lateral 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 ($\delta w/H$)	0,5%	0,7%	0,7%	1,0%

Keterangan:

x = jarak dari batas galian; H = kedalaman galian; dan δw = defleksi dinding

(Sumber: SNI 8460, 2017)

$$\frac{x}{H} = \frac{24,3}{4,5} = 5,4 > 2$$

Karena hasilnya lebih dari 2, termasuk ke dalam zona 3 dengan tanah tipe B, maka nilai batas izin deformasi lateral dinding maksimum $1,00\% H = 1,00\% 4,5 \text{ m} = 4,5 \text{ cm}$.

Dinding penahan tanah *secant pile* terdiri dari bentonite sebagai *primary pile* dan beton bertulang sebagai *secondary pile* atau tulangan utama. Material ini selanjutnya digunakan sebagai input geometri struktur dalam aplikasi berbasis FEM, sesuai dengan spesifikasi material *secant pile* sebagai berikut.

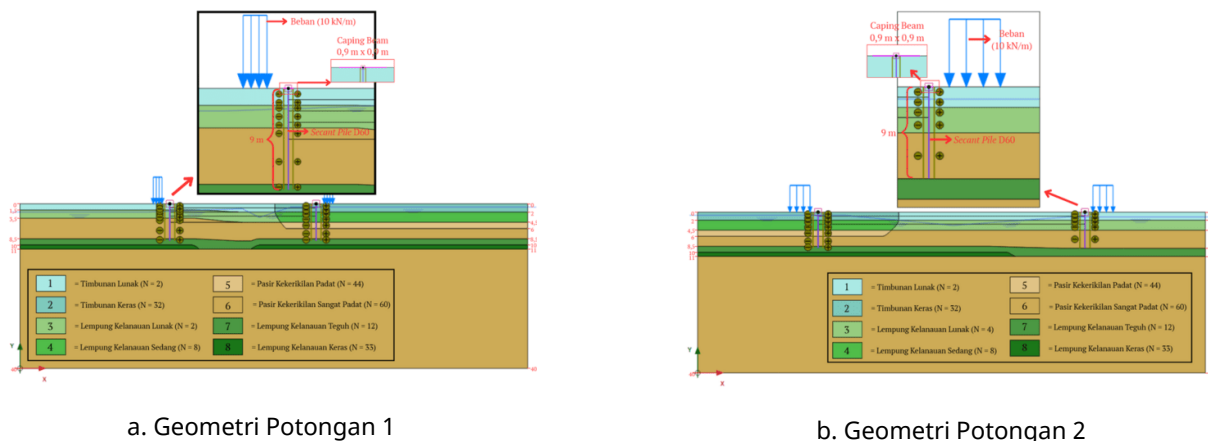
Jenis perkuatan	: <i>Secant Pile</i>
Diameter (D)	: 60 cm $\approx$ 0,6 m
Jarak antar <i>pile</i> (s)	: 100 cm $\approx$ 1 m
Mutu beton (f'c)	: K350 $\approx$ 35 mPa
Tulangan utama	: 10 D19
Berat efektif <i>secant pile</i> per meter panjang (w)	: 2,546 kN/m
<i>Bending Stiffness</i> per meter panjang (EI)	: 176962,62 kNm ²
<i>Axial Stiffness</i> per meter panjang (EA)	: 8353422,7 kN

Selain itu, ada *caping beam* yang berfungsi sebagai pengikat kepala *secant pile* dengan material *caping beam* sebagai berikut.

Lebar (b)	: 90 cm $\approx$ 0,9 m
Tinggi (h)	: 90 cm $\approx$ 0,9 m
Mutu beton (f'c)	: K350 $\approx$ 35 mPa
Berat efektif <i>caping beam</i> per meter panjang (w)	: 7,290 kN/m
Tulangan utama	: 16 D22
<i>Bending Stiffness</i> per meter (EI)	: 1590991,6 kNm ²
<i>Axial Stiffness</i> per meter (EA)	: 23570245,013 kN

2.4. Pemodelan Analisis Stabilitas Galian dengan *Secant Pile*

Lokasi muka air tanah (MAT) awal tinjauan analisis bor log 1, 2, 3 dan 4 berturut-turut berada pada kedalaman 1,2 m, 3,3 m, 0,8 m dan 2,0 m. Geometri galian dengan *secant pile* dapat dilihat pada Gambar 7.



