

## ***Soil Bioengineering: Metode Alternatif Peningkatan Stabilitas Lereng***

Fatin Adriati<sup>1\*</sup>, Diki Surya Irawan<sup>2</sup>, Eli Jamilah Mihardja<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Universitas Bakrie, Indonesia (10 pt)

\**email*: fatin.adriati@bakrie.ac.id

Info Artikel	ABSTRAK
Dikirim: 21 Mei 2024 Diterima: 23 September 2024 Diterbitkan: 30 November 2024	Dalam dekade terakhir, terjadi peningkatan tanah longsor dan keruntuhan lereng yang signifikan. Guna menjawab permasalahan tersebut, stabilisasi lereng menggunakan metode geo-struktur menjadi sebuah kebutuhan. Seiring dengan perkembangan metode geo-struktur, metode <i>soil bioengineering</i> menjadi alternatif dalam stabilisasi lereng, baik untuk lereng alami maupun lereng buatan. <i>Soil bioengineering</i> sendiri merupakan metode ramah lingkungan untuk stabilisasi dan perkuatan pada lahan miring (lereng) melalui penanaman vegetasi. Tujuan penelitian ini adalah untuk membandingkan antara metode geo-struktur (menggunakan <i>soil nailing</i> dan perkuatan tiang) dan metode <i>soil bioengineering</i> (menggunakan <i>vetiver grass</i> dan <i>switchgrass</i> ) dalam stabilisasi lereng. Analisis stabilitas lereng dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga dan mempertimbangkan nilai faktor keamanan (SF). Jika dibandingkan dengan metode geo-struktur, metode <i>soil bioengineering</i> ternyata mampu menandingi sebagai metode stabilisasi lereng pada tiga kondisi tanah yang berbeda, yaitu kondisi tanpa air, kondisi jenuh, dan kondisi tidak jenuh. Metode <i>soil nailing</i> menghasilkan pengaruh paling besar dalam peningkatan stabilitas lereng (SF = 1.384 – 3.096), sedangkan yang berpengaruh paling kecil adalah metode perkuatan tiang (SF = 1.045 – 2.236). Metode <i>soil bioengineering</i> dengan menggunakan <i>switchgrass</i> (SF = 1.060 – 2.322) dan <i>vetiver grass</i> (SF = 1.090 – 2.449), berada pada tingkat menengah di antara metode <i>soil nailing</i> dan perkuatan tiang. Bisa dikatakan bahwa metode <i>soil bioengineering</i> cukup setara dengan metode perkuatan tiang dalam meningkatkan nilai SF meskipun masih jauh di bawah metode <i>soil nailing</i> . Dengan demikian, metode <i>soil bioengineering</i> terbukti dapat menggantikan metode geo-struktur dalam meningkatkan stabilitas lereng.
<b>Kata kunci:</b> Metode elemen hingga; Perkuatan tiang; <i>Soil bioengineering</i> ; <i>Soil nailing</i> ; Stabilitas Lereng.	

### **1. PENDAHULUAN**

Dalam beberapa dekade terakhir, aktivitas geologi, pengaruh hidrologi seperti curah hujan dan rembesan, serta campur tangan manusia menyebabkan peningkatan signifikan dalam terjadinya tanah longsor dan kegagalan lereng [1]. Guna menjawab permasalahan penting dalam rekayasa geoteknik tersebut, stabilisasi lereng menjadi suatu kebutuhan. Stabilisasi lereng dengan metode geo-struktur, contohnya metode *soil nailing* dan perkuatan tiang, merupakan salah satu metode yang banyak digunakan untuk memperkuat stabilitas beragam lereng [2] [3]. Stabilisasi lereng dengan metode *soil nailing* memperkuat lereng dengan cara pemasangan *nail*/paku (batang baja yang dipasang dengan jarak berdekatan). Perkuatan dengan *soil nail* bersifat pasif, yang berasal dari interaksi antara tanah dengan *nail*/paku seiring dengan terjadinya deformasi tanah pada saat dan sesudah konstruksi. Metode *soil nailing* diketahui mampu menahan gaya tarik, gaya geser, dan momen lentur [4].

Perkuatan *soil nailing* yang optimum pada stabilisasi lereng dipengaruhi oleh parameter *nail/paku*, khususnya orientasi/kemiringan *nail/paku*, panjang *nail/paku*, dan jumlah *nail/paku* [5] [6]. Tak jauh berbeda dengan metode *soil nailing*, metode perkuatan tiang juga diketahui mampu meningkatkan stabilitas lereng. Tiang berfungsi sebagai elemen perkuatan sekaligus penahan gaya lateral. Fungsi tersebut dilakukan dengan mereduksi gaya lateral dengan cara memindahkannya ke tiang yang ditempatkan pada jarak tertentu di bagian atas atau pada badan lereng. Stabilisasi lereng dengan menggunakan tiang dipengaruhi oleh panjang tiang, jarak tiang, dan diameter tiang [7].

Pemanfaatan vegetasi di lereng untuk mencegah pergerakan massa yang dangkal sudah banyak diketahui [8] [9]. Metode yang lebih dikenal dengan sebutan *soil bioengineering* ini merupakan salah satu metode alternatif dalam stabilisasi lereng, baik untuk lereng alami maupun lereng buatan, di samping metode geo-struktur yang sudah lebih berkembang. *Soil bioengineering* adalah metode ramah lingkungan melalui penanaman vegetasi untuk stabilisasi dan perkuatan tanah pada lahan miring (lereng), dengan berkontribusi dalam 2 (dua) cara, yaitu secara hidrologis dan mekanis [10] [1]. Bagian vegetasi yang berperan dalam stabilisasi lereng adalah akar. Secara hidrologis, akar meningkatkan daya hisap tanah [11] [12] [9], yang mengubah struktur tanah untuk meningkatkan kekuatan geser dari material komposit tanah dengan akar [13] [14] [15] [9]. Sementara itu, secara mekanis, akar meningkatkan stabilitas lereng dengan memotong bidang longsor potensial yang mungkin terjadi [9] dan berfungsi sebagai serat pembawa tegangan tarik, yang memindahkan tegangan geser pada kerangka tanah menjadi kekuatan tarik melalui gesekan antarmuka sepanjang permukaannya [16] [9].

Kekuatan tarik melalui gesekan antarmuka tanah yang tertembus akar membentuk kekuatan geser tambahan. Kekuatan geser dari tanah yang tertembus akar dipengaruhi oleh sudut geser dalam dari tanah yang kosong (tidak ditembus akar) [17] [9] atau tanah tanpa penahan [18] [9]. Selain itu, kekuatan geser dari tanah yang tertembus akar juga dipengaruhi oleh parameter yang disebut kohesi akar [15]. Nilai kohesi akar ( $c_R$ ) ditentukan dengan berbagai model berdasarkan pengukuran panjang akar, kekuatan tarik akar, dan rasio luas penampang akar [19] [20] [14] [9]. Rujukan [8] dalam rujukan [21] menentukan peningkatan kekuatan geser akibat keberadaan akar di dalam tanah atau kohesi akar sebagai:

$$c_R = 1.2 \times T_R \times RAR \quad (1)$$

Dimana  $c_R$  [ $\text{Nm}^{-2}$ ] adalah kohesi akar,  $T_R$  [ $\text{Nm}^{-2}$ ] adalah kekuatan tarik rata-rata dari rata-rata jumlah akar dengan rata-rata diameter per satuan luas tanah, dan  $RAR$  [ $\text{m}^2\text{m}^{-2}$ ] adalah rasio luas penampang akar (perbandingan antara luas penampang total akar dengan luas geser total).

