



## Performa Dinding Penahan Tanah Tipe GRS Akibat Konstruksi Fondasi Dangkal Pada Pembebanan Statis

Jenofer Y. Mangare<sup>#a</sup>, Roski R. I. Legrans<sup>#b</sup>, Lanny D. K. Manaroinson<sup>#c</sup>

<sup>#</sup>Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia

<sup>a</sup>jenofermangare021@student.unsrat.ac.id, <sup>b</sup>legransroski@unsrat.ac.id, <sup>c</sup>lanny.manaroinson@unsrat.ac.id

### Abstrak

Dinding penahan tanah tipe Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) merupakan sistem rekayasa geoteknik yang memanfaatkan interaksi antara tanah dan material geosintetik untuk meningkatkan stabilitas dan kapasitas dukung massa tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja dinding GRS akibat keberadaan fondasi dangkal yang dibebani secara statis, dengan fokus pada respons deformasi, stabilitas sistem, serta perubahan kapasitas dukung fondasi. Analisis dilakukan melalui pemodelan numerik berbasis metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak Plaxis 2D. Hasil penelitian menunjukkan bahwa variasi jarak fondasi terhadap dinding, yang direpresentasikan melalui rasio D/B, memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan, pergeseran lateral, dan kapasitas dukung fondasi. Pada rasio D/B kecil (0,5–1,5), deformasi mencapai nilai maksimum akibat interaksi intensif antara fondasi dan dinding. Kondisi optimum dicapai pada rasio D/B sekitar 2–3, di mana fondasi berada dalam zona perkuatan yang paling efektif sehingga deformasi minimum dan kapasitas dukung maksimum. Pada rasio D/B > 3, performa sistem menurun karena fondasi berada di luar area perkuatan. Temuan ini menegaskan pentingnya penentuan posisi fondasi terhadap dinding GRS dalam perencanaan geoteknik.

*Kata kunci: dinding GRS, fondasi dangkal, metode elemen hingga, penurunan, pergeseran lateral, kapasitas dukung*

### 1. Pendahuluan

Dinding penahan tanah tipe Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) merupakan inovasi penting dalam bidang geoteknik yang memadukan material timbunan granular dengan elemen penguat geosintetik, seperti geogrid atau geotekstil, untuk membentuk massa tanah bertulang yang memiliki kapasitas lateral lebih tinggi, efisiensi konstruksi yang baik, serta kemampuan deformasi yang lebih adaptif dibandingkan dinding penahan tanah konvensional berbahan beton. Teknologi yang pertama kali diperkenalkan oleh Henri Vidal pada tahun 1960-an ini telah menunjukkan efektivitasnya dalam berbagai aplikasi di Indonesia, termasuk perkuatan lereng jalan dan stabilisasi tebing sungai (Sianturi, 2022).

Berbagai studi numerik sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Srivastava et al. (2021), mengindikasikan bahwa parameter geometri dan konfigurasi sistem—khususnya rasio jarak fondasi terhadap muka dinding (D/B), lebar fondasi (B), serta panjang perkuatan (L)—memiliki pengaruh signifikan terhadap stabilitas struktur GRS. Parameter-parameter tersebut memengaruhi mekanisme guling, gelincir, kapasitas dukung, stabilitas global, serta besaran deformasi vertikal dan lateral yang terjadi pada sistem GRS dengan fondasi dangkal. Meskipun demikian, kajian yang mengevaluasi interaksi ketiga parameter tersebut secara simultan dan kontekstual masih diperlukan untuk memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif.

Penelitian ini menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D berbasis metode elemen hingga untuk menganalisis variasi panjang perkuatan (L), jarak fondasi terhadap dinding (D), dan lebar fondasi (B) dalam rangka mengidentifikasi konfigurasi yang menghasilkan performa optimum

pada sistem GRS. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain dinding GRS yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan, serta mendukung penerapan teknologi ini dalam berbagai kondisi lapangan di Indonesia.

Dinding penahan tanah *Geosynthetic Reinforced Soil* (GRS) merupakan inovasi geoteknik yang menggabungkan timbunan granular dengan penguat geosintetik (*geogrid*/geotekstil) untuk membentuk massa tanah bertulang dengan kapasitas lateral lebih tinggi, lebih ekonomis, cepat konstruksi, dan adaptif terhadap deformasi dibanding dinding beton konvensional. Teknologi ini, diperkenalkan Henri Vidal pada 1960-an, telah terbukti efektif di Indonesia untuk perkuatan lereng jalan dan tebing sungai (Sianturi, 2022).

Studi numerik seperti Srivastava *et al.* (2021) menunjukkan bahwa rasio jarak fondasi ke muka dinding ( $D/B$ ), lebar fondasi ( $B$ ), dan panjang perkuatan ( $L$ ) memengaruhi signifikan kestabilan (guling, gelincir, daya dukung, global stability) serta deformasi vertikal/lateral pada GRS dengan fondasi dangkal. Namun, diperlukan evaluasi gabungan parameter ini secara kontekstual.

Penelitian ini menggunakan PLAXIS 2D untuk menganalisis variasi  $L$ ,  $D$ , dan  $B$  guna mengoptimalkan performa GRS, berkontribusi pada desain yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1 Jenis Penelitian

Studi ini merupakan analisis numerik berbasis Finite Element Method (FEM) menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D untuk mengevaluasi performa dinding penahan tanah tipe Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) yang dipengaruhi oleh keberadaan fondasi dangkal pada kondisi pembebanan statis. Penelitian difokuskan pada optimasi parameter desain, khususnya panjang perkuatan ( $L$ ) dan rasio jarak fondasi terhadap lebar fondasi ( $D/B$ ), guna memperoleh konfigurasi yang memberikan stabilitas dan deformasi minimum. Pendekatan numerik ini memungkinkan evaluasi perilaku sistem secara komprehensif tanpa memerlukan uji lapangan, sehingga memberikan dasar teknis yang efisien dan andal untuk pengembangan desain GRS dalam berbagai kondisi geoteknik.

