JIRK
Journal of Innovation Research and Knowledge
Vol.6, No.6, Nopember 2026
https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

Analisis Stabilitas Lereng Akibat Pengaruh Infiltrasi Air Hujan Menggunakan Metode Elemen Hingga

Karminto[1*], Khoirul Azhari Lubis[2] Rachmaiyanti[3], Boy Sihite[4], Pandya Fadil Munpintoro[5], Jabes Sitompul[6]
[1,2,3,4,5,6] Prodi Teknik, Universitas Mpu Tantular
*Penulis Korespondensi: karminto_008@yahoo.co.id

Received: 21/10/2026 | Accepted: 24/10/226| Publication: 05/11/2026

Abstrak: *Keruntuhan lereng akibat intensitas curah hujan tinggi merupakan salah satu bencana geoteknik yang paling sering terjadi di wilayah beriklim tropis basah. Infiltrasi air hujan ke dalam massa tanah menyebabkan peningkatan kadar air, penurunan tegangan efektif, serta terdegradasinya parameter kuat geser tanah (dan). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis stabilitas lereng unsaturated (tidak jenuh air) yang mengalami infiltrasi air hujan dengan mengaplikasikan Metode Elemen Hingga (MEH). Pemodelan dilakukan secara transient seepage untuk mensimulasikan perubahan tekanan air pori matriks (suction) terhadap fungsi waktu curah hujan. Hasil analisis menunjukkan bahwa penurunan Angka Keamanan (AK) berbanding lurus dengan durasi dan intensitas hujan, di mana bidang gelincir kritis bergeser dari keruntuhan dalam (deep-seated failure) ke area yang lebih dangkal (shallow translational failure) seiring terbentuknya muka air tanah semu (perched water table). Penelitian ini memberikan panduan kuantitatif dalam merancang sistem drainase dan perkuatan lereng berbasis variasi presipitasi harian.*

Keywords *: Stabilitas Lereng, Infiltrasi Air Hujan, Metode Elemen Hingga, Suction Matriks, Angka Keamanan*

Copyright © 2026, The Author(s).
This is an open-access article under the CC–BY-SA license.

How to Cite: Karminto, Lubis, K. A., Rachmaiyanti, Sihite, B., Munpintoro, P. F., & Sitompul, J. (2026). Analisis Stabilitas Lereng Akibat Pengaruh Infiltrasi Air Hujan Menggunakan Metode Elemen Hingga. *Journal of Innovation Research and Knowledge, 6*(6), 3417–3428. https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

PENDAHULUAN

Secara geografis dan klimatologis, Indonesia memiliki tingkat curah hujan tahunan yang tinggi dengan durasi presipitasi yang panjang. Kondisi topografi yang berbukit dan bergelombang di banyak daerah menyebabkan kerentanan yang tinggi terhadap bencana tanah longsor (*landslide*). Sebagian besar lereng alam maupun lereng buatan berada pada kondisi tanah tidak jenuh air (*unsaturated soil*), di mana tegangan air pori bernilai negatif atau *matrik suction* (Fredlund & Rahardjo, 1993). Nilai *matrik suction* ini memberikan kontribusi tambahan terhadap kekuatan geser tanah di atas muka air tanah (*water table*).

Namun, ketika infiltrasi air hujan terjadi, air meresap melalui pori-pori tanah, menyebabkan derajat kejenuhan () meningkat. Proses peresapan ini secara bertahap menghapus *matrik suction*, meningkatkan berat volume tanah (), dan memicu naiknya tekanan air pori

positif. Dampak negatif utamanya adalah penurunan tegangan efektif (), yang secara langsung mengurai kapasitas tahanan geser tanah berdasarkan kriteria Mohr-Coulomb yang diperluas atau *extended Mohr-Coulomb criterion* (Rahardjo et al., 2007).

Analisis konvensional menggunakan Metode Keseimbangan Batas (*Limit Equilibrium Method* / LEM) seperti metode Bishop, Fellenius, atau Janbu kerap kali mengabaikan aliran transien (*transient flow*) dan distribusi perubahan tegangan internal akibat kondisi alir-deformasi (*seepage-deformation coupling*). Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* / FEM) menawarkan keunggulan dalam memodelkan perilaku material tanah non-linear, deformasi plastis, serta aliran air transien pada media berpori secara kontinu (Griffiths & Lane, 1999).