Pemilihan vegetasi yang sesuai menjadi langkah awal yang penting dalam pendekatan metode *soil bioengineering*. *Vetiver grass* (*Vetiveria nemoralis* A. Camus) atau dikenal juga sebagai rumput akar wangi, merupakan vegetasi asli negara tropis dan subtropis seperti Indonesia (lihat Gambar 1a). *Vetiver grass* dipengaruhi oleh jenis tanah dan kondisi lingkungan, yang berkaitan dengan kemampuan *vetiver grass* untuk bertahan dalam jangka waktu yang lama. *Vetiver grass* telah dipilih sebagai salah satu vegetasi yang banyak digunakan untuk stabilisasi lereng dengan metode *soil bioengineering* [1] [22] [21]. Pemilihan *vetiver grass* didasarkan pada kemampuannya dalam meningkatkan kekuatan geser tanah, terutama kohesi secara signifikan [18] [1]. Dalam proses pertumbuhannya, *vetiver grass* berinteraksi dengan tanah sehingga membentuk material komposit yang terdiri dari akar-akar yang berkekuatan tarik tinggi. Akar menempel pada tanah yang memiliki kekuatan tarik lebih rendah dan mengikat partikel tanah tersebut, selanjutnya mampu mentransfer tegangan geser dalam matriks tanah menjadi tegangan tarik. Oleh karena itu, *vetiver grass* dapat dikatakan berperan sebagai paku tanah alami. Selain karena kontribusinya terhadap kekuatan geser tanah, *vetiver grass* yang digolongkan sebagai rumput namun berperilaku seperti pohon, dipilih karena sifatnya yang cepat tumbuh dan membutuhkan sedikit perawatan. *Vetiver grass* juga memiliki estetika yang lebih baik karena dapat ditanam berdampingan dengan vegetasi asli lainnya [23]. Selain *vetiver grass*, *switchgrass* (*Panicum virgatum*) sebagai tanaman alang-alang asal Amerika juga dikembangkan untuk metode *soil bioengineering* (lihat Gambar 1b). Meskipun lebih dikenal sebagai bahan yang cocok untuk memproduksi *biofuel*, *switchgrass* direkomendasikan

untuk stabilisasi lereng jalan raya karena akarnya yang dalam [24]. *Switchgrass* menjadi pilihan karena ketahanannya dan pertumbuhannya yang cepat [25].



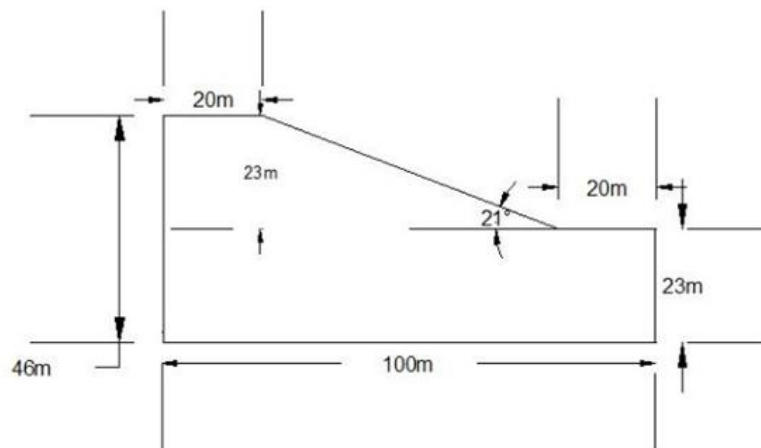
Gambar 1: (a) *Vetiver grass* (sumber: [www.everand.com](http://www.everand.com)); (b) *Switchgrass* (sumber: [www.metroblooms.org](http://www.metroblooms.org))

Berdasarkan penjelasan sebelumnya, sasaran penelitian ini adalah untuk menyajikan berbagai metode dalam meningkatkan stabilitas lereng. Metode *soil bioengineering* dianggap sebagai alternatif pengganti metode geo-struktur karena keterbatasan dana suatu proyek. Oleh karena itu, tujuan dari studi ini adalah untuk menyajikan perbandingan dua metode stabilitas lereng, khususnya stabilisasi lereng dengan geo-struktur, menggunakan metode *soil nailing* dan perkuatan tiang, serta metode *soil bioengineering*. Penelitian ini mempertimbangkan dua jenis vegetasi dalam metode *soil bioengineering*, yaitu menggunakan *vetiver grass* dan *switchgrass*.

## 2. METODE PENELITIAN

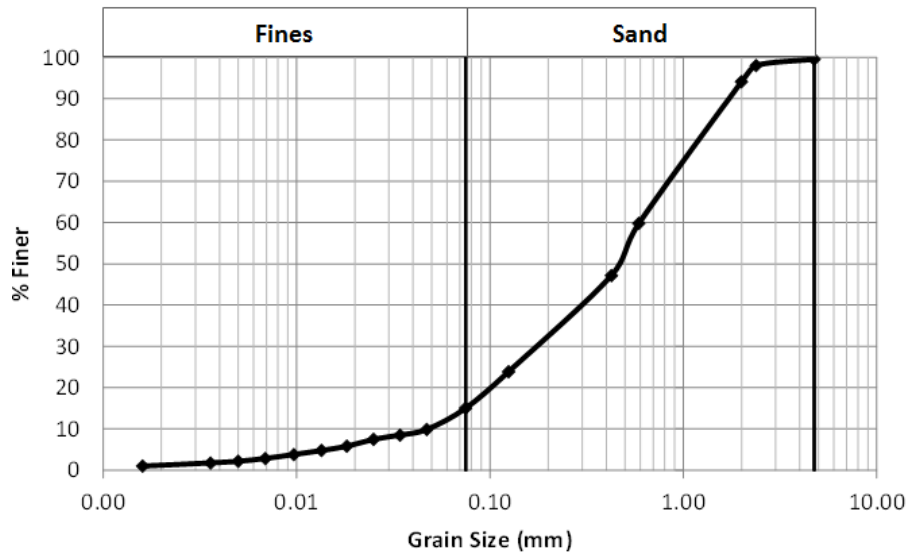
Analisis stabilitas lereng dilakukan menggunakan metode elemen hingga atau *finite element method* (FEM), yaitu menggunakan *software* Plaxis versi 8.6. Model elemen hingga yang diterapkan untuk pemodelan dalam penelitian ini adalah *plain strain*, dikarenakan geometri yang seragam sepanjang sumbu z. Pemodelan tanah mengikuti kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb untuk masing-masing metode stabilisasi lereng, yaitu *soil nailing*, perkuatan tiang, dan *soil bioengineering* dengan menggunakan *vetiver grass* dan *switchgrass*. Analisis stabilitas lereng dipertimbangkan dari segi nilai faktor keamanan atau *safety factor* (SF) yang diperoleh melalui tipe kalkulasi *safety* atau *phi/c reduction* dalam model numerik. Hal ini dilakukan untuk mempelajari perbandingan peningkatan nilai SF dari masing-masing metode tersebut. Dalam studi ini, kontribusi vegetasi terhadap stabilitas lereng dibatasi hanya secara mekanis saja.

