

Pemodelan Berangka Cerun Tanah Tak Tepu Bukit Mewah Menggunakan Data Lapangan Lengkung Ciri Air-Tanah (Numerical Modeling of Unsaturated Soil Slope of Bukit Mewah Using Field Data of Soil-Water Characteristic Curves)

Faris Shazani Suhaizan^{a,b}, Aizat Mohd Taib^{a*} & Mohd Raihan Taha^a

^a*Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering & Built Environment,
 Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia*

^b*Megaconsult Sdn. Bhd. Pusat Bandar Wangsa Maju, 53300 Kuala Lumpur, Malaysia*

*Corresponding author: amohdtaib@ukm.edu.my

Received 22 December 2025, Received in revised form 20 February 2026
 Accepted 30 March 2026, Available online 30 August 2026

ABSTRACT

Rainfall-induced instability is a major concern for unsaturated residual soil slopes in tropical regions, where pore-water pressure and matric suction fluctuate rapidly under transient hydrological conditions. This study investigates the hydro-mechanical response of the Bukit Mewah slope in Selangor through a fully coupled flow–deformation analysis using PLAXIS 2D. Bukit Mewah slope represents a typical urban residual soil slope in a tropical environment and is located within a residential area, making it suitable for slope investigation. The numerical model incorporates site-specific soil-water characteristic curves (SWCCs) derived from field monitoring data, allowing a realistic representation of unsaturated hydraulic behaviour. The simulation reproduced the pore-water-pressure dynamics at the monitored depths of 0.5 m and 1.0 m. At 0.5 m depth, suction during dry periods decreased to approximately –7.5 kPa, while heavy rainfall caused rapid dissipation toward about 5 kPa. At 1.0 m depth, pore-water pressure reduced to around –12 kPa after minor rainfall and rose to a peak of approximately 9 kPa during the heaviest storm. These responses aligned closely with the field sensor data, confirming the model's ability to capture wetting-front progression, delayed deeper infiltration, and post-rainfall suction recovery. The Factor of Safety (FoS) remained relatively stable, slowly increasing from 1.35 to 1.55, but dropped sharply to about 0.9 during the first major rainfall event. A second reduction to approximately 1.07 from 1.40 occurred during the subsequent heavy storm, followed by gradual recovery as suction redeveloped. Overall, the results demonstrate that PLAXIS 2D effectively reproduces the coupled hydraulic–mechanical behaviour of an unsaturated tropical slope, providing valuable insights into rainfall-induced pore-pressure changes and stability fluctuations.

Keywords: Pore-water pressure; PLAXIS; unsaturated; factor of safety

ABSTRAK

Ketidakstabilan cerun akibat hujan merupakan isu utama bagi cerun tanah baki tak tepu di kawasan tropika, di mana tekanan liang air dan sedutan matrik berubah dengan cepat di bawah keadaan hidrologi peralihan. Kajian ini meneliti tindak balas hidro-mekanikal cerun Bukit Mewah di Selangor melalui analisis aliran–deformasi berangka terangkai sepenuhnya menggunakan PLAXIS 2D. Cerun Bukit Mewah mewakili cerun tanah baki bandar yang tipikal dalam persekitaran tropika dan terletak di kawasan perumahan, menjadikannya sesuai untuk kajian cerun. Model berangka ini menggabungkan lengkung ciri air-tanah (SWCC) khusus tapak yang diperolehi daripada data pemantauan lapangan, membolehkan gambaran tingkah laku hidraulik tak tepu yang lebih realistik. Simulasi berjaya menggambarkan dinamik tekanan air liang pada kedalaman 0.5 m dan 1.0 m. Pada kedalaman 0.5 m, tekanan air liang semasa tempoh kering

menurun kepada kira-kira -7.5 kPa, manakala hujan lebat menyebabkan peleraian sedutan dengan cepat sehingga menghampiri 5 kPa. Pada kedalaman 1.0 m, tekanan air liang menurun kepada sekitar -12 kPa selepas hujan kecil dan meningkat kepada nilai puncak kira-kira 9 kPa semasa kejadian hujan paling lebat. Tindak balas ini menunjukkan hubungkait yang rapat dengan data sensor lapangan, mengesahkan keupayaan model untuk merakam pergerakan zon pembasahan, resapan mendalam yang tertangguh, dan pemulihan sedutan selepas hujan. Faktor keselamatan (FoS) kekal agak stabil, meningkat perlahan daripada 1.35 kepada 1.55 , tetapi merosot dengan ketara kepada sekitar 0.9 semasa kejadian hujan pertama yang besar. Pengurangan kedua kepada kira-kira 1.07 daripada 1.40 berlaku semasa ribut lebat berikutnya, diikuti pemulihan secara beransur-ansur apabila sedutan meningkat semula. Secara keseluruhan, keputusan menunjukkan bahawa PLAXIS 2D berkesan dalam menggambarkan tingkah laku hidro-mekanikal Bukit Mewah yang tidak tepu dalam persekitaran tropika, sekali gus memberikan pemahaman penting terhadap perubahan tekanan air liang akibat hujan dan variasi kestabilan cerun.

Kata kunci: Tekanan air liang, PLAXIS, tak tepu, faktor keselamatan

PENGENALAN

Ketidakstabilan cerun akibat hujan merupakan salah satu mekanisme kegagalan yang paling lazim berlaku pada cerun tanah baki tak tepu di kawasan tropika. Cerun ini kekal dalam keadaan tak tepu sepanjang sebahagian besar tahun, dan kestabilannya dikawal oleh keseimbangan antara sedutan matrik, tingkah laku peresapan, serta pengagihan semula tekanan air liang di bawah keadaan hidrologi tak tunak. Banyak kajian menunjukkan bahawa ciri hujan seperti intensiti, tempoh dan kelembapan terdahulu memainkan peranan penting dalam mengawal pergerakan muka pembasahan dan kehilangan sedutan, yang akhirnya mempengaruhi kekuatan ricih dan kadar ubah bentuk cerun tak tepu (Ng dan Shi 1998; Rahardjo et al. 2007).

Dalam amalan kejuruteraan, pemodelan berangka telah menjadi alat penting untuk menganalisis tindak balas hidraulik dan mekanikal cerun yang terdedah kepada peresapan hujan. Kaedah elemen terhingga membolehkan simulasi aliran air tak tunak dalam media tepu berubah dan interaksinya dengan parameter kekuatan tanah, sekali gus memberikan pemahaman yang sukar diperoleh melalui analisis teori atau pemerhatian lapangan sahaja. PLAXIS 2D digunakan secara meluas dalam konteks ini kerana keupayaannya menjalankan pemodelan berpasangan aliran-deformasi serta menggabungkan model tanah tak tepu yang ditadbir oleh lengkung ciri air-tanah (SWCC) seperti dilaporkan oleh Hamdhan dan Schweiger (2013), Md Rahim dan Toll (2014), dan Yang et al. (2019).

Namun, ketepatan simulasi berangka yang dipacu oleh hujan sangat bergantung pada cara syarat sempadan hidraulik ditakrifkan. Parameter seperti nilai maksimum dan minimum sedutan, kadar evapotranspirasi, dan had peresapan mengawal imbalan air berhampiran permukaan dan mempengaruhi permulaan peresapan, pemulihan sedutan, serta pembentukan zon air tertahan. Syarat ini perlu dikalibrasi dengan teliti supaya mencerminkan tingkah laku sebenar lapangan, terutamanya di kawasan

tropika yang mengalami pengeringan diurnal yang ketara, kesan vegetasi, dan kitaran pembasahan-pengeringan yang cepat.

