

LAPORAN PENELITIAN



**JUDUL PENELITIAN:
PENENTUAN AMBANG BATAS FAKTOR KEAMANAN
KELONGSORAN LERENG AKIBAT PENGARUH CURAH
HUJAN DI SEPANJANG JALUR KERETA API**

Diusulkan oleh:

Tim Peneliti Program Studi Teknik Sipil

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS WIDYATAMA**

April 2021

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh.

Puji syukur kita panjatkan kepada Allah SWT karena atas limpahan rah. Ridha dan karuniaNya laporan penelitian tahap 1 yang berjudul **Penentuan Ambang Batas Faktor Keamanan Kelongsoran Lereng Akibat Pengaruh Curah Hujan di Sepanjang Jalur Kereta Api** hasil kerja sama antara Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widyatama dan PT Kereta Api Indonesia (KAI) (Persero) dapat diselesaikan.

Kegiatan penelitian ini merupakan bentuk dukungan dan implementasi program Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) dari Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Widyatama untuk kemajuan Pendidikan Tinggi di Indonesia. Diharapkan dengan adanya program kerja sama dengan pihak industri yang aplikatif seperti ini bisa meningkatkan kreatifitas dan inovasi dari pihak akademisi maupun praktisi. Sehingga kedepan diperoleh hasil penelitian yang lebih bermanfaat untuk kemajuan Pendidikan maupun teknologi di Indonesia khususnya di bidang Teknik Sipil dan Perkeretaapian.

Tidak lupa juga kami haturkan banyak terima kasih kepada pihak PT KAI, diantaranya:

1. Bpk Mohamad Ramdany, ST selaku *Vice President Safety Standard*
2. Bpk Dicky Arisikam, S.T., M.T selaku *Manager Track and Bridge Engineering*
3. Ibu Endah Kartikasari, S.T

Dan pihak - pihak terkait lainnya yang tidak bisa kami sebutkan satu persatu, yang selama ini telah mendukung berjalannya penelitian ini dengan memberikan informasi, masukan serta saran selama penelitian ini berlangsung, juga atas kemudahan akses akan data – data yang diperlukan., serta dukungan yang maksimal saat dilakukan pengecekan/kunjungan langsung ke lokasi studi.

Kami menyadari atas ketidaksempurnaan penyusunan laporan penelitian ini, namun kami berharap laporan ini akan memberikan manfaat terutama untuk meningkatkan keselamatan di bidang transportasi kereta api. Demi kemajuan kami mengharapkan adanya masukan dan saran. Demikian kami sampaikan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Bandung, 3 April 2021,

Ketua Program Studi Teknik Sipil,



(Yanyan Agustian, S.T., M.Eng., Ph.D)

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
DAFTAR ISI.....	ii
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL	v
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 LATAR BELAKANG.....	1
1.2 MAKSUD DAN TUJUAN	2
1.3 LINGKUP KEGIATAN.....	2
1.4 SISTEMATIKA PENULISAN	2
BAB II STUDI LITERATUR	3
2.1 Siklus Hidrologi	3
2.2 Air Tanah.....	4
2.2.1 Hubungan Air dengan Tanah	4
2.3 Infiltrasi	5
2.4 Kestabilan Lereng	5
BAB III METODOLOGI.....	6
3.1 Diagram Alir Penelitian	6
3.2 Hipotesa Penelitian.....	7
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	8
4.1 LOKASI PEKERJAAN	8
4.2 KELAS SITUS DAN DATA TANAH	9
4.3 ANALISIS STABILITAS TANAH.....	10

4.3.1 Analisis Pada Sta 76+775.....	12
4.4 Perhitungan Infiltrasi.....	16
4.5 Kalibrasi Data.....	22
4.6 Hubungan Hujan, Infiltrasi dan Faktor Keamanan Stabilitas Lereng	23
4.7 Penentuan <i>Threshold</i> Hujan	26
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	28
5.1 Kesimpulan.....	28
5.2 Saran.....	28
DAFTAR PUSTAKA.....	6-1

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3-1 Diagram Alir Penelitian.....	6
Gambar 4-1 Lokasi Studi.....	8
Gambar 4-2 Potongan Melintang Lokasi Studi.....	8
Gambar 4-3 Dasar ketentuan dan definisi dari <i>tension crack</i>	10
Gambar 4-4 Tekanan aktif Rankine.....	11
Gambar 4-5 Pemodelan Plaxis.....	13
Gambar 4-6 Kondisi 1.....	13
Gambar 4-7 Kondisi 2.....	14
Gambar 4-8 Kondisi 3.....	14
Gambar 4-9 Kondisi 4.....	15
Gambar 4-10 Grafik Penurunan FK.....	15
Gambar 4-11 DTA Lokasi Studi.....	17
Gambar 4-12 Curah Hujan Harian bulan Januari 2021 Stasiun Hujan Citeko.....	17
Gambar 4-13 Intensitas Hujan per jam.....	18
Gambar 4-14 Asumsi Elevasi Muka Air Tanah STA 76+775.....	24
Gambar 4-15 Grafik Hubungan Tinggi Hujan, MAT dan FK di Lokasi STA 76+77524	
Gambar 4-16 cara penentuan nilai FK dari nilai Tinggi Hujan.....	25
Gambar 4-17 Penentuan Treshhold hujan.....	27

DAFTAR TABEL

Tabel 4-1 Kelas Situs	9
Tabel 4-2 Parameter Tanah	9
Tabel 4-3 Parameter Sleeper	9
Tabel 4-4 Penurunan FK	15
Tabel 4-5 Intensitas Hujan per Jam per hari	18
Tabel 4-6 Koefisien Airan Permukaan untuk daerah Urban	19
Tabel 4-7 Perhitungan Debit dan Volume Limpasan	21
Tabel 4-8 Pehitungan Phi Indeks	22
Tabel 4-9 Laju Infiltrasi (Inches/Hour).....	23
Tabel 4-10 Rekomendasi Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng	26
Tabel 4-11 Ambang Batas (<i>Threshold</i>) Hujan terhadap FK	27

BAB I PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

Bisnis transportasi adalah bisnis keselamatan. Begitu juga kereta api, keselamatan merupakan prioritas utama. Salah satu faktor yang paling berpengaruh terhadap keselamatan kereta api ialah jalur kereta api.

Saat ini perkeretaapian di Indonesia semakin berkembang dengan pesat baik dari sarana, prasarana, maupun teknologinya. Hal ini juga berarti bahwa tingkat keselamatannya juga semakin meningkat dan tingkat kecelakaannya semakin menurun bahkan “zero accident”.

Salah satu faktor yang dapat membahayakan keselamatan perjalanan kereta api ialah kondisi lingkungan yaitu terdapatnya lokasi-lokasi yang rawan longsor di sepanjang jalur kereta api. Lokasi rawan ini dilakukan melalui kajian dengan membuat DED (Detail Engineering Design) dan pelaksanaan konstruksinya dilapangan. Perbaikan ini membutuhkan waktu yang cukup lama, sedangkan jumlah lokasi rawan banyak. Untuk lokasi yang belum dilakukan perbaikan, maka perlu dilakukan pemantauan (monitoring) agar tidak membahayakan perjalanan kereta api.

Salah satu upaya pemantauan dapat dilakukan dengan metode Simple Early Warning System (EWS). Simple-EWS disini yaitu dengan membuat threshold tingkat bahaya dari lokasi rawan dengan independent variable berupa curah hujan. Sehingga dengan adanya variasi intensitas curah hujan, maka kita dapat melihat tingkat bahaya dari lokasi rawan tersebut, dengan begitu kita dapat memberikan notifikasi kepada Pusat Pengendali KA agar KA berhati-hati serta kepada petugas Satuan Kerja agar bersiaga menjaga lokasi rawan tersebut guna memastikan keamanan dan keselamatannya ketika dilalui KA.

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil data topografi dan data properti tanah dan kuat geser tanah hasil dari penyelidikan geoteknik pada lokasi rawan yang ditinjau dan hasil uji laboratorium. Data tersebut kemudian dianalisis dengan menggunakan software Plaxis 2D untuk melihat nilai Safety Factor (SF) pada berbagai variasi intensitas curah hujan. Kemudian kita tetapkan range dari SF tersebut sehingga didapatlah threshold tingkat bahaya dari lokasi rawan tersebut.

1.2 MAKSUD DAN TUJUAN

Adapun maksud dari penelitian ini adalah untuk menentukan nilai ambang batas hujan dengan kaitannya terhadap nilai FK dari lereng.

Sedangkan tujuan dari penelitian ini adalah untuk mencari hubungan antara pengaruh hujan dan infiltrasi terhadap penurunan nilai FK lereng.

1.3 LINGKUP KEGIATAN

Lingkup kegiatan penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengumpulan data sekunder.
2. Analisis stabilitas tanah dengan menggunakan PLAXIS.
3. Analisis hidrologi.
4. Analisis hubungan hujan dan FK lereng.
5. Penentuan nilai ambang batas hujan.
6. Pembuatan laporan akhir.

1.4 SISTEMATIKA PENULISAN

KATA PENGANTAR

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

BAB I PENDAHULUAN

BAB II STUDI LITERATUR

BAB III METODOLOGI

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

DAFTAR PUSTAKA

BAB II STUDI LITERATUR

2.1 Siklus Hidrologi

Siklus hidrologi adalah rangkaian tahapan-tahapan yang dilalui air dari atmosfer ke bumi dan kembali lagi ke atmosfer. Siklus hidrologi inilah yang menyebabkan jumlah air di bumi relatif sama. Dimana, menurut para ahli total air yang di bumi mencapai 1,38 miliar km³ dan volume air ini jumlahnya sama tetapi senantiasa bergerak secara dinamis dalam siklus hidrologi tersebut.