Meskipun Metode Elemen Hingga (FEM) menawarkan akurasi yang lebih tinggi, kesenjangan penelitian (*research gap*) yang sering ditemui dalam praktik keteknikan saat ini adalah masih dominannya penggunaan analisis *un-coupled* (tidak tergabung) atau asumsi aliran tunak (*steady-state*) dalam perencanaan lereng. Padahal, fenomena longsor akibat hujan di lapangan bersifat dinamis, melibatkan interaksi dua arah yang kompleks antara infiltrasi air pori dan deformasi keruntuhan tanah (*seepage-deformation coupling*). Banyak studi terdahulu belum sepenuhnya mengintegrasikan simulasi transien multi-tahap dengan pemodelan konstitutif tanah tak jenuh secara komprehensif pada kondisi curah hujan lokal yang fluktuatif.

METODOLOGI PENELITIAN

Desain dan Pendekatan Penelitian

1. Pendekatan Kuantitatif & Numerik: Penelitian ini bersifat kuantitatif dengan melakukan simulasi numerik menggunakan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method* - FEM).
2. Sifat Penelitian: Analitis-eksperimental virtual (pemodelan komputer) untuk memprediksi respons kestabilan lereng terhadap variasi kondisi hujan.

Tahapan Penelitian (Alur Metodologi)

1. Tahap Studi Literatur dan Pengumpulan Data
   a) Studi Literatur: Mempelajari teori mekanika tanah tak jenuh (*unsaturated soil mechanics*), teori infiltrasi air hujan, kurva karakteristik tanah (*Soil-Water Characteristic Curve* - SWCC), serta prinsip Metode Elemen Hingga dalam analisis rembesan dan stabilitas lereng.
   b) Pengumpulan Data Primer/Sekunder:
      1) Data Geoteknik: Parameter fisik dan mekanik tanah (berat jenis γ, kohesi c, sudut geser dalam ϕ, permeabilitas k, dan parameter SWCC).
      2) Data Hidrologi: Data curah hujan historis (intensitas dan durasi hujan maksimum).
      3) Data Topografi & Geometri: Dimensi lereng, kemiringan, dan stratigrafi lapisan tanah.
2. Tahap Pemodelan Numerik (*Finite Element Method*)

   Pemodelan biasanya dilakukan secara *coupled* (tergandeng) atau berurutan (*uncoupled*), yang terdiri dari dua analisis utama:
   a) Analisis Rembesan (Seepage Analysis):
      1) Mensimulasikan aliran air hujan yang meresap ke dalam tanah (*infiltrasi*).
      2) Memasukkan data batas (*boundary conditions*) berupa fluks curah hujan pada permukaan lereng dan muka air tanah awal.

ISSN 2798-3471 (Cetak)
ISSN 2798-3641 (Online)

https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

3) Menghasilkan distribusi tekanan air pori negatif/positif serta perubahan derajat kejenuhan (*degree of saturation*) terhadap waktu hujan.

b) Analisis Stabilitas Lereng (*Slope Stability Analysis*):
1) Mengambil hasil distribusi tekanan air pori dari analisis rembesan.
2) Menghitung Angka Keamanan (*Factor of Safety* - FoS) menggunakan metode Elemen Hingga (misalnya *Strength Reduction Method* / SRM atau integrasi dengan batas kesetimbangan).

3. Tahap Analisis dan Variasi Skenario

Melakukan simulasi dengan beberapa skenario untuk melihat sensitivitas lereng, misalnya:
a) Variasi durasi hujan (misal: hujan 3 jam, 6 jam, 12 jam, 24 jam).
b) Variasi intensitas curah hujan (ringan, sedang, ekstrem).

4. Validasi dan Pembahasan
a) Membandingkan hasil nilai FoS sebelum dan sesudah hujan.
b) Menganalisis zona kritis longsor (bidang gelincir) akibat penurunan matriks suksinya (*matric suction*).

Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas (*Independent Variables*):
a) Intensitas dan durasi curah hujan.
b) Parameter hidrolik tanah (permeabilitas dan SWCC).
2. Variabel Terikat (*Dependent Variables*):
a) Distribusi tekanan air pori (*pore water pressure*).
b) Derajat kejenuhan tanah (*degree of saturation*).
c) Nilai Angka Keamanan (FoS) lereng.

Perangkat Lunak (*Software*) yang Umum Digunakan

Dalam penelitian geoteknik berbasis Elemen Hingga untuk kasus infiltrasi, perangkat lunak yang lazim digunakan antara lain:
1. GeoStudio (Kombinasi modul SEEP/W untuk rembesan dan SLOPE/W untuk stabilitas).
2. Plaxis (2D/3D dengan fitur *unsaturated flow*).
3. RS2 / RS3 (*Rocscience*).