Kajian ini membentangkan penyiasatan berangka terhadap tingkah laku hidraulik dan mekanikal cerun tanah baki menggunakan model aliran-deformasi berpasangan sepenuhnya dalam PLAXIS 2D. Parameter sempadan hidraulik terkalibrasi diterapkan untuk mensimulasikan peristiwa hujan yang direkodkan di cerun Bukit Mewah, dan analisis parametrik dijalankan bagi menilai pengaruhnya terhadap corak peresapan dan evolusi tekanan air liang. Kajian ini meneliti tindak balas sedutan, pembentukan muka pembasahan, perkembangan paras air tertahan, dan variasi kestabilan cerun mengikut masa di bawah keadaan hujan semula jadi.

Secara keseluruhannya, kajian ini memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai kepentingan syarat sempadan hidraulik dalam mengawal tingkah laku infiltrasi cerun tak tepu di kawasan tropika. Hasil kajian turut menawarkan panduan praktikal untuk penetapan syarat sempadan dalam model berangka dan menegaskan keperluan proses pengkalibrasian untuk menilai prestasi cerun semasa hujan.

KAJIAN LITERATUR

Tanah tak tepu mempunyai tingkah laku hidro-mekanikal yang kompleks, dipengaruhi oleh sedutan matrik, darjah ketepuan dan ciri pengekal air-tanah. Kajian asas oleh Fredlund dan Rahardjo (1993) serta Vanapalli et al. (1996) menunjukkan bahawa sedutan matrik memberikan sumbangan besar terhadap kekuatan ricih, terutamanya dalam tanah baki tropika yang lazimnya mempunyai paras air-tanah yang dalam. Oleh kerana sedutan sentiasa berubah mengikut keadaan iklim, turun naik ini memainkan peranan penting dalam mengawal kestabilan cerun cetek.

Sedutan berhampiran permukaan sangat sensitif terhadap hujan, evapotranspirasi dan kesan atmosfera. Ng

dan Shi (1998) menunjukkan bahawa kelembapan terdahulu mempunyai pengaruh yang kuat terhadap pergerakan muka pembasahan dan perkembangan tekanan air liang seterusnya. Dapatan mereka menunjukkan bahawa cerun dengan sedutan awal yang tinggi bertindak balas dengan cepat walaupun terhadap jumlah hujan yang kecil. Gallage dan Uchimura (2010) turut melaporkan bahawa sedutan maksimum biasanya terbentuk dalam 1–2 m bahagian atas tanah akibat pengeringan melalui penyejatan dan penyerapan akar. Penemuan ini menekankan kepentingan penetapan syarat sempadan hidrolik yang tepat dalam analisis ketidakstabilan cerun akibat hujan.

Pemahaman tentang aliran air-tanah tepu dan tak tepu dalam mekanik tanah berakar umbi pada hukum Darcy (1856). Darcy membuktikan bahawa kadar aliran melalui medium berliang adalah berkadar dengan gradien hidrolik dan kebolehtelapan tanah. Persamaan aliran keadaan tunak ini dinyatakan seperti berikut:

$$q = -K\nabla h \quad (1)$$

Dalam persamaan ini, q mewakili vektor fluks isipadu bendalir, K ialah tensor kekonduksian hidrolik, dan h merujuk kepada jumlah kepala hidrolik. Rumusan ini menunjukkan bahawa kadar aliran melalui medium berliang adalah berkadar terus dengan kecerunan hidrolik serta keupayaan bahan tersebut untuk mengalirkan air. Hukum Darcy merupakan asas teori resapan dan kekal sebagai dasar bagi analisis aliran air-tanah, infiltrasi dan hidrolik telaga.

Untuk melanjutkan hukum Darcy ke zon tak tepu, Richards (1931) menggabungkan formulasi Darcy dengan persamaan kesinambungan, menghasilkan Persamaan Richards yang mentadbir aliran tak tepu tak tunak:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot [K(h)\nabla(h+z)] \quad (2)$$

Dalam persamaan ini, θ merujuk kepada kandungan air isipadu manakala t mewakili masa. Kekonduksian hidrolik tak tepu, $K(h)$, bergantung kepada kepala tekanan h , z menunjukkan kepala gravity, dan Δ mewakili pengendali kecerunan ruang. Persamaan Richards, yang berasaskan hukum Darcy, menerangkan aliran air dalam tanah tak tepu yang dipengaruhi oleh gabungan kecerunan tekanan dan daya graviti. Persamaan ini menerangkan bagaimana infiltrasi, pengagihan semula dan saliran berlaku dalam tanah tak tepu dan digunakan secara meluas dalam pemodelan geoteknik, pertanian dan alam sekitar.

Elemen pusat dalam penyelesaian Persamaan Richards ialah Lengkung Ciri Air-Tanah (SWCC), yang mentakrifkan

hubungan antara sedutan matrik dan kandungan air. SWCC boleh digunakan untuk menentukan pelbagai sifat tanah, termasuk perubahan isipadu, kekonduksian hidrolik, dan parameter kekuatan ricih (Chowdepalli & Watanabe, 2023). Kaedah makmal seperti plat tekanan, penterjemahan paksi, tensiometer kapasiti tinggi serta pemantauan lapangan menggunakan sensor dielektrik digunakan untuk menentukan SWCC. Lengkung berdasarkan data lapangan lazimnya lebih mencerminkan fenomena histeresis semula jadi, struktur tanah dan variabiliti bermusim seperti yang dilaporkan oleh Rahardjo et al. (2004) dan Leong & Rahardjo (1997).

Fungsi kekonduksian hidrolik kebiasaannya disimpulkan daripada SWCC menggunakan model seperti Fredlund et al. (1994) atau van Genuchten (1980). Antara model ini, formulasi van Genuchten paling meluas digunakan dalam pemodelan berangka kerana sifat berterusannya dan keserasiannya dengan penyelesaian elemen terhingga. Model ini menyatakan sifat pengekalan air sebagai:

$$\theta(\psi) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha\psi)^n]^m} \quad (3)$$

Dalam persamaan ini, θ mewakili kandungan air isipadu pada sedutan matrik ψ , manakala θ_r dan θ_s masing-masing merujuk kepada kandungan air baki dan kandungan air tepu. Parameter α , n dan m ialah pemalar pepadanan lengkung yang mengawal bentuk fungsi pengekalan air. Parameter α berkaitan dengan songsang nilai kemasukan udara dan menentukan permulaan penyahtepuan, n mempengaruhi kecuraman lengkung yang mencerminkan taburan saiz liang, manakala m melaras kelengkungan lengkung untuk meningkatkan ketepatan pepadanan data eksperimen. Disebabkan fleksibilitinya, model van Genuchten dapat mewakili pelbagai jenis tanah daripada pasir kasar hingga tanah halus baki tropika, dan menjadi pilihan utama dalam simulasi hidrologi dan geoteknik termasuk dalam PLAXIS 2D.

