

# Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Tipe *Mechanically Stabilized Earth (MSE) Wall* Terhadap Curah Hujan

Wirman Hidayat<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Perencanaan Infrastruktur,  
Universitas Pertamina  
Jalan Teuku Nyak Arief, Simprug, Kebayoran Lama, Jakarta 12220  
Email: [wirman.hidayat@universitaspertamina.ac.id](mailto:wirman.hidayat@universitaspertamina.ac.id)

## Abstract

The rainfall is a factor that has a significant effect on the stability of the retaining wall. In this paper, a study was conducted on the effect of rainfall intensity and duration on the stability of the Mechanically Stabilized Earth (MSE) wall indicated by the number of the safety factors. The variations were made on the rate of the rainfall intensity, namely the intensity of normal, heavy, and extremely heavy rain, then variations were also made on the duration of the rain, namely 12, 24, 36, 48, 72, and 96 hours. The analysis was carried out using the software PLAXIS 2D finite element method with the type of calculation of fully coupled flow-deformation analysis. The analysis begins with an analysis of the safety factor was carried out on the construction process and the operational loading conditions of the MSE wall, the results obtained that the wall was in a stable condition with a safety factor for the long term 1.87. The next step is to analyze the effect of rain intensity and duration on the stability of the MSE wall, it was found that there is a decrease in safety factor due to rainfall intensity for a certain duration. Normal rain intensity results in a safety factor that is always above the safety criteria for the specified rain duration, while in heavy and extremely heavy rain the safety factors are below the minimum safety criteria after the rain duration of more than 24 hours and 12 hours, respectively. The decrease in safety factor is caused by several factors, such as an increase in pore water pressure, an increase of soil saturation, and a decrease in the suction pressure which affects the effective stress as a parameter that determines soil strength.

**Keywords:** MSE Wall; Rain Intensity; Rain Duration, Stability; Suction Pressure; Finite Element Method

## Abstrak

Curah hujan merupakan faktor yang berpengaruh signifikan terhadap stabilitas dinding penahan. Pada penelitian ini dilakukan studi tentang pengaruh intensitas dan durasi hujan terhadap stabilitas dinding penahan tanah tipe *Mechanically Stabilized Earth (MSE) wall* yang ditunjukkan dalam nilai angka keamanan. Untuk melihat pengaruh faktor-faktor tersebut dilakukan variasi terhadap nilai intensitas curah hujan yaitu intensitas hujan normal, lebat dan sangat lebat, kemudian juga dilakukan variasi terhadap durasi hujan yaitu 12, 24, 36, 48, 72, dan 96 jam. Analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga PLAXIS 2D dengan tipe perhitungan *fully coupled flow-deformation analysis* (analisis aliran dan deformasi secara penuh). Pada tahap awal dilakukan analisis angka keamanan terhadap proses konstruksi dan kondisi pembebanan operasional *MSE wall*, diperoleh hasil bahwa dinding berada dalam kondisi aman dengan angka keamanan untuk jangka pajang adalah 1.87. Tahap selanjutnya adalah analisis pengaruh intensitas dan durasi hujan terhadap stabilitas *MSE wall*, diperoleh bahwa terdapat penurunan angka keamanan akibat intensitas curah hujan dalam durasi tertentu. Intensitas hujan normal memberikan hasil angka keamanan yang selalu berada diatas angka keamanan selama durasi hujan yang ditentukan, sedangkan pada hujan lebat dan sangat lebat angka keamanan berada dibawah angka keamanan minimum setelah durasi hujan lebih dari 24 jam dan 12 jam secara berturut-turut. Penurunan angka keamanan disebabkan oleh beberapa faktor yaitu kenaikan tegangan air, kenaikan nilai saturasi tanah, dan penurunan tegangan hisap (*suction*) yang mempengaruhi tegangan efektif sebagai parameter yang menentukan kekuatan tanah.

**Kata Kunci:** *MSE Wall*; Intensitas Hujan; Durasi Hujan; Stabilitas; Tegangan Hisap, Metode Elemen Hingga

## PENDAHULUAN

*Mechanically Stabilized Earth (MSE) wall* merupakan dinding penahan tanah yang menggunakan perkuatan internal secara berlapis dengan mekanisme friksi antara tanah dengan material perkuatan. Penggunaan *MSE wall* menjadi pilihan alternatif dinding penahan tanah karena memiliki biaya konstruksi yang relatif lebih murah dan secara teknis lebih mudah dikerjakan dibandingkan dengan dinding penahan tanah dengan tipe beton (Berg et al., 2009). Stabilitas *MSE wall* sangat bergantung kepada jenis material timbunan yang digunakan, geometri dinding penahan, posisi muka air tanah, dan faktor eksternal berupa curah hujan dan penguapan.

(Rahardjo et al., 2011) melakukan evaluasi stabilitas lereng melalui sistem monitoring tegangan air tanah yang dianalisis secara numerik pada tanah tidak jenuh (*unsaturated*) yang disebabkan oleh curah hujan, ditemukan bahwa terdapat karakteristik formasi tanah terhadap curah

hujan yang menyebabkan perubahan kekuatan geser tanah sehingga mengakibatkan variasi terhadap angka keamanan ketika hujan terjadi. Curah hujan yang menyebabkan perubahan derajat kejenuhan tanah pada tanah timbunan tidak jenuh air dapat menyebabkan keruntuhan pada *MSE wall* (Yoo & Jung, 2006).

