

Analisis Numerik Pengaruh Beban Hujan dan Gempa pada Stabilitas Lereng Tanah Tak Jenuh

Wilson Koven*

Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia, Fakultas Teknik
Universitas Indonesia, E-mail: wilson.koven@gmail.com

Abdul Halim Hamdany

Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia, Fakultas Teknik
Universitas Indonesia, E-mail: abdul.halim04@office.ui.ac.id

Abstrak

Efek hujan dan gempa mempengaruhi stabilitas lereng. Hujan dapat mengakibatkan terjadinya infiltrasi pada lereng yang menyebabkan turunnya tekanan air pori negatif pada lereng dan meningkatkan muka air tanah. Sedangkan gempa akan memberikan beban seismik yang menyebabkan terjadinya deformasi pada lereng. Lereng akan mengalami kondisi yang lebih kritis lagi apabila efek hujan dan gempa dikombinasikan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh hujan yang disusul gempa pada stabilitas lereng tak jenuh. Penelitian ini terdiri dari dua tahap analisis numerik, yaitu analisis rembesan untuk mengetahui perubahan tekanan air pori pada lereng dan dilanjutkan dengan analisis dinamik time history tidak linear untuk menghitung deformasi yang terjadi akibat gempa. Kurva karakteristik tanah-air yang diambil dari hasil pengukuran akan diinkorporasikan pada lapisan atas tanah tak jenuh dan catatan gempa Loma Prieta (1989) akan digunakan sebagai akselerasi gempa. Enam skenario hujan dilanjutkan gempa akan dianalisis dan dibandingkan yaitu skenario intensitas hujan tidak berubah selama tiga hari, skenario intensitas hujan meningkat bertahap dan berkurang bertahap dalam tiga hari, dan skenario intensitas hujan acak selama tiga hari.

Kata-kata Kunci: Analisis dinamik, analisis rembesan, deformasi lereng, lereng tak jenuh, tekanan air pori negatif

Abstract

Rain and earthquake affect the stability of the slope. Rain results in infiltration on the slope which causes a decrease in negative pore water pressure on the slope and increases the groundwater level. Meanwhile, the seismic load from earthquake causes deformation on the slopes. Slope will experience even more critical condition if the effects of rain and earthquake are combined. This study aims to determine the influence of rain followed by earthquake on the stability of the unsaturated slope. This study consists of two stages of numerical analysis, which are seepage analysis to determine changes in pore water pressure on the slope and followed by non-linear time history dynamic analysis to calculate the deformation that occurs due to the ground motion. The soil-water characteristic curve from the field measurement will be incorporated in the upper layer of unsaturated soil and the Loma Prieta (1989) earthquake acceleration recording will be used. Six scenarios of rain followed by earthquake will be analyzed and compared, which are the scenario of rain intensity not changing for three days, the scenario of rain intensity gradually increasing and decreasing gradually, and the scenario of random rain intensity.

Keywords: Dynamic analysis, negative pore water pressure, seepage analysis, slope deformation, unsaturated slope

1. Pendahuluan

Lereng yang mengalami hujan akan mengakibatkan terjadinya infiltrasi dan limpasan permukaan pada lereng. infiltrasi yang terjadi pada permukaan lereng akan menyebabkan kenaikan air pori yang kemudian akan menaikkan muka air pada tubuh lereng. Infiltrasi akan mulai terjadi pada bagian permukaan bawah lereng dan permukaan atas lereng kemudian berangsur menginfiltrasi ke bagian dalam lereng yang lebih jauh dari permukaan. Namun adanya hisapan matrik pada tanah tidak jenuh dan derajat konsolidasi yang lebih tinggi pada bagian bawah lereng akan menghambat

terjadinya infiltrasi. Infiltrasi lebih cepat terjadi pada tanah dengan hisapan matrik yang kecil dibandingkan tanah dengan hisapan matrik tinggi. Pada saat besarnya infiltrasi lebih kecil daripada intensitas hujan maka air hujan akan menjadi limpasan permukaan yang dapat menyebabkan terjadinya erosi pada lereng, namun erosi dapat dihindari apabila derajat kompaksi tanah terbilang tinggi.

Yeh dkk (2018) melakukan studi untuk mengetahui pengaruh dari kenaikan intensitas hujan pada tanah tak jenuh dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh kenaikan intensitas hujan pada nilai faktor keamanan

* Penulis Korespondensi: wilson.koven@gmail.com

lereng. Hasil studi menunjukkan ketika intensitas hujan semakin bertambah kecepatan infiltrasi bertambah dan mengurangi durasi tanah pada lereng untuk saturasi, sehingga kenaikan muka air tanah juga bertambah cepat dan terjadi peningkatan tekanan air pori yang akan menurunkan nilai faktor keamanan lereng.

Studi oleh Wang dkk (2023) menunjukkan proses rembesan dimulai dari infiltrasi permukaan dan kemudian rembesan tersebut menyatu dengan kenaikan muka air tanah dan meningkatkan tekanan air pori pada bagian mendekati area kaki lereng. Tekanan air pori dipengaruhi oleh infiltrasi dan kenaikan muka air tanah dan berakibat menurunkan tegangan efektif tanah sehingga menurunkan nilai faktor keamanan lereng.

Untuk mengetahui mekanisme infiltrasi dan kegagalan pada lereng tak jenuh, Yang dan Huang (2023) melakukan penelitian dengan model hujan buatan di laboratorium. Hasil yang didapat adalah ketika durasi hujan meningkat maka infiltrasi mulai terjadi pada bagian atas dan permukaan lereng dan perlahan menjenuhi dari atas permukaan menuju bagian bawah dalam lereng. Ketika kecepatan infiltrasi menurun, dan konduktivitas hidrolik lebih kecil daripada kecepatan infiltrasi ditambah intensitas hujan, maka akan terjadi limpasan permukaan. Pada fase tersebut intensitas hujan tidak akan mempengaruhi infiltrasi lagi, tetapi secara dapat menyebabkan terjadinya erosi. Apabila derajat kompaksi meningkat, waktu infiltrasi juga akan bertambah panjang, yang dapat menyebabkan limpasan permukaan, namun karena derajat kompaksi yang tinggi, dapat mencegah terjadinya erosi.

Gempa akan memberikan beban seismik (arah vertikal dan arah horizontal) pada tanah, dan akan mengganggu kestabilan lereng. Beban dinamik yang diberikan pada lereng akan menyebabkan deformasi tanah dan menyebabkan perubahan regangan pada tanah. Penelitian oleh Zhao dkk. (2020) menyebutkan bahwa bidang longsor mulai terbentuk dari kaki lereng menuju ke mahkota lereng oleh karena adanya pergerakan tanah akibat gempa yang terjadi pada lereng. Memahami proses keruntuhan dan mekanisme keruntuhan pada lereng sangat diperlukan dalam merancang kestabilan lereng pada saat mengalami kondisi gempa.

Penelitian oleh Zhang dkk (2020) terhadap pengaruh variasi bentuk lereng pada stabilitas seismik lereng bertujuan untuk membandingkan stabilitas seismik lereng pada setiap bentuk lereng yang berbeda dengan mengamati dari faktor keamanan dinamik minimum dan deformasi permanen yang terjadi. Hasil penelitian apabila diurutkan dari stabilitas yang tinggi ke stabilitas yang rendah adalah (1) Lereng bentuk cekung yang disederhanakan, (2) Lereng cekung, (3) Lereng linear, (4) Lereng bentuk cembung yang disederhanakan (5) Lereng cembung

Doi dan Kamai (2020) mengamati perubahan tekanan air pori yang terjadi pada lereng yang dimonitoring selama terjadi gempa kuat. Hasil dari pengamatan mereka menunjukkan tekanan air pori eksese yang meningkat secara signifikan terjadi pada saat

pergerakan tanah yang kuat yang terjadi secara mendadak dan tekanan air pori eksese meningkat selama pergerakan tanah yang kuat berlangsung dan akhirnya mencapai level maksimum yang ditentukan oleh komponen magnitudo frekuensi yang lebih besar pada seismograf.

Lereng akan mengalami kondisi yang lebih kritis apabila terjadi kondisi gabungan hujan dan gempa. Kondisi gabungan hujan dan gempa dapat berupa hujan pasca gempa, gempa pasca hujan, ataupun gempa pada saat terjadi hujan. Dari ketiga kondisi tersebut penelitian Zhang dkk (2020) menyebutkan apabila diurutkan kondisi dengan faktor keamanan paling kritis adalah pada kondisi gempa pada saat terjadi hujan, disusul oleh gempa pasca hujan, dan kemudian hujan pasca gempa.

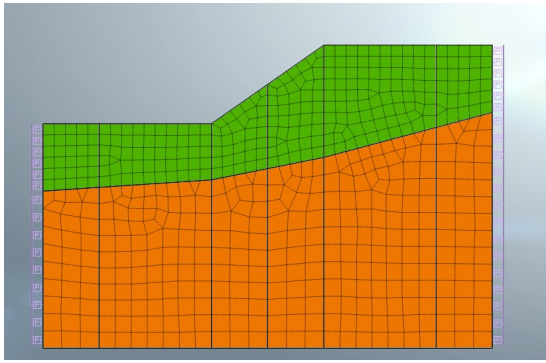
Xu dkk (2022) membuat model numerik rembesan dan deformasi pada lereng tak jenuh yang mengalami gempa yang disusul hujan. Hasil studi menyatakan bahwa ketika lereng sebelumnya mengalami gempa yang cukup besar kemudian hujan, deformasi yang disebabkan oleh hujan akan besar karena modulus geser tanah berkurang dan permeabilitas berubah. Oleh karena itu apabila terjadi gempa yang menyebabkan deformasi pada lereng, maka efek dari gempa tersebut haruslah diperhitungkan ketika melakukan analisis kestabilan lereng akibat hujan.