Untuk membentuk suatu siklus hidrologi tersebut terdapat beberapa proses yang terjadi di dalamnya antara lain evaporasi, transpirasi, sublimasi, intersepsi, kondensi, adveksi, presipitasi, run off, dan infiltrasi.

- Evaporasi, adalah proses penguapan air dari tubuh-tubuh air, seperti laut, danau, dan sungai akibat pemanasan sinar matahari. Air yang menguap karena panas matahari tersebut akan naik dan nantinya menjadi awan. Pada dasarnya, semakin tinggi suhu matahari terutama pada musim kemarau maka semakin banyak juga air yang menjadi uap.
- Transpirasi, adalah proses penguapan air dari tanaman melalui stomata atau mulut daun.
- Sublimasi, adalah proses penguapan yang terjadi pada es tanpa melalui proses pencairan.
- Intersepsi, adalah proses tertahannya air hujan pada tanaman untuk kemudian ter-evaporasi kembali ke atmosfer.
- Kondensasi, proses siklus hidrologi yang satu ini menampakkan perubahan wujud uap air menjadi titik-titik air di atmosfer, sehingga terbentuklah awan. Proses ini terjadi karena pengaruh rendahnya suhu udara di ketinggian atmosfer tertentu.
- Adveksi, adalah proses pergerakan butiran air (dalam bentuk awan) secara horizontal dari satu tempat ke tempat lain. Proses ini terjadi karena pengaruh angin.
- Presipitasi, adalah proses turunnya air ke permukaan bumi dalam bentuk hujan. Jika presipitasi terjadi di daerah yang bersuhu rendah, maka presipitasi akan menghasilkan hujan salju.
- Run off, adalah pergerakan air hujan dari tempat yang tinggi ke tempat yang lebih rendah yang terjadi di permukaan bumi.

- Infiltrasi, adalah proses peresapan air ke dalam tanah melalui pori-pori tanah. Akibat proses ini, air hujan dapat tersimpan menjadi air tanah. Air tanah ini secara lambat akan mengalir kembali ke laut.

2.2 Air Tanah

Air tanah adalah air yang berada di wilayah jenuh di bawah permukaan tanah. Ketersediaannya lebih dari 97% dari keseluruhan air tawar yang ada di planet bumi. Ketersediaan air tanah akan membantu tanaman pada masa pertumbuhan, dimana air akan diserap oleh akar tanaman. Meskipun jumlahnya tidak sebanyak air permukaan, air tanah merupakan air yang banyak digunakan untuk keperluan rumah tangga, misalnya untuk air minum, memasak, mencuci, dan mandi. Air tanah juga dimanfaatkan untuk keperluan industri, perkantoran, perhotelan, dan irigasi.

Air tanah banyak mempunyai kelebihan dibandingkan dengan air permukaan yaitu:

- a. Lebih steril atau tidak terkontaminasi oleh organisme penyebab penyakit.
- b. Berada di bawah permukaan tanah dan tersimpan pada lapisan batuan pada kedalaman tertentu.
- c. Mempunyai temperatur yang hampir konstan.
- d. Tersedia di banyak tempat.

2.2.1 Hubungan Air dengan Tanah

Air hujan masuk meresap ke dalam pori-pori batuan atau tanah dan menempati lapisan batuan lolos air (permeable). Air tanah dalam berasal dari air hujan yang jatuh di daerah hulu atau daerah atas karena berada di kaki pegunungan yang disebut daerah tangkapan hujan (catchment area). Air kemudian masuk dan mengalir dalam tanah ke daerah bawah serta menempati lapisan batuan lolos air. Lapisan batuan lolos air yang mengandung banyak air dan dapat melepaskan air disebut akuifer. Antara akuifer atas dan bawah dibatasi oleh lapisan batuan kedap air (impermeable).

Berdasarkan letak kedalaman, air tanah dibedakan menjadi air tanah dangkal dan air tanah dalam.

a. Air Tanah Dangkal

Air tanah dangkal adalah air tanah yang berada di bawah permukaan tanah dan di atas lapisan batuan kedap air atau tidak tembus air. Air tanah dangkal merupakan akuifer atas dan

sering disebut dengan air tanah freatis atau air freatis. Air tanah dangkal dimanfaatkan oleh penduduk untuk memenuhi kebutuhan air sehari-hari dengan membuat sumur.

b. Air Tanah Dalam

Air tanah dalam adalah air tanah yang berada di bawah lapisan air tanah dangkal dan di antara dua lapisan batuan kedap air. Air tanah dalam merupakan akuifer bawah yang dimanfaatkan sebagai sumber air minum penduduk kota, kebutuhan air perhotelan, perkantoran, dan industri.

2.3 Infiltrasi

Infiltrasi adalah proses aliran air hujan masuk ke dalam tanah. Aliran air hujan masuk ke dalam tanah sebagai akibat gaya kapiler dan gaya gravitasi. Faktor-Faktor yang mempengaruhi infiltrasi, antara lain:

1. Hujan
2. Jenis tanah
3. Kelengasan/kelembaban tanah
4. Kemiringan lereng
5. Vegetasi
6. Bangunan

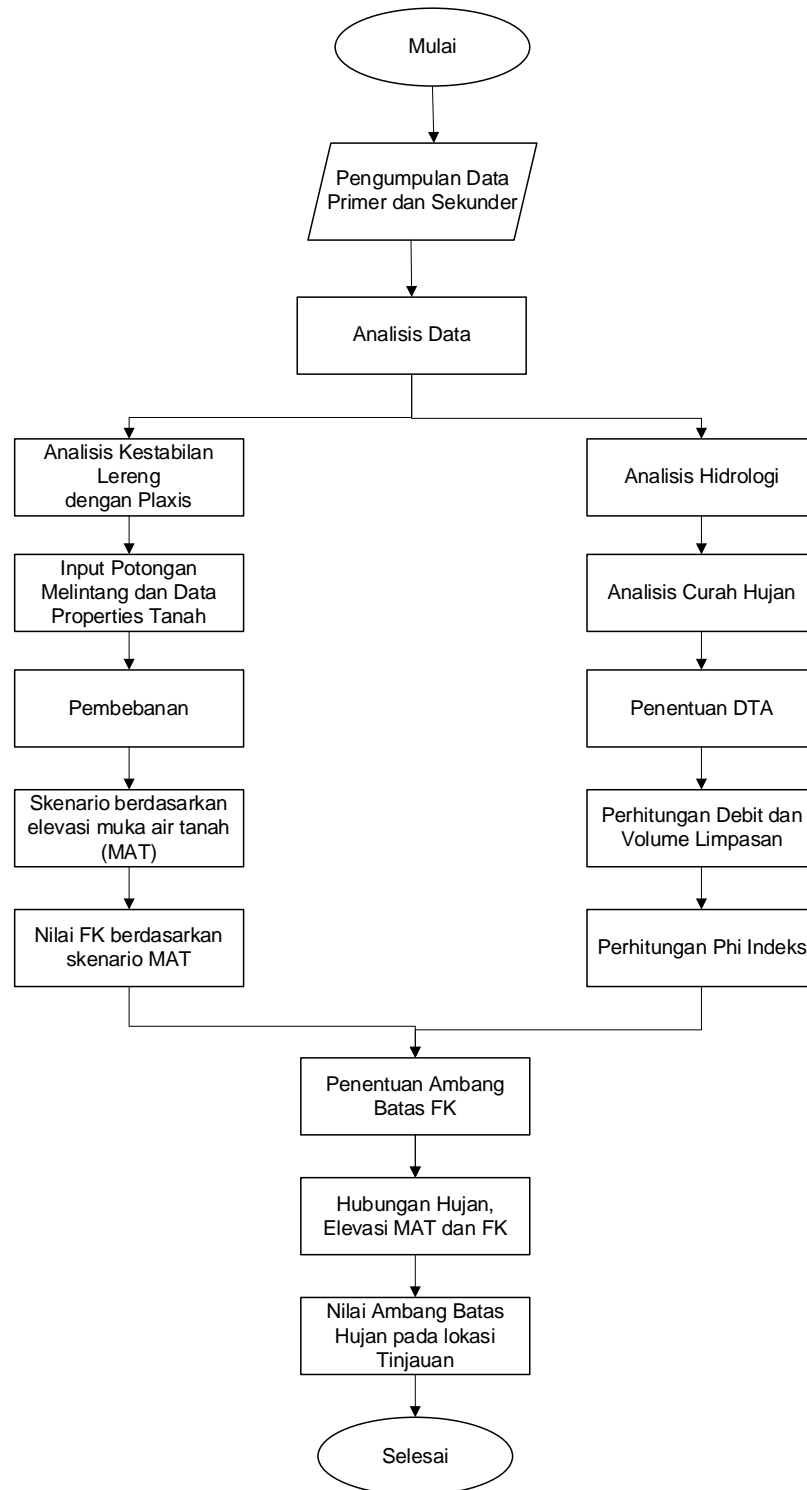
2.4 Kestabilan Lereng

Lereng merupakan permukaan tanah (material) terbuka yang membentuk sudut tertentu dengan bidang datar (horisontal). Lereng dapat terjadi secara alamiah atau buatan yang direkayasa oleh manusia. Menurut material pembentuknya, lereng dapat dibedakan atas lereng batuan, lereng tanah, dan lereng campuran. Kestabilan dari suatu lereng dipengaruhi oleh kondisi geologi daerah setempat, bentuk keseluruhan lereng pada lokasi tersebut, dan kondisi air tanah setempat. Faktor – factor yang mem[pengaruhi Kestabilan lereng adalah sebagai berikut:.