### 2.1 Geometri Lereng dan Parameter Tanah



Gambar 2: Geometri lereng sebagai *input* dalam pemodelan numerik

Gambar 2 menunjukkan kemiringan lereng sebagai *input* geometri pada model numerik. Model lereng memiliki tinggi sebesar 23 m, panjang dasar sebesar 60 m, dan kemiringan sebesar  $21^\circ$ . Selanjutnya, parameter tanah yang digunakan untuk pemodelan mengacu pada parameter tanah asli di Cianjur, Jawa Barat, Indonesia. Berdasarkan kurva distribusi butir pada Gambar 3 dan parameter yang tercantum pada Tabel 1, tanah asli tersebut diklasifikasikan ke dalam golongan pasir berlempung (SC) dengan kepadatan sedang menurut Unified Soil Classification System (USCS). Beberapa parameter tanah dalam Tabel 1, diantaranya yaitu sudut geser dalam ( $\phi$ ), kohesi ( $c$ ), modulus elastisitas ( $E$ ), dan angka Poisson ( $\nu$ ), merupakan parameter *input* untuk material model Mohr-Coulomb guna memodelkan tanah yang memiliki karakteristik elastik-plastik, kondisi tanah yang terdrainasi.

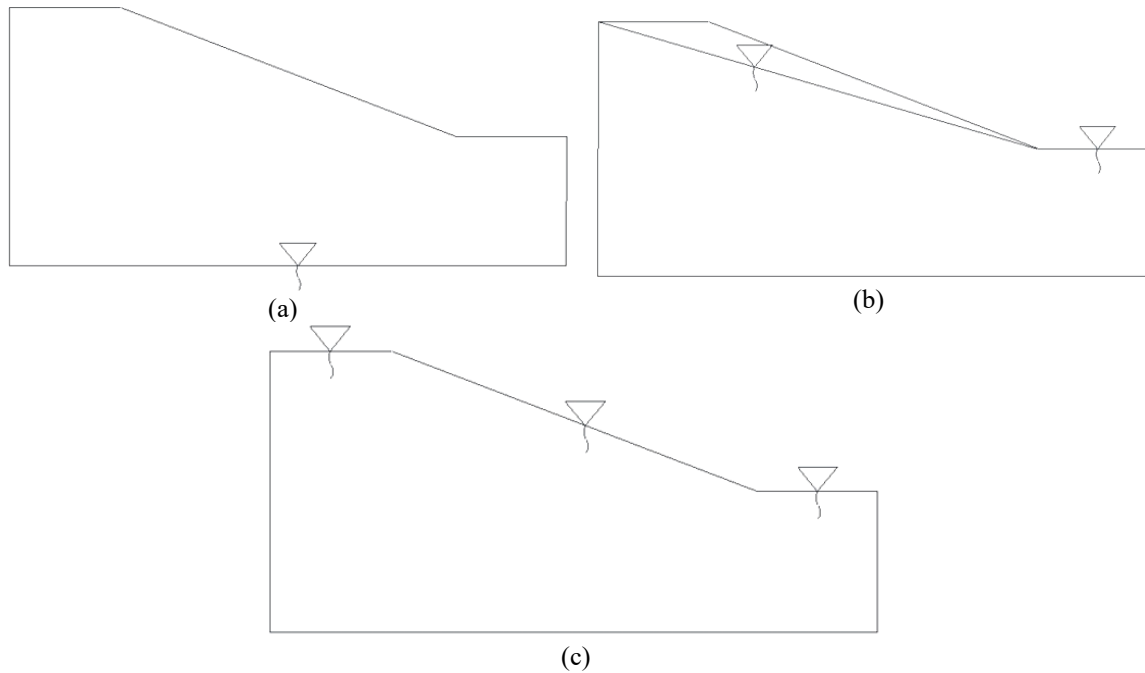


Gambar 3: Kurva distribusi ukuran butir tanah pasir berlempung

Tabel 1: Parameter tanah untuk pemodelan numerik

Parameter		Nilai	Satuan
<i>Specific gravity</i>	G <sub>s</sub>	2.69	-
Angka pori	e	0.95	-
Kadar air	w <sub>c</sub>	43.55	%
Batas cair	LL	53.25	%
Indeks plastisitas	PI	17.28	%
Berat volume tak jenuh	$\gamma_{unsat}$	15.56	kN/m <sup>3</sup>
Berat volume jenuh	$\gamma_{sat}$	18.31	kN/m <sup>3</sup>
Konduktivitas hidrolik	k	10 <sup>-3</sup>	cm/s
Sudut geser dalam	$\phi$	32	°
Kohesi	c	11.01	kN/m <sup>2</sup>
Modulus elastisitas	E	22500	kN/m <sup>2</sup>
Angka Poisson	$\nu$	0.3	-

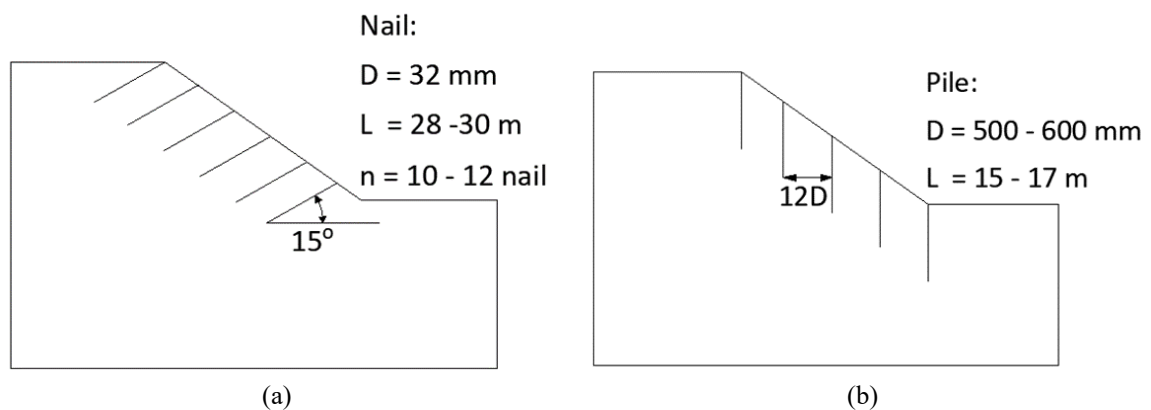
Pemodelan dilakukan pada 3 (tiga) kondisi tanah yang berbeda (diilustrasikan pada Gambar 4) untuk masing-masing metode stabilisasi lereng, yaitu (1) kondisi tanpa muka air tanah (kondisi tanpa air); (2) kondisi dengan muka air tanah tertentu (kondisi tidak jenuh); dan (3) kondisi dengan muka air selevel kemiringan lereng (kondisi jenuh).