2. Metodologi Penelitian

Penelitian ini memodelkan lereng dengan ketinggian 7 m dan sudut kemiringan lereng 35° yang terdiri dari dua lapisan tanah. Lapisan pertama adalah lapisan tanah lanau berlempung dan lapisan kedua adalah kerikil berlanau. Tebal lapisan pertama adalah 6 m dan tebal lapisan kedua adalah 14 m. Muka air tanah awal berada pada antarmuka antara lapisan pertama dan lapisan kedua.

Model elemen hingga dua dimensi dipakai untuk menganalisis perubahan tekanan air pori yang terjadi akibat infiltrasi hujan ke dalam tanah dan menganalisis deformasi yang terjadi akibat gempa. Model menggunakan elemen berbentuk segi empat dikombinasikan dengan segi tiga; total keseluruhan nodal adalah 1.890 nodal dan total keseluruhan elemen adalah 599 elemen. Isotropik Mohr-Coulomb digunakan sebagai memodelkan kedua jenis tanah; modulus elastisitas untuk lanau berlempung 21.000 kN/m^2 , kohesi tanah adalah 20 kN/m^2 , sudut geser tanah adalah 5° dan koefisien permeabilitas tanah adalah $0,51 \text{ m/hari}$; modulus elastisitas kerikil berlanau adalah 60.000 kN/m^2 , kohesi 5 kN/m^2 , dan sudut geser 40° .

Lapisan tanah tak jenuh adalah lapisan lanau berlempung. Pada lapisan tanah tersebut juga dimasukkan sifat tanah tak jenuh berupa grafik Kurva Karakteristik Tanah dan Air (*Soil-Water Characteristic Curve*) yang didapat dari hasil pengukuran di lapangan yang dilakukan oleh Hamdany dkk (2023) di daerah Depok, Jawa Barat. Grafik Kurva Karakteristik Tanah dan Air yang dimaksud adalah grafik kurva kadar air vs. hisapan tanah.

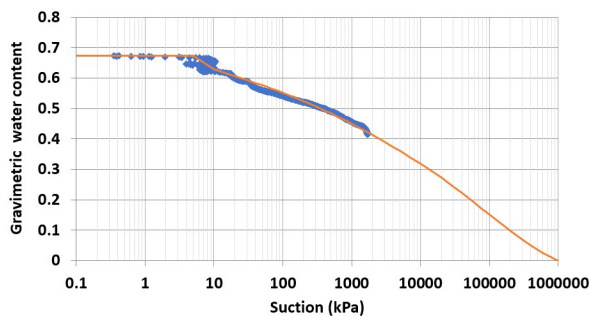


Gambar 1. Pemodelan lereng dengan menggunakan Midas GTS NX

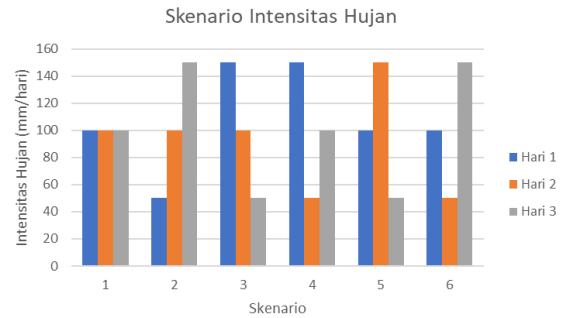
Lapisan tanah tak jenuh adalah lapisan lanau berlempung. Pada lapisan tanah tersebut juga dimasukkan sifat tanah tak jenuh berupa grafik Kurva Karakteristik Tanah dan Air (*Soil-Water Characteristic Curve*) yang didapat dari hasil pengukuran di lapangan yang dilakukan oleh Hamdany dkk (2023) di daerah Depok, Jawa Barat. Grafik Kurva Karakteristik Tanah dan Air yang dimaksud adalah grafik kurva kadar air vs. hisapan tanah dapat dilihat pada **Gambar 2**.

Intensitas Hujan sebagai beban pada lereng akan divariasikan dalam 6 skenario hujan yang terjadi selama 3 hari. Skenario pertama adalah intensitas hujan 100 mm / hari selama 3 hari; skenario kedua adalah intensitas hujan hari pertama 50 mm, hari kedua 100 mm, dan hari ketiga 150 mm; skenario ketiga adalah intensitas hujan hari pertama 150 mm, hari kedua 100 mm, dan hari ketiga 50 mm; skenario keempat adalah intensitas hujan hari pertama 150 mm, hari kedua 50 mm, dan hari ketiga 100 mm; skenario kelima adalah intensitas hujan hari pertama 100 mm, hari kedua 150 mm, dan hari ketiga 50 mm; skenario keenam adalah intensitas hujan hari pertama 100 mm, hari kedua 50 mm, dan hari ketiga 150 mm. Hari keempat adalah hari tanpa hujan dengan tujuan untuk memberikan waktu untuk air menginfiltrasi ke dalam tanah dan mencapai faktor keamanan kritis setelah hujan dapat dilihat pada **Gambar 3**.

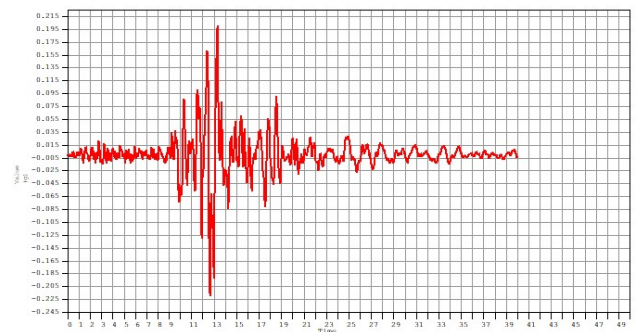
Setelah menerima beban hujan dan infiltrasi yang menyebabkan kenaikan muka air tanah dalam tubuh lereng, lereng akan diberikan beban gempa dengan tujuan untuk mengetahui deformasi yang terjadi akibat gempa pasca hujan. Input seismik yang dimasukkan adalah catatan *time history* gempa Loma Prieta tahun 1989, dengan akselerasi puncak 0,21g dan durasi 40 s.



Gambar 2. Kurva karakteristik tanah-air hasil pengukuran



Gambar 3. Grafik enam skenario intensitas hujan

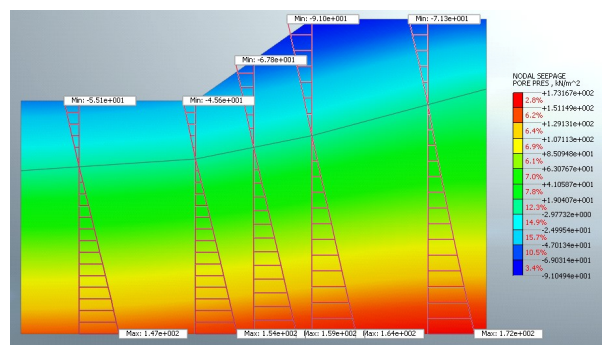


Gambar 4. Catatan time history gempa Loma Prieta (1989)

3. Pengaruh Hujan Terhadap Perubahan Tekanan Air Pori Lereng

Analisis rembesan dengan menggunakan *software* Midas GTS NX dilakukan untuk mengetahui perubahan tekanan air pori pada lereng akibat hujan yang terjadi. Tekanan air pori negatif pada fase awal sebelum terjadi hujan berkisar sekitar $45,6 \text{ kN/m}^2$ pada kaki lereng hingga $91,0 \text{ kN/m}^2$ pada puncak lereng. Garis muka air tanah berada pada posisi tekanan air pori negatif bernilai nol. Semakin jauh dari garis muka air tanah, maka semakin besar tekanan air pori negatif. Titik terjauh dari muka air tanah yaitu titik puncak lereng memiliki tekanan pori negatif yang paling besar.

Analisis Faktor keamanan dengan metode pengurangan kekuatan (*strength reduction method*) untuk lereng tak jenuh yang menginkorporasikan Kurva Karakteristik