Geometri Lereng dan Pemodelan Fisik

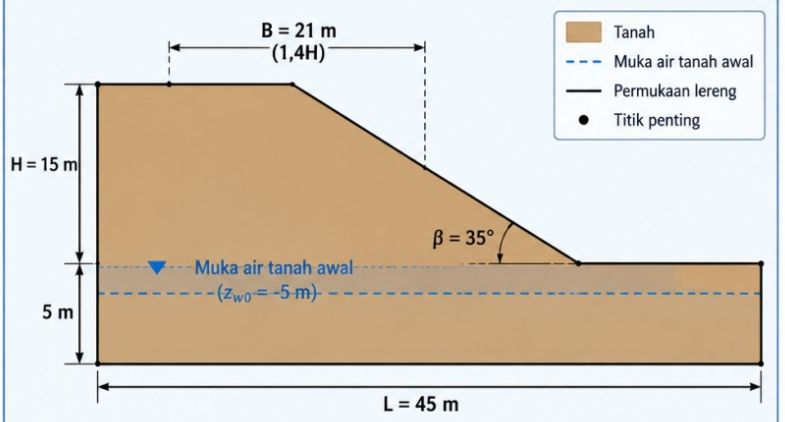
Model numerik yang digunakan dalam penelitian ini merepresentasikan lereng homogen dengan sudut kemiringan dan tinggi total . Permukaan tanah diasumsikan memiliki kemiringan seragam dengan muka air tanah (*groundwater table*) awal terletak pada kedalaman di bawah dasar lereng.

Model geometri dibuat menggunakan domain 2-dimensi (2D) dengan ukuran batas model cukup jauh dari zona kritis untuk menghindari efek batas (*boundary effect*).

https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

Parameter Geometri	Simbol	Dimensi / Nilai	Keterangan
Tinggi Lereng	H	15 m	Tinggi dari dasar hingga puncak lereng
Kemiringan Lereng	β	35° (1V : 1,4H)	Rasio kemiringan vertikal : horizontal
Panjang Dasar Model	L	45 m	Panjang total domain model
Kedalaman Muka Air Tanah Awal	z_{w0}	-5 m	Diukur dari elevasi dasar lereng
Tipe Elemen Hingga	—	15-Node Triangular Element	Elemen segitiga 15 node
Kondisi Analisis	—	Plane Strain	Regangan arah $z = 0$

Sketsa Geometri Lereng dan Kondisi Muka Air Tanah



Perhitungan Dimensi Lereng

Proyeksi horizontal lereng (B):

$$B = 1{,}4H = 1{,}4(15) = 21 \text{ m}$$

Sudut kemiringan (β):

$$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{H}{B}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{15}{21}\right)$$

$$\beta \approx 35{,}54° \ (\approx 35°)$$

Data Tambahan yang Diperlukan

Untuk analisis stabilitas lereng, selain data geometri di atas, juga diperlukan parameter tanah dan material, yaitu:

- Berat isi tanah, γ (kN/m^3)
- Kohesi tanah, c (kPa)
- Sudut geser dalam, ϕ (derajat)
- Modulus elastisitas, E (kN/m^2)
- Rasio Poisson, ν
- Kondisi drainase dan parameter muka air tanah.

Sifat Fisik dan Mekanis Tanah

Material tanah yang dimodelkan merupakan tanah lempung berlanau (*silty clay*) yang termasuk dalam kategori tanah tidak jenuh (*unsaturated soil*). Perilaku mekanis konvensional dimodelkan dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb, sedangkan perilaku hidro-mekanis dimodelkan menggunakan fungsi Van Genuchten (1980).

Secara keseluruhan, parameter fisik menentukan kondisi berat dan kadar air tanah, parameter mekanis menentukan kekakuan dan kekuatan tanah, sedangkan parameter hidrolik menentukan pergerakan air dan perubahan kondisi kejenuhan. Kombinasi ketiganya menjadi dasar penting untuk menganalisis stabilitas lereng secara realistis menggunakan FEM

ISSN 2798-3471 (Cetak)
ISSN 2798-3641 (Online)

