



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 1 (2026) pp: 6251-6258

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Analisis Stabilitas MSE Wall dengan Stone Column di Tol Yogyakarta – Bawen

Sigit Arya Teguh Panuntun*, Untoro Nugroho

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Negeri Semarang, Indonesia

sigitaryateguhpanuntun2003@gmail.com, untoro.nugroho@unnes.ac.id

Abstrak

Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall merupakan struktur penahan tanah yang banyak digunakan pada proyek jalan tol, khususnya pada kondisi tanah lunak. Pada Proyek Jalan Tol Yogyakarta - Bawen Seksi 1, MSE Wall dikombinasikan dengan perbaikan tanah menggunakan stone column untuk meningkatkan kapasitas dukung tanah dasar dan mengendalikan penurunan. Oleh karena itu, diperlukan evaluasi stabilitas internal dan eksternal MSE Wall berdasarkan desain eksisting dengan mempertimbangkan pengaruh beban statis dan dinamis (gempa). Metode penelitian meliputi analisis stabilitas internal dan eksternal MSE Wall menggunakan perhitungan manual mengacu pada SNI 8460:2017 serta pemodelan numerik dua dimensi menggunakan perangkat lunak FEM 2D. Analisis beban gempa dilakukan dengan pendekatan pseudostatik, sedangkan evaluasi stone column difokuskan pada kapasitas dukung dan penurunan tanah dasar. Hasil analisis menunjukkan bahwa perbaikan tanah menggunakan stone column menghasilkan angka keamanan hingga 3,57 dengan penurunan tanah sebesar 0,86 m berdasarkan FEM 2D. Stabilitas internal memenuhi kriteria desain dengan faktor keamanan tarik minimum sebesar 2,47 (statis) dan 1,70 (gempa) serta terhadap cabut sebesar 29,89 (statis) dan 20,58 (gempa). Stabilitas eksternal berada dalam kondisi aman dengan faktor keamanan terhadap geser sebesar 3,66 (statis) dan 2,25 (gempa), serta terhadap guling sebesar 17,82 (statis) dan 9,93 (gempa). Analisis stabilitas global FEM 2D menghasilkan faktor keamanan sebesar 2,174 pada kondisi statis dan 1,53 pada kondisi gempa, yang menunjukkan desain MSE Wall layak secara teknis.

Kata kunci: MSE Wall, Stabilitas, Tanah Lunak, FEM 2D

1. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur transportasi memiliki peran strategis dalam mendukung pertumbuhan ekonomi, pemerataan wilayah, dan peningkatan konektivitas nasional. Melalui Peraturan Presiden Nomor 109 Tahun 2020, Pemerintah Indonesia menetapkan Jalan Tol Yogyakarta - Bawen sebagai bagian dari Proyek Strategis Nasional (PSN) yang bertujuan meningkatkan efisiensi mobilitas manusia dan distribusi barang di wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta dan Jawa Tengah [1]. Pada Seksi 1, variasi topografi mengharuskan penggunaan kombinasi struktur at grade, timbunan tinggi, dan elevated, sehingga pada zona transisi diperlukan sistem penahan tanah yang aman dan andal dalam jangka panjang.

Salah satu sistem yang banyak digunakan pada kondisi tersebut adalah Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall karena memiliki fleksibilitas tinggi, efisiensi konstruksi, serta performa baik terhadap beban statis dan dinamis [2]. Stabilitas MSE Wall ditinjau dari aspek eksternal (geser, guling, dan daya dukung tanah dasar) serta internal (tahanan tarik dan cabut tulangan). Evaluasi stabilitas menjadi semakin penting ketika struktur berada pada wilayah rawan gempa dan menerima beban lalu lintas yang signifikan [3].

