



GO-9

ANALISIS *REABILITY* PENGARUH VEGETASI RUMPUT GAJAH DENGAN METODE ELEMEN HINGGA PADA LERENG TANAH VULKANIK

I Nengah Sinarta^{1,2*}, Putu Aryastana^{1,2}, Kadek Windy Candrayana², I Ketut Agung Sudewa³

^{1*}Program Studi Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar

e-mail: inengahsinarta@gmail.com

¹Program Studi Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar

e-mail: aryastanaputu@gmail.com

²Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar

e-mail: windy.candrayana@gmail.com

³Program Studi Agroteknologi, Universitas Warmadewa, Jl. Terompong No.24, Denpasar

e-mail: agsudewa63@gmail.com

ABSTRAK

Desa-desanya sekitar Kaldera Gunung Batur terancam mengalami longsor bahan rombakan (*Debris Flow*) akibat erosi permukaan karena lereng yg tersusun oleh tanah vulkanik dan minim vegetasi. Penerapan Bioengineering banyak menggunakan dengan penanaman rumput, karena lebih efektif mengurasi erosi permukaan dibandingkan dengan pepohonan. Pengujian konsep bioengineering dilakukan di laboratorium dengan kemiringan lereng 45° dengan vegetasi rumput gajah (*Pennisetum purpureum*) di dalam box pengujian. Analisis reability dengan metode *finite element* menggunakan *software* Plaxis 3D versi 2.2. Analisis pada lereng dengan dan tanpa vegetasi, menggunakan metode reliabilitas orde pertama dan pemodelan *root as pile approach*. Penelitian menunjukkan selisih regangan bidang gelincir tanpa dan dengan vegetasi pada lereng sampai 0,1094 kN/m². Vegetasi pada lereng membuktikan efektifitas penurunan lereng dengan selisih perpindahan 0,00235 m. Faktor keamanan lereng dipertimbangkan tanpa vegetasi berdasarkan *deterministic analysis* adalah 0,80. Analisis numerik menunjukkan faktor keamanan dengan vegetasi rumput gajah diperoleh sebesar 0,83. Fase pertama tegangan akibat penambahan vegetasi mendapatkan selisih tegangan 0,01 kN/m² antara tanpa vegetasi dengan penambahan vegetasi. Selisih tegangan akibat penambahan vegetasi yaitu 5,87 kN/m² dan mendapatkan selisih waktu lebih panjang 28,16 hari dari pada tanpa vegetasi. Penambahan vegetasi rumput gajah pada lereng mendapatkan hasil memuaskan, karena mampu menaikkan angka aman lereng meskipun kecil.

Kata kunci: Bioengineering, Rumput Gajah, Reability, Plaxis.

PENDAHULUAN

Konstruksi berbasis lingkungan di abad ke-21 menjadi topik hangat, tetapi pemerintah dan masyarakat masih terfokus dari upaya penyelesaian konstruksi tidak ramah lingkungan, sehingga cenderung malah merusak lingkungan. Perlindungan lereng dengan konstruksi seperti memasang pasangan batu, dinding beton, perlindungan shotcrete, dan lain-lain, sehingga langkah rekayasa ini telah menyebabkan kerusakan vegetasi asli, merusak struktur tanah sehingga menyebabkan erosi tanah ataupun tanah longsor, ketidakstabilan lereng merupakan serangkaian masalah lingkungan dan rekayasa (I Nengah Sinarta et al., 2021), (Kurniawan & Krol, 2014) (Damara Putra et al., 2020). Banyak negara telah melakukan usaha pembangunan konstruksi ekologi dan perlindungan lingkungan, sebagai salah satu usaha pembangunan berkelanjutan, untuk mempromosikan konstruksi hijau khususnya pembangunan konstruksi ekologi dan perlindungan lingkungan pada pelaksanaan pembangunan (Salter et al., 2020).

Erosi akibat hujan merupakan proses alami yang tidak dapat dihilangkan, sehingga penanganan dengan bioteknologi merupakan praktik berkelanjutan (Aziz & Islam, 2023). Mitigasi dan penanganan tanah longsor dengan konsep bioengineering dapat menjadi pilihan karena murah, ramah lingkungan, dan dapat dilakukan secara mandiri (G. Tejakusuma, 2019) (I N Sinarta et al., 2021). Penerapan bioteknologi yang paling banyak digunakan adalah penanaman rumput. Pemilihan rumput untuk mengurangi erosi permukaan tanah lebih efektif dibandingkan dengan pepohonan, dengan pepohonan akan meningkatkan beban pada tanah yang berdampak pada ketidakstabilan lereng dan tanah longsor (Doug Brown, 2010). Bio-engineering dengan pepohonan akan meningkatkan beban pada tanah yang berdampak pada ketidakstabilan lereng dan tanah longsor, sehingga rumput menjadi populer digunakan untuk mengatasi tanah longsor adalah rumput vetiver, rumput salah satu jenis rumput yang dikenal dengan nama akar wangi (*Vetiveria zizanioides*). Tanaman ini merupakan tanaman tahunan yang tumbuh tegak dengan tinggi 1,5 – 2,5 m. Tanaman ini mempunyai sistem perakaran yang unik, akar serabutnya menancap sangat dalam ke dalam tanah, panjangnya mencapai lebih dari 3 meter dan rekor akar akar wangi terpanjang adalah 5,2 meter yang ditemukan di Doi Tung, Thailand (Kusminingrum, 2011).

Penerapan teknologi hijau sebagai usaha pelaksanaan pembangunan berkelanjutan adalah untuk mengetahui mekanisme dan manfaat dari metode-metode *soil bioengineering*, antara lain: *Vegetated Rock Gabion*, *Live Fascine*, dan *Brush Layering*. Pengembangan penggunaan rumput gajah (*Pennisetum purpureum*) merupakan salah satu alternatif dalam hal menerapkan *soil bioengineering* untuk mengurangi erosi permukaan, di samping itu sebagai penyediaan hijauan pakan ternak, karena rumput ini merupakan jenis rumput unggul. Rumput gajah yang dikenal dengan *napier grass* atau *elephant grass* berasal dari Afrika tropika, kemudian menyebar dan diperkenalkan ke daerah tropika di dunia dan tumbuh alami di seluruh Asia Tenggara yang bercurah hujan lebih dari 1.000 mm dan tidak ada musim panas yang panjang (Ramin et al., 2012).

