

**RUWAIDA ZAYADI • ENDAH KURNIYANINGRUM •
ASTRI RINANTI • REZA FAUZI**



PROTEKSI LERENG RAWAN LONGSOR

DENGAN METODE *SOIL BIOENGINEERING*

PROTEKSI LERENG RAWAN LONGSOR

DENGAN METODE *SOIL BIOENGINEERING*

Ruwaida Zayadi, Endah Kurniyaningrum
Astri Rinanti, Reza Fauzi

PT. Lontar Digital Asia

PROTEKSI LERENG RAWAN LONGSOR
dengan Metode *Soil Bioengineering*

Penulis:

Ruwaida Zayadi, Endah Kurniyaningrum,
Astri Rinanti, Reza Fauzi

©2025

Editor:

Anita Khairunnisa, Winingsih

Layouter:

Saewangsa

Desain Cover:

Saewangsa menggunakan Adobe Firefly AI

Diterbitkan oleh:

PT Lontar Digital Asia
www.bitread.co.id

Kerja sama:

PT. Lontar Digital Asia dengan Universitas Trisakti untuk publikasi
buku berbasis penelitian

ISBN: 978-623-224-806-9

Surel: admbitread@gmail.com

Facebook: BitreadID

Twitter: BITREAD_ID

Instagram: bitread_id

Anggota IKAPI No. 556/DKI/2018

Hak Cipta dilindungi oleh Undang-Undang.
Dilarang mengutip atau memperbanyak sebagian atau
seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.



PRAKATA

Puji syukur kehadiran Allah SWT Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan monograf ini yang berjudul “Proteksi Lereng Rawan Longsor dengan Metode *Soil Bioengineering*”.

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan topografi yang beragam, sangat rentan terhadap bencana alam, khususnya longsor. Peristiwa longsor tidak hanya menimbulkan kerugian materi, tetapi juga korban jiwa. Oleh karena itu, upaya untuk mencegah dan menanggulangi bencana longsor menjadi sangat penting.

Salah satu alternatif yang efektif dan ramah lingkungan dalam upaya proteksi lereng adalah dengan menggunakan metode *soil bioengineering*. Metode ini memanfaatkan prinsip-prinsip ekologi untuk meningkatkan stabilitas lereng dan mengurangi risiko longsor.

Monograf ini bertujuan untuk memberikan kontribusi dalam pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi terkait dengan penerapan metode *soil bioengineering* di Indonesia. Penulis berharap buku monograf ini dapat menjadi referensi bagi para akademisi, praktisi, dan pemerhati mitigasi bencana longsor dengan tinjauan ilmu teknik sipil, biologi, dan lingkungan, serta pembuat kebijakan dalam upaya pengelolaan sumber daya alam secara berkelanjutan.

Dengan selesainya penulisan buku monograf ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- 1) Lembaga Penelitian Universitas Trisakti yang telah menyelenggarakan program Hibah Monograf dan Buku Ajar pada tahun akademik 2024/2025.
 - 2) Pihak lain secara langsung dan tidak langsung atas kerja samanya mulai dari awal hingga selesainya penulisan buku ini.
- Penulis menyadari bahwa monograf ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat terbuka terhadap kritik dan saran yang bersifat membangun demi perbaikan di masa mendatang.

Jakarta, Maret
2025

Tim Penulis

DAFTAR ISI

Prakata	03
Daftar Isi	05
Daftar Gambar	07
Prolog	09
BAB 1 PENDAHULUAN	12
BAB 2 BENCANA LONGSOR	16
2.1 Terjadinya Longsor	16
2.2 Jenis Tanah Longsor	18
2.3 Penyebab Terjadinya Longsor	27
2.4 Dampak Longsor	34
2.5 Upaya Pencegahan Longsor Konvensional	37
BAB 3 SOIL BIOENGINEERING	39
3.1 Konsep Dasar <i>Soil Bioengineering</i>	39
3.2 Perbandingan <i>Soil Bioengineering</i> dengan Metode Konvensional	57
BAB 4 TEKNIK SOIL BIOENGINEERING	60
3.1 Komponen Teknik <i>Soil Bioengineering</i>	60
3.2 Pemilihan Teknik <i>Soil Bioengineering</i> yang Tepat	62
3.3 Penerapan <i>Soil Bioengineering</i>	63

BAB 5	PERUBAHAN IKLIM DAN SOIL	
	BIOENGINEERING	71
5.1	Dampak Perubahan Iklim Terhadap Longsor	74
5.2	Peran <i>Soil Bioengineering</i> dalam Adaptasi Perubahan	75
BAB 6	FAKTOR KEBERHASILAN IMPLEMENTASI SOIL	
	BIOENGINEERING	85
6.1	Faktor Alam	85
6.2	Faktor Manusia	87
6.3	Faktor Sosial Ekonomi	96
BAB 7	STUDI KASUS PENERAPAN SOIL	
	BIOENGINEERING	92
7.1	<i>Soil Bioengineering</i> dengan Metode <i>Cribwall</i>	96
7.2	Kendala dan Tantangan	104
7.3	Upaya Mitigasi	105
7.4	Penutup	105
	Daftar Pustaka	108
	Tentang Penulis	112

DAFTAR GAMBAR

Gambar1.	Peta kondisi kejadian longsor di Indonesia (2014-2023).	13
Gambar 2.	Ilustrasi longsor rotasional yang telah berkembang menjadi aliran tanah.	17
Gambar 3.	Ilustrasi jenis pergerakan longsor rotasi.	19
Gambar 4.	Ilustrasi Jenis pergerakan longsor translasi.	20
Gambar 5.	Ilustrasi jenis pergerakan longsor blok.	20
Gambar 6.	Ilustrasi Jenis pergerakan longsor <i>falls</i> (jatuh).	21
Gambar 7.	Ilustrasi Jenis pergerakan longsor <i>topple</i> (roboh).	22
Gambar 8.	Ilustrasi jenis pergerakan longsor debris <i>flows</i> (aliran puing).	22
Gambar 9.	Ilustrasi Jenis pergerakan longsor <i>debris avalanche</i> (longsor puing).	24
Gambar 10.	Ilustrasi Jenis pergerakan longsor earthflow (aliran tanah).	25
Gambar 11.	Ilustrasi Jenis pergerakan longsor creep (aliran tanah lambat).	26
Gambar 12.	Ilustrasi Jenis pergerakan longsor spreads.	27
Gambar 13.	Ilustrasi <i>landslides due to water</i> (longsor akibat air).	30

Gambar 15.	Ilustrasi <i>landslides due to seismic activity</i> (longsor akibat aktivitas seismik)	32
Gambar 16.	Ilustrasi <i>landslides due to human activities</i> (longsor akibat aktivitas manusia).	34
Gambar 17.	Konsep dasar <i>soil bioengineering</i> .	40
Gambar 18.	Ilustrasi <i>live staking</i> .	46
Gambar 19.	Ilustrasi <i>bush layering</i> .	48
Gambar 20.	Ilustrasi <i>live fascines</i> .	50
Gambar 21.	Ilustrasi <i>vegetated retaining walls</i> .	52
Gambar 22.	Ilustrasi dampak perubahan iklim di Indonesia.	72
Gambar 23.	Kondisi lereng sungai akibat pengaruh peningkatan suhu permukaan tanah.	73
Gambar 24.	Penerapan cocomesh pada teknik <i>hydroseeding</i> di IKN (Ardiasa, 2024).	81
Gambar 25.	Kampung Adat Kasepuhan di Desa Sinar Resmi, Sukabumi, Jawa Barat.	94
Gambar 26.	Kondisi kawasan desa Sinarremi	95
Gambar 27.	Bagan alir proteksi lereng dengan metode <i>bamboo cribwall</i> .	98
Gambar 28.	Persiapan material proteksi lereng dengan metode <i>bamboo cribwall</i> .	99
Gambar 29.	Tahap pelaksanaan pembuatan proteksi lereng.	102
Gambar 30.	Kondisi lereng dengan proteksi metode <i>bamboo cribwall</i> pada bulan Mei 2021.	103



PROLOG

Frekuensi bencana longsor yang semakin meningkat di Indonesia menuntut adanya solusi yang inovatif dan berkelanjutan. Teknologi *soil bioengineering* menawarkan harapan baru dalam mengatasi permasalahan tersebut. Penelitian mengenai *soil bioengineering* telah mengalami perkembangan yang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Namun, masih banyak tantangan yang perlu diatasi dalam penerapan metode ini di lapangan, terutama di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Buku ini hadir untuk memberikan kontribusi nyata untuk pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi dalam bidang Teknik Sipil dan Teknologi Lingkungan khususnya berkaitan dengan stabilisasi lereng, dengan fokus teknologi *soil bioengineering*. Melalui kajian yang mendalam, diharapkan buku ini dapat menjadi rujukan bagi para pemangku kepentingan dalam upaya mengurangi risiko bencana longsor dan meningkatkan kualitas lingkungan.