### 2.2 Metode Elemen Hingga/Finite Element Method (FEM)

Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM) bekerja dengan membagi domain analisis menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung pada titik-titik nodal, sehingga memungkinkan representasi perilaku mekanis yang kompleks secara numerik (Zienkiewicz & Taylor, 2005). Dalam konteks analisis dinding penahan tanah tipe GRS, penggunaan PLAXIS 2D memberikan sejumlah keunggulan yang relevan secara teknis dan praktis, antara lain:

#### 1. Kemampuan Memodelkan Geometri Rumit dan Material Nonlinier

PLAXIS 2D mampu merepresentasikan geometri dinding GRS yang tidak seragam serta memodelkan perilaku tanah nonlinier, termasuk perubahan kondisi tanah dari keadaan longgar menjadi padat akibat pembebanan. Selain itu, perilaku geosintetik seperti geogrid dapat dimodelkan sebagai elemen yang mengalami regangan elastis, sehingga respons interaksi tanah-perkuatan dapat ditangkap secara lebih realistis.

#### 2. Representasi Interaksi Tanah–Struktur Secara Realistis dalam Domain 2D

Perangkat lunak ini memungkinkan pemodelan interaksi kontak yang akurat, termasuk gesekan antara tanah timbunan dan geogrid (misalnya interface reduction factor  $R_{inter} = 0.7$ ), interaksi geogrid dengan modular block, serta kontak antara fondasi dan tanah dasar. Dengan demikian, distribusi gaya geser, gaya tarik, dan transfer tegangan dapat direpresentasikan mendekati kondisi lapangan.

#### 3. Analisis Terpadu terhadap Deformasi, Tekanan Pori, dan Gaya Dalam

Dalam satu skenario simulasi, PLAXIS 2D mampu menghasilkan informasi komprehensif berupa deformasi lateral dinding, penurunan fondasi, tekanan pori pada kondisi drained, gaya geser tanah, serta tegangan tarik pada geogrid. Integrasi berbagai parameter ini memungkinkan evaluasi performa sistem GRS secara menyeluruh.

#### 4. Identifikasi Rasio D/B Optimal Berdasarkan Kondisi Kegagalan

Melalui pembebanan bertahap hingga mencapai kondisi kegagalan ( $FS = 1.0$ ), PLAXIS 2D dapat digunakan untuk menentukan rasio D/B yang memberikan performa optimum. Misalnya, fondasi dengan  $D/B = 1.0$  mampu menahan beban hingga 180 kPa, sedangkan  $D/B = 0.5$  mengalami kegagalan pada sekitar 120 kPa. Informasi ini sangat berguna sebagai dasar rekomendasi desain praktis untuk konfigurasi fondasi terhadap dinding GRS.

### 2.3 Data Penelitian

Data yang akan digunakan dalam penelitian adalah data sekunder dari literatur (Srivastava et al. 2021, Bowles 1989).

#### 2.3.1 Data Tanah

Pemodelan tanah pada analisis ini menggunakan Mohr–Coulomb Model, yang merepresentasikan perilaku elastis–plastis dengan parameter kekuatan geser internal. Seluruh material tanah dimodelkan dalam kondisi drained, sehingga perubahan tekanan pori dan respons konsolidasi dapat disimulasikan secara realistis sesuai kondisi lapangan.

Parameter tanah yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Tanah timbunan (*loose sand*)
  - Berat isi tak jenuh ( $\gamma_{\text{unsat}}$ ) = 12 kN/m<sup>3</sup>
  - Berat isi jenuh ( $\gamma_{\text{sat}}$ ) = 16 kN/m<sup>3</sup>
  - Sudut geser dalam ( $\phi$ ) = 29°
  - Modulus elastisitas ( $E$ ) = 7 MPa
  - Poisson's ratio ( $\nu'$ ) = 0.30
- Tanah dasar (*medium sand*)
  - Berat isi tak jenuh ( $\gamma_{\text{unsat}}$ ) = 14 kN/m<sup>3</sup>
  - Berat isi jenuh ( $\gamma_{\text{sat}}$ ) = 18 kN/m<sup>3</sup>
  - Sudut geser dalam ( $\phi$ ) = 32°
  - Modulus elastisitas ( $E$ ) = 19 MPa
  - Poisson's ratio ( $\nu'$ ) = 0.30

Model Mohr–Coulomb dipilih karena kesederhanaannya, kestabilan numeriknya, serta kemampuannya menangkap perilaku dominan tanah granular pada kondisi pembebanan statis.

#### 2.3.2 Data Beton

Elemen struktural berupa footing, leveling pad, dan modular block dimodelkan sebagai material linear elastic, non-porous, sesuai karakteristik beton yang dominan elastis pada rentang tegangan kerja.

