

## ***Earth Wall dengan Tanah Marginal dengan Pengujian Skala Penuh***

**Nastiti Tiasundari**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,  
E-mail: nastiti.tiasundari@gmail.com

**Widjojo Adi Prakoso**

Departemen Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia,  
E-mail: wprakoso@eng.ui.ac.id

**Dandung Sri Harninto**

PT. Geoforce Indonesia,  
E-mail: dandung@geoforce-indonesia.com

### **Abstrak**

*Mechanically Stabilized Earth Wall (MSE Wall)* banyak dilakukan sebagai salah satu alternatif dinding penahan tanah. Ketidaktersediaan material granular bergradasi baik sesuai dengan persyaratan menyebabkan penggunaan tanah marginal tidak dapat dihindari. Penelitian ini bertujuan untuk melihat performa dari *MSE Wall* dengan timbunan tanah marginal. Pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan model dinding dengan tinggi 3 m menggunakan timbunan tanah marginal *clayey silt*. Perkuatan yang akan digunakan adalah strip geosintetik yang terbuat dari anyaman benang polyester kuat tarik tinggi dengan kuat tarik 50 kN, panjang penjangkaran 3 m (1H), spasi vertikal 0,6 m, dan spasi horizontal 0,6 m. Pembebanan akan dilakukan secara bertahap dari mulai 10 kPa, 20 kPa, hingga 30 kPa. Proses saturasi akan berlangsung selama 5 hari setelah pembebanan terakhir dilakukan. Monitoring akan dilakukan terhadap pergerakan dinding, gaya aksial tarik yang terjadi pada perkuatan, dan tekanan yang terjadi pada dinding. Gaya tarik aksial terjadi paling besar pada layer bagian atas yang disertai dengan pergerakan dinding ke arah dalam *facing* pada akhir proses saturasi dikarenakan turunnya tegangan efektif, berkurangnya kuat geser, terjadinya *settlement* akibat beban, dan efek *suction* yang berkurang.

**Kata-kata Kunci:** *Infiltrasi air, MSE Wall, strip geosintetik, tanah marginal, tanah yang diperkuat*

### **Abstract**

*Mechanically Stabilized Earth Wall (MSE Wall)* is widely used as an alternative retaining wall. The unavailability of well-graded granular material according to the requirements makes the use of marginal soil unavoidable. This study aims to see the performance of *MSE Wall* with marginal soil embankment. In this study, a wall model with a height of 3 m will be made using marginal *clayey silt* soil embankment. The reinforcement to be used is a geosynthetic strip made of high tenacity polyester yarn with a tensile strength of 50 kN, an anchorage length of 3 m (1H), a vertical spacing of 0.6 m, and a horizontal spacing of 0.6 m. The loading will be carried out in stages starting from 10 kPa, 20 kPa, to 30 kPa. The saturation process will take place for 5 days after the last loading is carried out. Monitoring will be carried out on the movement of the wall, the tensile axial force that occurs in the reinforcement, and the pressure that occurs on the wall. The axial tensile force occurs most in the upper layer which is accompanied by the movement of the wall towards the facing at the end of the saturation process due to a decrease in effective stress, reduced shear strength, settlement due to load, and reduced suction effect.

**Keywords:** *Geosynthetic strip, marginal soil embankment, MSE Wall, reinforced soil, water infiltration*

## **1 Pendahuluan**

Dinding penahan tanah merupakan sebuah konstruksi yang dibutuhkan untuk menciptakan support bagi lahan alami maupun buatan (Clayton et al., 2013). *Mechanically Stabilized Earth Wall (MSE Wall)* banyak dilakukan sebagai salah satu alternatif dinding penahan tanah. *MSE Wall* banyak digunakan pada beberapa proyek dinding penahan

tanah dengan proses penimbunan, seperti: struktur timbunan pendekat jembatan, ramp jalan, maupun untuk tujuan stabilisasi lereng lainnya. Struktur *MSE Wall* mengandalkan kekuatan friksi antara tanah dengan komponen perkuatan yang dapat berupa strip besi maupun material geosintetik. Perkuatan tersebut kemudian dihubungkan dengan panel *precast* beton untuk menciptakan satu kesatuan struktur yang kokoh.

\* Penulis Korespondensi: nastiti.tiasundari@gmail.com

*MSE Wall* pada kondisi ideal dibangun dengan menggunakan timbunan tanah granular dengan kandungan tanah berbutir halus tidak lebih dari 15% (FHWA, 2009). Tantangan yang sering dihadapi di lapangan adalah sulitnya dan mahalnya material tanah granular di beberapa lokasi konstruksi di Indonesia. Oleh karena itu, penggunaan material setempat yang pada umumnya adalah tanah berbutir halus perlu menjadi pertimbangan.

Pengujian terhadap *MSE Wall* dalam skala laboratorium sudah banyak dilakukan (Won et al., 2021; Komak Panah et al., 2015; Kilic et al., 2021). Salah satu penelitian oleh Kilic et al. (2021) yang membuat model dinding penahan tanah yang diperkuat dengan material geosintetik skala lab di atas meja getar. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa tanah kohesif memiliki performa seismik yang lebih baik dibandingkan dengan model tanah granular dengan panjang penjangkaran perkuatan 0,6-0,8 H sudah dirasa mencukupi untuk tanah kohesif. Namun demikian, model laboratorium ini perlu dilakukan verifikasi apakah sesuai dengan penerapannya di lapangan.

Pembuatan model berskala kecil juga dilakukan oleh (Zheng et al., 2023; Li et al., 2024; Yazdandoust & Bahrami Balfeh Taimouri, 2022; Yang et al., 2023). Salah satu penelitian pembuatan model berskala kecil *MSE Wall* adalah oleh Yang et al. (2023) yang dilengkapi dengan instrumentasi untuk monitoring kadar air volumetrik, tekanan air pori, dan regangan tarik pada material. Model yang dibuat menggunakan tanah marginal dengan variasi hujan dan efek ketebalan dari lapisan bantalan pasir terhadap performa dinding. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa semakin lama berlangsungnya hujan, deformasi akan terus terjadi yang mengakibatkan garis kelongsoran yang semakin bergerak ke belakang. Penempatan lapisan bantalan pasir pada tanah marginal memberikan keuntungan: meningkatkan tahanan cabut, meningkatkan kekuatan dinding penahan tanah, dan memperbaiki drainase dinding. Berkurangnya spasi perkuatan dan meningkatnya ketebalan lapisan bantalan pasir dapat menurunkan deformasi dinding dan meningkatkan stabilitas.

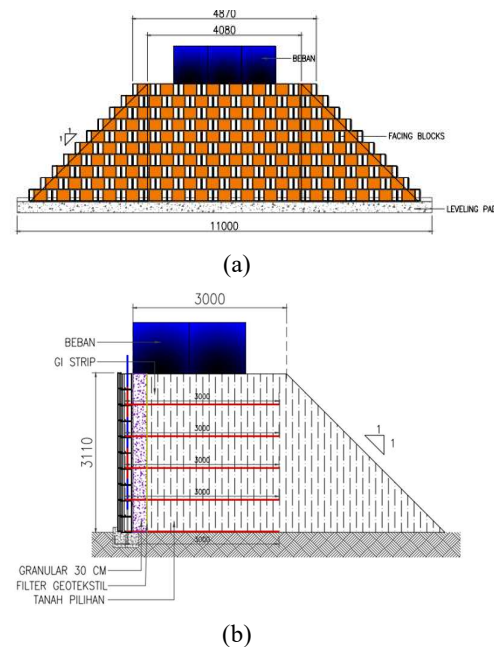
Pembuatan model skala penuh dari *MSE Wall* juga telah banyak dilakukan (Riccio et al., 2014; Yoo & Jung, 2004; Yoo & Kim, 2008; Kahyaoğlu et al., 2021; Jiang et al., 2016). Model skala penuh dari *MSE Wall* oleh Kahyaoğlu et al. (2021) adalah dinding penahan tanah dengan tinggi 3 m yang dibebani mencapai 20 kPa. Timbunan yang digunakan adalah pasir kelanauan dengan sedikit kerikil dengan perkuatan *reinforced polymer strip* panjang 0,7 H, spasi horizontal 0,3 m, dan spasi vertikal 0,6 m. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pergerakan horizontal maksimum dinding terjadi pada 70% dari tinggi dinding dari bawah dengan

variasi besar pergerakan adalah 1,9-3,1% dari tinggi dinding. Beban maksimum pada perkuatan ditemukan pada jarak 60% dari tinggi dinding terhadap dasar dan terjadi pada jarak 40% dari depan facing.

