

PERENCANAAN SISTEM PENUNJANG UNTUK MENGATASI PENAMBAHAN DEFORMASI DINDING DIAFRAGMA PADA PROYEK GALIAN BASEMEN

Monica Michelle Susanto¹ dan Alfred Jonathan Susilo²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1 Jakarta
monica.325180104@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta
alfred@ft.untar.ac.id

Masuk: 15-09-2022, revisi: 04-10-2022, diterima untuk diterbitkan: 08-10-2022

ABSTRACT

Although has been widely used, cases of diaphragm wall collapse in basemen excavation project still occur sometimes. The collapse of diaphragm wall usually preceded by excessive lateral deformation of the diaphragm wall. This study discussed a case of excessive lateral deformation of the diaphragm wall in a 12 meter deep excavation project. Excessive deformation occurs when the excavation is at -11 meter depth. The amount of deformation occurred is 86.17 mm, while the allowable deformation limit is 84 mm. To prevent the wall from collapsing, excavation support system will be installed with ground anchor and strut as the options. Based on the analysis result, ground anchor can reduce the lateral deformation to 63.32 mm, while struts can reduce the lateral deformation to 67.72 mm. Thus, ground anchor will be recommended as the main option because it generates smaller deformation. However, the length of ground anchor required is very large and shall be installed outside project area so there is a possibility that ground anchor can not be applied. Although struts generates greater deformation than ground anchor, struts is recommended as a backup option that can be used because the struts components are only installed inside the excavation hole.

Keywords: basement; horizontal deformation; diaphragm wall; ground anchor; strut

ABSTRAK

Meskipun telah sering digunakan, kasus kegagalan dinding diafragma pada galian basemen masih kerap terjadi. Keruntuhan dinding diafragma biasanya diawali dengan penambahan deformasi lateral yang berlebihan hingga dinding akhirnya runtuh. Penelitian ini membahas salah satu kasus deformasi berlebihan dinding diafragma pada suatu poyek galian sedalam 12 meter. Deformasi berlebihan terjadi ketika galian mencapai elevasi -11 meter. Deformasi yang terjadi adalah 86.17 mm sementara batas defleksi yang diizinkan adalah 84 mm. Untuk mencegah keruntuhan dinding, perbaikan akan dilakukan dengan menambahkan sistem penunjang (*support system*). Opsi sistem penunjang yang akan dipasang berupa *ground anchor* dan *struts*. Berdasarkan hasil analisis, *ground anchor* dapat mengurangi deformasi dinding menjadi 63.32 mm, sedangkan *struts* dapat mengurangi deformasi dinding menjadi 67.72 mm. Dengan demikian, *ground anchor* menjadi opsi utama yang direkomendasikan karena menghasilkan deformasi yang paling kecil. Akan tetapi, panjang komponen *ground anchor* yang diperlukan cukup besar hingga harus dipasang di luar lahan milik proyek. Akibatnya, terdapat kemungkinan *ground anchor* tidak dapat dipasang dan harus diambil opsi lain untuk mengantisipasi hal tersebut. Meskipun deformasi yang dihasilkan *struts* lebih besar dibandingkan *ground anchor*, komponen *struts* hanya dipasang di dalam lahan proyek. Dengan demikian, *struts* direkomendasikan sebagai opsi cadangan untuk digunakan apabila *ground anchor* tidak dapat diterapkan pada proyek.

Kata kunci: basemen; deformasi horizontal; dinding diafragma; *ground anchor*; *strut*

1. PENDAHULUAN

Semakin terbatasnya jumlah lahan yang tersedia ditambah dengan harga lahan yang semakin mahal di kota-kota besar membuat para pengembang kini semakin dituntut untuk memaksimalkan penggunaan lahan yang ada. Salah satu solusi yang seringkali diambil adalah dengan membuat basemen dengan jumlah lantai yang banyak. Semakin banyak jumlah lantai, galian yang harus dibuat juga akan semakin dalam sehingga diperlukan dinding penahan tanah untuk menjaga stabilitas lereng galian agar tidak longsor. Salah satu jenis dinding penahan tanah yang banyak digunakan saat ini adalah dinding diafragma.

Pembangunan dinding diafragma memerlukan perencanaan dan pelaksanaan lapangan yang memadai karena memiliki risiko yang besar apabila terjadi kegagalan. Karena terdapat perbedaan tekanan pada kedua sisi, maka dinding

diafragma akan mengalami deformasi ke arah lubang galian. Deformasi tersebut dapat terus bertambah hingga melebihi kriteria batas defleksi yang diizinkan. Deformasi yang berlebihan ini dapat menjadi awal mula terjadinya keruntuhan galian, seperti pada kasus keruntuhan galian pada proyek Nicoll Highway di Singapura. Perencanaan desain yang kurang optimal, ditambah dengan manajemen lapangan yang buruk menjadi penyebab terjadinya kasus tersebut. Beberapa peringatan akan potensi kegagalan sebenarnya telah diberikan sebelum keruntuhan benar-benar terjadi, tetapi justru tidak dianggap serius atau bahkan diabaikan (Puzrin, Alonso, & Pinyol, 2010). Padahal, risiko kerusakan yang terjadi sebenarnya dapat dicegah atau setidaknya tidak terlalu parah apabila tindakan penanganan diambil segera setelah peringatan awal muncul.

Deformasi berlebihan pada dinding diafragma dapat menjadi indikasi bahwa tekanan tanah yang dialami sudah melebihi kapasitas dinding. Tindakan penanganan seharusnya diambil dan dilaksanakan secara cepat untuk mengatasi penambahan deformasi yang terjadi. Meskipun demikian, penerapan di lapangan justru seringkali menunjukkan hal yang berbeda. Tindakan penanganan biasanya baru diambil setelah dinding mengalami retak atau bahkan runtuh sepenuhnya. Padahal, keruntuhan galian sebenarnya dapat dicegah sedini mungkin ketika deformasi berlebihan mulai terdeteksi pada dinding diafragma.

Penelitian ini akan membahas salah satu kasus deformasi berlebihan dinding diafragma pada proyek galian basemen sedalam 12 meter. Upaya perbaikan akan direncanakan dan dianalisis untuk mengatasi penambahan deformasi lateral dinding diafragma yang terjadi. Metode perbaikan dilakukan dengan cara menambahkan sistem penunjang galian. Opsi sistem penunjang galian yang dianalisis terdiri dari *ground anchor* dan *strut*. Kedua opsi tersebut selanjutnya akan dianalisis efektivitasnya dalam mengatasi penambahan deformasi horizontal dinding diafragma serta efisiensi metode pelaksanaannya sehingga diperoleh rekomendasi desain sistem penunjang galian terbaik untuk diterapkan pada proyek. Dengan demikian, keruntuhan dinding dapat dicegah dan risiko kerugian nyawa maupun material yang besar dapat dihindari.

Dinding Diafragma

Pekerjaan pembuatan dinding diafragma dilakukan sebelum pekerjaan penggalian dan diawali dengan pengecoran *guide wall*. Selanjutnya, dilakukan pengeboran dengan lumpur *bentonite* menggunakan *clamshell bucket* khusus untuk membuat panel dengan dimensi yang direncanakan. Setelah panel selesai dibuat, rangka pembesian tiga dimensi akan dimasukkan ke dalam galian dan beton kemudian dicor ke dalam tulangan menggunakan metode *tremie* (Puzrin, Alonso, & Pinyol, 2010).

Berdasarkan SNI 8460:2017, toleransi defleksi dinding penahan tanah sangat bergantung pada kepadatan lingkungan sekitar. Jika lingkungan sekitar tidak mensyaratkan defleksi maksimum yang ketat, defleksi maksimum 0,5% H harus dianggap sebagai batas toleransi defleksi dinding.

