



Performa Dinding Penahan Tanah Tipe GRS (*Geosynthetic Reinforced Soil*) Pada Variasi Kekakuan *Facing*

Maria A. Pombu^{#a}, Roski R. I. Legrans^{#b}, Jack H. Ticoh^{#c}

[#]Program Studi Teknik Sipil Universitas Sam Ratulangi, Manado, Indonesia
^amariapombu021@student.unsrat.ac.id, ^blegransroski@unsrat.ac.id, ^cjack.ticoh@unsrat.ac.id

Abstrak

Kekakuan lentur *facing* (EI) merupakan parameter penting yang memengaruhi respons mekanik dinding Geosynthetic Reinforced Soil (GRS), namun belum secara eksplisit diakomodasi dalam sebagian besar pendekatan desain konvensional. Penelitian ini mengevaluasi pengaruh variasi EI terhadap kinerja dinding GRS dalam kerangka *performance-based design*, dengan indikator utama berupa deformasi lateral relatif (δ_H/H), regangan maksimum geosintetik (ϵ_{max}), gaya tarik maksimum perkuatan (T_{max}), dan faktor keamanan global (SF). Analisis dilakukan melalui studi parametrik berbasis metode elemen hingga (FEM) menggunakan PLAXIS 2D, serta dibandingkan dengan prediksi metode empiris K-Stiffness dan GRS-Non Load Bearing (GRS-NLB). Hasil menunjukkan bahwa peningkatan EI secara konsisten memperbesar deformasi lateral, regangan, dan gaya tarik perkuatan, sekaligus menurunkan faktor keamanan global. Meskipun demikian, seluruh kondisi tetap memenuhi batas stabilitas ($SF \geq 1,5$), dan tidak teridentifikasi fenomena *stiffness saturation* dalam rentang EI yang dianalisis. Perbandingan metode mengindikasikan bahwa pendekatan numerik lebih sensitif terhadap variasi EI dibandingkan metode empiris, yang relatif kurang responsif terhadap perubahan kekakuan struktural. Secara berbasis kinerja, *facing* dengan kekakuan rendah hingga semi-kaku memberikan respons yang lebih optimal, menegaskan bahwa peningkatan kekakuan tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan kinerja sistem.

Kata kunci: Geosynthetic Reinforced Soil, kekakuan, deformasi lateral, Finite Element Method, K-Stiffness, GRS-NLB

1. Pendahuluan

Dinding penahan tanah tipe Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) merupakan solusi geoteknik modern yang semakin banyak diterapkan dalam pembangunan infrastruktur. Sistem ini meningkatkan stabilitas massa tanah melalui interaksi antara material granular dan elemen perkuatan geosintetik. Dibandingkan dengan dinding penahan konvensional berbasis beton, GRS menawarkan keunggulan berupa fleksibilitas terhadap deformasi diferensial, efisiensi biaya, kemudahan konstruksi, serta kinerja yang lebih adaptif terhadap kondisi tanah dasar.

Meskipun demikian, performa sistem GRS tidak hanya ditentukan oleh sifat tanah dan karakteristik perkuatan, tetapi juga oleh kekakuan elemen *facing* sebagai komponen struktural pada bagian muka dinding. *Facing* tidak lagi sekadar berfungsi sebagai pelindung atau elemen estetika, melainkan berperan mekanis dalam mengendalikan deformasi lateral, memengaruhi distribusi tegangan, serta menentukan kompatibilitas deformasi antara tanah dan perkuatan.

Sebagian besar metode desain konvensional, seperti pendekatan kesetimbangan batas, belum secara eksplisit mempertimbangkan kontribusi kekakuan lentur *facing* (EI) terhadap respons mekanik sistem. Akibatnya, prediksi gaya tarik perkuatan dan deformasi cenderung konservatif serta kurang merepresentasikan perilaku aktual di lapangan. Studi eksperimental oleh Bathurst et al. menegaskan bahwa variasi kekakuan *facing* berpengaruh signifikan terhadap deformasi lateral dan mobilisasi gaya tarik geosintetik, sehingga menunjukkan bahwa *facing* merupakan komponen struktural aktif dalam sistem GRS. Namun, kajian sistematis mengenai

pengaruh EI melalui pendekatan numerik, khususnya dalam kerangka evaluasi berbasis kinerja yang mengintegrasikan parameter deformasi, regangan, gaya tarik, dan faktor keamanan, masih terbatas.

Selain itu, fenomena stiffness saturation—yakni kondisi ketika peningkatan kekakuan tidak lagi menghasilkan peningkatan kinerja signifikan—belum banyak dikaji dalam konteks evaluasi berbasis kinerja. Keterbatasan ini menegaskan perlunya penelitian yang mampu mengisi kesenjangan melalui analisis parametrik yang komprehensif dan terintegrasi.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi kekakuan lentur *facing* (EI) terhadap kinerja dinding GRS, yang direpresentasikan melalui deformasi lateral relatif (δ_h/H), regangan maksimum geosintetik (ϵ_{max}), gaya tarik maksimum perkuatan (T_{max}), serta faktor keamanan global (SF). Analisis dilakukan menggunakan metode elemen hingga (FEM) berbasis PLAXIS 2D untuk memperoleh gambaran respons mekanik sistem secara komprehensif. Hasil numerik kemudian dibandingkan dengan prediksi metode empiris K-Stiffness dan GRS–Non Load Bearing (GRS–NLB) guna mengevaluasi tingkat kesesuaian pendekatan empiris terhadap perilaku aktual struktur. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengidentifikasi rentang kekakuan *facing* yang memberikan kinerja paling optimal berdasarkan kriteria batas layan dan stabilitas, sehingga dapat menjadi dasar pengembangan desain dinding GRS yang lebih rasional dan berbasis kinerja.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis numerik berbasis Finite Element Method (FEM) dengan perangkat lunak PLAXIS 2D untuk mengevaluasi kinerja dinding penahan tanah tipe Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) akibat variasi kekakuan lentur *facing*.

