Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil **ISSN Print 2685-7553**
Vol. 9 No. 3 Desember 2025 **ISSN Online2581-1134**

Analisis Pengaruh Intensitas dan Durasi Hujan Terhadap Stabilitas Lereng pada Tanah Residual Balikpapan

Arief Nugraha Pontoh*[1], Noor Zaqiyah Muhding[2], Muhammad Fajrin Wahab[3], Fachreza Akbar[4]

[1,2,3,4]Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Kalimantan, Balikpapan

e-mail: **1*arief.nugraha@lecturer.itk.ac.id**, 2fajrin.wahab@lecturer.itk.ac.id

Abstract

Rainfall-induced landslides on residual soil slopes pose a serious threat to communities in North Balikpapan, Indonesia, where the landslide hazard index ranges from 0.23 to 0.73 and the region is underlain by weathered residual soils susceptible to slope failure. This study investigates the effects of rainfall intensity and duration on slope stability and pore water pressure in residual soils at three representative sites in North Balikpapan: Institut Teknologi Kalimantan (ITK), Pondok Joang Indah (PJI), and Jalan Sei Wain Km.15. Numerical simulations were performed using SEEP/W for transient seepage analysis and SLOPE/W for slope stability analysis with the Bishop Simplified method, under four rainfall intensity levels (20, 50, 100, and 198 mm/day) and three duration scenarios (1, 2, and 33 hours). Intensity levels were selected based on a 20-year daily rainfall record from the BMKG Sepinggan station (2003-2022), using national rainfall classification categories, with 198 mm/day representing the maximum observed event. Results show that initial safety factors ranged from 0.741 to 3.773 across sites and slope angles. Following rainfall simulation, the Km.15 site with a 35-degree slope transitioned from critical (SF = 1.172) to unstable (SF = 0.894) under 33-hour rainfall. Pore water pressure increased from negative to near-positive values, with maximum infiltration depths of 2.5 m at ITK and 2.9 m at PJI and Km.15, both occurring on the 15-degree slopes, with the greatest effects at slope crests and toes. The 198 mm/day and 33-hour scenario produced the most critical conditions. These findings provide a quantitative basis for rainfall-triggered landslide risk assessment in residual soil areas of Borneo.

Keywords: *Landslide, rainfall duration, rainfall intensity, residual soil, slope stability*

Abstrak

Tanah longsor yang dipicu oleh curah hujan pada lereng tanah residual menjadi ancaman serius bagi masyarakat di Balikpapan Utara, Indonesia, di mana indeks bahaya tanah longsor berkisar antara 0,23 hingga 0,73 dengan kondisi geologi yang didominasi oleh tanah residual lapuk yang rentan terhadap keruntuhan. Penelitian ini mengkaji pengaruh intensitas dan durasi curah hujan terhadap stabilitas lereng serta tekanan air pori pada tanah residual di tiga lokasi representatif di Balikpapan Utara: Institut Teknologi Kalimantan (ITK), Pondok Joang Indah (PJI), dan Jalan Sei Wain Km.15. Simulasi numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak SEEP/W untuk analisis rembesan transien dan SLOPE/W untuk analisis stabilitas lereng dengan metode Bishop Sederhana, di bawah empat variasi tingkat intensitas curah hujan (20, 50, 100, dan 198 mm/hari) serta tiga skenario durasi hujan (1, 2, dan 33 jam). Tingkat intensitas curah hujan dipilih berdasarkan data rekaman hujan harian selama 20 tahun dari stasiun BMKG Sepinggan (2003–2022) dengan mengacu pada kategori klasifikasi curah hujan nasional, di mana 198 mm/hari merepresentasikan kejadian curah hujan maksimum yang pernah teramati. Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor

keamanan awal berkisar antara 0,741 hingga 3,773 di seluruh lokasi dan sudut kemiringan lereng. Setelah simulasi curah hujan, lereng di lokasi Km.15 dengan kemiringan 35 derajat berubah status dari kritis (FK = 1,172) menjadi tidak stabil (FK = 0,894) di bawah pengaruh curah hujan selama 33 jam. Tekanan air pori meningkat dari nilai negatif menuju mendekati positif, dengan kedalaman infiltrasi maksimum mencapai 2,5 m di lokasi ITK dan 2,9 m di lokasi PJI serta Km.15, yang keduanya terjadi pada kemiringan lereng 15 derajat, dengan dampak terbesar terdeteksi pada bagian puncak dan kaki lereng. Skenario curah hujan 198 mm/hari dengan durasi 33 jam menghasilkan kondisi yang paling kritis. Temuan ini memberikan dasar kuantitatif bagi penilaian risiko tanah longsor akibat curah hujan di wilayah tanah residual di Kalimantan.

Kata kunci: C*urah hujan, intensitas curah hujan, stabilitas lereng, tanah longsor, tanah residual*

1. Pendahuluan

Tanah residual, yang terbentuk dari proses pelapukan batuan induk *in-situ*, tersebar luas di seluruh wilayah Indonesia dan menutupi sekitar 53% daratan negara ini (Saroso, 2006). Di Kalimantan, jenis tanah ini menjadi fondasi bagi sebagian besar infrastruktur di wilayah perkotaan yang berkembang pesat, seperti Balikpapan. Secara karakteristik, tanah residual bersifat heterogen, di mana parameter kuat geser tanah bervariasi bergantung pada kedalaman dan tingkat pelapukan. Pada zona tak jenuh (*unsaturated zone*), isapan matrik (*matric suction*) berkontribusi terhadap kohesi semu dan stabilitas lereng; namun, kontribusi ini menurun drastis saat terjadi infiltrasi air hujan (Fredlund & Rahardjo, 1993; Wesley, 2010). Tanah longsor akibat curah hujan pada lereng tanah residual merupakan salah satu ancaman geobahaya yang paling sering terjadi dan merusak di wilayah tropis (Dikau et al., 1996; Hasnawir, 2012).

Indonesia mencatat 9.005 kejadian tanah longsor antara tahun 2003 dan 2022, yang mengakibatkan 3.131 korban jiwa dan kerusakan pada lebih dari 56.923 bangunan (BNPB, 2022). Balikpapan Utara menunjukkan tingkat kerentanan tanah longsor yang sangat tinggi, dengan indeks bahaya berkisar antara 0,23 hingga 0,73 (RKPD Balikpapan, 2022). Distrik ini dicirikan oleh lereng curam dengan kemiringan 15 hingga 40%, tutupan tanah residual, serta intensitas curah hujan tinggi yang secara kolektif menciptakan kondisi kondusif bagi keruntuhan lereng.

Curah hujan memengaruhi stabilitas lereng terutama dengan meningkatkan tekanan air pori dan mengurangi isapan matrik pada tanah tak jenuh. Baik intensitas maupun durasi curah hujan memengaruhi besaran dan laju peningkatan tekanan air pori, yang pada gilirannya mengendalikan penurunan tegangan efektif dan kuat geser tanah (Pontoh, 2021; Darajaat et al., 2020; Tohari et al., 2005). Hardiyatmo (2006) menetapkan bahwa tekanan air pori negatif akan berkurang hingga nol saat mencapai kejenuhan penuh dan berbalik menjadi nilai positif di bawah muka air tanah, di mana setiap kenaikan tekanan air pori positif akan menurunkan kuat geser. Hasnawir (2012) menemukan bahwa tanah longsor dangkal di Sulawesi Selatan dipicu secara langsung oleh intensitas curah hujan yang melampaui nilai ambang batas (*threshold*) pada lingkungan tanah residual. Pontoh (2022) mendemonstrasikan pada lokasi Km.15 Sei-Wain di Balikpapan Utara bahwa beban bangunan tambahan menurunkan faktor keamanan lereng dari 1,686 menjadi 1,455, yang menegaskan stabilitas marginal inheren dari lereng tanah residual di lokasi tersebut.

Simulasi numerik menggunakan perangkat lunak GeoStudio (SEEP/W dan SLOPE/W) telah menjadi pendekatan yang diadopsi secara luas untuk analisis rembesan transien dan stabilitas lereng akibat curah hujan. Abishev et al. (2024) menggunakan SEEP/W dan SLOPE/W untuk mengevaluasi stabilitas lereng akibat hujan pada berbagai kemiringan lereng, dengan temuan bahwa lereng yang lebih curam mengalami penurunan faktor keamanan yang lebih signifikan. Ramadhan et al. (2024) mendemonstrasikan bahwa durasi hujan yang berkepanjangan memberikan efek destabilisasi yang lebih kuat daripada sekadar intensitas pada lereng tak jenuh. Faizal (2025) menerapkan metode

Bishop dan GeoStudio untuk menganalisis stabilitas lereng yang diperkuat dengan tiang bambu di Aceh, yang mengonfirmasi reliabilitas GeoStudio untuk komputasi faktor keamanan pada kondisi geoteknik yang kompleks. Muntaha et al. (2018) mengarakterisasi sifat fisik dan mekanik tanah residual Balikpapan Utara serta menetapkan parameter geoteknik dasar yang krusial untuk pemodelan numerik.

Data curah hujan yang akurat sangat esensial untuk kalibrasi simulasi stabilitas lereng di Kalimantan. Helda et al. (2025) mengevaluasi data satelit GPM (*Global Precipitation Measurement*) terhadap observasi penakar hujan BMKG di daerah aliran sungai Kemuning, Kalimantan Selatan, dan menemukan bahwa meskipun data satelit dapat berfungsi sebagai informasi pelengkap (r = 0,45), data stasiun BMKG tetap menjadi sumber utama yang lebih reliabel untuk analisis hidrologi di Kalimantan. Hal ini mendukung penggunaan data stasiun BMKG sebagai sumber data curah hujan utama dalam studi ini.