Pada STA 73+100–73+175, tanah dasar didominasi oleh tanah lunak dengan daya dukung rendah dan potensi deformasi besar. Kondisi ini memerlukan perbaikan tanah, salah satunya menggunakan stone column yang terbukti efektif meningkatkan kapasitas dukung dan mempercepat konsolidasi [4][5]. Penelitian di Indonesia menunjukkan bahwa kombinasi MSE Wall dan perbaikan tanah granular mampu meningkatkan stabilitas global serta mengurangi penurunan pada tanah lunak [6].

Dalam praktik perencanaan, evaluasi stabilitas MSE Wall umumnya dilakukan menggunakan metode keseimbangan batas (limit equilibrium) dengan mengacu pada pedoman FHWA. Pendekatan ini efektif untuk menghitung faktor keamanan, namun belum mampu menggambarkan pola deformasi serta interaksi tanah dengan

struktur secara rinci, khususnya ketika struktur menerima beban gempa. Oleh karena itu, analisis numerik berbasis Finite Element Method (FEM) 2D digunakan sebagai metode pelengkap untuk memperoleh gambaran distribusi tegangan dan respons deformasi yang lebih representatif terhadap kondisi lapangan. [7].

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi stabilitas internal dan eksternal MSE Wall pada tanah lunak yang diperkuat stone column di Jalan Tol Yogyakarta - Bawen Seksi 1 melalui perhitungan manual dan analisis numerik FEM 2D, serta membandingkan hasil kedua metode untuk memperoleh pemahaman stabilitas yang lebih komprehensif.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif untuk mengevaluasi keamanan struktur Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall berdasarkan nilai faktor keamanan. Data teknis diperoleh dari PT Jasamarga Jogja Bawen melalui izin resmi observasi lapangan dan meliputi geometri struktur, sifat tanah, serta spesifikasi elemen perkuatan dan perbaikan tanah menggunakan stone column. Analisis dilakukan melalui perhitungan manual dan pemodelan numerik menggunakan FEM 2D untuk menilai stabilitas internal dan eksternal, kemudian hasil kedua metode tersebut dibandingkan guna menilai kinerja struktur pada kondisi eksisting.

2.1. Lokasi Penelitian

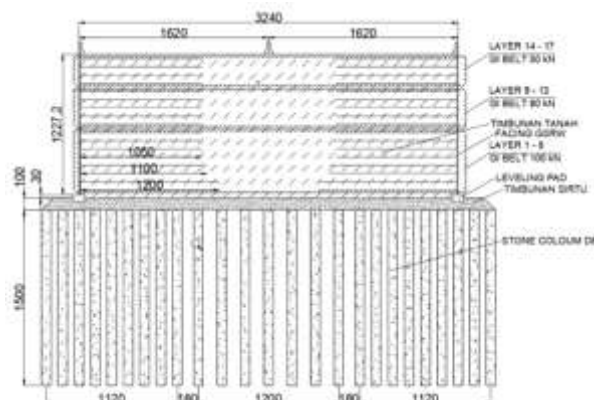
Penelitian ini dilaksanakan pada Proyek Jalan Tol Yogyakarta–Bawen Seksi 1, pada rentang STA 73+100 – 73+175, Kabupaten Sleman, DIY, yang terdapat dalam gambar 1



Gambar 1. Lokasi Penelitian

2.2. Data Teknis

Pengumpulan data dilakukan melalui studi pustaka yang relevan guna mendukung proses analisis, serta dilengkapi dengan data teknis proyek yang diperoleh dari PT Jasamarga Jogja Bawen selaku pemilik proyek. Data tersebut mencakup informasi kondisi lapangan, karakteristik tanah, dan spesifikasi struktur yang menjadi dasar dalam pelaksanaan penelitian ini.