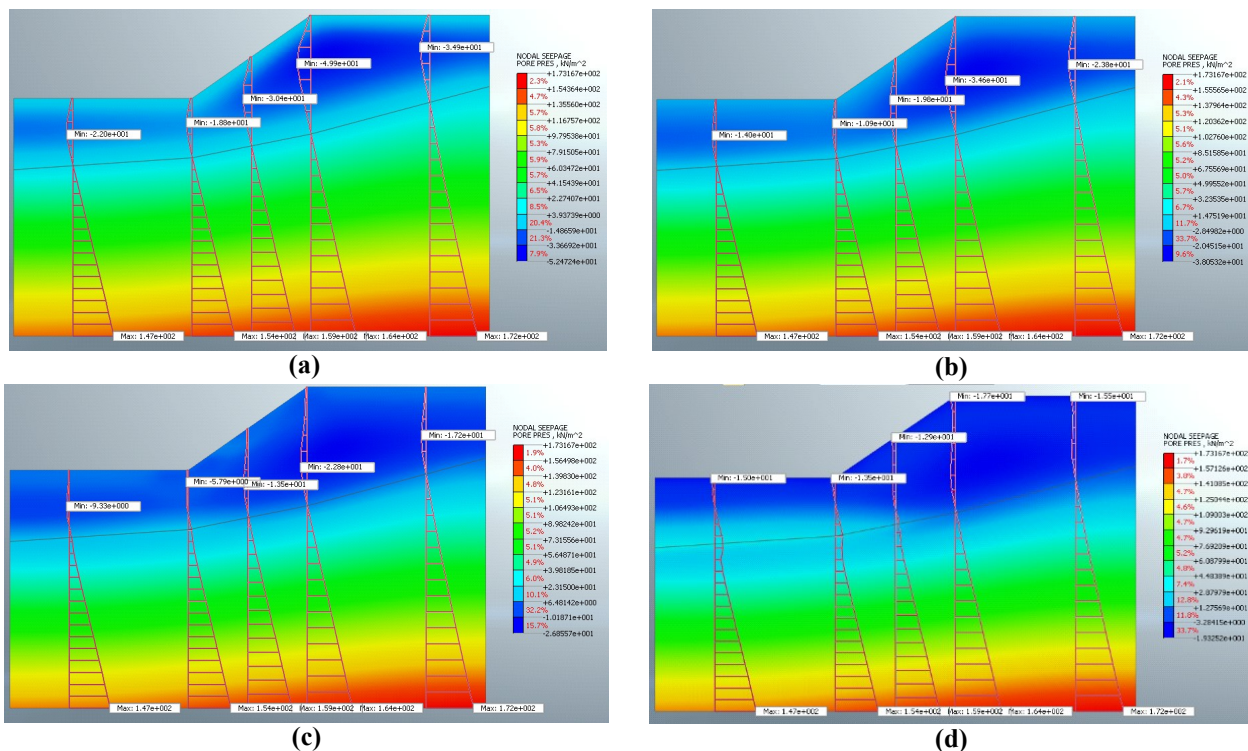
Gambar 5. Tekanan air pori pada fase awal

Tanah dan Air mula-mula pada penelitian ini adalah 1,3 sedangkan apabila tekanan air pori negatif tanah tidak diperhitungkan maka nilai faktor keamanan lereng adalah 1,25. Hasil penelitian Zhai dkk (2022) juga menyebutkan bahwa menginkorporasikan Kurva Karakteristik Tanah dan Air pada lereng tak jenuh menghasilkan bidang longsor yang lebih dalam dan menghasilkan nilai faktor keamanan yang lebih besar. Hal tersebut dapat diarenakan adanya tekanan air pori negatif pada tanah tak jenuh yang meningkatkan nilai tegangan efektif tanah.

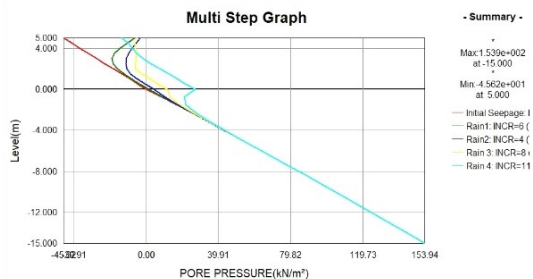
3.1 Hasil skenario hujan pertama

Hasil analisis rembesan dengan software Midas GTS NX menunjukkan bahwa akibat hujan intensitas 100 mm per hari selama tiga hari menyebabkan tekanan air pori negatif mulai berkurang. Tekanan pori negatif pada permukaan tanah lereng di hari pertama hingga hari ketiga hujan berkurang menuju angka nol, membesar seiring kedalaman bertambah dan berbentuk

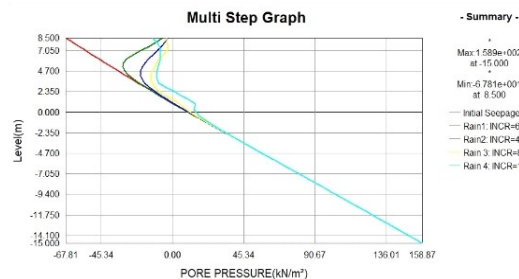
seperti busur. Pada bagian yang ditinjau pada kaki lereng terdapat tekanan air pori negatif sebesar 5,79 kN/m² dan tekanan air pori negatif terbesar pada bagian bawah puncak lereng yang ditinjau sebesar 22,8 kN/m². Selama tiga hari hujan terjadi penurunan tekanan air pori negatif sebesar 75% hingga 87,3% hingga Hal tersebut dikarenakan oleh infiltrasi air hujan ke dalam tanah tak jenuh dari permukaan lereng ke garis muka air tanah. Infiltrasi menyebabkan peningkatan tekanan air pori tanah pada bagian tanah yang dilaluinya. Pada hari keempat dimana tidak terjadi hujan, infiltrasi ke dalam tanah oleh hujan tiga hari sebelumnya telah menaikkan muka air tanah lereng. Kenaikan muka air tanah pada lereng terjadi lebih signifikan pada bagian bawah lereng, sedangkan pada slope lereng hingga bagian atas lereng tidak ada kenaikan muka air tanah yang signifikan. Pada bagian permukaan lereng tekanan air pori negatif tanah mulai bertambah. Perubahan tekanan air pori negatif pada kaki lereng, kemiringan lereng, dan puncak lereng dapat dilihat pada grafik pada Gambar 6.



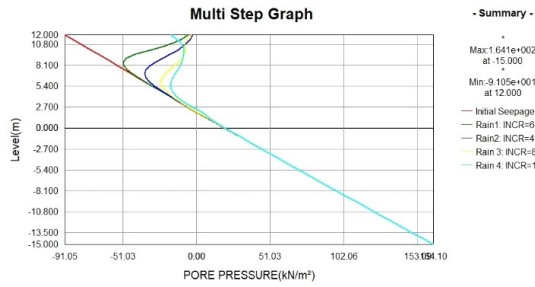
Gambar 6. Tekanan air pori hari pertama (a), kedua (b), ketiga (c), dan keempat (d) skenario hujan pertama



Gambar 7. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada kaki lereng untuk skenario hujan pertama



Gambar 8. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada tengah lereng untuk skenario hujan pertama

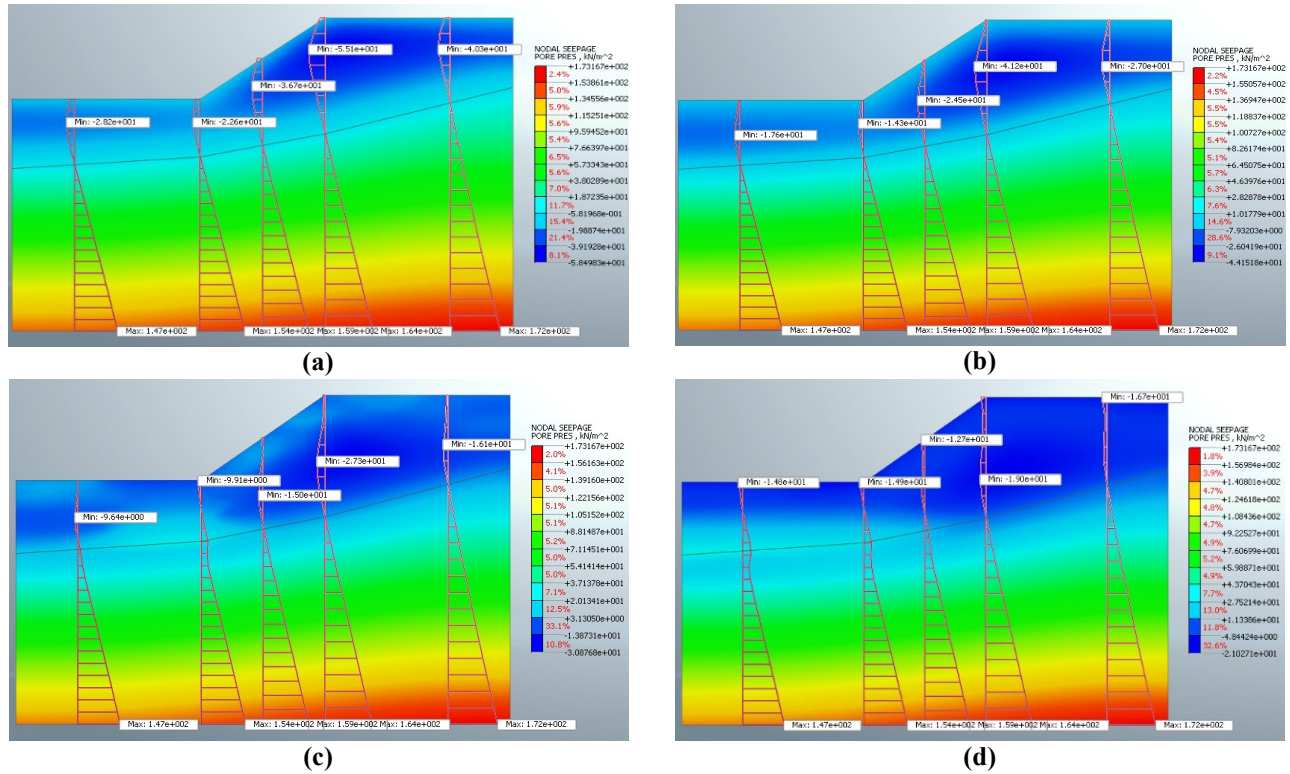


Gambar 9. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada puncak lereng untuk skenario hujan pertama

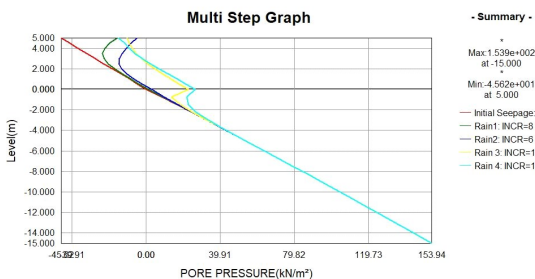
3.2 Hasil skenario hujan kedua

Hujan skenario kedua adalah hari pertama 50 mm, selanjutnya intensitas bertambah menjadi 100 mm di hari kedua dan 150 mm di hari ketiga. Hasil analisis rembesan dapat dilihat pada Gambar di bawah yang menunjukkan bahwa intensitas 50 mm di hari pertama