- Geometri Lereng
- Relief Permukaan Bumi (Topografi)
- Struktur Geologi Rebional dan Lokal
- Iklim dan Curah Hujan
- Sifat FISik dan Mekanika Bantua

BAB III METODOLOGI

3.1 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3-1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Hipotesa Penelitian

Hipotesa awal pada penelitian ini adalah:

“Nilai FK akan menurun seiring meningkatnya elevasi muka air tanah (MAT) yang dipengaruhi oleh tingginya curah hujan dan laju infiltrasi.”

Selanjutnya akan dilakukan beberapa pendekatan untuk membuktikan hipotesa tersebut.

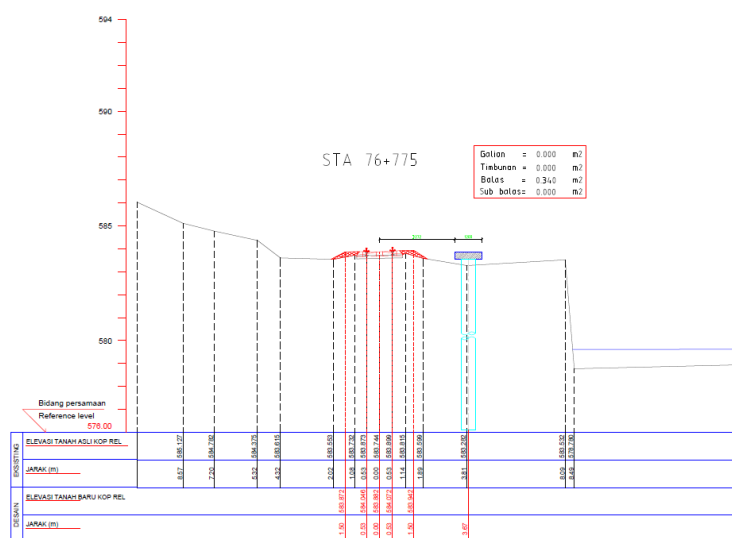
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 LOKASI PEKERJAAN

Lokasi pada pekerjaan ini yaitu pada jalur Lampegan – Cibeber – Cilaku tepatnya STA 76+775 seperti ditampilkan di bawah ini.



Gambar 4-1 Lokasi Studi



Gambar 4-2 Potongan Melintang Lokasi Studi

4.2 KELAS SITUS DAN DATA TANAH

Untuk mengetahui kondisi tanah yang kritis kita dapat melakukan analisa dengan keals situs, di bawah ini merupakan analisa kelas situs :

Tabel 4-1 Kelas Situs

Jenis Tanah	N
SE (Tanah Lunak)	<15
SD (Tanah Sedang)	15-50
SC (tanah keras)	>50

Sumber :SNI 1726 2012

Titik kajian berada pada BH 02 dengan parameter sebagai berikut:

Tabel 4-2 Parameter Tanah

Lapisan	Kedalaman			N _{SPT}	γ_n Desain (kN/m ³)	Cu Desain (kN/m ²)	ϕ Desain (°)	Eu Desain (kN/m ²)
1	0	-	1.5	10	17.18	20	1	8000
2	1.5	-	4.25	29	17.18	58	1	23200
3	4.25	-	6.5	8	17.18	24	1	9600
4	6.5	-	8.75	49	17.18	98	1	39200
5	8.75	-	10	60	17.18	120	1	48000
6	Ballas				17	30	40	14000
7	Subballas				16	20	40	1400

Selain itu ada pula parameter sleeper sebagai berikut:

Tabel 4-3 Parameter Sleeper

Parameter	Value
EA (kN/m)	3.615.727,9
EI (kN/m)	12.004,12
D (m)	0,2

4.3 ANALISIS STABILITAS TANAH

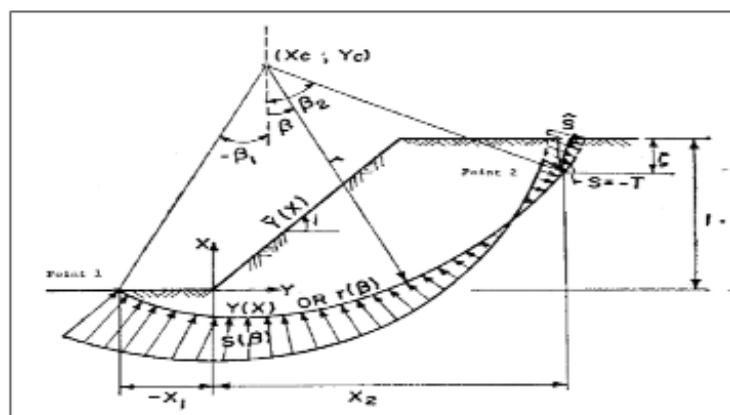
a. Efek Tegangan Retak (*Tension Crack*)

Retakan sering ditemukan di puncak lereng tanah dan batuan. Keberadaan retakan tersebut menunjukkan bahwa dalam zona tertentu, tegangan tarik melebihi kekuatan tarik Baker (1981) dalam Silmi A Frizkia, dkk. (2018). Efek dari tegangan retakan terhadap stabilitas lereng dibagi menjadi beberapa hal, diantaranya :

- Kekuatan geser akibat lekatan dan gesekan tanah berkurang akibat adanya retakan.
- Tekanan air yang bekerja pada permukaan retakan merupakan suatu kekuatan yang mendorong untuk terjadinya kelongsoran.
- Air yang berada didalam celah retakan cenderung melunakkan tanah sehingga kekuatan tanah tersebut berkurang.

Oleh karena itu, sangat diharapkan untuk mampu meramalkan kedalaman dimana retakan itu akan muncul dan memperhitungkan efek stabilitasnya. Terutama, sangat penting untuk menentukan kondisi-kondisi dimana tidak ada retakan yang akan diharapkan untuk muncul, sekaligus menghindari efek pelunakan yang mana sulit untuk dianalisa secara kuantitatif. Lebih jauh lagi, saat kedalaman retakan diketahui, tidaklah sulit untuk membuat nilai yang tepat pada efek dari analisis stabilitas yang merupakan penentuan dari kedalaman retakan yang tetap menjadi rantai yang lemah dalam perhitungan stabilitas lereng

$$z_c = \frac{2c}{\gamma} \tan^2 \left(45 + \frac{1}{2} \phi \right)$$



Gambar 4-3 Dasar ketentuan dan definisi dari *tension crack*
(Sumber : Baker,1981)

Dimana :

z_c = kedalaman tegangan retak [m],

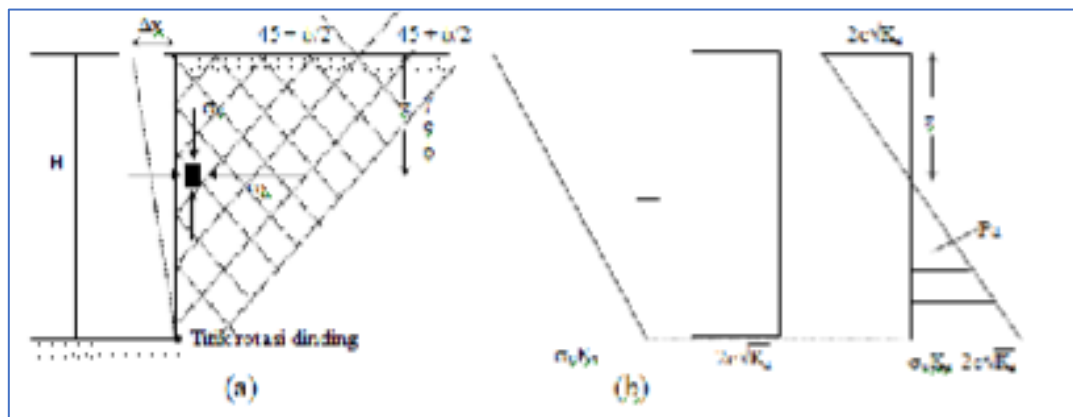
c = kohesi [kN/m^2],

ϕ = sudut dari gesekan [$^\circ$],

γ = berat isi dari tanah [kN/m^2].

b. Tekanan Tanah Aktif dan Pasif Menurut Rankine

Rankine menyelidiki keadaan tegangan di dalam massa tanah yang berada pada kondisi keseimbangan plastis. Keseimbangan plastis adalah suatu kondisi dimana setiap titik dalam suatu massa tanah menuju proses keadaan rutil



Gambar 4-4 Tekanan aktif Rankine
(Sumber : Principle of Foundation Engineering, Braja M.Daz)

- Tekanan tanah aktif menurut Rankine

Tegangan tanah aktif :

$$\sigma_a = \sigma_v K_a - 2c \sqrt{K_a}$$

Dimana :

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

Tegangan pada $z = 0$ adalah : $\sigma_a = -2c \sqrt{K_a}$, menunjukkan tegangan tarik (*tensile stress*). Tegangan tarik akan berkurang terhadap kedalaman dan menjadi nol pada kedalaman $z = z_c$.

$$\gamma z_c K_a - 2c \sqrt{K_a} = 0 \dots\dots\dots(1)$$

$$z_c = \frac{2c}{\gamma \sqrt{K_a}} \dots\dots\dots(2)$$

Karena tegangan tarik pada tanah menyebabkan retak sepanjang permukaan tanah-dinding.

- Tekanan tanah pasif :

$$\sigma_p = \sigma_v K_p + 2c \sqrt{K_a} \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

$$K_p = \tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2} \right)$$

c. Pemeriksaan stabilitas dinding dan faktor keamanan minimum

Menurut SNI 8460-2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik setiap dinding penahan tanah harus diperiksa stabilitasnya terhadap guling, geser lateral, dan daya dukung.