Gambar 2. Potongan Melintang Perencanaan Dinding Penahan Tanah

Tabel 1. Parameter Tanah

Parameter	Tanah Timbunan	Tanah Asli				
		1,00 m - 1,50 m	5,50 m - 6,00 m	11,50 m - 12,00 m	16,00 m - 16,50 m	19,00 m - 19,50 m
Berat isi, γ (t/m ³)	1,921	2,128	2,162	1,475	1,750	1,637
Kadar air, W (%)	18,090	11,592	18,280	70,551	28,003	30,789
Berat jenis, Gs gr/cm ³	2,652	2,732	2,796	2,252	2,672	2,690
Liquid Limit, LL (%)	30,260			74,120	34,520	
Plastic Limits, PL (%)	26,770	Non Plastis	Non Plastis	34,890	34,350	Non Plastis
Placticity Index, PI (%)	3,280			39,230	0,170	
Kohesi, C (kg/cm ²)	0,530	1,367	2,923	0,117	0,257	2,997
Sudut Geser, ϕ (°)	30,940	57,886	7,677	0,873	1,081	7,078

Tabel 2. Parameter Stone Colomn

Parameter	Nilai	Satuan
Kohesi, C (kg/cm ²)	5	kg/cm ²
Sudut Geser, ϕ (°)	42	°
Jarak Instalasi Stone Coloumn	1,4 1,8 2	m

2.3. Prosedur Penelitian

Perkuatan harus memiliki kapasitas tarik yang cukup terhadap gaya tarik maksimum yang terjadi pada setiap lapisan. Rumus gaya tarik maksimum [8][9]

$$T_{max} = K_a \times \gamma \times H \times S_v \times S_h \quad (1)$$

Syarat kestabilan tarik:

$$SF_{tensile\ rupture} = \frac{T_{allow}}{T_{max}} \quad (2)$$

Tmax adalah gaya tarik pada lapisan perkuatan (kN/m), Ka adalah koefisien tekanan tanah aktif, γ adalah berat isi tanah timbunan (kN/m³), H adalah tinggi dinding (m), Sv adalah jarak vertikal antar perkuatan (m), Sh adalah jarak horizontal antar perkuatan (m), Tallow adalah kekuatan tarik ijin perkuatan, SFtensile rupture adalah faktor keamanan tarik perkuatan (>1,5).

Tahanan cabut merupakan kapasitas perkuatan untuk tetap bertahan dalam tanah akibat gaya geser tanah-perkuatan. Rumus tahanan cabut [9]:

$$R_{pullout} = F^* \times \alpha \times \gamma Z_p \times L_e \times C \quad (3)$$

Syarat kestabilan tarik

$$SF_{pullout\ resistance} = \frac{T_{allow}}{R_{pullout}} \quad (4)$$

F* adalah faktor tahanan cabut, α adalah faktor koreksi skala, γZ_p adalah tekanan beban berlebih (overburden), Le adalah panjang tertanam pada zona tanah yang ditahan, C adalah 2 untuk perkuatan dengan jenis pita, rangka dan lembaran, SFpullout resistance adalah faktor keamanan cabut perkuatan (>1,5)

MSE Wall harus memiliki gaya penahan yang cukup di dasar struktur untuk menahan gaya horizontal. Faktor keamanan geser [10]:

$$SF_{sliding} = \frac{W \cdot \tan(k \cdot \phi)}{P_a} \quad (5)$$

W adalah berat total dinding + tanah timbunan (kN), k adalah 2/3, Φ adalah sudut geser tanah timbunan, Pa adalah tekanan tanah aktif total (kN), SFsliding : faktor keamanan geser (>1,5)

Stabilitas guling diperiksa dengan membandingkan momen penahan terhadap momen pengguling.

$$SF_{overtuning} = \frac{M_{resist}}{M_{overtuning}} \quad (6)$$

Mresist adalah momen penahan akibat berat struktur, Moverturning adalah momen akibat tekanan tanah aktif, SFoverturning adalah faktor keamanan guling (>2)

Evaluasi daya dukung bertujuan memastikan tekanan fondasi tidak melebihi kapasitas tanah, dengan angka keamanan ($>2,5$):

$$SF_{bearing\ capacity} = \frac{q_u}{q_{allow}} \quad (7)$$

Kapasitas dukung kolom batuan tunggal atau kolom batuan di dalam kelompoknya dinyatakan oleh persamaan (>2)[11]:

$$q_u = c_u N_c' \quad (8)$$

q_u adalah kapasitas dukung ultimit yang dapat didukung oleh kolom batuan, c_u adalah kuat geser underdrained tanah kohesif disekitar kolom batuan, N_c' adalah faktor kapasitas dukung untuk kolom batuan.