Parameter material beton:

- Berat isi ( $\gamma$ ) = 25 kN/m<sup>3</sup>
- Modulus elastisitas ( $E$ ) = 30 GPa
- Poisson's ratio ( $\nu'$ ) = 0.15

Dimensi elemen struktural:

- Footing: 1.0 m × 0.5 m
- Leveling pad: 2.0 m × 0.2 m
- Modular block: 1.5 m × 0.6 m

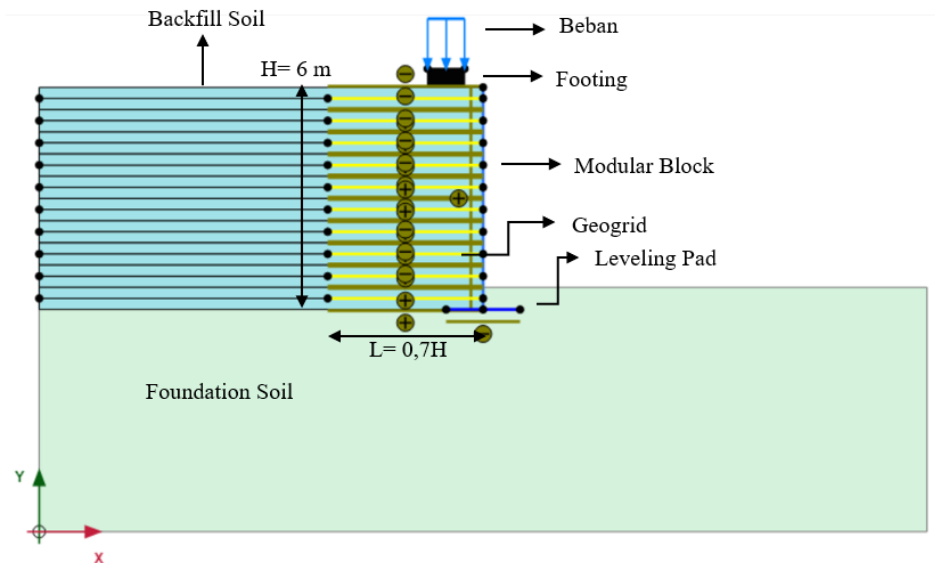
Pemodelan elastis linier dipilih untuk memastikan distribusi tegangan dan interaksi footing–tanah dapat dianalisis tanpa kompleksitas perilaku nonlinier beton.

#### 2.3.3 Data Geogrid

Material geogrid dimodelkan sebagai tension member yang hanya bekerja dalam tarik, dengan perilaku linear elastis. Tipe geogrid yang digunakan mengacu pada Tencate Miragrid 3XT dengan kekakuan aksial:

- Axial stiffness ( $EA$ ) = 1000 kN/m
- Faktor interaksi tanah–geogrid ( $R_{\text{inter}}$ ) = 0.7
- Panjang perkuatan ( $L$ ) = 0.7H, dengan  $H$  = 6 m

- Spasi vertikal geogrid = konstan pada seluruh tinggi dinding
- Pemodelan ini memungkinkan simulasi distribusi gaya tarik geogrid, interaksi dengan tanah timbunan, serta kontribusinya terhadap stabilitas sistem GRS secara akurat.



**Gambar 1.** Pemodelan Dinding Penahan Tanah Tipe GRS pada PLAXIS 2D

### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Penurunan pada Fondasi

Grafik pada Gambar 2 menunjukkan hubungan antara beban vertikal (kN) dan penurunan maksimum fondasi (m) untuk berbagai variasi rasio D/B. Secara umum, seluruh kurva memperlihatkan tren peningkatan penurunan seiring bertambahnya beban, namun dengan karakteristik yang berbeda bergantung pada jarak fondasi terhadap dinding GRS.

##### 1. Perilaku Penurunan pada Rasio D/B Kecil (0.5–1.5)

Rasio D/B kecil menghasilkan penurunan terbesar pada setiap tingkat beban. Hal ini disebabkan oleh posisi fondasi yang berada sangat dekat dengan muka dinding, sehingga interaksi tanah–struktur menjadi lebih intensif dan zona perkuatan belum termobilisasi secara optimal. D/B = 0.5 menunjukkan kurva paling curam, menandakan deformasi cepat meningkat bahkan pada beban rendah. D/B = 1 dan 1.5 menunjukkan respons yang sedikit lebih baik, tetapi tetap berada pada kelompok penurunan tinggi.

##### 2. Perilaku pada Rasio D/B Menengah (2–3)

Rentang ini memperlihatkan penurunan paling kecil untuk seluruh variasi beban. Fondasi berada dalam zona perkuatan aktif, sehingga kekakuan sistem meningkat. Kurva D/B = 2 dan D/B = 3 relatif landai, menunjukkan deformasi yang terkendali meskipun beban meningkat. Rentang ini mengindikasikan konfigurasi optimum, konsisten dengan teori dan hasil penelitian sebelumnya.

##### 3. Perilaku pada Rasio D/B Besar (3.5–6)

Pada jarak yang lebih jauh dari dinding, penurunan kembali meningkat secara bertahap. Hal ini terjadi karena fondasi mulai berada di luar zona pengaruh geogrid, sehingga kontribusi perkuatan terhadap kekakuan sistem berkurang. Kurva D/B = 4 hingga D/B = 6 menunjukkan pola penurunan yang lebih besar dibandingkan D/B = 2–3, tetapi tetap lebih kecil dibandingkan D/B kecil.

##### 4. Tren Umum dan Implikasi Desain

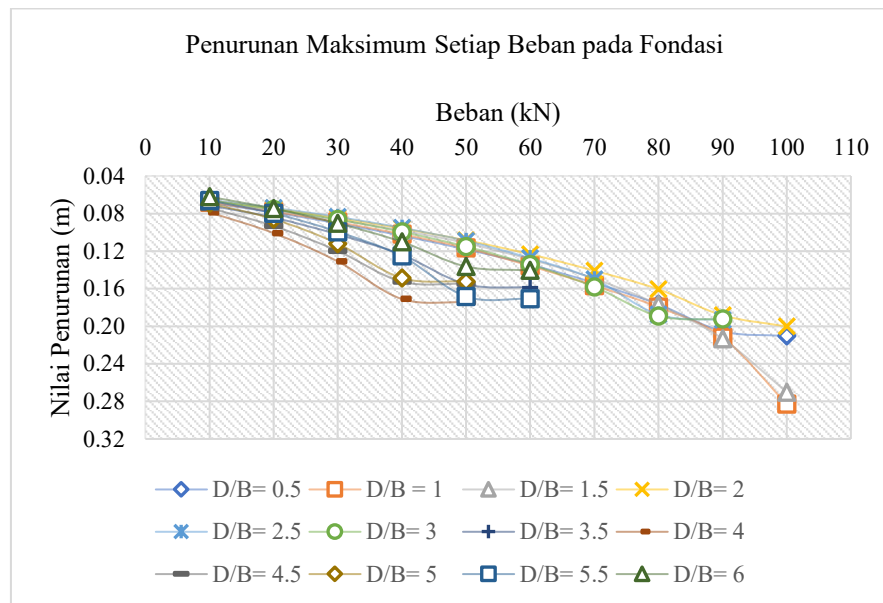
D/B kecil → deformasi tinggi, risiko instabilitas meningkat