Dalam aplikasi pemodelan berangka, formulasi hidrolik van Genuchten lazimnya dilaksanakan dalam platform elemen terhingga seperti PLAXIS 2D, yang menyediakan rangka kerja kukuh untuk menganalisis aliran tak tepu dan ubah bentuk tanah secara serentak. PLAXIS 2D menggunakan skim aliran-deformasi berpasangan sepenuhnya, di mana perubahan tekanan air liang tak tunak yang dikira melalui Persamaan Richards mempengaruhi tegasan efektif dan ubah bentuk, dan sebaliknya. Gandingan ini membolehkan model menangkap proses berkaitan masa seperti pergerakan muka pembasahan, penyebaran sedutan dan pengurangan kekakuan secara progresif semasa

infiltrasi. Disebabkan hubungan rapat antara tindak balas hidraulik dan mekanikal tanah tak tepu, formulasi berpasangan PLAXIS 2D menjadi pendekatan utama dalam analisis cerun terjejas hujan, memberikan gambaran lebih realistik berbanding pendekatan tidak berpasangan atau keadaan mantap seperti dalam kajian Villarraga et al. (2014), Taib et al. (2018), Toll et al. (2019) dan Pradhan et al. (2022).

Kekuatan ricih tanah tak tepu ditadbir oleh tegasan normal bersih dan sedutan matrik. Mekanik tanah tepu klasik mempertimbangkan tegasan efektif sebagai $\sigma' = \sigma - u_w$, namun pendekatan ini tidak mampu mewakili sepenuhnya tingkah laku tanah tak tepu kerana kewujudan dua tekanan liang (udara dan air). Beberapa penyelidik seperti Bishop (1959), Fredlund et al. (1978) dan Vanapalli et al. (1996) telah memperluas konsep tegasan efektif untuk memasukkan kesan sedutan. Salah satu formulasi lazim menyatakan kekuatan ricih sebagai:

$$= c' + (\sigma - u_a) \tan \phi' + \chi(u_a - u_w) \tan \phi' \quad (4)$$

di mana c' ialah lekatan efektif, $(\sigma - u_a)$ ialah tegasan normal bersih, $(u_a - u_w)$ ialah sedutan matrik, dan χ ialah faktor pemberat antara 0 hingga 1 yang mencerminkan sumbangan sedutan kepada kekuatan. Formulasi ini mengiktiraf sumbangan sedutan kepada kekuatan ricih, terutamanya berhampiran permukaan tanah yang mengalami pengeringan kuat. Kajian oleh Fredlund dan Rahardjo (1993) serta Vanapalli dan Fredlund (2000) menunjukkan bahawa sedutan memainkan peranan penting dalam menstabilkan cerun tanah baki semasa musim kering.

Dalam analisis kestabilan, rangka kerja kekuatan ricih ini disepadukan ke dalam pendekatan pemodelan berangka untuk menilai Faktor Keselamatan (FoS). PLAXIS 2D menggunakan kaedah Pengurangan Kekuatan Ricih (SSR) untuk menentukan FoS dengan mengurangkan parameter kekuatan ricih secara beransur-ansur sehingga kegagalan berlaku. Parameter terkurang ditakrifkan sebagai:

$$C_{red} = \frac{c}{SRF}, \quad \tan \phi_{red} = \frac{\tan \phi}{SRF} \quad (5)$$

$$FoS = SRF_{crit}$$

di mana SRF ialah faktor pengurangan kekuatan. SRF ditingkatkan secara berperingkat sehingga model tidak lagi

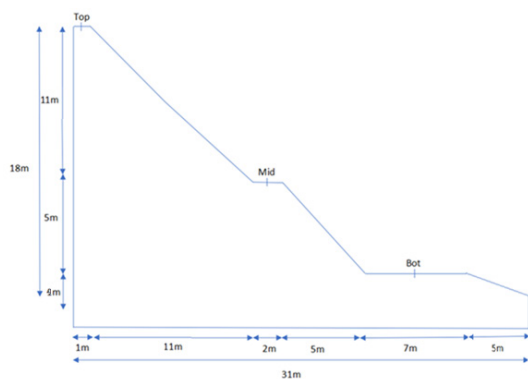
mencapai keseimbangan dan nilai kritikal SRF diambil sebagai FoS. Kaedah ini menangkap kegagalan progresif, taburan tekanan air liang kompleks dan corak ubah bentuk dengan lebih berkesan berbanding kaedah keseimbangan had. Kajian oleh Griffiths dan Lane (1999), Zhang et al. (2011) dan Conte et al. (2018) menunjukkan bahawa SSR memberikan gambaran lebih realistik terhadap mekanisme kegagalan cerun, terutamanya bagi cerun tak tepu yang mengalami infiltrasi tak tunak.

Dengan menggabungkan teori kekuatan ricih tanah tak tepu bersama analisis kestabilan berasaskan SSR, pemodelan berangka membolehkan penilaian langsung terhadap kesan perubahan sedutan, kadar infiltrasi dan tekanan air liang terhadap prestasi cerun mengikut masa. Pendekatan bersepadu ini kini meluas digunakan dalam amalan geoteknik lanjutan, khususnya dalam analisis ketidakstabilan cerun akibat hujan di iklim tropika.

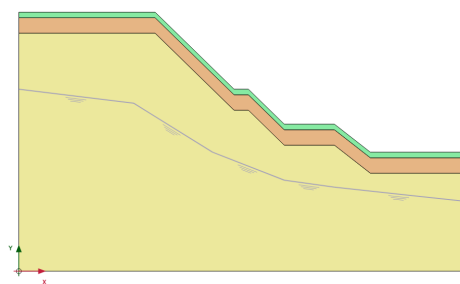
SIFAT DAN PARAMETER MODEL

Tapak pemantauan Bukit Mewah mewakili cerun tanah baki bandar yang tipikal dalam persekitaran tropika yang terletak pada koordinat 2°59'11" Utara dan 101°47'57" Timur. Cerun tersebut terletak di kawasan perumahan dengan kediaman di bahagian puncak serta kaki cerun. Puncak cerun dilitupi tumbuhan rendah yang membantu meningkatkan kestabilan permukaan tetapi pada masa yang sama meningkatkan pengekalan kelembapan di zon cetek. Cerun ini terletak berhampiran jalan perumahan, yang meningkatkan risiko kerosakan sekiranya berlaku pergerakan cerun.

Model berangka yang digunakan dalam kajian ini ditunjukkan dalam Rajah 1 dan Rajah 2. Dalam pemodelan PLAXIS 2D, penjanaan jejaring elemen terhingga yang sesuai penting bagi menggambarkan tingkah laku hidraulik dan mekanikal cerun tak tepu dengan tepat. Satu pemeringkatan kekasaran jejaring digunakan, di mana lapisan tanah bahagian atas diberikan faktor kekasaran 0.3536 untuk menangkap perubahan pantas tekanan air liang dan ubah bentuk. Lapisan pertengahan menggunakan faktor 0.5, manakala lapisan lebih dalam menggunakan nilai lalai PLAXIS iaitu 0.7071. Jejaring akhir terdiri daripada 2,423 elemen dan 19,747 nod. Pendekatan ini memberikan keseimbangan antara kecekapan pengiraan dan ketepatan numerik serta mengurangkan risiko isu penumpuan yang sering berlaku apabila jejaring terlalu halus digunakan secara seragam.



RAJAH 1. Dimensi cerun Bukit Mewah



RAJAH 2. Geometri cerun Bukit Mewah dalam PLAXIS 2D

Kesemua lapisan tanah dianggap homogen dan isotropik bagi memudahkan proses pemodelan serta membolehkan tafsiran yang lebih jelas terhadap tindak

balas hidrolik dan mekanikal cerun. Pendekatan ini membantu memastikan bahawa perubahan tekanan air liang, aliran tak tepu dan ubah bentuk tanah dapat dinilai tanpa dipengaruhi oleh variasi setempat yang sukar didokumenkan. Walaupun tanah tropika semula jadi lazimnya bersifat heterogen dari segi struktur, tekstur dan sifat hidrolik, andaian homogen-isotropik ini merupakan amalan biasa dalam kajian berangka kerana ia mampu mengawal kerumitan pengiraan, meningkatkan kestabilan model, dan membolehkan penyelidik menumpukan perhatian terhadap pengaruh parameter input utama seperti kekonduksian hidrolik, sifat ricih dan ciri SWCC.