3. Hasil dan Diskusi

3.1. Analisis Beban

- Beban yang bekerja pada timbunan ialah beban lalu lintas, diambil berdasarkan SNI 8460 : 2017 mengenai Persyaratan Perancangan geoteknik untuk jalan kelas I yaitu qlalu lintas sebesar 15 kN/m² [12].
- Beban gempa yang mempengaruhi dinding penahan tanah diperlakukan sebagai tambahan tekanan tanah aktif akibat percepatan seismic. Dari Desain Spektra Indonesia untuk wilayah Kabupaten Sleman, Provinsi DIY nilai PGA-nya adalah 0,424g dengan koefisien kelas situs pada tanah khusus (SF), nilai FPGA adalah 1[13].

$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA$$

$$PGA_M = 0,424$$

Koefisien percepatan horizontal (K_h) dan vertikal (K_v)

$$k_h = 0,5 \times PGA_M = 0,5 \times 0,424$$

$$k_h = 0,213\ g$$

$$k_v = 0$$

$$\xi = \tan^{-1} \left(\frac{k_h}{(1-k_v)} \right) = \tan^{-1} \left(\frac{0,213}{(1-0)} \right)$$

$$\xi = 11,86$$

- Koefisien tekanan tanah [14]

Koefisien tekanan tanah aktif

$$K_a = \tan^2 \left(45 - \frac{\phi}{2} \right) = 0,32$$

Koefisien tekanan tanah aktif akibat gempa

$$K_{ae} = \frac{\cos^2(\varphi - \xi - \beta)}{\cos \xi \cos^2 \beta \cos(\delta + \xi + \beta) \times \left[1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin(\varphi - \xi - \delta)}{\cos(\delta + \beta + \xi) \cos(\delta - \beta)}} \right]^2} = 0,47$$

3.2. Stabilitas Internal

Sampel perhitungan menggunakan lapisan perkuatan ke 8 dengan kondisi statis

- a. Tegangan vertikal lapisan ke 8
 $\sigma_v = q + (\gamma \times z) = 15kN/m + (18,84kN/m^3 \times 6,65m)$
 $\sigma_v = 140,28 kN/m^2$
- b. Tegangan horizontal lapisan ke 8
 $\sigma_h = K_a \times \sigma_v = 0,32 \times 140,28 kN/m^2$
 $\sigma_h = 45,01 kN/m^2$
- c. Nilai Tmax lapisan ke 8
 $Tmax = (\sigma_h \times K_a) \times S_v \times S_h = (45,01kN/m^2 \times 0,32) \times 0,7 m \times 0,8 m$
 $Tmax = 31,51 kN$
- d. Kuat tarik izin
 $T_{all} = \frac{T_{ult}}{(RF_{CR} \times RF_{ID} \times RF_D)} = \frac{100}{(1,6 \times 1,1 \times 1,1)}$
 $T_{all} = 51,65 kN$

Berdasarkan asumsi, perhitungan dalam satu panel selebar 1,6 m dengan empat strip perkuatan pada setiap lapisan, maka kapasitas tarik efektif per lapisan dapat ditentukan sebagai berikut :

$$GI \text{ Strip } 100 \text{ kN} = \left(\frac{51,65 \text{ kN} \times 4}{1,6} \right) = 129,13 \text{ kN}$$