2.1 Model dan Parameter

Model dinding GRS disusun dalam kondisi plane strain untuk merepresentasikan interaksi antara tanah, elemen perkuatan, dan *facing*. Sistem dianalisis menggunakan pendekatan elemen hingga dengan asumsi material homogen dan isotropis. Pemodelan dilakukan dengan perangkat lunak PLAXIS 2D, yang memungkinkan evaluasi respons mekanik secara komprehensif melalui analisis parametrik. Parameter utama yang digunakan dalam pemodelan meliputi:

- karakteristik tanah: sifat fisik dan mekanik material granular, termasuk berat jenis, sudut geser dalam, dan modulus elastisitas;
- perkuatan geosintetik: kekakuan tarik, kekuatan ultimit, serta interaksi dengan tanah;
- *facing*: variasi kekakuan lentur (EI) sebagai variabel utama dalam studi parametrik;
- kondisi batas: pembatasan gerakan lateral dan vertikal untuk merepresentasikan kondisi lapangan;
- kriteria evaluasi: deformasi lateral relatif (δ_h/H), regangan maksimum geosintetik (ϵ_{max}), gaya tarik maksimum perkuatan (T_{max}), serta faktor keamanan global (SF).

• Pemodelan Tanah

Tanah timbunan (backfill) dan tanah dasar (foundation soil) dimodelkan menggunakan model konstitutif Mohr–Coulomb yang merepresentasikan perilaku elastis–plastis tanah. Model ini dipilih karena kesederhanaannya sekaligus kemampuannya menggambarkan respons tegangan–regangan tanah granular dalam analisis numerik berbasis Finite Element Method (FEM).

Parameter tanah yang digunakan meliputi:

- Berat isi (γ)
- Kohesi efektif (c')
- Sudut geser dalam (ϕ')
- Modulus elastisitas (E)
- Rasio Poisson (ν)

Nilai parameter tersebut ditetapkan berdasarkan data geoteknik yang disajikan dalam Tabel 1 dan Tabel 2, yang masing-masing merepresentasikan kondisi tanah dasar dan tanah timbunan.

Tabel 1. Parameter Tanah Dasar (*Foundation Soil*)

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Berat isi tak jenuh	γ_{unsat}	17	kN/m ³
Berat isi jenuh	γ_{sat}	19	kN/m ³
Modulus elastisitas referensi	E_{ref}	25.000	kN/m ²
Rasio Poisson	ν	0,3	–
Kohesi efektif	c'	45	kPa
Sudut geser dalam	ϕ'	25	°

Tabel 2. Parameter Tanah Timbunan (*Backfill Soil*)

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Berat isi tak jenuh	γ_{unsat}	19	kN/m ³
Berat isi jenuh	γ_{sat}	20	kN/m ³
Modulus elastisitas referensi	E_{ref}	50.000	kN/m ²
Rasio Poisson	ν	0,3	–
Kohesi efektif	c'	5	kPa
Sudut geser dalam	ϕ'	30	°

• Pemodelan Geosintetik

Geosintetik dimodelkan sebagai elemen tarik (*geogrid*) dengan karakteristik utama berupa kekakuan aksial (EA). Material ini hanya bekerja dalam kondisi tarik dan berfungsi menahan deformasi lateral tanah, sehingga berperan penting dalam menjaga stabilitas sistem GRS. Parameter geosintetik yang digunakan meliputi:

- Kekakuan aksial (EA) sebagai representasi kapasitas perkuatan terhadap gaya tarik.
- Spasi vertikal perkuatan, yang menentukan distribusi interaksi antara tanah dan geosintetik. Nilai parameter tersebut ditetapkan berdasarkan data teknis yang disajikan dalam Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Geosintetik

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Kekakuan aksial	$J = EA$	1900	kN/m
Kuat tarik ultimit	T_{ult}	210	kN/m
Spasi vertikal perkuatan	S_v	0.2	m

• Pemodelan Facing

Facing dimodelkan sebagai elemen pelat (plate element) dengan variasi kekakuan lentur (EI), yang menjadi variabel utama dalam penelitian ini. Elemen pelat dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku struktural *facing* dalam menahan deformasi lateral serta mendistribusikan tegangan pada sistem GRS. Parameter utama yang digunakan meliputi:

- Kekakuan lentur (EI), divariasikan secara parametrik untuk merepresentasikan berbagai tingkat kekakuan *facing*.
- Rentang nilai EI, ditetapkan sesuai dengan data yang disajikan dalam Tabel 4.

Variasi EI ini memungkinkan evaluasi sistematis terhadap pengaruh kekakuan *facing* terhadap respons mekanik dinding GRS, sekaligus menjadi dasar dalam analisis berbasis kinerja.