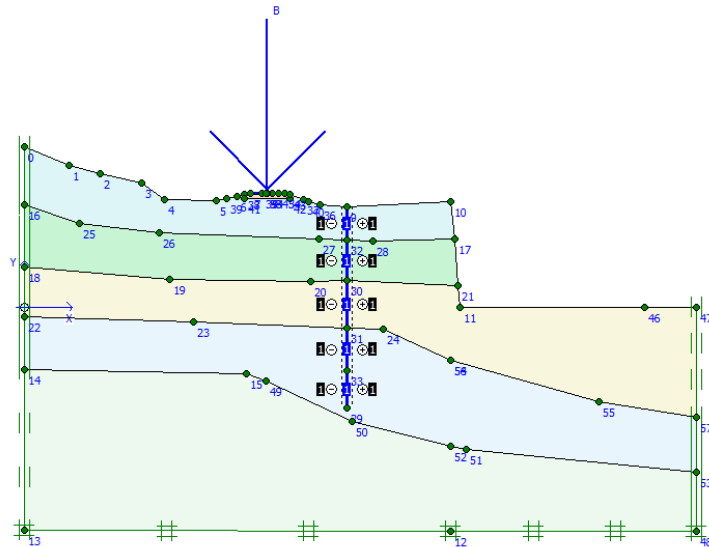
Faktor keamanan yang disyaratkan adalah sebagai berikut:

- Faktor keamanan terhadap guling minimum 2;
- Faktor keamanan terhadap geser lateral minimum 1,5;
- Faktor keamanan terhadap daya dukung minimum 3;
- Faktor keamanan terhadap stabilitas global minimum 1,5;
- Faktor keamanan terhadap gempa minimum 1,1.

4.3.1 Analisis Pada Sta 76+775

a. Model Analisa

Analisa dilakukan dengan program Plaxis, model Plaxis yang digunakan adalah sebagai berikut.

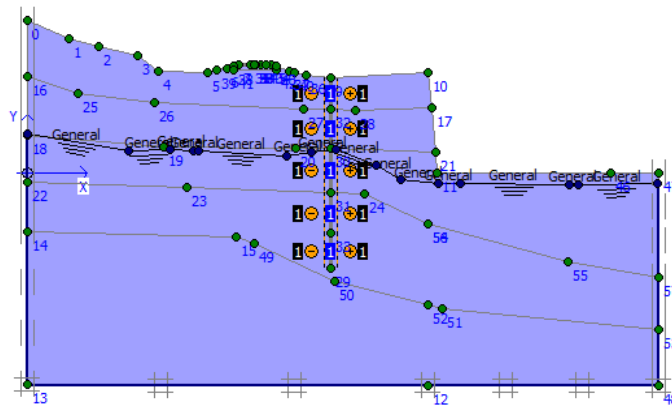


Gambar 4-5 Pemodelan Plaxis

Pemodelan plaxis ini menggunakan berbagai variasi muka air dengan komposisi sebagai berikut :

- Kondisi 1

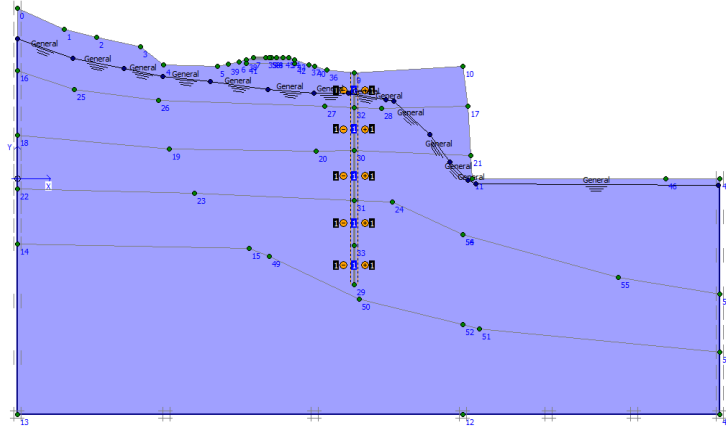
Pada kondisi ini muka air ada di dasar sungai



Gambar 4-6 Kondisi 1

- Kondisi 2

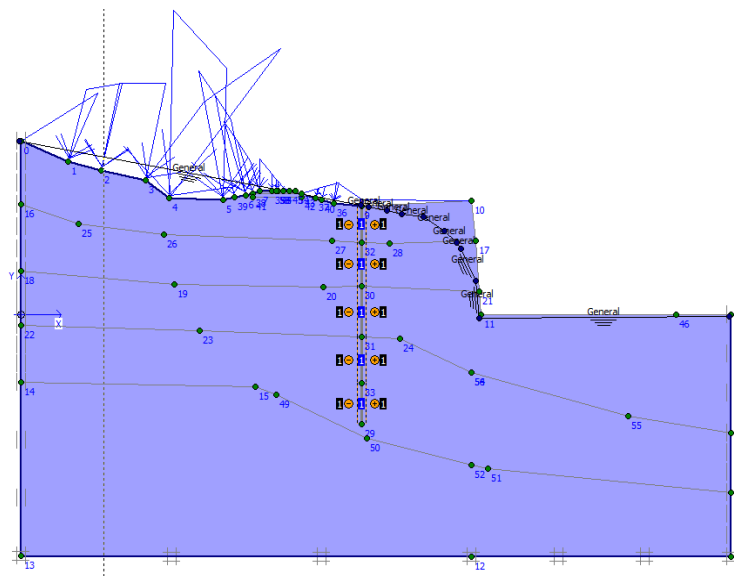
Pada kondisi ini muka air di sisi kiri mulai meningkat



Gambar 4-7 Kondisi 2

- Kondisi 3

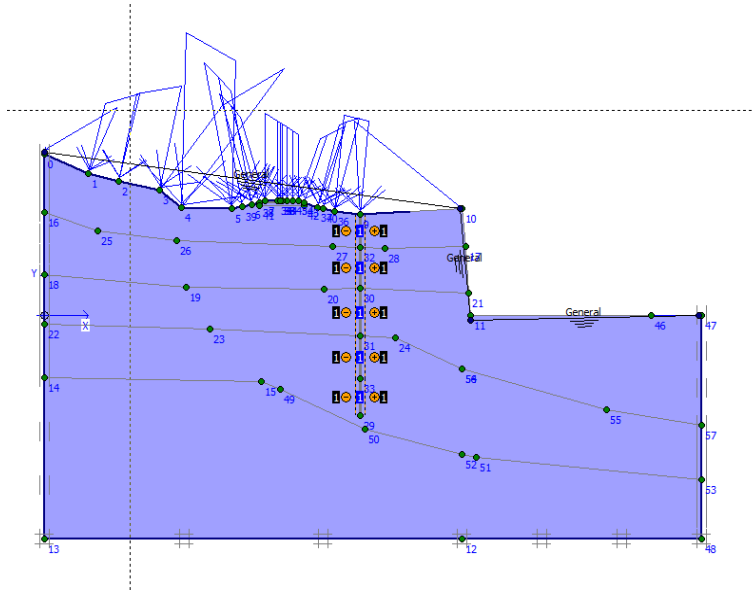
Pada kondisi ini muka air pada bagian kiri sudah cukup menggenangi, namun tebing masih belum tersaturasi.



Gambar 4-8 Kondisi 3

- Kondisi 4

Pada kondisi ini seluruh permukaan telah tersaturasi optimum.



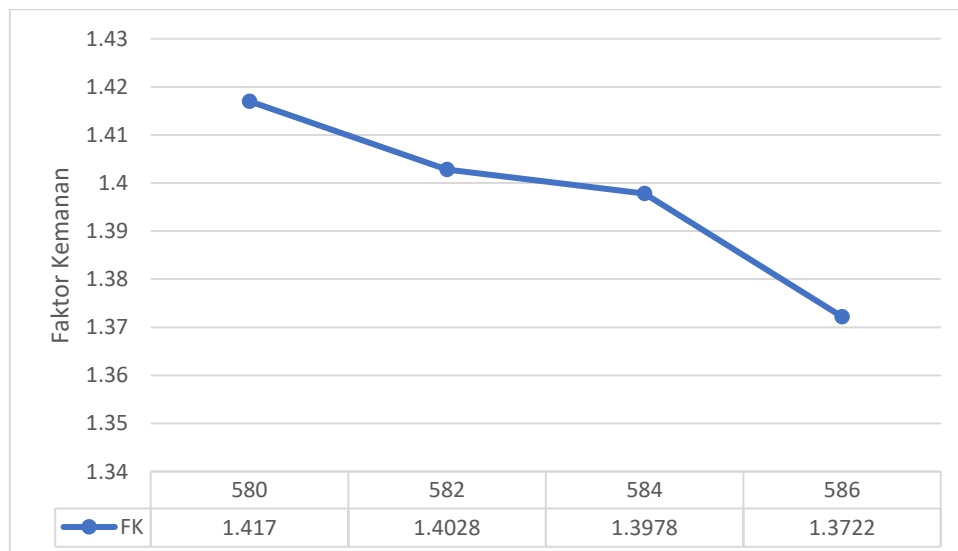
Gambar 4-9 Kondisi 4

b. Hasil Analisa

Berdasarkan hasil analisa didapatkan faktor keamanan sebagai berikut :

Tabel 4-4 Penurunan FK

Asumsi ElevasiMuka Air Tanah	Faktor Keamanan
MAT1	1.417
MAT2	1.403
MAT3	1.398
MAT4	1.372



Gambar 4-10 Grafik Penurunan FK

Dari grafik hubungan faktor keamanan dan elevasi muka air didapat hubungan regresi sebagai berikut:

$$Y = 5.46096 - 0.00697 * X$$

Dimana:

Y = nilai Faktor Keamanan

X = Elevasi Muka Air Tanah

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0.962634644							
R Square	0.926665459							
Adjusted R Square	0.889998188							
Standard Error	0.006200484							
Observations	4							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	1	0.000971618	0.000972	25.272278	0.037365356			
Residual	2	7.6892E-05	3.84E-05					
Total	3	0.00104851						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	5.46096	0.808318153	6.755954	0.02121451	1.983047693	8.938872307	1.983047693	8.938872307
X Variable 1	-0.00697	0.00138647	-5.02715	0.037365356	-0.0129355	-0.0010045	-0.0129355	-0.0010045

4.4 Perhitungan Infiltrasi

Dari hasil-hasil penelitian mengenai peristiwa longsor, longsor sering terjadi terutama pada musim hujan. Terjadinya longsor biasanya diawali dengan turunnya hujan deras. Longsor terjadi pada saat sedang hujan atau setelah hujan berhenti. Perubahan kondisi hidrologi lereng saat terjadi infiltrasi air hujan sulit untuk diamati secara langsung di lapangan, terutama pada saat terjadi longsor .