a. Geometri Potongan 1

b. Geometri Potongan 2

Gambar 7. Geometri analisis stabilitas galian dengan *secant pile*

Tahapan awal pemodelan dimulai dari kondisi awal yaitu untuk mendefinisikan kondisi tegangan awal tanah dan air (Gusnadi et al., 2023). Dilanjutkan dengan tahap *reset displacement* untuk mengatur ulang tegangan setelah kondisi tegangan awal agar deformasi akibat *self-weight* tidak ikut tercatat. Kemudian dilakukan pengaktifan struktur *secant pile*, *caping beam* dan beban 10 kN/m sebagai beban representatif daerah sekitar galian (SNI). Terakhir, dilakukan tahap galian sebanyak 4 tahap, dimulai dari galian pertama sedalam 1 m, galian kedua sedalam 1 m, galian ketiga sedalam 1 m dan galian keempat sedalam 1,5 m hingga total kedalaman yaitu 4,5 m.

Pemodelan analisis stabilitas galian dengan *secant pile* dilakukan menggunakan aplikasi berbasis elemen hingga atau FEM. Material tanah dimodelkan menggunakan model *hardening soil*. Struktur *secant pile* dan *capping beam* dimodelkan menggunakan fitur *plates* dengan parameter pada sub-bab sebelumnya dan beban jalan dimodelkan sebagai *line load* atau beban merata.

2.5. Faktor Keamanan Stabilitas Dasar Galian

2.5.1. Faktor Keamanan Terhadap *Basal Heave*

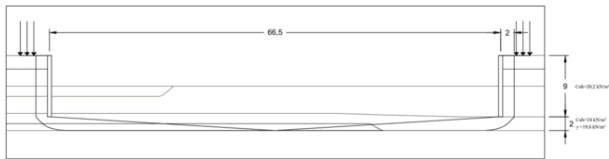
Basal heave merupakan mengalirnya tanah ke dalam galian akibat terganggunya kesetimbangan daya dukung tanah pada level ujung bawah DPT (SNI). Faktor keamanan terhadap *basal heave*, Persamaan (1), sesuai dengan persyaratan SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik yaitu:

$$FK_{heave} \geq 1,25 \quad (1)$$

Faktor keamanan *basal heave* dapat dihitung berdasarkan metode Terzaghi yang tercantum dalam (Wong and Goh, 2002) dengan Persamaan (2) sebagai berikut.

$$FK_{heave} = \frac{5,7 \times C_{ub} \times B1}{(\gamma \times H \times B1) - (C_{uh} \times H)} \quad (2)$$

di mana B = kedalaman galian (m); B1 = kedalaman tanah kedap di bawah galian (m); H = panjang *secant pile* (m); C_{ub} = nilai C_u rata-rata di atas *secant pile* (kN/m^2); C_{uh} = nilai C_u rata-rata di bawah *secant pile* (kN/m^2); γ = berat isi tanah rata-rata di bawah *secant pile* (kN/m^3).



Gambar 8 Faktor keamanan terhadap *basal heave*

Galian yang ditinjau merupakan galian pada potongan 2. Data galian dengan perkuatan *secant pile* untuk menghitung faktor keamanan terhadap *basal heave*.

$$\begin{aligned} B &= 66,5 \text{ m} \\ B1 &= 2 \text{ m} \\ H &= 9 \text{ m} \\ C_{ub} &= 20,2 \text{ kN/m}^2 \\ C_{uh} &= 24 \text{ kN/m}^2 \\ \gamma &= 19,9 \text{ kN/m}^3 \\ q &= 10 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

2.5.2. Faktor Keamanan Terhadap *Blow-in*

Blow-in terjadi Ketika tanah dasar galian berupa tanah lempung yang kedap air namun relatif tipis, sedangkan di bawahnya terdapat lapisan tanah berbutir sebagai akuifer tertekan. Faktor keamanan terhadap *blow-in*, Persamaan (3), sesuai dengan persyaratan SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik yaitu:

$$FK_{blow-in} \geq 1,25 \quad (3)$$

Stabilitas terhadap keruntuhan *blow-in* dapat dihitung menggunakan Persamaan (4) berikut.