Dibandingkan dengan karya-karya sebelumnya, buku ini menawarkan beberapa keunggulan, antara lain: (1) kajian yang lebih mendalam dan komprehensif mengenai prinsip-prinsip dan teknik *soil bioengineering*; (2) fokus pada kondisi spesifik di Indonesia dengan mengacu pada karakteristik tanah, iklim, dan vegetasi khas Indonesia, buku ini menyajikan rekomendasi-rekomendasi teknis yang lebih relevan dan aplikatif pada proyek-proyek konservasi tanah dan air. Selain itu, buku ini juga menyoroti berbagai jenis tanaman lokal yang potensial digunakan dalam teknik *soil bioengineering*, sehingga dapat

menjadi referensi yang berharga bagi para praktisi dan peneliti di Indonesia; dan (3) pendekatan multidisiplin yang mengintegrasikan berbagai aspek terkait dengan teknik *soil bioengineering*. Tidak hanya menyajikan aspek teknis, buku ini juga menyoroti aspek-aspek sosial, ekonomi, dan lingkungan yang terkait dengan penerapan metode *soil bioengineering*. Dengan demikian, buku ini diharapkan dapat menjadi rujukan yang sangat berharga bagi para akademisi, praktisi, pembuat kebijakan, serta masyarakat umum yang tertarik dengan upaya pelestarian lingkungan dan mitigasi bencana.

Buku ini dirancang untuk menjadi rujukan bagi siapa saja yang ingin memahami dan menerapkan metode *soil bioengineering* dalam upaya mitigasi bencana longsor sehingga diharapkan bermanfaat bagi para profesional dari berbagai disiplin ilmu, seperti teknik sipil, lingkungan, pertanian, dan sosial. Para pembaca yang memiliki latar belakang pendidikan di bidang teknik sipil atau lingkungan, pertanian, perkebunan, dan bidang-bidang terkait tanah lainnya diharapkan memperoleh solusi berkelanjutan untuk masalah erosi dan longsor. Kolaborasi antar disiplin ilmu sangat penting dalam upaya mengatasi permasalahan kompleks seperti bencana longsor. Dengan menyajikan informasi yang komprehensif dan lintas disiplin, buku ini diharapkan dapat memfasilitasi terjadinya dialog dan kerja sama antara berbagai pihak yang berkepentingan.

Dengan ilustrasi yang menarik dan contoh kasus yang relevan, buku ini diharapkan dapat memperkaya pemahaman pembaca mengenai pentingnya teknologi *soil bioengineering* dalam upaya menjaga kelestarian lingkungan dan mengurangi risiko bencana. Sejalan dengan perkembangan kurikulum pendidikan tinggi yang semakin mengarah pada pembelajaran berbasis masalah dan proyek, materi *soil bioengineering* dapat menjadi sumber inspirasi bagi pendidik dalam merancang kegiatan pembelajaran yang lebih menarik dan relevan. Studi kasus yang disajikan dalam buku ini dapat digunakan sebagai dasar untuk mengembangkan tugas kelompok, proyek penelitian mahasiswa, atau bahkan mata kuliah khusus terkait *soil bioengineering*.

Untuk memperdalam pemahaman tentang *soil bioengineering*, disarankan untuk membaca buku-buku *Slope Stability and Erosion Control: Ecotechnological Solutions* (Norris et al., 2008) dan buku *Eco and Ground Bio-engineering: The Use of Vegetation to Improve Slope Stability* (Stokes et al., 2004). Selain itu, berbagai organisasi internasional seperti FAO dan World Bank juga menyediakan publikasi dan *database* yang relevan, seperti *Green Roads for Water* (World Bank, 2021); *Field Guide on Soil Bioengineering for Slope Stability in Timor Leste* (World Bank, 2012).

Kami mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat. Universitas Trisakti, dosen, dan rekan sejawat tingkat doktoral di Program Doktor Ilmu Lingkungan. Sekolah Pascasarjana Universitas Brawijaya, rekan dalam tim yang terlibat dalam program PKM di desa Sinar Resmi, Sukabumi, dan rekan dalam tim penulis yang telah membantu menyusun buku ini hingga selesai tepat waktu.

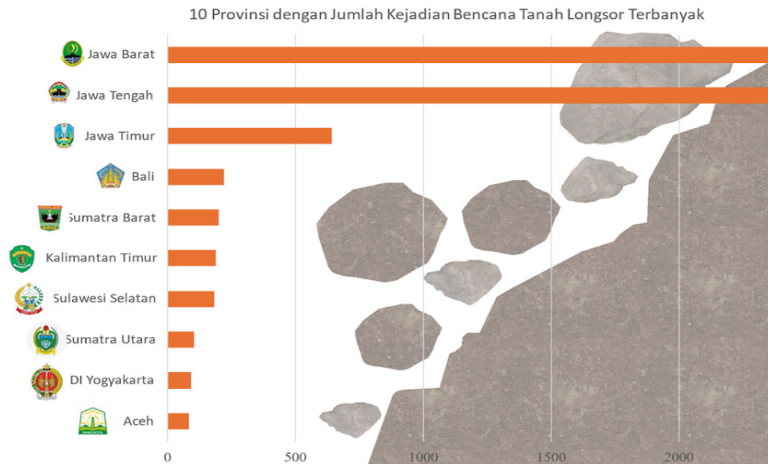
Jakarta, Maret
2025

Tim Penulis

PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara dengan topografi yang beragam, memiliki wilayah pegunungan yang rentan terhadap bencana alam, khususnya longsor. Longsor adalah pergerakan massa tanah, batuan, atau material lainnya yang turun dari lereng yang curam, sering kali disebabkan oleh faktor-faktor alam seperti hujan lebat, gempa bumi, atau erosi. Longsor dapat menyebabkan kerusakan yang parah pada infrastruktur, mengancam keselamatan jiwa, serta merusak ekosistem yang ada. Data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) menunjukkan bahwa kejadian longsor di Indonesia meningkat setiap tahunnya, terutama di wilayah-wilayah dengan kemiringan lereng yang tajam dan curah hujan tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa longsor merupakan ancaman serius yang harus diwaspadai.

Peningkatan frekuensi longsor ini tidak terlepas dari perubahan iklim yang menyebabkan pola curah hujan yang ekstrem, serta aktivitas manusia yang merusak lingkungan. Musim hujan sering kali dikaitkan dengan peningkatan frekuensi terjadinya longsor. Berdasarkan data BNPB, Jawa Barat dan Jawa Tengah merupakan provinsi dengan jumlah kejadian tanah longsor terbanyak dalam periode 2014-2023 (Gambar 1). Hubungan antara keduanya sangat



Gambar 1. Peta kondisi kejadian longsor di Indonesia (2014-2023).

erat, terutama karena peran curah hujan yang tinggi dalam memicu ketidakstabilan tanah.