Dengan itu, kesan faktor lapangan yang dominan dapat ditonjolkan tanpa gangguan daripada ketidakseragaman tanah yang sukar diukur secara terperinci. Instrumentasi lapangan merangkumi pasangan sensor TERSO 11 (kandungan air volumetrik) dan TERSO 21 (potensi matrik) yang dipasang di bahagian puncak, pertengahan dan kaki cerun pada kedalaman 0.5 m dan 1.0 m. Data ini digunakan untuk mendapatkan SWCC berasaskan lapangan, yang seterusnya menentukan syarat sempadan hidrolik. Tingkah laku hidrolik tak tepu dimodelkan menggunakan model van Genuchten–Mualem, dengan parameter dipadankan berdasarkan data pemantauan jangka panjang oleh Suhaizan et al. (2023) untuk memastikan keseragaman antara simulasi dan keadaan sebenar lapangan. Parameter hidrolik dan mekanikal bagi setiap lapisan tanah diringkaskan dalam Jadual 1.

Jadual 1. Ringkasan parameter mekanikal yang terkalibrasi bagi setiap lapisan tanah cerun Bukit Mewah

Parameter Mekanikal							
Lapisan	g_{unsat} (kN/m ³)	g_{sat} (kN/m ³)	E (kPa)	V	c' (kPa)	Φ (°)	Ψ (kPa)
1	12	16	25000	0.3	5	45	0
2	13	17	30000	0.3	5	45	0
3	16	19	35000	0.3	5	45	0
Parameter Hidraulik							
Lapisan	K_x (m/day)	K_y (m/day)	A (1/a) (kPa ⁻¹)	N	M	S_{res}	S_{sat}
1	0.12	0.1	1.49	10.77	0.9072	0.8208	1
2	0.1	0.08	0.883	8.545	1.594	0.647	1
3	0.01	5×10^{-3}	0.883	8.545	1.594	0.647	1

Tingkah laku mekanikal bahan cerun dimodelkan menggunakan model konstitutif Mohr–Coulomb. Setiap lapisan dianalisis menggunakan keadaan saliran ‘Undrained A’, yang membenarkan tekanan air liang terbentuk akibat regangan volumetrik, manakala tegasan dikira menggunakan parameter tegasan efektif. Pendekatan ini sesuai untuk tanah baki Malaysia yang lazimnya mempunyai kebolehtelapan rendah dan menunjukkan tingkah laku saliran bergantung masa.

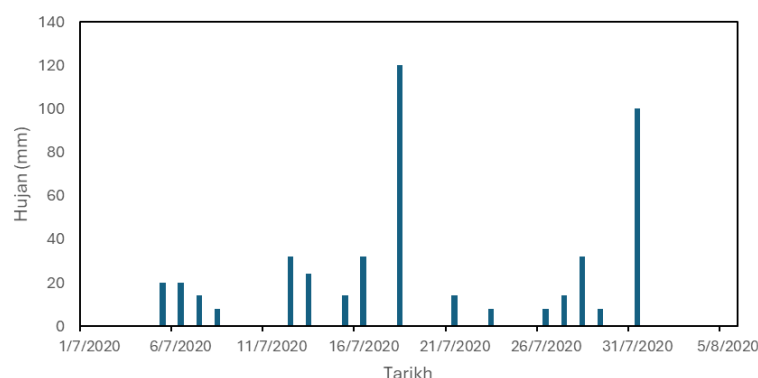
Syarat sempadan geometri model ditakrifkan untuk memastikan kestabilan mekanikal dan gambaran realistik persekitaran cerun. Bahagian dasar model dikekang sepenuhnya dalam arah mendatar dan menegak untuk mensimulasikan asas yang tegar dan tidak bergerak. Sempadan sisi dikekang secara menegak tetapi dibenarkan bergerak secara bebas secara menegak, satu konfigurasi yang menghalang ubah bentuk mendatar tidak realistik serta mengekalkan kestabilan numerik. Permukaan tanah

dimodelkan sebagai sempadan infiltrasi, membenarkan hujan dan evapotranspirasi bertindak secara langsung ke atas cerun. Syarat ini membolehkan pertukaran air atmosfera–tanah berlaku secara tak tunak dan penting untuk pemodelan aliran tak tepu.

Bagi syarat hidraulik, garisan freatik ditetapkan kira-kira 7.8 m di bawah permukaan cerun pertengahan berdasarkan pemerhatian lapangan. Objektif utama simulasi ialah menilai perubahan tekanan air liang, pemulihan sedutan dan kestabilan cerun di bawah rekod

hujan dari 1 Julai hingga 5 Ogos 2020 selama tempoh analisis 40 hari. Input hujan ditunjukkan dalam Rajah 3.

Nilai syarat sempadan hidraulik termasuk sedutan maksimum 0.2 m, sedutan minimum –2 m dan kadar evapotranspirasi 4 mm/hari. Nilai evapotranspirasi –0.004 m/hari adalah selaras dengan cadangan Lambert dan Chitrakar (1989) untuk iklim tropika. Nilai-nilai ini dipilih berdasarkan keupayaannya menghasilkan corak infiltrasi dan turun naik sedutan yang realistik seperti diperhatikan dalam data lapangan.



RAJAH 3. Rekod hujan semasa tempoh pemantauan lapangan

Kajian terdahulu telah mengenakan had tertentu terhadap tekanan air liang dan sedutan bagi memastikan realisme fizikal dalam pemodelan berangka. Taib et al. (2018) menghadkan kepala tekanan air liang antara –0.5 m dan 0.1 m bagi mewakili proses penyejatan serta mengelakkan ketepuan permukaan, dengan nilai yang setara dengan had sedutan terkalibrasi yang digunakan dalam kajian ini. Pradhan et al. (2022) turut menghadkan kepala maksimum kepada 0.1 m bagi mengelakkan penggenangan permukaan yang tidak realistik serta menetapkan had minimum sedutan pada –30 m, sambil menggunakan kadar evapotranspirasi sebanyak 4 mm/hari, yang selari dengan nilai ET optimum yang dikenal pasti dalam kajian ini.

Sebaliknya, Sadatieh et al. (2025) menggunakan julat sedutan yang lebih luas, iaitu antara –0.5 m hingga –100 m, bagi menangkap kesan pengeringan yang dipacu oleh vegetasi di bawah unjuran iklim masa hadapan. Perbezaan ini menunjukkan bahawa pemilihan parameter sempadan hidraulik adalah bergantung kepada objektif kajian dan perlu disesuaikan dengan proses hidro-mekanikal dominan. Oleh itu, nilai ψ_{maks} , ψ_{min} , dan ET yang ditentukan dalam kajian ini memberikan perwakilan yang lebih realistik terhadap proses penyusutan, pelepasan sedutan, dan pemulihan sedutan di cerun Bukit Mewah berbanding penggunaan tetapan sempadan yang bersifat umum.

Keadaan awal ditetapkan menggunakan kaedah

pemberatan graviti, yang disyorkan untuk permukaan condong kerana ia menambahkan berat tanah secara beransur sehingga tercapai keseimbangan tegasan (Brinkgreve et al., 2018). Analisis keadaan mantap dilakukan terlebih dahulu untuk menghasilkan profil tekanan air liang permulaan yang sepadan dengan paras air-tanah lapangan. Semasa fasa penyepaduan ini, kadar evapotranspirasi 4 mm/hari digunakan selama 30 hari bagi menstabilkan keadaan hidraulik sebelum simulasi hujan bermula.