Gambar 4: Model lereng (a) kondisi tanpa air; (b) kondisi tidak jenuh; dan (c) kondisi jenuh

## 2.2 Parameter Nail/Paku dan Tiang

Berdasarkan perhitungan awal untuk geometri lereng yang spesifik pada studi kasus ini [26] [27], diperoleh variasi parameter *nail*/paku sebagai berikut: *nail*/paku divariasikan dengan panjang antara 28 – 30 m, dengan diameter antara 29 – 32 mm, dan sejumlah 10 – 12 buah, dipasang dengan kemiringan 15°. Sementara itu, parameter tiang divariasikan dengan panjang antara 15 – 17 m, dengan diameter 500 – 600 mm, dan dipasang dengan jarak tanam 12D (D adalah diameter tiang). Penelitian ini mempertimbangkan 3 (tiga) model yang berbeda berdasarkan variasi parameter *nail*/paku dan tiang, dengan penempatan seperti yang diilustrasikan pada Gambar 5. Parameter *nail*/paku dan tiang yang digunakan dalam pemodelan numerik dirangkum dalam Tabel 2.



Gambar 5: Model lereng (a) variasi dan penempatan *nail*/paku; (b) variasi dan penempatan tiang

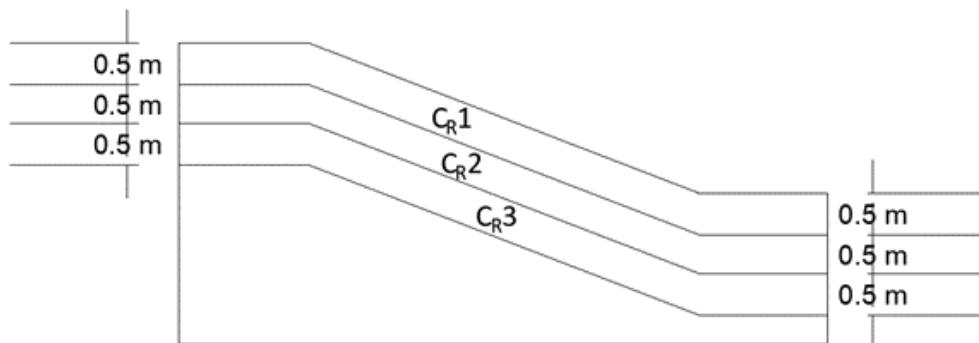
Tabel 2: Parameter *nail/paku* dan tiang untuk pemodelan numerik

Parameter		Nilai	Satuan
<b>Soil Nail</b>			
Kuat tarik	$f_y$	525	MPa
Modulus elastisitas	E	$2 \times 10^8$	kN/m <sup>2</sup>
Kemiringan		15	°
Jarak antar <i>nail/paku</i>	$L_{spacing}$	2	m
<b>Tiang</b>			
Kuat tekan	$f'_c$	52	MPa
Modulus elastisitas	E	$3.3 \times 10^6$	kN/m <sup>2</sup>
Angka Poisson	$\nu$	0.15 – 0.25	-

### 2.3 Parameter *Vetiver Grass* dan *Switchgrass*

Kedalaman sistem matriks akar merupakan kunci parameter mekanis dari lereng dengan tutupan vegetasi, yaitu *vetiver grass* dan *switchgrass*. Sistem matriks akar sendiri merupakan salah satu variabel dari fungsi kohesi tambahan atau kohesi akar ( $c_R$ ). Akar *vetiver grass* mampu menembus jauh ke dalam tanah hingga kedalaman 2 – 3.5 m, dengan kisaran diameter akar kurang lebih 0.73 – 1.60 mm [28]. Sedangkan akar *switchgrass* mampu mencapai kedalaman maksimal 3 – 4 m, dengan diameter akar 0.76 – 1.91 mm.

Baik *vetiver grass* maupun *switchgrass* dikatakan dapat meningkatkan kekuatan geser tanah di sekitarnya. Meskipun demikian, peningkatan kekuatan geser tanah menurun seiring dengan penetrasi akar yang semakin dalam [29]. Oleh karena itu, pengaruh sistem matriks akar dimodelkan dengan menyesuaikan distribusi nilai kohesi akar terhadap lapisan tanah sebagai fungsi dari kedalaman zona akar pada lereng. Dalam model tersebut, lapisan sedalam 1.5 m dianggap sebagai zona pengaruh distribusi nilai kohesi akar. Zona tersebut dibagi menjadi 4 (empat) sub-lapisan (lapisan 0 – 0.5 m; lapisan 0.5 – 1 m; lapisan 1 – 1.5 m; dan lapisan 1.5 m – batuan dasar). Selanjutnya, kohesi tanah di setiap lapisan diubah dengan menambahkan nilai kohesi akar yang sesuai [30]. Ilustrasi dari model dapat dilihat pada Gambar 6. Nilai kohesi akar *vetiver grass* dan *switchgrass* yang digunakan pada pemodelan numerik dirangkum pada Tabel 3.



Gambar 6: Model lereng dengan distribusi kohesi akar terhadap lapisan tanah

Tabel 3: Nilai kohesi akar untuk pemodelan numerik

Diameter akar – d (mm)	Kedalaman akar – z (m)	Kuat tarik (MPa)	Kohesi akar (kPa)
<b>Switchgrass</b>			
0.75	0.5	22.88	102.96
	1		68.64
	1.5		34.32
1.125	0.5	20.19	90.86
	1		60.57
	1.5		30.29
1.91	0.5	15.55	69.98
	1		46.65
	1.5		23.33

Diameter akar – d (mm)	Kedalaman akar – z (m)	Kuat tarik (MPa)	Kohesi akar (kPa)
<i>Vetiver grass</i>			
0.73	0.5	59.72	268.72
	1		179.15
	1.5		89.57
1.165	0.5	37.38	168.20
	1		112.14
	1.5		56.07
1.6	0.5	23.40	105.29
	1		70.19
	1.5		35.10

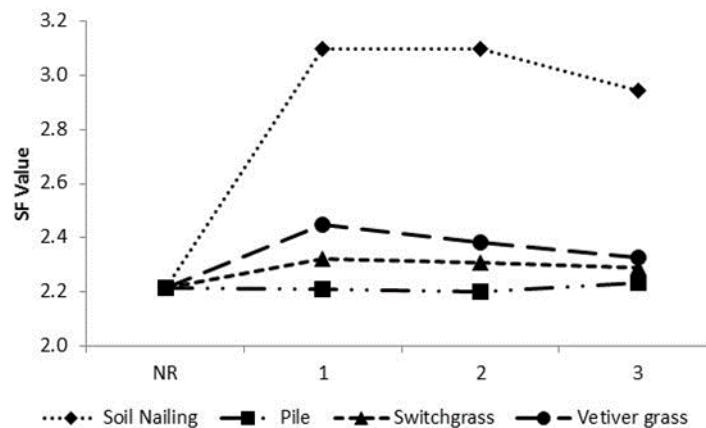
(Sumber: Nugraha &amp; Hamdhan, 2016)

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Nilai SF Perkuatan Geo-Struktur dan *Soil Bioengineering*

##### 1) Kondisi Tanpa Air

Pada kondisi tanpa muka air tanah, lereng berada pada keadaan aman dengan nilai SF sebesar 2.213. Meskipun demikian, baik metode geo-struktur maupun metode *soil bioengineering* mampu meningkatkan nilai SF seperti terlihat pada Gambar 7. Dari kurva terlihat bahwa metode *soil nailing* merupakan metode yang paling berpengaruh dalam meningkatkan nilai SF, dengan peningkatan hingga 40%. Kemudian disusul dengan metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass* dan *switchgrass* dengan peningkatan nilai SF masing-masing sebesar 11% dan 5%. Sedangkan metode yang berpengaruh paling kecil adalah metode perkuatan tiang dengan kenaikan nilai SF hanya sebesar 1%.