Dari tahun 2014-2023, Jawa Barat dan Jawa Tengah mengalami sekitar 2.400 kejadian tanah longsor. Sementara itu, di tahun 2023, bencana tanah longsor di Indonesia menelan 132 korban jiwa dan menyebabkan 18.775 orang harus mengungsi ke tempat yang lebih aman.

Tanah longsor sering terjadi di daerah persawahan, perladangan, dan lereng yang terjal. Tak jarang daerah rawan longsor ini berdekatan dengan pemukiman penduduk, sehingga dibutuhkan mitigasi yang tepat agar dampak bencana dan korban jiwa dapat diminimalkan.

Salah satu upaya mitigasi yang semakin berkembang adalah penerapan teknik *soil bioengineering* sebagai solusi untuk memperkuat lereng-lereng rawan longsor. *Soil Bioengineering* merupakan pendekatan teknik yang menggabungkan unsur-unsur biologi dan teknik rekayasa tanah dengan memanfaatkan tanaman dan bahan organik untuk menstabilkan tanah dan lereng. Dengan memanfaatkan potensi alam, metode ini memberikan solusi yang ramah lingkungan, terjangkau, dan efektif untuk mengurangi risiko

longsor. Tanaman-tanaman yang digunakan dalam *soil bioengineering* memiliki kemampuan untuk memperkuat struktur tanah melalui akar yang berkembang dan membentuk jaringan yang dapat mengikat tanah, sementara bahan organik yang digunakan juga membantu dalam memperbaiki kondisi fisik dan kimia tanah.

Namun, meskipun teknologi ini sudah dikenal secara luas, tantangan dalam implementasinya, seperti pemilihan spesies tanaman yang sesuai dengan kondisi lokal, pengelolaan yang tepat, serta kesadaran masyarakat tentang pentingnya peran *soil bioengineering*, masih memerlukan perhatian untuk mendapatkan hasil yang maksimal. Oleh karena itu, penting untuk mengeksplorasi lebih lanjut penerapan *soil bioengineering* sebagai langkah mitigasi yang efektif terhadap bahaya longsor.

Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam tentang bagaimana *soil bioengineering* dapat digunakan sebagai metode proteksi lereng rawan longsor. Beberapa tujuan spesifik yang ingin dicapai melalui penulisan buku ini antara lain:

- 1) Menyajikan konsep dasar *soil bioengineering* sebagai metode mitigasi bencana longsor yang efektif, ramah lingkungan, dan berkelanjutan.
- 2) Mengidentifikasi teknik-teknik *soil bioengineering* yang sesuai untuk diterapkan pada lereng-lereng dengan berbagai jenis tanah dan kondisi lingkungan di Indonesia.
- 3) Menganalisis berbagai kelebihan dan tantangan dalam penerapan *soil bioengineering* sebagai solusi untuk pengelolaan tanah yang lebih baik dan perlindungan terhadap kawasan rawan longsor.
- 4) Memberikan rekomendasi untuk pengembangan kebijakan dan praktik terkait penerapan *soil bioengineering* di wilayah rawan longsor.

Berbagai aspek terkait penerapan *soil bioengineering* untuk proteksi lereng rawan longsor akan dibahas secara mendalam, meliputi:

- 1) Definisi dan Prinsip Dasar *Soil Bioengineering*, membahas mengenai dasar teori dan prinsip kerja *soil bioengineering*, serta

perbedaan antara teknik ini dengan metode penguatan lereng lainnya.

- 2) Metode dan Teknik *Soil Bioengineering*, menguraikan berbagai teknik *soil bioengineering* yang dapat diterapkan untuk proteksi lereng, seperti penggunaan tanaman penahan erosi, struktur berbasis tanaman (seperti dinding hidup atau terasering), serta penggunaan bahan alami seperti jaring biomassa atau mulsa atau bahan sintetis seperti geotekstil.
- 3) Studi Kasus Penerapan *Soil Bioengineering* di Indonesia, membahas penerapan *soil bioengineering* di beberapa daerah rawan longsor di Indonesia, termasuk tantangan, keberhasilan, serta pelajaran yang dapat diambil dari pengalaman-pengalaman tersebut.
- 4) Faktor-Faktor yang Memengaruhi Keberhasilan *Soil Bioengineering*, membahas faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan penerapan *soil bioengineering*, seperti jenis tanah, curah hujan, vegetasi lokal, dan peran masyarakat dalam pemeliharaan jangka panjang.
- 5) Kebijakan dan Regulasi terkait *Soil Bioengineering*, membahas kebijakan pemerintah dan regulasi yang mendukung atau menghambat penerapan *soil bioengineering* di Indonesia, serta rekomendasi kebijakan untuk mendukung pengembangan teknik ini.

Dengan ruang lingkup yang jelas, buku ini memberikan gambaran komprehensif mengenai potensi, tantangan, dan solusi yang terkait dengan penerapan *soil bioengineering* dalam mengurangi risiko longsor, serta kontribusinya terhadap pembangunan yang berkelanjutan. Buku ini juga dapat menjadi referensi bagi para akademisi, praktisi, pemerintah, serta masyarakat luas dalam mengimplementasikan *soil bioengineering* sebagai bagian dari upaya mitigasi bencana longsor yang berkelanjutan dan berbasis alam.

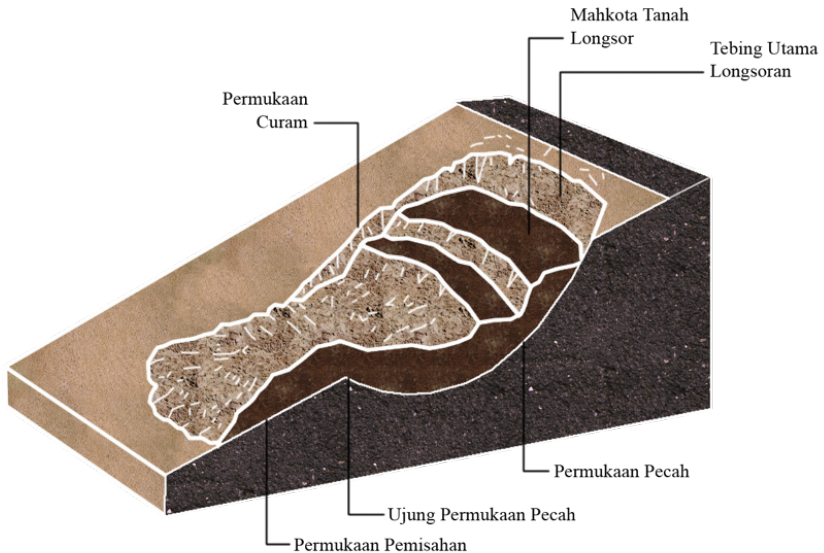
BENCANA LONGSOR

2.1 Terjadinya Longsor

Tanah longsor adalah gerakan massa tanah atau batuan secara tiba-tiba menuruni lereng. Proses ini terjadi ketika gaya pendorong pada lereng lebih besar daripada gaya penahan. Apabila gaya gravitasi yang bekerja pada suatu lereng melebihi gaya penahannya, maka lereng tersebut akan runtuh dan terjadilah tanah longsor.

Klasifikasi longsor yang bervariasi dikaitkan dengan mekanisme spesifik keruntuhan lereng, sifat, serta karakteristik jenis keruntuhannya. Gambar 2 menunjukkan posisi dan istilah yang paling umum digunakan untuk menggambarkan bagian-bagian unik dari tanah longsor.