D/B optimum (2–3) → deformasi minimum, kapasitas dukung maksimum

D/B besar → perkuatan tidak termobilisasi, performa menurun

Temuan ini memperkuat bahwa posisi relatif fondasi terhadap dinding GRS merupakan

parameter kritis dalam desain, terutama untuk memastikan deformasi yang terkendali dan kapasitas dukung yang memadai.



**Gambar 2.** Grafik Penurunan Maksimum Setiap Beban pada Fondasi

Grafik pada Gambar 3 menunjukkan hubungan antara beban vertikal dan penurunan relatif fondasi ( $s/B$ ) untuk berbagai variasi rasio  $D/B$ . Penyajian dalam bentuk  $s/B$  memungkinkan evaluasi deformasi yang terstandarisasi, sehingga perbandingan antar skenario menjadi lebih representatif.

### 1. Perilaku Penurunan Relatif pada $D/B$ Kecil (0.5–1.5)

Kelompok kurva  $D/B$  kecil memperlihatkan nilai  $s/B$  tertinggi pada seluruh rentang beban. Karakteristik utamanya:

- Penurunan relatif meningkat tajam bahkan pada beban rendah.
- Fondasi berada sangat dekat dengan dinding GRS, sehingga zona perkuatan belum termobilisasi secara efektif.
- Interaksi tanah–struktur yang intensif menyebabkan deformasi vertikal dan lateral yang besar.

Secara geoteknis, kondisi ini menunjukkan bahwa  $D/B$  kecil tidak direkomendasikan karena menghasilkan deformasi berlebih dan potensi instabilitas.

### 2. Perilaku Optimum pada $D/B$ Menengah (2–3)

Kurva untuk  $D/B = 2, 2.5$ , dan  $3$  menunjukkan nilai  $s/B$  paling rendah dan peningkatan yang paling landai terhadap beban. Fenomena ini terjadi karena:

- Fondasi berada dalam zona perkuatan aktif, di mana geogrid termobilisasi secara optimal.
- Kekakuan sistem meningkat, sehingga deformasi relatif dapat ditekan.
- Distribusi tegangan lebih merata antara fondasi, tanah timbunan, dan lapisan perkuatan.

Rentang ini mengindikasikan konfigurasi optimum, konsisten dengan teori GRS dan hasil penelitian numerik sebelumnya.

### 3. Perilaku pada $D/B$ Besar (3.5–6)

Pada jarak yang lebih jauh dari dinding, nilai  $s/B$  kembali meningkat secara bertahap.

Penyebabnya:

- Fondasi mulai berada di luar zona pengaruh geogrid.
- Kontribusi perkuatan terhadap kekakuan sistem berkurang.
- Tanah dasar memikul beban lebih dominan, sehingga deformasi meningkat.

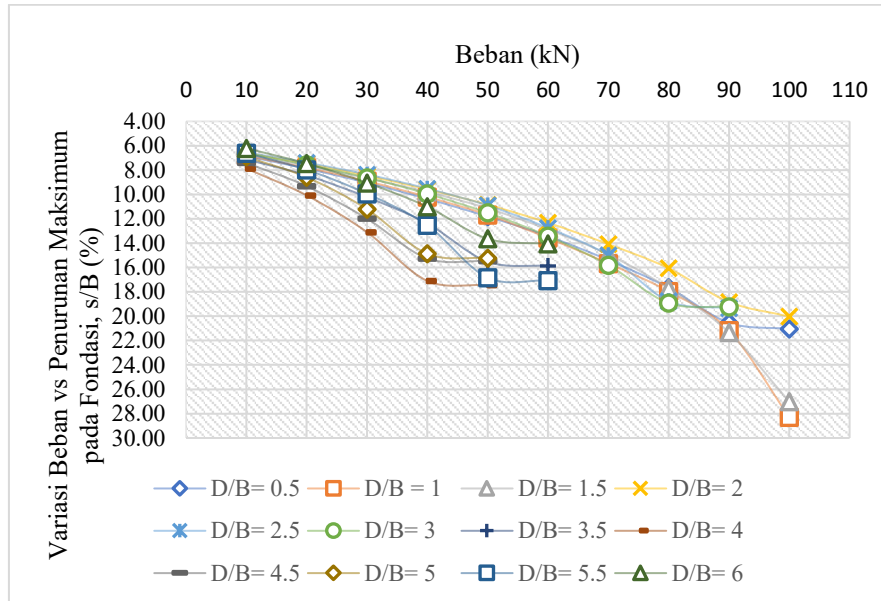
Meskipun deformasi tidak sebesar  $D/B$  kecil, performanya tetap lebih rendah dibandingkan  $D/B$  optimum.

### 4. Tren Umum dan Implikasi Desain

- $D/B$  kecil (0.5–1.5): deformasi relatif tinggi, risiko instabilitas meningkat.
- $D/B$  optimum (2–3): deformasi minimum, respons paling stabil, kapasitas dukung maksimum.