Pada penelitian ini akan dilakukan pembuatan model dinding dengan tinggi 3 m menggunakan timbunan tanah marginal. Tanah marginal didefinisikan sebagai tanah yang tidak memenuhi persyaratan perancangan struktur dengan perkuatan geosintetik, yaitu tanah dengan kandungan tanah berbutir halus lebih dari 15% (Guerra-Escobar et al., 2024). Dalam penelitian ini akan digunakan tanah dengan jenis lanau berlempung. Perkuatan yang akan digunakan adalah strip geosintetik yang terbuat dari anyaman benang *polyester* kuat tarik tinggi dengan panjang H (3m), kuat tarik 50 kN, spasi vertikal 0,6 m, dan spasi horizontal 0,6 m. Pembebanan akan dilakukan secara bertahap dari mulai 10 kPa, 20 kPa, hingga 30 kPa. Proses saturasi akan berlangsung selama 10 hari setelah pembebanan terakhir dilakukan. Dalam penelitian ini akan dilakukan *monitoring* terhadap pergerakan muka dinding, *axial load* pada perkuatan, dan tekanan yang terjadi pada dinding.

## 2 Metodologi Pengujian

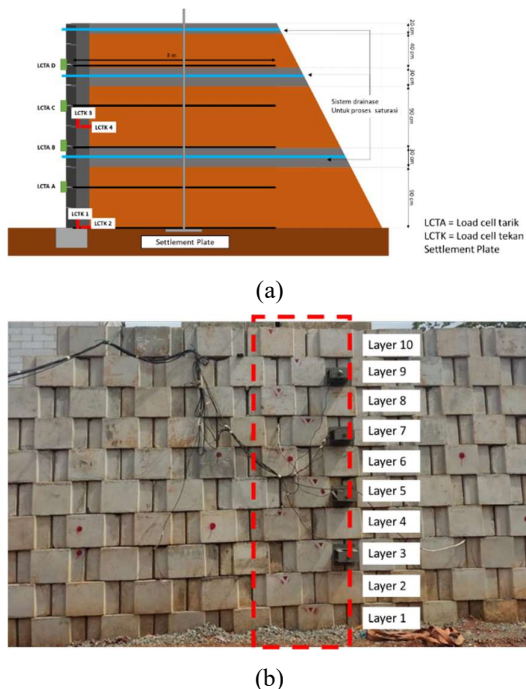
Metode pengujian akan dilakukan dengan membuat satu model prototype skala 1:1 dari *MSE Wall* dengan blok-blok berukuran kecil. Ukuran tinggi dari dinding yang akan dibangun adalah 3 m dengan ukuran tampak depan dan samping seperti terlihat pada **Gambar 1**.



**Gambar 1. (a) Tampak depan; (b) Tampak samping**

Tanah yang digunakan merupakan tanah marginal lanau berlempung dengan sedikit lapisan kerikil di antaranya pada posisi jalur saturasi. Pada bagian belakang dinding akan diberikan lapisan kerikil setebal 30 cm untuk drainase. Perkuatan yang akan digunakan adalah strip geosintetik kuat tarik 50 kN dengan panjang penjangkaran 3m (1H), spasi vertikal 0,6 m, dan spasi horizontal 0,6 m. Proses pembebanan akan dilakukan secara bertahap mulai dari 1 ton/m<sup>2</sup> (10 kPa), 2 ton/m<sup>2</sup> (20 kPa), dan 3 ton/m<sup>2</sup> (30 kPa). Proses saturasi selama 5 hari akan dilakukan setelah pembebanan terakhir dilakukan.

Monitoring akan dilakukan ketika awal masa konstruksi dan ketika masa pembebanan berlangsung. Monitoring dilakukan terhadap pergerakan dinding di bagian tengah, gaya tarik yang terjadi pada tiga level perkuatan paling atas, dan tekanan tanah yang terjadi. Layout monitoring dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 2. (a) Layout pemasangan instrumentasi; (b) Titik monitoring pergerakan dinding**

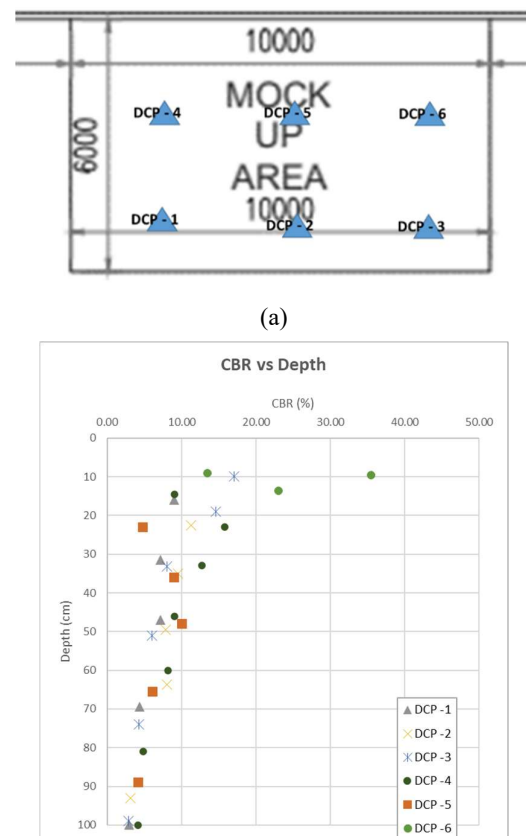
Pengamatan terhadap gaya tarik aksial dilakukan pada empat titik sesuai pada Gambar 2(a), yaitu pada perkuatan di level ke-2 (LCTA-A), level ke-3 (LCTA-B), level ke-4 (LCTA-C), dan level ke-5 (LCTA-D). Pengamatan gaya tarik aksial dilakukan dengan memasang *load cell* tekan pada bagian ujung perkuatan yang menempel pada dinding. Sementara itu, pengamatan terhadap gaya tekan vertikal dan lateral yang dialami akibat adanya beban timbunan akan diamati pada dua titik, yaitu pada bagian dasar timbunan dan pada bagian tengah timbunan.

Pengamatan terhadap penurunan tanah dilakukan dengan satu titik *settlement plate* yang dipasang di bagian tengah pada dasar timbunan. Pengamatan terhadap penurunan dan pergerakan horizontal dari panel dilakukan pada sepuluh titik panel seperti pada **Gambar 2(b)**.

### 3 Properti Material

#### 3.1. Tanah dasar

Pengujian terhadap tanah dasar dilakukan dengan dua metode, yaitu uji *Dynamic Cone Penetrometer* (DCP) dan *Cone Penetration Test* (CPT). Pengujian DCP dilakukan pada enam titik yang tersebar sepanjang area konstruksi dinding penahan tanah. Layout dan hasil pengujian dari DCP dapat dilihat pada Gambar 3. Hasil pengujian DCP menunjukkan bahwa kedalaman 0-30 cm nilai CBR >10% dan kedalaman 30-100 cm nilai CBR <10%. Nilai CBR rata-rata yang didapatkan dari enam titik pengujian DCP tersebut adalah 7,8%.



**Gambar 3. (a) Layout pengujian DCP; (b) Hasil pengujian DCP**

Pengujian CPT hanya dilakukan hingga kedalaman 10 m karena kondisi keterbatasan alat. Hasil pengujian menunjukkan pada kedalaman 0,4-10 m tanah memiliki nilai  $q_c$  berkisar 15-33 kg/cm<sup>2</sup>. Tanah

pada kedalaman tersebut dapat dideskripsikan sebagai tanah lempung/lanau dengan konsistensi sedang hingga kaku.

Berdasarkan hasil DCP, tanah masih tergolong dalam kelompok sedang hingga baik untuk *subgrade*, sesuai dengan hasil tes CPT. Hasil pengujian lapangan menunjukkan bahwa tanah dasar mungkin belum cukup kuat dan berisiko mengalami penurunan tanah yang relatif besar. Oleh karena itu, bagian tanah dasar dipadatkan dengan menggunakan alat berat untuk menghasilkan tanah dasar yang lebih kuat.