Tanah longsor merupakan salah satu bencana yang paling sering terjadi di Indonesia. Menurut BNPB (2023), frekuensi bencana tanah longsor di Indonesia meningkat selama satu dekade terakhir, sehingga mengakibatkan semakin luasnya wilayah yang terdampak bencana. Tren ini disebabkan oleh meningkatnya praktik penggunaan lahan yang tidak ramah lingkungan, ditambah dengan curah hujan yang tinggi dan berkepanjangan, serta meningkatnya kejadian gempa bumi. Banyak daerah rawan longsor merupakan lahan subur



Gambar 2. Ilustrasi longsor rotasional yang telah berkembang menjadi aliran tanah.

dengan air tanah yang melimpah, yang telah dikembangkan untuk pemukiman, pertanian, dan pembangunan infrastruktur. Akibatnya, relokasi permukiman dan infrastruktur menjadi tantangan tersendiri. Oleh karena itu, beberapa faktor, termasuk kepadatan penduduk, kualitas infrastruktur, status ekonomi, dan kapasitas wilayah, berkontribusi terhadap risiko tanah longsor.

Meskipun peta bahaya tanah longsor untuk bencana geologi telah dipublikasikan dan tersedia di domain publik, lengkap dengan mitigasi di dalamnya, namun tanah longsor selalu memakan korban jiwa. Alasan yang menonjol adalah: (i) jumlah permukiman dan aktivitas masyarakat di wilayah kerawanan sedang dan tinggi masih terus bertambah; (ii) peta kerawanan longsor dan EWS (*Early Warning System*) belum optimal digunakan sebagai *database* perencanaan dan pembangunan wilayah; dan (iii) pendidikan dini di sekolah mengenai bahaya geologi seperti tanah longsor sebagai bagian dari manajemen bahaya, belum diperkenalkan secara formal dalam kurikulum sekolah.

Salah satu kejadian tanah longsor pada tahun lalu, tepatnya pada tanggal 24 Maret 2024 di Jawa Barat, terjadi setelah hujan deras

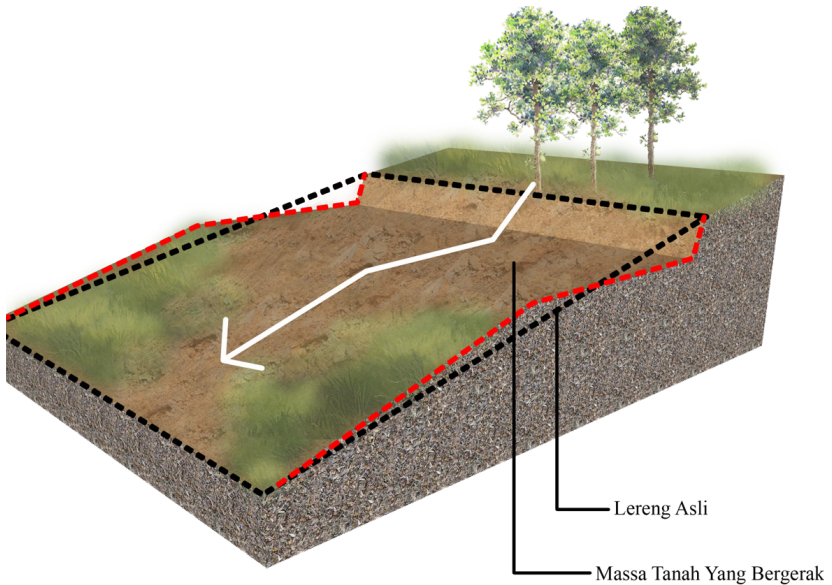
mengguayur wilayah tersebut selama kurang lebih dua jam. Peristiwa longsor tersebut menyebabkan satu korban jiwa dan sembilan orang hilang, sedangkan 400 warga desa harus mengungsi ke tempat penampungan sementara karena puluhan rumah hancur. Penyebab paling menonjol terjadinya tanah longsor tersebut adalah curah hujan dengan durasi yang lama. Namun demikian, permasalahan ini di beberapa tempat diperparah dengan penggundulan hutan. Hujan deras yang berkepanjangan juga menyebabkan beberapa wilayah di kawasan ini langganan terkena banjir.

2.2. Jenis Tanah Longsor

Istilah "Longsor" menggambarkan berbagai macam proses yang mengakibatkan pergerakan material pembentuk lereng, termasuk batuan, tanah, atau kombinasi keduanya, baik menurun maupun keluar secara lateral. Material tersebut dapat bergerak dengan cara jatuh, terguling, bergeser, menyebar, atau mengalir. Berbagai jenis tanah longsor dapat dibedakan berdasarkan jenis material yang terlibat dan cara pergerakannya.

Karakteristik jenis bahaya tanah longsor tertentu sangat penting untuk menjadi bahan pertimbangan saat merencanakan atau mengambil tindakan mitigasi yang tepat agar mengurangi risiko kerugian/kerusakan yang ditimbulkannya. Jenis tanah longsor akan menentukan kecepatan potensial pergerakan, kemungkinan volume perpindahan, jarak *run-out*, serta kemungkinan dampak tanah longsor dan tindakan mitigasi yang tepat untuk dipertimbangkan. Berikut adalah beberapa gerakan tanah yang terkait dengan longsor:

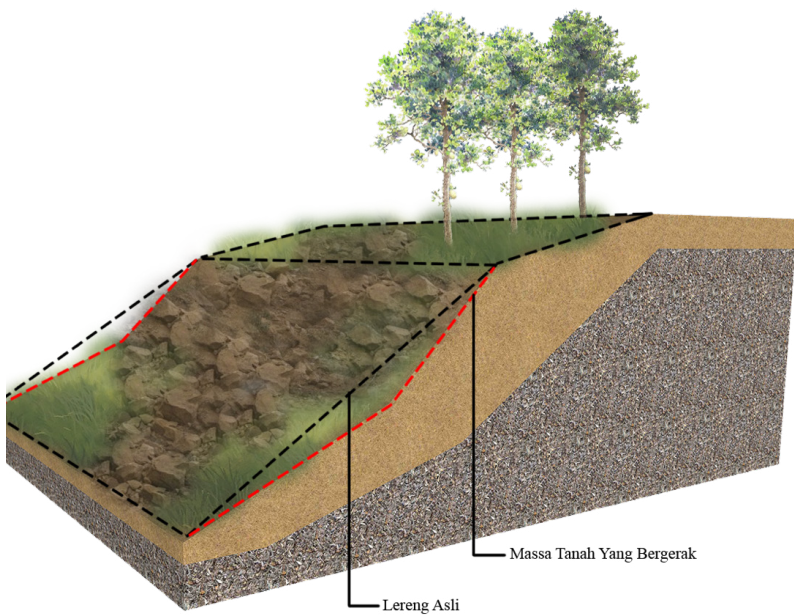
- 1) **Slides (Longsoran)** adalah gerakan menuruni lereng dari massa tanah atau batuan yang terjadi pada permukaan retakan atau pada zona yang relatif tipis dengan regangan geser yang kuat. Dua jenis longsoran utama adalah longsoran rotasi dan longsoran translasi.
 - a. Longsoran rotasi, yaitu longsoran yang permukaan retakannya melengkung ke atas (berbentuk sendok) dan gerakan longsornya



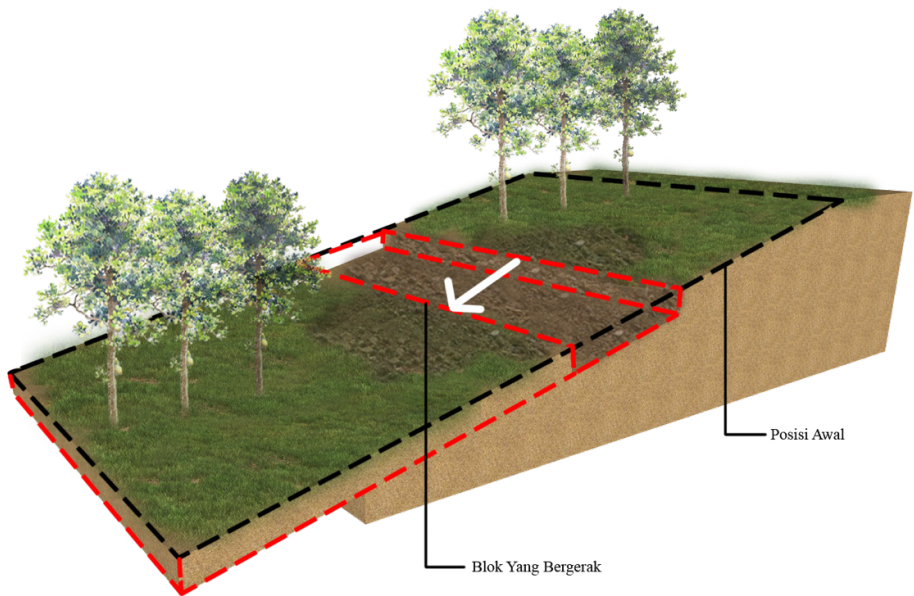
Gambar 3. Ilustrasi jenis pergerakan longsoran rotasi.

lebih atau kurang berputar pada sumbu yang sejajar dengan kontur lereng (Gambar 3).