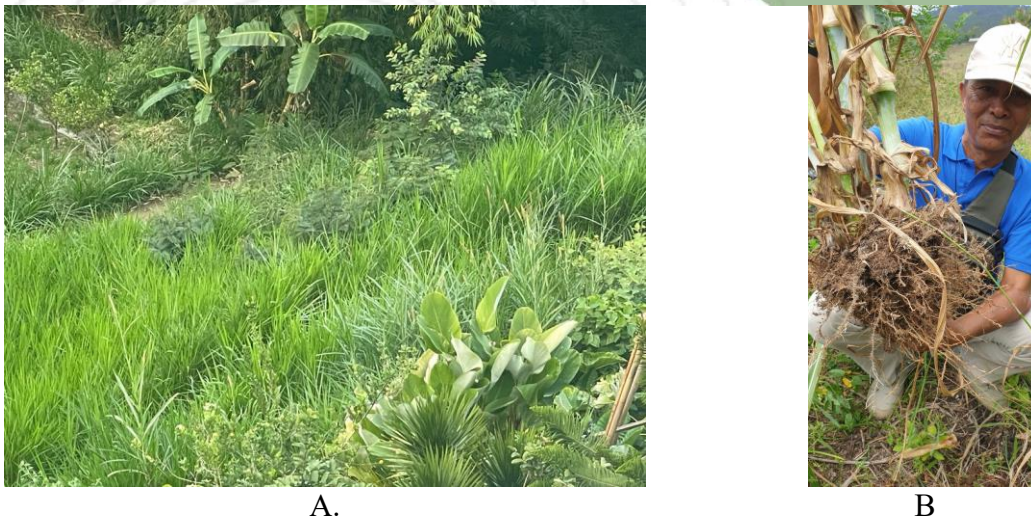
Lembah-lembah bukit dan gunung tersebut alur tebing yang riskan terhadap pergerakan tanah akibat jumlah vegetasi yang minim khususnya desa pedalaman, sehingga perlu usaha mitigasi bencana khususnya longsor bahan rombakan (*Debris Flow*) selanjutnya menjadi sliding/tanah longsor. Berdasarkan penyelidikan lapangan terdapat morfologi wilayah dan jenis tanah serta peta pergerakan tanah sebenarnya wilayah kaldera Gunung Batur tersusun oleh batuan vulkanik yang telah lapuk, sehingga menjadi tanah vulkanik. Desa-desanya sekitar Kaldera Gunung Batur khususnya sekitar Desa Buah, Dusun Dukuh Abang Batudinding, Dusun Cemara landung dan Dusun Terunyan, yang terbentuk secara alami berada pada lereng Gunung Abang (gunung berapi parasit) dan Bukit Terunyan sangat rawan mengalami longsor bahan rombakan (*Debris Flow*) akibat bukit disekitarnya yang minim vegetasi (I. Nengah Sinarta et al., 2020) (I. Nengah Sinarta et al., 2023).

Penelitian dimaksudkan untuk memperkenalkan alternatif penyelesaian stabilitas lereng dengan menaikkan kuat geser tanah terhadap bahaya longsor dan erosi permukaan dengan menggunakan teknologi hijau serta bernilai ekonomis. Rumput gajah sebagai media vegetasi dalam menanggulangi erosi dan meningkatkan stabilitas lereng karena tanaman ini memberikan nilai ekonomis sebagai pakan ternak sehingga masyarakat tertarik menanamnya dan penerapannya pada tanah batuan vulkanik. Model numerik pengaruh akar dilakukan metode elemen hingga pada *software* Plaxis 3D sehingga dapat diketahui pengaruh rumput gajah terhadap stabilitas lereng.

TINJAUAN PUSTAKA

Rumput Gajah (*Pennisetum purpureum*)

Rumput gajah dapat tumbuh pada ketinggian hingga 2.000 m dpl dengan suhu 25-40°C dan curah hujan 1.500 mm/tahun. Rumput ini toleran terhadap kekeringan dan lebih cocok tumbuh pada lahan dengan drainase yang baik dan pada tanah yang subur serta memiliki adaptasi yang luas terhadap tingkat kemasaman (pH) tanah (4,5-8,2). Rumput gajah merupakan rumput yang tumbuh baik pada kondisi cahaya penuh, meskipun masih dapat berproduksi bila yang ternaungi hanya sebagian tanaman (Dumadi et al., 2021)(Heuze et al. 2016) dan akan tumbuh sangat baik bila ditanam di tanah yang gembur dan subur.



Gambar 4. Rumput Gajah di Lereng (A) dan Akar Rumput gajah (B)

Indeks Jangkar dan Indeks Cengkeram akar (IJA dan ICA) adalah parameter kemampuan akar vegetasi dalam meningkatkan stabilitas lereng selain melalui penjangkarannya, juga karena akarnya mampu menambah kekuatan geser tanah sehingga mampu mengurangi bahaya terjadinya gerakan tanah. Peningkatan kekuatan geser ini tergantung pada karakteristik akar diantaranya distribusi akar yaitu bagaimana posisi penetrasi akar dalam lapisan tanah, kondisi akar vertikal dan horizontal, serta pola percabangan akarnya (Subramaniam, 2011).

Posisi akar tanaman di lereng Menurut Sotir (1984) (Gray & Sotir, 1996), posisi penetrasi akar di bagi menjadi 4 bagian sebagai berikut: 1) Tipe A, akar tanaman hanya mencapai lapisan top soil tanah, sehingga dapat untuk menanggulangi erosi permukaan, 2) Tipe B, akar tanaman sudah mencapai tanah asli sehingga penjangkaran akar cukup kuat untuk mencegah erosi permukaan dan longsor dangkal, 3) Tipe C, akar tanaman menembus dua lapisan tanah, sehingga efek pengankuran akar lebih efektif. 4) Tipe D, hampir mirip dengan tipe A tapi beda ketebalan dari top soilnya. Tipe D lebih tebal daripada tipe A Tipe – tipe tersebut sangat tergantung dari jenis tanaman, jenis akar, jenis lapis – lapisan tanah.

Modelling Numerik

Pada metode elemen hingga yang digunakan untuk memodelkan dan menganalisis permasalahan kompleks yang biasa ditemui dalam bidang geoteknik adalah aplikasi Plaxis (Islam & Badhon, 2017). Metode elemen hingga ini pertama kali diluncurkan oleh Pieter Vermeer pada tahun 1974 untuk menyelesaikan masalah penetrasi *cone* (Brinkgreve & Broere, 2019). *Software* Plaxis berasal dari kesimetrisan plastisitas dan sumbu, sehingga memungkinkan pemodelan masalah interaksi struktur tanah yang sangat sulit dianalisis secara matematis. Model numerik dengan metode elemen hingga menghasilkan perpindahan total, perpindahan ke berbagai arah, tekanan air pori, tegangan total dan efektif dapat dihitung. Model simulasi program elemen hingga PLAXIS 3D versi 22 untuk analisis stabilitas lereng, tegangan awal dihasilkan dengan menggunakan metode pembebanan gravitasi. Tegangan awal timbul karena berat sendiri tanah/struktur dan tekanan air pori yang dihasilkan (Jotisankasa et al., 2014). Prosedur K_0 digunakan untuk model jika permukaan tanahnya berada pada posisi horizontal. Koefisien tekanan bumi dalam keadaan diam dapat dihitung dengan menggunakan rumus *Jaky's formula* (Rao & Das, 2016).

$$K_0 = 1 - \sin \phi' \quad (1)$$

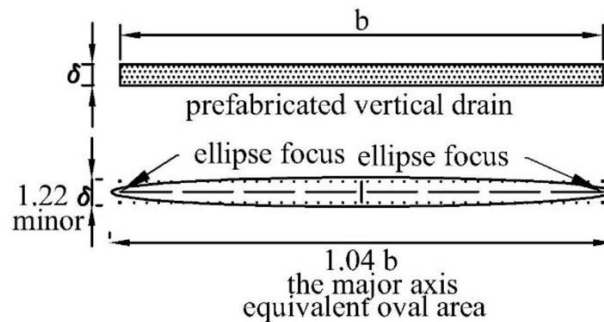
Dimana ϕ' = Sudut gesek dalam tanah efektif.