### 3.2. Tanah timbunan

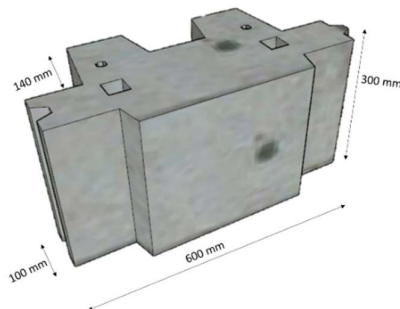
Pengujian terhadap tanah timbunan dilakukan di laboratorium untuk mengetahui nilai *specific gravity*, distribusi butiran, indeks plastisitas, *compaction*, *california bearing ratio*, dan *triaxial unconsolidated undrained*. Hasil pengujian lab terhadap tanah timbunan dapat dilihat pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Hasil pengujian laboratroium sampel tanah timbunan

| Pengujian                                | Nilai                                                                   |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <i>Specific Gravity</i>                  | 2,648                                                                   |
| <i>Grain size distribution</i>           | Sand : 7%; Silt: 76%; Clay: 17%                                         |
| <i>Plasticity index</i>                  | 28,88%                                                                  |
| <i>Standard compaction test</i>          | $\gamma_{dry\ max} = 12,73\ kN/m^3$ ;<br>Optimum water content = 37,60% |
| <i>California bearing ratio</i>          | Swelling = 0,42%                                                        |
| <i>Triaxial unconsolidated undrained</i> | $c = 55,82\ kPa$ ; $\phi = 33,85^\circ$                                 |

### 3.3. Blok segmental beton

Blok segmental beton yang digunakan memiliki mutu K-250 atau setara dengan  $f'c=20\ MPa$ . Dimensi panjang 600 mm x tinggi 300 mm, dan lebar total adalah 290 mm.



**Gambar 4.** Bentuk segmental beton

### 3.4. Perkuatan

Material perkuatan yang digunakan adalah strip geosintetik yang terbuat dari anyaman benang *polyester* kuat tarik tinggi. Strip geosintetik yang digunakan memiliki kuat tarik maksimum 50 kN dan regangan pada saat putus sebesar 11%. Konfigurasi pemasangan pada dinding dapat dilihat pada Gambar 5. Perkuatan akan dipasang pada level 0 (dasar timbunan), layer ke-2, layer ke-4, layer ke-6, dan layer ke-8.



**Gambar 5.** Strip geosintetik dan konfigurasi pemasangan pada dinding

Kapasitas tarik izin ( $T_{allowable}$ ) dari material geosintetik dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$T_{allowable} = \frac{T_{ultimate}}{RF_{ID} \times RF_{CR} \times RF_{CBD}} \quad (1)$$

Dimana:

$T_{allowable}$  = kapasitas tarik izin material (kN)

$RF_{ID}$  = Faktor reduksi atas kerusakan instalasi

$RF_{CR}$  = Faktor reduksi atas *creep* material

$RF_{CBD}$  = Faktor reduksi atas degradasi kimia dan biologis

Koerner (2005) menyebutkan angka faktor reduksi untuk penggunaan geosintetik pada perkuatan lereng dan timbunan adalah sebagai berikut:  $RF_{ID} = 1,1-1,4$ ;  $RF_{CR} = 2,0-3,0$ ; dan  $RF_{CBD} = 1,1-1,5$ . Berdasarkan rentang nilai tersebut, kemudian dipilih angka  $RF_{ID} = 1,2$ ,  $RF_{CR} = 2,2$ , dan  $RF_{CBD} = 1,1$ .

$$T_{allowable} = \frac{50\ kN}{1,2 \times 2,2 \times 1,1} = 17,21\ kN$$

Nilai kapasitas tarik izin ( $T_{allowable}$ ) dari material strip geosintetik yang digunakan dalam penelitian ini adalah 17,21 kN.

## 4. Desain Stabilitas Internal

Perhitungan desain terhadap stabilitas internal dilakukan berdasarkan panduan pada manual desain untuk *MSE Wall* yang dikeluarkan oleh *Federal Highway Administration* dalam dokumen FHWA-NHI-10-024. Stabilitas internal yang dihitung adalah

faktor keamanan terhadap gagal cabut dari material (*pull out failure*) dan rusaknya material (*breaking failure*). Properti tanah yang digunakan sesuai dengan properti tanah pada pengujian lapangan. Beban yang diberikan adalah beban mati dengan besaran 30 kN/m<sup>2</sup>.

Proses desain dilakukan dengan mendefinisikan beban yang akan diterima, yaitu meliputi beban dari tanah dan beban mati yang akan diberikan. Tahap kedua adalah menghitung stabilitas internal pada struktur *MSE Wall*. Persamaan yang digunakan dalam kalkulasi stabilitas internal adalah sebagai berikut :

$$\sigma_H = \gamma_{\text{tanah}} \times Z \times K_a \quad (2)$$

$$q_H = q \times K_a \quad (3)$$

$$\text{Beban Total} = \sigma_H + q_H \quad (4)$$

$$L_a = (H-Z) \tan (45-\phi/2) \quad (5)$$

$$\phi L_e \geq T_{\max} / (F^* \alpha \sigma_v C R_c) \quad (6)$$

$$T_{\max} = \sigma_H \times S_v \quad (7)$$

$$L_{\text{total}} = L_a + L_e \quad (8)$$

$$Pr = F^* \alpha \sigma_v L_e C \quad (9)$$

$$T_r = \phi T_{al} \quad (10)$$

$$SF_{\text{pullout}} = Pr / T_{\max} \quad (11)$$

$$SF_{\text{breaking}} = T_r / T_{\max} \quad (12)$$

Dimana:

$\sigma_H$  = beban tanah horizontal (kN/m<sup>2</sup>)

$K_a = \tan^2(45-\phi/2)$ , dimana dalam penelitian ini

digunakan nilai  $\phi = 27^\circ$ , sehingga nilai  $K_a = 0,37$

$\gamma_{\text{tanah}}$  = berat jenis tanah (kN/m<sup>3</sup>)

$Z$  = tebal tanah timbunan (m)

$q_H$  = beban mati horizontal (kN/m<sup>2</sup>)

$q$  = beban mati yang diberikan (kN/m<sup>2</sup>)

$L_a$  = panjang perkuatan di zona aktif (m)

$L_e$  = panjang perkuatan di zona tahanan (m)

$\phi$  = faktor perkuatan [Tabel 4-7 (FHWA, 2009)]

$T_{\max}$  = beban terfaktor maksimum pada perkuatan (kN)

$S_v$  = spasi vertikal perkuatan (m)

$Pr$  = tahanan cabut/*pullout resistance* (kN)

$F^*$  = faktor tahanan cabut/*friction-bearing-interaction factor*

$\alpha$  = faktor koreksi efek skala (umumnya 1,0 untuk perkuatan metal dan 0,6 – 1,0 untuk geosintetik

$\sigma_v$  = tekanan vertikal tanah (kN/m<sup>2</sup>)

$C$  = unit perimeter efektif dari perkuatan ( $C=2$  untuk strip)

$SF_{\text{pullout}}$  = faktor keamanan terhadap cabut/*pullout*

$SF_{\text{breaking}}$  = faktor keamanan terhadap *breaking*.