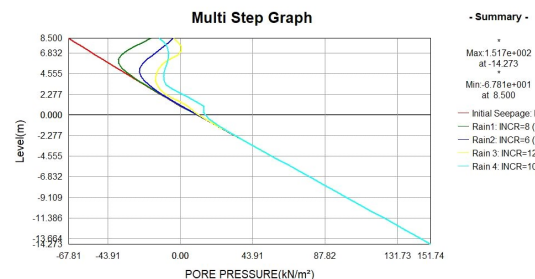
tidak cukup untuk menurunkan tekanan air pori negatif di permukaan lereng hingga mencapai nol, tetapi tetap terjadi penurunan tekanan pori negatif pada permukaan tanah. Pada bagian bawah kaki lereng, tekanan pori negatif berkurang dari awal 45,6 kN/m² hingga menjadi 22,6 kN/m². Pada hari yang kedua, dimana terjadi peningkatan intensitas hujan, tekanan air pori negatif di permukaan tanah berlanjut turun mendekati nilai nol. Dan pada hari yang ketiga peningkatan intensitas hujan berangsur menurunkan tekanan air pori negatif tanah hingga semakin mendekati nol, pada bagian kaki lereng tekanan air pori negatif hanya tersisa 9,91 kN/m² akan tetapi pada tubuh lereng masih terdapat tekanan air pori negatif sebesar 27,3 kN/m². Selama tiga hari hujan terjadi penurunan tekanan air pori negatif sebesar 70% hingga 78,27%. Pada hari keempat dimana tidak terjadi hujan, tekanan pori negatif pada permukaan lereng mulai meningkat dan infiltrasi yang terjadi telah meningkatkan muka air tanah lereng pada bagian bawah lereng.



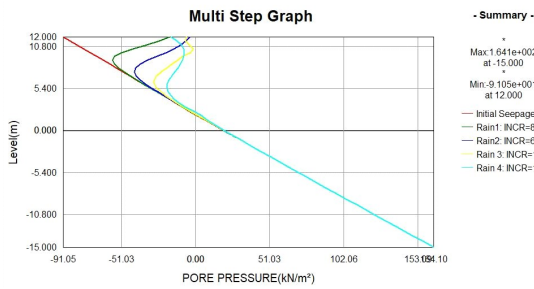
Gambar 10. Tekanan air pori hari pertama (a), kedua (b), ketiga (c), dan keempat (d) skenario hujan kedua



Gambar 11. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada kaki lereng untuk skenario hujan kedua



Gambar 12. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada tengah lereng untuk skenario hujan kedua

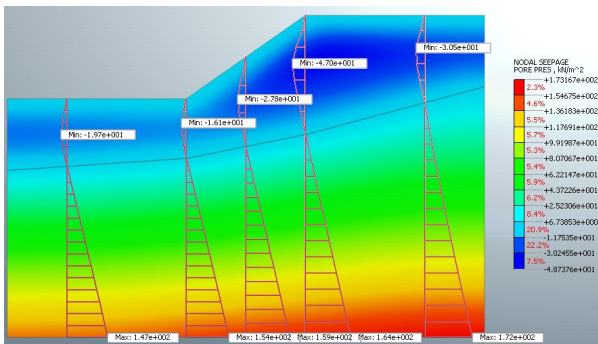


Gambar 13 Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada puncak lereng untuk skenario hujan kedua

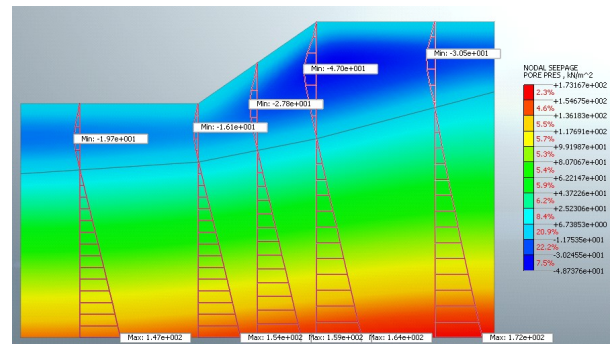
3.3 Hasil skenario hujan ketiga

Hujan skenario ketiga berkebalikan dengan skenario kedua, dimana intensitas hujan berturut-turut berkurang. Intensitas hujan hari pertama adalah 150 mm, kemudian di hari kedua intensitas hujan

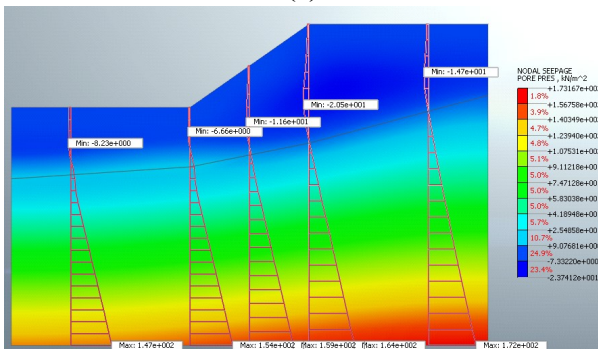
berkurang menjadi 100 mm, dan selanjutnya di hari ketiga berkurang menjadi 50 mm. Hasil analisis rembesan menunjukkan bahwa hujan dengan intensitas tinggi di hari pertama secara cepat menurunkan tekanan air pori negatif pada permukaan lereng hingga hampir mendekati nol, namun di hari yang kedua intensitas hujan yang berkurang tidak lagi menyebabkan penurunan tekanan air pori negatif hingga pada hari ketiga intensitas hujan yang semakin berkurang menyebabkan penambahan kecil tekanan pori negatif pada lereng. Selama tiga hari hujan tersebut tekanan air pori negatif pada bawah kaki lereng adalah 6,66 kN/m² dan pada bawah puncak lereng adalah 20,5 kN/m². Penurunan tekanan air pori negatif berkisar antara 77,47% hingga 85,4%. Pada hari yang keempat terjadi peningkatan garis muka air tanah karena infiltrasi. Peningkatan garis muka air tanah sama seperti skenario sebelumnya yakni lebih signifikan pada bagian bawah lereng dibandingkan bagian *slope* lereng dan puncak lereng.



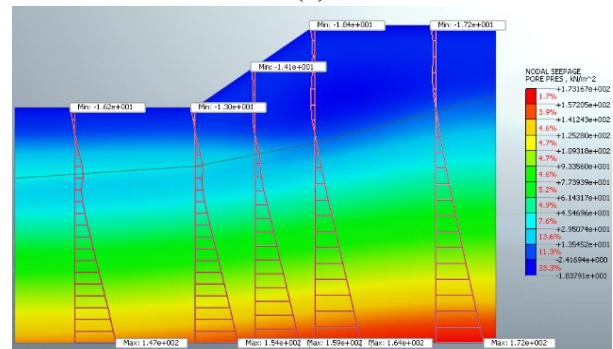
(a)



(b)

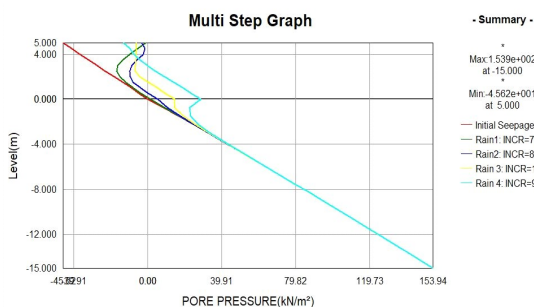


(c)

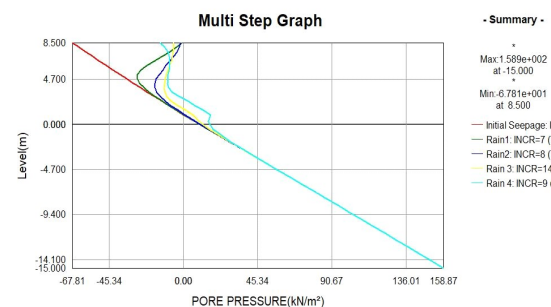


(d)

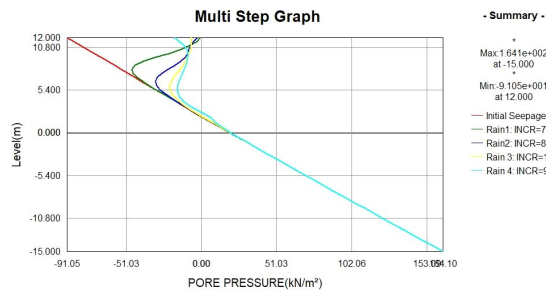
Gambar 14. Tekanan air pori hari pertama (a), kedua (b), ketiga (c), dan keempat (d) skenario hujan ketiga



Gambar 15. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada kaki lereng untuk skenario hujan ketiga



Gambar 16. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada tengah lereng untuk skenario hujan ketiga