Tabel 1. Batas Maksimum Deformasi Lateral Dinding (Badan Standardisasi Nasional, 2017)

Batas maksimum deformasi lateral pada dinding	Lokasi gedung dan infrastruktur eksisting terdekat			
	Zona 3 (x/H > 2)		Tanah Tipe A	Tanah Tipe B
Keterangan: x = jarak dari batas galian, H = Kedalaman galian, δ_w = Defleksi dinding	Zona 1 (x/H < 1)	Zona 2 (1 ≤ x/H ≤ 2)		
Batas izin maksimum deformasi (δ_w/H)	0,5%	0,7%	0,7%	1,0%

Tekanan Tanah Lateral Aktif

Tekanan tanah aktif merupakan tekanan yang menyebabkan dinding penahan tanah terdorong menjauh dari tanah. Rankine mengembangkan persamaan untuk menghitung tekanan tanah aktif dengan mengasumsikan gesekan dinding dengan tanah (δ) = 0. Rumus tekanan tanah aktif menurut Rankine dapat diperoleh dengan Persamaan 1 (Das, 2011).

$$\sigma'_a = \sigma'_v K_a - 2c' \sqrt{K_a} \quad (1)$$

Dengan σ'_a = tekanan tanah aktif (kN/m²), σ'_v = tegangan vertikal efektif *overburden* (kN/m²), K_a = koefisien tekanan tanah aktif, dan c' = kohesi (kN/m²).

Besarnya koefisien tekanan tanah aktif menurut Rankine dapat dihitung dengan Persamaan 2.

$$K_a = \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\phi'}{2} \right) \quad (2)$$

Dengan K_a = koefisien tekanan tanah aktif dan ϕ' = sudut geser dalam ($^\circ$).

Tekanan Tanah Lateral Pasif

Tekanan tanah aktif merupakan tekanan yang bekerja ketika dinding penahan tanah terdorong ke arah tanah yang tertahan. Menurut Rankine (1857) tekanan tanah pasif dapat dihitung dengan persamaan 3 (Das, 2011).

$$\sigma'_p = \sigma'_v K_p + 2c' \sqrt{K_p} \quad (3)$$

Dengan σ'_p = tekanan tanah pasif (kN/m²), σ'_v = tegangan vertikal efektif *overburden* (kN/m²), K_p = koefisien tekanan tanah aktif, dan c' = kohesi (kN/m²).

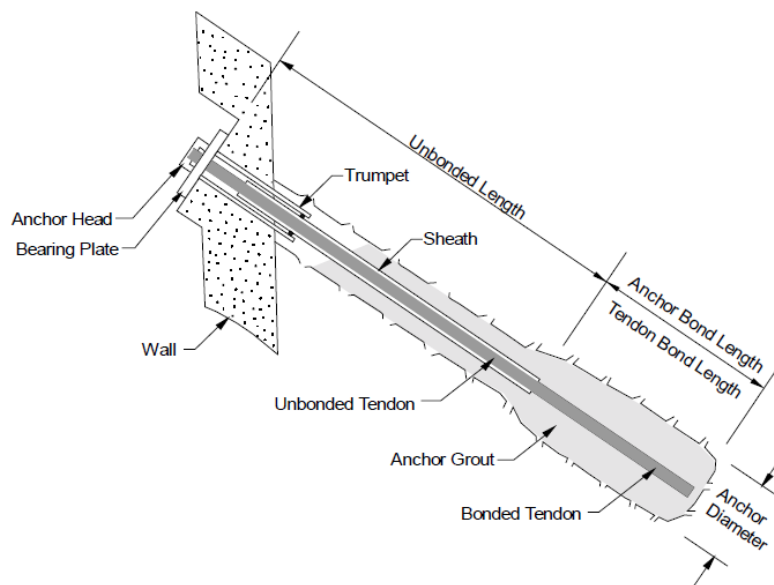
Besarnya koefisien tekanan tanah aktif menurut Rankine dapat dihitung dengan Persamaan 2.

$$K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) \quad (4)$$

Dengan K_a = koefisien tekanan tanah aktif dan ϕ' = sudut geser dalam ($^\circ$).

Ground Anchor

Komponen utama *ground anchor* terdiri dari *unbonded length* dan *bond length*. *Unbonded length* atau *free length* merupakan bagian tendon yang dapat memanjang secara elastis dan menyalurkan gaya tarik menuju bagian *bond length*. *Free length* biasanya dibungkus dengan pipa plastik untuk mencegah bagian ini tercampur dengan material *grouting* pada *bond length* atau tanah. *Bond length* atau *fixed length* adalah bagian tendon yang terjauh dari struktur dimana gaya tarik dari *free length* akan disalurkan ke tanah di sekitar jangkar. Bagian ini terbuat dari baja berkekuatan tinggi (*bar, strand, atau wire*) dan dikelilingi dengan *grouting* semen.



Gambar 1. Komponen *Ground Anchor* (Federal Highway Administration, 1999)

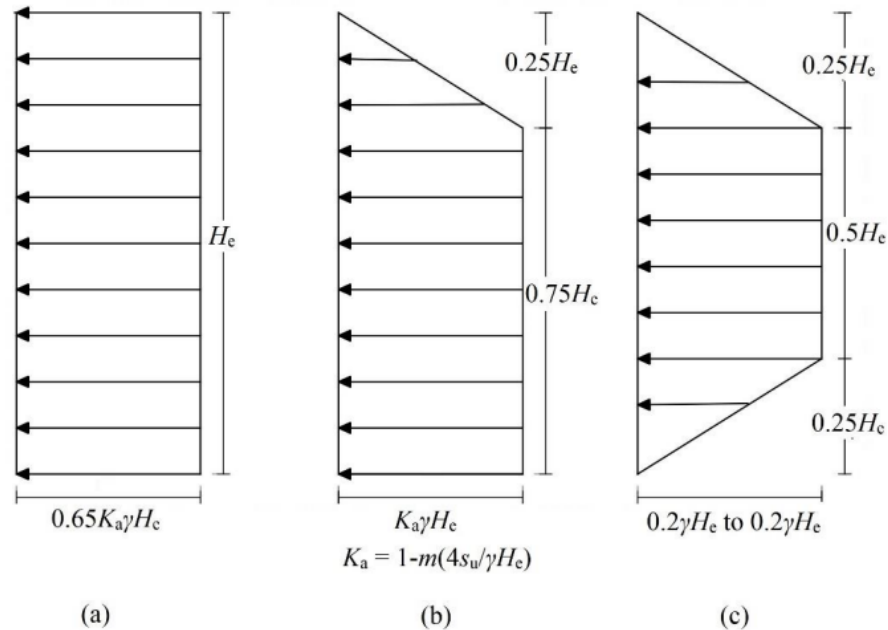
Panjang minimum *free length* pada angkur adalah 4,5 m untuk tipe *wire* dan 3 m untuk tipe tendon. *Free length* sebaiknya didesain sampai H/5 atau 1,5 m (digunakan nilai tertinggi) di belakang garis potensi kegagalan kritis untuk mengakomodasi transfer beban minor ke kolom beton di atas angkur (Federal Highway Administration, 1999). Panjang *fixed length* yang terbenam pada tanah kohesif dapat dihitung menggunakan persamaan 5 (British Standards Institution, 1989).

$$L = \frac{T_{all} \times SF}{\pi \times d \times \alpha \times S_u} \quad (5)$$

Dengan L = panjang *fixed length* (m), T_{all} = gaya tarik desain angkur (kN), SF = faktor keamanan, d = diameter *grouting* (m), α = faktor adhesi, dan S_u = kuat geser tak terdrainase tanah rata-rata sepanjang *fixed length* (kN/m²).

Strut

Strut biasanya menggunakan pipa atau baja profil I atau H yang dipramuat (*preloaded*) untuk memberikan sistem yang sangat kaku. Perhitungan gaya *strut* dapat menggunakan diagram tekanan semu (*apparent pressure diagram*) yang diusulkan oleh Peck (1969).



Gambar 2. Diagram tekanan *apparent* Peck: (a) tanah pasir, (b) lempung lunak sampai *medium soft*, (c) lempung kaku (Bahrami, 2019)

Perilaku *strut* umumnya dievaluasi berdasarkan gaya tekan aksial dan gaya lentur. Tegangan tekan aksial (f_a) dapat dihitung dengan persamaan 6, sedangkan tegangan lentur (f_b) dihitung dengan persamaan 7 (Ou, 2006).

$$f_a = \frac{N_1 + N_2}{A} \quad (6)$$

$$f_b = \frac{M}{S} \quad (7)$$

Dengan N_1 = gaya *strut* akibat penggalian (kN), N_2 = gaya *strut* akibat perubahan suhu (kN), A = luas penampang *strut* (m^2), M = momen lentur akibat *strut*, dan S = modulus penampang *strut* (m^3).