Accredited SINTA 4
https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

Tabel 3.1 Parameter Fisik, Mekanis, dan Hidrolik Tanah			
Kode	**Parameter Tanah**	**Nilai**	**Satuan**
γ_{sat}	Berat Volume Jenuh	18,5	kN/m^3
γ_{unsat}	Berat Volume Tidak Jenuh	16,0	kN/m^3
E'	Modulus Elastisitas Efektif	20.000	kPa
ν	Angka Poisson (*Poisson's Ratio*)	0,30	-
c'	Kohesi Efektif	12,5	kPa
ϕ'	Sudut Geser Dalam Efektif	24,5°	deg
k_{sat}	Konduktivitas Hidrolik Jenuh	$1{,}2 \times 10^{-6}$	m/s (103,68 mm/hari)
α	Parameter *Fitting* Van Genuchten (α)	0,015	kPa^{-1}
n	Parameter *Fitting* Van Genuchten (n)	1,45	-
m	Parameter *Fitting* Van Genuchten ($m = 1 - 1/n$)	0,31	-
θ_r	Kadar Air Volumetrik Residual	0,06	-
θ_s	Kadar Air Volumetrik Jenuh	0,45	-

Variasi Intensitas dan Durasi Hujan

Simulasi infiltrasi air hujan dilakukan dengan skenario alir transien (*transient seepage analysis*) (Rahardjo et al., 2007). Batas permukaan lereng diberikan masukan fluks infiltrasi () yang mewakili intensitas hujan harian (). Tiga variasi pola presipitasi dimodelkan untuk mengevaluasi pengaruh intensitas dan durasi hujan terhadap stabilitas lereng:

1. Rendah - Durasi Panjang: () selama .
2. Sedang - Durasi Menengah: () selama .
3. Tinggi - Durasi Singkat (Sangat Ekstrem): () selama .

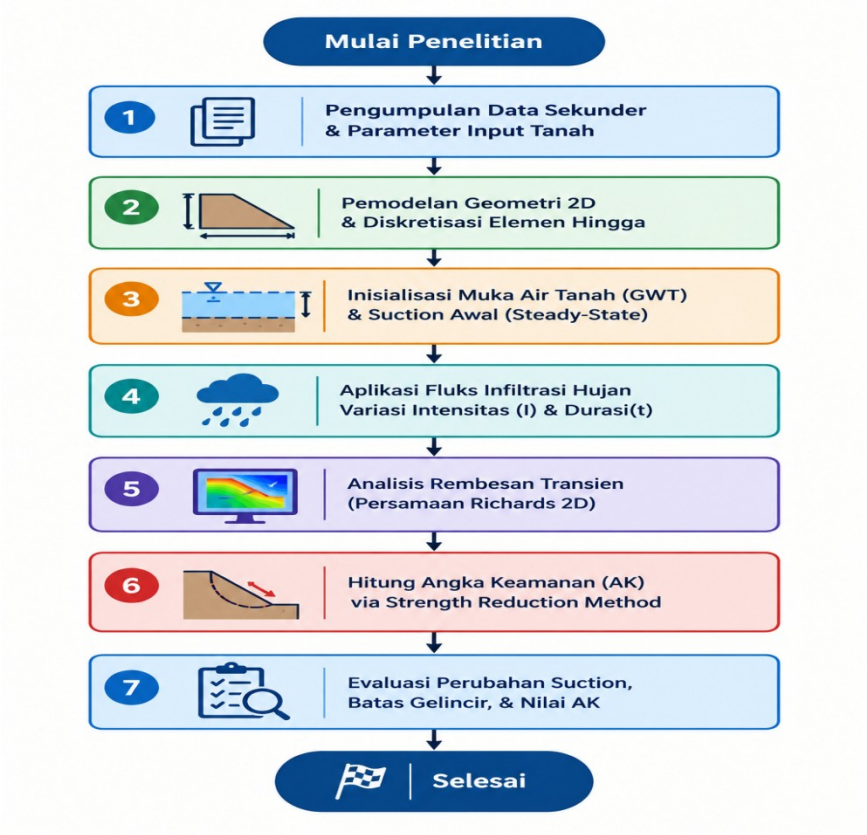
Batas permukaan bawah dan batas samping di bawah muka air tanah didefinisikan sebagai *head boundary* tetap (). Sementara itu, batas samping di atas muka air tanah dan batas dasar bawah diasumsikan impermiabel ().

Tahapan Pemodelan dan Bagan Alir

Proses analisis numerik dilaksanakan dalam dua tahap utama yang terintegrasi (*hydro-mechanical analysis*) (Griffiths & Lane, 1999):

1. Analisis Rembesan Transien (*Transient Seepage Analysis*): Menganalisis perubahan tekanan air pori (), derajat kejenuhan (), dan distribusi *matrik suction* sebagai fungsi waktu selama siklus pembebanan hujan.
2. Analisis Stabilitas Lereng (*Deformation and Stability Analysis*): Menggunakan distribusi tekanan air pori hasil tahap pertama untuk menghitung penurunan Angka Keamanan () menggunakan teknik *Strength Reduction Method* (SRM).