**Tabel 2. Desain stabilitas internal pasca konstruksi**

| Tinggi         | Z    | $\sigma_H$           | $q_H$                | Beban Total          | $L_a$ | $L_e$ | L total | L desain | $T_{\max}$ | Pr    | Tr    | SF       | SF        |
|----------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|---------|----------|------------|-------|-------|----------|-----------|
| Perkuat-an (m) | (m)  | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (m)   | (m)   | (m)     | (m)      | (kN)       | (kN)  | (kN)  | Pull-out | Break-ing |
| 2,40           | 0,60 | 3,59                 | 0,00                 | 3,59                 | 1,47  | 1,10  | 2,57    | 3        | 1,29       | 10,02 | 15,50 | 7,75     | 11,98     |
| 1,80           | 1,20 | 7,19                 | 0,00                 | 7,19                 | 1,10  | 1,10  | 2,20    | 3        | 2,59       | 24,85 | 15,50 | 9,60     | 5,99      |
| 1,20           | 1,80 | 10,78                | 0,00                 | 10,78                | 0,73  | 1,10  | 2,10    | 3        | 3,88       | 44,49 | 15,50 | 11,46    | 3,99      |
| 0,60           | 2,40 | 14,38                | 0,00                 | 14,38                | 0,37  | 1,10  | 2,10    | 3        | 5,18       | 68,92 | 15,50 | 13,32    | 2,99      |
| 0,00           | 3,00 | 17,97                | 0,00                 | 17,97                | 0,00  | 1,10  | 2,10    | 3        | 6,47       | 98,17 | 15,50 | 15,18    | 2,40      |

**Tabel 3. Desain stabilitas internal dengan beban 20 kN/m<sup>2</sup>**

| Tinggi         | Z    | $\sigma_H$           | $q_H$                | Beban Total          | $L_a$ | $L_e$ | L total | L desain | $T_{\max}$ | Pr    | Tr    | SF       | SF        |
|----------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|-------|-------|---------|----------|------------|-------|-------|----------|-----------|
| Perkuat-an (m) | (m)  | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (m)   | (m)   | (m)     | (m)      | (kN)       | (kN)  | (kN)  | Pull-out | Break-ing |
| 2,40           | 0,60 | 3,59                 | 7,49                 | 11,08                | 1,47  | 1,10  | 2,57    | 3        | 3,99       | 10,02 | 15,50 | 2,51     | 3,88      |
| 1,80           | 1,20 | 7,19                 | 7,49                 | 14,67                | 1,10  | 1,10  | 2,20    | 3        | 5,28       | 24,85 | 15,50 | 4,70     | 2,93      |
| 1,20           | 1,80 | 10,78                | 7,49                 | 18,27                | 0,73  | 1,10  | 2,10    | 3        | 6,58       | 44,49 | 15,50 | 6,76     | 2,36      |
| 0,60           | 2,40 | 14,38                | 7,49                 | 21,86                | 0,37  | 1,10  | 2,10    | 3        | 7,87       | 68,92 | 15,50 | 8,76     | 1,97      |
| 0,00           | 3,00 | 17,97                | 7,49                 | 25,46                | 0,00  | 1,10  | 2,10    | 3        | 9,16       | 98,17 | 15,50 | 10,71    | 1,69      |

Tabel 4. Desain stabilitas internal dengan beban 30 kN/m<sup>2</sup>

| Tinggi         | Z   | $\sigma_H$           | $q_H$                | Beban Total          | La  | Le  | L <sub>total</sub> | L <sub>desain</sub> | T <sub>max</sub> | Pr   | Tr   | SF       | SF        |
|----------------|-----|----------------------|----------------------|----------------------|-----|-----|--------------------|---------------------|------------------|------|------|----------|-----------|
| Perkuat-an (m) | (m) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (m) | (m) | (m)                | (m)                 | (kN)             | (kN) | (kN) | Pull-out | Break-ing |
| 2,40           | 0,6 | 3,59                 | 11,23                | 14,82                | 1,4 | 1,1 | 2,5                | 3                   | 5,3              | 10,0 | 15,5 | 1,88     | 2,90      |

Tabel 5. Desain stabilitas internal dengan beban 30 kN/m<sup>2</sup>

| Tinggi         | Z    | $\sigma_H$           | $q_H$                | Beban Total          | La   | Le   | L <sub>total</sub> | L <sub>desain</sub> | T <sub>max</sub> | Pr    | Tr    | SF       | SF        |
|----------------|------|----------------------|----------------------|----------------------|------|------|--------------------|---------------------|------------------|-------|-------|----------|-----------|
| Perkuat-an (m) | (m)  | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (kN/m <sup>2</sup> ) | (m)  | (m)  | (m)                | (m)                 | (kN)             | (kN)  | (kN)  | Pull-out | Break-ing |
| 2,40           | 0,60 | 3,59                 | 11,23                | 14,82                | 1,47 | 1,10 | 2,57               | 3                   | 5,34             | 10,02 | 15,50 | 1,88     | 2,90      |
| 1,80           | 1,20 | 7,19                 | 11,23                | 18,42                | 1,10 | 1,10 | 2,20               | 3                   | 6,63             | 24,85 | 15,50 | 3,75     | 2,34      |
| 1,20           | 1,80 | 10,78                | 11,23                | 22,01                | 0,73 | 1,10 | 2,10               | 3                   | 7,92             | 44,49 | 15,50 | 5,61     | 1,96      |
| 0,60           | 2,40 | 14,38                | 11,23                | 25,61                | 0,37 | 1,10 | 2,10               | 3                   | 9,22             | 68,92 | 15,50 | 7,48     | 1,68      |
| 0,00           | 3,00 | 17,97                | 11,23                | 29,20                | 0,00 | 1,10 | 2,10               | 3                   | 10,51            | 98,17 | 15,50 | 9,34     | 1,47      |

Hasil analisis terhadap stabilitas internal menunjukkan bahwa faktor keamanan internal terhadap *pull out* dan *breaking* lebih besar dari 1,5, berarti struktur ini dalam kondisi aman. Namun demikian, efek saturasi belum tergambarkan dalam perhitungan ini. Efek saturasi akan menyebabkan penurunan kuat geser yang akan meningkatkan nilai  $T_{max}$ .

## 5. Hasil Pengamatan Lapangan

### 5.1. Gaya tarik aksial

Hasil pengamatan terhadap gaya tarik aksial pada bagian ujung perkuatan dapat dilihat pada Error! Reference source not found.. Pada setiap level perkuatan terjadi peningkatan gaya tarik aksial ketika masa konstruksi dilaksanakan. Masa tunggu pasca konstruksi dilakukan selama 8 hari. Pada masa tunggu tersebut tidak terlihat adanya peningkatan gaya tarik aksial kecuali pada titik LCTA-D yang terletak di perkuatan level paling atas.

Proses pembebanan dilakukan secara bertahap, mulai dari beban 20 kN/m<sup>2</sup> dengan masa tunggu 8 hari, kemudian dilanjutkan dengan beban 30 kN/m<sup>2</sup> dengan masa tunggu 11 hari. Pada saat pemberian beban 20 kN/m<sup>2</sup>, terlihat lonjakan kenaikan nilai gaya aksial yang diterima oleh perkuatan pada level ke-2 (LCTA-A) 0,41 kN, level ke-3 (LCTA-B) 0,79 kN, level ke-4 (LCTA-C) 0,71 kN, dan level ke-5 (LCTA-D) 1,72 kN. Pada saat pemberian beban 30 kN/m<sup>2</sup>, terlihat lonjakan nilai gaya aksial yang diterima oleh perkuatan pada level ke-2 (LCTA-A)



Gambar 6. Proses pembebanan

0,38 kN, level ke-3 (LCTA-B) 0,29 kN, level ke-4 (LCTA-C) 0 kN, dan level ke-5 (LCTA-D) 1,72 kN.

Berdasarkan data tersebut terlihat bahwa respon terhadap beban yang diberikan akan lebih besar pada perkuatan level paling atas dibandingkan level di bagian bawah. Hal ini berkaitan dengan pengaruh tekanan akibat beban yang bekerja, dimana bagian paling atas akan menerima tekanan lebih besar dibandingkan dengan bagian bawah.

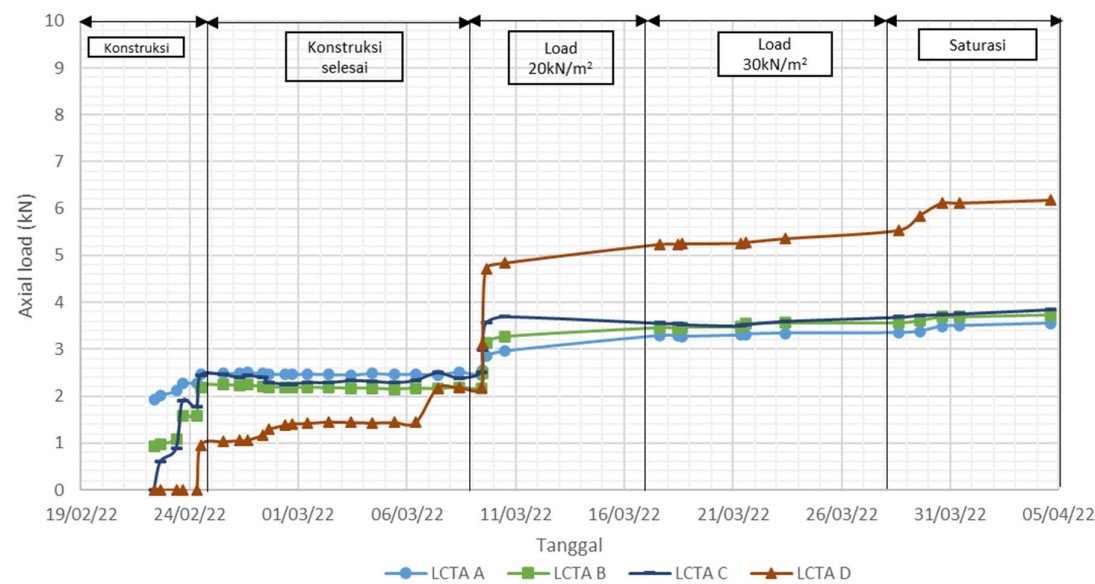
Masa saturasi dilakukan selama 5 hari dengan memberikan air melalui pipa-pipa drainase yang tertanam sepanjang lapisan granular pada timbunan. Berdasarkan hasil pengamatan, terlihat peningkatan gaya tarik aksial yang terjadi pada masing-masing level perkuatan. Pada perkuatan level ke-5 (LCTA-D), terlihat peningkatan yang signifikan akibat