Tegangan aksial yang terjadi harus memenuhi syarat izin (F_a) berdasarkan persamaan 8 atau 9, sedangkan tegangan lentur yang terjadi harus memenuhi tegangan izin (F_b) yang dihitung dengan persamaan 11 (Ou, 2006).

$$\frac{KL}{r_x} \leq C_c \quad F_a = \frac{[1 - \frac{1}{2}((KL/r_x)/C_c)]F_y}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8}[(KL/r_x)/C_c] - \frac{1}{8}[(KL/r_x)/C_c]^3} \quad (8)$$

$$\frac{KL}{r_x} < C_c \quad F_a = \frac{12\pi^2 E}{23(KL/r_x)^2} \quad (9)$$

$$C_c = \sqrt{2\pi^2 E/F_y} \quad (10)$$

$$F_b = 0,6F_y \quad (11)$$

Dengan K = faktor panjang efektif, L = lebar galian (m), r_x = radius girasi penampang pada sumbu lemah (m), C_c = rasio kelangsingan kritis, E = modulus Young *strut* (kPa), dan F_y = tegangan leleh *strut* (kPa).

Kombinasi antara tegangan lentur dan tegangan aksial yang terjadi juga harus memenuhi persamaan 12 dan 13.

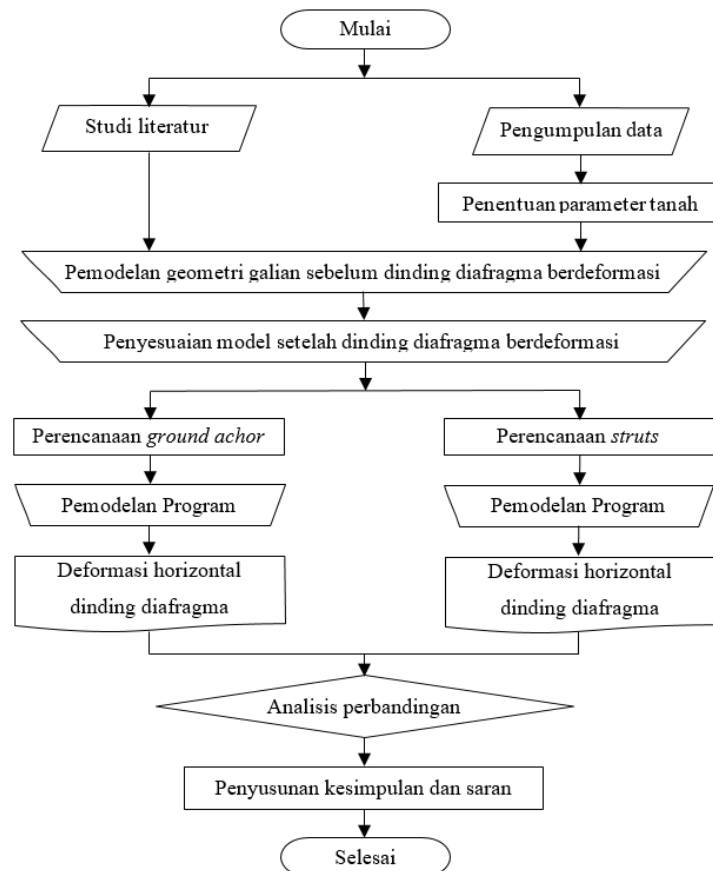
$$\frac{f_a}{F_a} \leq 15\% \quad \frac{f_a}{F_a} + \frac{f_b}{F_b} \leq 1.0 \quad (12)$$

$$\frac{f_a}{F_a} > 15\% \quad \frac{f_a}{F_a} + \frac{C_m f_b}{(1 - f_a/F'_e)F_b} \leq 1.0 \quad (13)$$

2. METODE PENELITIAN

Secara garis besar, alur penelitian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3. Uraian dari diagram alir tersebut adalah sebagai berikut:

- Penelitian dimulai dengan pengumpulan referensi terkait topik penelitian dari berbagai sumber literatur.
- Kemudian dilakukan pengumpulan data penelitian berupa data tanah dan data proyek galian basemen yang akan diteliti.
- Data tanah yang telah diperoleh selanjutnya akan diolah untuk mendapatkan parameter tanah pada lokasi proyek yang diteliti.
- Selanjutnya, akan dilakukan pemodelan dan analisis deformasi galian awal sebelum penambahan sistem penunjang galian pada program elemen hingga.
- Hasil deformasi dinding diafragma selanjutnya akan diverifikasi kesesuaiannya dengan kondisi eksisting yang terjadi di lapangan.
- Setelah model pada program sesuai dengan kondisi eksisting di lapangan, berikutnya akan dilakukan perencanaan desain awal, permodelan, serta analisis deformasi *ground anchor* dan *strut*.
- Tahap selanjutnya adalah membandingkan *ground anchor* dan *strut* dari segi efektivitasnya dalam mengatasi deformasi lateral dinding diafragma serta efisiensi desain dan metode pelaksanaannya untuk mendapatkan rekomendasi opsi sistem penunjang galian yang dapat diterapkan.
- Setelah diperoleh rekomendasi sistem penunjang galian yang dapat diterapkan, selanjutnya akan disusun beberapa kesimpulan dan saran untuk penelitian yang akan datang.



Gambar 3. Diagram Alir Penelitian

Penentuan Parameter Tanah

Parameter tanah ditentukan berdasarkan data pengujian lapangan serta data pengujian laboratorium dari lokasi proyek yang dianalisis. Data pengujian lapangan mencakup data *boring log* sebanyak 8 titik dan data uji sondir sebanyak 4 titik sedangkan pengujian laboratorium dilakukan terhadap 32 sampel tanah dari 8 titik bor. Apabila parameter tanah yang tersedia dari hasil pengujian laboratorium kurang mencukupi, maka nilai parameter tanah diambil dari hasil korelasi nilai tipikal maupun rumus empirik berdasarkan hasil pengujian lapangan. Seluruh nilai parameter tanah yang diperoleh dari data laboratorium maupun pengujian lapangan selanjutnya di-plot ke grafik untuk mendapatkan nilai rata-rata parameter tanah yang akan digunakan untuk analisis.

Tabel 2. Rekapitulasi Parameter Tanah untuk Analisis

Lapisan	Elevasi		Jenis Tanah	Konsistensi	γ_{wet} (kN/m ³)	γ_{sat} (kN/m ³)	e_0	S_u (kPa)	E (kPa)	c' (kPa)
	Lapisan Atas	Lapisan Bawah								
1	0	12	Silt	Stiff	16	17	0,9	100	30	19
2	12	28	Clay	Very soft	15	16	1,6	30	10	10
3	28	38	Clay	Stiff	16	17	1,2	120	40	42
4	38	50	Clay	Very stiff	16	16	1,4	120	50	25
5	50	56	Clay	Very stiff	16	17	1,2	200	60	30
6	56	70	Clay	Very stiff	16	17	1,1	150	45	27

Tabel 2. Rekapitulasi Parameter Tanah untuk Analisis (lanjutan)