(Koerner & Koerner, 2013) melakukan studi secara statistik terhadap 171 data kegagalan struktur geosintetik pada *MSE wall*, ditemukan bahwa 60% penyebab kegagalan *MSE wall* disebabkan oleh pengaruh air secara internal dan eksternal. Curah hujan yang tinggi atau terjadi dalam waktu lama, dapat menyebabkan kenaikan tingkat kejenuhan tanah dan tegangan air dibelakang *MSE wall* yang memberikan dorongan horizontal terhadap dinding sehingga dapat mengurangi stabilitas, hal ini akan semakin rentan terhadap keruntuhan apabila material timbunan memiliki tingkat *finer content* (kehalusan) yang tinggi dan system drainasi yang tidak

baik. Untuk mengantisipasi resiko kenaikan tegangan air tersebut, terdapat kriteria material yang digunakan dalam beberapa pedoman, (AASHTO, 2007) mensyaratkan nilai kehalusan material dibatasi maksimal 15% untuk dinding bangunan yang digunakan oleh publik, sedangkan (NCMA, 2012) menyatakan bahwa nilai kehalusan bisa digunakan lebih tinggi sampai dengan 35% untuk dinding yang bersifat privat, akan tetapi nilai ini tidak selalu bisa dipenuhi karena keterbatasan material dan biaya, sehingga perlu dilakukan analisis yang baik terhadap jenis material yang digunakan. Evaluasi terhadap stabilitas *MSE wall* secara probabilistik juga menunjukkan bahwa perlu dipertimbangkan perhitungan variasi beban dan tahanan dengan tingkat akurasi yang baik termasuk pertimbangan faktor ketidakpastian pada saat konstruksi dan operasional (Allen et al., 2019; Bozorgzadeh et al., 2019; Kim & Borden, 2013; VandenBerge et al., 2020).

Metode elemen hingga merupakan metode yang populer digunakan dalam analisis stabilitas geoteknik, perkembangan teknologi juga telah mendukung penggunaan metode elemen hingga dalam bentuk perangkat lunak komputer, sehingga dapat menyelesaikan perhitungan untuk model yang kompleks dalam waktu yang relatif singkat. Metode ini memberikan hasil perhitungan yang baik terhadap hasil pengukuran dan pengujian, akan tetapi hasil perhitungan sangat bergantung terhadap input data dan kemampuan pengguna dalam mendefinisikan model. Analisis perancangan, stabilitas, dan pengaruh beban eksternal terhadap *MSE wall* menggunakan metode elemen hingga memberikan hasil yang baik dan diskusi yang bersesuaian dengan hasil pengukuran (Adamson et al., 2020; Bathurst & Naftchali, 2021; Hulagabali et al., 2018; Turkel et al., 2020; VandenBerge et al., 2021).

Pada studi ini dilakukan analisis stabilitas dinding penahan tanah tipe *MSE wall* yang dipengaruhi oleh intensitas curah hujan dalam periode waktu tertentu. Untuk melihat kondisi normal dan ekstrim, maka curah hujan dibagi menjadi kondisi normal, lebat, dan sangat lebat (Sosrodarsono, 1999) yang terjadi dalam variasi rentang waktu tertentu. Analisis dilakukan secara numerik dengan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D.

## KAJIAN PUSTAKA

Curah hujan yang terjadi dalam periode waktu tertentu dimodelkan dalam bentuk infiltrasi pada PLAXIS 2D. Infiltrasi merupakan proses masuknya air kedalam tanah yang diukur dalam besaran kecepatan aliran air, yaitu menggunakan satuan panjang per satuan waktu, pada model ini air hujan masuk melalui permukaan tanah mengikuti batas kondisi hidraulik. Pada tanah tidak jenuh air, air hujan akan masuk melalui permukaan dan mengalir secara *transient*, aliran air ini mempengaruhi tingkat kejenuhan tanah dan tegangan air yang terjadi sehingga mempengaruhi tegangan efektif yang terjadi pada tanah.

Pada tanah jenuh air (*saturated*), metode perhitungan tegangan efektif sudah sangat berkembang dan memiliki tingkat keandalan yang baik (Skempton, 1960; Terzaghi, 1963) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (1)$$

dimana  $\sigma'$  = tegangan normal efektif,  $\sigma$  = tegangan normal total, dan  $u_w$  = tegangan air pori. Sedangkan untuk tanah tidak jenuh air (*unsaturated*) dimana pada sebagian pori tanah diisi oleh udara, maka tegangan efektif tanah dipengaruhi oleh derajat kejenuhan tanah (Bishop & Blight, 1963) dengan persamaan sebagai berikut:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + x(u_a - u_w) \quad (2)$$

dimana  $u_a$  = tegangan udara pori dan  $x$  = parameter tegangan efektif yang disebut juga dengan matriks koefisien hisap (*matric suction coefficient*) yang nilainya bervariasi antara 0 sampai dengan 1, nilai parameter  $x$  bisa diperoleh dari hasil percobaan yang bergantung kepada derajat kejenuhan dan porositas. Analisis stabilitas geoteknik menggunakan perhitungan kondisi *unsaturated* dilakukan untuk mengetahui perilaku aktual dari tanah, karena pada umumnya tanah berada dalam kondisi tidak jenuh pada kondisi natural (Deng & Yang, 2019; M. D. Fredlund et al., 2018; Sun et al., 2019; Vahedifard et al., 2016; Vahedifard & Robinson, 2016).

Analisis yang dilakukan pada Plaxis 2D mampu memperhitungkan tegangan efektif tanah dalam kondisi jenuh dan tidak jenuh menggunakan metode perhitungan *fully coupled flow-deformation analysis* (analisis aliran dan deformasi secara penuh), pada analisis ini dilakukan perhitungan deformasi dan tegangan air pada tanah jenuh dan tanah tidak jenuh secara simultan yang disebabkan oleh perubahan kondisi batas hidraulik terhadap waktu. Untuk mendefinisikan parameter hidraulik aliran pada tanah *unsaturated* digunakan model hidraulik (Van Genuchten, 1980) yang terdapat pada PLAXIS 2D. Persamaan Van Genuchten digunakan untuk menghitung nilai saturasi terhadap *head* tekanan sebagai berikut:

$$S(\psi) = S_{res} + (S_{sat} - S_{res})[1 + (g_a|\psi|)^{gn}]^{gc} \quad (3)$$

dimana  $S(\psi)$  = derajat kejenuhan,  $S_{res}$  = saturasi residu yang menggambarkan bagian air yang terdapat pada pori tanah,  $g_a$  = parameter yang berhubungan dengan proses masuknya udara kedalam pori (dalam satuan 1/L),  $\psi$  = rasio antara tegangan hisap terhadap berat volume air,  $gn$  = parameter fungsi ekstraksi air dari tanah setelah nilai udara yang masuk melewati,  $gc$  = parameter umum Van Genuchten yang digunakan untuk mengkonversi persamaan dalam hitungan PLAXIS 2D.