$$FK_{blow-in} = \frac{R_{dinding}}{P_a + P_{air}} \quad (4)$$

dimana $R_{dinding}$ = tekanan lateral dinding (mPa); P_a = tekanan lateral aktif sepanjang dinding *secant pile* (kPa); dan P_{air} = tekanan air lateral (kPa). Galian yang ditinjau merupakan galian pada potongan 2 dengan data galian sebagai berikut.

$$\begin{aligned} D &= 0,6 \text{ m} \\ t &= 0,6 \text{ m} \\ P_a &= 223.91 \text{ kPa} \\ L &= 9 \text{ m} \\ h_w &= 3,3 \text{ m} \\ \gamma_w &= 9,807 \text{ kN/m}^3 \end{aligned}$$

Nilai tekanan lateral dinding ($R_{dinding}$) dan tekanan air lateral (P_{air}) dapat diperoleh menggunakan persamaan berikut.

1. Inersia Tiang (I), Persamaan (5).

$$I = \frac{t \times D^3}{12} \quad (5)$$

dimana t = tebal dinding *pile* (m) dan D = diameter *pile* (m).

2. Momen Maksimum Tiang (M_{max}), Persamaan (6).

$$M_{max} = \frac{P_a \times L^2}{2} \quad (6)$$

dimana L = panjang *pile* (m).

3. Jarak Sumbu Netral ke Tepi Pile ($Y_{extreme}$), Persamaan (7).

$$Y_{extreme} = \frac{t}{2} \quad (7)$$

4. Section Modulus (Z), Persamaan (8).

$$Z = \frac{Y_{extreme}}{I} \quad (8)$$

5. Tahanan Lateral Dinding ($R_{dinding}$), Persamaan (9).

$$R_{dinding} = \frac{M_{max}}{Z} \quad (9)$$

6. Tekanan Air Lateral (P_{air}), Persamaan (10).

$$P_{air} = h_w \times \gamma_w \quad (10)$$

dimana h_w = kedalaman dari MAT ke dasar galian (m) dan γ_w = berat jenis air = 9,807 kN/m³.

2.5.3. Faktor Keamanan Terhadap *Piping*

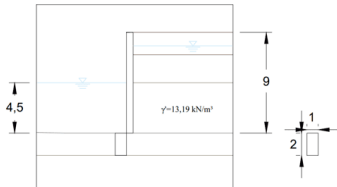
Piping merupakan bentuk ketidakstabilan galian yang terjadi akibat tekanan air tanah berlebih pada dasar galian. Faktor keamanan terhadap *piping*, Persamaan (11), sesuai dengan persyaratan SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik yaitu:

$$FK_{piping} \geq 1,5 \quad (11)$$

Faktor keamanan *piping* dapat dihitung berdasarkan (Das and Sobhan, 2014) dengan Persamaan (12) berikut.

$$FK_{pipping} = \frac{\gamma' \times D}{0,36(H1 - H2)\gamma_w} \quad (12)$$

di mana γ' = berat jenis efektif ujung galian ke lapisan *impermeable* (kN/m^3); D = kedalaman ujung lapisan *permeable* ke lapisan *impermeable* (m); $H1$ = kedalaman galian = $H2$ (m); $H2$ = kedalaman ujung galian ke lapisan *permeable* (m); dan γ_w = berat jenis air = $9,807 \text{ kN/m}^3$.



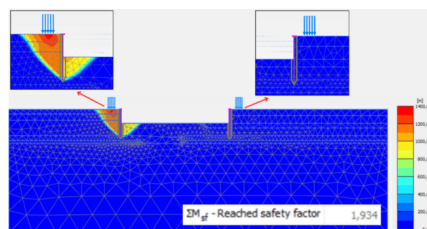
Gambar 9 Faktor keamanan terhadap *pipping*

Galian yang ditinjau merupakan galian pada potongan 2. Data galian dengan perkuatan *secant pile* untuk menghitung faktor keamanan terhadap *pipping*. Data galian dengan perkuatan *secant pile* untuk menghitung faktor keamanan terhadap *pipping* sebagai berikut.