- D/B besar ( $>3$ ): perkuatan tidak termobilisasi, performa menurun.

Temuan ini menegaskan bahwa penempatan fondasi relatif terhadap dinding GRS merupakan parameter desain yang sangat menentukan, terutama dalam konteks deformasi yang diizinkan dan efisiensi perkuatan.



Gambar 3. Variasi Beban vs Penurunan Maksimum pada Fondasi, s/B (%)

### 3.2 Perpindahan Lateral pada Dinding Penahan Tanah

Grafik pada Gambar 4 menunjukkan hubungan antara beban vertikal (kN) dan perpindahan lateral maksimum dinding GRS (m) untuk berbagai variasi rasio D/B. Secara umum, seluruh kurva memperlihatkan peningkatan perpindahan lateral seiring bertambahnya beban, namun dengan karakteristik yang berbeda bergantung pada posisi fondasi terhadap dinding.

#### 1. Perilaku Perpindahan Lateral pada D/B Kecil (0.5–1.5)

Rasio D/B kecil menghasilkan perpindahan lateral terbesar pada seluruh tingkat beban. Karakteristik teknisnya:

- Fondasi berada sangat dekat dengan dinding, sehingga beban vertikal menghasilkan tekanan lateral tambahan yang signifikan.
- Zona perkuatan belum termobilisasi secara optimal, menyebabkan dinding lebih mudah mengalami rotasi dan deformasi lateral.
- Kurva D/B = 0.5 menunjukkan perpindahan paling besar dan peningkatan paling curam, menandakan kondisi paling kritis.

Secara geoteknis, kondisi ini menunjukkan bahwa fondasi yang terlalu dekat dengan dinding GRS meningkatkan risiko deformasi lateral berlebih.

#### 2. Perilaku Optimum pada D/B Menengah (2–3)

Kurva untuk D/B = 2, 2.5, dan 3 menunjukkan perpindahan lateral paling kecil dan peningkatan yang paling terkendali. Fenomena ini terjadi karena:

- Fondasi berada dalam zona perkuatan aktif, sehingga geogrid termobilisasi secara efektif untuk menahan gaya lateral.
- Kekakuan sistem meningkat, mengurangi rotasi dan pergeseran dinding.
- Distribusi tegangan lebih stabil antara tanah timbunan, geogrid, dan blok modular.

Rentang ini kembali menegaskan bahwa D/B = 2–3 merupakan konfigurasi optimum untuk meminimalkan deformasi lateral.

#### 3. Perilaku pada D/B Besar (3.5–6)

Pada jarak yang lebih jauh dari dinding, perpindahan lateral kembali meningkat secara bertahap. Penyebabnya:

- Fondasi mulai berada di luar zona pengaruh perkuatan.
- Beban vertikal tidak lagi termobilisasi oleh sistem GRS, sehingga dinding menerima efek lateral yang lebih besar dari deformasi tanah di belakangnya.

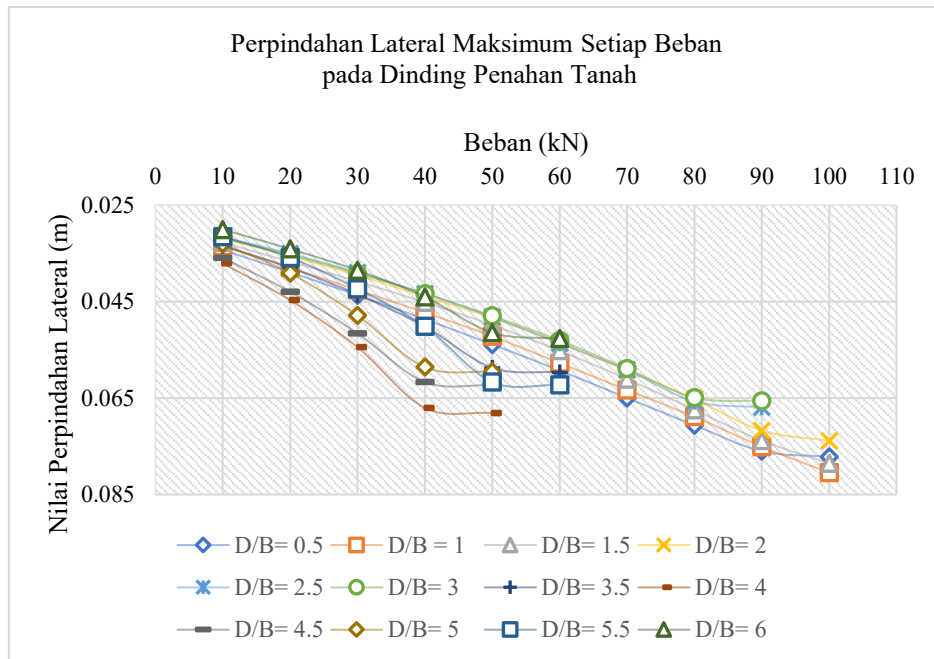
- Kurva  $D/B = 4$  hingga  $6$  menunjukkan perpindahan yang lebih besar dibandingkan  $D/B$  optimum, tetapi tetap lebih kecil dibandingkan  $D/B$  kecil.

Hal ini menunjukkan bahwa perkuatan geogrid memiliki batas jangkauan efektif, dan fondasi yang terlalu jauh tidak lagi mendapat manfaat dari sistem GRS.

#### 4. Tren Umum dan Implikasi Desain

- $D/B$  kecil ( $0.5-1.5$ ): perpindahan lateral tinggi, risiko instabilitas meningkat.
- $D/B$  optimum ( $2-3$ ): perpindahan minimum, respons paling stabil, mobilisasi perkuatan maksimal.
- $D/B$  besar ( $>3$ ): kontribusi perkuatan berkurang, performa menurun.