Dalam program PLAXIS 3D, faktor keamanan lereng dihitung dengan menggunakan metode reduksi ϕ - c . Parameter kohesi (c) dan sudut gesek dalam (ϕ) tanah diperkecil hingga lereng menjadi tidak stabil. Parameter *Poisson's Ratio* (ν) dan *Modulus of Elasticity* (E) tidak mempunyai pengaruh terhadap faktor keamanan (Msf).

$$\text{safety factor} = \frac{\text{Resisting force}}{\text{Driving Force}} \quad (2)$$

Kinerja PVD dalam Koordinat Elips

Menurut Huang dkk., bentuk PVD lebih tepat dianggap ekuivalen ellipsoid jika dibandingkan dengan menggunakan metode ekuivalen silinder. Lebar b jauh lebih besar daripada ketebalan δ , oleh karena itu lebih masuk akal jika PVD strip setara dengan silinder elips seperti Gambar 2.



Gambar 2 Model elips dan PVD

Asumsi badan drainase yang zona smear dan pengaruhnya semuanya disederhanakan dalam bentuk elips silinder adalah sebagai berikut:

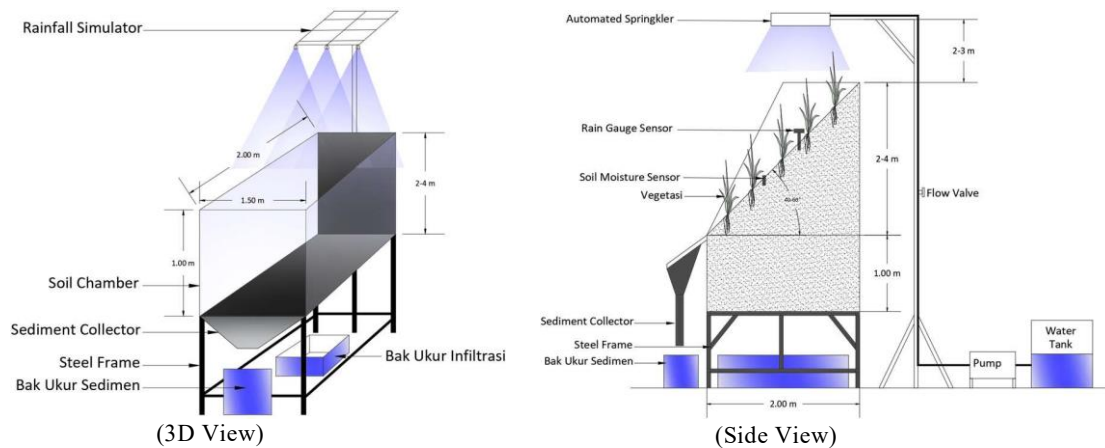
1. Deformasi lateral diabaikan, dan deformasi vertikal pada setiap titik pada kedalaman yang sama adalah sama. Regangan hanya ditentukan oleh deformasi vertikal.
2. Rembesan mengikuti aliran Darcy dalam arah horizontal, dan tekanan air pori sama dalam arah radial.
3. Aliran air pada interval waktu penampang dari tanah pada setiap kedalaman z ke saluran pembuangan sama dengan pertambahan debit ke atas.
4. Perilaku kompresi saluran pembuangan, zona smear, dan tanah tidak terganggu adalah serupa, sedangkan koefisien konduktivitasnya dari ketiganya berbeda.

Pendekatan *Equivalent Cohesion* untuk mengukur pengaruh vegetasi terhadap stabilitas lereng dihitung dengan menggunakan pendekatan *Equivalent Cohesion* dan akar sebagai tiang pancang. Program elemen hingga PLAXIS 3D versi 22 digunakan untuk memodelkan lereng dengan vegetasi.

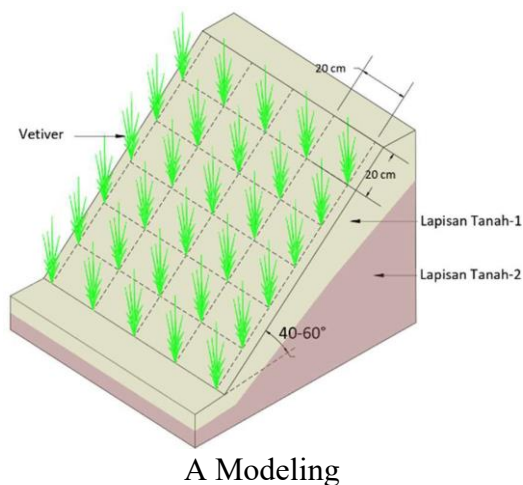
METODOLOGI PENELITIAN

Sampel tanah vulkanik sekitar 5 m^3 untuk pengisian box eksperimen dari Dusun Dukuh khususnya di lereng Gunung Abang kecamatan Kintamani yang sekaligus menjadi lokasi pengujian lapangan. Vegetasi rumput gajah disemaikan sendiri pada laboratorium Fakultas Pertanian Universitas Warmadewa. Pengujian lapangan menggunakan peralatan laboratorium Mekanika Tanah Universitas Warmadewa dengan pengujian Standard penetration test (SPT) dan bor mesin sampai kedalaman 10 meter. Sampel tanah vulkanik hasil hand boring setiap 1 meter dilakukan pengujian sifat fisik tanah adalah kadar air, gradasi butiran, batas-batas atterberg, spesifik gravity, permeabilitas.

Prosedur penelitian dan pengujian konsep *bioengineering* dengan memanfaatkan rumput gajah sebagai vegetasi untuk mereduksi erosi permukaan dilaksanakan di Laboratorium Mekanika Tanah di dalam kotak eksperimen dengan kemiringan lereng dibuat sebesar 45° lapisan tanah disesuaikan pengambilan pada lereng Desa Abang Batudinding dimensi lihat Gambar 3. Pendekatan numerik dengan bantuan Plaxis 3D, diawali dengan memodelkan lapisan tanah dengan properties tanah tiap lapisan hasil pengujian sampel tanah di lapangan dan laboratorium. Pendekatan analisis numerik mendapatkan hasil stabilitas lereng berupa faktor keamanan (Msf), penurunan dan tegangan awal yang tidak diperoleh dalam eksperimen lapangan.