Hasil perhitungan *fully coupled flow-deformation analysis* adalah deformasi dan tegangan air, nilai tegangan air pada tanah *unsaturated* pada PLAXIS 2D dihitung sebagai berikut:

$$p_{active} = S_{eff}(p_{steady} + p_{excess}) \quad (4)$$

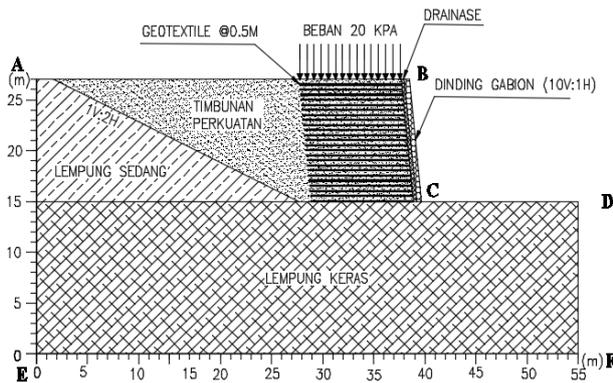
dimana  $p_{active}$  = tegangan air pori aktif yang bekerja pada saat kondisi tertentu,  $S_{eff}$  = saturasi efektif,  $p_{steady}$  = tegangan air berdasarkan input data (groundwater flow calculation),  $p_{excess}$  = tegangan air pori pada saat perhitungan plastis atau konsolidasi dengan mempertimbangkan kondisi nir-alir (*undrained*). Nilai tegangan air pori aktif dinyatakan dalam tekanan negatif. Pada model perhitungan *fully coupled flow-deformation*

analysis juga diperoleh tegangan hisap (*suction pore pressure*) yang dinyatakan dalam nilai tekanan positif, tegangan hisap ini merupakan tegangan yang realistis pada tanah tidak jenuh air. Penggunaan metode perhitungan numerik pada penelitian ini diharapkan mampu memodelkan kondisi tegangan air dan deformasi dengan baik.

**METODE PENELITIAN**

**Model Geometri**

Pada studi ini dilakukan analisis terhadap *MSE wall* dengan tinggi 12 meter dengan rasio kemiringan permukaan dinding adalah 10 vertikal : 1 horizontal, beban operasional berasal dari beban lalu lintas sebesar 20 kPa (AASHTO, 2007). Hasil *preliminary design* berdasarkan (FHWA, 2009) diperoleh bahwa *geotextile* dipasang dengan spasi pemasangan 0.5 meter dengan panjang pemasangan 10 meter, pada bagian belakang dinding terdapat drainase berdimensi 0.3 meter, untuk bagian luar dinding digunakan *facing* menggunakan blok gabion dengan ukuran 0.5 meter x 0.5 meter. *MSE wall* berada diatas tanah dasar berupa lempung keras, dan pada bagian belakang dinding terdapat lereng alami dengan kemiringan 1 vertikal : 2 horizontal. Model geometri analisis terdapat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Model Geometri Analisis

**Parameter Material**

*MSE wall* dibangun diatas tanah lempung keras yang memiliki kekuatan geser yang tinggi, pada bagian belakang dinding terdapat lereng asli yang merupakan tanah tanah lempung dengan konsistensi sedang. Material timbunan perkuatan atau material pengisi yang digunakan mengacu kepada (AASHTO, 2007), yaitu material pasir dengan gradasi baik dengan persentase kehalusan maksimal adalah 15%, kemudian juga disyaratkan bahwa nilai indeks plastisitas (PI) < 6, persyaratan ini digunakan untuk menjamin bahwa material yang digunakan memiliki durabilitas yang tinggi, drainase yang baik, mudah dipadatkan, dan memiliki interaksi yang baik dengan material perkuatan. Material *geotextile* yang digunakan adalah jenis *woven* dan memiliki kekuatan yang tinggi, dengan nilai kekuatan tarik jangka pendek adalah 300 kN/m, dan kekuatan tarik jangka panjang (umur layan 120 tahun) adalah 168 kN/m.

Untuk mengalirkan air berlebih di belakang dinding digunakan material drainase yang dipasang di belakang dinding. Kriteria material drainase yang digunakan memiliki persentase kehalusan 3-5% dan bersifat

non-plastis bergradasi baik dengan ketebalan minimal 300 mm, pada bagian permukaan dinding digunakan *facing* yang dengan material blok gabion yang merupakan batu yang diikat dengan *wire mesh* (FHWA, 2009).

Model konstitutif material yang digunakan dalam PLAXIS 2D adalah *Mohr-Coulomb* (MC), model ini mampu menganalisis perilaku tanah berupa deformasi, tegangan air, dan kekuatan geser dengan kriteria elastik, pemilihan model konstitutif MC bertujuan untuk menyederhanakan parameter input tanah yang berkaitan dengan elastisitas dan kekuatan tanah (Brinkgreve, 2016). Parameter input material pada analisis terdapat pada **Tabel 1**.