Temuan ini memperkuat bahwa posisi fondasi relatif terhadap dinding GRS merupakan parameter desain yang sangat menentukan, terutama dalam konteks kontrol deformasi lateral dan stabilitas jangka panjang.



**Gambar 4.** Grafik Perpindahan Lateral Maksimum Setiap Beban pada Dinding Penahan Tanah

Grafik pada Gambar 5 memperlihatkan hubungan antara beban vertikal (kN) dan perpindahan lateral relatif dinding GRS (%) untuk seluruh variasi rasio  $D/B$ . Penyajian dalam bentuk persentase memungkinkan evaluasi deformasi yang terstandarisasi, sehingga perbandingan antar-skenario menjadi lebih objektif.

#### 1. Tren Umum Perpindahan Lateral

Seluruh kurva menunjukkan pola yang konsisten:

- Perpindahan lateral meningkat seiring bertambahnya beban.
- Besarnya perpindahan sangat dipengaruhi oleh posisi fondasi terhadap dinding (rasio  $D/B$ ).
- Perbedaan antar-kurva semakin jelas pada beban menengah hingga tinggi, menandakan mobilisasi tegangan yang berbeda pada tiap konfigurasi.

#### 2. Perilaku pada $D/B$ Kecil ( $0.5-1.5$ )

Kelompok ini menunjukkan perpindahan lateral terbesar pada seluruh tingkat beban. Karakteristik teknis:

- Fondasi terlalu dekat dengan dinding sehingga beban vertikal menghasilkan tekanan lateral tambahan yang signifikan.
- Zona perkuatan belum termobilisasi secara efektif.
- Dinding mengalami rotasi dan pergeseran lateral yang lebih besar.

Secara desain,  $D/B$  kecil merupakan kondisi paling kritis dan tidak direkomendasikan untuk konfigurasi GRS dengan fondasi dangkal.

#### 3. Perilaku Optimum pada $D/B$ Menengah ( $2-3$ )

Kurva untuk  $D/B = 2, 2.5$ , dan  $3$  menunjukkan perpindahan lateral paling kecil dan

peningkatan paling landai. Fenomena ini terjadi karena:

- Fondasi berada dalam zona perkuatan aktif, sehingga geogrid termobilisasi secara optimal.
- Kekakuan sistem meningkat, mengurangi rotasi dinding.
- Distribusi tegangan lebih stabil dan merata.

Rentang ini kembali menegaskan bahwa  $D/B = 2-3$  adalah konfigurasi optimum untuk meminimalkan deformasi lateral.

#### 4. Perilaku pada D/B Besar (3.5–6)

Pada jarak yang lebih jauh, perpindahan lateral kembali meningkat. Penyebabnya:

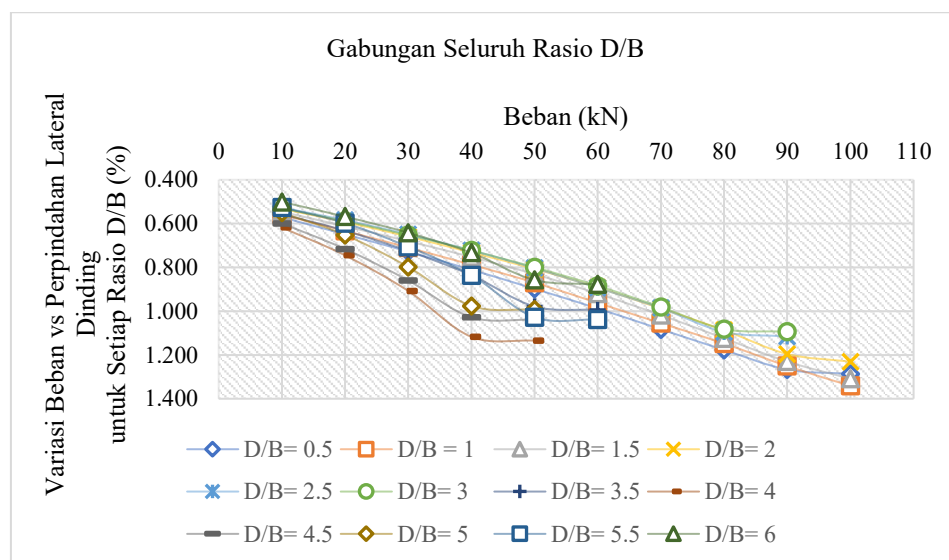
- Fondasi berada di luar jangkauan efektif perkuatan.
- Beban vertikal tidak lagi berinteraksi dengan sistem GRS secara signifikan.
- Dinding menerima efek lateral dari deformasi tanah belakang yang tidak diperkuat.

Meskipun perpindahan tidak sebesar D/B kecil, performanya tetap lebih rendah dibandingkan D/B optimum.

#### 5. Implikasi Desain dan Stabilitas Sistem

- D/B kecil (0.5–1.5): perpindahan lateral tinggi, risiko instabilitas meningkat.
- D/B optimum (2–3): perpindahan minimum, stabilitas maksimum, mobilisasi perkuatan optimal.
- D/B besar ( $>3$ ): kontribusi perkuatan berkurang, performa menurun.

Temuan ini memperkuat bahwa posisi fondasi relatif terhadap dinding GRS merupakan parameter desain yang sangat menentukan, terutama dalam konteks kontrol deformasi lateral dan stabilitas jangka panjang.



Gambar 5. Variasi Beban vs Perpindahan Lateral Dinding untuk Setiap Rasio D/B (%)

### 3.3 Kapasitas Dukung Maksimum

Grafik pada Gambar 6 menunjukkan hubungan antara rasio D/B pada sumbu horizontal dan beban ultimit fondasi (kN) pada sumbu vertikal. Dua kurva ditampilkan: kurva data aktual dan kurva tren. Keduanya memperlihatkan pola penurunan kapasitas beban seiring bertambahnya jarak fondasi dari dinding GRS.