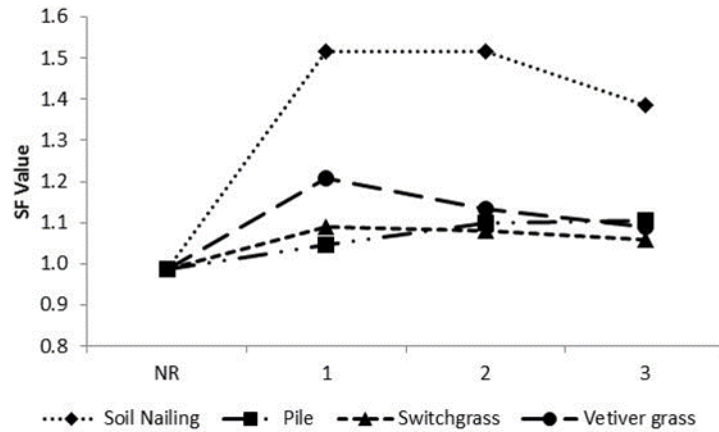


Gambar 7: Perbandingan nilai SF metode stabilisasi lereng pada kondisi tanpa air

##### 2) Kondisi Jenuh

Kehadiran air menyebabkan terjadinya kondisi jenuh yang diketahui dapat menurunkan kekuatan geser tanah, dan pada akhirnya menurunkan stabilitas lereng. Teori tersebut kembali dibuktikan pada penelitian ini dimana nilai SF untuk lereng tanpa perkuatan (NR) pada kondisi jenuh turun menjadi 0.988. Nilai SF ini 55% lebih kecil dibandingkan dengan lereng tanpa perkuatan dalam kondisi tanpa air. Untuk nilai SF pada kondisi jenuh, mengalami tren peningkatan yang serupa dengan kondisi tanpa air untuk masing-masing metode stabilisasi lereng (lihat Gambar 8). Metode *soil nailing* masih menjadi metode yang paling berpengaruh, dengan peningkatan nilai SF hingga 53%. Metode yang berpengaruh dalam meningkatkan stabilitas lereng selanjutnya adalah metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass*, dimana peningkatan nilai SF mencapai 22%. Pada kondisi jenuh ini, terjadi perubahan untuk metode yang paling kecil pengaruhnya. Jika pada kondisi tanpa air

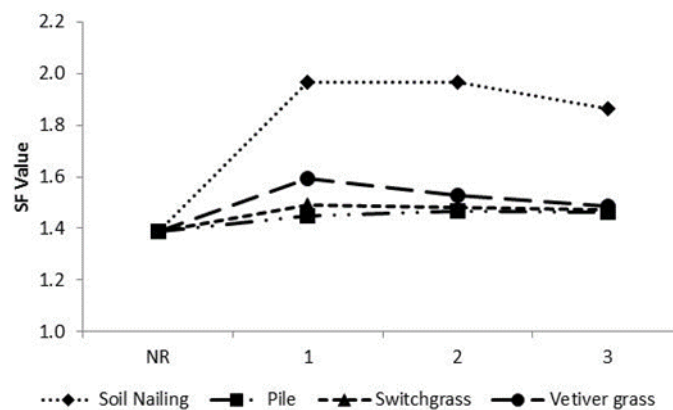
sebelumnya adalah perkuatan tiang yang paling kecil pengaruhnya terhadap stabilitas lereng, kini pada kondisi jenuh justru metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass* yang paling kecil pengaruhnya. Kenaikan nilai SF untuk metode perkuatan tiang sebesar 12% sedangkan untuk metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass* sebesar 10%, dimana selisih keduanya tidak terlalu besar hanya sebesar 2%.



Gambar 8: Perbandingan nilai SF metode stabilisasi lereng pada kondisi jenuh

### 3) Kondisi Tidak Jenuh

Pada kondisi tidak jenuh, keberadaan air tidak menyebabkan kejenuhan tanah. Namun hal tersebut tetap menyebabkan penurunan kuat geser tanah sehingga mengakibatkan penurunan nilai SF dan stabilitas lereng. Penurunan stabilitas lereng pada kondisi tidak jenuh tentunya tidak se-ekstrem kondisi jenuh. Nilai SF berkurang sebesar 37%, menjadi 1.389 pada lereng tanpa perkuatan dengan kondisi tanpa air. Untuk nilai SF pada kondisi tidak jenuh, juga mengalami tren peningkatan seperti terlihat pada Gambar 9, untuk masing-masing metode stabilisasi lereng. Peningkatan yang terjadi bahkan identik dengan kondisi tanpa air, dimana urutan metode dari yang paling berpengaruh terhadap stabilitas lereng hingga yang paling kecil pengaruhnya, yaitu metode *soil nailing*, *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass*, *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass*, kemudian perkuatan tiang. Kenaikan nilai SF masing-masing mencapai 42%, 15%, 7%, dan 6%.



Gambar 9: Perbandingan nilai SF metode stabilisasi lereng pada kondisi tidak jenuh

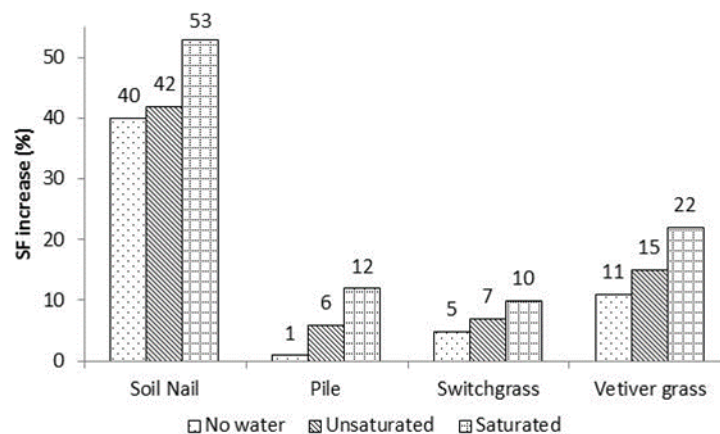
Tren yang ada menunjukkan bahwa metode yang paling berpengaruh dalam meningkatkan stabilitas lereng adalah metode *soil nailing*, sedangkan yang paling kecil pengaruhnya adalah metode perkuatan tiang. Metode *soil bioengineering* itu sendiri, dengan menggunakan *vetiver grass* dan *switchgrass*, berada pada tingkat menengah. Cukup setara dengan metode perkuatan tiang dalam meningkatkan nilai SF, meskipun masih jauh di bawah metode *soil nailing*. Dibandingkan dengan metode geo-struktur, metode *soil bioengineering* mempunyai kecenderungan serupa pada ketiga



kondisi. Dengan demikian, metode *soil bioengineering* dapat dikatakan mampu menandingi metode geo-struktur dan menjadi alternatif sebagai metode stabilisasi lereng.