Pada penelitian ini untuk memperkirakan besarnya laju infiltrasi di lokasi studi digunakan metode phi indeks (ϕ) atau indeks infiltrasi. Metode phi indeks menentukan laju infiltrasi dengan mengurangi volume hujan (P) dengan volume limpasan permukaan (Q).

$$\phi = P - Q$$

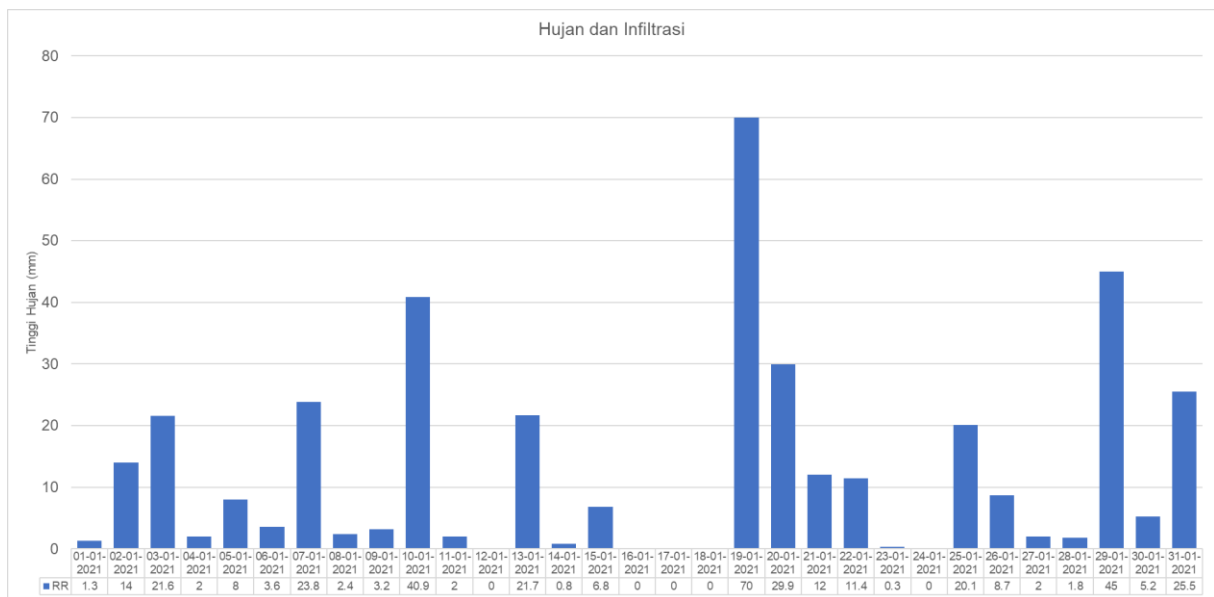
Untuk menghitung volume limpasan ditentukan terlebih dulu debit banjir yang terjadi di daerah tangkapan air lokasi studi. Sebelum menghitung debit ditentukan terlebih dahulu daerah tangkapan air lokasi studi (*Cross Section STA 76+775*) sebagai berikut:



Gambar 4-11 DTA Lokasi Studi

Berdasarkan hasil pengamatan DAS *Cross Section* STA 76+775 mempunyai luas

Berikut adalah data curah hujan harian bulan Januari 2021 yang didapat dari stasiun meteorologi Citeko di Kota Bogor.



Gambar 4-12 Curah Hujan Harian bulan Januari 2021 Stasiun Hujan Citeko

Dari data hujan harian tersebut kemudian dihitung intensitas hujan per jamnya dengan menggunakan rumus Mononobe:

$$I = \frac{R24}{24} \left(\frac{24}{t} \right)^{\frac{2}{3}}$$

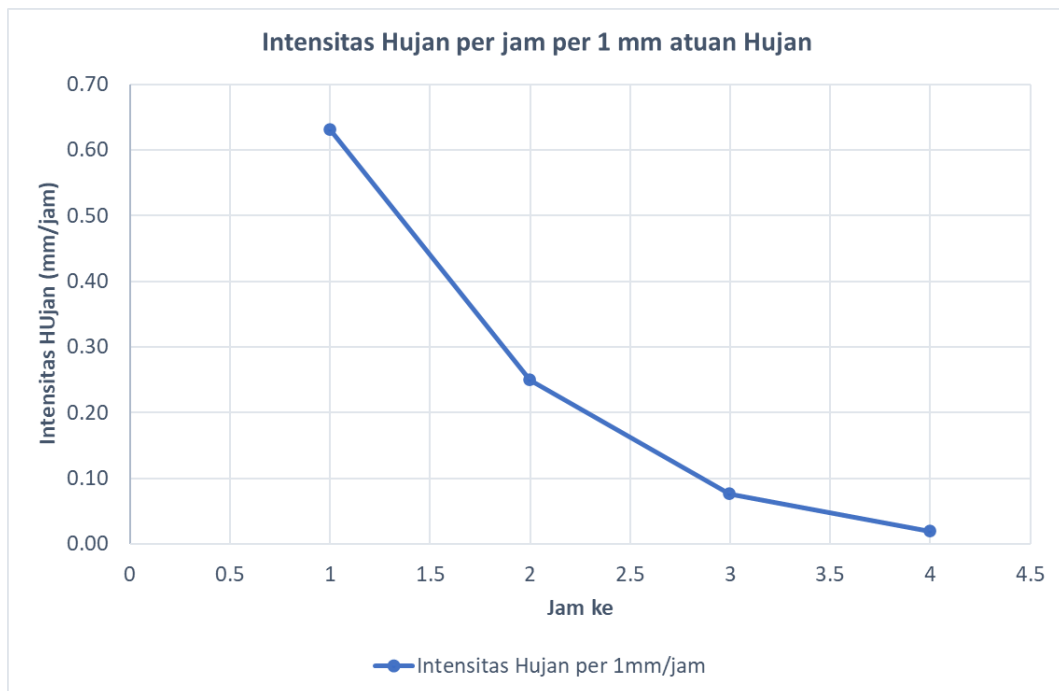
Dimana:

I = Intensitas curah hujan (mm/jam)

R24 = Curah hujan maksimum harian (selama 24 jam) (mm)

T = lamanya hujan (asumsi: 4 jam)

Berikut adalah grafik intensitas hujan per jam per 1mm satuan hujan.



Gambar 4-13 Intensitas Hujan per jam

Tabel 4-5 Intensitas Hujan per Jam per hari

Tanggal	RR (mm)	Intensitas Hujan (jam)			
		1	2	3	4
01-01-2021	1.3	0.82	0.33	0.10	0.02
02-01-2021	14	8.82	3.50	1.06	0.26
03-01-2021	21.6	13.61	5.40	1.64	0.41
04-01-2021	2	1.26	0.50	0.15	0.04
05-01-2021	8	5.04	2.00	0.61	0.15
06-01-2021	3.6	2.27	0.90	0.27	0.07
07-01-2021	23.8	14.99	5.95	1.80	0.45
08-01-2021	2.4	1.51	0.60	0.18	0.05

Tanggal	RR (mm)	Intensitas Hujan (jam)			
		1	2	3	4
09-01-2021	3.2	2.02	0.80	0.24	0.06
10-01-2021	40.9	25.77	10.23	3.10	0.77
11-01-2021	2	1.26	0.50	0.15	0.04
12-01-2021	0	0.00	0.00	0.00	0.00
13-01-2021	21.7	13.67	5.43	1.64	0.41
14-01-2021	0.8	0.50	0.20	0.06	0.02
15-01-2021	6.8	4.28	1.70	0.51	0.13
16-01-2021	0	0.00	0.00	0.00	0.00
17-01-2021	0	0.00	0.00	0.00	0.00
18-01-2021	0	0.00	0.00	0.00	0.00
19-01-2021	70	44.10	17.50	5.30	1.32
20-01-2021	29.9	18.84	7.48	2.26	0.57
21-01-2021	12	7.56	3.00	0.91	0.23
22-01-2021	11.4	7.18	2.85	0.86	0.22
23-01-2021	0.3	0.19	0.08	0.02	0.01
24-01-2021	0	0.00	0.00	0.00	0.00
25-01-2021	20.1	12.66	5.03	1.52	0.38
26-01-2021	8.7	5.48	2.18	0.66	0.16
27-01-2021	2	1.26	0.50	0.15	0.04
28-01-2021	1.8	1.13	0.45	0.14	0.03
29-01-2021	45	28.35	11.25	3.41	0.85
30-01-2021	5.2	3.28	1.30	0.39	0.10
31-01-2021	25.5	16.06	6.38	1.93	0.48