Simulasi dijalankan menggunakan modul aliran–deformasi berpasangan sepenuhnya dalam PLAXIS 2D untuk menangkap interaksi antara perubahan tekanan air liang tak tunak dan tindak balas mekanikal cerun dalam keadaan tak tepu. Sempadan infiltrasi bergantung masa diterapkan sepanjang permukaan tanah untuk mencerminkan proses hidrologi lapangan. Dalam rangka kerja ini, Persamaan Richards mengawal aliran tak tepu manakala model Mohr–Coulomb menggambarkan tingkah laku tegasan–regangan tanah. Kedua-dua persamaan ini diselesaikan secara serentak, membolehkan infiltrasi, penyebaran sedutan dan ubah bentuk berevolusi secara konsisten sepanjang simulasi.

Selepas setiap fasa aliran–deformasi tak tunak selesai, kestabilan cerun dinilai menggunakan kaedah SSR. Parameter kekuatan ricih dikurangkan melalui faktor pengurangan kekuatan (SRF) sehingga model gagal

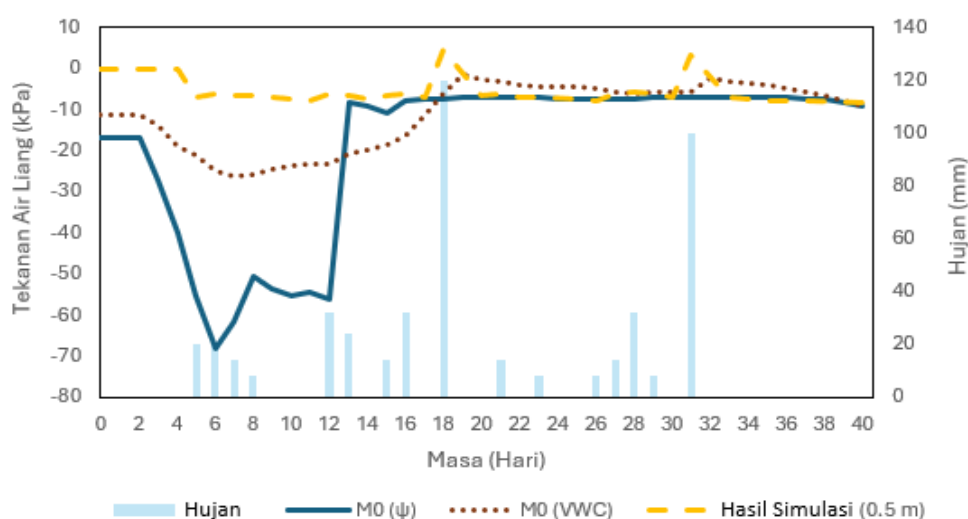
mencapai keseimbangan; nilai SRF ini dianggap sebagai FoS bagi keadaan hidraulik tersebut. Penggabungan analisis SSR selepas setiap langkah memastikan penilaian kestabilan mengambil kira perubahan tekanan air liang yang berlaku semasa infiltrasi.

Keseluruhan analisis meliputi tempoh 40 hari dan dibahagikan kepada 30 fasa pengiraan. Pembahagian masa ini memberikan keseimbangan antara kecekapan pengiraan dan keperluan untuk menangkap variasi infiltrasi yang cepat, pergerakan muka pembasahan serta kehilangan sedutan. Selang masa yang lebih pendek digunakan semasa hujan lebat bagi memastikan ketepatan numerik terpelihara.

KEPUTUSAN

TEKANAN AIR LIANG

Tindak balas tekanan air liang (PWP) tak tunak bagi cerun Bukit Mewah dinilai di bawah syarat sempadan hidraulik menggunakan set data hujan dari 1 Julai hingga 5 Ogos 2020. Simulasi menggunakan nilai $\psi_{\max} = 0.2$ m, $\psi_{\min} = -2$ m, dan kadar evapotranspirasi 4 mm/hari. Keputusan diekstrak pada titik pemantauan pertengahan cerun, iaitu lokasi sensor lapangan pada kedalaman 0.5 m dan 1.0 m. Rajah 4 dan Rajah 5 membentangkan tindak balas PWP terhasil bersama bacaan sedutan matrik ($M0(\psi)$, $M1(\psi)$) dan kandungan air volumetrik ($M0(VWC)$, $M1(VWC)$) yang dilaporkan oleh Suhaizan et al. (2023).



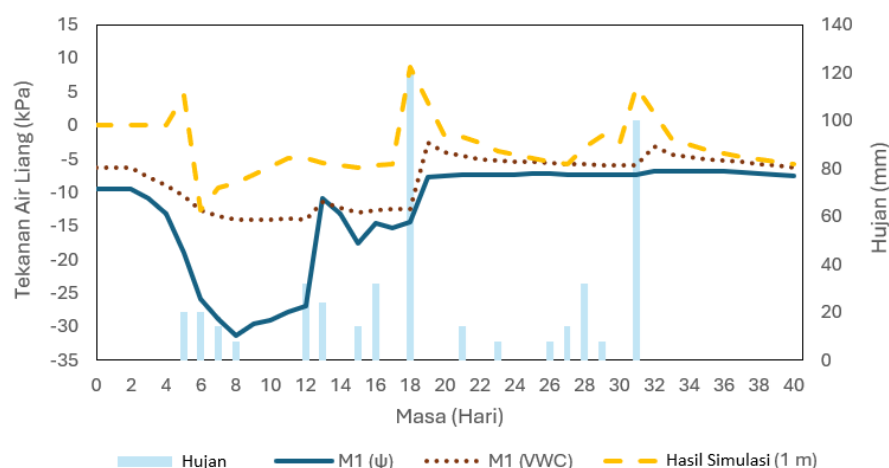
RAJAH 4. Tindak balas tekanan air liang pada kedalaman 0.5 m bagi simulasi hujan dan perbandingan dengan bacaan lapangan ($M0(\psi)$ dan $M0(VWC)$)

Pada kedalaman 0.5 m, simulasi berjaya menghasilkan pola sedutan seperti yang direkodkan di lapangan. Pada awal simulasi, tekanan air liang hampir 0 kPa, menandakan pengimbangan cepat dalam lapisan cetek. Hujan ringan pertama menyebabkan penurunan tekanan air liang sehingga kira-kira -7.5 kPa, menunjukkan pembasahan pantas zon permukaan. Hujan lebat pada Hari 18 menghasilkan lonjakan tekanan ke 5 kPa akibat penyebaran sedutan yang cepat. Pola yang sama berlaku semasa ribut kedua, sebelum sedutan pulih secara beransur-ansur melalui proses evapotranspirasi.

Trend simulasi menunjukkan kesesuaian yang baik dengan bacaan $M0(\psi)$ dan $M0(VWC)$, yang kedua-duanya turut menunjukkan kejatuhan segera selepas hujan ringan pertama. Walau bagaimanapun, amplitud lapangan lebih besar, dengan $M0(\psi)$ menurun sehingga -68 kPa dan

$M0(VWC)$ sehingga -26 kPa. Peningkatan tekanan pada Hari 8 dan 12 turut muncul pada kedua-dua set data walaupun puncak sedutan lebih ketara bagi sensor matrik berbanding sensor VWC. Bacaan $M0(\psi)$ mendatar kerana sensor mencapai had bacaannya, manakala $M0(VWC)$ masih menunjukkan sedikit peningkatan semasa dua ribut utama meskipun lebih kecil daripada simulasi.