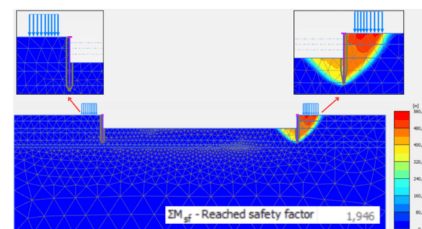
$H2 = 4,5 \text{ m}$
 $H = 9 \text{ m}$
 $D = 2 \text{ m}$
 $D/2 = 1 \text{ m}$
 $\gamma' = 13,19 \text{ kN/m}^3$
 $\gamma_w = 9,807 \text{ kN/m}^3$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Faktor Keamanan



a. Potongan 1



b. Potongan 2

Gambar 10. Hasil analisis faktor keamanan galian dengan perkuatan *secant pile*

Hasil kalkulasi faktor keamanan dari analisis pemodelan yang telah dilakukan ditunjukkan pada Gambar 10 yang memperlihatkan nilai faktor keamanan sebesar 1,934 ($1,934 \geq 1,5$) pada potongan 1 dan 1,946 ($1,946 \geq 1,5$) pada potongan 2. Nilai tersebut menunjukkan bahwa galian dengan perkuatan *secant pile* sudah memenuhi kriteria stabilitas yang disyaratkan sesuai dengan SNI 8460:2017 yaitu $FK \geq 1,5$.

3.2. Stabilitas Dasar Galian

3.2.1. Terhadap *Basal Heave*

Stabilitas galian terhadap potensi terjadinya *heave* dihitung menggunakan persamaan (2) dengan data galian ditunjukkan pada Gambar 8. Berdasarkan data tersebut, maka faktor keamanan terhadap *heave* dihasilkan sebagai berikut.

$$FK_{heave} = \frac{5,7 \times C_{ub} \times B1}{(\gamma \times H \times B1) - (C_{uh} \times H)} = \frac{5,7 \times 24 \times 2}{(19,8 \times 9 \times 2) - (20,2 \times 9)} = 1,6 (\geq 1,25)$$

Nilai faktor keamanan yang dihasilkan sebesar 1,6 ($\geq 1,25$). Nilai ini menunjukkan bahwa galian terhadap *heave* sudah memenuhi persyaratan keamanan geoteknik dan berpotensi aman dari instabilitas galian yang akan menimbulkan *heave*.

3.2.2. Terhadap *Blow-in*

Berikut perhitungan stabilitas galian dengan perkuatan *secant pile* terhadap *blow-in* yang dihitung menggunakan persamaan (4) hingga (10).

1. Inersia Tiang (I).

$$I = \frac{t \times D^2}{12} = \frac{0,6 \times 0,6^2}{12} = 0,011 \text{ m}^4$$

2. Momen Maksimum ($M_{\max}$).

$$M_{\max} = \frac{Pa \times L^2}{2} = \frac{223,81 \times 9^2}{12} = 9064 \text{ kNm / m}$$

3. Jarak Sumbu Netral ke Tepi *Pile* (Y_{extreme}).

$$Y_{\text{extreme}} = \frac{t}{2} = \frac{0,6}{2} = 0,3 \text{ m}$$

4. Section Modulus (Z).

$$Z = \frac{Y_{\text{extreme}}}{I} = \frac{0,3}{0,011} = 27,78 \text{ m}^3$$

5. Tahanan Lateral Dinding (R_{dinding}).

$$R_{\text{dinding}} = \frac{M_{\max}}{Z} = \frac{9064}{27,78} = 326,3 \text{ mPa}$$

6. Tekanan Air Lateral (P_{air}).

$$P_{\text{air}} = h_w \times \gamma_w = 3,3 \times 9,807 = 32,37 \text{ kPa}$$

7. Faktor Keamanan (FK).

$$FK_{\text{blow-in}} = \frac{R_{\text{dinding}}}{P_a + P_{\text{air}}} = \frac{326,3}{223,81 + 32,37} = 1,274 (FK \geq 1,25)$$

Nilai faktor keamanan yang dihasilkan yaitu sebesar 1,274 ($\geq 1,25$). Nilai yang diperoleh lebih besar dari kriteria minimum sehingga disimpulkan bahwa stabilitas terhadap *blow-in* termasuk ke dalam kriteria cukup aman terhadap potensi terjadinya *blow-in*.