Tabel 1. Parameter Material

N	Nama Material	$\gamma_m$ (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$ (kN/m <sup>3</sup> )	$c'$ (kPa)	$\phi'$ (°)	$E_{50}$ (kPa)	$k$ (m/hari)
1	Timbunan Perkuatan	18.2	20.4	5	35	45000	0.70
2	Lempung Sedang	16.2	18.5	2	30	20000	0.04
3	Lempung Keras	19.8	22.8	25	30	60000	0.04
4	Drainase	19.2	20.8	1	40	43000	86.4
5	Blok Gabion	20.0	22.0	1	45	230000	86.4

**Kondisi Hidraulik**

*Kondisi Batas Aliran Air*

Untuk menganalisis perilaku tegangan air yang terjadi diperlukan kriteria kondisi batas aliran air yang disebut dengan kondisi hidraulik (*hydraulic boundary condition*). Kondisi batas aliran merupakan salah satu parameter hidraulik yang perlu didefinisikan ketika melakukan analisis aliran air dengan jenis perhitungan *fully coupled flow-deformation analysis*, kondisi batas aliran mendefinisikan jenis aliran yang terjadi pada batas- batas permukaan geometri. Pada **Gambar 1** terdapat kondisi batas **EF** dibuat tertutup (*closed*), kondisi batas ini tidak mengijinkan terjadinya aliran melewati permukaan tersebut, kemudian terdapat kondisi batas pada sisi samping geometri yaitu **AE** dan **DF**, batas ini didefinisikan sebagai rembesan (*seepage*), pada kondisi batas ini air dapat mengalir melalui batas berdasarkan kondisi hidrostatis pada tanah. Untuk permodelan kondisi batas dalam mendefinisikan masuknya air hujan kedalam tanah digunakan kondisi batas infiltrasi (*infiltration*) atau presipitasi (*precipitation*) pada permukaan **ABCD**, pada permukaan ini dibutuhkan parameter input dalam memodelkan kondisi hujan berupa kecepatan infiltrasi (q) dalam satuan m/hari,  $\psi_{max}$ , dan  $\psi_{min}$  yang merupakan nilai *head* tekanan maksimum dan minimum relatif terhadap elevasi kondisi batas. Parameter infiltrasi yang digunakan dibagi menjadi tiga kategori intensitas hujan yaitu kondisi normal, lebat, dan sangat lebat (Sosrodarsono, 1999) dan dibagi menjadi rentang waktu 12 jam, 24 jam, 36 jam, 48 jam, dan 72 jam, dan 96 jam seperti pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Intensitas Infiltrasi Curah Hujan dan Pemodelan Durasi Hujan

No	Curah Hujan	Intensitas Curah Hujan Maksimal (mm/hari)	Pemodelan Durasi Hujan (Jam)
1	Hujan Normal	50	12
			24
2	Hujan Lebat	100	36
			48
3	Hujan Sangat Lebat	250	72
			96

Sumber: (Sosrodarsono, 1999)

**Parameter Konduktivitas Hidraulik**

Parameter konduktivitas hidraulik secara mendasar ditentukan oleh nilai permeabilitas tanah ketika berada dalam kondisi jenuh air. Pada tanah tidak jenuh, terdapat kondisi aliran air yang bersifat *transient* sehingga mempengaruhi nilai tegangan air yang terjadi akibat perubahan derajat saturasi tanah berdasarkan **Persamaan (3)**. Parameter konduktivitas hidraulik yang digunakan menggunakan parameter fungsi Mualem-Van Genuchten (Van Genuchten, 1980). Nilai parameter mengacu kepada *Hydraulic Properties of European Soils (HYPRES)* (Wösten et al., 1999), data *HYPRES* memiliki fleksibilitas penggunaan yang baik dan populer untuk digunakan di berbagai kasus karena memiliki keragaman sumber data yang luas (menggunakan data dari 20 institusi berbeda). Nilai parameter yang digunakan terdapat pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Parameter Konduktivitas Hidraulik Mualem- Van Genuchten.

No	Nama Material	Tipe	ga (1/m)	gl (-)	gn (-)
1	Timbunan Perkuatan	Coarse	4.3	1.25	1.52
2	Lempung Sedang	Fine	1.98	-3.71	1.09
3	Lempung Keras	Fine	1.98	-3.71	1.09
4	Drainase	Coarse	4.3	1.25	1.52
5	Blok Gabion	Coarse	4.3	1.25	1.52

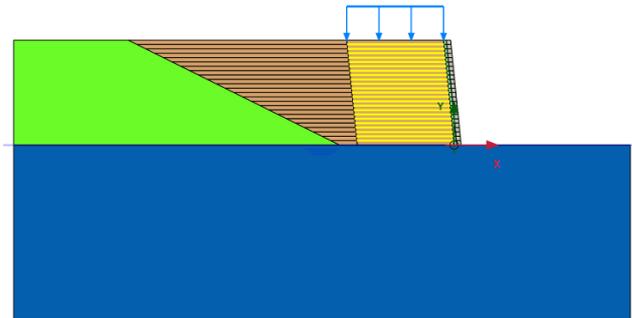
Sumber: (Wösten et al., 1999)

**Tahap Pemodelan**

Pemodelan dimulai dengan analisis proses konstruksi *MSE wall* secara bertahap dengan ketinggian timbunan 2 meter dan diikuti oleh pemasangan *geotextile* pada setiap tahap timbunan, asumsi waktu konstruksi per tahap adalah 5 hari dan dilakukan analisis angka keamanan pada setiap tahap, hal ini bertujuan untuk menganalisis angka keamanan jangka pendek selama masa konstruksi, setiap proses konstruksi dihitung menggunakan *fully coupled flow-deformation analysis*. Setelah dinding mencapai elevasi final, diberikan beban operasional sebesar 20 kPa dan kemudian dihitung angka kermanan jangka pendek (setelah beban operasional diberikan) dan jangka panjang (setelah konsolidasi dengan derajat konsolidasi 90%).

Tahap selanjutnya dilakukan analisis pengaruh curah hujan terhadap stabilitas *MSE wall* berdasarkan parameter infiltrasi yang terdapat pada **Tabel 2**. Dari hasil analisis yang diperoleh, dilakukan pembahasan terhadap hasil tegangan air dan angka keamanan untuk setiap pemodelan, sehingga dapat diperoleh hubungan antara

pengaruh variasi intensitas curah hujan dan durasi hujan terhadap stabilitas *MSE wall*, model analisis dan tahap analisis terdapat pada **Gambar 2** dan **Tabel 4**.