Gambar 3. Rencana peralatan uji model fisik



A Modeling



B. Box uji laboratorium

Gambar 4. Konfigurasi penanaman vegetasi

Pengujian Laboratorium

Uji laboratorium ini terdiri dari 2 bagian yakni: uji sifat fisik (*index properties*) dan sifat mekanis (*engineering properties*) dari sampel tanah dengan dan tanpa akar vegetasi yang terdapat di area studi. Uji sifat-sifat fisik yang dilakukan terhadap sampel tanah di area studi mengikuti standar ASTM yang terdiri dari: uji natural *water content*, sesuai ASTM D-2216, uji *density*, sesuai ASTM D-2937, uji *specific gravity* sesuai ASTM D-854, *sieve analysis*, sesuai ASTM D-136, sehingga diperoleh nilai-nilai seperti: derajat kejenuhan (S_r), porositas (n), angka pori (e), *density* lapangan (γ_s), *spesifik gravity* (G_s) dan *dry density* (γ_d). Sifat-sifat mekanis tanah (kekuatan geser tanah) adalah uji geser langsung (*direct shear test*). Sampel tanah dengan dimensi tinggi ($H=1,785\text{cm}$) dan diameter ($D=6\text{cm}$) disiapkan untuk uji geser langsung (*direct shear test*) pada kelembaban alami yaitu kelembaban tanah pada saat pengumpulan sampel. Pengujian dilakukan melalui penerapan gaya normal dan gaya horizontal dalam kaitannya dengan permukaan geser (ASTM D-3080).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Pengujian tanah dan di laboratorium di perolehan data berupa tanah lanau kepasiran dengan sedikit fraksi lempung dimana tanah ini merupakan hasil pelapukan batuan vulkanik. Tanah Lanau kepasiran ini memiliki sifat tidak plastis dan nilai permeabilitas yang tinggi. Berdasarkan Tabel menunjukkan bahwa tanah vulkanik cenderung lanau kepasiran jika mengandung air dan berkonsistensi lunak sangat mudah tererosi. Tabel 2 adalah hasil pengujian laboratorium yang selanjutnya dipakai input Plaxis 3D.

Tabel 2. Tabel Hasil Laboratorium

Soil (Mohr Coulomb model)	Description	Unit	Value
		Unit Weight (γ)	kN/m ³
	Modulus of Elasticity (E)	kPa	7500
	Effective Poisson's ratio (ν)	-	0.35
	Effective Cohesion (c)	kPa	5
	Effective friction angle (ϕ)	($^{\circ}$)	30
	Incremental Cohesion (c')	kPa	15

Analisis elemen hingga dengan model pengaruh vegetasi terhadap stabilitas lereng dengan menggunakan dua pendekatan *Equivalent cohesion approach* dan *Root as pile approach*. Analisis numerik dengan Plaxis 3D pada penelitian ini dianggap kemiringan homogen bersudut 45 $^{\circ}$ dengan tinggi 4 meter, lebar 4 meter, dan panjang 4 meter. Rumput gajah dikategorikan type A, dimana akar tanaman hanya mencapai lapisan top soil tanah berdasarkan pengamatan di kotak pengujian kedalaman pengakaran mencapai 30 cm. Tabel 3 menunjukkan parameter yang digunakan dalam analisis kemiringan.

Tabel 3. Parameter Lereng

Soil (Mohr Coulomb model)	Description	Unit	Value
		Unit Weight (γ)	kN/m ³
	Modulus of Elasticity (E)	kPa	7500
	Effective Poisson's ratio (ν)	-	0.35
	Effective Cohesion (c)	kPa	5
	Effective friction angle (ϕ)	($^{\circ}$)	30

Berdasarkan metode *Equivalent cohesion approach* seluruh zona akar dianggap sebagai blok tunggal dan sifat kuat geser yang modelkan adalah isotropis. pemodelan lereng dengan vegetasi dilakukan dengan menggunakan *software* Plaxis 3D. Tabel 3 menunjukkan parameter yang digunakan dalam analisis lereng bervegetasi.

Tabel 4. Parameter Lereng pendekatan *Equivalent Cohesion*

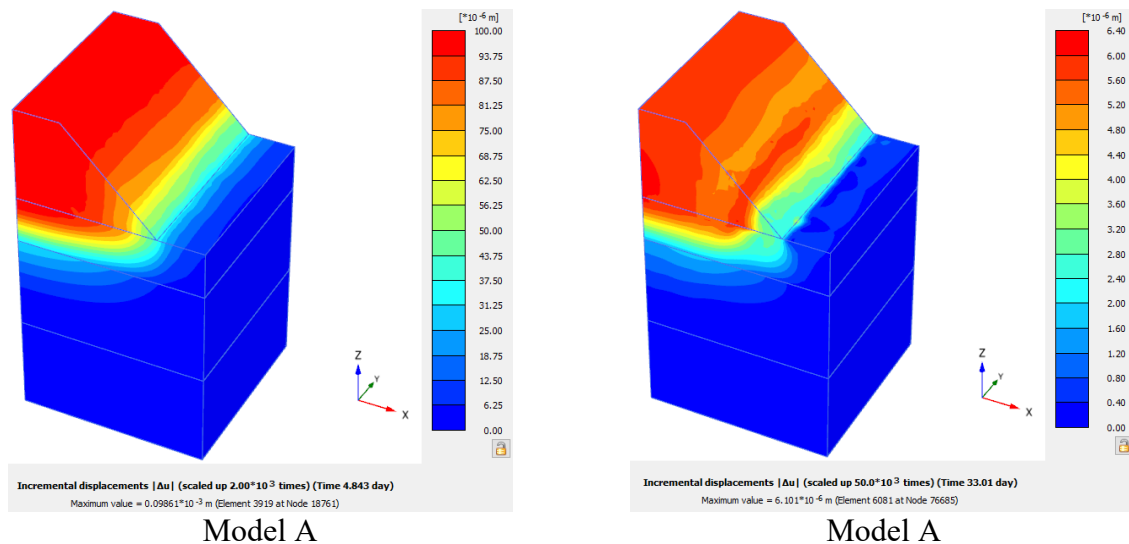
Soil (Mohr Coulomb model)	Description	Unit	Value
		Unit Weight (γ)	kN/m ³
	Modulus of Elasticity (E)	kPa	7500
	Effective Poisson's ratio (ν)	-	0.35
	Effective Cohesion (c)	kPa	5
	Effective friction angle (ϕ)	($^{\circ}$)	30
	Incremental Cohesion (c')	kPa	15

Analisis pendekatan lereng dengan vegetasi menggunakan pendekatan *root as pile approach*, seluruh zona akar dianggap sebagai tiang tunggal dengan kedalaman 30cm pada umur 33 hari dan sifat akar di terapkan pada pile. Modulus elastisitas akar adalah sekitar 2,6 GPa dan kekuatan tarik akarnya bervariasi antara 45 – 145 MPa (rata-rata 75 MPa) (Rao & Das, 2016). Diameter akar rumput gajah berdasarkan pengukuran di box uji umumnya bervariasi antara 0,2-1,2 mm. Tabel 4 menunjukkan parameter yang digunakan dalam analisis kemiringan.

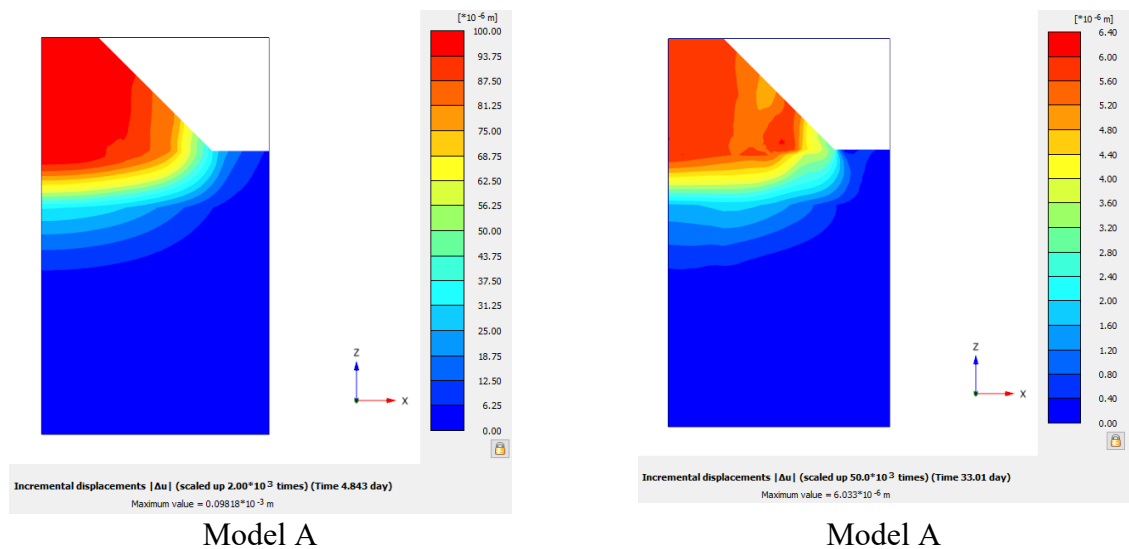
Tabel 5. Parameter Lereng pendekatan *Root as Pile*