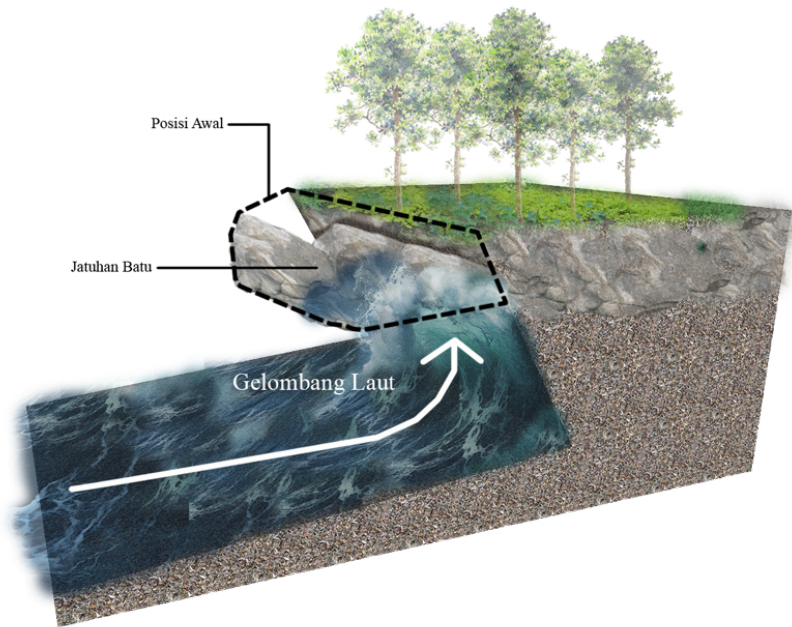
- b. Longsoran translasi, massa dalam longsor translasi bergerak keluar, atau turun dan keluar, sepanjang permukaan yang relatif datar dengan sedikit gerakan rotasi atau kemiringan ke belakang. Jenis longsor ini dapat berlanjut hingga jarak yang cukup jauh jika permukaan retakan cukup miring, berbeda dengan longsor rotasi, yang cenderung mengembalikan keseimbangan longsor (Gambar 4). Longsor translasi biasanya runtuh di sepanjang diskontinuitas geologis seperti patahan, sambungan, permukaan pelapisan, atau kontak antara batu dan tanah.
- c. Longsoran blok adalah longsor translasi di mana massa yang bergerak terdiri dari satu unit atau beberapa unit yang terkait erat, yang bergerak menuruni lereng sebagai massa yang relatif koheren (Gambar 5).



Gambar 4. Ilustrasi Jenis pergerakan longsoran translasi.

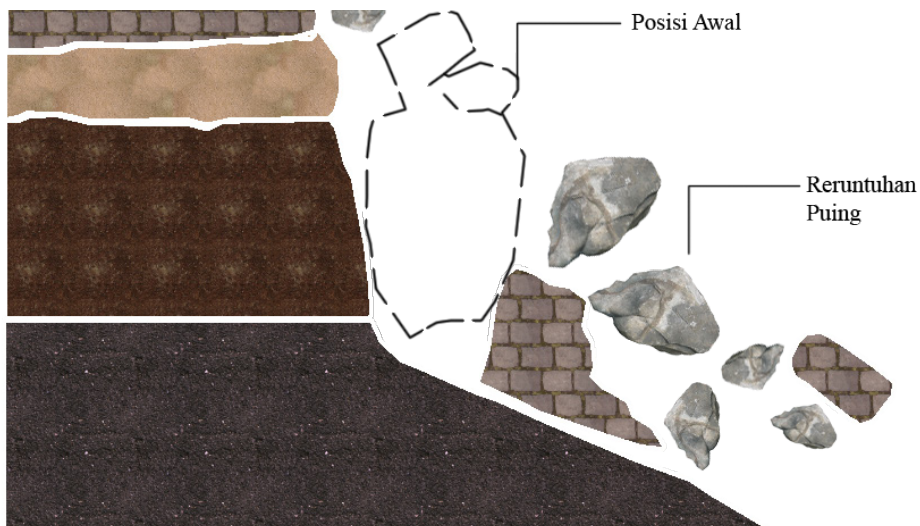


Gambar 5. Ilustrasi jenis pergerakan longsoran blok.

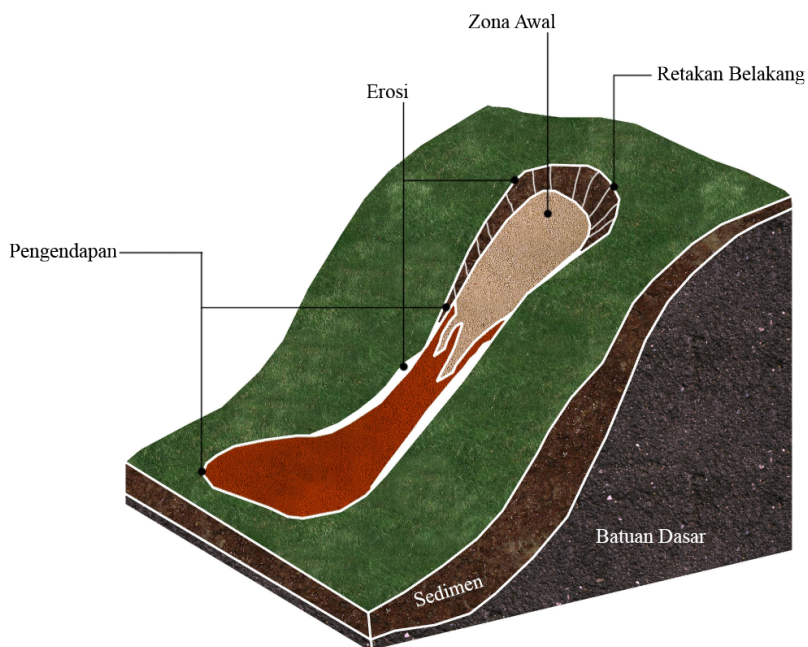


Gambar 6. Ilustrasi Jenis pergerakan longsoran falls [jatuh].

- 2) **Falls (Jatuh)** adalah gerakan turun yang tiba-tiba dari batu atau tanah, atau keduanya, yang terlepas dari lereng atau tebing yang curam (Gambar 6). Material tersebut kemudian turun terutama dengan cara jatuh, memantul, atau menggelinding, dan biasanya langsung menghantam lereng yang lebih rendah pada sudut yang lebih kecil dari sudut jatuh, yang menyebabkan pantulan. Massa yang jatuh dapat pecah saat terjadi benturan, dapat mulai menggelinding di lereng yang lebih curam, dan berlanjut hingga medan menjadi datar.
- 3) **Topple (Roboh)** dikenali sebagai rotasi maju dari lereng massa tanah atau batu di sekitar titik atau sumbu di bawah pusat gravitasi massa yang dipindahkan. Roboh terkadang didorong oleh gravitasi yang diberikan oleh berat material di lereng atas massa yang dipindahkan. Terkadang roboh disebabkan oleh cairan di celah-celah massa (Gambar 7). Roboh dapat terdiri



Gambar 7. Ilustrasi Jenis pergerakan longsoran topple [robokh].