- e. Faktor keamanan tarik
 $SF_{Tarik} = \frac{T_{ult}}{T_{max}} = \frac{129,13 \text{ kN}}{31,51 \text{ kN}}$
 $SF_{Tarik} = 4,1 > 1,5 \text{ (Aman)}$
- f. Faktor tahanan cabut
 $F^* = \frac{2}{3} \tan \phi = \frac{2}{3} \tan(30,94)$
 $F^* = 0,4$
- g. Faktor keamanan cabut
 $SF_{Cabut} = \frac{F^* \times \alpha \times \sigma_v \times L_e \times C}{T_{max}} = \frac{941,77 \text{ kN}}{31,51 \text{ kN}}$
 $SF_{Cabut} = 29,89 > 1,5 \text{ (Aman)}$

Tabel 3.Rekapitulasi Angka Keamanan Tarik dan Cabut Kondisi Statis

Lapis ke	Z (m)	σ_v (kN/m ²)	σ_h (kN/m ²)	Tmax (kN)	Tall (kN)	SFtarik (1,5)	Tcabut (kN)	SFcabut (1,5)
1	11,55	232,59	74,63	52,24	129,13	2,47	1784,58	34,16
2	10,85	219,40	70,40	49,28	129,13	2,62	1683,40	34,16
3	10,15	206,21	66,17	46,32	129,13	2,79	1450,37	31,31
4	9,45	193,02	61,94	43,36	129,13	2,98	1357,62	31,31
5	8,75	179,84	57,71	40,39	129,13	3,20	1207,37	29,89
6	8,05	166,65	53,48	37,43	129,13	3,45	1118,84	29,89
7	7,35	153,46	49,24	34,47	129,13	3,75	1030,31	29,89
8	6,65	140,28	45,01	31,51	129,13	4,10	941,77	29,89
9	5,95	127,09	40,78	28,55	103,31	3,62	853,24	29,89
10	5,25	113,90	36,55	25,58	103,31	4,04	764,71	29,89
11	4,55	100,72	32,32	22,62	103,31	4,57	676,17	29,89
12	3,85	87,53	28,09	19,66	103,31	5,25	587,64	29,89
13	3,15	74,34	23,85	16,70	103,31	6,19	499,11	29,89
14	2,45	61,15	19,62	13,74	64,57	4,70	410,57	29,89
15	1,75	47,97	15,39	10,77	64,57	5,99	322,04	29,89
16	1,05	34,78	11,16	7,81	64,57	8,26	233,51	29,89
17	0,35	21,59	6,93	4,85	64,57	13,31	144,97	29,89

Tabel 4. Rekapitulasi Angka Keamanan Tarik dan Cabut Kondisi Gempa

Lapis ke	Z (m)	σ_v (kN/m ²)	σ_h (kN/m ²)	Tmax (kN)	Tall (kN)	SFtarik (1,1)	Tcabut (kN)	SFcabut (1,1)
1	11,55	232,59	108,42	75,89	129,13	1,70	1784,58	23,51
2	10,85	219,40	102,27	71,59	129,13	1,80	1683,40	23,51
3	10,15	206,21	96,12	67,29	129,13	1,92	1450,37	21,56
4	9,45	193,02	89,98	62,98	129,13	2,05	1357,62	21,56
5	8,75	179,84	83,83	58,68	129,13	2,20	1207,37	20,58
6	8,05	166,65	77,68	54,38	129,13	2,37	1118,84	20,58
7	7,35	153,46	71,53	50,07	129,13	2,58	1030,31	20,58
8	6,65	140,28	65,39	45,77	129,13	2,82	941,77	20,58
9	5,95	127,09	59,24	41,47	103,31	2,49	853,24	20,58
10	5,25	113,90	53,09	37,17	103,31	2,78	764,71	20,58
11	4,55	100,72	46,95	32,86	103,31	3,14	676,17	20,58
12	3,85	87,53	40,80	28,56	103,31	3,62	587,64	20,58
13	3,15	74,34	34,65	24,26	103,31	4,26	499,11	20,58
14	2,45	61,15	28,51	19,95	64,57	3,24	410,57	20,58
15	1,75	47,97	22,36	15,65	64,57	4,13	322,04	20,58
16	1,05	34,78	16,21	11,35	64,57	5,69	233,51	20,58
17	0,35	21,59	10,07	7,05	64,57	9,16	144,97	20,58