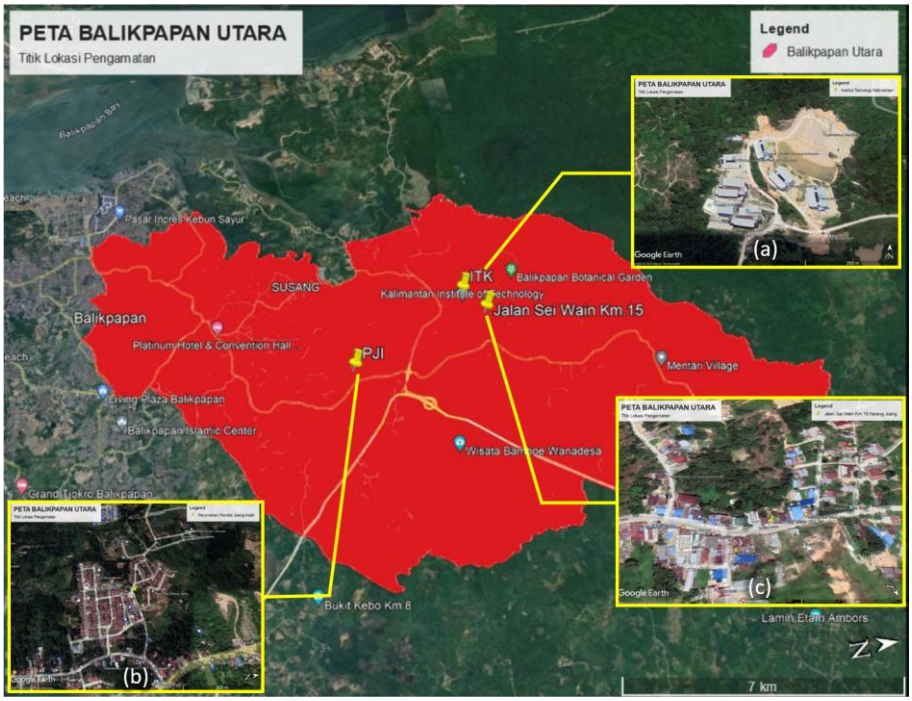
Meskipun telah tersedia dasar pengetahuan tersebut, data kuantitatif spesifik lokasi mengenai bagaimana kombinasi intensitas dan durasi curah hujan memengaruhi stabilitas lereng pada tanah residual di Balikpapan Utara masih terbatas. Belum ada studi sebelumnya yang secara sistematis menerapkan matriks intensitas-durasi multi-lokasi dan multi-skenario yang dikalibrasi terhadap catatan curah hujan observasi lokal untuk distrik ini. Kesenjangan ini membatasi pengembangan ambang batas peringatan dini tanah longsor berbasis bukti (*evidence-based*) untuk wilayah tersebut.

Studi ini menjawab kesenjangan tersebut dengan menguantifikasi pengaruh empat tingkat intensitas curah hujan (20, 50, 100, 198 mm/hari) dan tiga skenario durasi (1, 2, 33 jam) terhadap stabilitas lereng di tiga lokasi tanah residual di Balikpapan Utara, menggunakan analisis kopel rembesan transien (SEEP/W) dan analisis kesetimbangan batas (*limit equilibrium*) (SLOPE/W). Tujuan khususnya adalah: (1) menentukan faktor keamanan awal di setiap lokasi pada tiga sudut lereng, yang diverifikasi menggunakan metode Bishop Sederhana; (2) menyimulasikan respons tekanan air pori dan penurunan faktor keamanan di bawah setiap kombinasi curah hujan; dan (3) mengidentifikasi kedalaman infiltrasi dan skenario curah hujan paling kritis di setiap lokasi. Kebaruan dari studi ini terletak pada pendekatan sistematis multi-lokasi dan multi-skenario menggunakan data curah hujan dan geoteknik yang dikalibrasi secara lokal dari Balikpapan Utara, yang memberikan fondasi kuantitatif bagi penilaian risiko tanah longsor di distrik perkotaan dengan tingkat bahaya tinggi di Kalimantan ini.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Studi dan Pemilihan Lokasi

Tiga lokasi tanah residual di Balikpapan Utara, Kalimantan Timur, Indonesia dipilih sebagai area studi: (1) kampus Institut Teknologi Kalimantan (ITK); (2) area perumahan Pondok Joang Indah (PJI); dan (3) titik longsor di Jalan Sei Wain Km.15, Kelurahan Karang Joang. Ketiga lokasi tersebut berada dalam wilayah distrik Balikpapan Utara yang dicirikan oleh medan berbukit, gradien lereng 15 hingga 40%, serta tanah residual yang berasal dari batuan induk sedimen yang telah mengalami pelapukan. Pemilihan lokasi dipandu oleh peta kerentanan tanah longsor dari RKPD Balikpapan (2022) dan observasi lapangan terhadap profil tanah residual. Gambar 1 menunjukkan peta lokasi studi.



Gambar 1. Peta lokasi studi tanah residual di Balikpapan Utara. (a) Institut Teknologi Kalimantan (ITK), (b) Pondok Joang Indah (PJI), dan (c) Titik longsor di Jalan Sei Wain Km.15

2.2 Pengumpulan Data Geoteknik

Sampel tanah dari setiap lokasi diuji di laboratorium untuk menentukan parameter geoteknik yang diperlukan untuk analisis stabilitas lereng. Pengujian meliputi kadar air (ASTM D2216), berat jenis (ASTM D854), pengukuran berat isi, pengujian geser langsung dalam kondisi terkonsolidasi terdrainase (*consolidated drained* / CD) untuk memperoleh kohesi efektif (c') dan sudut geser dalam (φ'), serta klasifikasi tanah menurut *Unified Soil Classification System* (USCS). Hasil pengujian disajikan pada Tabel 1. Klasifikasi tanah di ITK dan Km.15 adalah lempung berplastisitas tinggi (CH), sedangkan PJI adalah lempung berplastisitas rendah (CL). Karena pengujian batas Atterberg tidak termasuk dalam rangkaian pengujian laboratorium studi ini, penetapan klasifikasi USCS didasarkan pada identifikasi visual-manual sampel di laboratorium serta korelasi dengan karakteristik tanah residual Balikpapan Utara yang dilaporkan oleh Muntaha et al. (2018) untuk distrik yang sama. Dengan demikian, klasifikasi ini bersifat indikatif; pengujian batas Atterberg pada studi lanjutan direkomendasikan untuk konfirmasi definitif, khususnya di lokasi PJI yang menunjukkan kadar air alami relatif tinggi (w = 56,31%) untuk kelas CL.

Kohesi efektif yang mendekati nol di Km.15 (c' = 0,53 kPa) mencerminkan sifat tanah residual permukaan yang sangat lapuk dan kehilangan kohesi di lokasi tersebut, di mana ketahanan geser didominasi oleh sudut geser (φ′ = 27,98 derajat). Parameter ini ditentukan dari pengujian geser langsung di laboratorium dan konsisten dengan kisaran yang dipublikasikan untuk tanah lempung residual yang lapuk di lingkungan tropis (Wesley, 2010).

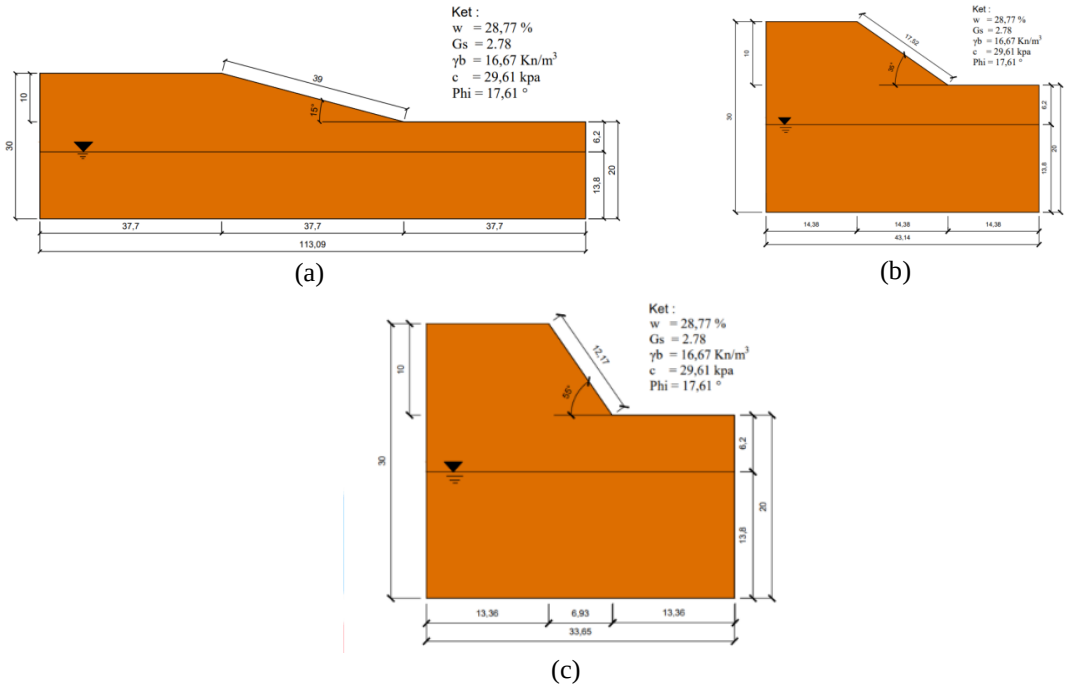
Beberapa parameter pada Tabel 1 memerlukan klarifikasi terkait konsistensi hubungan fase. Berat volume yang rendah di Km.15 (γb = 12,87 kN/m³ pada w = 25,5%) menghasilkan berat volume kering γd = 10,25 kN/m³ dan, dengan Gs = 2,78, angka pori e = 1,66 serta derajat kejenuhan S ≈ 43%. Angka pori yang tinggi ini, dikombinasikan dengan kohesi yang mendekati nol dan sudut geser yang relatif tinggi, konsisten dengan tanah residual berderajat pelapukan lanjut (zona VI menurut klasifikasi Wesley, 2010), di mana struktur tanah bersifat terbuka dan ikatan antarpartikel telah

terdegradasi oleh pelapukan. Nilai berat volume ini telah diverifikasi ulang terhadap catatan pengujian laboratorium asli. Di PJI, berat jenis yang relatif rendah (Gs = 2,42) bersama kadar air alami yang tinggi (w = 56,31%) mengindikasikan kemungkinan kandungan organik atau mineral lapukan ringan pada tanah residual permukaan.