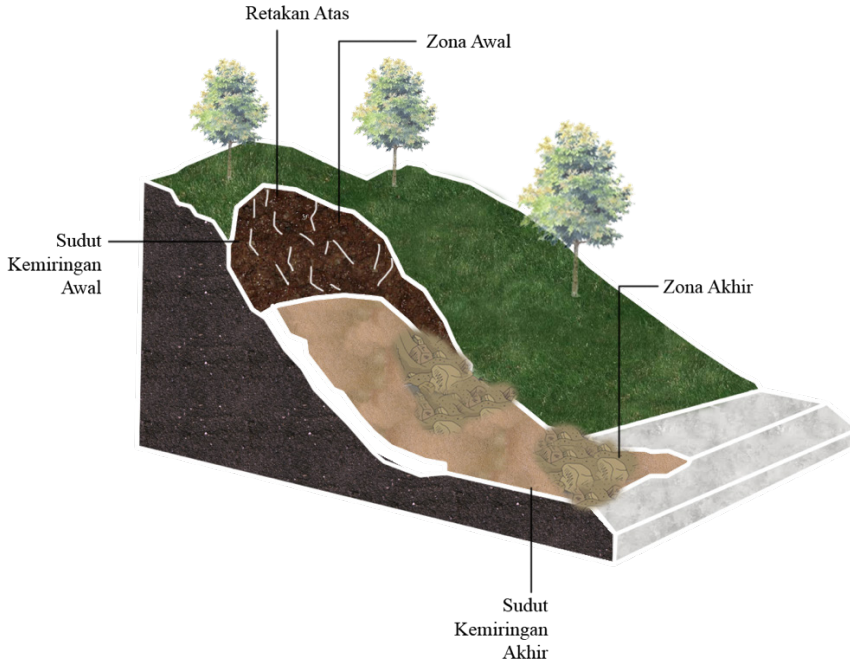


Gambar 8. Ilustrasi jenis pergerakan longsoran debris flows [aliran puing].

dari batu, puing (material kasar), atau material tanah (material berbutir halus). Roboh dapat bersifat kompleks dan komposit.

4) **Flows (Aliran)** adalah gerakan spasial yang berkesinambungan di mana permukaan gesernya berumur pendek, berjarak dekat, dan biasanya tidak dipertahankan. Kecepatan komponen dalam massa yang menggeser aliran menyerupai kecepatan dalam cairan kental. Sering kali, ada gradasi perubahan dari longsoran menjadi aliran, tergantung pada kadar air, mobilitas, dan evolusi gerakan. Ada lima kategori dasar *flows* (aliran) yang berbeda satu sama lain dalam hal-hal mendasar, yaitu:

- a. *Debris Flows* (Aliran Puing), yaitu suatu bentuk gerakan massa cepat di mana tanah gembur, batu, dan terkadang bahan organik bergabung dengan air untuk membentuk bubur yang mengalir menuruni lereng. Aliran puing umumnya disebabkan oleh aliran air permukaan yang deras, akibat curah hujan lebat yang mengikis dan menggerakkan tanah atau batu lepas di lereng. Kadang-kadang, saat longsoran rotasi atau translasi memperoleh kecepatan dan massa internal kehilangan kohesi atau memperoleh air, ia dapat berkembang menjadi aliran puing. Aliran puing dapat mematikan karena alirannya sangat cepat dan dapat terjadi tanpa adanya peringatan. (Gambar 8).
- b. *Debris Avalanche* (Longsoran Puing), pada dasarnya adalah aliran yang besar, sangat cepat, dan sering kali terjadi di lereng terbuka yang terbentuk ketika lereng yang tidak stabil runtuh dan puing-puing yang terfragmentasi yang dihasilkan dengan cepat diangkut menjauh dari lereng (Gambar 9).
- c. *Earthflow* (Aliran tanah), dapat terjadi pada lereng landai hingga sedang, umumnya di tanah berbutir halus, biasanya lempung atau lanau, tetapi juga di batuan dasar yang sangat lapuk dan mengandung lempung (Gambar 10). Massa dalam aliran tanah bergerak sebagai aliran plastis atau kental dengan deformasi internal yang kuat. Lempung laut yang rentan (*quick clay*) saat terganggu sangat rentan dan dapat kehilangan semua kekuatan

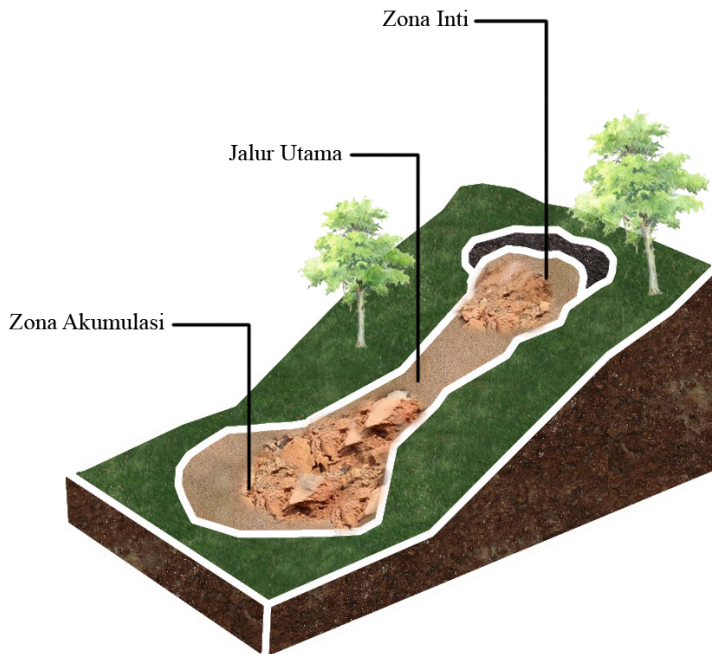


Gambar 9. Ilustrasi Jenis pergerakan longsor debris avalanche (longsor puing).

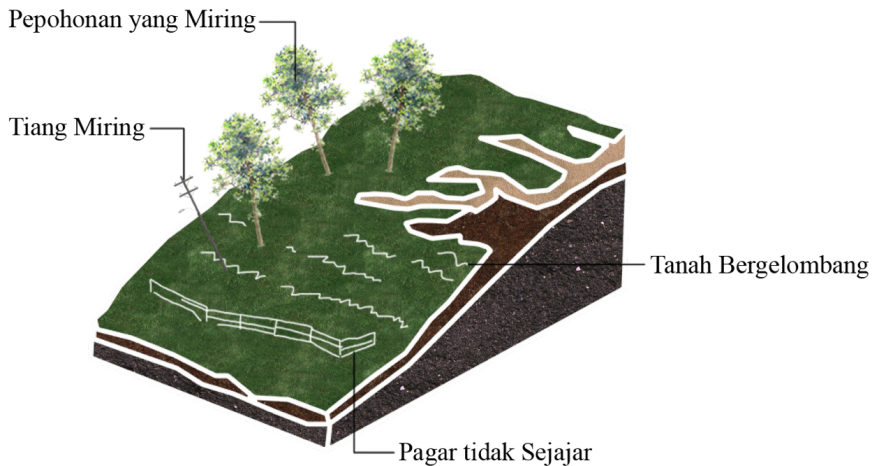
geser dengan perubahan kadar air alamnya dan tiba-tiba mencair, berpotensi menghancurkan area yang luas dan mengalir sejauh beberapa kilometer. Ukuran umumnya meningkat melalui kemunduran tebing. Longsor atau penyebaran lateral juga dapat berkembang menurun lereng menjadi aliran tanah. Aliran tanah dapat berkisar dari sangat lambat (merayap) hingga cepat dan dahsyat.