• Aspek Teknis Pemodelan

Selain parameter material, pemodelan numerik juga mempertimbangkan aspek teknis berikut:

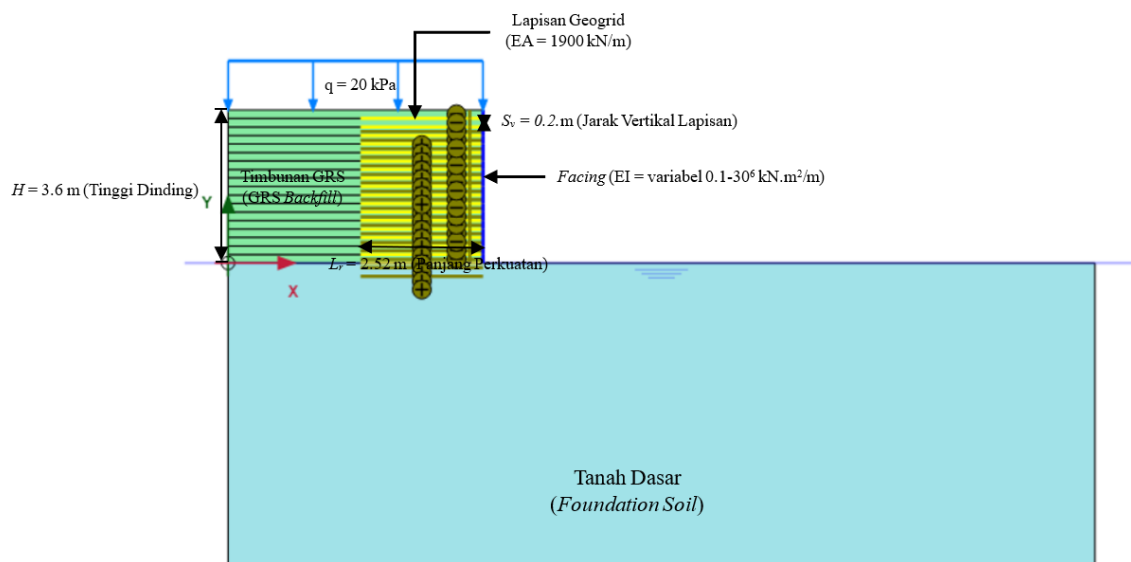
- Kondisi batas (boundary conditions): batas bawah model ditahan penuh (fixed), sedangkan batas samping dibatasi pergerakan horizontal untuk merepresentasikan kondisi lapangan secara realistis.
- Tahapan konstruksi (staged construction): proses penimbunan dimodelkan secara bertahap dengan aktivasi elemen geosintetik dan *facing* sesuai urutan konstruksi aktual, sehingga interaksi antar komponen dapat tergambarkan secara progresif.
- Pembentukan mesh: dilakukan dengan tingkat kehalusan tertentu, disertai refinement pada zona dinding untuk meningkatkan akurasi hasil analisis, khususnya pada area dengan konsentrasi tegangan dan deformasi tinggi.

Pendekatan ini digunakan untuk memastikan bahwa model numerik mampu merepresentasikan perilaku mekanis dinding GRS secara realistis serta menghasilkan respons

yang rasional dalam kerangka evaluasi berbasis kinerja.

Tabel 4. Variasi Parameter Kekakuan *Facing* (EI) dalam Studi Parametrik

FLEKSIBEL				
Produk	EI	EA	v	w
	(kN m ² /m)	(kN/m)		(kN/m/m)
Wrap-Around	0.1	1000	0.3	1
Gabion Tipis	1,000	16,000	0.25	1.6
Gabion Standar	5,000	27,000	0.25	2.7
Gabion Besar	10,000	34,000	0.25	3.4
SEMI-KAKU				
Produk	EI	EA	v	w
	(kN m ² /m)	(kN/m)		(kN/m/m)
Small Block	20,000	2.4×10 ⁶	0.2	5.5
Standard Block	50,000	3.4×10 ⁶	0.2	6.8
Thick Block	100,000	4.3×10 ⁶	0.2	8.2
Heavy Block	300,000	6.2×10 ⁶	0.2	10.5
Massive Block	500,000	7.5×10 ⁶	0.2	12
KAKU				
Produk	EI	EA	v	w
	(kN m ² /m)	(kN/m)		(kN/m/m)
Panel Tipis (~12 cm)	1,000,000	1.0×10 ⁷	0.2	14
Panel Standar (~15 cm)	3,000,000	1.6×10 ⁷	0.2	17.5
Panel Tebal (~20 cm)	10,000,000	3.0×10 ⁷	0.2	22
Panel Super Kaku	30,000,000	12×10 ⁷	0.2	24



Gambar 1. Model numerik dinding GRS dengan variasi kekakuan *Facing* (EI)

2.2. Variasi Parameter

Variabel utama dalam penelitian ini adalah kekakuan lentur *facing* (EI), yang divariasikan secara parametrik untuk mengevaluasi pengaruhnya terhadap respons mekanik dinding Geosynthetic Reinforced Soil (GRS). Variasi nilai EI ditetapkan berdasarkan rentang parameter yang disajikan dalam Tabel 4, dengan mempertahankan parameter lainnya dalam kondisi konstan.

Pendekatan ini memastikan bahwa perubahan respons struktur semata-mata dipengaruhi oleh variasi kekakuan *facing*.

Tujuan dari pendekatan parametrik ini adalah:

- Mengidentifikasi hubungan antara kekakuan *facing* dan kinerja sistem.
- Mengevaluasi kecenderungan terjadinya fenomena stiffness saturation dalam rentang kekakuan yang dianalisis.

Parameter performa yang dianalisis meliputi:

- Deformasi lateral relatif (δ_h/H): indikator utama pada kondisi Serviceability Limit State (SLS), yang menggambarkan tingkat deformasi global dinding terhadap tinggi total struktur.
- Regangan maksimum geosintetik (ϵ_{max}): merepresentasikan deformasi internal pada elemen perkuatan akibat mobilisasi gaya tarik selama proses pembebanan.
- Gaya tarik maksimum (T_{max}): menunjukkan besarnya gaya internal yang termobilisasi dalam sistem akibat interaksi antara tanah dan elemen perkuatan.
- Faktor keamanan global (SF): diperoleh melalui metode strength reduction pada analisis numerik untuk mengevaluasi stabilitas keseluruhan struktur dalam kondisi Ultimate Limit State (ULS).