Gambar 2. Model Geometri pada PLAXIS 2D

Tabel 4. Tahap Analisis

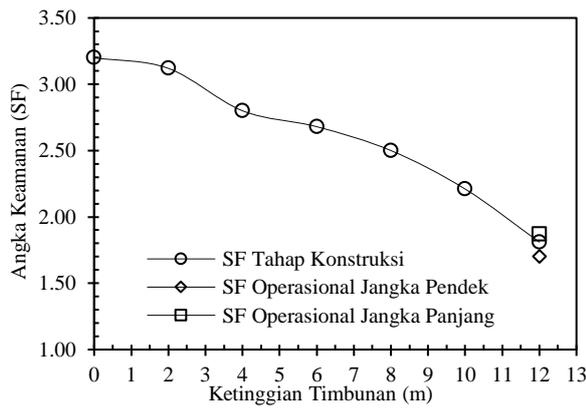
No	Tahap	Aktivitas	Hasil
1	Konstruksi	Penimbunan dan pemasangan <i>geotextile</i> @2m	1. <i>Flow-deformation</i> 2. <i>Safety factors</i>
	Operasional Jangka Pendek	Beban 20 kPa	
Operasional Jangka Pendek			
4	Analisis Intensitas Hujan	Pemodelan infiltrasi	

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

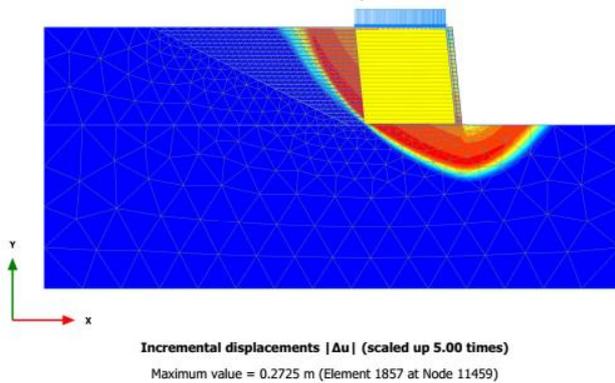
**Tahap Konstruksi**

Hasil analisis menunjukkan bahwa kontruksi *MSE wall* mempunyai angka keamanan yang memenuhi kriteria, dengan syarat angka keamanan global minimum untuk *MSE wall* adalah 1.5 (FHWA, 2009). **Gambar 3** merupakan grafik hubungan angka keamanan terhadap tahapan konstruksi, diperoleh bahwa tanah asli memiliki kondisi yang stabil dengan angka keamanan lereng adalah 3.20 sebelum dilakukan proses penimbunan, kemudian dilakukan penimbunan secara bertahap setinggi 2 meter pada setiap tahapnya, diperoleh angka keamanan pada akhir proses konstruksi adalah 1.81, kemudian dilakukan analisis terhadap beban operasional sehingga angka keamanan operasional minimum adalah 1.70, untuk angka keamanan operasional jangka panjang diperoleh hasil sebesar 1.87.

Penggunaan material *geotextile* dan material timbunan memberikan hasil yang baik, hal ini dapat dilihat pada **Gambar 4** bahwa bidang runtuh *MSE wall* berada diluar zona perkuatan, hal ini mengindikasikan bahwa tidak ada kerusakan pada zona perkuatan.



Gambar 3. Angka Keamanan MSE Wall pada Tahap Konstruksi dan Operasional



Gambar 4. Bidang Runtuh MSE Wall kondisi Operasional

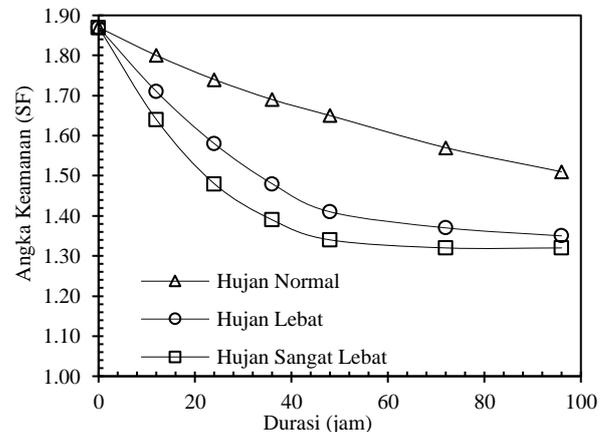
### Stabilitas MSE Wall Terhadap Curah Hujan

Pengaruh curah hujan terhadap angka keamanan terdapat pada **Gambar 5**. Berdasarkan analisis yang dilakukan terdapat variasi parameter intensitas hujan dan durasi terjadinya hujan. Pada intensitas hujan normal diperoleh bahwa angka keamanan pada 12 jam pertama terdapat penurunan angka keamanan menjadi 1.80, kemudian analisis yang sama dilakukan untuk durasi waktu yang lebih lama (24, 36, 48, 72, dan 96 jam), dari analisis tersebut diperoleh angka keamanan dengan nilai 1.74, 1.69, 1.65, 1.57, dan 1.51 secara berturut-turut. Penurunan angka keamanan yang terjadi pada curah hujan normal memiliki hubungan yang hampir linear, dimana angka keamanan mengalami penurunan dengan rasio penurunan yang cenderung konstan.

Analisis stabilitas untuk intensitas hujan lebat memberikan hasil dalam batas aman terhadap syarat minimum untuk hujan pada durasi maksimal 24 jam, dimana diperoleh angka keamanan sebesar 1.58, sedangkan pada durasi hujan diatas 24 jam menunjukkan bahwa angka keamanan berada dibawah kriteria angka keamanan minimum, akan tetapi secara teoritis lereng masih berada dalam kondisi stabil karena angka keamanan berada diatas 1, dengan angka keamanan terkecil sebesar 1.35 yang terjadi pada durasi hujan 96 jam.

Analisis intensitas hujan sangat lebat menunjukkan terjadinya penurunan angka keamanan paling besar, hal ini dapat dilihat bahwa grafik angka keamanan untuk kasus ini membentuk garis yang paling curam, angka kermanan yang diperoleh masih berada dalam kriteria aman

untuk durasi 12 jam dengan nilai angka keamanan 1.64, sedangkan untuk durasi lebih dari 12 jam angka keamanan berada dibawah nilai 1.5 dengan angka keamanan terkecil 1.32 yang terjadi pada durasi hujan 72 jam dan 96 jam. Analisis intensitas hujan lebat dan sangat lebat memberikan hasil yang memiliki pola yang hampir sama, dimana penurunan angka keamanan yang terjadi pada 48 jam pertama cenderung lebih besar dibandingkan dengan penurunan angka keamanan setelah 48 jam terjadinya hujan.