- d. Lahars/Volcanic *Debris Flows* (Aliran Puing Vulkanik) atau dikenal sebagai aliran lumpur vulkanik. Aliran ini berasal dari lereng gunung berapi dan merupakan jenis aliran puing (Gambar 10). Lahar memobilisasi akumulasi lepas tefra (padatan di udara yang meletus dari gunung berapi) dan puing terkait.

- e. *Creep* (Aliran tanah lambat), yaitu gerakan menurun yang lambat, stabil, dan tidak terasa dari tanah atau batu pembentuk lereng. Gerakan disebabkan oleh tegangan geser yang cukup untuk menghasilkan deformasi permanen, tetapi terlalu kecil untuk menghasilkan kegagalan geser. Secara umum ada tiga jenis *creep*: (1) musiman, di mana gerakan berada di dalam kedalaman tanah yang dipengaruhi oleh perubahan musim pada kelembapan tanah dan suhu tanah; (2) kontinu, di mana tegangan geser terus-menerus melebihi kekuatan material; dan (3) progresif, di mana lereng mencapai titik kegagalan seperti jenis gerakan massa lainnya. Perambatan ditunjukkan oleh batang pohon yang melengkung, pagar atau dinding penahan yang bengkok, tiang atau pagar yang miring, dan riak atau tonjolan tanah kecil (Gambar 11).



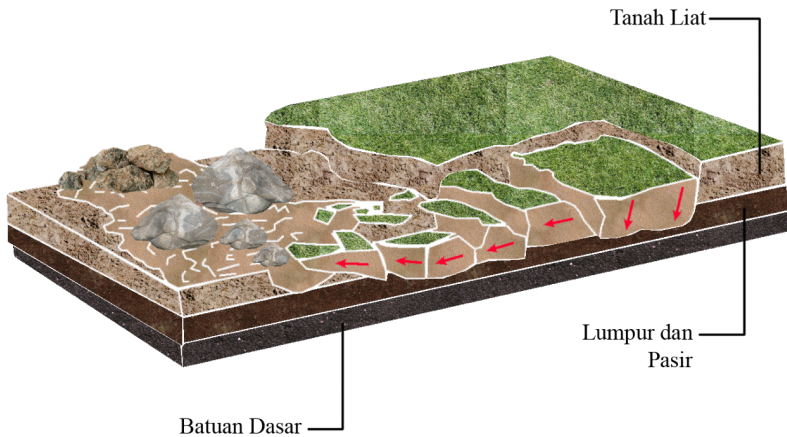
Gambar 10. Ilustrasi Jenis pergerakan longsoran earthflow (aliran tanah).



Gambar 11. Ilustrasi Jenis pergerakan longsoran creep [aliran tanah lambat].

5) ***Spreads*** adalah perpanjangan massa tanah atau batuan yang kohesif, yang dikombinasikan dengan penurunan umum massa material kohesif yang retak ke material dasar yang lebih lunak. Penyebaran dapat terjadi akibat pencairan atau aliran (dan ekstrusi) material dasar yang lebih lunak. Jenis penyebaran meliputi penyebaran blok, penyebaran pencairan, dan penyebaran lateral (*Lateral Spreads*, Gambar 12). Penyebaran Lateral biasanya terjadi pada lereng yang sangat landai atau medan yang pada dasarnya datar, terutama di tempat lapisan atas batuan atau tanah yang lebih kuat mengalami perluasan dan bergerak di atas lapisan dasar yang lebih lunak dan lebih lemah. Kegagalan seperti ini biasanya disertai dengan beberapa penurunan umum ke unit dasar yang lebih lemah.

Dalam penyebaran batuan, tanah padat memanjang dan retak, menarik diri perlahan dari tanah yang stabil dan bergerak di atas lapisan yang lebih lemah tanpa harus membentuk permukaan retakan yang dapat dikenali. Unit yang lebih lunak dan lemah,



Gambar 12. Ilustrasi Jenis pergerakan longsoran spreads.

dalam kondisi tertentu, dapat terjepit ke atas, menyebabkan retakan yang membagi lapisan memanjang menjadi blok. Pada penyebaran tanah, lapisan atas yang stabil meluas sepanjang unit dasar yang lebih lemah yang telah mengalir setelah pencairan atau deformasi plastik. Jika unit yang lebih lemah relatif tebal, blok-blok fraktur yang berada di atasnya dapat turun ke dalamnya, bergeser, berputar, hancur, mencair, atau bahkan mengalir.

2.3 Penyebab Terjadinya Longsor

Tanah longsor mempunyai tiga penyebab utama: geologi, morfologi, dan aktivitas manusia. Geologi mengacu pada karakteristik material itu sendiri. Tanah atau batuan mungkin lemah atau retak, atau lapisan yang berbeda mungkin mempunyai kekuatan dan kekakuan yang berbeda. Morfologi mengacu pada struktur tanah.

- 1) Penyebab geologis
 - a. Material yang lemah atau sensitif.
 - b. Material yang lapuk.
 - c. Material yang tergeser, tersambung, atau retak.

- d. Diskontinuitas yang berorientasi berlawanan (perlapisan, skistositas, patahan, ketidakselarasan, kontak, dan sebagainya).
 - e. Kontras dalam permeabilitas dan/atau kekakuan material.
- 2) Penyebab morfologis
- a. Pengangkatan tektonik atau vulkanik.
 - b. Pantulan gletser.
 - c. Erosi fluvial, gelombang, atau gletser pada kaki lereng atau tepi lateral.
 - d. Erosi bawah tanah (larutan, perpipaan).
 - e. Lereng yang memuat pengendapan atau puncaknya.
 - f. Hilangnya vegetasi (oleh kebakaran, kekeringan).
 - g. Pencairan.
 - h. Pelapukan beku-cair.
 - i. Pelapukan susut-bengkak.
- 3) Penyebab manusia
- a. Penggalian lereng atau ujung lereng.
 - b. Pembebanan lereng atau puncak.
 - c. Penurunan muka air (waduk).
 - d. Penggundulan hutan.
 - e. Irigasi.
 - f. Penambangan.
 - g. Getaran buatan.
 - h. Kebocoran air dari utilitas.

Tanah longsor dapat terjadi pada lereng yang sudah berada di ambang pergerakan akibat curah hujan, perubahan ketinggian air, erosi aliran sungai, perubahan muka air tanah, gempa bumi, aktivitas gunung berapi, gangguan aktivitas manusia, atau kombinasi dari faktor-faktor tersebut. Meskipun ada beberapa jenis penyebab tanah longsor, ada empat penyebab tanah longsor yang paling merusak di seluruh dunia, yaitu:

1) *Landslides Due to Water (Longsor Akibat Air)*

Penjenuhan lereng oleh air merupakan penyebab utama longsor. Penjenuhan dapat terjadi akibat curah hujan yang tinggi dengan