#### 1. Tren Umum Kapasitas Beban terhadap Rasio D/B

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa:

- Semakin besar rasio D/B, semakin kecil kapasitas beban ultimit fondasi.
- Kurva tren menurun secara konsisten, menandakan hubungan negatif yang kuat antara jarak fondasi dan kekuatan dukung sistem GRS.
- Kapasitas beban tertinggi terjadi pada D/B kecil, sedangkan kapasitas terendah terjadi pada D/B besar.

Pola ini mencerminkan bahwa kontribusi perkuatan geogrid terhadap peningkatan kapasitas dukung hanya efektif dalam jarak tertentu dari dinding.

## 2. Perilaku pada D/B Kecil (0.5–1.5)

Pada rentang ini, grafik menunjukkan kapasitas beban tertinggi, dengan nilai mendekati atau melebihi 120 kN. Fenomena ini terjadi karena:

- Fondasi berada sangat dekat dengan dinding GRS.
- Lapisan geogrid termobilisasi secara maksimal untuk menahan gaya vertikal dan lateral.
- Kekakuan sistem meningkat akibat interaksi tanah–perkuatan yang intensif.

Namun, meskipun kapasitas beban tinggi, hasil analisis sebelumnya menunjukkan bahwa deformasi (settlement dan lateral displacement) juga tinggi, sehingga kondisi ini tidak selalu ideal secara keseluruhan.

## 3. Perilaku Optimum pada D/B Menengah (2–3)

Pada rentang ini, kapasitas beban masih relatif tinggi (sekitar 100–110 kN), tetapi dengan deformasi yang jauh lebih kecil dibandingkan D/B kecil. Karakteristik teknis:

- Fondasi berada dalam zona perkuatan aktif, sehingga geogrid bekerja optimal.
- Sistem mencapai keseimbangan antara kekakuan, stabilitas, dan deformasi.
- Beban ultimit masih tinggi, tetapi perpindahan lateral dan penurunan berada pada nilai minimum.

Rentang ini kembali menegaskan bahwa  $D/B = 2-3$  merupakan konfigurasi optimum untuk desain GRS dengan fondasi dangkal.

## 4. Perilaku pada D/B Besar (3.5–6)

Pada jarak yang lebih jauh, grafik menunjukkan penurunan kapasitas beban yang signifikan, dengan nilai mendekati 60–80 kN. Penyebabnya:

- Fondasi berada di luar jangkauan efektif perkuatan geogrid.
- Beban vertikal tidak lagi termobilisasi oleh sistem GRS.
- Tanah dasar memikul beban secara dominan, sehingga kapasitas dukung menurun.

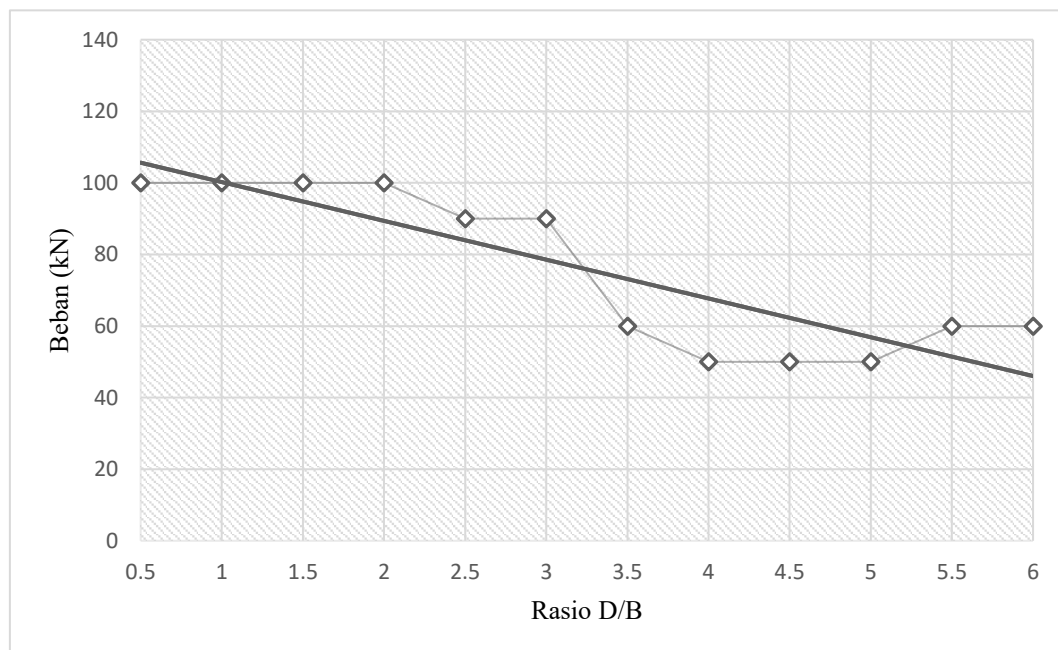
Meskipun deformasi lateral dan vertikal tidak sebesar D/B kecil, performa struktural secara keseluruhan lebih rendah dibandingkan D/B optimum.

## 5. Implikasi Desain

Temuan ini memberikan pedoman penting:

- D/B kecil  $\rightarrow$  kapasitas beban tinggi tetapi deformasi besar (tidak ideal).
- D/B optimum (2–3)  $\rightarrow$  kapasitas beban tinggi dan deformasi minimum (paling direkomendasikan).
- D/B besar  $\rightarrow$  kapasitas beban rendah karena perkuatan tidak termobilisasi.

Dengan demikian, rasio  $D/B = 2-3$  merupakan konfigurasi yang paling efisien dan stabil untuk fondasi dangkal di atas sistem GRS.