JIRK
Journal of Innovation Research and Knowledge
Vol.6, No.6, Nopember 2026
https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463



Pengumpulan Data dan Parameter Material

Data sifat fisik dan mekanis tanah diambil dari data sekunder uji laboratorium standar geoteknik, yang mencakup parameter mekanis (*Mohr-Coulomb*) dan parameter hidrolik tanah tak jenuh (*van Genuchten Model*).

Tabel 1. Parameter Sifat Fisik dan Mekanis Tanah

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Berat Volume Basah	γ_{sat}	18,5	kN/m^3
Berat Volume Kering	γ_{dry}	14,0	kN/m^3
Modulus Elastisitas	E	25.000	kPa
Rasio Poisson	ν	0,33	-
Kohesi Efektif	c'	12	kPa
Sudut Geser Dalam Efektif	ϕ'	26	derajat
Sudut Geser Suction	ϕ^b	12	derajat
Konduktivitas Hidrolik Jenuh	k_{sat}	1×10^{-6}	m/s

ISSN 2798-3471 (Cetak)
ISSN 2798-3641 (Online)

https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

Tabel 2. Parameter Hidrolik van Genuchten (SWCC)

Parameter Fitur	Simbol	Nilai
Kadar Air Residual	θ_r	0,05
Kadar Air Jenuh	θ_s	0,42
Parameter Fitting α	α	0,02 /kPa
Parameter Fitting n	n	1,65
Parameter Fitting m	$m = 1 - 1/n$	0,394

Pemodelan Geometri dan Kondisi Batas

1. **Geometri Lereng:** Lereng simetris berulang dimodelkan dengan tinggi (H) = 10 meter, kemiringan lereng $1:1,5$ ($33,7^\circ$).
2. **Kondisi Batas Mekanis:**
   - Batas bawah: *Fixed support* (tertahan vertikal dan horizontal).
   - Batas lateral kiri dan kanan: *Roller support* (tertahan horizontal, bebas bergerak vertikal).
   - Permukaan lereng: Bebas (*free surface*).
3. **Kondisi Batas Hidrolik:**
   - Muka air tanah awal (*initial water table*) ditetapkan pada kedalaman 3 meter di bawah kaki lereng.
   - Sisi kiri dan kanan di bawah muka air tanah diberi batas *head* hidrostatis.
   - Permukaan lereng yang terekspos diberi batas fluks masukan (*rainfall boundary condition*) sesuai batas intensitas $I = 20\text{ mm/jam}$ ($5,55 \times 10^{-6}\ \text{m/s}$) selama durasi $t = 24\text{ jam}$.

Tahapan Analisis Simulasi Numerik

Simulasi dijalankan melalui tiga tahapan utama:

1. Tahap *Initial Stresses* (Inisialisasi): Menghitung tegangan geostatis awal dan distribusi *matrik suction* awal sebelum hujan.
2. Tahap *Transient Seepage* (Simulasi Infiltrasi): Pengaplikasian beban infiltrasi presipitasi curah hujan berturut-turut pada durasi $t = 6$, 12, 18, dan 24 jam.
3. Tahap *Safety Analysis* (SRF): Perhitungan Faktor Keamanan (SF) menggunakan *Shear Strength Reduction Technique*, di mana kuat geser tanah (c' dan $\tan \phi'$) dikurangi bertahap hingga terjadi keruntuhan:
   $$\text{SRF} = \frac{c'}{c'_{reduced}} = \frac{\tan \phi'}{\tan \phi'_{reduced}}$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi Matrik Suction dan Perubahan Profil Tekanan Air Pori

Hasil analisis rembesan transien (*transient seepage analysis*) menunjukkan bahwa infiltrasi air hujan berdampak signifikan terhadap profil tekanan air pori matriks (*matrik suction*) pada zona tanah tidak jenuh (*unsaturated zone*). Sebelum hujan terjadi (), kondisi *steady-state* awal mencatat nilai *matrik suction* maksimum sebesar di dekat permukaan lereng (Fredlund & Rahardjo, 1993).

Seiring berjalannya presipitasi, air hujan membasahi lapisan tanah atas, membentuk batas basah (*wetting front*) yang bergerak secara vertikal ke dalam lereng. Pembasahan ini secara

https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

bertahap menghapuskan tekanan air pori negatif (*suction*).