Keempat parameter tersebut dipilih karena mampu merepresentasikan dua aspek utama dalam evaluasi kinerja dinding GRS, yaitu aspek layanan (serviceability) dan aspek stabilitas (ultimate). Dengan demikian, analisis ini memberikan gambaran komprehensif mengenai pengaruh variasi kekakuan *facing* terhadap respons struktur.

2.3 Metode Analisis

Penelitian ini menggunakan dua pendekatan analisis, yaitu analisis numerik dan analisis empiris, untuk mengevaluasi performa dinding Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) akibat variasi kekakuan *facing*.

2.3.1 Analisis Numerik

Analisis numerik dilakukan dengan perangkat lunak PLAXIS 2D berbasis Finite Element Method (FEM) untuk mensimulasikan respons mekanik sistem dinding GRS, meliputi deformasi, distribusi tegangan, serta gaya internal pada elemen perkuatan dan *facing*. Pemodelan dilakukan dalam kondisi plane strain dengan mempertimbangkan interaksi antara tanah, geosintetik, dan elemen struktur.

Proses analisis mengikuti tahapan konstruksi (staged construction), yang mencakup penimbunan bertahap, aktivasi elemen geosintetik dan *facing*, serta penerapan beban surcharge. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi konstruksi aktual di lapangan.

Evaluasi stabilitas global dilakukan dengan metode strength reduction, yaitu dengan mereduksi parameter kuat geser tanah hingga tercapai kondisi kegagalan, sehingga diperoleh nilai faktor keamanan global (SF). Selain itu, hasil analisis juga mencakup deformasi lateral (δ_h), distribusi gaya tarik geosintetik (T_{max}), serta regangan maksimum (ϵ_{max}).

2.3.2 Analisis Empiris

Sebagai pembanding terhadap hasil analisis numerik, digunakan metode empiris yang umum diterapkan dalam desain dinding GRS, yaitu:

- K-Stiffness Method: digunakan untuk memperkirakan gaya tarik maksimum (T_{max}) berdasarkan parameter kekakuan sistem, geometri dinding, serta kondisi pembebanan. Metode ini mempertimbangkan kontribusi kekakuan relatif dalam sistem tanah bertulang;
- GRS–Non Load Bearing (GRS–NLB) Method: digunakan untuk mengevaluasi respons dinding GRS tanpa adanya beban struktur tambahan di atasnya, dengan memperkirakan distribusi gaya tarik pada elemen perkuatan berdasarkan pendekatan empiris.

2.3.3 Perbandingan Metode

Perbandingan antara hasil analisis numerik dan empiris dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian serta sensitivitas masing-masing metode terhadap variasi kekakuan *facing* (EI). Analisis ini bertujuan mengidentifikasi perbedaan karakteristik prediksi antara kedua

pendekatan, khususnya dalam hal deformasi, gaya tarik maksimum, serta respons stabilitas sistem.

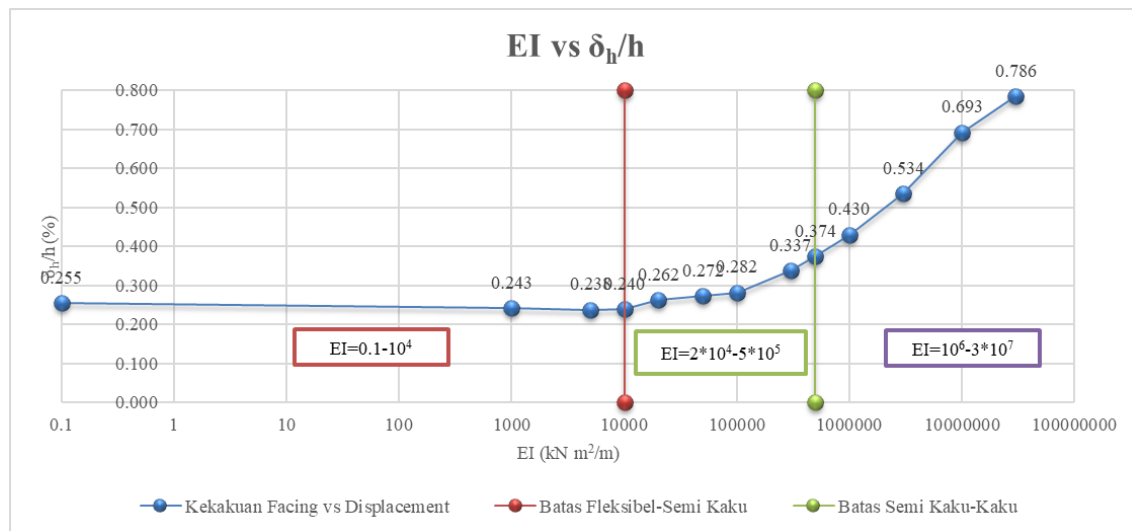
Melalui perbandingan ini, dapat dievaluasi keandalan metode empiris dalam merepresentasikan perilaku aktual dinding GRS, serta keunggulan pendekatan numerik dalam menangkap interaksi kompleks antara tanah, geosintetik, dan *facing* secara lebih komprehensif.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Deformasi Lateral (δ_h/H)

Analisis numerik menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan lentur *facing* (EI) secara konsisten diikuti oleh peningkatan deformasi lateral relatif dinding (δ_h/H). Hubungan antara EI dan δ_h/H tidak bersifat linier, melainkan menunjukkan pola perubahan yang kompleks. Pada rentang EI rendah hingga menengah, peningkatan deformasi terjadi lebih signifikan, sedangkan pada EI tinggi laju peningkatan deformasi cenderung lebih moderat.