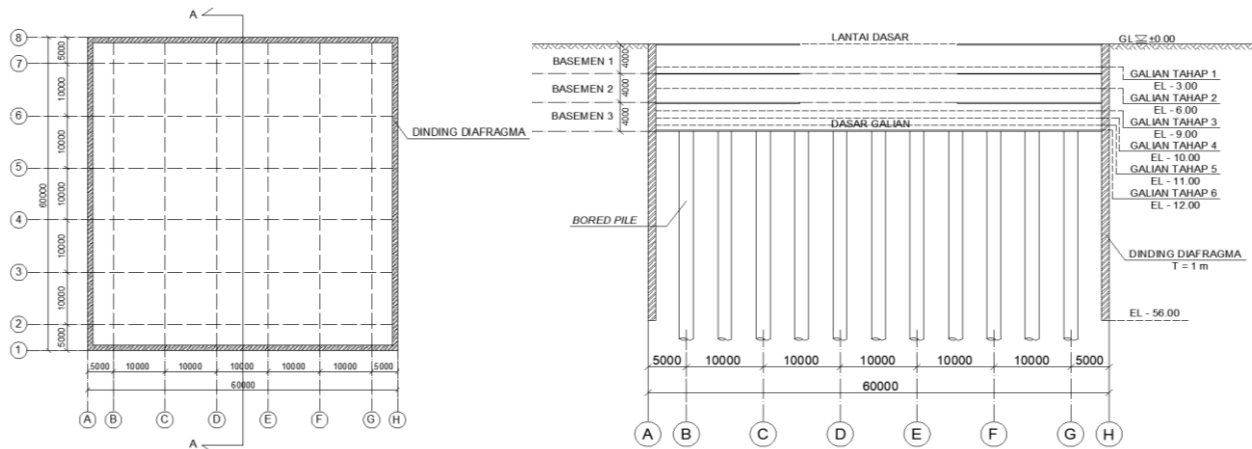
Lapisan	Elevasi		Jenis Tanah	Konsistensi	ϕ (°)	Ψ (°)	k (m/hari)	OCR	Poisson's Ratio
	Lapisan Atas	Lapisan Bawah							
1	0	12	Silt	Stiff	20	0	$8,64 \times 10^{-5}$	2	0,3
2	12	28	Clay	Very soft	10	0	$8,64 \times 10^{-7}$	0,5	0,4
3	28	38	Clay	Stiff	6	0	$8,64 \times 10^{-7}$	1	0,3
4	38	50	Clay	Very stiff	11	0	$8,64 \times 10^{-7}$	1	0,25
5	50	56	Clay	Very stiff	15	0	$8,64 \times 10^{-7}$	1	0,3
6	56	70	Clay	Very stiff	13	0	$8,64 \times 10^{-7}$	1	0,25

Pengumpulan Data Proyek

Proyek yang dianalisis berlokasi di kawasan Jakarta. Basemen yang dianalisis berbentuk persegi berukuran 60 m × 60 m dan terdiri dari 3 lantai dengan jarak antar lantai 4 meter. Dinding diafragma direncanakan memiliki tebal 1 meter dan panjang 56 meter. Beban yang digunakan dalam analisis terdiri dari beban alat berat sepanjang 15 m dari tepi galian, serta beban kendaraan sepanjang 8 m pada jarak 15 m dari tepi galian. Elevasi permukaan lubang galian berada pada ±0.00 m sedangkan elevasi dasar galian berada pada -12.00 m. Penggalian tanah awalnya direncanakan setiap 3 meter. Karena deformasi yang terjadi terus bertambah, maka ketika galian mencapai elevasi -9.00 m, rencana penggalian diubah menjadi setiap 1 meter hingga mencapai elevasi -12.00 m. Tahapan konstruksi yang direncanakan adalah sebagai berikut:

- Tahap 1: Pembersihan lahan dan mobilisasi alat berat.
- Tahap 2: Instalasi dinding diafragma
- Tahap 3: *Dewatering* hingga muka air tanah berada pada -4.00 m.
- Tahap 4: Galian tanah tahap pertama hingga elevasi -3.00 m.
- Tahap 5: *Dewatering* hingga muka air tanah berada pada -7.00 m.
- Tahap 6: Galian tanah tahap kedua hingga elevasi -6.00 m.
- Tahap 7: *Dewatering* hingga muka air tanah berada pada -10.00 m.
- Tahap 8: Galian tanah tahap ketiga hingga elevasi -9.00 m.
- Tahap 9: *Dewatering* hingga muka air tanah berada pada -13.00 m.
- Tahap 10: Galian tanah tahap keempat hingga elevasi -10.00 m.

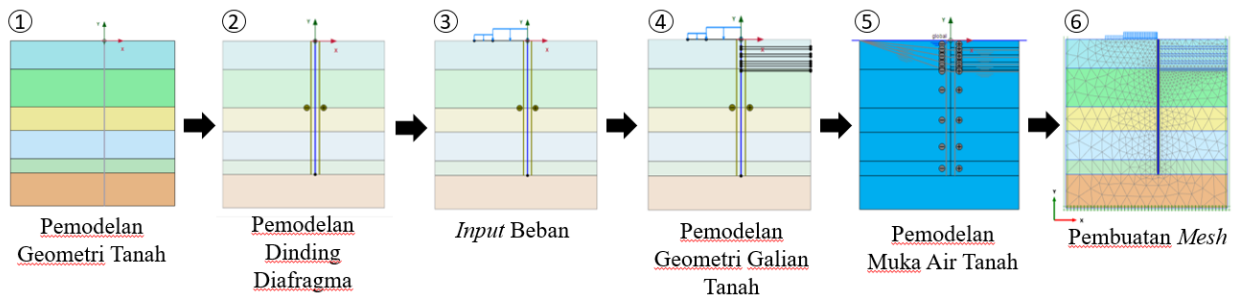
- Tahap 11: Galian tanah tahap keempat hingga elevasi -11.00 m.
- Tahap 12: Galian tanah tahap keempat hingga elevasi -12.00 m.



Gambar 4. Desain rencana penampang basemen

Pemodelan Geometri Galian Awal

Permodelan dengan program elemen hingga dilakukan untuk mensimulasikan penambahan deformasi dinding diafragma yang terjadi serta memverifikasi data pengamatan di lapangan. Permodelan juga dilakukan untuk analisis lebih lanjut dengan menambahkan sistem penunjang galian.



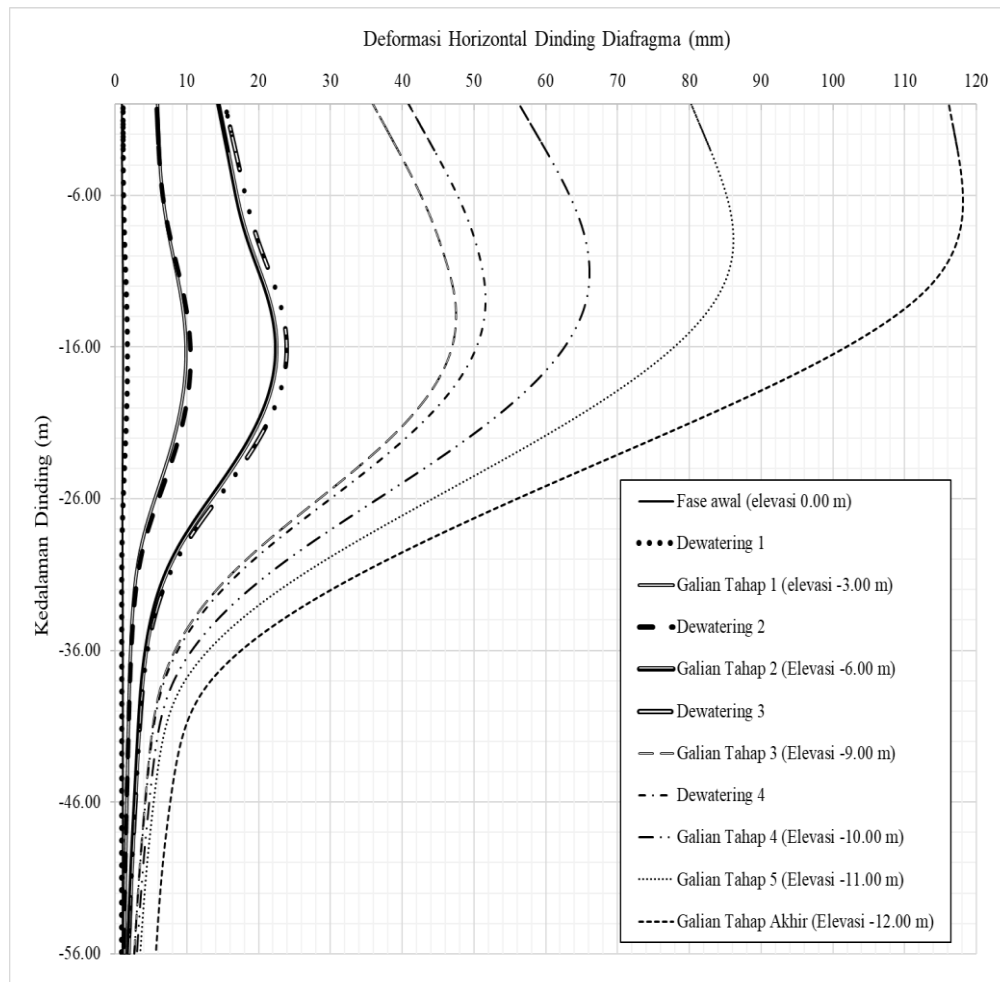
Gambar 5 Langkah Pemodelan Geometri Galian pada program Elemen Hingga