3.3. Stabilitas Eksternal

a. Menghitung Gaya Dan Momen Tanah Aktif Yang Bekerja Pada Kondisi Statis

b. Stabilitas Terhadap Geser Kondisi Statis

$$SF_{Geser} = \frac{(W+q.L)[\tan(k.\phi)]}{P_a} = \frac{(2775,19 \text{ kN} + 15 \text{ kN/m} \times 12)[\tan(\frac{2}{3} \times 30,94)]}{304,07 \text{ kN}}$$

$$SF_{Geser} = 3,66 > 1,5 \text{ (Aman)}$$

c. Stabilitas Terhadap Guling Kondisi Statis

$$SF_{Guling} = \frac{W.x}{\Sigma Ma} = \frac{16651,15 \text{ kNm}}{934,42 \text{ kNm}}$$

$$SF_{Guling} = 17,82 > 2 \text{ (Aman)}$$

d. Menghitung Gaya Dan Momen Tanah Aktif Yang Bekerja Pada Kondisi Gempa

e. Stabilitas Terhadap Geser Kondisi Gempa

$$SF_{Geser} = \frac{(W+q.L)[\tan(k.\phi)]}{P_a} = \frac{(2775,19 \text{ kN} + 15 \text{ kN/m} \times 12)[\tan(\frac{2}{3} \times 30,94)]}{493,52 \text{ kN}}$$

$$SF_{Geser} = 2,25 > 1,5 \text{ (Aman)}$$

f. Stabilitas Terhadap Guling Kondisi Gempa

$$SF_{Guling} = \frac{W.x}{\Sigma Ma} = \frac{16651,15 \text{ kNm}}{1676,73 \text{ kNm}}$$

$$SF_{Guling} = 9,93 > 2 \text{ (Aman)}$$

3.4. Daya Dukung Stone Column

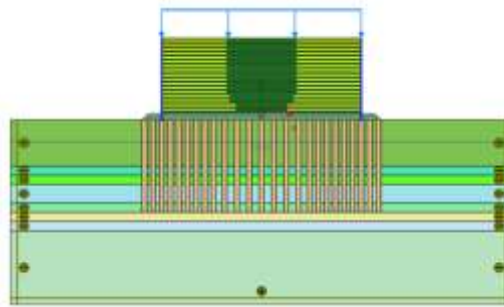
Tabel berikut menyajikan hasil perhitungan daya dukung stone column yang mengacu [15]

	S = 1,4 m	S = 1,8 m	S = 2 m	Satuan
De	1,47	1,89	2,10	m ²
A	2,24	2,88	3,20	m ²
$A_s = \frac{1}{4}\pi D^2$	0,50	0,50	0,50	m ²
Ac = A - As	1,74	2,38	2,70	m ²
$a_s = \frac{A_s}{A}$	0,22	0,17	0,16	
$a_c = \frac{A_c}{A}$	0,78	0,83	0,84	
$\mu_c = \frac{1}{1-(n-1)a_s}$	0,53	0,59	0,61	
$\mu_s = \frac{n}{1-(n-1)a_s}$	2,63	2,94	3,07	
$\sigma_s = c_u \cdot N'_c$	2406,14	2406,14	2406,14	kN/m ²

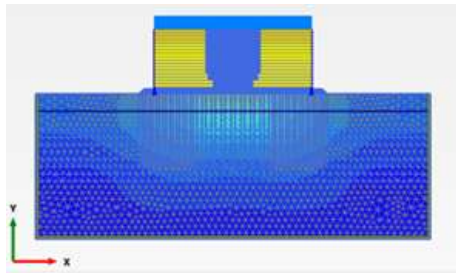
$\sigma_c = \mu_c \left(\frac{q_{ult}}{H_s} \right)$	481,23	481,23	481,23	kN/m ²
$P_u = \sigma_s \cdot A_s + \sigma_c \cdot A_c$	2045,52	2353,50	2507,50	kN/m ²
Pa	551,64	709,25	788,05	kN/m ²
SF > 2	3,71	3,32	3,18	

3.5. FEM 2D

Gambar berikut menyajikan hasil analisis stabilitas eksternal MSE Wall berdasarkan pemodelan numerik menggunakan metode elemen hingga (finite element method atau FEM 2D) untuk menilai kinerja struktur dalam menahan beban statis dan beban gempa.