Perbezaan ini mencerminkan variasi kepekaan sensor dan sifat lapisan cetek yang mempunyai kapasiti simpanan air rendah serta sangat dipengaruhi oleh aliran masuk dan keluar atmosfera. Tindak balas simulasi yang lebih sederhana berpunca daripada kapasiti simpanan rendah lapisan atas, yang mengalami kitaran pembasahan–pengeringan yang cepat.



RAJAH 5. Tindak balas tekanan air liang pada kedalaman 1 m bagi simulasi hujan dan perbandingan dengan bacaan lapangan (M1 (ψ) dan M1 (VWC))

Pada kedalaman 1.0 m, perubahan tekanan lebih ketara. Simulasi menunjukkan lonjakan kecil pada awalnya sebelum sedutan menurun sehingga kira-kira -12 kPa dua hingga tiga hari selepas tindak balas lapisan cetek. Kenaikan kecil turut berlaku selepas hujan ringan kedua. Semasa ribut besar pada Hari 18, tekanan air liang meningkat sehingga kira-kira 9 kPa sebelum pulih secara perlahan. Ribut seterusnya menghasilkan peningkatan kedua hingga ke 6 kPa sebelum sedutan pulih secara perlahan.

Simulasi ini sepadan dengan masa dan pola umum bacaan lapangan. M1(ψ) menurun sehingga sekitar -30 kPa semasa hujan pertama, manakala M1(VWC) menurun perlahan dari -6 ke -13 kPa. Peristiwa hujan kecil berikutnya menunjukkan peningkatan kecil pada kedua-dua bacaan. Semasa ribut besar, M1(ψ) meningkat sehingga -7 kPa dan kemudian mendatar apabila mencapai had sensor, manakala M1(VWC) hanya menunjukkan lonjakan kecil sekitar -2 kPa.

Lapisan 1.0 m menunjukkan variasi tekanan lebih besar kerana kapasiti simpanan airnya lebih tinggi. Tindak balas yang tertangguh tetapi lebih besar ini konsisten dengan kemaraan muka pembasahan dalam tanah tak tepu, di mana lapisan lebih dalam menjadi zon utama ketepuan sementara. Satu anomali kecil diperhatikan, iaitu lonjakan tekanan ringkas sebelum penurunan sedutan. Fenomena ini berpunca daripada pelarasan masa langkah pengiraan dalam PLAXIS apabila kekonduksian hidraulik berubah secara mendadak dan bukan disebabkan fenomena fizikal sebenar.

Walaupun simulasi ini berjaya menggambarkan corak tingkah laku umum yang diperhatikan di lapangan, keadaan sebenar tapak tidak dapat direplikasi sepenuhnya. Salah satu kekangan utama ialah kewujudan vegetasi pada cerun.

Pemodelan tanah tanpa litupan tumbuhan sahaja sudah kompleks, manakala penggabungan kesan sistem akar dan tumbuhan menjadi lebih mencabar kerana geometri akar yang berskala kecil tetapi secara kolektif memberikan pengaruh yang signifikan terhadap interaksi tanah–air. Keadaan ini jelas diperhatikan pada peringkat awal simulasi apabila tiada hujan dikenakan, di mana tekanan air liang yang disimulasikan hanya menunjukkan pengurangan yang sederhana, sedangkan data lapangan merekodkan peningkatan sedutan yang jauh lebih ketara. Kajian oleh Carminati dan Vetterlein (2012) serta Scholl et al. (2014) menunjukkan bahawa proses transpirasi tumbuhan memberi kesan besar terhadap taburan air dalam tanah secara temporal dan spatial. Perubahan ini mempengaruhi nilai sedutan dan kebolehtelapan tanah, menghasilkan corak hidrologi yang sukar digambarkan secara tepat oleh model berangka tanpa pencirian terperinci berkaitan seni bina akar dan ketumpatan vegetasi di tapak kajian.

Transpirasi tumbuhan diketahui dapat menjana sedutan matrik yang memainkan peranan penting dalam meningkatkan kestabilan cerun dan tebing sungai yang dilitupi vegetasi, seperti yang ditunjukkan oleh Ng et al. (2016). Kajian terkini turut menunjukkan bahawa sedutan akibat transpirasi boleh berterusan semasa dan selepas kejadian hujan (Hemmati et al., 2012; Rahardjo et al., 2014), sekali gus membantu tanah mengekalkan kekuatan ricih yang lebih tinggi walaupun dalam keadaan basah. Gabungan kesan pengukuhan akar, pemulihan sedutan yang lebih pantas, dan pengurangan laluan resapan menunjukkan bahawa vegetasi mampu meningkatkan kestabilan cerun cetek secara signifikan. Namun begitu, proses ini juga meningkatkan kerumitan pemodelan kerana ia memperkenalkan tingkah laku hidrologi yang sangat

berubah-ubah, yang sukar ditangani dengan tepat tanpa penggandingan sepenuhnya dinamik serapan air oleh akar ke dalam rangka kerja berangka.

Perwakilan sempadan hujan merupakan satu lagi kekangan utama dalam pemodelan berangka. Dalam PLAXIS, hujan dikenakan sebagai sempadan fluks pada permukaan tanah, dan kadar resapan tak mantap sepenuhnya dikawal oleh kekonduksian hidraulik tanah, tanpa simulasi aliran permukaan atau larian air hujan (Amarasinghe et al., 2024; Bentley Systems, 2025). Apabila hujan melebihi kapasiti resapan tanah, air lebihan akan disimpan dalam elemen berhampiran permukaan sebagai peningkatan tekanan air liang, dan bukannya dialirkan menuruni cerun. Oleh itu, kesan beban air permukaan, takungan air di kaki cerun, dan pengagihan semula secara lateral tidak diambil kira (Amarasinghe et al., 2024; Dou et al., 2021). Model bawah permukaan lazimnya menggunakan sempadan atmosfera atau fluks tanpa pemodelan larian air hujan secara eksplisit (Shao et al., 2015), yang boleh menyebabkan perwakilan resapan pada had atas semasa kejadian hujan ekstrem, sekali gus meremehkan mekanisme ketidakstabilan sebenar yang berlaku akibat penumpuan larian air dan ketepuan di kaki cerun.

Kajian yang hampir sama juga dilakukan oleh Yang et al. (2019), yang membentangkan satu kajian kes cerun tanah mengembang tak tepu yang memvalidasi hasil simulasi berangka dengan data pemantauan lapangan semasa kejadian hujan. Tindak balas yang diukur, termasuk tekanan air liang dan sedutan matrik, dibandingkan dengan simulasi resapan tak tentu masa dan menunjukkan persamaan yang baik dari segi corak umum serta masa pelepasan sedutan mengikut kedalaman. Perbezaan yang

diperhatikan berhampiran permukaan tanah dikaitkan dengan heterogeniti tanah dan kesan aliran keutamaan yang sukar diwakili secara berangka. Kajian ini menekankan kepentingan pengesanan lapangan dalam analisis kestabilan cerun akibat hujan dan menyokong penggunaan pemodelan bersepadu resapan–kestabilan bagi cerun tak tepu.

Pradhan et al. (2022) turut membandingkan keputusan simulasi dengan data tekanan air liang yang dipantau di lapangan menggunakan nilai evapotranspirasi yang sama, dan mendapati kesesuaian yang sangat baik antara keduanya. Perlu diperhatikan bahawa persamaan yang rapat ini diperoleh bagi cerun tanpa litupan vegetasi, yang menunjukkan bahawa ketiadaan vegetasi dapat mengurangkan kerumitan hidrologi dan seterusnya meningkatkan kesepadanan antara simulasi berangka dan pemerhatian lapangan.