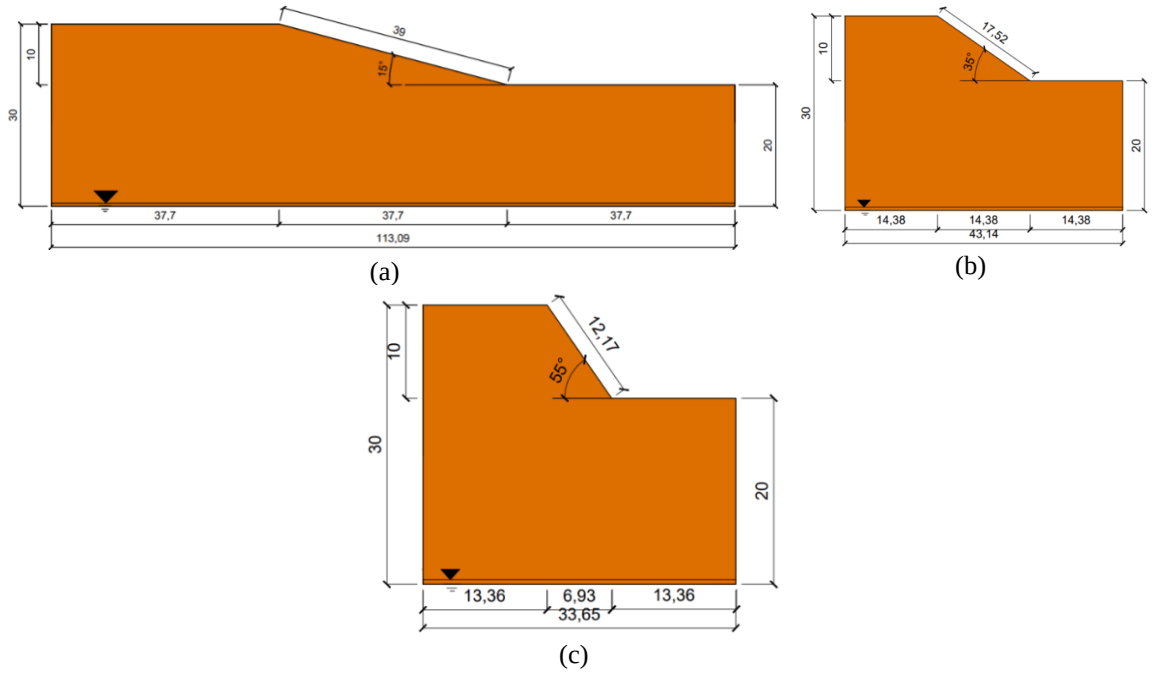
Geometri lereng ditentukan dari survei lapangan dan peta kemiringan lereng Balikpapan Utara. Sudut lereng maksimum yang teramati adalah 43 derajat; mengikuti klasifikasi oleh Zuidam (1985) dan ambang batas faktor keamanan dari Bowles (1979), tiga sudut lereng representatif dimodelkan: 15, 35, dan 55 derajat, masing-masing dengan ketinggian seragam 10 m. Model 55 derajat melampaui sudut lereng maksimum yang teramati di lapangan (43 derajat) dan disertakan sebagai skenario batas atas hipotetis untuk membatasi respons parametrik, bukan sebagai representasi lereng yang ada saat ini.

Tabel 1. Ringkasan parameter tanah untuk tiga situs tanah residual di Balikpapan Utara

Parameter	Simbol	Satuan	ITK (Site 1)	PJI (Site 2)	Km.15 (Site 3)
Klasifikasi Tanah (USCS)		-	CH	CL	CH
Kadar Air	w	%	28.70	56.31	25.50
Berat Jenis	Gs	-	2.78	2.42	2.78
Berat Volume	γ_b	kN/m^3	16.67	14.80	12.87
Kohesi	c'	kPa	29.61	20.495	0.53
Sudut Geser Dalam	φ'	derajat	17.61	26.216	27.98



Gambar 2. Model geometri lereng untuk ITK (Site 1):
(a) ITK $\alpha = 15°$, **(b)** ITK $\alpha = 35°$, dan **(c)** ITK $\alpha = 55°$



Gambar 3. Model geometri lereng untuk PJI (Site 2) dan Km.15 (Site 3):
(a) PJI dan KM.15 $\alpha = 15°$, **(b)** PJI dan KM.15 $\alpha = 35°$, **(c)** PJI dan KM.15 $\alpha = 55°$

2.3 Data Curah Hujan

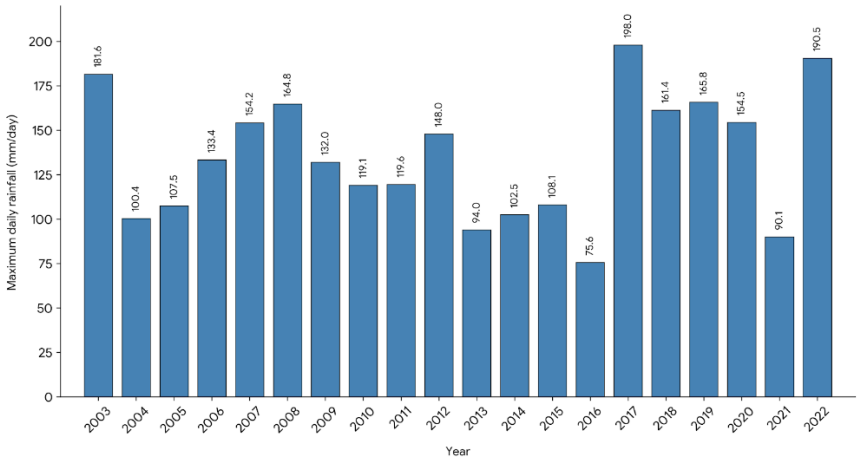
Data intensitas curah hujan harian diperoleh dari Stasiun Meteorologi Sultan Aji Muhammad Sulaiman Sepinggan (BMKG) di Balikpapan selama 20 tahun (2003 hingga 2022), sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2. Data stasiun BMKG dipilih sebagai sumber curah hujan utama, konsisten dengan rekomendasi Helda et al. (2025), yang mengevaluasi data curah hujan satelit GPM terhadap observasi BMKG di Kalimantan dan menemukan bahwa data BMKG berbasis darat tetap lebih reliabel untuk analisis hidrologi di wilayah tersebut. Nilai curah hujan harian maksimum tahunan berkisar antara 75,6 mm/hari (2016) hingga 198 mm/hari (2017), dengan rata-rata 20 tahun sekitar 135 mm/hari.

Tabel 2. Curah hujan harian maksimum tahunan di Stasiun BMKG Sepinggan, Balikpapan (2003-2022)

No.	Tahun	Curah Hujan Harian Maks. (mm/hari)	No.	Tahun	Curah Hujan Harian Maks. (mm/hari)
1	2003	181.6	11	2013	94.0
2	2004	100.4	12	2014	102.5
3	2005	107.5	13	2015	108.1
4	2006	133.4	14	2016	75.6
5	2007	154.2	15	2017	198.0
6	2008	164.8	16	2018	161.4
7	2009	132.0	17	2019	165.8
8	2010	119.7	18	2020	154.5
9	2011	119.6	19	2021	90.1
10	2012	148.0	20	2022	190.5

Berdasarkan data 20 tahun tersebut, curah hujan harian maksimum yang tercatat adalah 198 mm/hari pada tahun 2017, yang diklasifikasikan sebagai hujan sangat lebat menurut klasifikasi nasional BMKG. Empat tingkat intensitas dipilih untuk merepresentasikan cakupan penuh kategori curah

hujan yang teramati di Balikpapan (Tabel 3): 20 mm/hari (hujan ringan), 50 mm/hari (hujan sedang), 100 mm/hari (hujan lebat), dan 198 mm/hari (hujan sangat lebat, kejadian maksimum teramati).

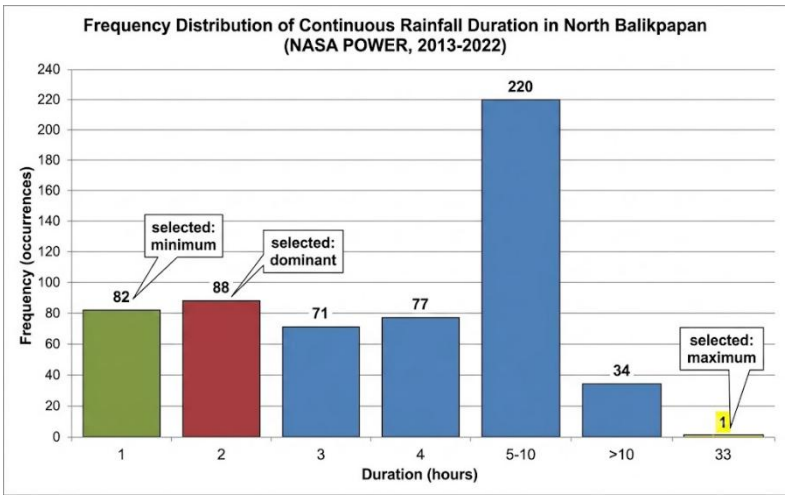


Gambar 4. Intensitas curah hujan harian maksimum tahunan dalam periode 20 tahun (2003–2022).

Tabel 3. Kategori intensitas curah hujan yang digunakan dalam simulasi (klasifikasi BMKG)

No.	Kategori Curah Hujan (BMKG)	Intensitas (mm/hari)
1	Ringan	20
2	Sedang	50
3	Lebat	100
4	Sangat Lebat (kejadian maksimum yang teramati)	198

Data durasi curah hujan diturunkan dari catatan presipitasi per jam NASA POWER untuk Balikpapan Utara selama periode 10 tahun (Januari 2013 hingga Desember 2022). Tiga durasi representatif dipilih: 1 jam (durasi terpendek yang tercatat), 2 jam (durasi tunggal dengan frekuensi kejadian tertinggi, yaitu 88 kejadian), dan 33 jam (maksimum, merepresentasikan durasi hujan kontinyu terpanjang yang tercatat dalam dataset NASA POWER Balikpapan Utara selama periode observasi 10 tahun). Meskipun hanya tercatat satu kali dalam periode observasi, durasi 33 jam dipilih secara sengaja sebagai skenario batas atas teramati untuk membatasi respons lereng terhadap hujan berkepanjangan, bukan sebagai representasi kejadian tipikal.



Gambar 5. Distribusi frekuensi kejadian curah hujan berdasarkan durasi dalam periode 10 tahun (Januari 2013–Desember 2022)

Data intensitas harian diambil dari stasiun BMKG Sepinggan karena observasi penakar hujan berbasis darat lebih reliabel untuk besaran curah hujan titik (*point rainfall*), sebagaimana ditunjukkan oleh Helda et al. (2025). Namun, data presipitasi per jam dari stasiun BMKG Balikpapan tidak tersedia untuk keseluruhan periode, sehingga statistik durasi hujan menerus diturunkan dari dataset per jam NASA POWER. Perlu diakui bahwa NASA POWER merupakan produk reanalisis berbasis satelit (MERRA-2) dengan resolusi spasial sekitar 0,5° × 0,625°, sehingga sel grid yang digunakan mencakup wilayah yang jauh lebih luas daripada lokasi studi. Akibatnya, statistik durasi yang diperoleh merepresentasikan karakteristik hujan skala regional dan kejadian durasi maksimum 33 jam pada skala grid belum tentu terjadi secara persis di titik lereng yang dianalisis. Untuk tujuan studi parametrik ini, data tersebut dinilai memadai sebagai dasar pemilihan skenario durasi representatif (terpendek, frekuensi tertinggi, dan batas atas), namun pengembangan ambang batas peringatan dini operasional di masa depan sebaiknya menggunakan data per jam dari penakar hujan lokal.