(Sumber: Hasil analisis, 2021)

Untuk selanjutnya ditentukan koefisien aliran permukaan untuk Kawasan di lokasi studi. Untuk nilai koefisien aliran permukaan (C) diambil berdasarkan table nilai C untuk daerah Urban (Schwab, et al 1981) berikut ini:

Tabel 4-6 Koefisien Airan Permukaan untuk daerah Urban

No	Jenis Daerah	Nilai Koefisien C
1	Daerah Perdagangan	
	<ul style="list-style-type: none"> • Perkotaan • Pinggiran 	0.70 – 0.90 0.50 – 0.70
2	Pemukiman	
	<ul style="list-style-type: none"> • Pemukiman satu keluarga 	0.30 – 0.50
	<ul style="list-style-type: none"> • Perumahan berkelompok, terpisah – pisah 	0.40 – 0.60
	<ul style="list-style-type: none"> • Perumahan berkelompok, bersambung 	0.60 – 0.75
		0.25 – 0.40

No	Jenis Daerah	Nilai Koefisien C
	<ul style="list-style-type: none"> • Suburban • Daerah Apartemen 	0.50 – 0.75
3	Industri <ul style="list-style-type: none"> • Daerah industry ringan • Daerah industry berat 	0.50 – 0.80 0.60 – 0.90
4	Taman, kuburan	0.10 – 0.25
5	Tempat bermain	0.20 – 0.35
6	Daerah stasiun kereta api	0.20 – 0.40
7	Daerah belum diperbaiki	0.10 – 0.30
8	Jalan	0.70 – 0.95
9	Bata <ul style="list-style-type: none"> • Alan, Hampan • Atap 	0.75 – 0.85 0.75 – 0.95

Berdasarkan table diatas ditentukan bahwa koefisien aliran untuk daerah stasiun kereta api adalah 0.35.

Setelah ditentukan koefisien aliran permukaan (C), intensitas hujan (I) dan luas daerah tangkapan air (A), maka dapat dihitung debit limpasan pada daerah tangkapan lokasi studi dengan menggunakan Metode Rasional sebagai berikut:

$$Q = 0.278 \times C \times I \times A$$

Dimana:

Q = debit limpasan daerah tangkapan air (m³/s)

C = Koefisien Aliran Permukaan

I = Intensitas Hujan (mm/jam)

A = Luas daerah tangkapan air (km²)

Berikut adalah hasil pehitungan debit (m³/s) dan volume (m³) limpasan untuk setiap jamnya:

Tabel 4-7 Perhitungan Debit dan Volume Limpasan

Tanggal	RR (mm)	Debit Limpasan (m ³ /s)				Volume Limpasan (m ³)			
		Q1	Q2	Q3	Q4	V1	V2	V3	V4
01-01-2021	1.3	0.016	0.006	0.002	0.000	57.37	22.77	6.90	1.72
02-01-2021	14	0.172	0.068	0.021	0.005	617.86	245.20	74.26	18.56
03-01-2021	21.6	0.265	0.105	0.032	0.008	953.26	378.30	114.57	28.64
04-01-2021	2	0.025	0.010	0.003	0.001	88.27	35.03	10.61	2.65
05-01-2021	8	0.098	0.039	0.012	0.003	353.06	140.11	42.43	10.61
06-01-2021	3.6	0.044	0.018	0.005	0.001	158.88	63.05	19.10	4.77
07-01-2021	23.8	0.292	0.116	0.035	0.009	1050.35	416.83	126.24	31.56
08-01-2021	2.4	0.029	0.012	0.004	0.001	105.92	42.03	12.73	3.18
09-01-2021	3.2	0.039	0.016	0.005	0.001	141.22	56.04	16.97	4.24
10-01-2021	40.9	0.501	0.199	0.060	0.015	1805.02	716.32	216.94	54.24
11-01-2021	2	0.025	0.010	0.003	0.001	88.27	35.03	10.61	2.65
12-01-2021	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
13-01-2021	21.7	0.266	0.106	0.032	0.008	957.68	380.05	115.10	28.78
14-01-2021	0.8	0.010	0.004	0.001	0.000	35.31	14.01	4.24	1.06
15-01-2021	6.8	0.083	0.033	0.010	0.003	300.10	119.10	36.07	9.02
16-01-2021	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
17-01-2021	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
18-01-2021	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
19-01-2021	70	0.858	0.341	0.103	0.026	3089.28	1225.98	371.29	92.82
20-01-2021	29.9	0.367	0.145	0.044	0.011	1319.56	523.67	158.59	39.65
21-01-2021	12	0.147	0.058	0.018	0.004	529.59	210.17	63.65	15.91
22-01-2021	11.4	0.140	0.055	0.017	0.004	503.11	199.66	60.47	15.12
23-01-2021	0.3	0.004	0.001	0.000	0.000	13.24	5.25	1.59	0.40
24-01-2021	0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00	0.00	0.00	0.00
25-01-2021	20.1	0.246	0.098	0.030	0.007	887.06	352.03	106.61	26.65
26-01-2021	8.7	0.107	0.042	0.013	0.003	383.95	152.37	46.15	11.54
27-01-2021	2	0.025	0.010	0.003	0.001	88.27	35.03	10.61	2.65
28-01-2021	1.8	0.022	0.009	0.003	0.001	79.44	31.53	9.55	2.39
29-01-2021	45	0.552	0.219	0.066	0.017	1985.96	788.13	238.69	59.67
30-01-2021	5.2	0.064	0.025	0.008	0.002	229.49	91.07	27.58	6.90
31-01-2021	25.5	0.313	0.124	0.038	0.009	1125.38	446.61	135.26	33.81

Kemudian dari volume limpasan tersebut ditentukan tinggi limpasan dengan cara membagi dengan luas DTA (0.2 km²).

Tahap berikutnya adalah menghitung tinggi kehilangan air (mm) dengan cara mengurahi tinggi intensitas hujan dengan tinggi limpasan yang telah dihitung sebelumnya. Selisih dari nilai tersebut diasumsikan sebagai tinggi infiltrasi (phi Indeks = P-Q). kemudian ditentukan nilai rata – rata dari nilai phi indeks tersebut untuk dinyatakan sebagai tinggi infiltrasi mewakili daerah studi. Hasil dari perhitungan phi indeks dapat dilihat pada table berikut.

Tabel 4-8 Pehitungan Phi Indeks

Tanggal	ϕ Indeks (mm)	Rata – Rata (mm)
01-01-2021	0.206	1.962
02-01-2021	2.216	
03-01-2021	3.419	
04-01-2021	0.317	
05-01-2021	1.266	
06-01-2021	0.570	
07-01-2021	3.768	
08-01-2021	0.380	
09-01-2021	0.507	
10-01-2021	6.475	
11-01-2021	0.317	
12-01-2021	0.000	
13-01-2021	3.435	
14-01-2021	0.127	
15-01-2021	1.076	
16-01-2021	0.000	
17-01-2021	0.000	
18-01-2021	0.000	
19-01-2021	11.081	
20-01-2021	4.733	
21-01-2021	1.900	
22-01-2021	1.805	
23-01-2021	0.047	
24-01-2021	0.000	
25-01-2021	3.182	
26-01-2021	1.377	
27-01-2021	0.317	
28-01-2021	0.285	
29-01-2021	7.124	
30-01-2021	0.823	
31-01-2021	4.037	

4.5 Kalibrasi Data

Agar hasil pendekatan infiltrasi diatas dianggap sesuai atau valid maka perlu dilakukan kalibrasi data. Dikarenakan tidak adanya pengukuran laju infiltrasi di lapangan maka kalibrasi didasarkan pada tabel berikut:

Tabel 4-9 Laju Infiltrasi (Inches/Hour)

Soil Texture, Type	Percent of Slope				
	0-4%	5-8%	8-12%	12-16%	Over 16%
Coarse Sand	1.25	1.00	.75	.50	.31
Medium Sand	1.06	.85	.64	.42	.27
Fine Sand	.94	.75	.56	.38	.24
Loamy Sand	.88	.70	.53	.35	.22
Sandy Loam	.75	.60	.45	.30	.19
Fine Sandy Loam	.63	.50	.38	.25	.16
V. Fine Sandy Loam	.59	.47	.35	.24	.15
Loam	.54	.43	.33	.22	.14
Silt Loam	.50	.40	.30	.20	.13
Silt	.44	.35	.26	.18	.11
Sandy Clay	.31	.25	.19	.12	.08
Clay Loam	.25	.20	.15	.10	.06
Silty Clay	.19	.15	.11	.08	.05
Clay	.13	.10	.08	.05	.03