Fenomena ini mengindikasikan adanya perubahan mekanisme interaksi antara tanah, perkuatan geosintetik, dan *facing*. Peningkatan kekakuan *facing* tidak serta-merta meningkatkan kekakuan global sistem, melainkan memodifikasi distribusi tegangan dan pola deformasi. Secara mekanis, *facing* yang lebih kaku membatasi deformasi lokal pada muka dinding, namun menyebabkan redistribusi tegangan ke dalam massa tanah bertulang dan elemen perkuatan. Akibatnya, deformasi global sistem justru meningkat. Kondisi ini menegaskan bahwa peningkatan EI tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan deformasi, dan dalam beberapa kasus dapat menghasilkan respons deformasi yang lebih besar akibat ketidakselarasan deformasi (*deformation incompatibility*) antar komponen sistem.



Gambar 2. Hubungan antara Kekakuan *Facing* (EI) dan Deformasi Lateral Relatif (δ_h/H)

Dari perspektif serviceability limit state, peningkatan δ_h/H akibat kenaikan EI menjadi indikator penting dalam evaluasi kinerja dinding GRS. Nilai deformasi lateral yang lebih besar berpotensi melampaui batas toleransi deformasi yang diizinkan, sehingga pemilihan kekakuan *facing* harus mempertimbangkan keseimbangan antara kontrol deformasi dan distribusi tegangan internal.

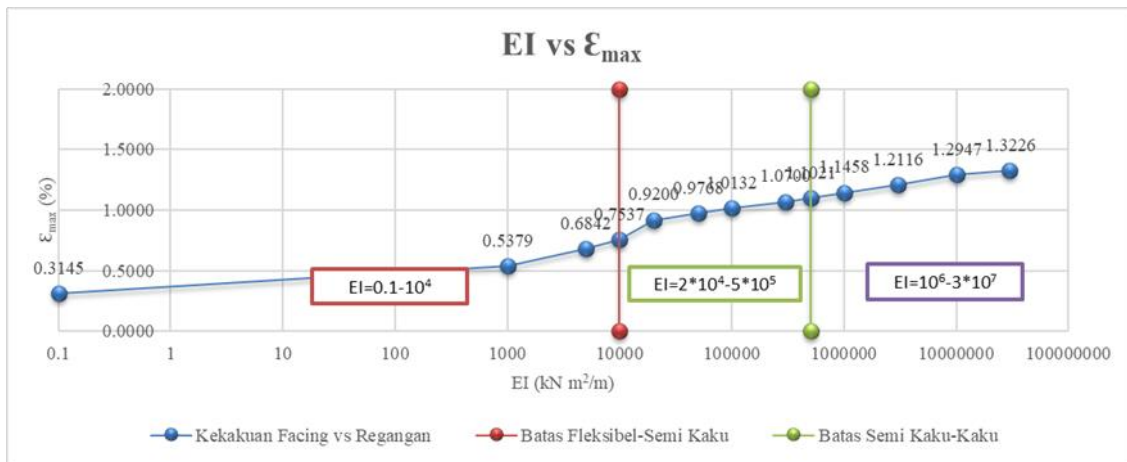
Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa desain dinding GRS tidak dapat hanya didasarkan pada peningkatan kekakuan struktural *facing*. Sebaliknya, desain harus mempertimbangkan respons sistem secara menyeluruh dalam kerangka berbasis kinerja, dengan memperhatikan kompatibilitas deformasi antara tanah, perkuatan, dan *facing*.

3.2 Regangan dan Gaya Tarik (ϵ_{max} & T_{max})

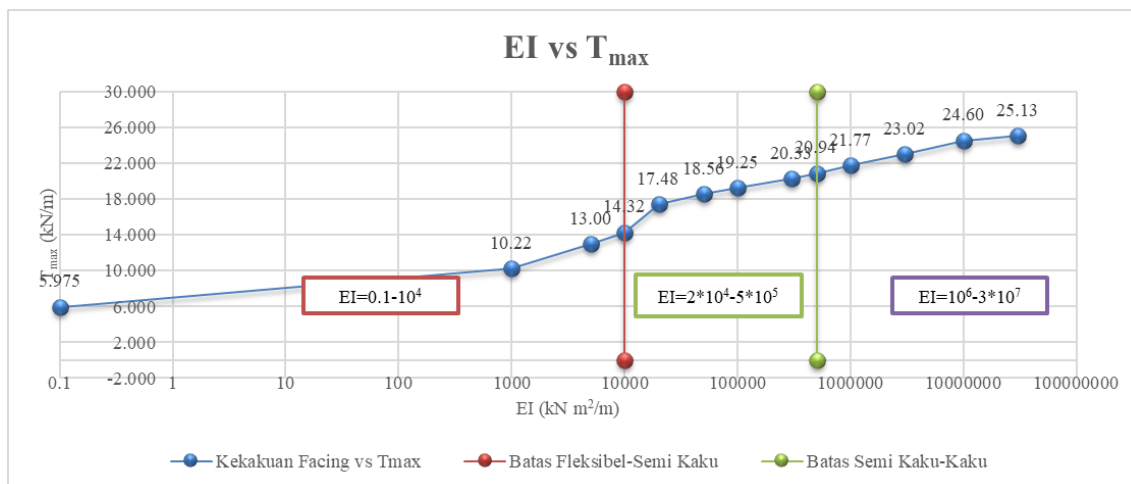
Analisis menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan lentur *facing* (EI) secara konsisten

diikuti oleh peningkatan regangan maksimum geosintetik (ϵ_{max}) dan gaya tarik maksimum perkuatan (T_{max}). Tren ini bersifat nonlinier, dengan peningkatan yang lebih signifikan pada rentang EI rendah hingga menengah, kemudian cenderung lebih moderat pada EI tinggi.