Gambar 5. Pengaruh Intensitas dan Durasi Hujan Terhadap Angka Keamanan

Kegagalan terhadap sistem penahan merupakan hal yang rentan terjadi yang disebabkan oleh intensitas curah hujan dan durasi hujan yang terjadi dalam waktu yang cukup lama. Infiltrasi air hujan kedalam tanah menyebabkan kenaikan tinggi muka air di belakang dinding meningkat, sehingga gaya lateral yang diterima dinding menjadi lebih besar. Akan tetapi jika dinding memiliki drainase yang baik, maka air yang terdapat di belakang dinding akan dapat mengalir dengan segera.

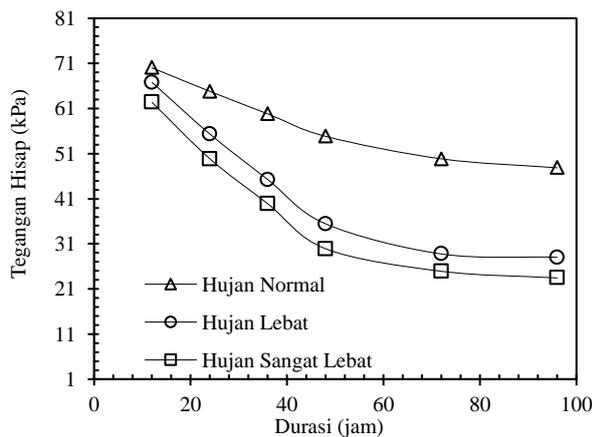
Stabilitas MSE wall ditentukan oleh besarnya tegangan efektif yang terjadi pada tanah. Pada tanah jenuh, nilai tegangan efektif ditentukan oleh nilai tegangan total dikurangi dengan tegangan air yang terjadi, akan tetapi pada tanah tidak jenuh terdapat tegangan hisap (*suction*) yang terjadi karena perbedaan antara tekanan udara dan tekanan air yang mengisi pori tanah, keberadaan tegangan hisap membuat nilai tegangan efektif lebih besar berdasarkan **Persamaan (2)** (Bishop & Blight, 1963), perhitungan tentang tegangan efektif juga dilakukan oleh (D. G. Fredlund et al., 1978; Oberg & Salfors, 1997).

**Gambar 6** menunjukkan hasil analisis nilai tegangan hisap terhadap intensitas dan durasi hujan, pada kondisi hujan normal terjadi tegangan hisap maksimum sebesar 70.03 kPa pada durasi hujan 12 jam, nilai tegangan hisap mengalami penurunan dengan bertambahnya durasi hujan (24, 36, 48, 72, dan 96 jam) yaitu 64.81 kPa, 59.82 kPa, 54.84 kPa, 49.85 kPa, dan 47.86 kPa secara berturut-turut. Pola penurunan yang terjadi hampir mengikuti pola penurunan angka keamanan yang terjadi.

Pada hujan lebat nilai tegangan hisap pada durasi 12 jam adalah 66.80 kPa, nilai ini mengalami penurunan yang signifikan sampai dengan durasi hujan 48 jam yaitu sebesar 35.45 kPa, atau turun sebesar 47%, sedangkan penurunan nilai tegangan hisap yang terjadi setelah 48 jam cenderung lebih kecil dibandingkan dengan durasi

sebelumnya, dimana diperoleh nilai tegangan hisap sebesar 28.76 kPa dan 28.03 kPa untuk waktu 72 jam dan 96 jam.

Penurunan tegangan hisap terbesar terdapat pada kondisi hujan sangat lebat, pada durasi 12 jam tegangan hisap yang terjadi adalah 62.38 kPa, nilai ini mengalami penurunan yang relatif besar dengan rasio penurunan yang hampir linear sampai dengan durasi hujan 48 jam, dimana diperoleh nilai tegangan hisap sebesar 29.91 kPa, atau turun sebesar 52%. Pola yang terjadi pada kondisi hujan sangat lebat hampir mirip dengan kondisi hujan sangat lebat, dimana setelah durasi hujan 48 jam, nilai penurunan tegangan hisap menjadi lebih kecil, diperoleh nilai tegangan hisap sebesar 24.93 kPa dan 23.44 kPa pada waktu 72 jam dan 96 jam untuk kondisi hujan sangat lebat.