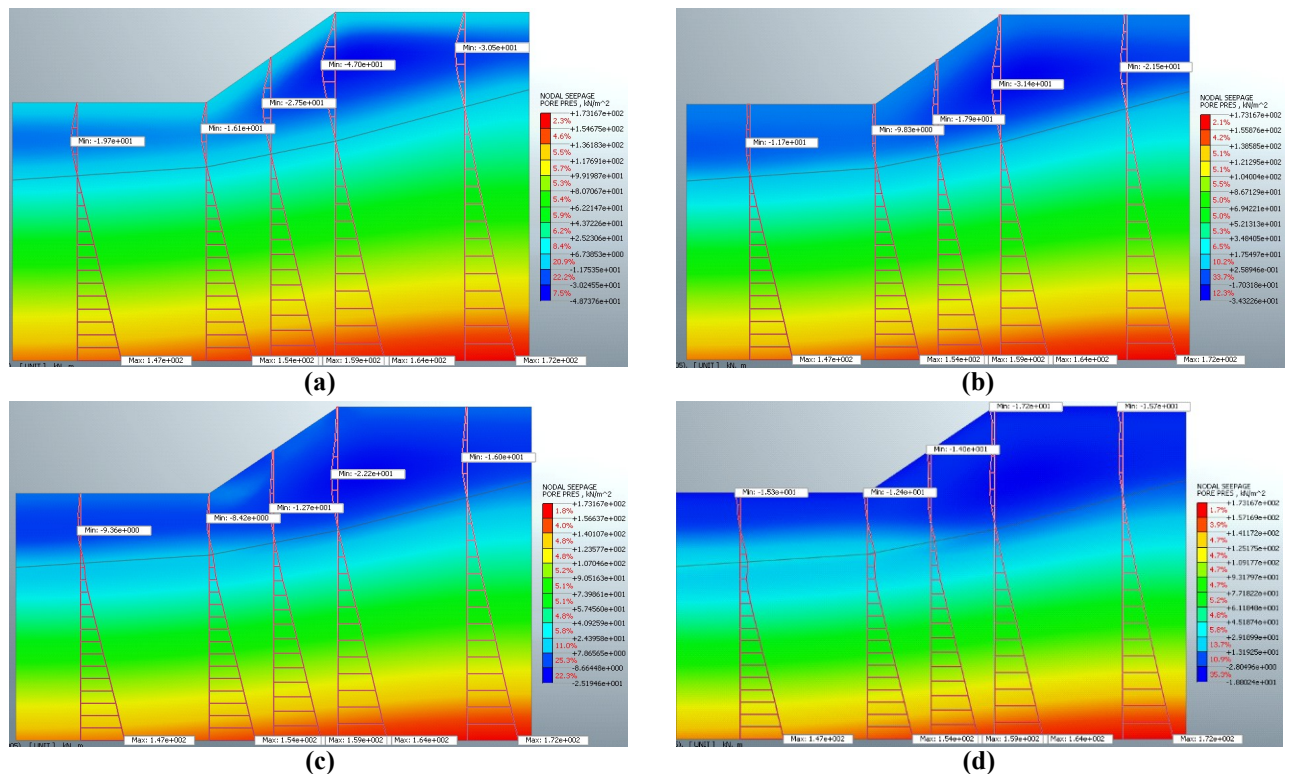


Gambar 17. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada tengah lereng untuk skenario hujan ketiga

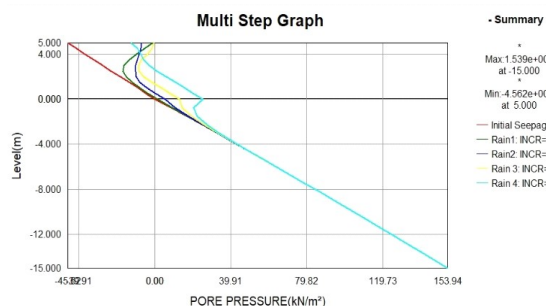
3.4 Hasil skenario hujan keempat

Hujan skenario keempat adalah skenario hujan acak dengan intensitas di hari pertama adalah 150 mm, kemudian di hari kedua intensitas turun menjadi 50 mm,

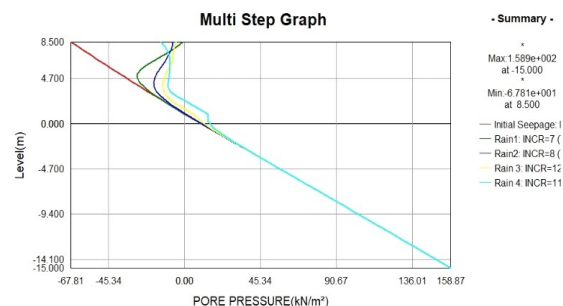
dan di hari ketiga intensitas meningkat menjadi 100 mm. Pada permukaan lereng tekanan air pori negatif berkurang secara drastis mendekati angka nol dan pada bagian bawah dalam lereng tekanan air pori negatif terbesar bernilai 16,1 kN/m² dan pada atas tubuh lereng atas tekanan terbesar berkurang menjadi 47 kN/m². Pada hari kedua dimana intensitas hujan turun drastis, tekanan air pori negatif pada bagian permukaan lereng mulai terjadi peningkatan. Pada hari ketiga ketika intensitas hujan naik, tekanan air pori negatif pada permukaan lereng kembali berkurang mendekati angka nol namun penurunan tidak seperti hari pertama. Pada bagian dalam lereng tekanan air pori negatif terbesar yang terpantau berkisar 8,42 kN/m² pada bagian bawah lereng sampai dengan 22,2 kN/m² di bagian atas lereng, mengalami penurunan antara 75,6% sampai 81,5%. Peningkatan muka air tanah di hari keempat juga signifikan pada bagian bawah kaki lereng dibandingkan bagian *slope* dan atas lereng.



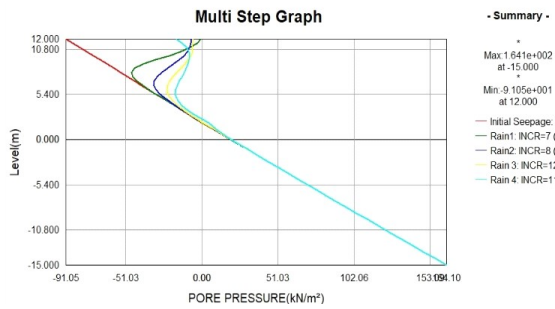
Gambar 18. Tekanan air pori hari pertama (a), kedua (b), ketiga (c), dan keempat (d) skenario hujan keempat



Gambar 19. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada kaki lereng untuk skenario hujan keempat



Gambar 20. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada tengah lereng untuk skenario hujan keempat

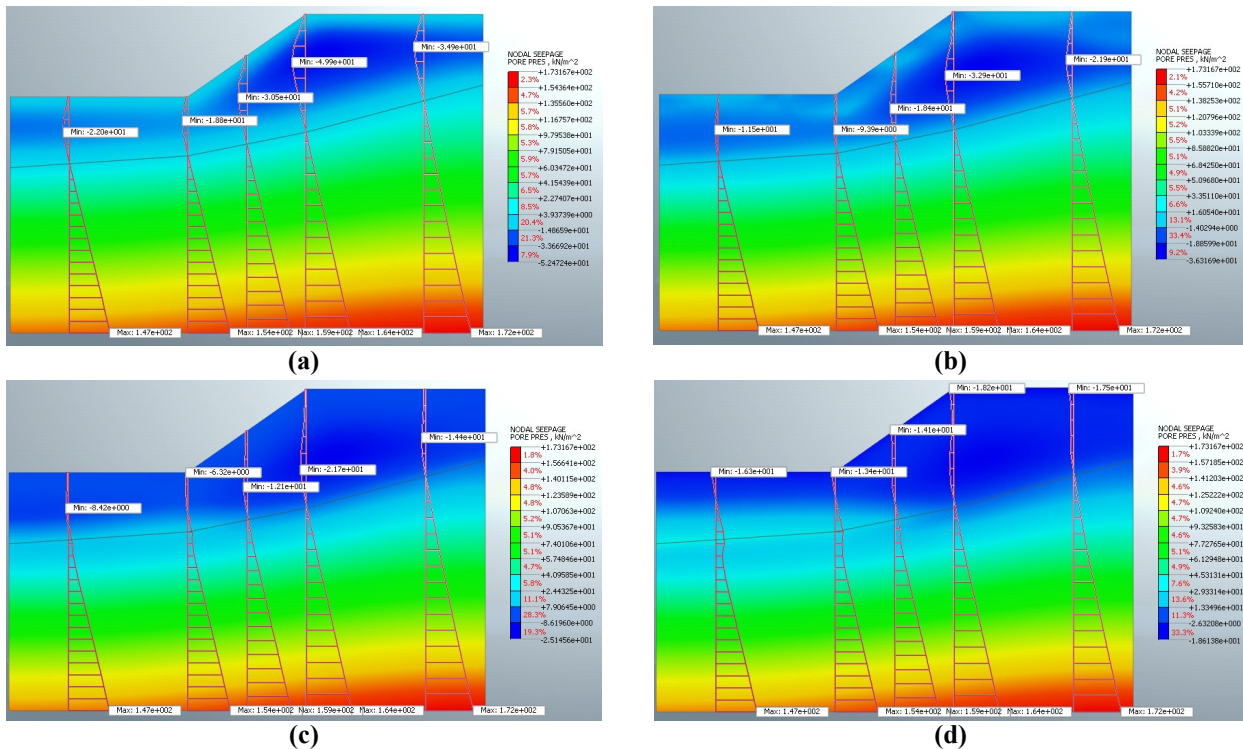


Gambar 21. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada puncak lereng untuk skenario hujan keempat