Secara mekanis, fenomena ini berkaitan dengan efek restrain yang dihasilkan oleh *facing* yang lebih kaku. *Facing* dengan kekakuan tinggi membatasi deformasi lokal pada muka dinding, namun menyebabkan redistribusi tegangan ke dalam massa tanah bertulang dan elemen geosintetik. Akibatnya, mobilisasi regangan pada perkuatan meningkat untuk menahan deformasi global sistem, yang selanjutnya menghasilkan peningkatan gaya tarik maksimum. Dengan kata lain, pembatasan deformasi lokal oleh *facing* tidak mengurangi beban internal, melainkan mengalihkan dan memusatkan respons ke elemen perkuatan.



Gambar 3. Hubungan antara Kekakuan *Facing* (EI) dan Gaya Tarik Maksimum Perkuatan (ϵ_{max})



Gambar 4. Hubungan antara Kekakuan *Facing* (EI) dan Regangan Maksimum Geosintetik (T_{max})

Implikasi terhadap desain adalah sebagai berikut:

- Regangan maksimum (ϵ_{max}): peningkatan regangan berpotensi mendekati batas kapasitas material geosintetik, sehingga perlu diperhatikan dalam evaluasi batas layan (*serviceability*);
- Gaya tarik maksimum (T_{max}): peningkatan gaya tarik menuntut pertimbangan kapasitas tarik dan penerapan faktor reduksi yang lebih ketat dalam desain;
- Keseimbangan desain: pemilihan kekakuan *facing* harus mempertimbangkan interaksi antara kontrol deformasi dan peningkatan beban internal pada perkuatan, sehingga diperoleh konfigurasi yang efisien secara struktural sekaligus aman secara kinerja.

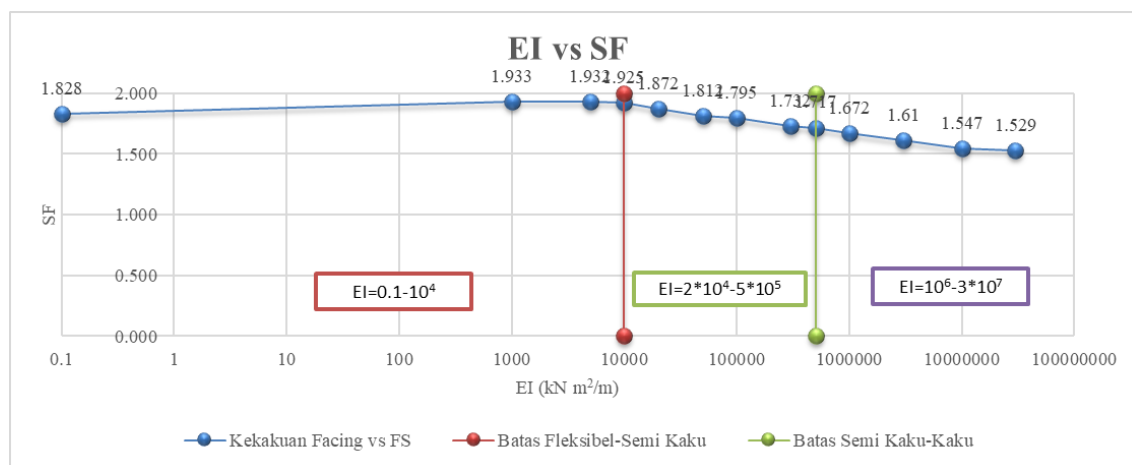
Dengan demikian, hasil ini menegaskan bahwa peningkatan kekakuan *facing* tidak selalu meningkatkan kinerja sistem secara keseluruhan, karena dapat memicu peningkatan beban internal pada geosintetik. Desain berbasis kinerja harus mempertimbangkan keseimbangan antara deformasi global, kapasitas material, dan distribusi tegangan internal agar sistem GRS tetap stabil

dan efisien.

3.3 Faktor Keamanan (SF)

Analisis menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan lentur *facing* (EI) cenderung diikuti oleh penurunan faktor keamanan global (SF). Tren ini konsisten pada seluruh variasi EI, meskipun penurunannya relatif moderat dan tidak bersifat linier. Fenomena ini mengindikasikan bahwa peningkatan kekakuan *facing* tidak secara langsung meningkatkan stabilitas global sistem, melainkan memengaruhi redistribusi tegangan internal yang berkontribusi terhadap penurunan nilai SF.

Secara mekanis, peningkatan EI menyebabkan restrain deformasi lokal pada muka dinding, yang selanjutnya mengalihkan beban ke dalam massa tanah bertulang dan elemen perkuatan. Kondisi ini meningkatkan mobilisasi gaya dalam sistem, sebagaimana tercermin dari kenaikan ϵ_{\max} dan T_{\max} , sehingga rasio terhadap kapasitas kekuatan tanah dan perkuatan menjadi lebih tinggi. Akibatnya, nilai faktor keamanan global cenderung menurun seiring meningkatnya kekakuan *facing*.



Gambar 5. Hubungan antara Kekakuan *Facing* (EI) dan Faktor Keamanan Global (SF)

Meskipun terjadi penurunan SF, seluruh variasi EI yang dianalisis masih menghasilkan nilai $SF \geq 1,5$, sehingga memenuhi kriteria stabilitas yang umum digunakan dalam desain geoteknik. Hal ini menunjukkan bahwa, dari perspektif *ultimate limit state*, sistem tetap berada dalam kondisi aman.

Namun, jika dikombinasikan dengan temuan sebelumnya mengenai peningkatan deformasi lateral (δ_h/H), regangan maksimum (ϵ_{\max}), dan gaya tarik maksimum (T_{\max}), hasil ini menegaskan bahwa peningkatan kekakuan *facing* tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja secara keseluruhan. Oleh karena itu, evaluasi desain perlu mempertimbangkan keseimbangan antara stabilitas dan respons deformasi dalam kerangka *performance-based design*.