3.2.3. Terhadap *Piping*

Stabilitas galian terhadap potensi terjadinya *piping* dihitung menggunakan persamaan (12) dengan data galian ditunjukkan pada Gambar 9. Berdasarkan data tersebut, maka faktor keamanan terhadap *piping* dihasilkan sebagai berikut.

$$FK_{\text{piping}} = \frac{\gamma' \times D}{0,36(H_1 - H_2)\gamma_w} = \frac{13,19 \times 2}{0,36(9 - 4,5)9,807} = 1,660 (\geq 1,5)$$

Nilai faktor keamanan yang dihasilkan yaitu 1,660 ($\geq 1,5$). Nilai yang dihasilkan lebih besar dari nilai minimum persyaratan keamanan geoteknik sehingga galian termasuk aman terhadap terjadinya *piping*.

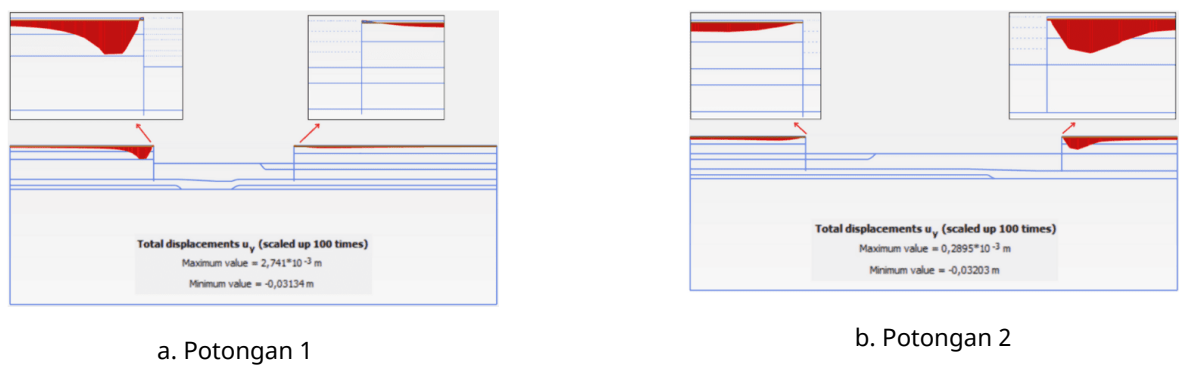
3.3. Deformasi Lateral pada Dinding *Secant Pile*



Gambar 11. Analisis deformasi lateral pada dinding *secant pile*

Hasil kalkulasi deformasi lateral yang terjadi pada dinding *secant pile* ditunjukkan pada Gambar 11. Nilai deformasi yang ditampilkan merupakan nilai defleksi paling kritis dari masing-masing potongan. Pada potongan 1 dihasilkan nilai deformasi aksial sebesar 4,16 cm ($\leq 4,5$ cm) dan pada potongan 2 sebesar 4,22 cm ($\leq 4,5$ cm). Hal ini menunjukkan bahwa deformasi lateral yang terjadi masih dalam batas yang diizinkan (defleksi *maximum* 1,00% H = 4,5 cm) dan dalam kondisi batas aman.

3.4. Deformasi Aksial pada Tanah Area Sekitar Galian



Gambar 12. Analisis deformasi aksial tanah sekitar galian



Gambar 13. Grafik deformasi aksial terhadap kedalaman (potongan 1)



Gambar 14. Grafik deformasi aksial terhadap kedalaman (potongan 2)