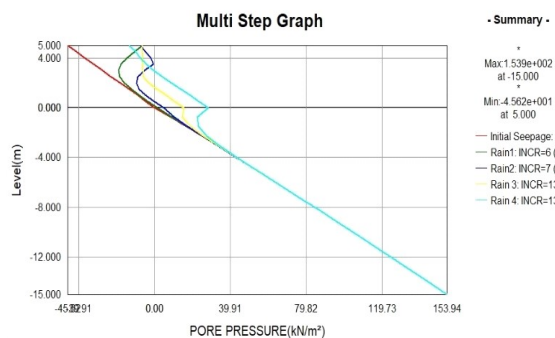
3.5 Hasil skenario hujan kelima

Hujan skenario kelima juga adalah hujan acak yaitu pada hari pertama 100 mm, kemudian meningkat di

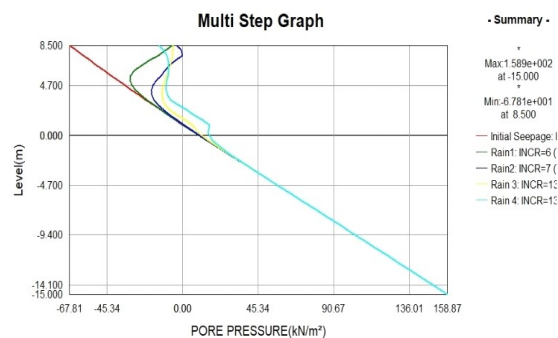
hari berikutnya menjadi 150 mm, dan menurun di hari berikutnya menjadi 50 mm. Pada hari pertama hujan tekanan air pori negatif berkurang sedemikian rupa karena adanya proses infiltrasi yang terjadi pada permukaan lereng, kemudian di hari kedua penurunan tekanan air pori negatif pada permukaan lereng tidak mengalami penurunan yang signifikan lagi walaupun intensitas hujan meningkat, tekanan air pori negatif baru terjadi pada hari ketiga ketika intensitas berkurang drastis. Tekanan air pori negatif pada tubuh lereng tak jenuh hingga mencapai 6,32 kN/m² pada bagian tubuh bawah lereng dengan persentase penurunan sebesar 86,14% dan 21,7 kN/m² pada bagian tubuh atas lereng dengan persentase penurunan sebesar 76,15%. Peningkatan muka air tanah di hari keempat juga lebih signifikan pada bagian bawah kaki lereng dibandingkan bagian slope dan atas lereng yang menandakan infiltrasi lebih cepat terjadi pada bagian bawah lereng.



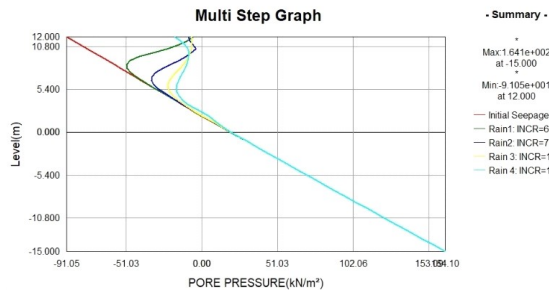
Gambar 22. Tekanan air pori hari pertama (a), kedua (b), ketiga (c), dan keempat (d) skenario hujan kelima



Gambar 23. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada kaki lereng untuk skenario hujan kelima



Gambar 24. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada tengah lereng untuk skenario hujan kelima

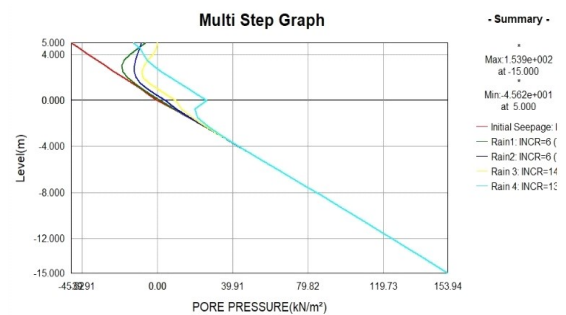


Gambar 25. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada puncak lereng untuk skenario hujan kelima

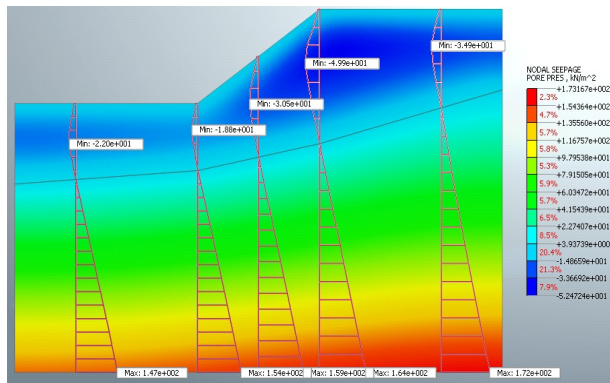
3.6 Hasil skenario hujan keenam

Skenario hujan keenam juga merupakan hujan acak yaitu pada hari pertama 100 mm, kemudian berkurang di hari kedua hingga 50 mm dan di hari ketiga meningkat secara drastis di hari ketiga hingga 150 mm. Hasil analisis rembesan menunjukkan bahwa pada hari pertama permukaan lereng tak jenuh mengalami penurunan tekanan pori negatif yang cukup signifikan, kemudian di hari kedua terjadi peningkatan kecil oleh karena intensitas hujan yang berkurang, namun pada hari ketiga mengalami penurunan hingga mencapai angka nol oleh karena intensitas hujan yang bertambah secara drastis. Tekanan air pori negatif terbesar pada tubuh lereng adalah 7,57 kN/m² bagian bawah lereng dengan persentase penurunan 83,4% dan 26 kN/m² bagian atas lereng dengan persentase penurunan 71,43%

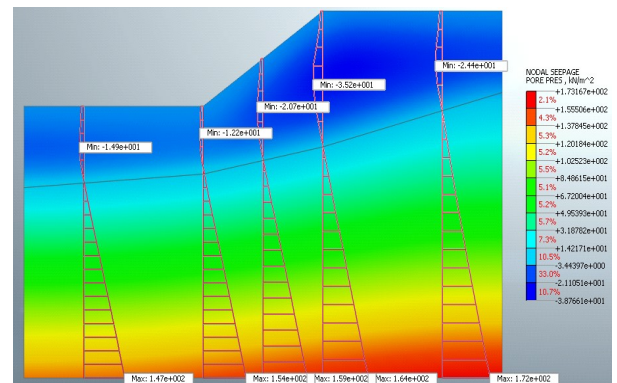
Setiap skenario hujan menunjukkan bahwa perubahan tekanan air pori terjadi pada permukaan lereng terlebih dahulu. Pada permukaan lereng yang berinteraksi langsung dengan air hujan, tekanan air pori negatif akan berkurang hingga mencapai nol, kemudian tekanan air pori negatif akan bertambah besar pada bagian antara permukaan lereng dan garis muka air tanah. Infiltrasi paling cepat terjadi pada bagian bawah lereng hal ini dapat disebabkan oleh tekanan air pori negatif mula-mula pada bawah lereng lebih kecil dari pada tekanan air pori negatif awal pada atas lereng. Infiltrasi akan mensaturasi tanah pada lereng tak jenuh dan akan meningkatkan garis muka air tanah lereng. Pada setiap skenario hujan, peningkatan garis muka air tanah pada bawah lereng lebih signifikan daripada peningkatan yang terjadi pada *slope* dan atas lereng.



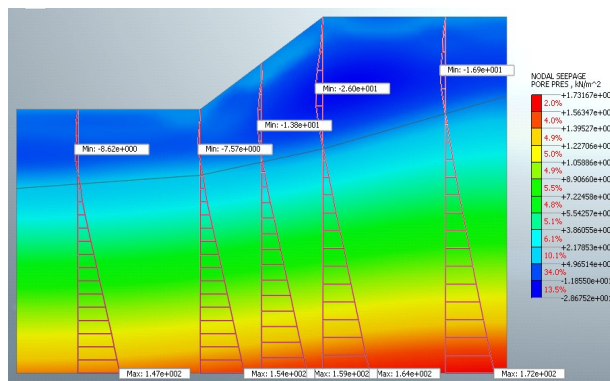
Gambar 27. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada kaki lereng untuk skenario hujan keenam



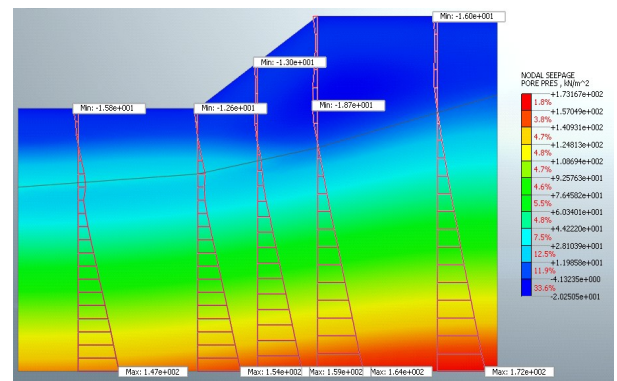
(a)



(b)

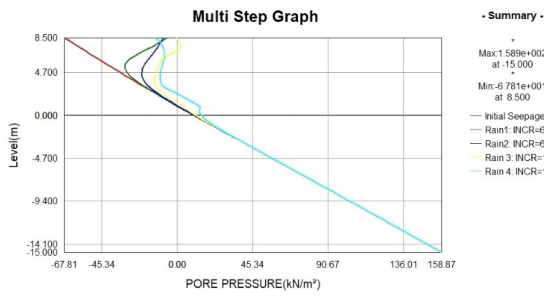


(c)