	Description	Unit	Value
Soil (Mohr Coulomb model)	Unit Weight (γ)	kN/m ³	16
	Modulus of Elasticity (E)	kPa	7500
	Effective Poisson's ratio (ν)	-	0.35
	Effective Cohesion (c)	kPa	5
	Effective friction angle (ϕ)	($^{\circ}$)	35
Pile	R _{inter}	-	0.8
	Modulus of Elasticity (E _{inter})	GPa	2.5

Hasil analisis reability tanah vulkanik tanpa vegetasi (Model A) diperoleh hasil penurunan dalam kurun waktu 4 hari sampai 33 hari dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6. Hasil analisis menunjukkan pergerakan tanah semakin berkurang seiring bertambahnya waktu, akibat berat sendiri tanah yang disebabkan oleh sifat tanah lanau kepasiran yang lepas. Terbukti pada kurun waktu 4 hari penurunan maksimal sampai dengan 0,1 mm dan penurunan pada kurun waktu 33 hari maksimal sampai dengan 0,064mm, dalam hal ini tanah lanau kepasiran telah melakukan konsolidasi akibat berat sendiri tanah.

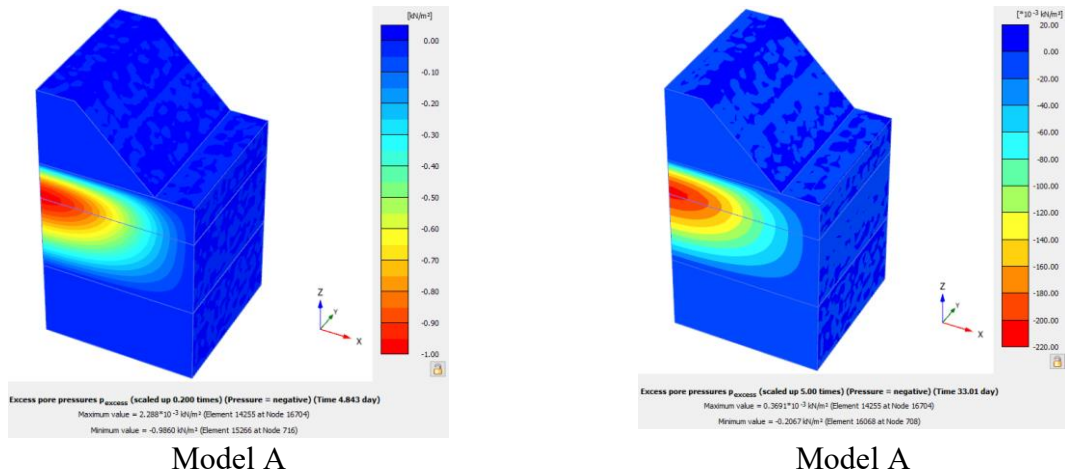


Gambar 5. Visual 3D Perpindahan dalam kurun waktu 4 hari dan 33 hari

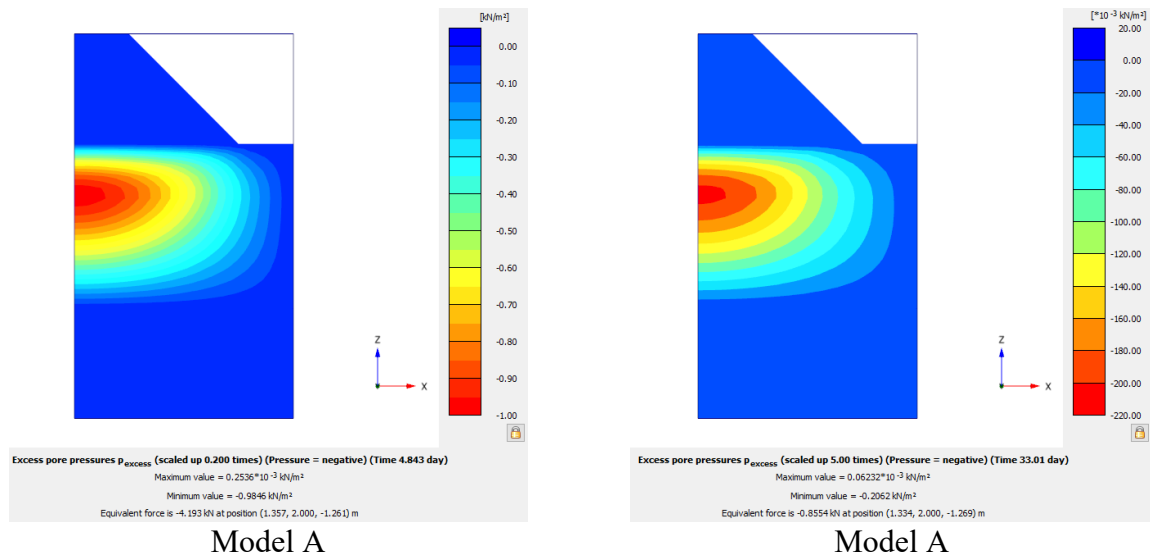


Gambar 6. Potongan Perpindahan dalam kurun waktu 4 hari dan 33 hari

Tegangan tekan yang dihasilkan lereng dalam kurun waktu 4 hari dan 33 hari pada model A terlihat pada Gambar 7 dan Gambar 8. Hasil menunjukkan pada kurun waktu 4 hari terjadi tegangan tekan negatif lereng sebesar 0 sampai -1 kN/m^2 dan tegangan tekan menuju positif pada kurun waktu 33 menghasilkan $-0,220$ sampai $0,020 \text{ kN/m}^2$, sehingga terlihat kenaikan tegangan tanah sehingga tanah diindikasikan akan mengalami penurunan.