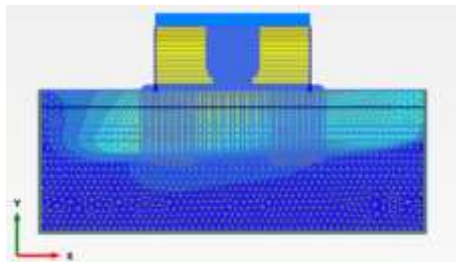
Gambar 3. Pemodelan dinding MSE



Gambar 4. Displacement Pada Pemodelan FEM 2D Kondisi Statik

Reached values	
Reached total time	30.00 day
CSP - Relative stiffness	5.1110E-3
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Prmax - Reached max pp	640.5 kN/m ²
SM _{stage} - Reached phase proportion	0.000
SM _{weight} - Reached weight proportion	1.000
SM _μ - Reached safety factor	2.174

Gambar 5. Output Angka Keamanan Global FEM 2D Kondisi Statik



Gambar 6. Displacement Pada Pemodelan FEM 2D Kondisi Pseudostatik

Reached values	
Reached total time	30.00 day
CSP - Relative stiffness	0.04230E-3
ForceX - Reached total force X	0.000 kN/m
ForceY - Reached total force Y	0.000 kN/m
Prmax - Reached max pp	1382 kN/m ²
SM _{stage} - Reached phase proportion	0.000
SM _{weight} - Reached weight proportion	1.000
SM _μ - Reached safety factor	1.530

Gambar 7. Output Angka Keamanan Global FEM 2D Kondisi Pseudostatik

Hasil pemodelan numerik MSE Wall dengan perbaikan tanah dasar stone column menggunakan metode elemen hingga pada FEM 2D menunjukkan faktor keamanan stabilitas global sebesar 2,174 pada kondisi statis, dan pada kondisi gempa nilainya 1,53 yang telah memenuhi persyaratan minimum $SF \geq 1,5$ sesuai SNI 8460:2017. Analisis deformasi pada kondisi statis menunjukkan bahwa perpindahan terbesar terjadi di bawah fondasi dengan nilai sekitar 0,857 m, yang merupakan kombinasi pergeseran horizontal dan penurunan vertikal.

4. Kesimpulan

Hasil analisis menunjukkan bahwa stabilitas internal dinding MSE pada STA 73+100–73+175 berada dalam kondisi aman. Berdasarkan perhitungan manual, faktor keamanan terhadap putus tulangan berkisar antara 2,47–13,31 pada kondisi tanpa gempa dan 1,70–9,16 pada kondisi gempa. Sementara itu, faktor keamanan terhadap cabut tulangan berada pada rentang 29,89–34,16 tanpa gempa dan 20,58–23,51 dengan gempa, yang seluruhnya telah memenuhi persyaratan desain. Ditinjau dari stabilitas eksternal, hasil perhitungan manual menunjukkan bahwa dinding MSE memenuhi kriteria terhadap geser dengan faktor keamanan 3,66 tanpa gempa dan 2,25 dengan gempa, terhadap guling sebesar 17,82 tanpa gempa dan 9,93 dengan gempa, serta terhadap daya dukung tanah dasar sebesar 3,57 dengan penurunan 0,86 m berdasarkan FEM 2D. Hasil analisis stabilitas global menggunakan FEM 2D memberikan faktor keamanan sebesar 2,174 pada kondisi tanpa gempa dan 1,53 pada kondisi gempa, yang menunjukkan bahwa struktur tetap stabil meskipun mengalami pengaruh pembebanan gempa