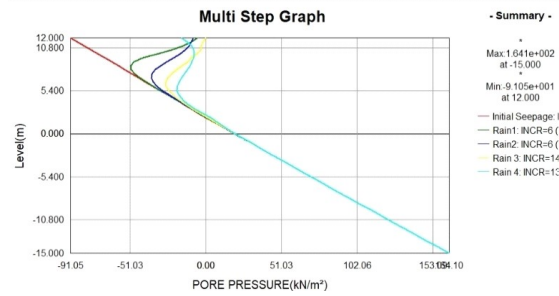


(d)

Gambar 26. Tekanan air pori hari pertama (a), kedua (b), ketiga (c), dan keempat (d) skenario hujan keenam



Gambar 28. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada tengah lereng untuk skenario hujan keenam



Gambar 29. Perubahan tekanan air pori selama 4 hari pada puncak lereng untuk skenario hujan keenam

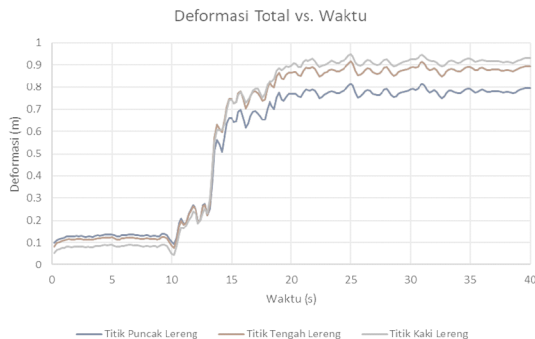
4. Deformasi yang Terjadi Akibat Gempa pada Lereng

Hasil dari analisis rembesan dilanjutkan dengan analisis dinamik untuk mengetahui dan membandingkan deformasi yang terjadi apabila lereng tak jenuh yang telah mengalami hujan diberikan beban gempa. Titik pengamatan deformasi analisis dinamik adalah pada titik pada permukaan kaki lereng, pertengahan slope lereng, dan puncak lereng. Hasil dari analisis dinamik selama 40 detik gempa dapat dilihat pada **Gambar 30**, **31**, dan **32**.

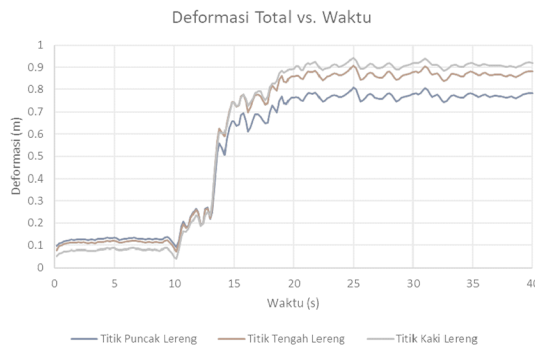
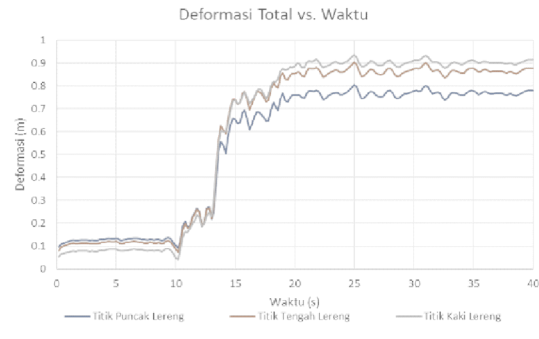
Hasil dari analisis deformasi menunjukkan bahwa deformasi yang terjadi pada kaki lereng pada awalnya lebih rendah daripada deformasi yang terjadi pada

tengah lereng dan puncak lereng, namun pada saat memasuki puncak percepatan gempa (13 detik) deformasi yang terjadi pada kaki lereng naik secara signifikan dan melampaui deformasi yang terjadi pada tengah dan puncak lereng. Hal tersebut dapat dikarenakan ketika lereng mulai longsor, bidang longsor mulai terbentuk dari kaki lereng dan secara progresif naik ke puncak lereng. Sekalipun percepatan puncak gempa terjadi pada waktu 13 detik namun deformasi paling besar terjadi pada waktu 25 detik gempa. Gambar di bawah adalah hasil analisis pemodelan dinamik pada saat deformasi maksimal.

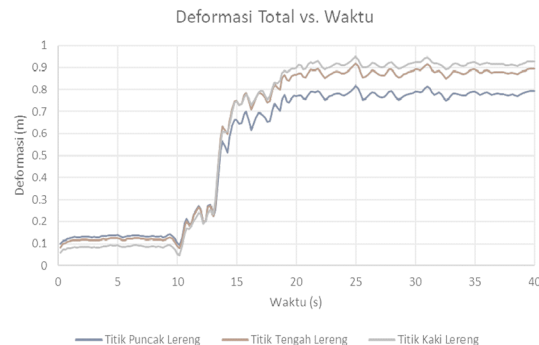
Untuk dapat mengetahui manakah deformasi terbesar pada enam skenario hujan dan gempa yang dibuat, maka hasil deformasi maksimal dari enam analisis

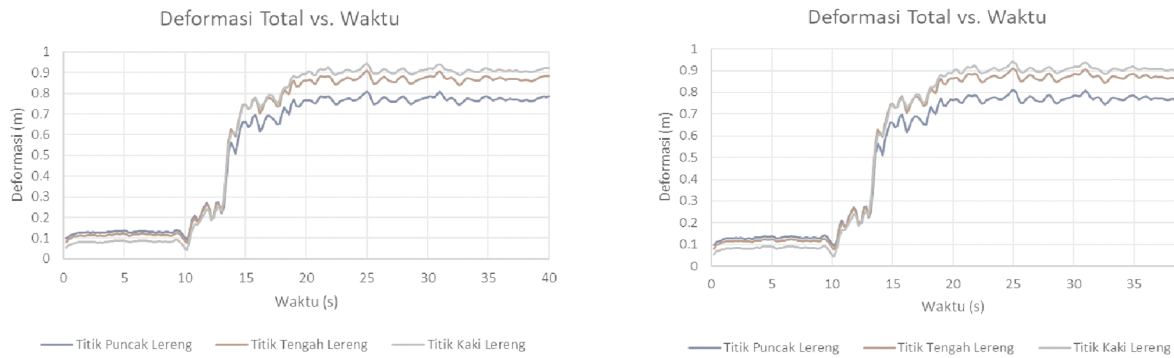


Gambar 30. Deformasi lereng selama 40 detik untuk skenario hujan pertama dan gempa Loma Prieta (kiri); Deformasi lereng selama 40 detik untuk skenario hujan kedua dan gempa Loma Prieta (kanan)

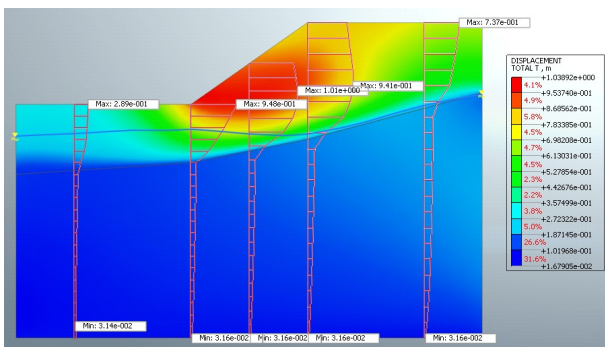


Gambar 31. Deformasi lereng selama 40 detik untuk skenario hujan ketiga dan gempa Loma Prieta (kiri); Deformasi lereng selama 40 detik untuk skenario hujan keempat dan gempa Loma Prieta (kanan)

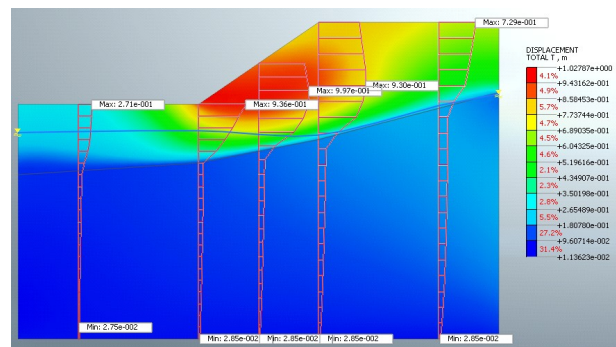




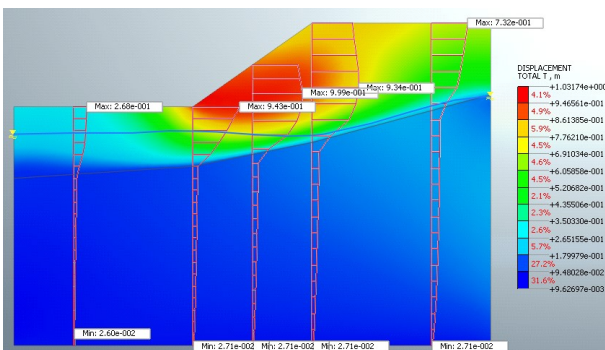
Gambar 32. Deformasi lereng selama 40 detik untuk skenario hujan kelima dan gempa Loma Prieta (kiri); Deformasi lereng selama 40 detik untuk skenario hujan keempat dan gempa Loma Prieta (kanan)



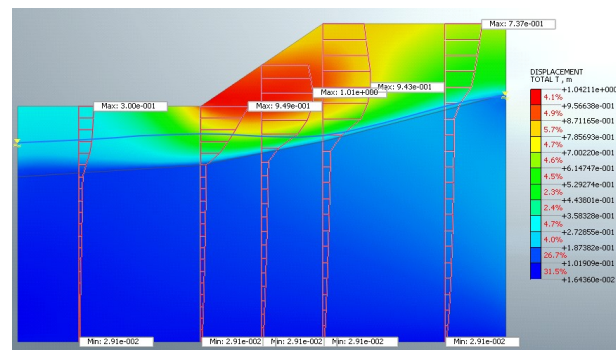
Gambar 33. Deformasi terbesar lereng (25 detik gempa) skenario hujan pertama dan gempa Loma Prieta