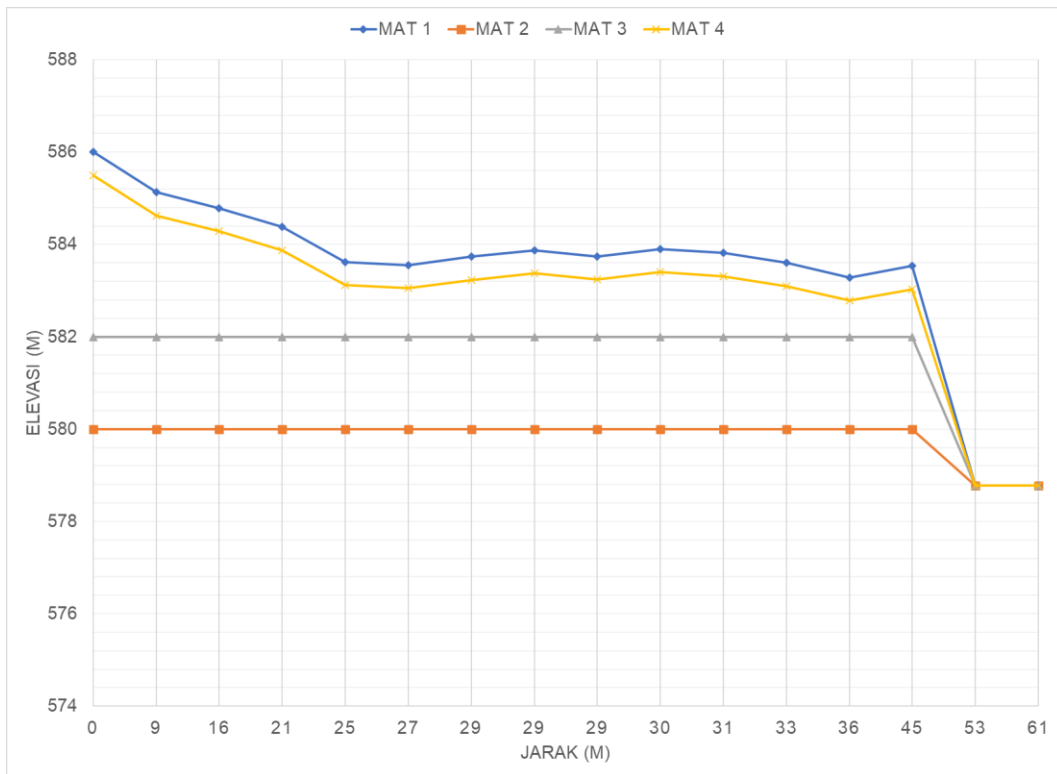
Note: Rates based on full cover. These figures decrease with time and percent of cover. Derived from USDA information. (SCC 0812 § 1, 1990.)

(Sumber: https://qcode.us/codes/sacramentocounty/view.php?topic=14-14_10-14_10_110)

Dengan asumsi bahwa tanah di lapangan mayoritas Lempung maka berdasarkan tabel diatas nilai laju infiltrasi berada pada kisaran 0.13 inch – 0.03 inch atau 3.302 – 0.762 mm. Dari pendekatan phi indeks pada sub bab 4.4 didapat phi indeks rata – rata 1.961 mm, sehingga nilai tersebut sudah dianggap mewakili kondisi laju infiltrasi di lokasi studi. Untuk selanjutnya pendekatan phi Indeks akan digunakan untuk menetapkan laju infiltrasi untuk setiap kejadian hujan, sehingga pada akhirnya akan diperoleh hubungan antara tinggi hujan dan laju infiltrasi yang akan berpengaruh pada penambahan elevasi muka air tanah.

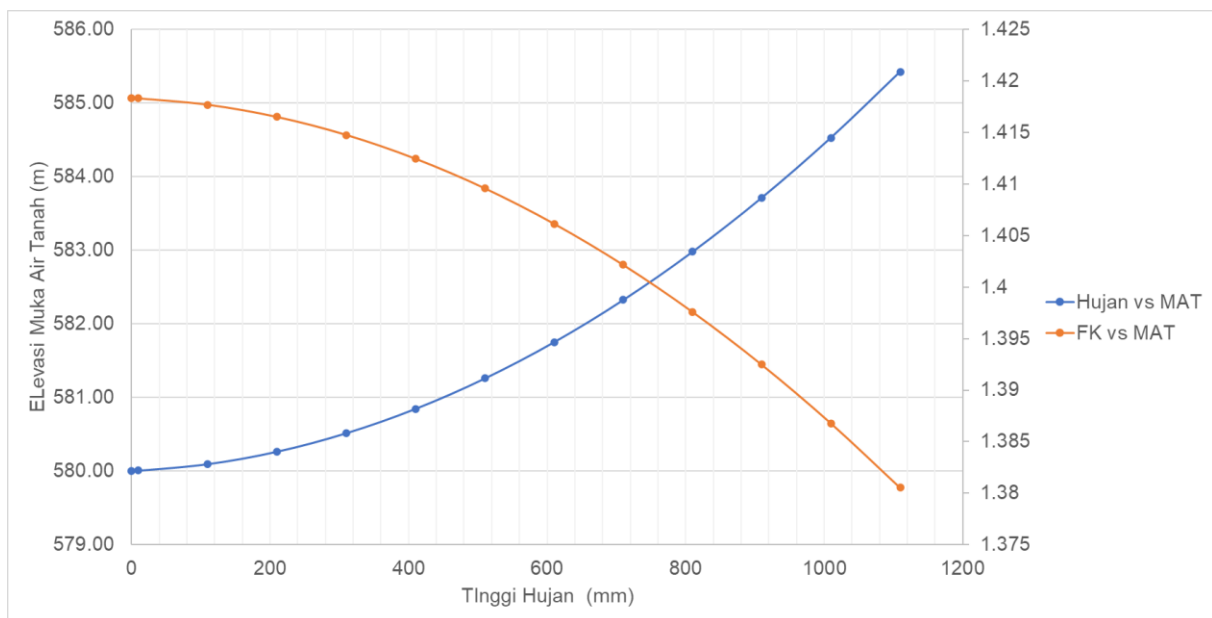
4.6 Hubungan Hujan, Infiltrasi dan Faktor Keamanan Stabilitas Lereng

Setelah diketahui nilai rata – rata infiltrasi, factor keamanan stabilitas lereng dari hasil pemodelan yang dipengaruhi oleh elevasi air tanah, kemudian dicari hubungan antara tinggi hujan, laju infiltrasi dan factor keamanan stabilitas lereng. Adapun asumsi untuk tiap kondisi elevasi muka air tanah untuk lokasi potongan STA 76+775 adalah sebagai berikut:



Gambar 4-14 Asumsi Elevasi Muka Air Tanah STA 76+775

Adapun grafik hubungan tinggi hujan, elevasi muka air tanah dan factor keamanan stabilitas lereng di lokasi STA 76+775 adalah sebagai berikut:

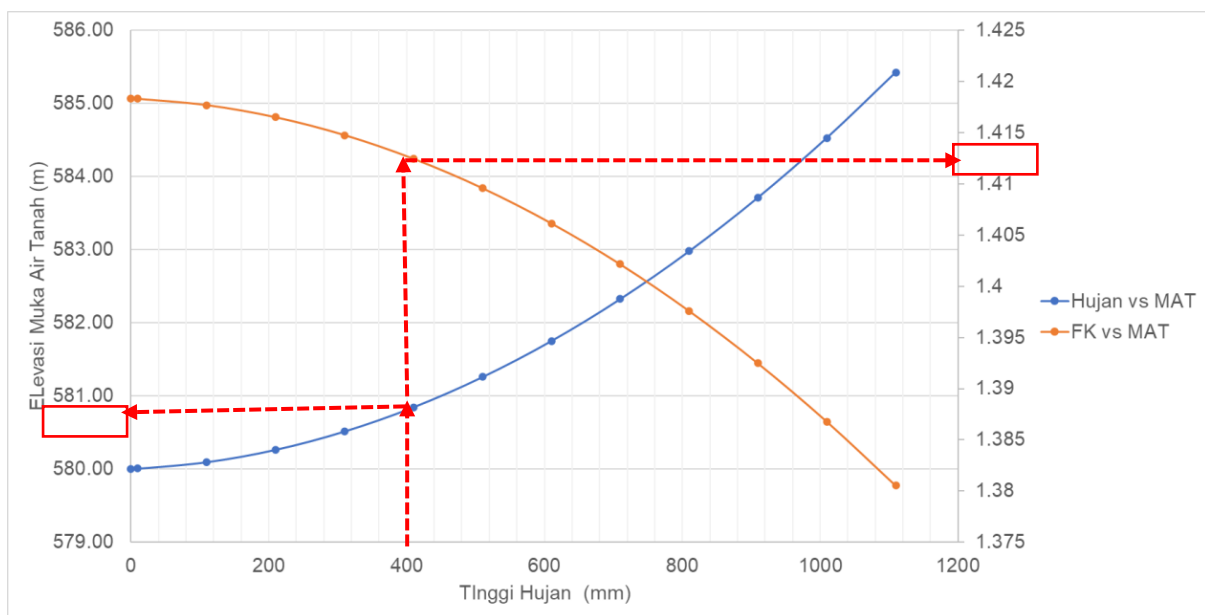


Gambar 4-15 Grafik Hubungan Tinggi Hujan, MAT dan FK di Lokasi STA 76+775

Berikut adalah cara untuk membaca grafik Gambar 4-15

1. Tentukan tinggi hujan yang ingin dipantau.
2. Untuk mengetahui berapa elevasi muka air tanah dari tinggi hujan pada poin satu tarik garis ke atas sampai menyentuh grafik warna biru kemudian Tarik ke sebelah kiri untuk menentukan nilai elevasi muka air tanahnya.
3. Untuk mengetahui berapa nilai FK pada saat terjadi hujan pada poin satu Tarik garis ke atas sampai menyentuh grafik warna orange kemudian Tarik ke sebelah kanan untuk menentukan nilai FK.