Tabel 4. Distribusi frekuensi durasi curah hujan menerus di Balikpapan Utara (NASA POWER, 2013-2022)

Durasi (jam)	Frekuensi (kejadian)	Kategori
1	82	Terpendek (terpilih)
2	88	Frekuensi tertinggi untuk durasi tunggal (terpilih)
3	71	
4	77	
5-10	220	Agregat enam kelas durasi
>10	34	
33	1	Maksimum (terpilih)

Catatan: Kelas 5–10 jam merupakan agregat enam interval durasi (5, 6, 7, 8, 9, dan 10 jam), sehingga frekuensinya tidak dapat dibandingkan langsung dengan kelas durasi tunggal.

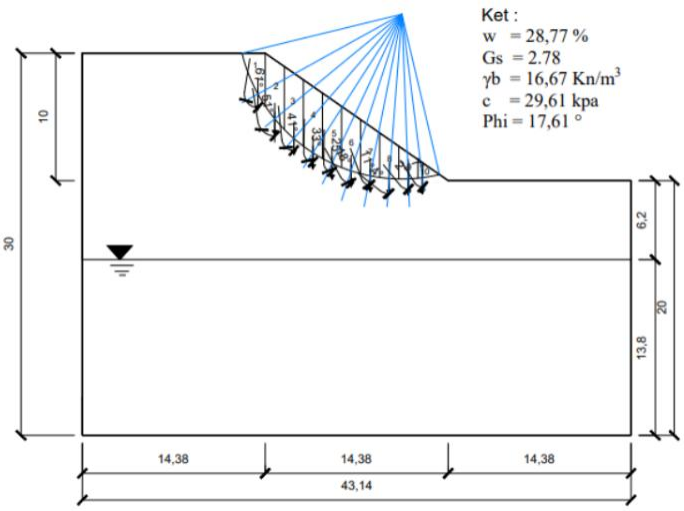
2.4 Analisis Stabilitas Lereng: Kondisi Awal

Model geometri lereng untuk setiap lokasi dan sudut lereng (15, 35, 55 derajat) dibangun di SLOPE/W (GeoStudio 2018, Geoslope International Ltd., Calgary, Canada), sebuah program kesetimbangan batas berlisensi komersial yang diterapkan secara luas dalam praktik rekayasa geoteknik (Faizal, 2025; Abishev et al., 2024). Metode Bishop Sederhana dipilih untuk analisis kesetimbangan batas karena memenuhi kesetimbangan gaya vertikal dan momen, memberikan faktor keamanan yang reliabel untuk permukaan keruntuhan melingkar pada tanah kohesif (Pontoh, 2021; Darajaat et al., 2020). Metode ini menyelesaikan persamaan berikut secara iteratif:

$$FS = \Sigma \left[\left(c'b + (W - ub) \tan \varphi' \right) / M_\alpha \right] / \Sigma \left(W \sin \alpha \right) \quad (1)$$

$$M_\alpha = \cos \alpha + \left(\tan \varphi' \sin \alpha \right) / FS \quad (2)$$

Di mana *FS* adalah faktor keamanan, *W* adalah total berat irisan (kN), *b* adalah lebar irisan (m), *u* adalah tekanan air pori (kPa), φ' adalah sudut geser efektif, c' adalah kohesi efektif (kPa), α adalah kemiringan dasar setiap irisan, dan $M\alpha$ adalah fungsi tanpa dimensi dari sudut irisan dan *FS* yang didefinisikan oleh Persamaan (2). Karena perhitungan manual menggunakan permukaan uji tetap dan sepuluh irisan, sedangkan SLOPE/W mencari permukaan kritis dari sejumlah besar permukaan uji, kesepakatan eksak tidak diharapkan; perbedaan dalam kisaran 10% dianggap cukup untuk tujuan verifikasi.



Gambar 6. Contoh pengirisan bidang gelincir untuk lokasi ITK ($\alpha = 35°$) yang digunakan untuk verifikasi perhitungan manual

2.5 Simulasi Curah Hujan Numerik: SEEP/W

Analisis rembesan transien dilakukan dalam SEEP/W (GeoStudio 2018) untuk menyimulasikan infiltrasi curah hujan dan perubahan distribusi tekanan air pori yang dihasilkan. SEEP/W menyelesaikan persamaan Richards yang mengatur aliran pada kondisi jenuh variabel. Distribusi tekanan air pori awal ditetapkan menggunakan posisi muka air tanah yang ditentukan dari data lapangan: di ITK, muka air tanah ditempatkan pada kedalaman 16,2 m di bawah puncak model lereng berdasarkan data lubang bor N-SPT; di PJI dan Km.15, tidak tersedia data elevasi muka air tanah dari investigasi lapangan, sehingga muka air tanah diasumsikan berada di dasar model; karena asumsi muka air tanah yang lebih dalam menghasilkan isapan awal yang lebih tinggi, faktor keamanan awal di kedua lokasi tersebut harus dianggap sebagai estimasi batas atas.

Kondisi kepala hidrolik/tekanan air pori awal ditetapkan dari muka air tanah dalam pengaturan *KeyIn Analyses*. Tiga jenis kondisi batas diterapkan: (1) batas fluks unit yang sama dengan intensitas curah hujan pada permukaan lereng, diterapkan untuk durasi yang ditentukan dan kemudian disetel ke nol untuk menyimulasikan berhentinya hujan, dengan tinjauan muka rembesan aktif sehingga air yang dipasok melebihi kapasitas infiltrasi dibuang sebagai limpasan; (2) batas tanpa aliran di sepanjang dasar model; dan (3) batas kepala total konstan pada sisi vertikal kiri dan kanan, yang disetel konsisten dengan elevasi muka air tanah awal. Karena proses limpasan dan penyegelan permukaan direpresentasikan hanya melalui batas kapasitas ini, infiltrasi selama hujan singkat dengan intensitas tinggi mungkin masih sedikit terestimasi secara berlebihan.

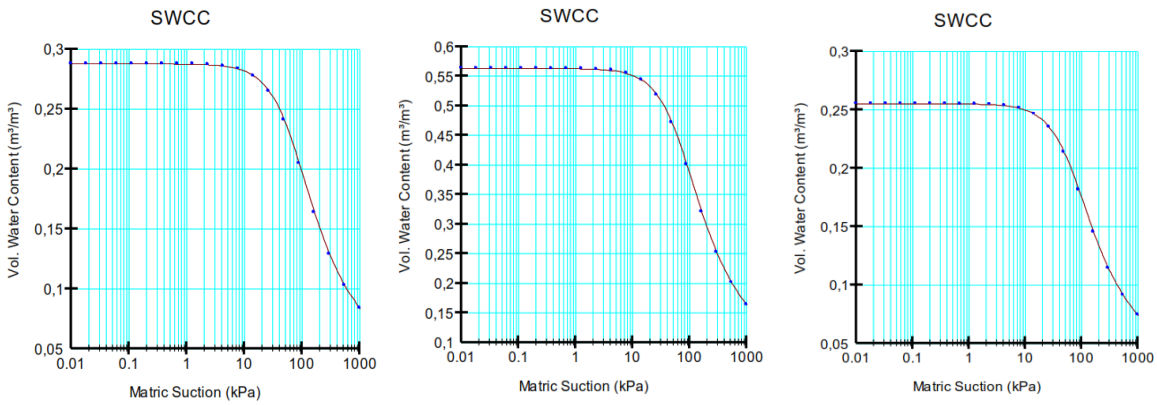
Sebuah matriks curah hujan 12-kombinasi (4 intensitas x 3 durasi) disimulasikan (Tabel 5), dengan setiap skenario mewakili curah hujan kontinyu selama 1, 2, atau 33 jam yang diikuti oleh penghentian hujan. Perlu dicatat bahwa penerapan intensitas harian sebagai fluks konstan selama durasi simulasi menyebabkan skenario durasi 33 jam menghasilkan total curah hujan kumulatif yang melampaui nilai harian historisnya; sebagai contoh, kombinasi (33, 198) setara dengan total hujan sekitar 272 mm, melebihi kejadian harian maksimum teramati sebesar 198 mm/hari. Kombinasi ini dipertahankan secara sengaja sebagai skenario parametrik konservatif (batas atas) untuk membatasi respons lereng pada kondisi terekstrem, bukan sebagai representasi kejadian hujan historis tunggal. Fungsi kadar air volumetrik (*SWCC*) diestimasi menggunakan metode *sample-functions* di SEEP/W, dengan kadar air dan jenis tanah dari Tabel 1 sebagai input. Fungsi konduktivitas hidrolik diestimasi

menggunakan metode Van Genuchten (1980). Konduktivitas hidrolik jenuh ditetapkan sebesar K(sat) = 0,002 m/jam (setara dengan 0,20 cm/jam), diadopsi dari set parameter Van Genuchten tipikal untuk kelas tekstur lempung yang dilaporkan oleh Carsel dan Parrish (1988), yang sesuai untuk tanah CH dan CL yang diklasifikasikan di lokasi studi (Tabel 1).

Karena pengujian permeabilitas dan data retensi air spesifik lokasi tidak tersedia, baik K(sat) maupun SWCC ditetapkan dari nilai publikasi untuk kelas tekstur lempung (Carsel & Parrish, 1988); dengan demikian, respons tekanan air pori yang disimulasikan harus dibaca sebagai nilai indikatif, bukan nilai yang terkalibrasi terhadap kondisi lokasi. Gambar 7 dan 8 menunjukkan output *SWCC* dan output fungsi konduktivitas hidrolik. Tekanan air pori negatif dari SEEP/W diterapkan langsung dalam suku tegangan efektif Persamaan (1), yang setara dengan mengasumsikan $\varphi_b = \varphi'$; perlakuan ini dapat melebih-lebihkan kontribusi kekuatan isapan pada nilai isapan yang tinggi.