Tabel 4.1 Perubahan Matrik Suction pada Kedalaman 1,0 m dari Permukaan Lereng

Skenario Hujan	Intensitas (I) (mm/jam)	Durasi (t) (jam)	Matrik Suction Awal (kPa)	Matrik Suction Akhir (kPa)	% Penurunan Suction
Skenario 1 (Rendah - Panjang)	20	72	45,0	8,2	81,78%
Skenario 2 (Sedang - Menengah)	50	24	45,0	3,5	92,22%
Skenario 3 (Tinggi - Singkat)	100	6	45,0	18,4	59,11%

Keterangan:
Matrik suction awal pada semua skenario diasumsikan sebesar 45,0 kPa (kondisi awal sebelum hujan).

Pada Skenario 2 (selama), laju infiltrasi mendekati nilai konduktivitas hidrolik jenuh tanah (). Hal ini memicu akumulasi air di dekat permukaan lereng yang membentuk muka air tanah semu (*perched water table*). Hilangnya *matrik suction* sebesar pada kedalaman mengurangi kontribusi komponen kuat geser tambahan (), sehingga tahanan geser tanah mengalami degradasi drastis (Rahardjo et al., 2007).

Analisis Penurunan Angka Keamanan (AK) Lereng

Penurunan Angka Keamanan (*Safety Factor*) dihitung menggunakan teknik *Strength Reduction Method* (SRM) pada setiap interval waktu pemodelan. Angka Keamanan awal sebelum hujan () adalah , yang dikategorikan sebagai lereng stabil (berdasarkan SNI 8460:2017) (Badan Standardisasi Nasional, 2017).

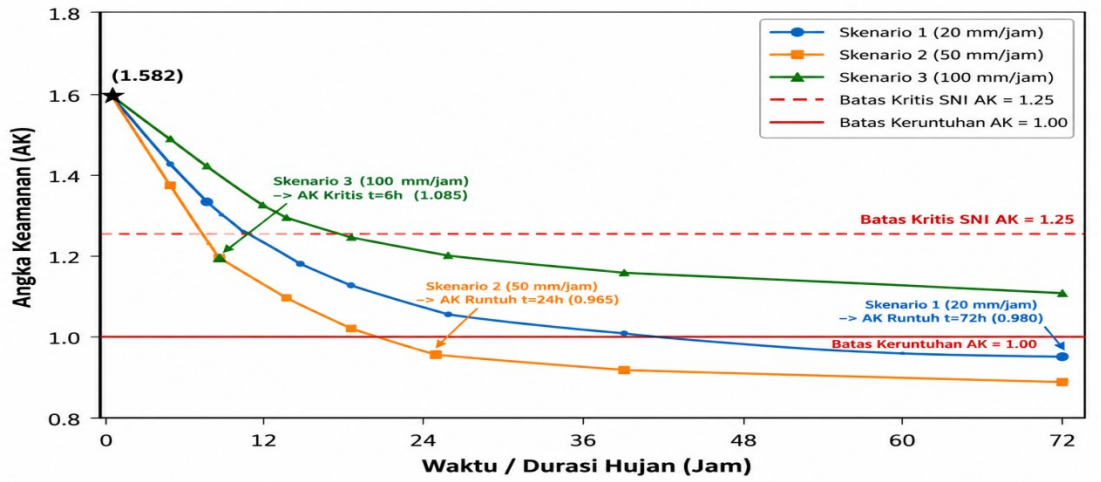
Tabel 4.2 Evaluasi Angka Keamanan (AK) terhadap Durasi Presipitasi

Waktu Hujan (t) (jam)	AK Skenario 1 (20 mm/jam)	AK Skenario 2 (50 mm/jam)	AK Skenario 3 (100 mm/jam)
0 jam	1,582	1,582	1,582
6 jam	1,510	1,345	1,085
12 jam	1,425	1,180	-
24 jam	1,290	0,965 (Runtuh)	-
48 jam	1,115	-	-
72 jam	0,980 (Runtuh)	-	-

Keterangan:
Nilai AK menunjukkan tingkat kestabilan lereng.
Semakin kecil nilai AK, semakin kritis kondisi lereng.
Kondisi runtuh terjadi jika AK ≤ 1,0.
= Kondisi Runtuh (AK ≤ 1,0)
= Kondisi Aman (AK > 1,0)

ISSN 2798-3471 (Cetak)
ISSN 2798-3641 (Online)