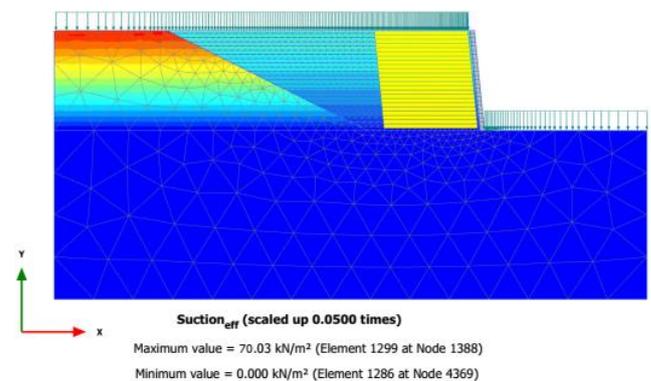


Gambar 6. Pengaruh Intensitas dan Durasi Hujan Terhadap Tegangan Hisap

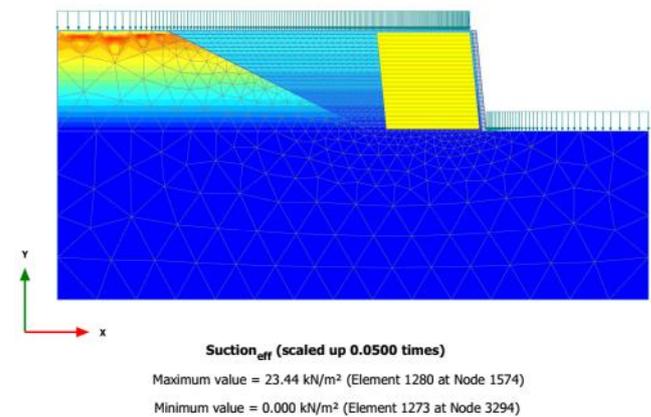
Penurunan angka keamanan dan penurunan tegangan hisap pada *MSE wall* menunjukkan hasil yang cenderung sama, dimana pada masing-masing variasi intensitas hujan dan durasi ditemukan pola penurunan yang mendekati. Angka keamanan dan tegangan hisap mengalami penurunan yang signifikan sampai dengan durasi hujan 48 jam dan kemudian nilai penurunan relatif lebih kecil setelah durasi tersebut, kecuali pada kondisi hujan normal bahwa penurunan angka keamanan masih menunjukkan rasio yang hampir sama, hal ini terjadi karena tingkat kejenuhan tanah masih rendah pada hujan kondisi normal sampai dengan durasi 96 jam. Derajat penurunan angka keamanan dipengaruhi oleh tingkat kejenuhan tanah, dimana mekanisme penurunan tegangan hisap terjadi karena proses kenaikan kejenuhan tanah yang menyebabkan perbedaan tegangan udara dan tegangan air pada pori tanah akan menurun, pada saat tanah jenuh sempurna nilai tegangan hisap habis, hasil tersebut juga diperoleh oleh (D. G. Fredlund et al., 1978; Tohari et al., 2007; Van Genuchten, 1980).

**Gambar 7 dan Gambar 8** menunjukkan hasil tegangan hisap maksimum dan tegangan hisap minimum, diperoleh bahwa tegangan hisap maksimum terjadi pada kondisi hujan normal dengan durasi 12 jam, sedangkan tegangan hisap minimum terjadi pada kondisi hujan sangat lebat dengan durasi 96 jam. Berdasarkan hasil tersebut juga diperoleh bahwa tegangan hisap cenderung terjadi pada tanah asli dimana tanah tersebut adalah tanah berbutir halus dengan permeabilitas rendah, sehingga air membutuhkan waktu untuk mengalir, seiring dengan bertambahnya waktu

dan intensitas hujan, maka volume air akan bertambah dan saturasi tanah meningkat, yang mengakibatkan penurunan tegangan hisap dan berakibat kepada turunnya angka keamanan. Pada tanah timbunan diperoleh nilai tegangan hisap yang sangat kecil dan cenderung tidak berubah pada durasi hujan berlangsung, dengan nilai maksimum adalah 1.13 kPa dari semua model, kondisi ini disebabkan oleh permeabilitas tanah timbunan yang tinggi dan terdapat drainase yang mampu mengalirkan air dengan cepat, hal ini mengakibatkan tidak terjadinya penurunan angka keamanan pada bagian internal *MSE wall*. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan material dan drainase yang baik pada timbunan *MSE wall* sangat penting terhadap stabilitas dinding akibat hujan. Kecepatan infiltrasi air kedalam tanah dipengaruhi oleh jenis butiran tanah dan tingkat kejenuhan tanah, tanah berbutir halus dan saturasi tinggi cenderung mempunyai kecepatan infiltrasi lebih lambat dibandingkan dengan tanah berbutir kasar dengan saturasi rendah.



Gambar 7. Tegangan Hisap Maksimum Terjadi pada Kondisi Hujan Normal dengan Durasi 12 Jam.



Gambar 8. Tegangan Hisap Minimum Terjadi pada Kondisi Hujan Sangat Lebat dengan Durasi 96 Jam.

Meskipun memiliki drainase yang baik, dan tidak terdapat tegangan air yang menyebabkan kerentanan pada internal struktur *MSE wall*, perlu diperhatikan bahwa pada tanah alami dengan gradasi halus yang memiliki nilai permeabilitas yang rendah dapat menyebabkan kondisi kritis terhadap stabilitas global *MSE wall*, karena apabila terjadi hujan maka akan terjadi kenaikan saturasi tanah, kenaikan tegangan air, penurunan tegangan hisap, dan penurunan angka keamanan.

## KESIMPULAN

Curah hujan memberikan pengaruh yang signifikan terhadap stabilitas *MSE wall*, pada penelitian ini dilakukan analisis stabilitas terhadap variasi intensitas dan durasi hujan menggunakan metode elemen hingga dengan memperhatikan hasil berupa angka keamanan, derajat kejenuhan, dan tegangan yang terjadi. Berikut adalah kesimpulan yang diperoleh:

1. Stabilitas *MSE wall* sangat dipengaruhi oleh intensitas hujan, dimana intensitas hujan yang tinggi memberikan nilai penurunan angka keamanan yang relatif lebih besar.
2. Durasi hujan yang semakin lama akan memberikan penurunan angka keamanan yang semakin besar, dimana penurunan yang terjadi lebih signifikan pada durasi awal terjadinya hujan, semakin lama hujan terjadi derajat penurunan angka keamanan semakin berkurang.
3. Penurunan angka keamanan disebabkan oleh kenaikan saturasi tanah, kenaikan tegangan air, dan penurunan tegangan hisap yang diakibatkan oleh infiltrasi air kedalam tanah. Kecepatan infiltrasi dan penurunan tegangan hisap dipengaruhi oleh permeabilitas tanah, semakin kasar butiran tanah, maka penurunan tegangan hisap semakin kecil. Potensi penurunan angka keamanan secara global harus diperhatikan pada semua lapisan tanah, terutama pada tanah berbutir halus.
4. Pemilihan material timbunan berbutir kasar dan bergradasi baik serta perencanaan drainase yang memadai pada *MSE wall* dapat mengurangi risiko penurunan keamanan internal dinding.