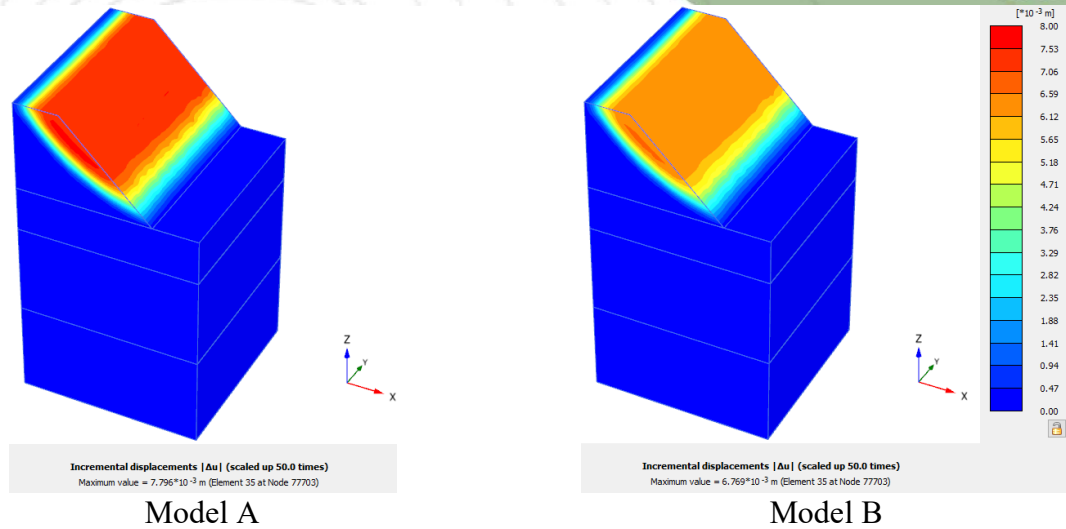


Gambar 7. Visual 3D Gaya Tekanan Lereng dalam kurun waktu 4 hari dan 33 hari

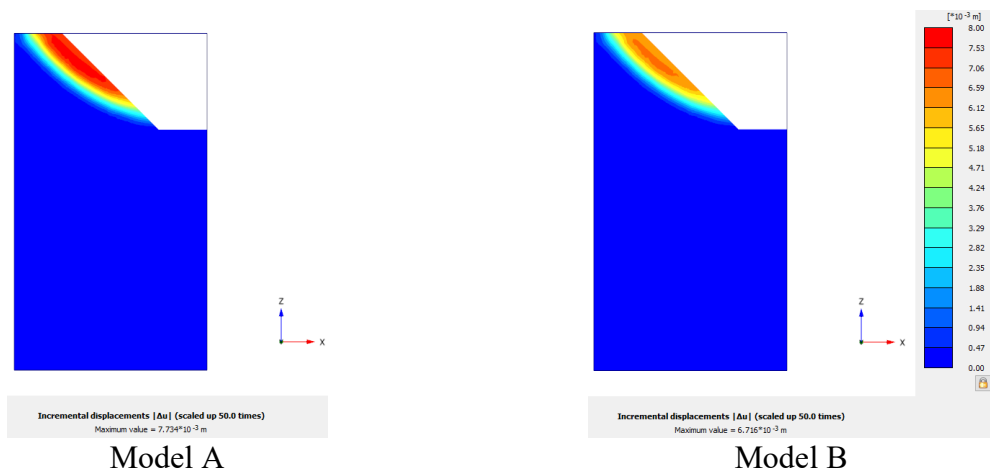


Gambar 8. Potongan Gaya Tekanan Lereng dalam kurun waktu 4 hari dan 33 hari

Analisis selanjutnya dilakukan pemodelan tanah dengan vegetasi yang akarnya dilakukan dengan pendekatan *root as pile approach*. Vegetasi rumput gajah digunakan panjang akar rumput gajah 30 cm pada umur tanam 33 hari berdasarkan pengamatan di kotak eksperimen. Hasil bidang gelincir lereng tanpa vegetasi (model A) dan dengan vegetasi (model B) dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10. Hasil analisis menunjukkan penurunan semakin berkurang akibatnya vegetasi dimana terjadi penurunan tanah dari $7,796 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ menjadi $6,796 \cdot 10^{-3}$, efektifnya penambahan vegetasi pada lereng dengan selisih perpindahan $0,00235 \text{ m}$.

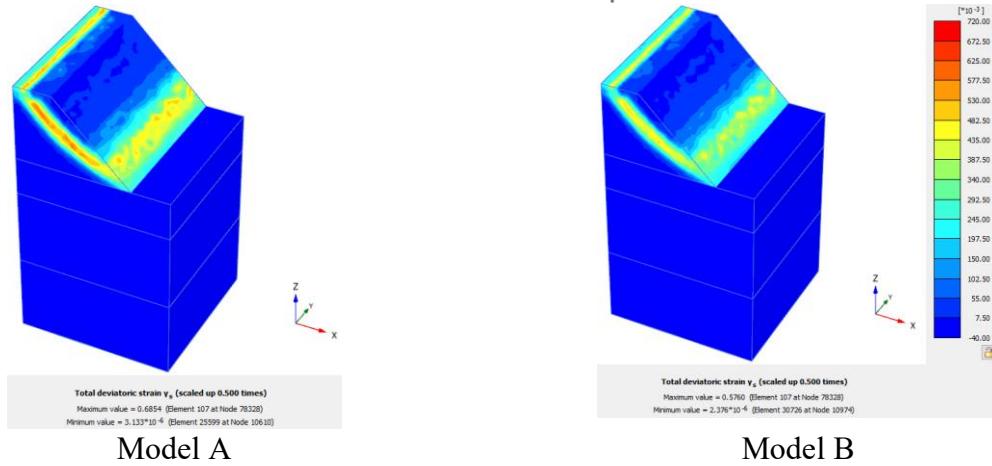


Gambar 9. 3D Hasil Bidang Gelincir

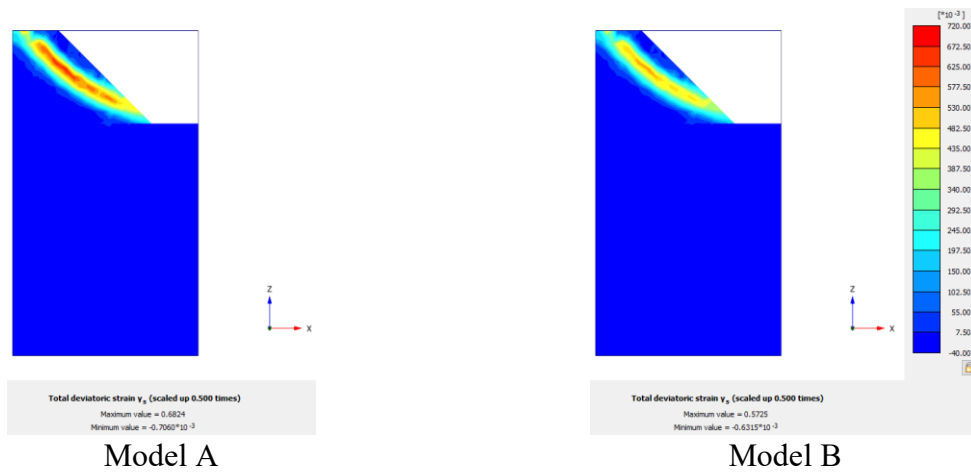


Gambar 10. Potongan Hasil Bidang Gelincir

Gambar 11 dan Gambar 12 menunjukkan analisis tegangan tanah untuk memperoleh nilai angka keamanan (Msf) serta pola gelincir permukaan tanah dalam kondisi keruntuhan kritis. Hasil menunjukkan model tanpa vegetasi tegangan pada bidang gelincir sebesar 0,6854, sedangkan dengan vegetasi menghasilkan tegangan tanah pada bidang gelincir mencapai 0,5760, diperoleh selisih pengurangan tegangan pada bidang gelincir dengan adanya vegetasi sebesar 0,1094, dalam hal ini stabilitas tanah meningkat.