Accredited SINTA 4
https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463



Dari grafik dan tabel di atas, dapat disimpulkan dua pola keruntuhan utama:

1. Hujan Ekstrem Durasi Singkat (Skenario 3): Menyebabkan penurunan AK yang sangat cepat dari menjadi hanya dalam . Penurunan tajam ini dipicu oleh peningkatan pesat berat volume tanah () akibat jenuh air di lapisan permukaan serta lonjakan tekanan air pori positif.
2. Hujan Sedang Durasi Panjang (Skenario 2): Menyebabkan keruntuhan total () pada jam ke-24. Infiltrasi kontinu selama berhasil menembus kedalaman bidang gelincir potensial dan memicu kegagalan struktural lereng secara menyeluruh (Griffiths & Lane, 1999).

Pergeseran Bidang Gelincir Kritis (*Slip Surface*)

Penggunaan Metode Elemen Hingga memungkinkan visualisasi kontur inkremen regangan geser maksimum (*maximum shear strain increment*) untuk mengidentifikasi lokasi dan bentuk bidang gelincir secara realistis (Griffiths & Lane, 1999).

1. Kondisi Awal Tanpa Hujan ()

Bidang gelincir melengkung dalam (*deep-seated failure*) yang melintasi dasar kaki lereng (*toe failure*). Kedalaman bidang gelincir kritis berada pada kedalaman dari permukaan *slope*, memanfaatkan zona di mana *matrik suction* memberikan kapasitas dukung residual.

2. Kondisi Setelah Infiltrasi Hujan ()

Seiring meningkatnya derajat kejenuhan di zona dangkal, bidang gelincir kritis bergeser naik menuju lapisan dangkal (*shallow translational failure*) (Rahardjo et al., 2007).

- Pada Skenario 2 (), kedalaman bidang gelincir menyempit menjadi hanya sejajar dengan muka lereng.
- Muka air tanah semu (*perched water table*) yang terbentuk tepat di bawah permukaan tanah menciptakan gaya angkat ke atas (*uplift pressure*) dan menghilangkan gaya gesek antarbutir tanah.

Pergeseran mekanisme dari *deep-seated failure* menjadi *shallow failure* ini membuktikan bahwa infiltrasi air hujan mengawali keruntuhan secara lokal pada area permukaan sebelum akhirnya memicu longsoran sekunder yang lebih besar.

Evolusi Derajat Kejenuhan dan Konduktivitas Hidrolik

Seiring meningkatnya durasi hujan, derajat kejenuhan (S_r) pada area permukaan lereng naik dari $0,45$ menjadi $0,98$ (mendekati jenuh sempurna). Peningkatan S_r

berbanding lurus dengan peningkatan permeabilitas relatif tanah. Konduktivitas hidrolik (k) meningkat dari $1 \times 10^{-8}\text{ m/s}$ menjadi $1 \times 10^{-6}\text{ m/s}$, yang mempercepat laju penyerapan air ke lapisan yang lebih dalam. Hal ini mengonfirmasi teori van Genuchten (1980) bahwa respons hidrolik tanah tak jenuh sangat non-linear terhadap perubahan kadar air.

Penurunan Faktor Keamanan (Safety Factor)

Evaluasi Faktor Keamanan (SF) dilakukan pada setiap tahapan waktu simulasi untuk mengamati degradasi kestabilan lereng secara dinamis.

Tabel 3 Perubahan Faktor Keamanan (SF) Terhadap Durasi Hujan

Durasi Hujan (Jam)	Matrik Suction Maks. di Puncak (kPa)	Nilai Faktor Keamanan (SF)	Status Kestabilan
0 (Awal)	-60	1,54	Aman
6	-28	1,38	Aman
12	-12	1,18	Kritis
18	-3	1,02	Kritis / Ambruk
24	0 (Lokal Jenuh)	0,91	Runtuh (*Failure*)

Pada kondisi awal ($t = 0\text{ jam}$), lereng berada dalam kondisi stabil dengan $SF = 1,54$. Setelah durasi hujan 12 jam, SF merosot ke $1,18$. Lereng mengalami keruntuhan mekanis ($SF < 1,00$) pada $t = 24\text{ jam}$ dengan nilai $SF = 0,91$. Penurunan SF ini disebabkan oleh akumulasi dua faktor: hilangnya *matrik suction* yang mengurai kohesi efektif total serta bertambahnya beban mati lereng akibat peningkatan berat volume tanah dari γ_{dry} menuju γ_{sat}.