Analisis Deformasi Dinding Diafragma Sebelum Penambahan Sistem Penunjang Galian

Sesuai kriteria dalam SNI 8460:2017, batas maksimum deformasi lateral dinding diafragma pada proyek yang dianalisis adalah 84 mm. Berdasarkan data pengamatan di lapangan, deformasi dinding telah melebihi batas ketika penggalian tanah baru mencapai elevasi -11.00 meter sehingga proyek dihentikan sementara. Dari hasil analisis menggunakan bantuan program elemen hingga, diperoleh deformasi maksimum yang terjadi adalah 86,17 mm. Untuk mengatasi deformasi berlebihan tersebut, maka akan dilakukan penambahan sistem penunjang galian agar dinding tidak mengalami keruntuhan. Deformasi maksimum dinding diafragma dari hasil analisis pada masing-masing tahapan konstruksi (*construction stage*) yang dimodelkan dijelaskan pada Tabel 3.

Tabel 3. Deformasi maksimum dinding pada masing-masing fase *construction stage* dari hasil analisis program

Fase	Construction Stage	Keterangan	Deformasi Maksimum Dinding Diafragma (mm)
1	Initial Phase	Fase awal galian	0
2	Load & D-wall	Mobilisasi alat berat dan instalasi dinding diafragma	1,123
3	Dewatering 1	Dewatering muka air tanah hingga elevasi -4.00 m	1,725
4	First Excavation	Galian tanah hingga elevasi -3.00 m	9,885
5	Dewatering 2	Dewatering muka air tanah hingga elevasi -7.00 m	10,49
6	Second Excavation	Galian tanah hingga elevasi -6.00 m	22,44
7	Dewatering 3	Dewatering muka air tanah hingga elevasi -10.00 m	23,89
8	Third Excavation	Galian tanah hingga elevasi -9.00 m	47,48
9	Dewatering 4	Dewatering muka air tanah hingga elevasi -13.00 m	51,58
10	Fourth Excavation	Galian tanah hingga elevasi -10.00 m	66,11
11	Fifth Excavation	Galian tanah hingga elevasi -11.00 m	86,17
12	Final Excavation	Galian tanah hingga elevasi -12.00 m	118,1



Gambar 6. Grafik kronologi penambahan deformasi horizontal dinding diafragma

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Desain *Ground Anchor*

Sebanyak 4 buah *Ground anchor* akan dipasang pada kemiringan 30° dengan spasi vertikal 3 meter serta spasi horizontal 2 meter. Kedalaman *ground anchor* baris pertama berada pada elevasi -2.00 meter dari permukaan tanah.

Desain penampang *ground anchor* meliputi perhitungan panjang komponen *free length* dan perhitungan panjang komponen *fixed length*.

Penentuan panjang *free length* ditentukan sesuai dengan kedalaman komponen *fixed length* agar komponen *fixed length* dapat tenggelam dalam lapisan tanah keras. Pada tanah kohesif, komponen *fixed length* harus dibenamkan pada lapisan tanah dengan N-SPT ≥ 25 . Pada analisis ini, lapisan tanah keras dengan N-SPT = 28 berada pada kedalaman 38 meter dari permukaan tanah. Dengan demikian, panjang *free length* yang diperlukan adalah:

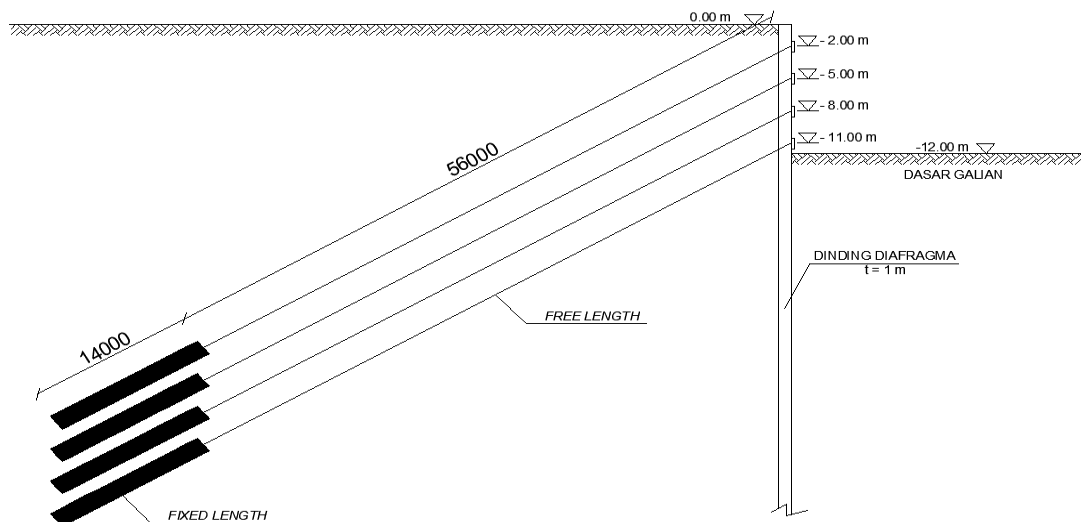
$$\begin{aligned} L_{free\ length} &= \frac{28}{\sin 30^\circ} \\ &= 56\ m \end{aligned}$$

Fixed length direncanakan terbuat dari *strand* diameter 15,24 mm dengan kuat tarik 260,7 kN per *strand*. Tegangan tarik *ultimate ground anchor* yang terjadi adalah 799,0781 kN. Maka jumlah *strand* yang diperlukan adalah:

$$\begin{aligned} n_{strand} &= \frac{T_{ult}}{T_{strand}} \\ &= \frac{799,0781}{260,7} = 3,065 \approx 4\ \text{buah} \end{aligned}$$

Diameter *fixed length* yang direncanakan adalah 0.35 meter. Angkur pada analisis ini didesain untuk umur layan di bawah 6 bulan sehingga faktor keamanan yang digunakan adalah 2. Besarnya momen desain yang diperlukan diasumsikan terdistribusi merata pada keempat *ground anchor* sehingga besarnya gaya tarik pada keempat *ground anchor* bernilai sama. Berdasarkan perhitungan tekanan tanah lateral menggunakan Teori Rankine, diperoleh besarnya gaya tarik desain angkur (T_{all}) sebesar 399,539 kN.

$$\begin{aligned} L_{fixed\ length} &= \frac{T_{all} \times SF}{\pi \times d \times \alpha \times S_u} \\ &= \frac{399,539 \times 2}{\pi \times 0,35 \times 0,42 \times 120} = 13,4579\ m \approx 14\ m \end{aligned}$$



Gambar 7. Desain layout pemasangan *ground anchor*

Gaya prategang sebesar 75% sampai 100% gaya angkur hasil analisis harus diberikan pada saat pemasangan agar tidak terjadi defleksi yang berlebihan. Pada analisis ini, gaya *ultimate* angkur yang terjadi adalah 799,0781 kN sehingga gaya prategang yang harus diberikan adalah:

$$\begin{aligned} F_{prestress} &= 75\% \times T_{ult} \\ &= \frac{75}{100} \times 799,0781 = 599,3086\ kN \approx 600\ kN \end{aligned}$$