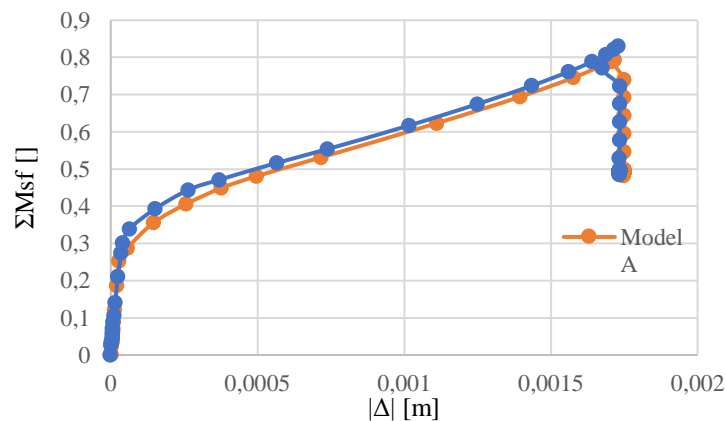


Gambar 11. Hasil 3D Tegangan pada bidang gelincir



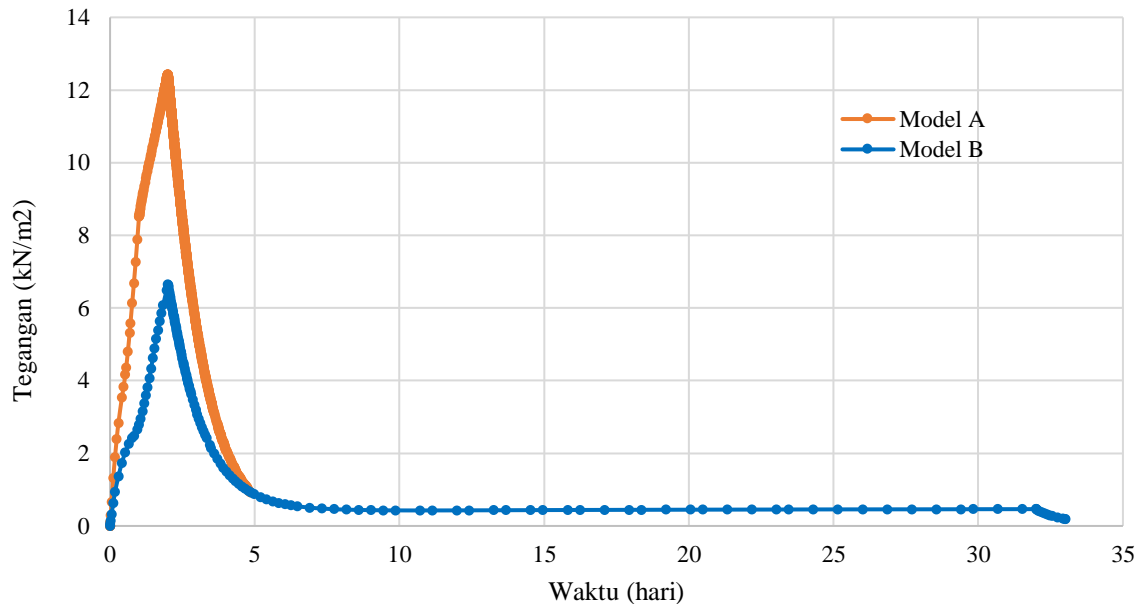
Gambar 52. Potongan Hasil Tegangan bidang gelincir

Grafik pada Gambar 13 dan Gambar 14 menunjukkan grafik antara perpindahan total (Δ) dan *Incremental multipliers* (Msf). Grafik ini faktor keamanan lereng diukur sebesar 0,80 tanpa vegetasi dan 0,83 dengan vegetasi. Pada grafik ini lereng dengan vegetasi faktor keamanannya lebih besar dibandingkan tanpa vegetasi dengan selisih 0,03, sehingga penambahan vegetasi pada lereng menunjukkan kenaikan angka keamanan lereng akibat peningkatan kuat geser tanah pada zona akar.



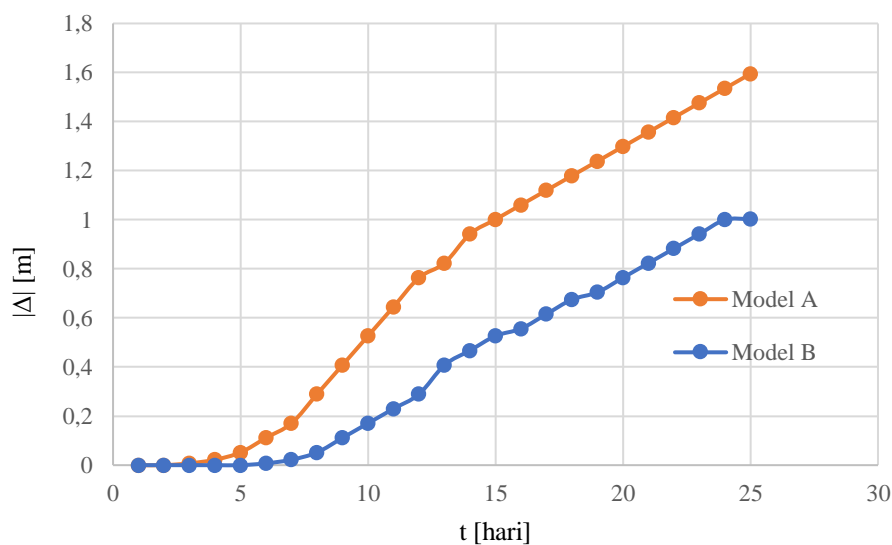
Gambar 13. Grafik Total displacement (Δ) Vs Incremental multipliers (Msf)

Perbandingan grafik tegangan lereng fase awal (4 hari) sampai fase akhir (33 hari) keruntuhan lereng dilihat dari perbandingan waktu dan tegangan tanah pada Gambar 14 menunjukkan tegangan tanah pada lereng tanpa vegetasi sebesar $12,3 \text{ kN/m}^2$ dengan hasil total waktu selama 4,84 hari. Tegangan tanah pada lereng dengan vegetasi sebesar $6,43 \text{ kN/m}^2$ dengan hasil total waktu selama 33 hari. Jadi selisih tegangan tanah dengan penambahan vegetasi mengalami penurunan sebesar $5,87 \text{ kN/m}^2$ dan mendapatkan selisih waktu lebih panjang 28,16 hari.



Gambar 14. Grafik Total Waktu (hari) dengan Tegangan (kN/m^2)

Grafik perbandingan waktu dengan *displacement* ditunjukkan pada Gambar 16 menunjukkan penurunan lereng tanpa vegetasi (model A) dan dengan vegetasi (model B). Analisis penurunan maksimal terjadi pada waktu 25 hari. Penurunan lereng saat hari ke 25 didapat maksimum 1,59 meter tanpa vegetasi dan 1,01 meter dengan vegetasi rumput gajah. Perbandingan selisih penurunan lereng dari model A dan model B adalah 0,58 meter.