proses saturasi yang mencapai 1,3 kN. Pada perkuatan level ke-2 (LCTA-A) dan level ke-3 (LCTA-B) penambahan gaya aksial yang terjadi adalah 0,3 kN, sementara pada perkuatan level ke-4 (LCTA-C) tidak mengalami penambahan gaya yang signifikan. Perkembangan gaya tarik maksimum

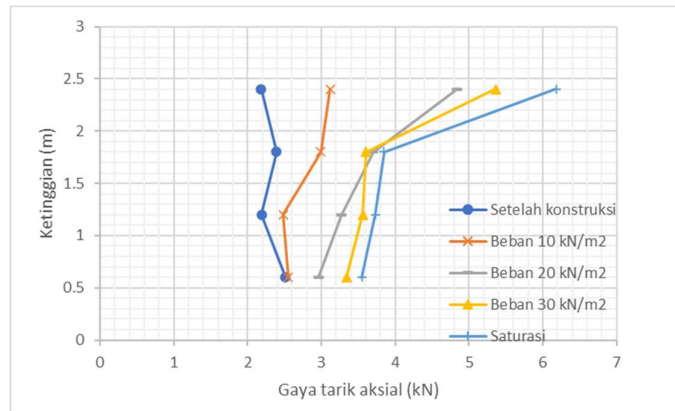
setiap peningkatan pembebanan dapat dilihat pada Error! Reference source not found. dan Error! Reference source not found..

Tabel 6. Gaya tarik aksial terhadap pembebanan

| Posisi Perkuatan        | Gaya tarik aksial maksimum (kN) |                            |                            |                            | Saturasi |
|-------------------------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------|
|                         | Setelah konstruksi              | Beban 10 kN/m <sup>2</sup> | Beban 20 kN/m <sup>2</sup> | Beban 30 kN/m <sup>2</sup> |          |
| Level 2, 0.6 m (LCTA-A) | 2,51                            | 2,55                       | 2,96                       | 3,34                       | 3,55     |
| Level 3, 1.2 m (LCTA-B) | 2,19                            | 2,48                       | 3,27                       | 3,56                       | 3,73     |
| Level 4, 1.8 m (LCTA-C) | 2,39                            | 2,99                       | 3,70                       | 3,6                        | 3,85     |
| Level 5, 2.4 m (LCTA-D) | 2,18                            | 3,12                       | 4,84                       | 5,36                       | 6,18     |



Gambar 7. Gaya tarik aksial pada perkuatan



Gambar 8. Grafik gaya tarik aksial vs ketinggian untuk berbagai tahapan pembebanan

## 5.2. Tekanan vertikal

Hasil pengamatan terhadap tekanan vertikal dilakukan pada dua titik, yaitu di bagian dasar timbunan (LCTK-2) dan di layer bagian tengah pada ketinggian 1,5 m dari top timbunan (LCTK-4) dengan menggunakan *load cell* dapat dilihat pada **Tekanan Vertikal**

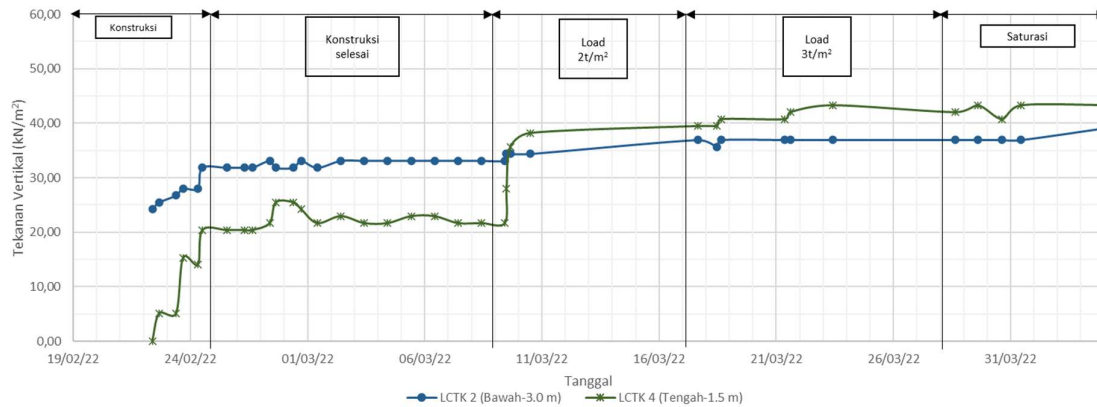
dan **Tabel 6**. Berdasarkan hasil pembacaan pada bagian dasar timbunan (LCTK-2), pada saat konstruksi dilakukan terjadi peningkatan tekanan vertikal sebesar 33 kPa. Selama masa tunggu sebelum dilakukan pembebanan, tidak terlihat adanya penambahan tekanan yang signifikan. Penambahan tekanan yang terjadi akibat beban 30 kPa pada titik ini adalah 3,8 kPa. Hal tersebut menunjukkan bahwa pengaruh tekanan dari beban yang diberikan tidak begitu signifikan pada bagian bawah timbunan di kedalaman 3 m dari letak beban.

Proses saturasi yang berlangsung selama 5 hari menyebabkan sedikit kenaikan tekanan sebesar 2,55 kPa pada bagian bawah timbunan. Hal ini menunjukkan bahwa efek penjenuhan yang terjadi menyebabkan sedikit kenaikan pada berat jenis tanah pada kedalaman di bawah 1,5 m.

Berbeda dengan hasil tekanan vertikal bagian dasar, pada *load cell* yang terletak di layer bagian tengah (LCTK-4) yang terletak 1,5 m dari bagian atas timbunan, terlihat peningkatan tekanan yang signifikan terjadi akibat adanya penambahan timbunan dan beban. Ketika selesai masa konstruksi, nilai tekanan vertikal pada titik LCTK-4 adalah 21,6 kPa. Nilai tersebut tidak bertambah signifikan selama masa tunggu konstruksi selesai. Penambahan beban 30 kN/m<sup>2</sup> menyebabkan penambahan tekanan vertikal sebesar 21,6 kPa, hanya 72.12% dari beban yang diberikan. Masa saturasi tidak memberikan efek yang signifikan terhadap tekanan vertikal yang terjadi.