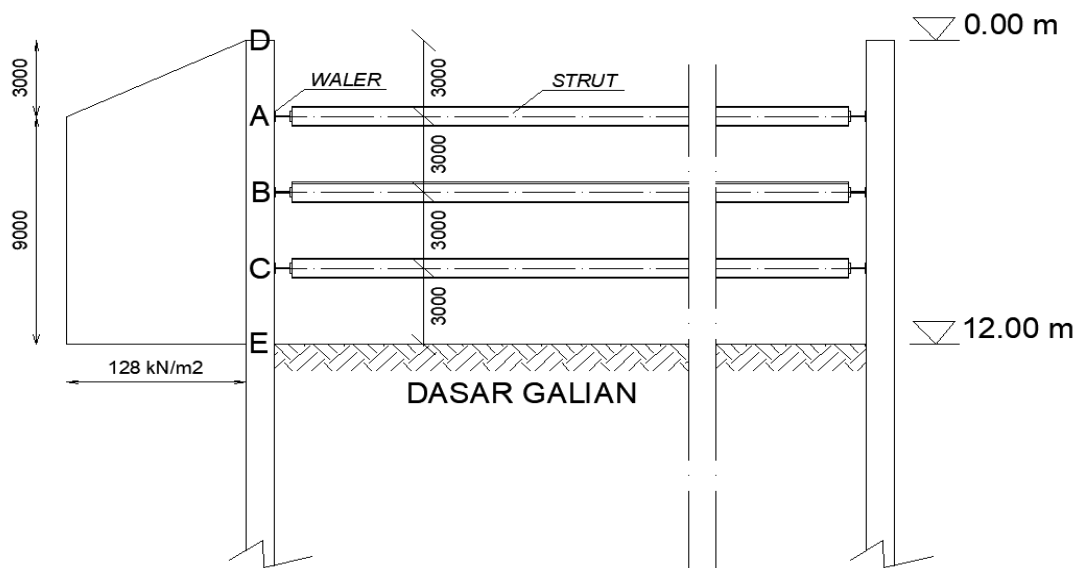
Desain Struts

Sebanyak 3 buah *strut* akan dipasang pada lubang galian dengan spasi vertikal 3 meter dan spasi horizontal 3 meter. Elevasi *strut* level pertama berada pada -3.00 m dari permukaan galian.

Gaya *strut* untuk desain penampang diambil dari gaya *strut* terbesar yang dihitung dengan menggunakan diagram tekanan tanah *apparent*. Penentuan gaya *strut* akibat penggalian tanah dilakukan dengan mengasumsikan bahwa *strut* memiliki perletakan sendi pada titik B serta perletakan rol pada titik A dan titik C pada Gambar 8. Gaya *strut* akibat perubahan temperatur (N_2) pada analisis ini diasumsikan sebesar 15 ton atau 147,15 kN (JSA, 1988). Total gaya *strut* yang digunakan merupakan penjumlahan dari gaya *strut* akibat penggalian tanah (N_1) dan gaya *strut* akibat perubahan temperatur (N_2).

$$N = N_1 + N_2$$

$$= 2304 + 147,15 = 2451,15 \text{ kN}$$



Gambar 8. Konfigurasi desain pemasangan *struts* (tampak samping)

Desain *strut* meliputi desain komponen *strut* serta komponen *waler*. *Strut* yang akan digunakan pada proyek direncanakan terbuat dari baja profil WF dengan ukuran 920 × 345 mm. Spesifikasi profil baja yang digunakan adalah:

- Luas penampang (A) = 44000 mm² = 0,044 m²
- Momen inersia (I_x) = 6243 × 10⁶ mm⁴ = 6,243 × 10⁻³ m⁴
- Radius girasi (r_x) = $\sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{6,243 \times 10^{-3}}{0,044}} = 0,3767 \text{ m}$
- Modulus penampang (S_x) = 13527 × 10³ mm³ = 0,0133 m³
- Modulus Elastisitas (E) = 2 × 10⁸ kPa
- Tegangan leleh (F_y) = 250 MPa = 2,5 × 10⁵ kPa

Penampang *strut* awal yang telah ditentukan harus dicek terlebih dahulu tegangannya apakah memenuhi tegangan izin yang disyaratkan oleh AISC. *Strut* menerima gaya aksial tekan dan momen secara bersamaan selama proses penggalian sehingga harus dicek kapasitasnya terhadap kedua gaya tersebut.

- Pengecekan tegangan aksial izin ($f_a < F_a$)

$$\text{Cek rasio kelangsingan } strut \rightarrow \lambda = \frac{KL}{r} = \frac{(1)(30)}{0,3767} = 79,6436$$

$$\text{Cek rasio kelangsingan kritis} \rightarrow C_c = \sqrt{2\pi^2(2 \times 10^8)/(2,5 \times 10^5)} = 125,663$$

$\lambda < C_c$, maka digunakan Persamaan (8)

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{79,6436}{125,663}\right)\right] (2,5 \times 10^5)}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left[\frac{79,6436}{125,663}\right] - \frac{1}{8} \left[\frac{79,6436}{125,663}\right]^3} = 91,2021 \text{ MPa}$$

$$N = 2451,15 \text{ kN}$$

$$A = 0,044 \text{ m}^2$$

$$f_a = \frac{N}{A} = \frac{2451,15}{0,044} \times 10^{-3} = 55,708 \text{ MPa} < F_a = 91,2021 \text{ MPa (OK)}$$

- Pengecekan tegangan lentur izin ($f_b < F_b$)

$$F_b = 0,6(2,5 \times 10^5) = 150 \text{ MPa}$$

$$w = 0,5 \text{ ton/m} = 4,905 \text{ kN/m}$$

$$M = \frac{wL^2}{8} = \frac{(4,905)(30^2)}{8} = 551,8125 \text{ kNm}$$

$$f_b = \frac{M}{S_x} = \frac{551,8125}{0,0133} \times 10^{-3} = 41,6242 \text{ MPa} < F_b = 150 \text{ MPa (OK)}$$

- Pengecekan tegangan kombinasi pada penampang

Cek $f_a/F_a = 55,708/91,2021 = 61,0819\% > 15\%$, maka digunakan Persamaan (13)

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{1,95 \times 10^{-4}}{0,044}} = 0,0666 \text{ m}$$

$$F_e = \frac{12\pi^2(2 \times 10^8)}{23 \left(\frac{1(30)}{0,0666}\right)^2} = 5,0713 \text{ MPa}$$

$$0,8963 + \frac{0,85(41,6242)}{\left(1 - \frac{55,708}{5,0713}\right) 150} = 0,5872 < 1 \text{ (OK)}$$

Karena penampang *strut* awal yang dipilih memenuhi tegangan aksial, lentur, maupun kombinasi yang disyaratkan oleh AISC, maka *strut* pada proyek yang dianalisis akan dibuat menggunakan profil WF 920 × 345 mm.

Waler diasumsikan disematkan pada *strut* sehingga tekanan tanah yang bekerja pada *waler* dihitung dari gaya *strut*. Beban dari *strut* didistribusikan sepanjang bentang spasi horizontal antar *strut* (3 meter) sehingga beban yang bekerja pada *waler* (p) dihitung sebagai:

$$p = \frac{1536}{3} = 768 \text{ kN/m}$$

Momen maksimum *waler* dapat dihitung dengan asumsi bahwa sambungan *waler* diletakkan pada jarak $\frac{1}{4}$ panjang bentang diukur dari perletakan.

$$M_{maks} = \frac{1}{10} pL^2 = \frac{1}{10} (768)(3^2) = 691,2 \text{ kNm}$$

Elemen *waler* direncanakan terbuat dari baja profil WF seri W690 dari Nucor-Yamato Steel dengan ukuran 690 × 289 mm. Spesifikasi profil baja yang digunakan adalah:

- Luas penampang (A) = 36800 mm² = 0,0368 m²
- Momen inersia (I_x) = 3272 × 10⁶ mm⁴ = 3,272 × 10⁻³ m⁴
- Radius girasi (r_x) = $\sqrt{\frac{I_x}{A}} = \sqrt{\frac{3,272 \times 10^{-3}}{0,0368}} = 0,2982 \text{ m}$
- Modulus penampang (S_x) = 9160 × 10³ mm³ = 0,0092 m³

- Modulus Elastisitas (E) = 2×10^8 kPa
- Tegangan leleh (F_y) = 250 MPa = $2,5 \times 10^5$ kPa

Penampang *waler* awal yang telah ditentukan selanjutnya dicek tegangan aksial dan lenturnya sesuai dengan kriteria pada AISC.