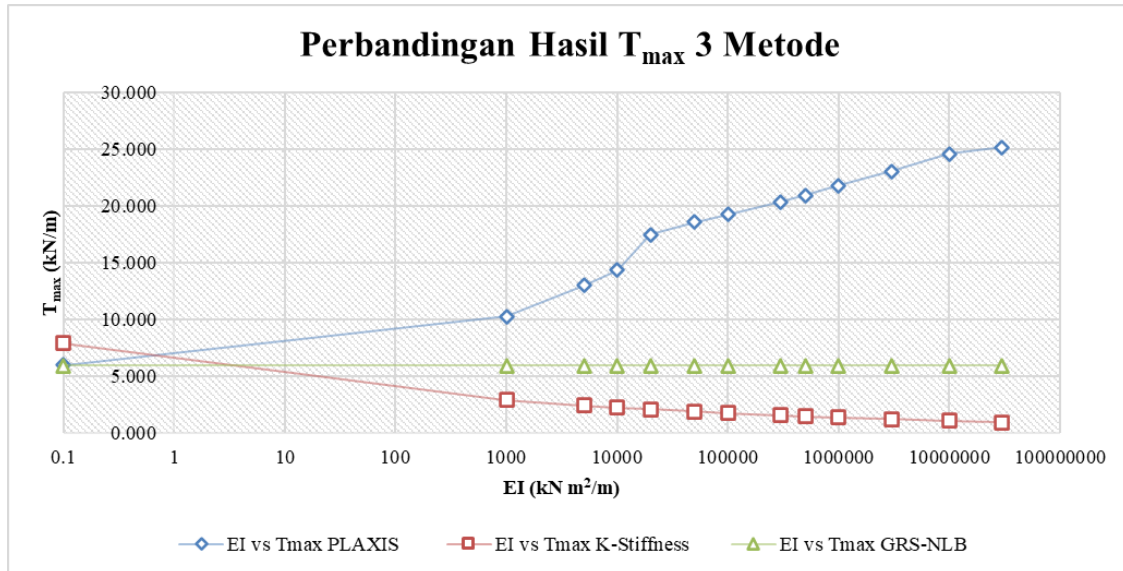
3.4 Perbandingan Metode

Perbandingan antara hasil analisis numerik berbasis Finite Element Method (FEM) dan metode empiris menunjukkan adanya perbedaan karakteristik respons terhadap variasi kekakuan lentur *facing* (EI). Metode FEM menunjukkan sensitivitas yang lebih tinggi dalam menangkap perubahan respons sistem, khususnya pada parameter gaya tarik maksimum (T_{\max}) dan distribusi deformasi. Variasi EI menghasilkan perubahan yang signifikan pada hasil FEM, mencerminkan kemampuan metode ini dalam merepresentasikan interaksi kompleks antara tanah, perkuatan geosintetik, dan *facing* secara lebih realistis.

Sebaliknya, metode empiris menunjukkan respons yang relatif kurang sensitif terhadap perubahan EI. Nilai T_{\max} yang dihasilkan cenderung lebih stabil dan tidak menunjukkan variasi signifikan meskipun terjadi perubahan kekakuan *facing*. Hal ini mengindikasikan bahwa

parameter EI belum secara eksplisit terakomodasi dalam formulasi metode empiris, sehingga pengaruh kekakuan struktural terhadap respons sistem tidak sepenuhnya terwakili.

Dari sisi konservatisme, metode empiris cenderung memberikan estimasi yang lebih aman, namun berpotensi kurang akurat dalam menangkap perilaku aktual sistem GRS, terutama pada kondisi yang dipengaruhi oleh variasi kekakuan *facing*. Sebaliknya, metode numerik mampu menangkap sensitivitas sistem terhadap parameter struktural yang tidak tercakup secara eksplisit dalam pendekatan empiris.



Gambar 6. Perbandingan Nilai Gaya Tarik Maksimum (T_{\max}) terhadap Variasi Kekakuan *Facing* (EI) menggunakan metode FEM, K-Stiffness, dan GRS-NLB

Hasil ini menegaskan pentingnya penggunaan analisis numerik dalam kerangka performance-based design. Metode FEM tidak hanya memberikan prediksi yang lebih realistis terhadap interaksi tanah-perkuatan-*facing*, tetapi juga memungkinkan evaluasi sensitivitas sistem terhadap variasi kekakuan *facing*. Dengan demikian, metode numerik dapat digunakan sebagai alat validasi dan pengembangan desain yang lebih rasional, sementara metode empiris tetap relevan sebagai pendekatan konservatif untuk estimasi awal.

3.5 Evaluasi Kinerja dan Kekakuan Optimal

Evaluasi kinerja dinding GRS dilakukan secara komprehensif dengan mempertimbangkan parameter deformasi lateral relatif (δ_h/H), regangan maksimum geosintetik (ϵ_{\max}), gaya tarik maksimum perkuatan (T_{\max}), serta faktor keamanan global (SF) dalam kerangka *performance-based design*.

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan kekakuan lentur *facing* (EI) tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja sistem secara keseluruhan. Meskipun peningkatan EI mampu memberikan restrain lokal pada muka dinding, kondisi tersebut justru diikuti oleh peningkatan deformasi global, regangan, dan gaya tarik pada elemen perkuatan, serta penurunan nilai faktor keamanan. Hal ini menegaskan bahwa peningkatan kekakuan *facing* tidak berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi sistem.