Secara keseluruhan, kesesuaian antara simulasi dan bacaan lapangan mengesahkan bahawa parameter hidraulik ($\psi_{\max} = 0.2$ m, $\psi_{\min} = -2$ m, $ET = 4$ mm/hari) berjaya menghasilkan tingkah laku infiltrasi tak tepu yang realistik termasuk pergerakan muka pembasahan, penyebaran sedutan dan pemulihan selepas hujan.

FAKTOR KESALAMATAN

Variasi kestabilan cerun semasa infiltrasi hujan dinilai menggunakan Faktor Keselamatan (FoS) masa-nyata yang diperoleh melalui analisis Pengurangan Kekuatan Ricih (SSR) selepas setiap fasa aliran–deformasi tak tunak. Rajah 6 menunjukkan FoS terhasil bersama taburan hujan sepanjang tempoh simulasi.



RAJAH 6. Faktor Keselamatan cerun Bukit Mewah hasil simulasi hujan

Pada awal simulasi, FoS berada sekitar 1.35, menunjukkan keadaan cerun yang stabil dalam cuaca kering. Sepanjang tempoh ini, hanya hujan ringan dan berselerak berlaku, menyebabkan sedutan matrik kekal tinggi dan memberikan sumbangan besar kepada lekatan ketara pada tanah tak tepu. Oleh itu, kestabilan cerun kekal hampir tidak berubah sambil meningkat perlahan kepada kira-kira 1.55.

Pengurangan kestabilan yang ketara berlaku sekitar Hari 18, bertepatan dengan kejadian hujan besar pertama. FoS merosot dengan mendadak daripada kira-kira 1.55 kepada hampir 0.9, menunjukkan cerun menghampiri keadaan kritikal. Penurunan ini mencerminkan tindak balas tekanan air liang pada kedalaman 0.5 m dan 1.0 m, di mana sedutan hilang dengan cepat apabila muka pembasahan bergerak ke dalam tanah. Hujan lebat meningkatkan tekanan air positif dan mengurangkan tegasan berkesan sepanjang bidang gelinciran berpotensi, sekali gus menurunkan kekuatan ricih (Taib et al. 2018; Hakroa et al. 2024; Hussin et al. 2015; Zhan et al., 2025).

Selepas peristiwa ini, FoS pulih secara beransur-ansur apabila intensiti hujan berkurang. Semasa tempoh pengeringan, evapotranspirasi memulihkan sedutan matrik yang seterusnya meningkatkan tegasan berkesan dan kekuatan ricih. Pengurangan kedua dalam FoS berlaku sekitar Hari 28 semasa ribut intensif yang seterusnya. FoS jatuh daripada 1.40 kepada kira-kira 1.07 sebelum pulih semula. Penurunan ini kurang ketara berbanding peristiwa pertama, kemungkinan akibat keadaan tanah yang telah lebih basah dan perbezaan sedutan awal yang lebih kecil. Menjelang akhir simulasi, FoS meningkat dengan stabil dan mencapai kira-kira 1.35 pada Hari 40, menunjukkan pemulihan sedutan dan penstabilan keadaan hidrolik.

Secara keseluruhan, trend FoS menunjukkan hubungan rapat antara proses hidrolik dan mekanikal dalam cerun Bukit Mewah. Sedutan tinggi semasa cuaca kering meningkatkan kestabilan cerun, manakala infiltrasi hujan menyebabkan sedutan hilang dengan cepat, tekanan air liang meningkat dan kekuatan ricih berkurang. Pemulihan sedutan semasa pengeringan membolehkan kestabilan pulih ke paras asal.

Kesesuaian antara trend FoS dan pola sedutan tak tunak mengesahkan bahawa model berjaya menggambarkan turun naik kestabilan cerun akibat hujan, serta menunjukkan bahawa parameter hidrolik terkalibrasi ($\psi_{\max} = 0.2$ m, $\psi_{\min} = -2$ m, ET = 4 mm/hari) memberikan gambaran yang realistik terhadap keadaan cerun.

KESIMPULAN

Proses pemodelan bermula dengan penetapan konfigurasi berangka yang sesuai dengan keadaan sebenar lapangan, termasuk geometri cerun, stratifikasi bahan dan syarat sempadan hidrolik yang diperoleh daripada pemantauan lapangan serta keputusan makmal. Tindak balas mekanikal cerun dimodelkan menggunakan model konstitutif Mohr–Coulomb, manakala aliran tak tepu dikawal oleh parameter model van Genuchten yang dipadankan kepada data SWCC khusus tapak dari oleh Suhaizan et al. (2023).

Analisis tak tunak berjaya menghasilkan semula mekanisme hidrologi utama yang diperhatikan di lapangan, termasuk penyebaran sedutan semasa hujan, kemaraan muka pembasahan ke bahagian lebih dalam, serta pemulihan sedutan secara beransur-ansur semasa tempoh pengeringan. Perbandingan antara simulasi dan bacaan tekanan air liang menunjukkan keserasian yang baik dari segi magnitud dan masa, khususnya pada kedalaman 0.5 m dan 1.0 m. Keserasian ini mengesahkan bahawa syarat sempadan hidrolik yang digunakan, khususnya nilai $\psi_{\max}$, $\psi_{\min}$ dan kadar evapotranspirasi, berjaya menggambarkan interaksi atmosfera dan tanah pada cerun Bukit Mewah. Keputusan faktor keselamatan turut mencerminkan tingkah laku tipikal cerun tak tepu tropika, di mana keseimbangan antara infiltrasi hujan dan sedutan matrik menentukan kestabilan semasa. Penurunan FoS jangka pendek bertepatan dengan episod hujan intensif dan peningkatan tekanan air liang, manakala pemulihan sedutan semasa pengeringan menyebabkan FoS kembali meningkat. Corak ini mengesahkan bahawa model berangka berpasangan berjaya menangkap interaksi hidrolik dan mekanikal yang mengawal variasi kestabilan cerun mengikut masa.

Secara keseluruhan, keputusan simulasi menunjukkan tahap padanan yang baik dengan respon lapangan, sekali gus mengesahkan ketepatan konfigurasi model dan nilai parameter sempadan yang diterapkan. Analisis dalam bab ini menyediakan satu rangka kerja berangka yang mantap untuk menggambarkan mekanisme infiltrasi hujan, penyebaran sedutan dan turun naik kestabilan dalam cerun tanah baki tropika. Rangka kerja ini juga boleh digunakan sebagai asas bagi kajian lanjutan meliputi senario iklim masa depan dan syarat hidrologi yang lebih kompleks, bagi meningkatkan keupayaan ramalan jangka panjang dan menyokong pengurusan risiko cerun di kawasan tropika.

PENGHARGAAN

Kajian ini telah dijalankan dengan bantuan geran Grant Geotecnica Sdn Bhd dengan kod projek KK-2024-025.