Gambar 16. Grafik perbandingan waktu (hari) dengan *displacement* (U) lereng

KESIMPULAN

Tanah vulkanik di lokasi penelitian lanau kepasiran yang lepas jika tanpa perkuatan tambahan akan mengalami penurunan akibat berat sendiri tanah, penambahan vegetasi rumput gajah akar yang kedalaman sampai 30 cm dimana hanya mencapai lapisan top soil tanah mampu mengikat partikel – partikel tanah sehingga tidak mudah dibawa erosi. Analisis pengaruh vegetasi terhadap stabilitas lereng dengan jenis tanah lanau kepasiran pada metode *finite element software* Plaxis 3D dengan pemodelan *root as pile approach*. Peningkatan kuat geser disebabkan oleh penurunan tegangan tanah dan hasil analisis reliabilitas pada lereng tanpa vegetasi dengan lereng bervegetasi rumput gajah, dengan hasil sebagai berikut:

1. Selisih penurunan tegangan pada bidang gelincir antara tanpa vegetasi dan dengan vegetasi sebesar 0,1094 kN/m², dengan efektivitas perpindahan sebesar 0,00235 m, meskipun kecil tapi cukup membantu.
2. Faktor keamanan lereng yang dipertimbangkan tanpa vegetasi berdasarkan *deterministic analysis* adalah 0,80.
3. Berdasarkan analisis *finite element*, faktor keamanan lereng dengan vegetasi dengan menggunakan pendekatan *root as pile approach* diperoleh sebesar 0,83.
4. Pada fase 1 (4 hari) tegangan akibat penambahan vegetasi mendapatkan selisih tegangan 0,01 kN/m² antara tanpa vegetasi dengan penambahan vegetasi.
5. Selisih tegangan akibat penambahan vegetasi yaitu 5,87 kN/m² dan mendapatkan selisih waktu lebih panjang 28,16 hari dari pada tanpa vegetasi.
6. Perbandingan selisih penurunan lereng tertinggi pada hari ke 25 dimana lereng tanpa vegetasi dan dengan vegetasi adalah 0,58 meter, dengan vegetasi penurunan lereng semakin berkurang seiring dengan panjangnya akar dari vegetasi.

DAFTAR PUSTAKA

- aziz, S., & Islam, M. S. (2023). Erosion And Runoff Reduction Potential Of Vetiver Grass For Hill Slopes: A Physical Model Study. *International Journal Of Sediment Research*, 38(1), 49–65. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.08.005>
- Brinkgreve, R. B. J., & Broere, W. (2019). *Plaxis 3d Foundation Version 2* (R. B. J. Brinkgreve & W. Broere (Eds.); 1.5, Number January 2007). Plaxis B.V. P.O. Box 572, 2600 An Delft, Netherlands.
- Damara Putra, I. N., Sinarta, I. N., & Yasa Bagiarta, I. K. (2020). Analisa Kekuatan Struktur Bambu Pada Pembangunan Entry Building Green School Ubud. *Ukarst*, 4(1), 39. <https://doi.org/10.30737/Ukarst.V4i1.661>
- Doug Brown. (2010). *Green Technologies For Reducing Slope Erosion, Division Of Design, Landscape Architecture*. 1–12.
- Dumadi, E. H., Abdullah, L., & Sukria, H. A. (2021). Kualitas Hijauan Rumput Gajah (*Pennisetum Purpureum*) Berbeda Tipe Pertumbuhan: Review Kuantitatif. *Jurnal Ilmu Nutrisi Dan Teknologi Pakan*, 19(1), 6–13.
- G. Tejakusuma, I. (2019). Soil Bioengineering Dan Peranannya Dalam Geologi Lingkungan. *Jurnal Sains Dan Teknologi Mitigasi Bencana*, 11(1), 51–57. <https://doi.org/10.29122/jstmb.v11i1.3684>
- Gray, D. H., & Sotir, R. B. (1996). *Biotechnical And Soil Bioengineering Slope Stabilization: A Practical Guide For Erosion Control*. John Wiley & Sons.
- Islam, M. S., & Badhon, F. F. (2017). Sandy Slope Stabilization Using Vegetation. *Proceedings, International Conference On Disaster Risk Mitigation, September*.
- Jotianskasa, A., Mairaing, W., & Tansamrit, S. (2014). Infiltration And Stability Of Soil Slope With Vetiver Grass Subjected To Rainfall From Numerical Modeling. *Unsaturated Soils: Research And Applications - Proceedings Of The 6th International Conference On Unsaturated Soils, Unsat 2014*, 2, 1241–1247. <https://doi.org/10.1201/B17034-181>
- Kurniawan, A., & Krol, B. G. C. M. B. (2014). Spatio Temporal Analysis Of Land Use Change For Supporting Landslide Exposure Assessment. *Indonesia Journal Of Geography*, 46(2), 104–124.



- Kusminingrum, N. (2011). Peranan Rumput Vetiver Dan Bahia Dalam Meminimasi Terjadinya Erosi Lereng (The Role Of Vetiver And Bahia Grass In Minimizing Slope Erosion). *Pusat Litbang Jalan Dan Jembatan*, 1(September), 1–12.
- Ramin, N., Soghra, M., Ehsan, A., & Mehrdad, N. (2012). Forest Road Stabilization Using Bioengineering Methods In Caspian Forest ., *Formec, Croatia 2012*, 1–6.
- Rao, K. S., & Das, S. K. (2016). Modelling Of Slope Stability Analysis With Vegetation. *Proceedings Of International Conference On Recent Advances In Mechanics And Materials (Icramm-2016)*, 1.
- Salter, D., Howell, J., & Eagle, S. (2020). *Bioengineering For Green Infrastructure* (1st Ed.). Asian Development Bank. <https://www.adb.org/terms-use#openaccess><http://www.adb.org/publications/corrigenda>
- Sinarta, I. Nengah, Rifa'i, A., Fathani, T. F., & Wilopo, W. (2020). Spatial Analysis Of Safety Factors Due To Rain Infiltration In The Buyan-Beratan Ancient Mountains. *International Review Of Civil Engineering*, 11(2), 90–97. <https://doi.org/10.15866/irece.v11i2.17668>
- Sinarta, I. Nengah, Wahyuni, P. I., & Aryastana, P. (2023). Analysis Of Debris Flow Hazard In Volcanic Soil By The Flood Flows Modelling (Dflowz) And Nakayasu Synthetic Unit Hydrograph. *International Review Of Civil Engineering*, 14(2), 112–118. <https://doi.org/10.15866/irece.v14i2.20470>
- Sinarta, I N, Wahyuni, P. I., & Aryastana, P. (2021). Analysis Of Discharge And Area Of The Debris Flow Based On Geological Structural And Rainfall Levels In The Slopes Of Mount Abang, Kintamani. *Iop Conf. Series: Materials Science And Engineering*, 1098. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1098/2/022064>
- Sinarta, I Nengah, Wahyuni, P. I., & Mahendrayani, A. . I. W. (2021). Analisis Ancaman Gerakan Tanah Dan Kerusakan Lingkungan Pada Pembangunan Infrastruktur Shortcut. *Konferensi Nasional Teknik Sipil Ke-15 (Konteks-15)*, 82(1), 1–10.
- Subramaniam, P. (2011). *Reliability Based Analysis Of Slope, Foundation And Retaining Wall Using Finite Element Method*. Institute Of Technology Rourkela-769008.