Gambar 6. Kapasitas Dukung Maksimum ( $q$ )

## 5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan PLAXIS 2D terhadap perilaku dinding penahan tanah tipe Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) yang menerima pengaruh pembebanan statis dari fondasi dangkal, diperoleh beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Rasio D/B merupakan parameter paling berpengaruh terhadap performa sistem GRS. Variasi jarak fondasi terhadap dinding, yang direpresentasikan melalui rasio D/B, terbukti memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan fondasi, perpindahan lateral dinding, dan kapasitas dukung ultimit. Semakin dekat fondasi ke dinding, semakin besar deformasi yang terjadi.
2. D/B kecil (0.5–1.5) menghasilkan deformasi terbesar dan kondisi paling kritis. Pada rasio D/B kecil:
  - Penurunan fondasi meningkat tajam pada setiap kenaikan beban.
  - Perpindahan lateral dinding mencapai nilai maksimum.
  - Interaksi tanah–struktur sangat intensif, sementara zona perkuatan belum termobilisasi secara efektif.

Kondisi ini menunjukkan bahwa fondasi yang ditempatkan terlalu dekat dengan dinding GRS tidak direkomendasikan karena berpotensi menurunkan stabilitas sistem.

3. D/B menengah (2–3) merupakan konfigurasi optimum  
Rentang D/B = 2–3 memberikan performa terbaik, ditandai dengan:
  - Penurunan fondasi paling kecil.
  - Perpindahan lateral minimum.
  - Kapasitas dukung fondasi tetap tinggi.
  - Mobilisasi geogrid berada pada kondisi paling efektif.

Zona ini merupakan jarak optimum di mana interaksi tanah–geogrid–fondasi mencapai keseimbangan antara kekakuan dan deformasi.

4. D/B besar ( $>3$ ) menurunkan efektivitas perkuatan  
Pada rasio D/B lebih besar dari 3:
  - Fondasi berada di luar zona pengaruh perkuatan.
  - Kapasitas dukung menurun secara signifikan.
  - Perpindahan lateral dan penurunan kembali meningkat.

Hal ini menunjukkan bahwa efektivitas geogrid memiliki jangkauan terbatas, dan fondasi yang terlalu jauh tidak lagi memperoleh manfaat dari sistem GRS.

5. Sistem GRS menunjukkan perilaku yang konsisten dan dapat diprediksi  
Hasil penelitian memperlihatkan pola deformasi dan kapasitas dukung yang konsisten pada seluruh variasi D/B, sehingga pendekatan numerik FEM terbukti efektif untuk mengevaluasi interaksi fondasi–dinding GRS tanpa memerlukan uji lapangan.

## Referensi

- Adisulung, N., Legrans, R. I., Sarajar, A. N. (2025). Studi Kestabilan Tanggul Pengaman Danau Tondano dengan Perkuatan Geosintetik. *TEKNO*, 23(91), 53-60.
- Ansori, E., Gofar, N. (2025). Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Tipe Mechanically Stabilized Earth (MSE) pada Jalan Layang Bantaian Sumatera Selatan. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(3), 659-670.
- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan Perancangan Geoteknik (SNI 8460:2017)*. Badan Standardisasi Nasional. Jakarta.
- Bathe, K. J. (1996). *Finite Element Procedures*. Prentice Hall. Englewood Cliffs.
- Bowles, J. E. (1989). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill. New York.
- Das, B. M. (1999). *Principles of Foundation Engineering* (5th ed.). PWS Publishing.
- Departemen Pekerjaan Umum Direktorat Jenderal Bina Marga - Direktorat Bina Teknik. (2009). *Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik*. Departemen Pekerjaan Umum. Jakarta.
- Koerner, R. M. (2012). *Designing with Geosynthetics*. Xlibris Corporation. Bloomington.
- Legrans, R. I. (2016). Pengaruh Jenis Tanah Terhadap Kestabilan Dinding MSE dengan Perkuatan Geotekstil di Daerah Reklamasi Malalayang. *TEKNO*, 14(66), 34-43.
- Look, B. G. (2007). *Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables*. Taylor & Francis. London.
- PLAXIS 2D User Manual. (2024). *PLAXIS Geotechnical Finite Element Software*. Bentley Systems.

- Sianturi, N. M. (2022). Analisis Perlindungan Tebing Sungai Bah Bolon Sumatera Utara Menggunakan Blok Beton Segmental dengan Perkuatan Geosintetik. *Jurnal Teknik Hidraulik*, 13(2), 113-126.
- Srivastava, A., J. S., C. V. B. (2021). Numerical Study of Geosynthetic-Reinforced Soil Wall Subjected to Static Footing Loading. *Proceedings of Engineering and Technology Innovation*, 17, 13-20.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons. New York.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. (1967). *Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons. New York.
- Truong, Q.-T., Tran, T.-Q. (2025). Settlement Analysis of Isolated Footings using PLAXIS 3D: Comparison Between Individual and Group Foundation Effects. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 14(9).
- Wenas, E. G. F., Legrans, R. I., Rondonuwu, S. G. (2025). Analisis Daya Dukung Fondasi Dangkal Dengan Perkuatan Geogrid. *TEKNO*, 23(91), 563-569.
- Xiao, C., Han, J., Zhang, Z. (2016). Experimental Study on Performance of Geosynthetic-Reinforced Soil Model Walls on Rigid Foundations Subjected to Static Footing Loading. *Geotextiles and Geomembranes*, 44(1), 81-94.
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals*. Elsevier. Amsterdam.
- Zulfiqar, M. (2024). Pengaruh Perkuatan Geogrid Terhadap Stabilitas Lereng Tanah Lunak [Skripsi]. Universitas Jambi