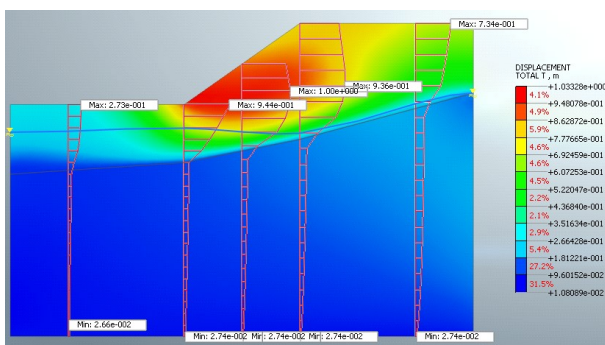
Gambar 34. Deformasi terbesar lereng (25 detik gempa) skenario hujan kedua dan gempa Loma Prieta



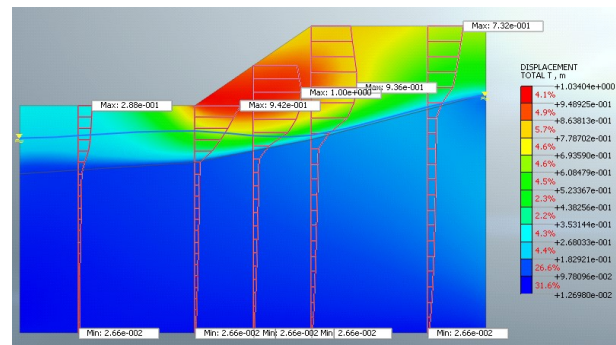
Gambar 35. Deformasi terbesar lereng (25 detik gempa) skenario hujan ketiga dan gempa Loma Prieta



Gambar 36. Deformasi terbesar lereng (25 detik gempa) skenario hujan keempat dan gempa Loma Prieta



Gambar 37. Deformasi terbesar lereng (25 detik gempa) skenario hujan kelima dan gempa Loma Prieta



Gambar 38. Deformasi terbesar lereng (25 detik gempa) skenario hujan keenam dan gempa Loma Prieta

dinamik dibandingkan. Perbandingan deformasi maksimal dari 3 titik pengamatan dan enam skenario dapat dilihat pada tabel dibawah. Deformasi terbesar terjadi pada skenario keempat hujan dan gempa dimana skenario tersebut adalah hujan terjadi dengan intensitas acak (150 mm, 50 mm, 100 mm) disertai gempa. Deformasi terbesar urutan kedua adalah skenario pertama hujan dan gempa dimana hujan terjadi dengan intensitas sama dalam tiga hari (100 mm, 100 mm, 100 mm). Sementara itu deformasi paling kecil terjadi pada skenario kedua hujan dan gempa dimana intensitas hujan meningkat dalam tiga hari (50 mm, 100 mm, 150 mm).

Tabel 1. Perbandingan deformasi yang terjadi pada enam skenario hujan dan gempa

Skenario	Deformasi (m)		
	Puncak	Tengah	Kaki
1	0.8147	0.9158	0.9477
2	0.8051	0.9049	0.9364
3	0.8075	0.9074	0.9430
4	0.8165	0.9185	0.9495
5	0.8096	0.9095	0.9443
6	0.8103	0.9113	0.9419

5. Kesimpulan

1. Faktor keamanan lereng dapat meningkat apabila kurva karakteristik tanah-air diinkorporasikan dan tekanan air pori negatif diperhitungkan. Pada penelitian ini dimana ketinggian lereng adalah 7 m dengansudut kemiringan lereng adalah 35^0 yang terdiri dari dua lapisan tanah dengan lapisan atas adalah tanah tak jenuh dan lapisan tanah bawah adalah lapisan tanah jenuh nilai faktor keamanan lereng apabila kurva karakteristik tanah-air dan tekanan air pori negatif tidak diperhitungkan adalah 1.25 sedangkan apabila kurva karakteristik tanah-air diinkorporasikan dan tekanan air pori negatif diperhitungkan maka nilai faktor keamanan lereng bertambah menjadi 1,3. Hal tersebut dapat dikarenakan adanya tekanan air pori negatif yang meningkatkan tegangan efektif tanah
2. Tekanan air pori negatif akan berkurang pada saat lereng mengalami kondisi hujan. Permukaan lereng yang berinteraksi langsung dengan hujan akan mengalami penurunan tekanan air pori negatif yang drastis, namun bagian tubuh lereng yang tidak berinteraksi secara langsung dengan hujan tidak akan mengalami penurunan yang drastis sehingga grafik tekanan air pori dalam tanah ditinjau secara vertikal akan berbentuk seperti busur yang membesar ke arah sumbu horizontal negatif.
3. Pada skenario hujan ketika intensitas hujan yang menyusul lebih kecil dari intensitas hujan sebelumnya, maka tekanan air pori negatif pada permukaan lereng yang berinteraksi langsung dengan hujan tidak akan meningkat lagi dan apabila intensitas hujan yang menyusul lebih kecil lagi maka tekanan air pori negatif pada permukaan akan mulai menungkat.
4. Infiltrasi air hujan akan meningkatkan garis muka air tanah. Setiap skenario hujan menghasilkan peningkatan garis muka air tanah pada bagian bawah lereng yang lebih signifikan dibandingkan dengan garis muka air tanah bagian slope dan bagian atas lereng. Hal ini menunjukkan bahwa saturasi karena infiltrasi terjadi lebih cepat pada bagian bawah lereng.
5. Analisis dinamik time history gempa menunjukkan bahwa deformasi terbesar terjadi pada kaki lereng dibandingkan dengan slope lereng dan puncak lereng. Hal ini dapat dikarenakan mekanisme pembentukan bidang longsor yang terjadi dimulai dari kaki lereng dan secara progresif naik menuju puncak lereng.
6. Grafik deformasi terhadap waktu menunjukkan bahwa kenaikan percepatan gempa yang terjadi meningkatkan secara drastis deformasi yang terjadi pada lereng. Tetapi deformasi terbesar bukanlah terjadi pada saat percepatan puncak gempa melainkan beberapa detik setelah terjadi percepatan puncak gempa. Percepatan puncak gempa terjadi pada saat 13 detik namun deformasi lereng terbesar terjadi pada saat 25 detik gempa.
7. Dari kelima skenario hujan dan gempa yang dimodelkan dan dianalisis, skenario hujan dan gempa keempat memiliki deformasi terbesar sedangkan skenario hujan dan gempa kedua memiliki deformasi terkecil. Namun selisih deformasi terbesar dan deformasi terkecil tidak besar. Selisih deformasi terbesar dan deformasi terkecil adalah 13,1 mm pada kaki lereng, 4,6 mm pada tengah lereng, dan 4,5 mm pada puncak lereng

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Direktorat Penelitian dan Pengembangan, Universitas Indonesia melalui Hibah PUTI 2023 (Nomor Hibah NKB-544/UN2.RST/HKP.05.00/2023).

Daftar Pustaka

- Doi, I., dan Kamai, T. (2020). *Relationship between earthquake-induced excess pore water pressure and strong ground motion observed in a monitored fill slope*. Engineering Geology.
- Hamdany, A.H.; Wijaya, M.; Satyanaga, A.; Rahardjo, H.; Qian, Z.; Lim, A.; Kim, J. *Numerical Simulation on the Effect of Infiltration and Evapotranspiration on the Residual Slope*. Sustainability 2023, Vol 15.
- Wang, C.-H., Fang, L., Chang, D. T.-T., & Huang, F.-C. (2023). *Back-analysis of a rainfall-induced landslide case history using deterministic and random limit equilibrium methods*. Engineering Geology.

- Xu, J., Ueda, K., & Uzuoka, R. (2022). *Numerical modeling of seepage and deformation of unsaturated slope subjected to post-earthquake rainfall*. Computers and Geotechnics.
- Yang, S.-R.; Huang, L.-J. (2023). *Infiltration and Failure Behavior of an Unsaturated Soil Slope under Artificial Rainfall Model Experiments*. Water 2023, Vol 15.
- Yeh, H.-F., & Tsa, Y.-J. (2018). *Effect of Variations in Long-Duration Rainfall Intensity on Unsaturated Slope Stability*. Water 2018, Vol 10.
- Yulin, L., Chen, X., & Wang, L. (2022). *Analytical Computation of Sandy Slope Stability under the Groundwater Seepage and Earthquake Conditions*. Hindawi Advances in Civil Engineering.
- Zhai, Q., Tian, G., Ye, W., Rahardjo, H., Dai, G., & Wang, S. (2022). *Evaluation of unsaturated soil slope stability by incorporating soil-water characteristic curve*. Geomechanics and Engineering, Vol. 28, 637-644.
- Zhang, X., Huang, L., Hou, Y., Wang, B., Xue, B., & Shi, M. (2020). *Study on the Stability of the Geogrids-Reinforced Earth Slope under the Coupling Effect of Rainfall and Earthquake*. Hindawi Mathematical Problems in Engineering.
- Zhang, Z., Chang, C., & Zhao, Z. (2020). *Influence of the Slope Shape on Seismic Stability of a Slope*. Hindawi Advance in Civil Engineering, Vol. 2020.
- Zhao, L., Huang, Y., Chen, Z., Ye, B., & Liu, F. (2020). *Dynamic failure processes and failure mechanism of soil slope under random earthquake ground motions*. Soil Dynamic and Earthquake Engineering, Vol. 133.