Nilai deformasi aksial terhadap tanah di area sekitar galian ditunjukkan pada Gambar 12. Lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar 13 dan Gambar 14. Hasil analisis menghasilkan nilai deformasi aksial untuk potongan 1 dan potongan 2 berturut-turut sebesar 0,03 cm dan 0,27 cm. Nilai ini terbilang masih tergolong kecil dibandingkan dengan kriteria umum batas toleransi deformasi aksial yaitu 25 mm – 50 mm (Terzaghi, Peck and Mesri, 1996). Maka, nilai deformasi aksial dari kedua potongan masing-masing berada dalam rentang aman dan sesuai dengan kriteria geoteknik.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Analisis stabilitas galian dengan perkuatan secant pile menunjukkan faktor keamanan pada potongan 1 dan 2 masing-masing 1,934 dan 1,946, lebih tinggi dari batas minimum >1,5. Stabilitas terhadap heave, blow-in, dan piping juga memenuhi syarat, dengan FK_{heave} 1,6, $FK_{blow-in}$ 1,274 (>1,25), dan FK_{piping} 1,660 (>1,5). Deformasi lateral dinding secant pile masih dalam batas izin (maks. 1,00%H = 4,5 cm), yaitu 4,16 cm (potongan 1) dan 4,22 cm (potongan 2). Deformasi aksial tanah tergolong kecil, masing-masing 0,03 cm dan 0,27 cm. Secara keseluruhan, seluruh parameter stabilitas menyatakan kondisi galian aman dan sesuai persyaratan geoteknik. Penelitian ini memberi pemahaman mengenai respons tanah terhadap stabilitas galian, namun tidak meninjau estimasi biaya, faktor cuaca, dan variasi muka air tanah; sehingga penelitian selanjutnya disarankan membandingkan metode perkuatan lain, memasukkan analisis biaya, serta mengkaji pengaruh hidrologi untuk hasil yang lebih komprehensif.

REFERENSI

- Ameratunga, J., Sivakugan, N. and Das, B.M. (2016) *Developments in Geotechnical Engineering Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering*. Springer. Available at: <https://doi.org/10.1007/978-81-322-2629-1>.
- “Badan Standardisasi Nasional Standar Nasional Indonesia tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik” (2017). Available at: www.bsn.go.id.
- Bowles, J.E. (1988) *Analisis dan Desain Pondasi*. Edisi Keempat. Edited by P. Fernando. Translated by P. Silaban. Jakarta: Erlangga.
- Coduto, D.P. (2001) *Foundation Design Principles and Practice*. Second Edition. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- Das, B.M. and Sobhan, K. (2014) *Principles of Geotechnical Engineering*. Eight Edition, SI. Cengage Learning.
- Gusnadi, Z., Handiman, I., and Sarifah, F. (2023) “Analisa Perbaikan Tanah Lunak Menggunakan Controlled Modulus Columns (CMC) pada Konstruksi Timbunan Jalan.” *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 4(2), pp 11-16.
- Hardiyatmo, H.C. (2003) *Mekanika Tanah II*. 3rd ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.
- Hashash, Y.M.A. and Whittle, A.J. (1996) “Ground Movement Prediction for Deep Excavations in Soft Clay,” *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(6), pp. 474–486. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1996\)122:6\(474\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1996)122:6(474)).
- Putrato, A.R. et al. (2022) “Optimalisasi Tambang Pit C2HU dengan Metode Secant Pile Pada Area Rawa di Site Sambarata, PT Berau Coal,” *Prosiding TPT XXXI Perhapi*, pp. 173–182. Available at: www.prosiding.perapi.or.id (Accessed: February 5, 2025).
- Roejanto, J. and Hardjasaputra, H. (2021) “Analisis Risiko Pelaksanaan Pekerjaan Secant Pile Terhadap Kinerja Biaya pada Proyek Apartemen di Makasar,” *Civil Engineering, Environmental, Disaster & Risk Management Symposium* [Preprint].
- Sivapriya, S. V. et al. (2024) “Analysis of Secant Pile During Underground Excavation – A Numerical Study,” in, p. 040011. Available at: <https://doi.org/10.1063/5.0237144>.
- Terzaghi, Karl., Peck, R.B.. and Mesri, Gholamreza. (1996) *Soil Mechanics in Engineering Practice*. Thrid Edition. Wiley.
- Wang, Y., Cheng, X. and Zheng, G. (2024) “Numerical Analysis Of Soil Deformation In The Excavation With Loose Sand Retained By Inclined Retaining Piles,” *Scientific Reports*, 14(1). Available at: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-83152-6>.
- Wong, K.S. and Goh, A.T.C. (2002) *Geotechnical Aspect of Underground Construction in Soft Ground*. Singapore: Specifique.