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

- Abed, A. A. & Vermeer, P. A. 2006. Foundation analyses with unsaturated soil model for different suction profiles. *Numerical Methods in Geotechnical Engineering (NUMGE 06)*, 6–8 September 2006.
- Amarasinghe, M. P., Robert, D., Kulathilaka, S. A. S., Zhou, A. & Jayathissa, H. A. G. 2024. Slope stability analysis of unsaturated colluvial slopes based on case studies of rainfall-induced landslides. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 83: 476.
- Bentley Systems. 2025. *PLAXIS 2D Scientific Manual*. Delft: Seequent (Bentley Systems).
- Bishop, A. W. 1959. The principle of effective stress. *Teknisk Ukeblad* 39: 859–863.
- Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., Swolfs, W. M., Foria, F., Waterman, D. & Bonnier, P. 2018. *PLAXIS 2D Reference Manual*. Delft: Plaxis bv.
- Carminati, A. & Vetterlein, D. 2012. Plasticity of rhizosphere hydraulic properties as a key for efficient utilization of scarce resources. *Annals of Botany* 112: 277–290.
- Chowdepalli, B. & Watanabe, K. 2023. Empirical equations expressing the effects of measured suction on the compaction curve for sandy soils varying fines content. *Geotechnics* 3(3): 760–780.
- Conte, E., Donato, A. & Troncone, A. 2018. A strength reduction method for slope stability analysis using finite elements. *Computers and Geotechnics* 98: 193–203.
- Darcy, H. 1856. *Les Fontaines Publiques de la Ville de Dijon*. Paris: Victor Dalmont.
- Dou, Z., Zhou, A., Sheng, D. & Li, J. 2021. Influence of layer transition zones on rainfall-induced infiltration and slope stability. *Computers and Geotechnics* 134: 104090.
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: Wiley.
- Fredlund, D. G., Morgenstern, N. R. & Widger, R. A. 1978. The shear strength of unsaturated soils. *Canadian Geotechnical Journal* 15(3): 313–321.
- Fredlund, D. G. & Xing, A. 1994. Equation for soil–water characteristic curve. *Canadian Geotechnical Journal* 31(4): 521–532.
- Gallage, C. P. K. & Uchimura, T. 2010. Effects of drying on the volumetric water content and matric suction of sandy soils. *Soils and Foundations* 50(4): 515–522.
- Griffiths, D. V. & Lane, P. A. 1999. Slope stability analysis by finite elements. *Géotechnique* 49(3): 387–403.
- Hakroa, M. R., Almania, Z., Channab, M. A. & Jokhioc, J. 2024. Numerical modelling of matric suction in unsaturated soil under shallow foundation under varying soil and hydrological conditions. *Jurnal Kejuruteraan* 36(2): 569–580.
- Hamdhan, I. N. & Schweiger, H. F. 2013. Finite element method-based analysis of an unsaturated soil slope subjected to rainfall infiltration. *International Journal of Geomechanics* 13: 653–658.
- Hemmati, S., Gatmiri, B., Cui, Y. J. & Vincent, M. 2012. Thermo-hydro-mechanical modelling of soil settlements induced by soil-vegetation-atmosphere interactions. *Engineering Geology* 139: 1–16.
- Hussin, H., Ghani, S. A. A., Jamaluddin, T. A. & Razab, M. K. A. A. 2015. Landslide in Malaysia: ‘Geobencana’ or ‘Geobahaya’. *Jurnal Teknologi* 77(1).
- Lambert, R. L. & Chitrakar, G. R. 1989. Variation of potential evapotranspiration with elevation in Nepal. *Mountain Research and Development* 9(3): 227–234.
- Leong, E. C. & Rahardjo, H. 1997. Review of soil–water characteristic curve equations. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 123(12): 1106–1117.
- Md Rahim, M. S. & Toll, D. 2014. Fully coupled flow–deformation analyses of infiltration and matric suctions within a tropical soil slope. In *Unsaturated Soils: Research and Applications*, edited by Khalili, N., Russell, A. R. & Khoshghalb, A., 1453–1458. London: CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group.
- Ng, C. W. W. & Shi, Q. 1998. A numerical investigation of the stability of unsaturated soil slopes subjected to transient seepage. *Computers and Geotechnics* 22(1): 1–28.
- Ng, C. W. W., Ni, J. J., Leung, A. K., Zhou, C. & Wang, Z. J. 2016. Effects of planting density on tree growth and induced soil suction. *Géotechnique* 66: 711–724.
- Rahardjo, H., Krisnanto, S., Leong, E. C. & Song, N. Y. 2004. Soil–water characteristic curves derived from field test data. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 130(1): 76–87.
- Rahardjo, H., Ong, T. H., Rezaur, R. B. & Leong, E. C. 2007. Factors controlling instability of homogeneous residual soil slopes under rainfall. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 133(12): 1532–1543.

- Rahardjo, H., Satyanaga, A., Leong, E. C., Santoso, V. A. & Ng, Y. S. 2014. Performance of an instrumented slope covered with shrubs and deep-rooted grass. *Soils and Foundations* 54: 417–425.
- Richards, L. A. 1931. Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Physics* 1(5): 318–333.
- Pradhan, S., Toll, D. G., Rosser, N. J. & Brain, M. J. 2022. An investigation of the combined effect of rainfall and road cut on landsliding. *Engineering Geology* 307: 106787.
- Sadatieh, M. S. M., Tsiamposi, A. & Paschalis, A. 2025. Numerical study of the effect of soil–plant–atmosphere interaction under future climate projections and different vegetation covers. *Geomechanics for Energy and the Environment* 43: 100697.
- Scholl, P., Leitner, D., Kammerer, G., Loiskandl, W., Kaul, H.-P. & Bodner, G. 2014. Root-induced changes of effective one-dimensional hydraulic properties in a soil column. *Plant and Soil* 381: 193–213.
- Shao, W., Bogaard, T. A., Bakker, M. & Greco, R. 2015. Quantification of the influence of preferential flow on slope stability. *Hydrology and Earth System Sciences* 19: 2197–2212.
- Suhaizan, F. S., Mohd Taib, A., Taha, M. R., Abang Hasbollah, D. Z. A., Ibrahim, A., Md Dan, M. F. & Satyanaga, A. 2025. Fitting of soil-water characteristic curves (SWCC) of Bukit Mewah, Malaysia soil using field monitoring dataset. *PLOS ONE* 20(1): e0316488.
- Taib, A. M., Taha, M. R. & Rosyidi, S. A. P. 2018. Numerical investigation of rainfall infiltration on slope with heterogeneous soil layers. *Jurnal Kejuruteraan SI* 1(5): 27–35.
- Toll, D. G., Md Rahim, M. S., Karthikeyan, M. & Tsaparas, I. 2019. Soil–atmosphere interactions for analysing slopes in tropical soils in Singapore. *Environmental Geotechnics* 6: 361–372.
- 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.
- Vanapalli, S. K., Fredlund, D. G., Pufahl, D. E. & Clifton, A. W. 1996. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction. *Canadian Geotechnical Journal* 33(3): 379–392.
- Vanapalli, S. K. & Fredlund, D. G. 2000. Application of the modified effective stress approach for the assessment of strength of unsaturated soils. In *Proceedings of the Asian Conference on Unsaturated Soils*, 141–156. Singapore.
- Villarraga, C., Ruiz, D., Vaunat, J. & Casini, F. 2014. Modelling landslides induced by rainfall: A coupled approach. *Procedia Earth and Planetary Science* 9: 222–228.
- Yang, K. H., Thuo, J. N., Chen, J. W. & Liu, C. N. 2019. Failure investigation of a geosynthetic-reinforced soil slope subjected to rainfall. *Geosynthetics International* 26: 42–65.
- Zhan, L. T., Ng, C. W. W., Fredlund, D. G. & Li, X. 2025. Stability of unsaturated soil slopes subjected to rainfall infiltration: Numerical and theoretical insights. *Canadian Geotechnical Journal* 62(2): 215–232.