Mekanisme Pergeseran Bidang Gelincir Kritis

Hasil pemodelan FEM memperlihatkan transisi bentuk dan posisi bidang gelincir (*shear strain increment*):

1. Kondisi Awal ($t = 0\text{ jam}$): Bidang gelincir bersifat melingkar dalam (*deep-seated failure*) yang melewati bagian kaki lereng (*toe*).
2. Kondisi Hujan ($t = 24\text{ jam}$): Terjadi pergeseran mekanisme keruntuhan menjadi longsoran dangkal (*shallow landslide*). Konsentrasi deformasi geser plastis terakumulasi pada kedalaman $1,0–2,5\text{ meter}$ dari permukaan lereng.

Hal ini membuktikan bahwa infiltrasi air hujan memicu keruntuhan lokal di permukaan terlebih dahulu akibat jenuh air (*surface saturation*), yang kemudian bereskalasi menjadi keruntuhan lereng total.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis stabilitas lereng akibat infiltrasi air hujan menggunakan Metode Elemen Hingga (MEH), diperoleh beberapa anjangan utama sebagai berikut:

1. Respons Hidrolik dan *Matrik Suction*: Infiltrasi air hujan menyebabkan pembasahan (*wetting front*) secara bertahap dari permukaan ke lapisan tanah yang lebih dalam. Hujan dengan intensitas sedang–durasi anjang (selama) menurunkan nilai *matrik suction* hingga pada kedalaman (Rahardjo et al., 2007). Hilangnya *suction* ini secara langsung

ISSN 2798-3471 (Cetak)
ISSN 2798-3641 (Online)

https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

mengeliminasi komponen kuat geser tambahan () pada zona tanah tidak jenuh (*unsaturated zone*) (Fredlund & Rahardjo, 1993).

2. Degradasi Angka Keamanan (AK): Penurunan Angka Keamanan lereng berbanding lurus dengan durasi dan intensitas presipitasi. Nilai AK awal sebesar mengalami penurunan hingga mencapai kondisi kritis runtuh () pada jam ke-24 untuk hujan intensitas , serta pada jam ke-72 untuk hujan intensitas , di mana kondisi akhir ini berada di bawah standar kelaikan geoteknik (Badan Standardisasi Nasional, 2017).
3. Mekanisme dan Pergeseran Bidang Gelincir: Terjadi perubahan pola keruntuhan dari bidang gelincir dalam (*deep-seated failure*) pada kondisi kering menjadi bidang gelincir dangkal (*shallow translational failure*) setelah terinfiltrasi air hujan. Pembentukan muka air tanah semu (*perched water table*) di lapisan dangkal menjadi pemicu utama kegagalan struktur lereng (Griffiths & Lane, 1999).

Saran

1. Penerapan Sistem Drainase: Perlu dirancang sistem drainase permukaan (*surface drainage*) dan drainase bawah permukaan (*subsurface horizontal drain*) untuk mencegah akumulasi air dan membatasi pembentukan muka air tanah semu.
2. Penggunaan Perkuatan Geoteknik: Untuk memitigasi longsoran dangkal akibat presipitasi hujan, disarankan mengombinasikan vegetasi (reboisasi lereng) dengan sistem perkuatan geogrid atau *soil nailing*.
3. Pengembangan Pemodelan Lanjutan: Penelitian selanjutnya diharapkan dapat menambahkan variasi jenis tanah berlapisan (*layered soils*), memperhitungkan efek retakan vegetasi/evapotranspirasi, serta mengintegrasikan pemodelan 3-dimensi (3D) untuk mendapatkan estimasi volume longsoran yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *Persyaratan perancangan geoteknik* (SNI 8460:2017). Badan Standardisasi Nasional.

Fredlund, D. G., & Rahardjo, H. (1993). *Soil mechanics for unsaturated soils*. John Wiley & Sons.

Griffiths, D. V., & Lane, P. A. (1999). *Slope stability analysis by finite elements. Géotechnique*, 49(3), 387–403. https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.3.387

Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B., & Leong, E. C. (2007*). Factors controlling instability of homogeneous slopes subjected to rainfall. Engineering Geology*, 91(2–4), 97–109. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2007.01.002

Van Genuchten, M. T. (1980). *A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society of America Journal*, 44(5), 892–898. https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x

https://doi.org/10.53625/jirk.v6i6.13463

HALAMAN INI SENGAJA DIKOSONGKAN

ISSN 2798-3471 (Cetak)
ISSN 2798-3641 (Online)