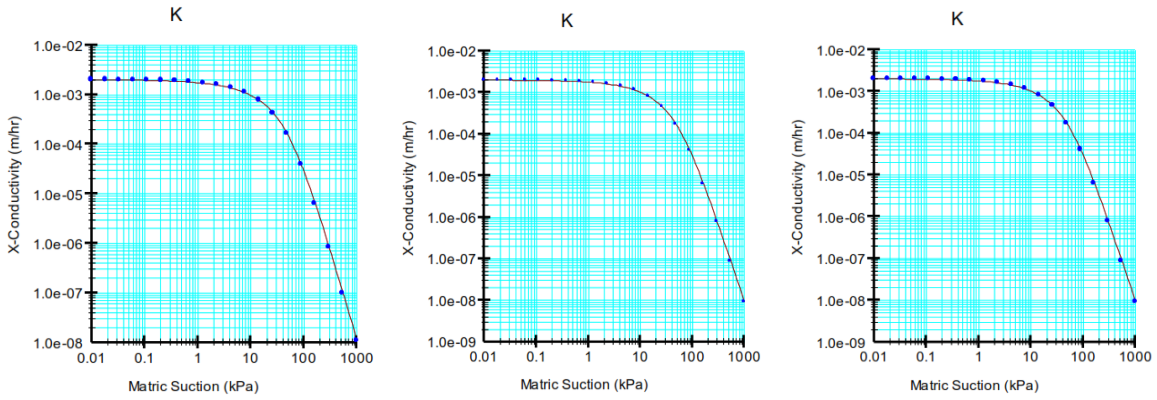
Tabel 5. Matriks simulasi intensitas-durasi curah hujan

Durasi \ Intensitas	20 mm/hari	50 mm/hari	100 mm/hari	198 mm/hari
1 jam	(1, 20)	(1, 50)	(1, 100)	(1, 198)
2 jam	(2, 20)	(2, 50)	(2, 100)	(2, 198)
33 jam	(33, 20)	(33, 50)	(33, 100)	(33, 198)



ITK (Site 1) PJI (Site 2) Km.15 (Site 3)

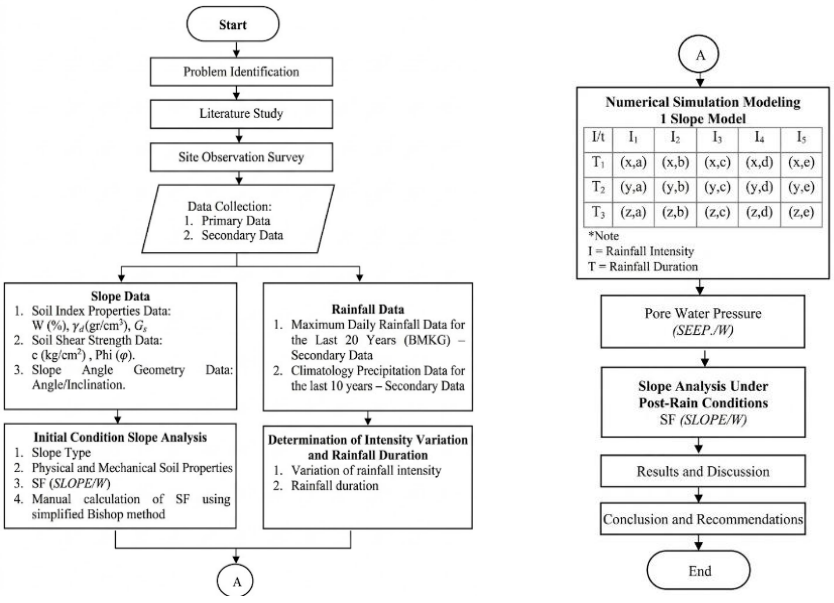
Gambar 7. Estimasi kurva karakteristik air-tanah (SWCC), atau fungsi kadar air volumetrik, untuk tiga lokasi pengamatan (ITK, PJI, dan Km.15)



ITK (Site 1) PJI (Site 2) Km.15 (Site 3)

Gambar 8. Estimasi fungsi konduktivitas hidrolik (K) terhadap isapan matrik untuk tiga situs pengamatan (ITK, PJI, dan Km.15)

Setelah simulasi rembesan, distribusi tekanan air pori diimpor ke dalam SLOPE/W untuk menghitung ulang faktor keamanan. Tiga garis pemantauan (Garis A: puncak lereng, Garis B: bagian tengah, Garis C: kaki lereng) melacak variasi tekanan air pori terhadap kedalaman. Diagram alir penelitian disajikan dalam Gambar 9.



Gambar 9. Diagram alir penelitian

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Stabilitas Lereng Awal

Tabel 6 menyajikan faktor keamanan (FK) awal dari SLOPE/W dan verifikasi manual independen menggunakan metode Bishop Sederhana. Perhitungan manual mengikuti prosedur irisan standar: membagi massa keruntuhan menjadi 10 irisan vertikal, menghitung berat irisan, tegangan efektif, dan tekanan air pori, serta menyelesaikan FK secara iteratif menggunakan Persamaan (1) dan (2). Perbedaan relatif antara kedua metode berkisar antara 1,5% hingga 10,2% pada sembilan kombinasi lokasi-sudut, dengan perbedaan terbesar terjadi pada lereng 15 derajat di PJI dan Km.15 serta lereng 55 derajat di Km.15, di mana permukaan melingkar yang diasumsikan secara manual menyimpang paling jauh dari permukaan kritis yang ditemukan oleh SLOPE/W. Tingkat kesesuaian ini mengonfirmasi konsistensi internal (verifikasi) dari *output* SLOPE/W. Validasi independen terhadap data instrumentasi lapangan (seperti pembacaan piezometer atau catatan inklinometer) tidak tersedia untuk lokasi-lokasi ini dan merupakan keterbatasan dari penelitian ini. Model SLOPE/W yang telah terverifikasi kemudian digunakan untuk semua simulasi curah hujan.

Tabel 6. Faktor keamanan awal dari SLOPE/W dan verifikasi manual metode Bishop Sederhana

Sudut Lereng	ITK Manual	ITK SLOPE/W	PJI Manual	PJI SLOPE/W	Km.15 Manual	Km.15 SLOPE/W
15°	3.43	3.219	4.15	3.773	2.84	2.551
35°	2.52	2.349	2.21	2.178	1.19	1.172
55°	1.96	1.884	1.54	1.576	0.68	0.741
Kategori	*Stabil*	*Stabil*	*Stabil*	*Stabil*	*Stabil (15°); Kritis (35°); Tidak Stabil (55°)*	

Faktor keamanan awal menunjukkan hubungan terbalik yang konsisten antara sudut lereng dan stabilitas di semua lokasi. Di ITK, FK berkisar dari 3,219 (15 derajat) hingga 1,884 (55 derajat); di PJI, dari 3,773 hingga 1,576; dan di Km.15, dari 2,551 hingga 0,741. Semua lereng ITK dan PJI dalam kondisi stabil (FK > 1,25) menurut Bowles (1979). Di Km.15, lereng 35 derajat berada dalam kondisi kritis (1,07 < FK < 1,25) dan lereng 55 derajat tidak stabil (FK < 1,07), yang mencerminkan efek gabungan dari kohesi yang sangat rendah (c = 0,53 kPa) dan geometri yang curam. Hasil ini konsisten dengan Hardiyatmo (2006), yang mencatat bahwa tanah residual dengan kohesi rendah sangat rentan pada sudut curam, dan dengan Pontoh (2022), yang menunjukkan bahwa lokasi Km.15 memiliki stabilitas dasar yang marginal secara inheren bahkan dalam kondisi kering. Faktor utama yang membedakan respons lokasi adalah kohesi: kohesi tinggi di ITK (29,61 kPa) memberikan ketahanan yang jauh lebih besar daripada kohesi yang mendekati nol di Km.15 (0,53 kPa).

3.2 Pengaruh Curah Hujan terhadap Faktor Keamanan

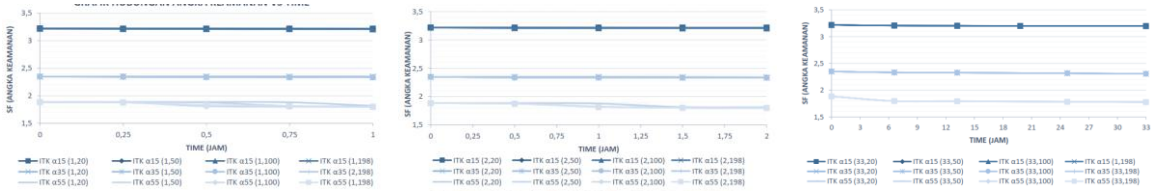
Di ITK dan PJI, semua lereng mempertahankan FK > 1,25 di bawah ke-12 kombinasi curah hujan, sehingga tetap stabil sepanjang simulasi (Tabel 7). Matriks FK pasca-hujan lengkap untuk semua lokasi disajikan pada Tabel 7. Di ITK, penurunan FK terbesar terjadi di bawah intensitas 198 mm/hari pada lereng 55 derajat (FK pasca-hujan minimum = 1,776, penurunan maksimum = 0,108), konsisten dengan perkembangan tekanan air pori yang didominasi oleh infiltrasi permukaan di lokasi ini, di mana muka air tanah berada pada kedalaman cukup dalam (16,2 m) dan intensitas secara langsung mengatur laju pembasahan permukaan.

Di PJI dan Km.15, nilai FK pada durasi tertentu tidak sensitif terhadap intensitas curah hujan: sebagai contoh, di PJI ($\alpha = 35°$) di bawah durasi 33 jam, FK = 2,063 untuk keempat intensitas tersebut. Dua faktor menjelaskan perilaku ini. Pertama, tiga dari empat intensitas yang diterapkan (50, 100, dan 198 mm/hari) melampaui konduktivitas hidrolik jenuh dari tanah residual lempungan (0,002 m/jam, setara dengan 48 mm/hari), sehingga ketika zona dekat permukaan mendekati kejenuhan, fluks yang terinfiltrasi dibatasi oleh kapasitas infiltrasi tanah, bukan oleh intensitas curah hujan nominal, dan kelebihannya dibuang sebagai limpasan. Kedua, dengan muka air tanah diasumsikan berada di dasar lereng, bidang tekanan pori di atasnya didominasi oleh isapan (*suction-dominated*) dan merespons terutama terhadap durasi pembasahan kumulatif, bukan terhadap perbedaan jangka pendek pada fluks permukaan. Perbedaan yang terkait dengan intensitas terendah (20 mm/hari, di bawah kapasitas infiltrasi) berada di bawah resolusi faktor keamanan yang dilaporkan. Implikasi praktisnya adalah bahwa di lokasi dengan muka air tanah dangkal atau tidak ditentukan dan tutupan permeabilitas rendah, ambang batas curah hujan berbasis durasi lebih informatif untuk peringatan dini tanah longsor daripada ambang batas berbasis intensitas.