### 3.2 Peningkatan Nilai SF Metode Geo-Struktur dan *Soil Bioengineering*

Seperti terlihat dalam diagram pada Gambar 10, metode *soil nailing* mampu meningkatkan nilai SF 13% lebih besar pada kondisi jenuh dibandingkan pada kondisi tanpa air. Peningkatan ini merupakan yang tertinggi di antara metode lainnya, disusul dengan metode perkuatan tiang dan *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass* dengan peningkatan nilai SF sebesar 11%. Yang terendah dalam peningkatan nilai SF adalah metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass* dengan peningkatan hanya sebesar 5%, lebih tinggi pada kondisi jenuh dibandingkan pada kondisi tanpa air. Tren yang berbeda muncul ketika membandingkan peningkatan nilai SF antara kondisi tidak jenuh dengan kondisi tanpa air. Metode *soil nailing* bukan lagi yang tertinggi dalam peningkatan nilai SF. Melainkan menjadi yang terendah, setara dengan metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass* dengan peningkatan sebesar 2%. Peningkatan tertinggi nilai SF dihasilkan oleh metode perkuatan tiang (5%) dan disusul metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass* (4%) dengan selisih 1%.



Gambar 10: Perbandingan peningkatan nilai SF untuk metode stabilisasi lereng pada tiga kondisi

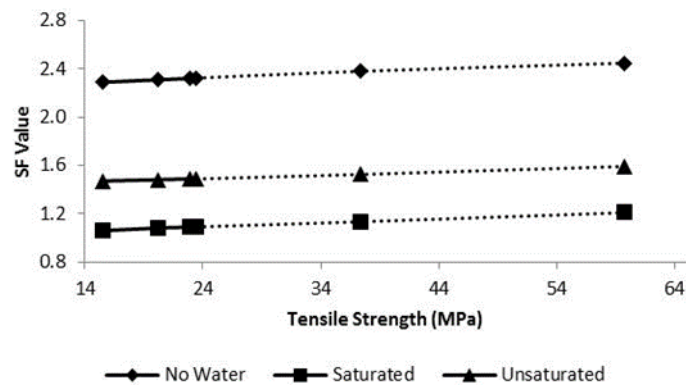
Perbandingan peningkatan nilai SF antara kondisi jenuh dan kondisi tidak jenuh menunjukkan kecenderungan yang sama dengan perbandingan peningkatan nilai SF antara kondisi jenuh dan kondisi tanpa air. Peningkatan nilai SF tertinggi dihasilkan oleh metode *soil nailing* dengan peningkatan sebesar 11%, sedangkan peningkatan terendah dihasilkan oleh metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass* dengan peningkatan hanya sebesar 3%. Terdapat sedikit perubahan pada tingkat menengah antara metode perkuatan tiang dengan metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass*. Pada perbandingan kondisi jenuh dan tidak jenuh, metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass* memperoleh peningkatan nilai SF yang lebih tinggi yaitu sebesar 7% dibandingkan dengan metode perkuatan tiang dengan peningkatan sebesar 6% (selisih 1% juga).

Berdasarkan ketinggian muka air, penambahan kadar air dari kondisi tanpa air ke kondisi tidak jenuh lebih besar dibandingkan penambahan kadar air dari kondisi tidak jenuh ke kondisi jenuh. Dalam diagram pada Gambar 10 dapat diketahui juga bahwa pada metode *soil nailing*, adanya penambahan kadar air yang besar diikuti dengan penambahan nilai SF yang besar pula. Hal ini berarti metode *soil nailing* tetap memberikan pengaruh besar terhadap peningkatan stabilitas lereng meskipun dengan adanya penambahan kadar air yang besar. Namun demikian, hal yang berkebalikan terjadi pada metode perkuatan tiang dan metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass*. Adanya penambahan kadar air yang besar tidak diikuti dengan penambahan nilai SF yang besar. Ini dapat diartikan bahwa metode perkuatan tiang dan metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass* mengalami penurunan pengaruh terhadap peningkatan stabilitas lereng dengan adanya penambahan kadar air. Sementara itu untuk metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass*, penambahan kadar air yang lebih kecil atau lebih besar menghasilkan penambahan nilai SF yang relatif sama.

Oleh karena itu, metode *soil nailing* merupakan metode yang paling berpengaruh dalam meningkatkan stabilitas lereng meskipun dengan adanya penambahan kadar air. Sedangkan metode perkuatan tiang dan metode *soil bioengineering* menggunakan *switchgrass* mengalami penurunan pengaruh dalam meningkatkan stabilitas lereng karena adanya penambahan kadar air. Untuk metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass* tidak terpengaruh oleh adanya penambahan kadar air yang besar dalam meningkatkan stabilitas lereng. Namun demikian, untuk pengaruh penambahan kadar air terhadap stabilisasi lereng dengan metode *soil bioengineering*, masih memerlukan penelitian lebih lanjut karena penelitian ini tidak membahas pengaruh vegetasi secara hidrologis

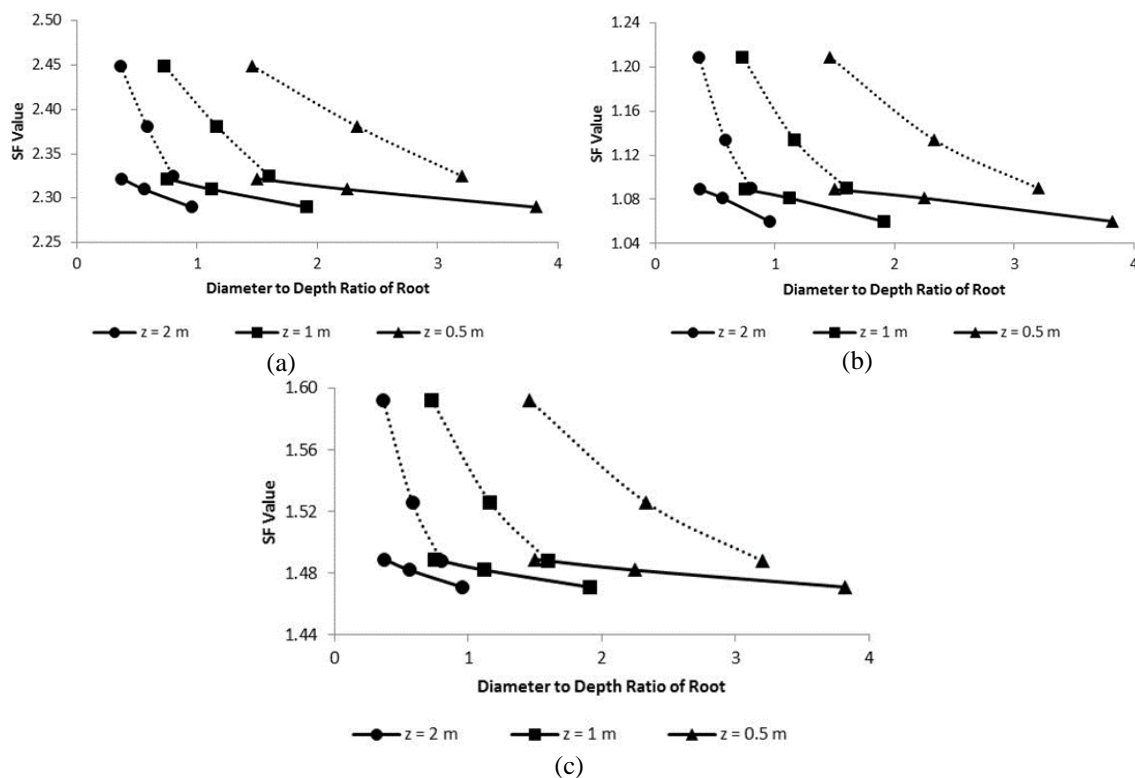
### 3.3 Pengaruh Tutupan Vegetasi terhadap Stabilitas Lereng