- Pengecekan tegangan aksial izin ($f_a < F_a$)

$$\text{Cek rasio kelangsingan } strut \rightarrow \lambda = \frac{KL}{r} = \frac{(1)(3)}{0,2982} = 10,0609$$

$$\text{Cek rasio kelangsingan kritis} \rightarrow C_c = \sqrt{2\pi^2(2 \times 10^8)/(2,5 \times 10^5)} = 125,664$$

$\lambda < C_c$, maka digunakan Persamaan (8)

$$F_a = \frac{\left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{10,0609}{125,6637}\right)\right] (2,5 \times 10^5)}{\frac{5}{3} + \frac{3}{8} \left[\frac{10,0609}{125,6637}\right] - \frac{1}{8} \left[\frac{10,0609}{125,6637}\right]^3} = 141,4526 \text{ MPa}$$

$$f_a = \frac{N}{A} = \frac{576}{0,0368} \times 10^{-3} = 15,6522 \text{ MPa} < F_a = 141,4526 \text{ MPa (OK)}$$

- Pengecekan tegangan lentur izin ($f_b < F_b$)

$$F_b = 0,6(2,5 \times 10^5) = 150 \text{ MPa}$$

$$f_b = \frac{M}{S_x} = \frac{691,2}{9,16 \times 10^{-3}} \times 10^{-3} = 75,4585 \text{ MPa} < F_b = 150 \text{ MPa (OK)}$$

- Pengecekan tegangan kombinasi pada penampang

Cek $f_a/F_a = 15,6522/141,4526 = 11,0653\% > 15\%$, maka digunakan Persamaan (13)

$$r_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = \sqrt{\frac{2,58 \times 10^{-4}}{0,0368}} = 0,0837 \text{ m}$$

$$F_e = \frac{12\pi^2(2 \times 10^8)}{23 \left(\frac{1(3)}{0,0837}\right)^2} = 802,2552 \text{ MPa}$$

$$0,8963 + \frac{0,85(75,4585)}{\left(1 - \frac{15,6522}{802,2552}\right) 150} = 0,5468 < 1 \text{ (OK)}$$

Karena penampang *strut* awal yang dipilih memenuhi tegangan aksial, lentur, maupun kombinasi yang disyaratkan oleh AISC, maka *strut* pada proyek yang dianalisis akan dibuat menggunakan profil WF 690 × 289 mm.

Berdasarkan SNI 8460:2017, gaya prategang sebesar 10% sampai 25% gaya *strut* harus diberikan pada *strut* untuk menjamin kontak yang baik antara dinding/*waler beam* dan *strut*. Pada analisis ini, gaya prategang diambil sebesar 25% gaya *strut* sehingga:

$$F_{prestress} = 25\% \times 2451,15 = 612,7875 \text{ kN} \approx 610 \text{ kN}$$

Pemodelan dan Analisis Deformasi Dinding Diafragma Setelah Penambahan Sistem Penunjang

Ground anchor baris pertama, kedua, dan ketiga dipasang ketika galian mencapai elevasi -11.00 m, sedangkan *ground anchor* baris keempat dipasang setelah galian mencapai elevasi -12.00 m. Komponen *free length* dimodelkan sebagai elemen *node-to-node anchor* dan komponen *fixed length* dimodelkan sebagai elemen *geogrid*. Urutan tahapan konstruksi (*construction stage*) pemasangan *ground anchor* serta deformasi maksimum dinding diafragma pada masing-masing fase konstruksi dijabarkan pada Tabel 4.

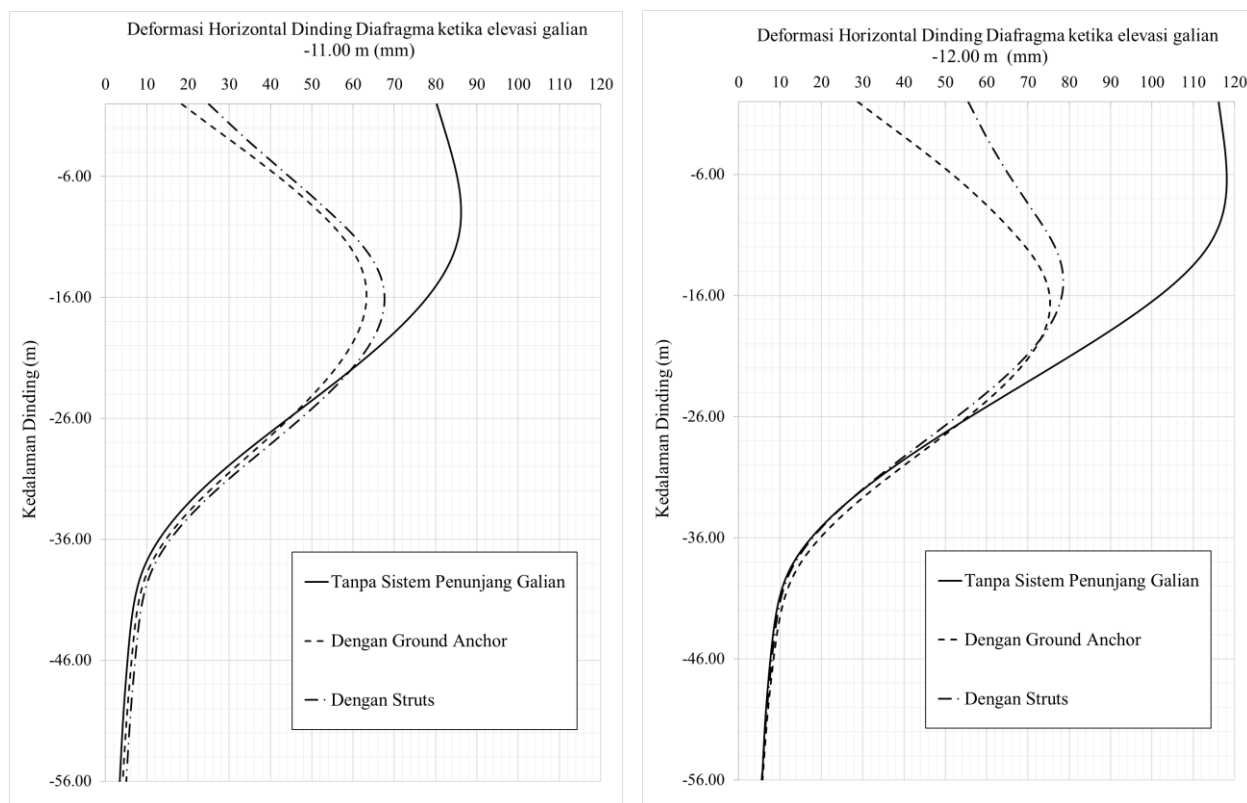
Tabel 4. Tahapan konstruksi pemasangan *ground anchor* dan deformasi maksimum dinding pada tiap fase

Fase	Construction Stage	Keterangan	Deformasi Maksimum Dinding Diafragma (mm)
1	<i>Initial Phase</i>	Fase awal galian	0
2	<i>Load & D-wall</i>	Mobilisasi alat berat dan instalasi dinding diafragma	1,123
3	<i>Dewatering 1</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -4.00 m	1,725
4	<i>First Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -3.00 m	9,885
5	<i>Dewatering 2</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -7.00 m	10,49
6	<i>Second Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -6.00 m	22,44
7	<i>Dewatering 3</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -10.00 m	23,89
8	<i>Third Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -9.00 m	47,48
9	<i>Dewatering 4</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -13.00 m	51,58
10	<i>Fourth Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -10.00 m	66,11
11	<i>Fifth Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -11.00 m	86,17
12	<i>1st, 2nd, 3rd anchor</i>	Instalasi angkur baris 1, baris 2, dan baris 3	63,32
13	<i>Final Excavation w/ ground anchor</i>	Galian tanah hingga elevasi -12.00 m	81,96
14	<i>4th anchor</i>	Instalasi angkur baris 4	75,41

Strut baris pertama, kedua, dan ketiga dipasang ketika galian mencapai elevasi -11.00 m. *Strut* dimodelkan sebagai elemen *fixed end anchor*. Urutan tahapan konstruksi (*construction stage*) pemasangan *strut* serta deformasi maksimum dinding diafragma pada masing-masing fase konstruksi dijabarkan pada Tabel 5.