Tabel 7. Tekanan vertikal tahap konstruksi, pembebanan, dan saturasi

| Kondisi                    | Tekanan Vertikal (kN/m <sup>2</sup> ) |                         |
|----------------------------|---------------------------------------|-------------------------|
|                            | Bawah (3m dari top)                   | Tengah (1.5 m dari top) |
| Setelah konstruksi         | 33,09                                 | 21,64                   |
| Beban 10 kN/m <sup>2</sup> | 34,36                                 | 28,00                   |
| Beban 20 kN/m <sup>2</sup> | 34,36                                 | 38,18                   |
| Beban 30 kN/m <sup>2</sup> | 36,91                                 | 43,27                   |
| Saturasi                   | 39,45                                 | 43,27                   |



Gambar 9. Tekanan Vertikal

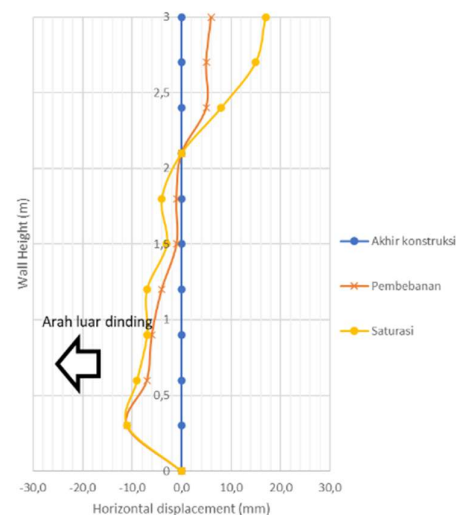
### 5.3. Pergerakan horizontal panel

Pengamatan terhadap pergerakan horizontal panel dilakukan dengan menggunakan *total station* untuk memantau sepuluh titik yang terdapat pada sepuluh panel bagian tengah seperti pada **Gambar2(b)**. Monitoring pergerakan panel diambil awal ketika masa akhir konstruksi, kemudian dilanjutkan dengan masa pembebanan  $20 \text{ kN/m}^2$ , dilanjutkan dengan masa saturasi 5 hari. Berdasarkan data pengamatan pergerakan horizontal panel (**Gambar 10** dan **Tabel 7**), terlihat bahwa setengah bagian atas panel mengalami pergerakan ke bagian dalam, sementara setengah bagian bawah panel mengalami dorongan ke bagian luar panel. Hal ini kemungkinan disebabkan karena adanya *settlement* pada timbunan di belakang panel dan pergerakan horizontal pada bagian belakang lereng timbunan yang tidak terproteksi.

Besarnya pergerakan horizontal panel paling tinggi adalah pada layer ke-10 yang mencapai  $0,071 \text{ m}$  ke arah dalam dinding. Pergerakan ini sudah melebihi persyaratan dalam SNI 8460:2017 dimana batas pergerakan horizontal untuk dinding dengan kekuatan fleksibel seperti strip geosintetik adalah  $H/75$ , yaitu  $0,04 \text{ m}$ . Sementara itu, pergerakan horizontal pada panel bawah mencapai  $0,03 \text{ mm}$ , masih dalam batas persyaratan SNI. Namun demikian, dapat dilihat bahwa proses infiltrasi air pada badan timbunan *MSE Wall* dapat mengakibatkan pergerakan yang sangat signifikan yang dapat membahayakan stabilitas *MSE Wall*. Oleh karena itu, penting untuk menjaga struktur *MSE Wall* agar tidak mengalami infiltrasi air dari sumber eksternal.

Tabel 8. Pergerakan horizontal panel pasca saturasi

| Layer no. | Tinggi (m) | Pergerakan Horizontal final (mm) |
|-----------|------------|----------------------------------|
| Layer 1   | 0,3        | 0,00                             |
| Layer 2   | 0,6        | -11,00                           |
| Layer 3   | 0,9        | -9,00                            |
| Layer 4   | 1,2        | -7,00                            |
| Layer 5   | 1,5        | -7,00                            |
| Layer 6   | 1,8        | -3,00                            |
| Layer 7   | 2,1        | -4,00                            |
| Layer 8   | 2,4        | 0,00                             |
| Layer 9   | 2,7        | 8,00                             |
| Layer 10  | 3          | 15,00                            |



Gambar 10. Pergerakan horizontal pada panel

#### 5.4. Penurunan panel

Pengamatan terhadap penurunan vertikal panel dilakukan pada sepuluh titik yang terdapat pada sepuluh panel bagian tengah seperti pada **Gambar 2(b)**. Monitoring pergerakan panel diambil awal ketika awal masa konstruksi masing-masing layer hingga akhir masa saturasi. **Gambar 11** dan **Tabel 8** menunjukkan bahwa penurunan panel terjadi secara dominan ketika masa konstruksi berlangsung. Ketika masa pembebanan dan saturasi berlangsung, tidak tercatat adanya penambahan penurunan pada panel secara signifikan.

**Tabel 9. Penurunan panel pasca saturasi**

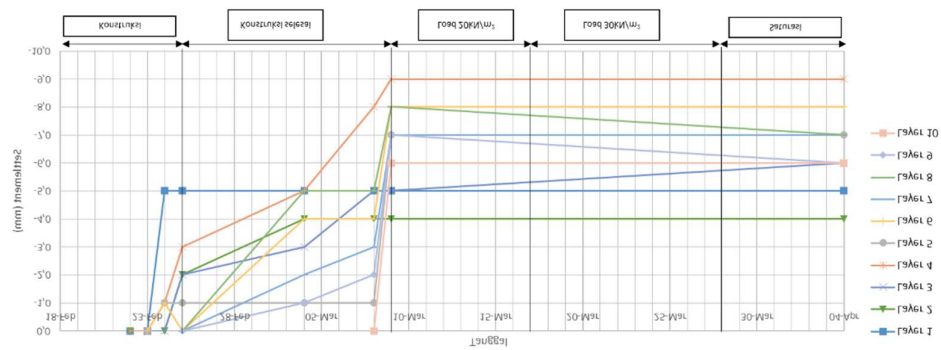
| Layer no. | Tinggi (m) | Settlement final (mm) |
|-----------|------------|-----------------------|
| Layer 1   | 0,3        | -5,00                 |
| Layer 2   | 0,6        | -4,00                 |
| Layer 3   | 0,9        | -6,00                 |
| Layer 4   | 1,2        | -9,00                 |
| Layer 5   | 1,5        | -9,00                 |

**Tabel 10. Penurunan panel pasca saturasi**

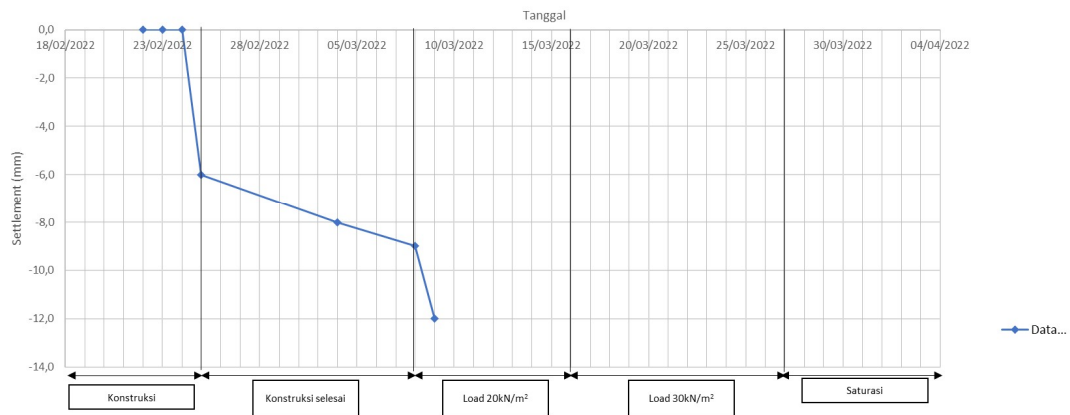
| Layer no. | Tinggi (m) | Settlement final (mm) |
|-----------|------------|-----------------------|
| Layer 6   | 1,8        | -8,00                 |
| Layer 7   | 2,1        | -7,00                 |
| Layer 8   | 2,4        | -7,00                 |
| Layer 9   | 2,7        | -6,00                 |
| Layer 10  | 3          | -6,00                 |

#### 5.5. Penurunan tanah dasar

Pengamatan terhadap penurunan tanah dasar dilakukan menggunakan satu titik *settlement plate* yang dipasang pada tanah dasar. Pengamatan hanya dilakukan hingga masa akhir konstruksi karena pada masa pembebanan *settlement plate* tertutup oleh beban yang diberikan. Penurunan tanah yang terjadi hingga masa akhir konstruksi adalah 9 mm. Setelah dilakukan pembebanan 10 kN/m<sup>2</sup>, terjadi penambahan penurunan tanah sebesar 3 mm menjadi total 12 mm.