Di Km.15, lereng 35 derajat beralih dari kritis (FK = 1,172) menjadi tidak stabil di bawah durasi 2 jam dan 33 jam pada keempat intensitas. Penurunan paling parah terjadi di bawah curah hujan 33 jam, di mana FK turun menjadi 0,894 (penurunan sebesar 0,278) terlepas dari intensitasnya, yang dihasilkan oleh kombinasi (33, 20), (33, 50), (33, 100), dan (33, 198) secara setara. Lereng 55 derajat, yang awalnya tidak stabil (FK = 0,741), mengalami penurunan lebih lanjut hingga serendah 0,490 di bawah curah hujan 33 jam (dihasilkan oleh keempat tingkat intensitas pada durasi ini). Hasil ini mengonfirmasi bahwa di lokasi ini, variabel pengontrol untuk pemicu tanah longsor adalah durasi curah hujan, bukan intensitas. Hasil ini sejalan dengan Pontoh (2021) dan Darajaat et al. (2020), yang melaporkan bahwa durasi memberikan efek kumulatif yang lebih kuat pada penurunan faktor keamanan daripada intensitas, terutama pada lereng curam. Abishev et al. (2024) secara serupa menemukan bahwa lereng yang lebih curam memperkuat efek destabilisasi curah hujan. Gambar 10 hingga 12 menyajikan grafik FK terhadap waktu untuk ketiga lokasi dan sudut lereng.

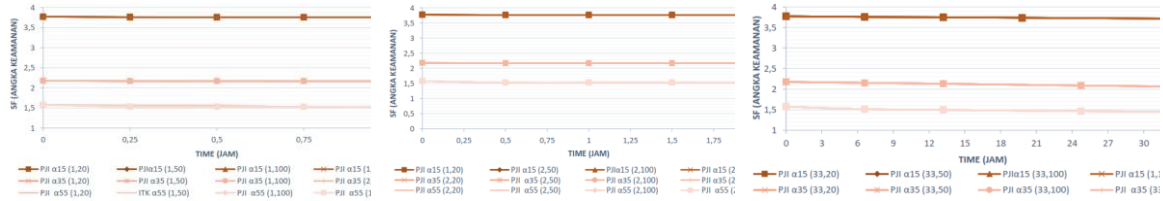
Tabel 7. Perbandingan faktor keamanan sebelum dan setelah simulasi curah hujan

Lokasi	Sudut Lereng	FK Awal	Kategori Awal	FK Min Pasca-Hujan	FK Maks Pasca-Hujan	Kategori Pasca-Hujan	Reduksi FK Maks
ITK (Site 1)	15°	3.219	Stabil	3.197	3.217	Stabil	0.022
	35°	2.349	Stabil	2.305	2.347	Stabil	0.044
	55°	1.884	Stabil	1.776	1.817	Stabil	0.108
PJI (Site 2)	15°	3.773	Stabil	3.715	3.762	Stabil	0.058
	35°	2.178	Stabil	2.063	2.167	Stabil	0.115
	55°	1.576	Stabil	1.446	1.525	Stabil	0.130
Km.15 (Site 3)	15°	2.551	Stabil	2.216	2.445	Stabil	0.335
	35°	1.172	Kritis	0.894	1.088	Kritis	0.278
	55°	0.741	Tidak stabil	0.490	0.635	Tidak stabil	0.251



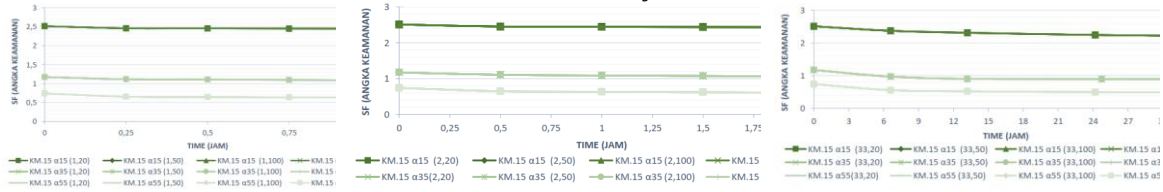
selama durasi 1 jam selama durasi 2 jam selama durasi 33 jam

Gambar 10. Faktor keamanan (FK) versus waktu untuk ITK (Site 1) selama durasi 1 jam, 2 jam, dan 33 jam



selama durasi 1 jam selama durasi 2 jam selama durasi 33 jam

Gambar 11. Faktor keamanan (FK) versus waktu untuk PJI (Site 2) selama durasi 1 jam, 2 jam, dan 33 jam

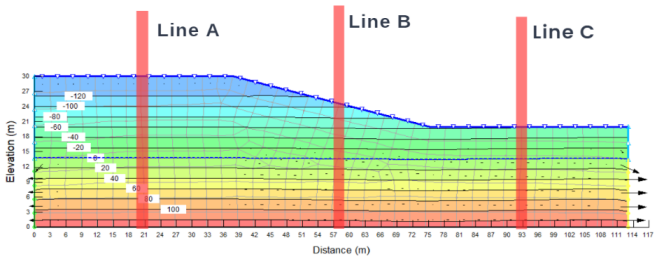


selama durasi 1 jam selama durasi 2 jam selama durasi 33 jam

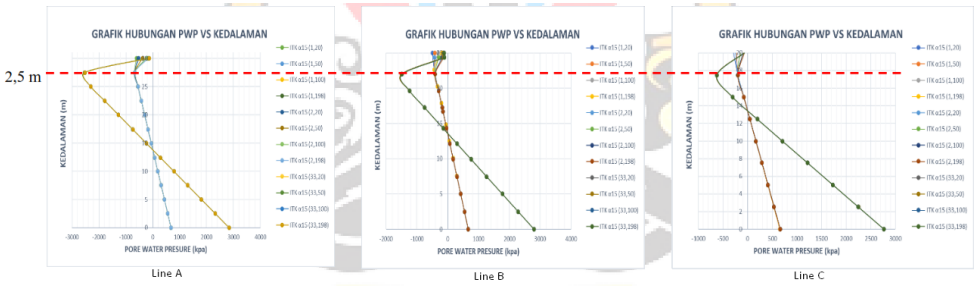
Gambar 12. Faktor keamanan (FK) versus waktu untuk Km.15 (Site 3) selama durasi 1 jam, 2 jam, dan 33 jam

3.3 Distribusi Tekanan Air Pori dan Kedalaman Infiltrasi

Gambar 13 sampai 21 menunjukkan profil tekanan air pori (*pore water pressure*/PWP) terhadap kedalaman pada Garis A, B, dan C untuk setiap sudut lereng di masing-masing lokasi.

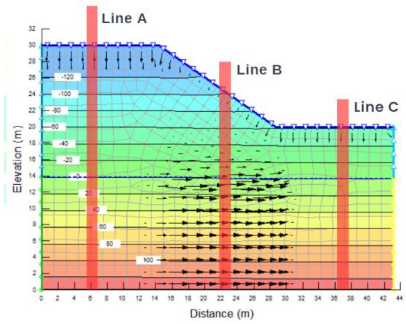


(a)

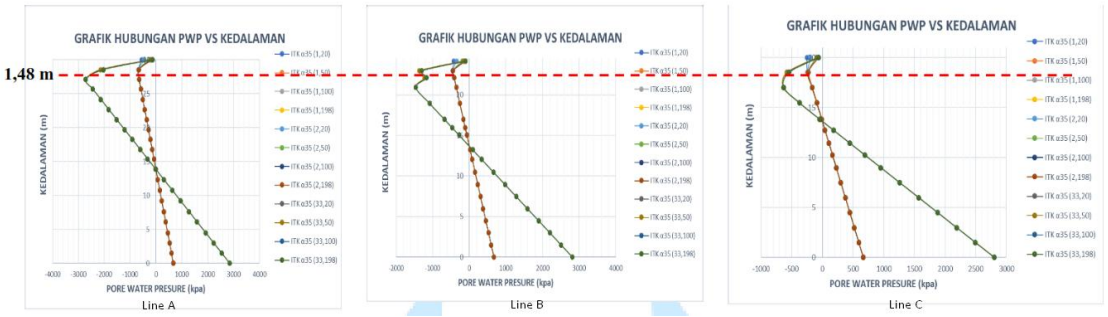


(b)

Gambar 13. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk ITK (Site 1, $\alpha = 15°$)

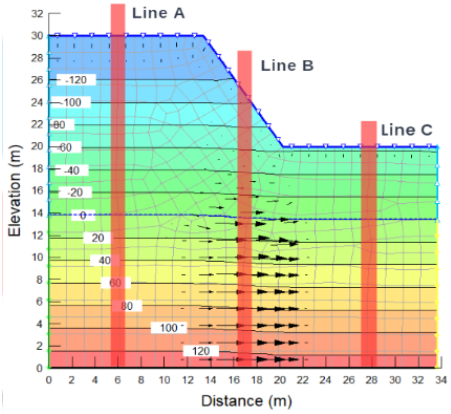


(a)

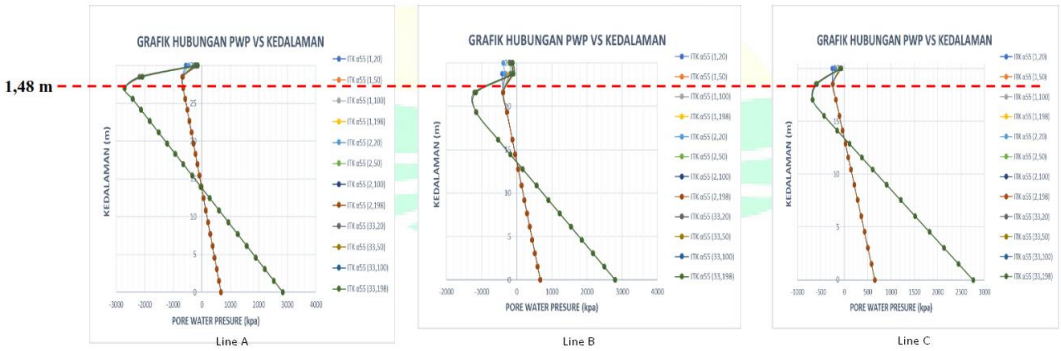


(b)

Gambar 14. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk ITK (Site 1, $\alpha = 35°$)

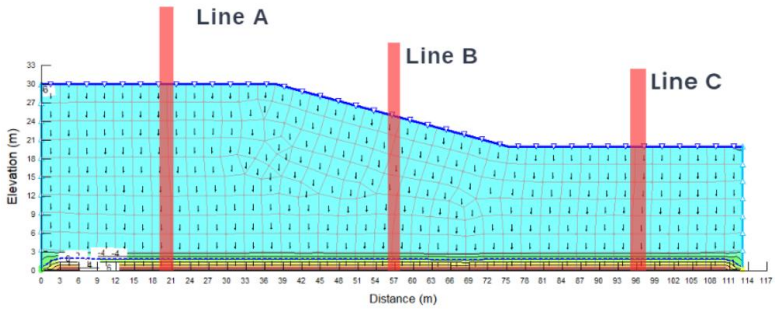


(a)