Berikut contoh cara penentuan FK pada grafik:



Gambar 4-16 cara penentuan nilai FK dari nilai Tinggi Hujan

Selain cara grafik untuk penentuan nilai FK berdasarkan tinggi hujan juga dapat dihitung dengan persamaan polynomial berikut:

$$Y = -0.00000003 * X^2 - 0.000003 * X + 1.4183$$

Dimana:

Y = nilai FK berdasarkan tinggi hujan

X = tinggi hujan (mm)

4.7 Penentuan *Threshold* Hujan

Penentuan Ambang Batas (*Threshold*) hujan berdasarkan pada grafik Gambar 4-15, yang akan dibagi 3 menjadi batas aman (hijau), waspada (kuning) dan bahaya (merah). Penentuan ambang batas tersebut didasarkan pada rekomendasi FK untuk lereng sesuai dengan Pedoman Pd T-09-2005-B tentang Rekayasa Penanganan Keruntuhan Lereng pada Tanah Residual dan Batuan sebagai berikut:

Tabel 4-10 Rekomendasi Nilai Faktor Keamanan untuk Lereng

Resiko terhadap nyawa manusia		Rekomendasi nilai faktor keamanan terhadap resiko kehilangan nyawa manusia		
		Tak diperhatikan	Rendah	Tinggi
Resiko Ekonomis				
Rekomendasi nilai faktor keamanan terhadap resiko kehilangan secara ekonomis	Diabaikan	1.1	1.2	1.5
	Rendah	1.2	1.2	1.5
	Tinggi	1.4	1.4	1.5

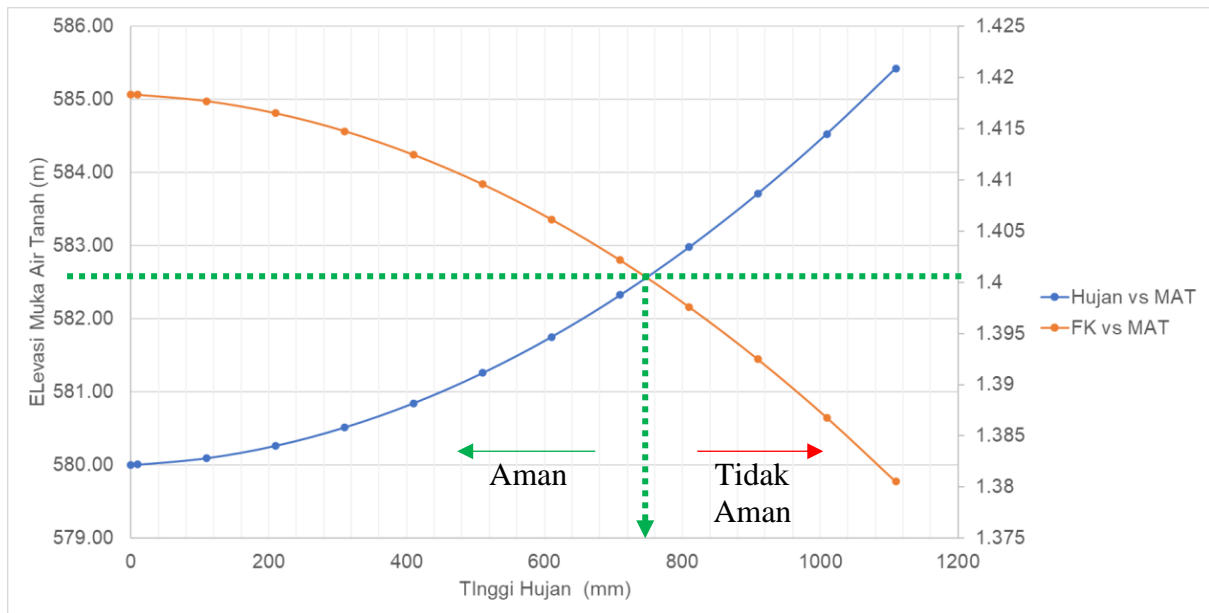
Catatan :

- Meskipun nilai faktor keamanan lerengnya 1,4, jika beresiko tinggi terhadap keselamatan orang-orang disekitarnya maka harus diubah menjadi 1.1 berdasarkan hasil prediksi kondisi air tanah terburuk.
- Faktor keamanan yang tercantum di dalam tabel ini adalah nilai-nilai yang direkomendasikan. Faktor keamanan yang lebih tinggi atau lebih rendah mungkin saja terjamin keamanannya pada situasi-situasi khusus dalam hubungannya dengan resiko kehilangan secara ekonomis.

Dari tabel diatas maka ditentukan untuk ambang batas FK sebagai berikut:

1. Batas Aman (FK = 1.4)
2. Batas Waspada (FK = 1.2)
3. Batas Bahaya (FK = 1.1)

Jika nilai tersebut diterapkan pada grafik Gambar 4-15 maka didapat ambang batas sebagai berikut:



Gambar 4-17 Penentuan Treshhold hujan

Untuk lokasi STA 76+775 ini ambang batas hujan terhadap nilai FK adalah sebagai berikut:

Tabel 4-11 Ambang Batas (*Threshold*) Hujan terhadap FK

No	Tinggi Hujan (mm)	FK	Status
1	711.59	1.4	Aman
2	2648.3	1.2	Waspada
3	3207.5	1.1	Bahaya

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian tahap 1 ini dengan lokasi studi STA 76+775 didapat beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penentuan nilai infiltrasi dilakukan dengan pendekatan nilai phi indeks.
2. Nilai FK akan menurun seiring meningkatnya elevasi muka air tanah (MAT) yang dipengaruhi oleh tingginya curah hujan dan laju infiltrasi.
3. Nilai ambang batas hujan diambil berdasarkan grafik hubungan tinggi curah hujan dan FK untuk rekomendasi lereng dengan ketentuan FK = 4 untuk batas aman, FK = 1.2 untuk batas waspada dan FK = 1.1 untuk bahaya.
4. Pada lokasi STA 76+775 ini nilai FK relative pada ambang batas aman dikarenakan sudah adanya struktur Sheetpile di sebelah kanan potongan yang membantu memperkuat stabilitas lereng, sehingga menyebabkan nilai ambang batas hujan yang relative tinggi.

5.2 Saran

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang lebih akurat maka ada beberapa saran yang disampaikan, diantaranya:

1. Diperlukan survey infiltrasi sebagai pembanding atau kalibrasi terhadap model perhitungan.
2. Diperlukan survey pengamatan tinggi muka air tanah eksisting sebagai input untuk simulasi perhitungan dan pengaruhnya terhadap FK.
3. Diperlukan lebih banyak lagi simulasi dan perhitungan nilai ambang batas hujan di beberapa lokasi rawan untuk mendapatkan hubungan yang lebih pasti antara kondisi tanah, hujan dan nilai FK.

DAFTAR PUSTAKA

- Manurung, R., Surjandari, N. S., & Djarwati, N. (2016). ANALISIS STABILITAS LERENG BERDASARKAN HUJAN 3 HARI BERURUTAN DI DAS TIRTOMOYO (Studi kasus Desa Damon, Hargorejo, Wonogiri). *Matriks Teknik Sipil*, 4(1), 97–105. <https://matriks.sipil.ft.uns.ac.id/index.php/MaTekSi/article/view/480>
- Department of Public Works. (2005). *Slope Failure Management Engineering in Residual Soil and Rock*. 98.
- Iqbal, P., Mulyono, A., & Syahbana, A. J. (2016). *Pemodelan Hidrologi Longsoran di Lereng Km 1, Jalur Lintas Barat Liwa - Krui, Lampung Barat*. 7(692), 69–78. <http://jlbgeologi.esdm.go.id/index.php/jlbgeologi>
- Sipil, J. T., & Sipil, J. T. (2015). *Pengaruh Infiltrasi Hujan dalam Analisis Stabilitas Lereng Kondisi Jenuh Sebagian Menggunakan Metode Elemen Hingga*. Xx(x), 1–12.
- Rochmawati, R., & Tonggiroh, M. (2019). *PENGARUH INFILTRASI TERHADAP ANALISIS STABILITAS*. November, 277–282.
- GISELLA, M. V. E. (2016). No Title '회선진화법' 에 관한 보론. *입법학연구*, 제13집 1호(2015), 31–48. <https://doi.org/10.1007/BF02590167>. Crozier
- Chen, H. E., Tsai, T. L., & Yang, J. C. (2017). Threshold of slope instability induced by rainfall and lateral flow. *Water (Switzerland)*, 9(9). <https://doi.org/10.3390/w9090722>
- Pengantar, K. (2011). *Zufialdi Zakaria 2011*.
- Putra, H. (2014). *Pengaruh Infiltrasi Terhadap Perubahan Parameter Tanah Jenuh Sebagian Dalam Analisis Stabilitas Lereng*. August, 1–246.
- Hafidz, A., Fauzan, M., Putra, H., & Daniswara, A. (2019). Analisis Perubahan Faktor Keamanan Lereng Akibat Hujan. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 4(3), 169–176. <https://doi.org/10.29244/jsil.4.3.169-176>
- Gunawan. (2007). Kajian Untuk Kerja Metode Hidrograf Satuan Sintetik Untuk Penetapan Banjir Rancangan Pada DAS Di Pulau Jawa (Studi Kasus DAS Cimanuk Hulu). *Dinamika Rekayasa*, 3(1), 1–7.
- Lereng, K. (n.d.). *ANALISIS PERUBAHAN HIDROLOGI LERENG AKIBAT HUJAN TERHADAP KESTABILAN LERENG Analysis Change of Slope Hidrology Result of The Rainfall To The Slope Stability*.
- Haryanti, S., Suryolelono, K. B., & Jayadi, R. (2010). Analisis Pengaruh Karakteristik Hujan terhadap Gerakan Lereng. *Jurnal Ilmiah Semesta Teknika*, 13(2), 105–115.