**Gambar 11. Pergerakan vertikal pada panel**



**Gambar 12. Penurunan pada tanah dasar**

## 6. Diskusi Hasil

### 6.1. Masa konstruksi

Pada masa konstruksi, terjadi kenaikan pada gaya tarik aksial dari masing-masing perkuatan. Hal ini terjadi akibat penambahan beban timbunan di bagian atas dari perkuatan. Besarnya gaya tarik aksial pada masing-masing perkuatan juga berkaitan erat dengan cara dan kondisi ketika pemadatan tanah dilakukan. Pada perkuatan di ketinggian 1,8 m dan 2,4 m terjadi penambahan yang signifikan pada saat pengerjaan perkuatan level terakhir hingga masa konstruksi selesai. Pengaruh pembebanan terhadap gaya aksial dirasakan paling besar pada perkuatan paling atas dan secara gradual menurun hingga perkuatan paling bawah. Efek paling dominan dirasakan oleh perkuatan pada ketinggian 2,4 m (level paling atas). Hal ini dikarenakan pengaruh beban yang bekerja akan lebih besar pada kedalaman tersebut, juga dipengaruhi oleh efek *arching* dari perkuatan yang terjadi akibat pembebanan yang juga ditandai oleh pergerakan horizontal dinding yang sedikit tertarik ke arah dalam.

Besarnya gaya aksial pada masa konstruksi jauh lebih kecil dibandingkan dengan analisis desain. Kecenderungan besarnya beban tarik maksimum pada masa konstruksi paling besar terjadi pada bagian bawah, sesuai dengan perhitungan teoritis.

Tekanan vertikal pada saat selesai masa konstruksi cenderung lebih kecil dibandingkan dengan perhitungan teoritis. Hal ini dipengaruhi oleh pemadatan dan kadar air material ketika dilakukan pemadatan. Settlement dinding terjadi dominan saat masa konstruksi dengan besaran tidak lebih dari 6 mm. Penurunan terjadi pada tanah dasar pada akhir masa konstruksi sebesar 9 mm diakibatkan oleh beban struktur *MSE Wall*.

### 6.2. Efek pembebanan

Proses pembebanan menyebabkan kenaikan pada gaya tarik aksial pada masing-masing perkuatan dengan kenaikan yang paling signifikan terjadi pada perkuatan level paling atas dan secara gradual menurun hingga ke perkuatan level paling bawah. Hal tersebut berkaitan dengan pengaruh distribusi tegangan dari beban yang secara gradual berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman.

Pada pembebanan awal 20 kN/m<sup>2</sup>, terjadi efek kenaikan yang sangat signifikan pada perkuatan yang menunjukkan bahwa pembebanan langsung dimobilisasi oleh perkuatan seketika setelah pembebanan dilakukan. Ketika dilakukan penambahan beban hingga 30 kN/m<sup>2</sup>, terjadi peningkatan juga pada perkuatan, namun tidak begitu besar. Secara keseluruhan, besar gaya tarik aksial maksimum lebih kecil dibandingkan perhitungan analisis teoritis. Hal ini menunjukkan bahwa hasil analisis cenderung *overestimate* gaya

tarik aksial yang mungkin terjadi.

Terdapat perbedaan hasil perhitungan gaya aksial akibat efek pembebanan antara teori dengan praktik di lapangan. Pada perhitungan teoritis, kenaikan gaya tarik aksial akan semakin meningkat mengikuti kedalaman. Pengaruh pembebanan dianggap sama menerus hingga bagian bawah perkuatan. Berbeda dengan analisis teoritis, besarnya gaya tarik aksial yang terjadi justru lebih besar pada perkuatan level paling atas, dan selanjutnya berkurang hingga ke level paling bawah. Hal ini berkaitan dengan distribusi tegangan tambahan dari beban yang di aplikasikan yang secara gradual akan berkurang hingga ke bagian bawah.

Jika dibandingkan secara keseluruhan antara gaya tarik aksial yang terjadi terhadap kapasitas tarik dari material perkuatan, maka didapatkan kecenderungan bahwa gaya tarik aksial yang terjadi jauh lebih kecil dibandingkan kapasitas tarik yang diizinkan. Gaya tarik aksial yang terjadi maksimum hanya 31% dari kapasitas tarik izin. Dengan demikian, dapat diartikan bahwa untuk kasus ini, perkuatan yang digunakan melebihi kapasitas yang dibutuhkan/*overdesign*. Penelitian oleh Kahyaoglu et al. (2021) menunjukkan bahwa teori Coulomb cenderung *overestimate* beban tarik, terutama pada bagian bawah dinding.

Tekanan vertikal akibat pembebanan 30 kN/m<sup>2</sup> pada kedalaman 1,5 m dan 3 m dirasakan hingga 72% dan 12% dari beban yang diaplikasikan. Berbeda dengan analisis desain teoritis yang menganggap bahwa beban yang diaplikasikan merata nilainya dari atas hingga bawah dinding. Hal ini mengakibatkan perkiraan efek akibat beban pada bagian bawah dinding yang cenderung *overestimate*.

Pergerakan horizontal yang terjadi pada dinding bertambah secara signifikan akibat adanya pembebanan yang dilakukan. Pergerakan horizontal dinding pada ketinggian setengah panel ke atas mengalami deformasi ke dalam, sementara pada ketinggian setengah panel bawah mengalami deformasi ke dalam. Bentuk pergerakan tersebut mengindikasikan adanya dorongan pada bagian bawah timbunan akibat pembebanan. Mekanisme pergerakan dinding seperti ini seringkali terjadi pada struktur *MSE Wall* dimana dinding bagian bawah yang menerima akumulasi beban yang tinggi dari timbunan dan beban tambahan di atasnya akan terdorong ke bagian luar dinding.

Penurunan tanah yang terjadi akibat pembebanan hanya tercatat hingga beban 10 kN/m<sup>2</sup>. Beban tersebut mengakibatkan penambahan penurunan pada tanah dasar sebesar 3 mm menjadi total penurunan 12 mm.

### 6.3. Efek saturasi

Skenario saturasi yang dilakukan dalam penelitian ini

ini merupakan saturasi lokal yang hanya terjadi pada badan MSE Wall tanpa disertai dengan kenaikan muka air tanah. Hal ini untuk menggambarkan kondisi ekstrem penjumlahan badan timbunan akibat adanya penyerapan air dari luar seperti air hujan dan sumber lainnya. Pada penelitian ini dilakukan proses saturasi selama 5 hari.

Gaya tarik aksial akan meningkat akibat adanya tambahan beban dan proses saturasi. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Vibha & Divya (2021) yang menyebutkan bahwa adanya infiltrasi air akan menyebabkan peningkatan beban tarik pada masing-masing perkuatan. Kenaikan gaya tarik aksial yang terjadi akibat proses saturasi pada level perkuatan ke-2, ke-3, dan ke-4 senilai 0,2 kN. Pada level ke-4 yang terletak paling atas, kenaikan gaya tarik aksial yang terjadi mencapai 0,8 kN. Kenaikan pada level ke-4 terjadi paling besar dikarenakan adanya efek *arching* pada perkuatan level tersebut yang diakibatkan proses saturasi dan beban yang ada di atasnya.

Perhitungan desain perkuatan yang dilakukan tidak mempertimbangkan kondisi tersaturasi. Meskipun demikian, besarnya gaya tarik aksial yang terjadi masih jauh lebih kecil dibandingkan desain. Jika dibandingkan secara keseluruhan antara gaya tarik aksial yang terjadi terhadap kapasitas tarik dari material perkuatan, maka didapatkan kecenderungan bahwa gaya tarik aksial yang terjadi jauh lebih kecil dibandingkan kapasitas tarik yang diizinkan. Gaya tarik aksial yang terjadi maksimum hanya 35% dari kapasitas tarik izin. Dengan demikian, dapat diartikan bahwa untuk kasus ini, perkuatan yang digunakan melebihi kapasitas yang dibutuhkan/overdesign.

Tekanan vertikal akibat proses saturasi pada kedalaman 1,5 m tidak mengalami kenaikan, sementara pada kedalaman 3 m mengalami kenaikan 2,55 kN/m<sup>2</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa proses saturasi akan menaikkan berat jenis tanah pada bagian bawah. Meskipun proses saturasi sudah dilaksanakan per posisi sesuai pada gambar 2 (a), namun adanya lapisan drainase di bagian depan memungkinkan air untuk keluar dan turun ke bagian bawah timbunan. Dengan demikian, bagian bawah timbunan akan lebih jenuh dibandingkan bagian atas timbunan. Hal ini menunjukkan pentingnya lapisan drainase antar dinding dengan tanah. Lapisan drainase tersebut akan dengan cepat mengalirkan kelebihan air yang ada di layer paling atas menuju ke pipa kolektor pada lapisan paling bawah.