Kekuatan tarik dari akar vegetasi merupakan salah satu parameter untuk menghasilkan kohesi akar yang mampu meningkatkan kekuatan geser tanah, sehingga menghasilkan stabilitas lereng yang lebih tinggi. Pernyataan tersebut dibuktikan sekali lagi dengan grafik pada Gambar 11, dimana semakin tinggi kekuatan tarik dari akar vegetasi maka semakin tinggi pula nilai SF dan hal tersebut berlaku pada ketiga kondisi lereng (tanpa air, jenuh, dan tidak jenuh). Dari Gambar 11 terlihat juga bahwa *vetiver grass* (garis titik-titik) yang mempunyai kuat tarik lebih tinggi pada kisaran 23.40 – 59.72 MPa mampu menghasilkan nilai SF yang lebih tinggi dibandingkan dengan *switchgrass* (garis menerus) yang mempunyai kekuatan tarik yang lebih rendah pada kisaran 15.55 – 22.88 MPa. Hal tersebut dapat diartikan bahwa *vetiver grass* mempunyai tutupan vegetasi yang lebih signifikan terhadap stabilitas lereng dibandingkan dengan *switchgrass*.



Gambar 11: Pengaruh kuat tarik terhadap nilai SF pada metode *soil bioengineering*

Sementara itu, jika dilihat dari rasio diameter terhadap kedalaman akar vegetasi ( $d/z$ ), pada kedalaman yang sama, semakin besar rasio  $d/z$  maka nilai SF semakin rendah dan berlaku juga pada ketiga kondisi lereng (lihat Gambar 12). Tren ini terjadi pada kedua metode *soil bioengineering*, baik menggunakan *vetiver grass* maupun *switchgrass*. Untuk kedalaman yang sama, semakin besar rasio  $d/z$  berarti semakin besar ukuran diameter akar vegetasi. Dengan demikian, bertambahnya diameter akar mengakibatkan turunnya pengaruh akar terhadap peningkatan nilai SF dan stabilitas lereng. Hal ini terjadi karena semakin besar diameter akar maka kekuatan tarik akar semakin kecil [10]. Karena *vetiver grass* cenderung memiliki diameter rata-rata akar yang lebih kecil, yaitu sebesar 1.165 mm, maka nilai SF yang dihasilkan lebih tinggi dibandingkan dengan *switchgrass* yang memiliki diameter rata-rata sebesar 1.262 mm.



Gambar 12: Pengaruh perbandingan diameter dengan kedalaman akar terhadap nilai SF pada metode *soil bioengineering* (a) kondisi tanpa air; (b) kondisi jenuh; dan (c) kondisi tidak jenuh

Selain kekuatan tarik dan diameter akar, kedalaman akar juga mempengaruhi nilai SF. Dari Gambar 12 dapat diketahui juga bahwa hingga kedalaman 2 m, kedalaman akar menghasilkan nilai SF yang hampir sama. Hasil ini ditunjukkan oleh kedua metode *soil bioengineering*, baik menggunakan *vetiver grass* maupun *switchgrass*. Oleh karena itu, berdasarkan kekuatan tarik dan diameter akar, penerapan *vetiver grass* sebagai tutupan vegetasi untuk stabilisasi lereng lebih signifikan dibandingkan dengan *switchgrass* dan ini berlaku pada ketiga kondisi lereng (tanpa air, kondisi jenuh, dan tidak jenuh). Meskipun demikian, perbedaan di antara kedua metode tersebut terbilang kecil, dengan selisih hanya sebesar 4%.

#### 4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian sebelumnya, metode *soil bioengineering* terbukti mampu meningkatkan kekuatan geser tanah. Penelitian saat ini menegaskan bahwa metode *soil bioengineering* memang mampu meningkatkan kekuatan geser tanah yang diwakili oleh peningkatan nilai SF pada stabilitas lereng. Perbandingan dengan metode umum yaitu menggunakan metode geo-struktur dilakukan untuk memahami efektivitas metode *soil bioengineering* dalam stabilisasi lereng. Kesimpulan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Metode *soil bioengineering* dapat disandingkan dengan metode geo-struktur dalam meningkatkan stabilitas lereng pada 3 (tiga) kondisi lereng yang berbeda, yaitu kondisi tanpa air, jenuh, dan tidak jenuh. Metode yang paling berpengaruh dalam meningkatkan stabilitas lereng adalah metode *soil nailing*, sedangkan yang paling kecil pengaruhnya adalah metode perkuatan tiang. Metode *soil bioengineering* sendiri, baik menggunakan *vetiver grass* maupun *switchgrass*, berada pada tingkat menengah. Metode *soil bioengineering* dapat dikatakan cukup setara dengan metode perkuatan tiang dalam meningkatkan nilai SF meskipun masih jauh di bawah metode *soil nailing*.
- 2) Meskipun dengan penambahan kadar air yang tinggi, metode *soil nailing* tetap merupakan metode yang paling berpengaruh dalam meningkatkan stabilitas lereng. Sementara itu, metode perkuatan tiang dan metode *soil bioengineering* menjadi kurang berpengaruh dalam meningkatkan stabilitas lereng karena penambahan kadar air yang tinggi. Untuk metode *soil bioengineering* menggunakan *vetiver grass*, tidak dipengaruhi oleh penambahan kadar air yang tinggi dalam meningkatkan stabilitas lereng. Namun

demikian, pengaruh penambahan kadar air terhadap stabilisasi lereng dengan metode *soil bioengineering* masih memerlukan penelitian lebih lanjut terkait pengaruh vegetasi secara hidrologis.

- 3) Pemanfaatan *vetiver grass* sebagai tutupan vegetasi untuk stabilisasi lereng lebih signifikan dibandingkan *switchgrass* pada ketiga kondisi, yaitu kondisi tanpa air, kondisi jenuh, dan kondisi tidak jenuh, meskipun selisih di antara keduanya hanya sebesar 4% dalam meningkatkan nilai SF. Hal ini disebabkan oleh kekuatan tarik *vetiver grass* yang lebih tinggi dan diameter akar yang lebih kecil dibandingkan dengan *switchgrass*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh “Hibah Riset Internal Universitas Bakrie” Tahun 2019. Penelitian yang ada saat ini dapat menjadi dasar untuk penelitian selanjutnya mengenai pengaruh kombinasi metode geo-struktur dan metode *soil bioengineering* terhadap stabilitas lereng atau topik lainnya.