## DAFTAR PUSTAKA

- AASHTO. (2007). *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*.
- Adamson, D., Alfaro, M., Blatz, J., & Bannister, K. (2020). *Construction and Post-Construction Deformation Analysis of an MSE Wall Using Terrestrial Laser Scanning*. 767–777. <https://doi.org/10.1061/9780784482797.075>
- Allen, T. M., Bathurst, R. J., & Bozorgzadeh, N. (2019). Probabilistic Tensile Strength Analysis of Steel Strips in MSE Walls Considering Corrosion. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 145(5), 04019016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002043](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002043)
- Bathurst, R. J., & Naftchali, F. M. (2021). Geosynthetic reinforcement stiffness for analytical and numerical modelling of reinforced soil structures. *Geotextiles and Geomembranes*, 49(4), 921–940. <https://doi.org/10.1016/J.GEOTEXMEM.2021.01.003>
- Berg, R. R., Christopher, B. R., & Samtani, N. C. (2009). *Design of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes, FHWA-NHI-10-024*.
- Bishop, A. ., & Blight, A. K. . (1963). Some aspects of effective stress in saturated and partially saturated soils. *Géotechnique*, 13, 177–197.
- Bozorgzadeh, N., Bathurst, R. J., Allen, T. M., & Miyata, Y. (2019). Reliability-Based Analysis of Internal Limit States for MSE Walls Using Steel-Strip Reinforcement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(1), 04019119. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002192](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002192)
- Brinkgreve, R. B. . (2016). *Manual, Plaxis Material Models*.
- Deng, B., & Yang, M. (2019). Bearing Capacity Analysis of Pile-Stabilized Slopes under Steady Unsaturated Flow Conditions. *International Journal of Geomechanics*, 19(12), 04019129. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001509](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001509)
- FHWA. (2009). *Design and Construction of Mechanically Stabilized Earth Walls and Reinforced Soil Slopes*.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R., & Widger, R. A. (1978). The shear strength of unsaturated soils. *Can. Geotech. J.*, 15, 313–321.
- Fredlund, M. D., Fredlund, D. G., & Zhang, L. (2018). *Moving from 2D to a 3D Unsaturated Slope Stability Analysis*. 136–145. <https://doi.org/10.1061/9780784481691.014>
- Hulagabali, A., Solanki, C., Dodagoudar, G., Konnur, S., & Shettar, M. (2018). Analysis of Mechanically Stabilised Earth (MSE) Retaining Wall using Finite Element and AASHTO Methods. *Journal of Engineering Technology*, 6, 139–150.
- Kim, W. S., & Borden, R. H. (2013). Numerical Simulation of MSE Wall Behavior Induced by Surface-Water Infiltration. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), 2110–2124. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000927](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000927)
- Koerner, R. M., & Koerner, G. R. (2013). A data base, statistics and recommendations regarding 171 failed geosynthetic reinforced mechanically stabilized earth (MSE) walls. *Geotextiles and Geomembranes*, 40, 20–27.
- NCMA. (2012). *National Concrete Masonry Association Procedure*.
- Oberg, A. L., & Sallfors, G. (1997). Determination of shear strength parameters of unsaturated silts and sands based on the water retention curve. *Geotech. Test. J.*, 20, 40–48.
- Rahardjo, H., Santoso, V. A., Leong, E. C., Ng, Y. S., & Hua, C. J. (2011). NUMERICAL ANALYSES AND MONITORING PERFORMANCE OF RESIDUAL SOIL SLOPES. *SOILS AND FOUNDATIONS*, 51(3), 471–482.
- Skempton, A. . (1960). “Terzaghi’s Discovery of Effective Stress”, From Theory to Practice in Soil Mechanics. *Selections from the Writings of Karl Terzaghi, John Wiley & Sons, New York*, 42–53.
- Sosrodarsono, S. (1999). *Hidrologi untuk Pengairan*. PT. Pradnya Paramita.
- Sun, D., Wang, L., & Li, L. (2019). Stability of Unsaturated Soil Slopes with Cracks under Steady-Infiltration Conditions. *International Journal of Geomechanics*, 19(6), 04019044.

- [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001398](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001398)--
- Terzaghi, V. K. (1963). The Shearing Resistance of Saturated Soils and the Angle between the Planes of Shear. *1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1*, 54–56.
- Tohari, A., Nishigaki, M., & Komatsu, M. (2007). Laboratory rainfall-induced slope failure with moisture content measurement. *J Geotech Geoenviron Eng, 133*, 575–587.
- Turkel, B., Yildirim, I. Z., & Guler, E. (2020). *The Effect of Natural Frequency on the Seismic Behavior of an 8 m High MSE Wall*. 406–415.  
<https://doi.org/10.1061/9780784482797.040>
- Vahedifard, F., Leshchinsky, D., Mortezaei, K., & Lu, N. (2016). Effective Stress-Based Limit-Equilibrium Analysis for Homogeneous Unsaturated Slopes. *International Journal of Geomechanics, 16*(6).  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000554](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000554)--
- Vahedifard, F., & Robinson, J. D. (2016). Unified Method for Estimating the Ultimate Bearing Capacity of Shallow Foundations in Variably Saturated Soils under Steady Flow. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 142*(4), 04015095.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001445](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001445)--
- Van Genuchten, M. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal, 44*(892–898).
- VandenBerge, D. R., Reed, E. C., & Li, R. (2021). Mobilized Bearing Capacity Analysis of Global Stability for Walls Supported by Aggregate Piers. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147*(6), 04021034.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002540](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002540)
- VandenBerge, D. R., Valentine, R. J., Brandon, T. L., & Wright, S. G. (2020). Case History: Failure of the Reinforced Soil Slope at Yeager Airport, Charleston, West Virginia. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 147*(1), 05020013.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002430](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002430)
- Wösten, J. H. M., Lilly, A., Nemes, A., & Le Bas, C. (1999). Development and use of a database of hydraulic properties of European soils. *Geoderma, 90*(3–4), 169–185.
- Yoo, C., & Jung, H.-Y. (2006). Case History of Geosynthetic Reinforced Segmental Retaining Wall Failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 132*(12), 1538–1548.