Pergerakan horizontal dinding yang cenderung bertambah karena terjadinya proses saturasi pada badan timbunan MSE Wall menunjukkan pentingnya menjaga timbunan untuk tetap dalam kondisi tidak tersaturasi. Infiltrasi air akan menyebabkan timbunan mengalami penurunan kuat geser yang menyebabkan pergerakan MSE Wall menjadi lebih

besar. Vibha & Divya (2021) menyebutkan penyebab bertambahnya deformasi ketika adanya infiltrasi air adalah karena terjadinya reduksi pada *matric suction* dari tanah. Ketika tanah yang berada dalam kondisi *unsaturated* mengalami infiltrasi air baik dari sumber air hujan maupun lainnya akan menyebabkan tekanan pori negatif akan menuju ke arah tekanan air pori positif, akibatnya akan terjadi pengurangan *suction* yang ada dalam tanah tersebut. Pada kondisi infiltrasi air hujan, bagian yang paling rentan mengalami pengurangan *suction* adalah 1/3 layer paling atas (Vibha & Divya, 2021).

Batasan pergerakan horizontal dinding selama masa konstruksi untuk dinding dengan perkuatan fleksibel adalah H/75 (SNI 8460:2017). Nilai pergerakan dinding selama masa layan diharapkan sudah sangat kecil dan tidak terjadi penambahan yang signifikan yang dapat membahayakan stabilitas struktur MSE Wall. Pengujian MSE Wall dalam kondisi tersaturasi ini memberikan gambaran bahwa infiltrasi air pada timbunan MSE Wall akan membuat kuat geser tanah menurun, menaikkan potensi penurunan tanah pada timbunan, menurunkan *suction*, yang menyebabkan perkuatan harus menahan beban tambahan yang lebih besar. Oleh karena itu, sangat penting untuk menjaga struktur MSE Wall dari infiltrasi air melalui air hujan, drainase jalan, maupun sumber air lainnya.

## 7. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Gaya tarik aksial yang diterima oleh perkuatan cenderung berbeda untuk masing-masing level ketinggian. Gaya tarik aksial paling besar terjadi pada perkuatan di level paling atas dan secara gradual berkurang seiring dengan peningkatan kedalaman perkuatan. Secara keseluruhan, gaya tarik aksial yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan desain. Secara keseluruhan, gaya tarik aksial yang terjadi pada perkuatan jauh lebih kecil dibandingkan kapasitas tarik izin dari material strip yang digunakan, yaitu hanya mencapai 35% dari kapasitas tarik izin.
2. Besarnya tekanan vertikal akibat penambahan beban akan berkurang seiring dengan bertambahnya kedalaman peninjauan. Efek penambahan beban akan lebih banyak ditanggung oleh perkuatan level paling atas.
3. Pergerakan horizontal yang terjadi semakin meningkat dengan bertambahnya beban dan selama proses saturasi berlangsung. Sekitar setengah dari dinding bagian atas mengalami pergerakan ke arah dalam dinding, sementara pergerakan setengah dinding bagian bawah mengarah ke luar timbunan. Pergerakan dinding bagian atas pada penelitian ini melebihi persyaratan

dalam SNI 8460:2017. Hal ini dikarenakan proses saturasi yang menyebabkan berkurangnya tegangan efektif, penurunan kuat geser, dan berkurangnya *suction* dari tanah timbunan. Oleh karena itu, penting untuk menjaga sistem *MSE Wall* untuk terjaga dalam kondisi tidak tersaturasi.

4. Infiltrasi air pada struktur *MSE Wall* harus dihindari karena dapat membuat kuat geser tanah menurun, menaikkan potensi penurunan tanah pada timbunan, menurunkan *suction*, yang menyebabkan perkuatan harus menahan beban tambahan yang lebih besar. Jika infiltrasi air terjadi akibat air hujan atau air permukaan, maka bagian paling atas adalah bagian yang paling rentan menerima efek infiltrasi air tersebut.
5. Instrumentasi yang lebih lengkap dan memadai pada pengujian skala penuh berikutnya perlu dilakukan, meliputi: penambahan *total pressure cell* untuk mengetahui perilaku tekanan tanah, inclinometer atau titik LVDT yang lebih banyak untuk monitoring deformasi dinding, dan pemasangan tensiometer untuk dapat melihat lebih jelas pengaruh dari saturasi terhadap besarnya *suction* yang hilang dari tanah.

Perlunya penelitian yang terinstrumentasi untuk melihat pengaruh beban dan penjenjutan timbunan terhadap struktur *MSE Wall* pada ketinggian dinding yang lebih tinggi dari 3 m.

## 8. Referensi

- Clayton, C. R. I., Woods, R. I., Bond, A. J., & Milititsky, J., 2013, *Earth Pressure and Earth-Retaining Structures* (Third Edition), CRC Press.
- FHWA-NHI-10-024, 2009, Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes-Volume I.
- Guerra-Escobar, P., León, A., & Zúñiga, D., 2024, Geosynthetics Sustainable Solutions in the Use of Marginal Fills in Reinforced Soil Structures. *Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)*.
- Jiang, Y., Han, J., Parsons, R. L., & Brennan, J. J., 2016, Field Instrumentation and Evaluation of Modular-Block MSE Walls with Secondary Geogrid Layers, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 142(12). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001573](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001573)
- Kahyaoglu, R., Sitki, M., & Üniversitesi, K., 2021, Model studies on polymer strip reinforced soil retaining walls, *Geomechanics and Engineering*, 25(5), 357–371. <https://doi.org/10.12989/gae.2021.25.5.357>
- Kilic, I. E., Cengiz, C., Edincliler, A., & Guler, E., 2021, Seismic behavior of geosynthetic-reinforced retaining walls backfilled with cohesive soil, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(5), 1256–1269. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2021.04.004>
- Koerner, R. M., 2005, *Designing with geosynthetics* (5th edition), Pearson Prentice Hall.
- Komak Panah, A., Yazdi, M., & Ghalandarzadeh, A., 2015, Shaking table tests on soil retaining walls reinforced by polymeric strips, *Geotextiles and Geomembranes*, 43(2), 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2015.01.001>
- Li, F., Guo, W., Pu, H., & Zheng, Y., 2024, Influence of geometric configuration on the deformation behavior of back-to-back MSE walls under dynamic loading, *Japanese Geotechnical Society Special Publication*, 10(25), 914–917. <https://doi.org/10.3208/jgssp.v10.os-14-01>
- Riccio, M., Ehrlich, M., & Dias, D., 2014, Field monitoring and analyses of the response of a block-faced geogrid wall using fine-grained tropical soils, *Geotextiles and Geomembranes*, 42(2), 127–138. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2014.01.006>
- SNI 8460:2017, Persyaratan perancangan geoteknik.
- Vibha, S., & Divya, P. V., 2021, Performance of Geosynthetic Reinforced MSE Walls with Marginal Backfills at the Onset of Rainfall Infiltration, *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 7(1). <https://doi.org/10.1007/s40891-020-00253-8>
- Won, M. S., Langcuyan, C. P., & Choi, G. H., 2021, Experimental study on the behavior of MSE wall having full-height rigid facing and segmental panel-type wall facing, *Open Geosciences*, 13(1), 932–943. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0278>
- Yang, K. H., Wu, H. M., Tseng, T. L., & Yoo, C., 2023, Model tests of geosynthetic-reinforced soil walls with marginal backfill subjected to rainfall, *Geotextiles and Geomembranes*, 51(2),

- 342–359.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.12.002>
- Yazdandoust, M., & Bahrami Balfeh Taimouri, A., 2022, Performance of two-tiered reinforced-soil retaining walls under strip footing load, *Geotextiles and Geomembranes*, 50(4), 545–565.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.04.002>
- Yoo, C., & Jung, H. S., 2004, Measured behavior of a geosynthetic-reinforced segmental retaining wall in a tiered configuration, *Geotextiles and Geomembranes*, 22(5), 359–376. [https://doi.org/10.1016/S0266-1144\(03\)00064-5](https://doi.org/10.1016/S0266-1144(03)00064-5)
- Yoo, C., & Kim, S. Bin., 2008, Performance of a two-tier geosynthetic reinforced segmental retaining wall under a surcharge load: Full-scale load test and 3D finite element analysis, *Geotextiles and Geomembranes*, 26(6), 460–472.  
<https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.05.008>
- Zheng, Y., Li, F., Guo, W., Wang, P., & Yang, G., 2023, Influence of facing conditions on the dynamic response of back-to-back MSE walls, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107650>