Referensi

- [1] Direktorat Jenderal Bina Marga, “Dimulai, Persiapan Pembangunan Tol Yogyakarta-Bawen Sepanjang 75,8 Km,” *Bina Marga – Berita*, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, Jakarta, 2020. [Online]. Available: <https://binamarga.pu.go.id/index.php/berita/dimulai-persiapan-pembangunan-tol-yogyakarta-bawen-sepanjang-758-km?PageSpeed=noscript>
- [2] E. Ansori and N. Gofar, “Analisis stabilitas dinding penahan tanah tipe Mechanically Stabilized Earth (MSE) pada Jalan Layang Bantaian Sumatera Selatan,” *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, 2025, [Online]. Available: <https://journal.untar.ac.id/index.php/jmts/article/view/33489>
- [3] Y. Salim and A. Suhendra, “Analisis Stabilitas Back-to-Back Mechanically Stabilized Earth Walls (Studi Kasus Jalan Layang di Sulawesi Selatan),” *JMTS J. Mitra Tek. Sipil*, vol. 0, no. 0, 2021, doi: 10.24912/jmts.v0i0.12582.
- [4] N. Hartono and T. F. Fathani, “Design of Stone Column to Mitigate Soil Liquefaction: Cases Study of Yogyakarta International Airport,” in *Journal of the Civil Engineering Forum*, 2023, pp. 195–208.
- [5] M. Shams, M. Roshani, and M. Taiebat, “Numerical study to evaluate the effect of encased stone columns technique for liquefaction mitigation of sandy soil by FEM 2D,” *Int. J. Geo-Engineering*, 2025, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1186/s40703-025-00252-6>
- [6] I. H. Purworaharjo, “Analisis Perkuatan Tanah Lunak Menggunakan Metode Stone Column Pada Pembangunan Jalan TOL Indralaya-Bengkulu,” 2023, *UNIVERSITAS BAKRIE*.
- [7] A. D. Ladi, R. R. I. Legrans, and J. H. Ticoh, “Studi Kestabilan Lereng Galian Dengan Perkuatan Geocell Di Kawasan Perumahan Koka, Kabupaten Minahasa,” *TEKNO J. Tekno Mesin*, vol. 23, no. 94, pp. 1–14, 2025, doi: 10.35793/jts.v23i94.66210.
- [8] FHWA, “Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes,” Federal Highway Administration, Washington, DC, 2009. [Online]. Available: <https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi10024/nhi10024.pdf>
- [9] Direktorat Jenderal Bina Marga, “Pedoman Perencanaan dan Pelaksanaan Perkuatan Tanah dengan Geosintetik,” 2009, *Departemen Pekerjaan Umum, Direktorat Jenderal Bina Marga, Direktorat Bina Teknik, Jakarta*. [Online]. Available: <https://binamarga.pu.go.id/uploads/files/402/pedoman-perencanaan-dan-pelaksanaan-perkuatan-tanah-dengan-geosintetik.pdf>
- [10] B. M. Das and N. Sivakugan, *Principles of Foundation Engineering*. Cengage learning, 2019.
- [11] H. C. Hardiyatmo, *Perbaikan Tanah*, 1st ed. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2020.
- [12] Badan Standardisasi Nasional, “SNI 8460:2017: Tata Cara Perencanaan Geoteknik,” 2017, *Badan Standardisasi Nasional, Jakarta*.
- [13] Kementerian PUPR, “RSA Cipta Karya – 2021 PGA Data,” 2021. [Online]. Available: <https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>
- [14] B. M. Das and K. Sobhan, *Principles of Geotechnical Engineering*. Cengage Learning, 2018.
- [15] FHWA, “Design and Construction of Stone Columns: Volume II – Appendixes,” Federal Highway Administration, Washington, D.C., 1983.