Tabel 5. Tahapan konstruksi pemasangan *strut* dan deformasi maksimum dinding pada tiap fase

Fase	Construction Stage	Keterangan	Deformasi Maksimum Dinding Diafragma (mm)
1	<i>Initial Phase</i>	Fase awal galian	
2	<i>Load & D-wall</i>	Mobilisasi alat berat dan instalasi dinding diafragma	1,123
3	<i>Dewatering 1</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -4.00 m	1,725
4	<i>First Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -3.00 m	9,885
5	<i>Dewatering 2</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -7.00 m	10,49
6	<i>Second Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -6.00 m	22,44
7	<i>Dewatering 3</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -10.00 m	23,89
8	<i>Third Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -9.00 m	47,48
9	<i>Dewatering 4</i>	<i>Dewatering</i> muka air tanah hingga elevasi -13.00 m	51,58
10	<i>Fourth Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -10.00 m	66,11
11	<i>Fifth Excavation</i>	Galian tanah hingga elevasi -11.00 m	86,17
12	<i>1st, 2nd, 3rd Strut</i>	Instalasi angkur baris 1, baris 2, dan baris 3	67,62
13	<i>Final Excavation w/ strut</i>	Galian tanah hingga elevasi -12.00 m	78,54



Gambar 9. Grafik perbandingan deformasi dinding diafragma ketika elevasi galian -11.00 m dan elevasi galian -12.00 m dengan perkuatan *ground anchor* dan *struts*

Analisis Perbandingan

Dinding diafragma pada proyek yang dianalisis telah mencapai kondisi darurat sehingga opsi sistem penunjang galian yang akan diterapkan harus mampu mengatasi deformasi berlebihan yang terjadi hingga sekecil mungkin agar kegagalan dapat dicegah. Dengan pertimbangan tersebut, maka efektivitas sistem penunjang dalam mengatasi deformasi dinding diafragma menjadi pertimbangan utama dalam memilih alternatif opsi sistem penunjang galian yang akan diterapkan. Berdasarkan grafik pada Gambar 9, dapat dilihat bahwa deformasi yang dihasilkan setelah pemasangan *ground anchor*, baik ketika galian mencapai elevasi -11 m maupun -12 m, lebih kecil dibandingkan *strut* sehingga *ground anchor* direkomendasikan sebagai opsi utama pada analisis ini.

Selain efektif dalam mengurangi deformasi horizontal, desain opsi sistem penunjang galian yang dipilih juga harus dapat diaplikasikan pada lokasi proyek dan dapat dibangun secara efisien tanpa membuang waktu dan tenaga. Opsi *ground anchor* memang paling efektif jika ditinjau dari segi kemampuannya mengatasi deformasi horizontal, tetapi pelaksanaan konstruksinya memiliki beberapa kendala. Komponen *fixed length* dari *ground anchor* harus terbenam pada lapisan tanah keras agar dapat bekerja secara efektif, sementara pada proyek yang dianalisis lapisan tanah keras berada cukup dalam dari permukaan tanah sehingga panjang *free length* yang diperlukan menjadi sangat besar. Sebagian komponen *ground anchor* harus dipasang di luar lahan proyek sehingga memerlukan perizinan terlebih dahulu kepada pemilik lahan atau pihak yang berwenang. Pemasangan *ground anchor* juga berpotensi mengganggu atau merusak komponen struktur bawah tanah eksisting seperti pipa, saluran air, terowongan, atau fondasi bangunan sekitar. Apabila pihak pemilik lahan tidak memberikan izin atau apabila lokasi rencana *ground anchor* bertabrakan dengan komponen struktur bawah tanah yang sudah ada, maka terdapat kemungkinan *ground anchor* tidak dapat digunakan sama sekali pada lokasi proyek sehingga perlu ditentukan opsi cadangan untuk mengantisipasi hal tersebut.

Dengan tetap mempertimbangkan efektivitasnya dalam mengatasi deformasi dinding diafragma, *strut* direkomendasikan sebagai opsi cadangan jika sewaktu-waktu *ground anchor* tidak dapat diaplikasikan. Pelaksanaan konstruksi *strut* memiliki beberapa kelebihan dibandingkan *ground anchor* karena pemasangannya dilakukan di dalam lubang galian sehingga tidak akan mengganggu komponen struktur bawah tanah. Pemasangan *strut* juga tidak memerlukan perizinan dari pemilik lahan sekitar karena seluruhnya dipasang pada lahan proyek. Meskipun demikian, *strut* juga memiliki beberapa kekurangan. Karena *strut* dipasang di dalam lubang galian, maka keberadaan *strut* dapat

membatasi mobilitas alat berat sehingga mengganggu aktivitas proyek di dalam lubang galian. Komponen *strut* juga harus dilepaskan setelah pelat basemen selesai dicor sehingga akan memerlukan waktu, tenaga, dan biaya tambahan.

4. KESIMPULAN

Kesimpulan

- Batas maksimum deformasi lateral dinding diafragma pada proyek yang dianalisis adalah 84 mm.
- Ketika galian mencapai elevasi -11.00 m, deformasi dinding diafragma yang terjadi adalah 86,17 mm dan telah melebihi deformasi izin sehingga sistem penunjang galian perlu ditambahkan untuk mencegah keruntuhan dinding diafragma.
- Opsi utama sistem penunjang galian yang direkomendasikan adalah *ground anchor* karena menghasilkan deformasi dinding yang terkecil. Panjang komponen *fixed length ground anchor* yang diperlukan adalah 14 m sedangkan panjang komponen *free length ground anchor* yang diperlukan adalah 56 m.
- Panjang komponen *ground anchor* yang besar menyebabkan sebagian komponen *ground anchor* harus dipasang pada lahan di luar milik proyek sehingga muncul kemungkinan *ground anchor* tidak dapat diterapkan karena komponen *ground anchor* mengenai struktur eksisting lain atau terbentur masalah perizinan.
- *Strut* direkomendasikan sebagai opsi cadangan sistem penunjang galian untuk mengantisipasi apabila *ground anchor* tidak dapat diterapkan pada proyek karena seluruh komponen *strut* dipasang di dalam lubang galian sehingga tidak memerlukan perizinan dan tidak akan mengenai komponen struktur eksisting lain.

Saran

- Pengaruh penambahan sistem penunjang galian terhadap penurunan tanah di belakang dinding diafragma dapat dianalisis lebih lanjut pada penelitian berikutnya.
- Beban gempa dapat dipertimbangkan pada penelitian selanjutnya mengingat proyek berada pada lokasi rawan gempa.
- Pemodelan galian dapat dilakukan secara tiga dimensi untuk menghasilkan analisis yang lebih akurat.
- Desain sistem penunjang galian dengan menggabungkan beberapa tipe sistem penunjang galian dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya untuk memperoleh konfigurasi yang optimal.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik (SNI 8460:2017)*. <http://sispk.bsn.go.id/SNI/DaftarList>.
- Bahrami, M. (2019, November). *Strut Design of Deep Excavation: Theory and Solved Example*. Diambil kembali dari ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/337245335_Strut_Design_of_Deep_Excavation_Theory_and_Solved_Example
- British Standards Institution. (1989). *BS 8081:1989 British Standard Code of Practice for Ground Anchorages*. British Standards Institution.
- Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering, SI Seventh Edition*. Cengage Learning.
- Federal Highway Administration. (1999). *Geotechnical Engineering Circular No. 4 : Ground Anchors and Anchored Systems*. U.S. Department of Transportation.
- Ou, C. Y. (2006). *Deep Excavation : Theory and Practice*. Taylor & Francis.
- Peck, R. B. (1969). Deep Excavation and Tunneling in Soft Ground. *Proceedings Seventh International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (hal. 225-290). State-of-the-Art Volume.
- Puzrin, A. M., Alonso, E. E., & Pinyol, N. M. (2010). Braced Excavation Collapse: Nicoll Highway, Singapore. *Geomechanics of Failures*, 151-181.
- Rankine, W. M. (1857). On Stability on Loose Earth . *Philosophic Transactions of Royal Society*, 9-27.