Dalam rentang kekakuan yang dianalisis, tidak teridentifikasi adanya fenomena *stiffness saturation*, di mana peningkatan EI mencapai kondisi *plateau* terhadap parameter kinerja. Sebaliknya, respons sistem terus berubah seiring peningkatan kekakuan, yang mengindikasikan bahwa efek kekakuan *facing* tetap signifikan dalam memengaruhi perilaku struktur. Dengan demikian, peningkatan EI tidak dapat dianggap sebagai solusi optimal secara otomatis, melainkan harus dievaluasi terhadap seluruh parameter kinerja secara simultan.

Berdasarkan evaluasi multi-parameter, *facing* dengan kekakuan rendah hingga semi-kaku menunjukkan kinerja yang paling efisien. Rentang ini mampu menjaga keseimbangan antara deformasi yang terkendali, mobilisasi gaya tarik yang moderat, serta tingkat stabilitas yang tetap memenuhi kriteria desain ($SF \geq 1,5$). Oleh karena itu, pemilihan kekakuan *facing* sebaiknya tidak

diarahkan pada nilai maksimum, melainkan pada rentang optimal yang memberikan respons struktural paling rasional dan efisien.

4. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi kinerja dinding Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) dengan variasi kekakuan lentur *facing* (EI) melalui pendekatan numerik berbasis Finite Element Method (FEM) menggunakan PLAXIS 2D serta metode empiris (K-Stiffness dan GRS-NLB). Analisis dilakukan dengan mempertimbangkan parameter deformasi lateral relatif (δ_h/H), regangan maksimum geosintetik (ϵ_{max}), gaya tarik maksimum perkuatan (T_{max}), dan faktor keamanan global (SF) dalam kerangka *performance-based design*.

Temuan utama penelitian adalah sebagai berikut:

- Deformasi lateral relatif (δ_h/H): peningkatan EI justru diikuti oleh peningkatan deformasi global, menegaskan adanya fenomena *deformation incompatibility* antar komponen sistem;
- Regangan maksimum (ϵ_{max}) dan gaya tarik maksimum (T_{max}): keduanya meningkat seiring bertambahnya EI, menunjukkan bahwa restrain lokal oleh *facing* mengalihkan beban ke elemen perkuatan;
- Faktor keamanan global (SF): nilai SF cenderung menurun dengan peningkatan EI, meskipun tetap berada pada level aman ($\geq 1,5$);
- Perbandingan metode: FEM lebih sensitif dalam menangkap pengaruh variasi EI dibandingkan metode empiris, yang relatif konservatif namun kurang akurat dalam merepresentasikan interaksi tanah-perkuatan-*facing*;
- Evaluasi kinerja: tidak teridentifikasi fenomena *stiffness saturation*; respons sistem terus berubah seiring peningkatan EI. *Facing* dengan kekakuan rendah hingga semi-kaku terbukti paling efisien, karena mampu menjaga keseimbangan antara deformasi terkendali, mobilisasi gaya tarik moderat, dan stabilitas yang memenuhi kriteria desain.

Hasil penelitian menegaskan bahwa peningkatan kekakuan *facing* tidak selalu menghasilkan peningkatan kinerja sistem GRS secara keseluruhan. Desain berbasis kinerja harus mempertimbangkan keseimbangan antara deformasi, beban internal, dan stabilitas global. Oleh karena itu, pemilihan kekakuan *facing* sebaiknya diarahkan pada rentang optimal (rendah hingga semi-kaku) yang memberikan respons struktural paling rasional, efisien, dan aman.

Referensi

- Allen, T. M. dan Bathurst, R. J. 2002. Soil Reinforcement Loads in Geosynthetic Walls at Working Stress Conditions. *Geosynthetics International*, Vol. 9, No. 5–6, hal. 525–566.
- Allen, T. M., Bathurst, R. J., Holtz, R. D., Walters, D. dan Lee, W. F. 2003. A New Working Stress Method for Prediction of Reinforcement Loads in Geosynthetic Walls. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 40, No. 5, hal. 976–994.
- Badan Standardisasi Nasional. 2017. SNI 8460:2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik. BSN. Jakarta.
- Bathurst, R. J., Vlachopoulos, N., Walters, D. L., Burgess, P. G. dan Allen, T. M. 2006. The Influence of Facing Stiffness on the Performance of Two Geosynthetic Reinforced Soil Retaining Walls. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, hal. 1225–1237.
- Berg, R. R., Christopher, B. R. dan Samtani, N. C. 2009. Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes (FHWA-NHI-10-024). Federal Highway Administration. Washington DC.
- Das, B. M. dan Sobhan, K. 2014. Principles of Geotechnical Engineering. Cengage Learning. Stamford.
- Hatami, K. dan Bathurst, R. J. 2005. Development and Verification of a Numerical Model for the Analysis of Geosynthetic-Reinforced Soil Segmental Walls under Working Stress Conditions. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 42, No. 4, hal. 1066–1085.
- Lambe, T. W. dan Whitman, R. V. 1969. Soil Mechanics. John Wiley & Sons. New York.
- Mangare, J. Y., Legrans, R. R. I., dan Manaroinsong, L. D. K. 2025. Performa Dinding Penahan Tanah Tipe GRS Akibat Konstruksi Fondasi Dangkal pada Pembebanan Statis. *Jurnal Tekno*, Vol. 23, No. 94. Universitas Sam Ratulangi.
- Pusat Litbang Prasarana Transportasi. 2001. Panduan Geoteknik 4: Timbunan Jalan pada Tanah Lunak – Desain dan Konstruksi. WSP International dan PT Virama Karya.
- Seequent. 2025. PLAXIS 2D 2025.1 Tutorial Manual. Bentley Subsurface Company.
- Wu, J. T. H. 2019. Geosynthetic Reinforced Soil (GRS) Walls. John Wiley & Sons. Hoboken, NJ.