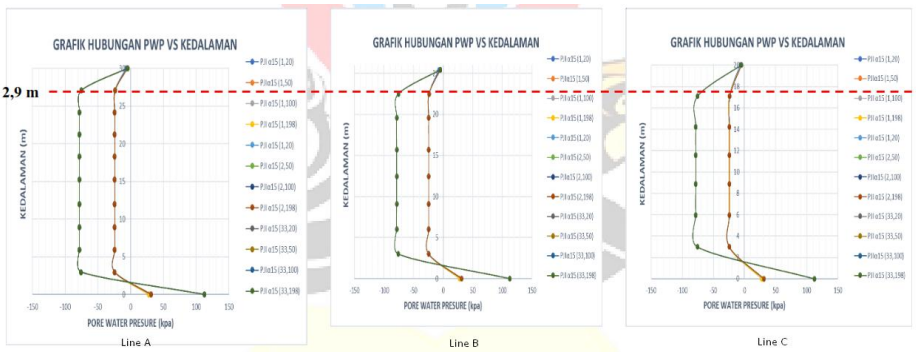


(b)

Gambar 15. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk ITK (Site 1, $\alpha = 55°$)

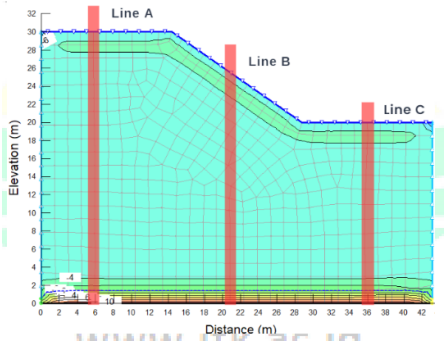


(a)



(b)

Gambar 16. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk PJI (Site 2, $\alpha = 15°$)

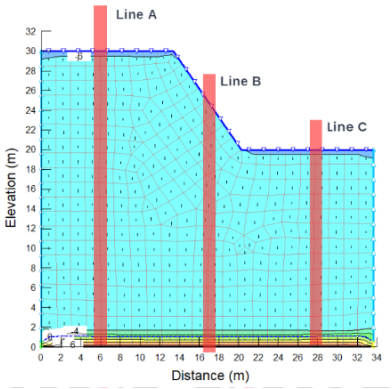


(a)



(b)

Gambar 17. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk PJI (Site 2, $\alpha = 35°$)

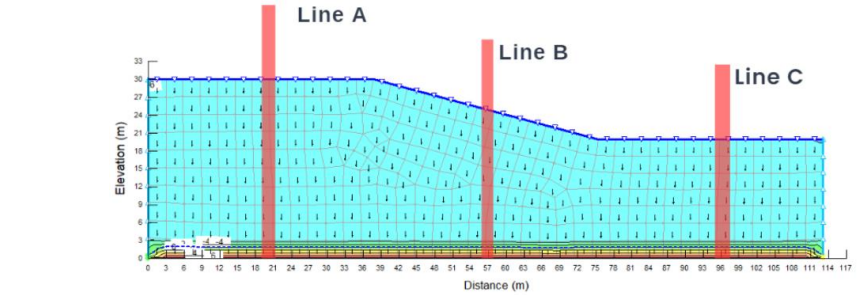


(a)

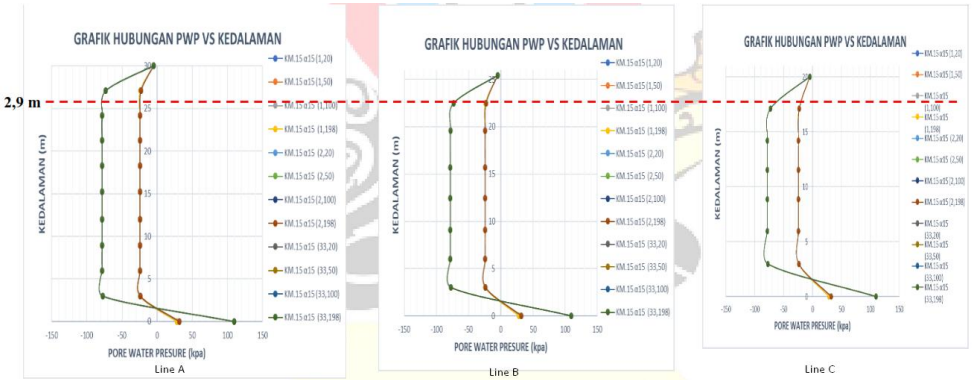


(b)

Gambar 18. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk PJI (Site 2, $\alpha = 55°$)

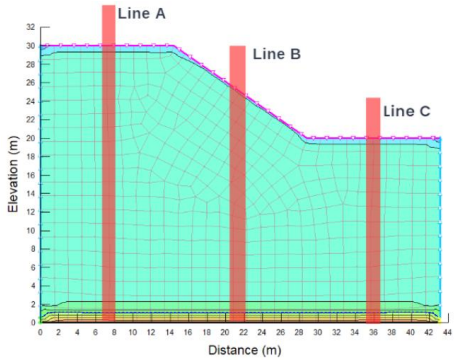


(a)

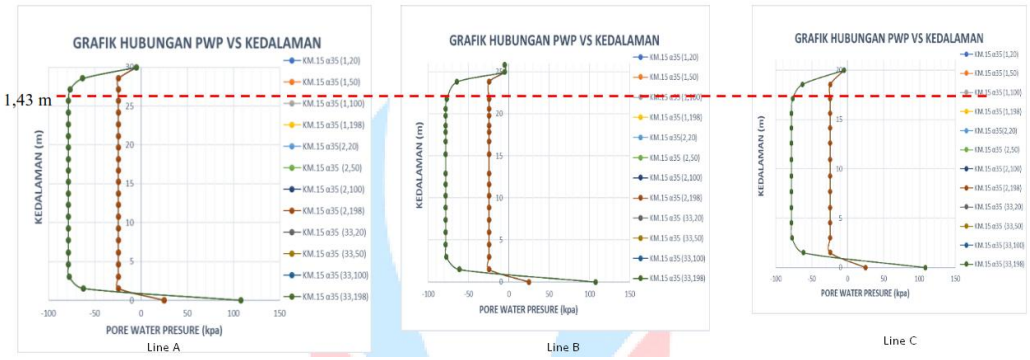


(b)

Gambar 19. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk Km.15 (Site 3, $\alpha = 15°$)

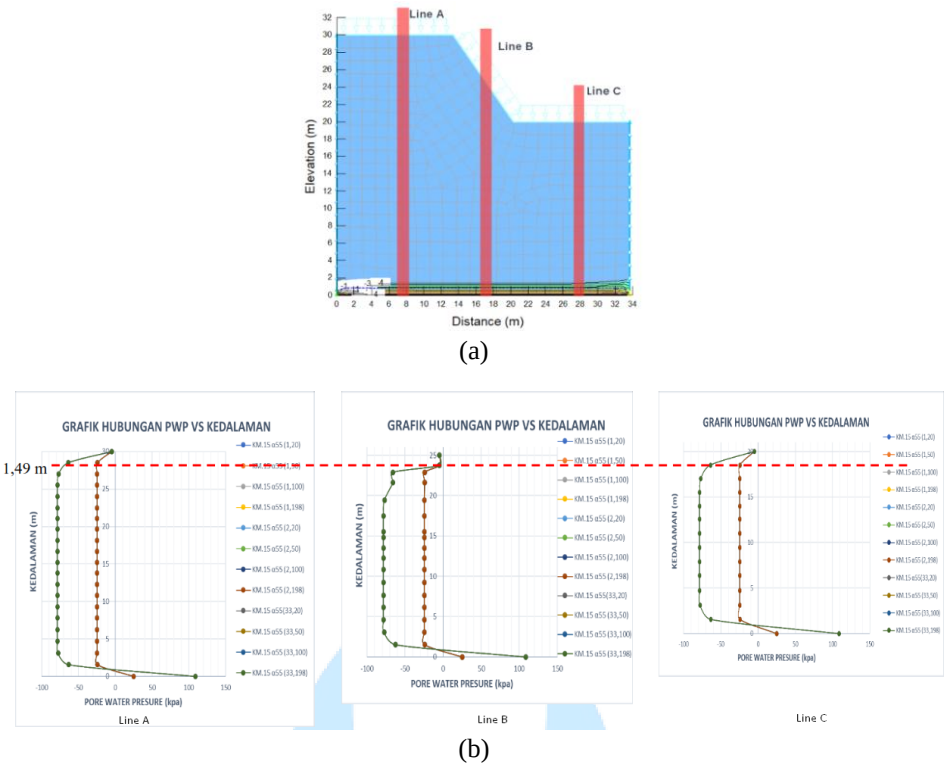


(a)



(b)

Gambar 20. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk Km.15 (Site 3, $\alpha = 35°$)



Gambar 21. Grafik tekanan air pori (PWP) versus kedalaman untuk Km.15 (Site 3, $\alpha = 55°$)

Pada semua lokasi, profil tekanan air pori (PWP) awal menunjukkan nilai negatif (isapan matrik) di atas muka air tanah, yang konsisten dengan kondisi tanah residual tak jenuh. Setelah simulasi curah hujan, nilai isapan menurun secara progresif, dengan PWP cenderung menuju nol dan mendekati nilai positif di dekat permukaan. Transisi ini mengindikasikan pembasahan parsial pada tanah residual tak jenuh, yang konsisten dengan kerangka mekanika tanah tak jenuh dari Fredlund & Rahardjo (1993). Kejenuhan penuh tidak tercapai dalam durasi simulasi, yang konsisten dengan nilai K(sat) = 0,002 m/jam yang rendah pada tanah lempung tersebut.

Skenario yang paling berpengaruh adalah intensitas 198 mm/hari dengan durasi 33 jam, yang menghasilkan peningkatan PWP terbesar pada semua garis pemantauan dan kedalaman. Hal ini sejalan dengan temuan Hardiyatmo (2006), yang menetapkan bahwa peningkatan PWP di atas muka air tanah merupakan mekanisme utama yang mengurangi tegangan efektif dan kuat geser, serta Hasnawir (2012), yang menghubungkan curah hujan berkepanjangan dengan intensitas tinggi sebagai pemicu tanah longsor dangkal di lingkungan tanah residual.