## REFERENSI

- [1] K. H. Eab, S. Likitlersuang, and A. Takahashi, “Laboratory and modelling investigation of root-reinforced system for slope stabilisation,” *Soils Found.*, vol. 55, no. 5, pp. 1270–1281, 2015, doi: 10.1016/j.sandf.2015.09.025.
- [2] G. Zhang, J. Cao, and L. Wang, “Failure behavior and mechanism of slopes reinforced using soil nail wall under various loading conditions,” *Soils Found.*, vol. 54, no. 6, pp. 1175–1187, 2014, doi: 10.1016/j.sandf.2014.11.011.
- [3] G. Zhang and L. Wang, “Simplified evaluation on the stability level of pile-reinforced slopes,” *Soils Found.*, vol. 57, no. 4, pp. 575–586, 2017, doi: 10.1016/j.sandf.2017.03.009.
- [4] Y.-C. Tan and C.-M. Chow, “Slope Stabilization Using Soil Nails: Design Assumptions and Construction Realities,” *Malaysia-Japan Symp. Geohazards*, pp. 2277–2280, 2004, [Online]. Available: [http://gnpgeo.com.my/download/publication/2004\\_11.pdf](http://gnpgeo.com.my/download/publication/2004_11.pdf)
- [5] C.-C. Fan and J.-H. Luo, “Numerical Study on The Optimum Layout of Soil-Nailed Slopes,” *Comput. Geotech.*, vol. 35, no. 4, pp. 585–599, 2008, doi: 10.1016/j.compgeo.2007.09.002.
- [6] V. Rotte, B. Viswanadham, and D. Chourasio, “Influence of Slope Geometry and Nail Parameters on The Stability of Soil-Nailed Slopes,” *Int. J. Geotech. Eng.*, vol. 5, no. 3, pp. 267–261, 2011, doi: 10.3328/IJGE.2011.05.03.267-281.
- [7] M. A. El Sawwaf, “Strip Footing Behavior on Pile and Sheet Pile-Stabilized Sand Slope,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 131, no. 6, 2005, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:6(705).
- [8] D. H. Gray and R. B. Sotir, “Biotechnical Stabilization of Steepened Slopes,” 1995.
- [9] A. Yildiz, F. Graf, C. Rickli, and S. M. Springman, “Determination of the shearing behaviour of root-permeated soils with a large-scale direct shear apparatus,” *Catena*, vol. 166, no. March, pp. 98–113, 2018, doi: 10.1016/j.catena.2018.03.022.
- [10] P. P. Capilleri, E. Motta, and E. Raciti, “Experimental Study on Native Plant Root Tensile Strength for Slope Stabilization,” *Procedia Eng.*, vol. 158, pp. 116–121, 2016, doi: 10.1016/j.proeng.2016.08.415.
- [11] G. E. Blight, “The Vadose Zone Soil-Water Balance and Transpiration Rates of Vegetation,” *Geotechnique*, vol. 53, pp. 55–64, 2003, doi: 10.1680/geot.2003.53.1.55.
- [12] S. M. Springman, P. Teyssere, and C. Jommi, “Instabilities on Moraine Slopes Induced by Loss of Suction: A Case History,” *Geotechnique*, vol. 53, pp. 3–10, 2003, doi: 10.1680/geot.2003.53.1.3.
- [13] F. Graf and M. Frei, “Soil Aggregate Stability Related to Soil Density, Root Length, and Mycorrhiza Using Site-Specific *Alnus incana* and *Melanogaster variegatus* s.l.,” *Ecol. Eng.*, vol. 57, pp. 314–323, 2014, doi: 10.1016/j.ecoleng.2013.04.037.
- [14] K. W. Loades, A. G. Bengough, M. F. Bransby, and P. D. Hallet, “Planting Density Influence on Fibrous Root Reinforcement of Soils,” *Ecol. Eng.*, vol. 36, pp. 276–284, 2010, doi: 10.1016/j.ecoleng.2009.02.005.
- [15] J. J. Ni, A. K. Leung, C. W. W. Ng, and W. Shao, “Modelling hydro-mechanical reinforcements of plants to slope stability,” *Comput. Geotech.*, vol. 95, pp. 99–109, 2018, doi: 10.1016/j.compgeo.2017.09.001.
- [16] D. H. Gray and D. Barker, “Root-Soil Mechanics and Interactions. Riparian Veg.Fluv.,” *Geomorphol.*, pp. 113–123, 2004, doi: 10.1029/008WSA09.
- [17] V. Operstein and S. Frydman, “The Influence of Vegetation on Soil Strength,” in *Proc. Inst. Civ. Eng. - Gr. Improv.*, 2000, pp. 81–89. doi: 10.1680/grim.2000.4.2.81.
- [18] F. H. Ali and N. Osman, “Shear strength of a soil containing vegetation roots,” *Soils Found.*, vol. 48,

- no. 4, pp. 587–596, 2008, doi: 10.3208/sandf.48.587.
- [19] S. B. Mickovski, “Mechanical Reinforcement of Soil by Willow Roots: Impacts of Root Properties and Root Failure Mechanism,” *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 37, no. 4, pp. 1276–1285, 2009, doi: 10.2136/sssaj2008.0172.
- [20] E. Comino, P. Marengo, and V. Rolli, “Root Reinforcement Effect of Different Grass Species: A Comparison between Experimental and Models Results,” *Soil Tillage Res.*, vol. 110, no. 1, pp. 60–68, 2010, doi: 10.1016/j.still.2010.06.006.
- [21] S. B. Mickovski and L. P. H. van Beek, “Root morphology and effects on soil reinforcement and slope stability of young vetiver (*Vetiveria zizanioides*) plants grown in semi-arid climate,” *Plant Soil*, vol. 324, no. 1, pp. 43–56, 2009, doi: 10.1007/s11104-009-0130-y.
- [22] J. C. Greenfield, “Vegetative vs. Mechanical Soil Conservation System as They Affect Moisture Conservation and Sustained Production,” in *Proceeding of The First International Conference on Vetiver*, 1996, pp. 1–7.
- [23] A. Noor, J. Vahlevi, and Fathurrozi, “Stabilisasi Lereng Untuk Pengendalian Erosi Dengan Soil Bioengineering menggunakan Akar Rumput Vetiver,” *J. POROS Tek.*, vol. 3, no. 2, pp. 69–74, 2011, [Online]. Available: <https://ejurnal.poliban.ac.id/index.php/porosteknik/article/view/44>
- [24] R. N. Brown and B. Maynard, “Evaluation of Native Grasses for Highway Slope Stabilization and Salt Tolerance,” 2010.
- [25] F. Y. Nugraha and I. N. Hamdhan, “Analisis Stabilitas Lereng Menggunakan Perkuatan Tanaman Switchgrass,” *J. Online Inst. Teknol. Nas.*, vol. 2, no. 2, pp. 71–82, 2016.
- [26] I. S. Bodhimantoro, “Pengaruh Kombinasi Panjang, Diameter dan Jarak Antar Tiang (Pile) Terhadap Stabilitas Lereng Zona Penyangga Situs Gunung Padang,” Jakarta, 2020.
- [27] N. A. P. Mansyurdin, “Pengaruh Kombinasi Panjang, Diameter dan Jumlah Nail Terhadap Stabilitas Lereng Zona Penyangga Situs Gunung Padang,” Jakarta, 2020.
- [28] D. Cazzuffi and E. Crippa, “Contribution of Vegetation to Slope Stability: an Overview of Experimental Studies Carried Out on Different Types of Plants,” *Eros. Soils Scour Found.*, pp. 1–12, 2005, doi: 10.1061/40781(160)9.
- [29] A. J., “Vetiver untuk Pengendalian Erosi dan Stabilitas Lereng,” Jakarta, 2009.
- [30] N. K. Kokutse, A. G. T. Temgoua, and Z. Kavazović, “Slope stability and vegetation: Conceptual and numerical investigation of mechanical effects,” *Ecol. Eng.*, vol. 86, no. November 2004, pp. 146–153, 2016, doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.11.005.