Dalam studi ini, kedalaman infiltrasi didefinisikan sebagai kedalaman maksimum di bawah permukaan tanah di mana tekanan air pori berubah lebih dari 1 kPa relatif terhadap profil awal, yang dibaca dari *output* PWP terhadap kedalaman SEEP/W pada setiap garis pemantauan. Pada lereng ITK $\alpha = 15°$, infiltrasi mencapai 2,5 m pada Garis A dan Garis C (puncak dan kaki lereng) serta 2,3 m pada Garis B (bagian tengah); pada lereng ITK $\alpha = 35°$dan $\alpha = 55°$, kedalaman infiltrasi berkisar antara 1,43–1,48 m pada Garis A dan Garis C. Pada lereng PJI $\alpha = 15°$, infiltrasi mencapai 2,9 m secara seragam pada ketiga garis. Pada lereng Km.15 $\alpha = 15°$, kedalaman infiltrasi maksimum adalah 2,9 m pada Garis A dan Garis C, serta 2,5 m pada Garis B. Pada sudut lereng yang lebih curam (35 dan 55 derajat), kedalaman infiltrasi maksimum di PJI dan Km.15 berkisar antara 1,40 hingga 1,49 m pada Garis A dan Garis C, serta 1,19 hingga 1,24 m pada Garis B. Peningkatan PWP terbesar

secara konsisten terjadi pada Garis A (puncak lereng) dan Garis C (kaki lereng) untuk lereng 15 derajat, yang mengidentifikasi zona-zona tersebut sebagai zona paling kritis untuk penurunan kuat geser. Pola spasial ini konsisten dengan temuan Pontoh (2022), yang menunjukkan bahwa puncak dan kaki lereng di Km.15 merupakan zona yang paling rentan terhadap perubahan tekanan air pori dan beban eksternal. Kedalaman infiltrasi maksimum yang dangkal (kurang dari 3 m dalam semua kasus) menunjukkan bahwa keruntuhan translasi dangkal sebagai moda keruntuhan potensial yang dominan. Pemeriksaan lanjutan terhadap output SLOPE/W memperlihatkan pergeseran bidang gelincir kritis pasca-hujan ke posisi yang lebih dangkal, dengan bentuk memanjang mengikuti zona penurunan isapan. Kedalaman maksimumnya terbaca antara 1,4 dan 2,9 m, hampir sama dengan kedalaman infiltrasi yang diperoleh dari SEEP/W. Kesamaan rentang dari dua analisis yang berbeda ini menunjukkan bahwa letak bidang gelincir kritis dikendalikan langsung oleh zona reduksi isapan. Meskipun metode Bishop Sederhana mengasumsikan permukaan melingkar, permukaan melingkar dangkal dengan radius besar mendekati geometri bidang translasi planar, sehingga faktor keamanan yang dihasilkan tetap representatif untuk moda keruntuhan dangkal yang teridentifikasi. Hal ini konsisten dengan praktik umum analisis lereng akibat infiltrasi hujan menggunakan kesetimbangan batas melingkar (Abishev et al., 2024; Ramadhan et al., 2024).

Dibandingkan dengan Darajaat et al. (2020), yang melaporkan penurunan FK yang lebih besar untuk durasi hingga 120 jam pada tanah residual vulkanik, penurunan dalam studi ini tergolong moderat. Penurunan yang lebih kecil yang ditemukan di sini mencerminkan durasi maksimum yang lebih singkat (33 jam) dan permeabilitas yang lebih rendah dari tanah CH/CL; memperpanjang simulasi ke curah hujan multi-hari, sebagaimana dicatat dalam Kesimpulan, akan memungkinkan perbandingan yang lebih langsung.

4. Kesimpulan

Studi ini menguantifikasi pengaruh intensitas dan durasi curah hujan terhadap stabilitas lereng dan tekanan air pori pada tanah residual di tiga lokasi di Balikpapan Utara melalui simulasi numerik kopel SEEP/W dan SLOPE/W. Tingkat intensitas curah hujan dipilih berdasarkan catatan curah hujan harian 20 tahun (2003–2022) dari stasiun BMKG Sepinggan menggunakan kategori klasifikasi nasional BMKG, dengan 198 mm/hari mewakili kejadian maksimum yang pernah teramati secara historis.

Terdapat tiga temuan utama. Pertama, faktor keamanan awal berkisar antara 0,741 hingga 3,773; lokasi Km.15 dengan kohesi rendah menunjukkan kondisi kritis dan tidak stabil bahkan sebelum curah hujan pada sudut 35 dan 55 derajat. Kedua, durasi dan intensitas curah hujan menurunkan faktor keamanan, dengan durasi mendominasi respons di PJI dan Km.15 karena kondisi batas air tanah. Lereng 35 derajat di Km.15 beralih dari kritis menjadi tidak stabil di bawah curah hujan 33 jam (FK = 0,894, penurunan sebesar 0,278), dan lereng yang lebih curam menunjukkan penurunan yang lebih nyata. Ketiga, tekanan air pori meningkat dari negatif menjadi mendekati positif, dengan kedalaman infiltrasi maksimum 2,5 m (ITK) dan 2,9 m (PJI dan Km.15), dengan efek terbesar pada puncak dan kaki lereng.

Beberapa keterbatasan membingkai temuan ini. Input hidrolik didasarkan pada parameter yang dipublikasikan untuk kelas tekstur lempung, bukan pengujian permeabilitas dan retensi air spesifik lokasi. Durasi simulasi hanya mencapai 33 jam, geometri lereng diidealkan pada ketinggian 10 m seragam, serta efek vegetasi dan beban tambahan tidak disertakan. Di PJI dan Km.15, muka air tanah harus diasumsikan di dasar model karena tidak adanya data lubang bor. Penelitian di masa depan disarankan untuk memperpanjang simulasi ke curah hujan multi-hari, mengadopsi geometri berbasis DEM, mengukur kurva karakteristik air tanah dan permeabilitas jenuh spesifik lokasi, melengkapi

pengujian batas Atterberg untuk konfirmasi klasifikasi USCS, menginstrumentasi lereng Km.15 dengan piezometer untuk memungkinkan validasi lapangan, serta menggabungkan efek beban bangunan yang diteliti oleh Pontoh (2022).

Ucapan Terima Kasih

Studi ini didukung oleh Hibah Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Institut Teknologi Kalimantan (ITK), sesuai dengan Surat Keputusan Rektor No. 3603/IT10/PPM.04/2024 tentang Penerima Hibah Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat ITK Tahun 2024. Penulis mengucapkan terima kasih kepada BMKG Balikpapan yang telah menyediakan data curah hujan historis dan NASA POWER untuk dataset presipitasi per jam.

Daftar Pustaka

Abishev, R., Satyanaga, A., Pernebekova, G., Rahardjo, H., Zhai, Q., Shon, C. S., Moon, S. W., & Kim, J. (2024). Stability of soil slope in Almaty covered with steel slag under the effect of rainfall. *Scientific Reports*, *14*, Article 7711. https://doi.org/10.1038/s41598-024-58364-5

Badan Nasional Penanggulangan Bencana. (2022). *Kejadian bencana tanah longsor Indonesia*. https://bnpb.go.id/

Bowles, J. E. (1979). *Physical and geotechnical properties of soils*. McGraw-Hill.

Carsel, R. F., & Parrish, R. S. (1988). Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. Water Resources Research, 24(5), 755-769. https://doi.org/10.1029/WR024i005p00755

Darajaat, M. R., Iqbal, P., Zakaria, Z., & Muslim, D. (2020). Pengaruh intensitas dan durasi hujan terhadap kestabilan lereng tanah residual vulkanik di jalur Liwa-Kemuning, Lampung Barat. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 4(2), 181-190.

Dikau, R., Cavallin, A., & Jager, S. (1996). Databases and GIS for landslide research in Europe. *Geomorphology*, 15(3-4), 227-239. https://doi.org/10.1016/0169-555X(95)00072-G

Faizal, R. (2025). Analisis stabilitas lereng menggunakan matras dan cerucuk bambu pada Projek X. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, *9*(3), 262-272. https://doi.org/10.35334/be.v9i3.336

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

Hardiyatmo, H. C. (2006). *Penanganan tanah longsor dan erosi*. Gadjah Mada University Press.

Hasnawir, H. (2012). Intensitas curah hujan memicu tanah longsor dangkal di Sulawesi Selatan. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 1(1), 62-73.

Helda, N., Amal, N., Afrila, H., Saputri, D. S., Erisa, E., Maulana, M. R., & Irfan, M. (2025). Evaluasi data satelit GPM (Global Precipitation Measurement) pada DAS Kemuning di Banjarbaru, Kalimantan Selatan. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 9(1), 1-13. https://doi.org/10.35334/be.v9i1.55

Muntaha, M., Caraka, L., & Saputra, A. A. (2018). Karakteristik fisik dan mekanik tanah residual Balikpapan Utara akibat pengaruh variasi kadar air. *IPTEK Journal of Proceedings Series*, 2018(2). https://doi.org/10.12962/j23546026.y2018i1.3353

NASA POWER Project. (2023). *POWER data access viewer*. https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

Pemerintah Kota Balikpapan. (2022). *Rencana kerja pemerintah daerah Kota Balikpapan tahun 2022*.

Pontoh, A. N. (2021). The effect of rainfall on the slope stability with numerical simulation on Tawaeli-Toboli road, Central Sulawesi. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 622(1), 012017. https://doi.org/10.1088/1755-1315/622/1/012017

Pontoh, A. N. (2022). Pengaruh penambahan beban bangunan terhadap kestabilan lereng pada ruas jalan Sei-Wain Km.15 Kelurahan Karang Joang, Kecamatan Balikpapan Utara, Kota Balikpapan. *Jurnal Multidisiplin Madani*, *2*(6), 2717-2728. https://doi.org/10.55927/mudima.v2i6.503

Ramadhan, R. I., Hamdany, A. H., Adiguna, G. A., & Satyanaga, A. (2024). Analisis numerik stabilitas lereng terhadap curah hujan pada tanah tak jenuh. *Jurnal Teknik Sipil*, *31*(3), 275-282. https://doi.org/10.5614/jts.2024.31.3.5

Saroso, B. S. (2006). Geology and landslide in Indonesia. *Proceedings of National Seminar Slope Bandung 2002,* 1-13.

Tohari, A., Sarah, D., & Sampurno Eko, T. (2005). *Studi pengaruh curah hujan terhadap gerakan tanah di Sumedang, Jawa Barat* (Laporan Penelitian). Puslit Geoteknologi-LIPI.

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

Wesley, L. D. (2010). *Geotechnical engineering in residual soils*. John Wiley & Sons.

Zuidam, R. A. (1985). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smits Publishers.