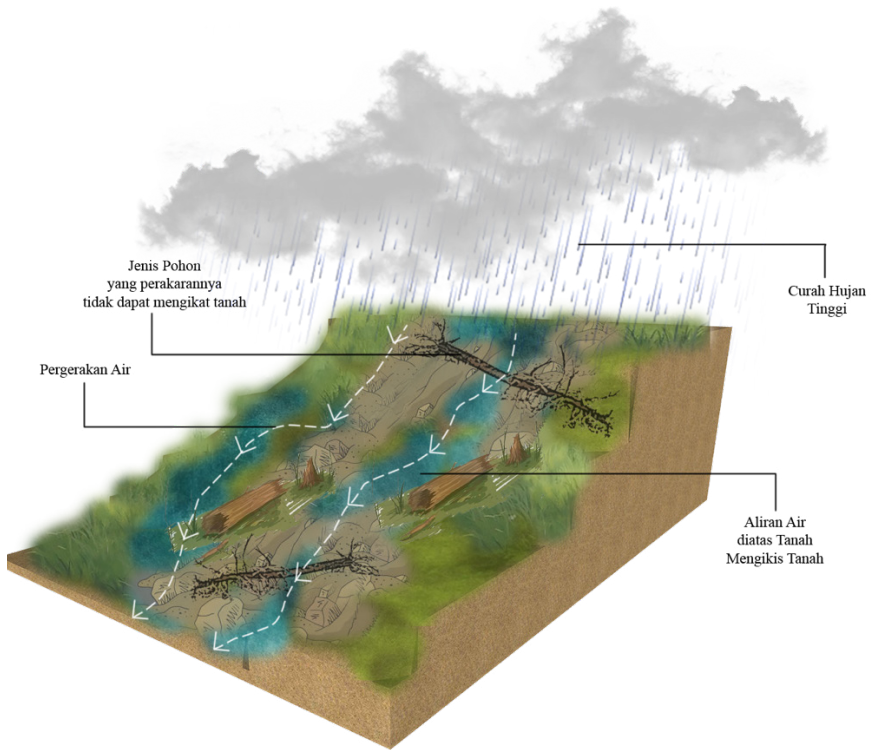
durasi yang lama, perubahan muka air tanah, dan perubahan muka air permukaan di sepanjang garis pantai, bendungan tanah, serta di tepi danau, waduk, kanal, dan sungai. Longsor dan banjir saling berhubungan erat karena keduanya terkait dengan curah hujan, limpasan, dan penjenjutan tanah oleh air.

Banjir dapat menyebabkan longsor dengan menggerus tepi sungai dan dengan penjenjutan lereng oleh air permukaan. Selain itu, aliran puing dan aliran lumpur biasanya terjadi di saluran sungai kecil yang curam dan umumnya disalahartikan sebagai banjir. Pada kenyataannya, kedua kejadian ini sering terjadi secara bersamaan di daerah yang sama. Sebaliknya, tanah longsor juga dapat menyebabkan banjir ketika batu dan puing yang bergeser menghalangi saluran sungai dan jalur air lainnya, yang memungkinkan sejumlah besar air mengalir kembali ke belakang bendungan tersebut. Hal ini menyebabkan banjir di daerah aliran balik dan jika bendungan jebol, banjir akan terjadi di daerah hilir berikutnya.

Selain itu, puing longsor padat dapat "Memperbesar" atau menambah volume dan kepadatan aliran sungai yang normal atau menyebabkan penyumbatan dan pengalihan saluran, sehingga menciptakan kondisi banjir atau erosi lokal. Longsor juga dapat menyebabkan tsunami, meluapnya waduk, dan/atau berkurangnya kapasitas waduk untuk menyimpan air. (Gambar 13) menunjukkan tanah longsor dahsyat yang disebabkan oleh curah hujan, dan mungkin diperparah oleh adanya kebocoran pipa air sehingga menambah lebih banyak air masuk ke dalam tanah.

2) *Landslides Due to Volcanic Activity* (Longsor Akibat Aktivitas Gunung Berapi)

Longsor akibat aktivitas gunung berapi merupakan salah satu jenis longsor yang paling dahsyat. Lava gunung berapi dapat mencairkan salju dengan cepat, yang dapat membentuk banjir batu, tanah, abu, dan air yang mengalir dengan cepat di lereng gunung berapi yang curam, menghancurkan apapun yang dilaluinya. Aliran puing gunung berapi ini (juga dikenal sebagai



Gambar 13. Ilustrasi landslides due to water (longsor akibat air).

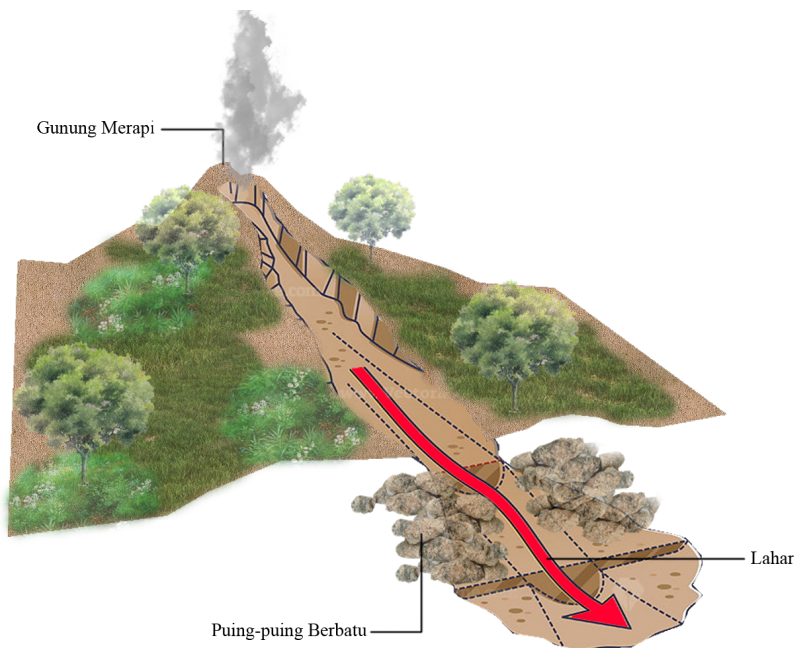
lahar, istilah Indonesia) dapat mencapai jarak yang sangat jauh setelah meninggalkan lereng gunung berapi dan dapat merusak bangunan di daerah datar sekitar gunung berapi. Bangunan gunung berapi adalah struktur yang masih muda, tidak terkonsolidasi dan secara geologis lemah yang dalam banyak kasus dapat runtuh, serta menyebabkan longsor batuan, longsor tanah, dan longsor puing.

Banyak pulau yang berasal dari gunung berapi mengalami longsor berkala di daerah sekelilingnya (akibat endapan permukaan gunung berapi yang lemah) dan massa tanah serta batu meluncur ke laut atau badan air lainnya, seperti teluk. Runtuhnya gunung berapi tersebut dapat menyebabkan tanah

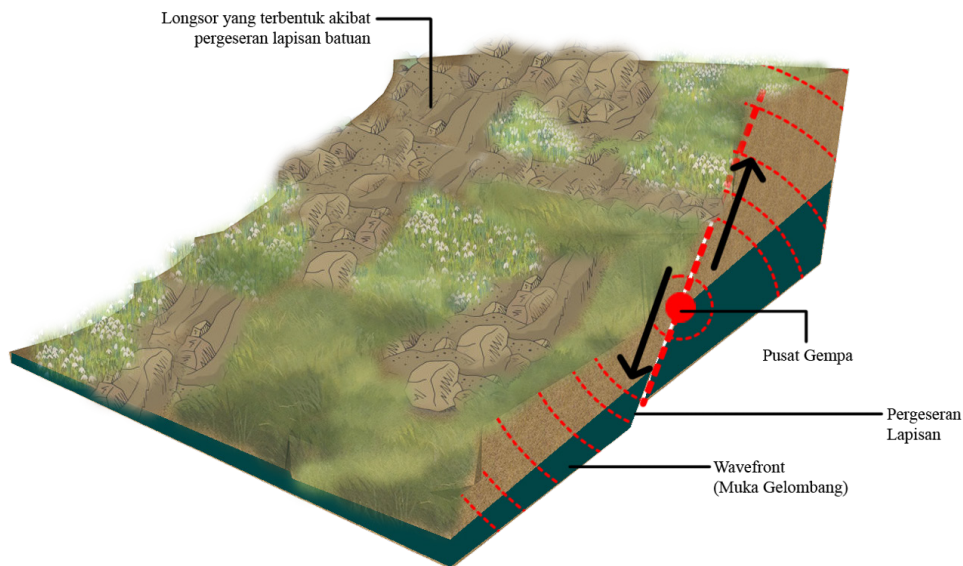
longsor bawah laut yang besar yang dapat dengan cepat memindahkan air, yang kemudian menimbulkan tsunami mematikan yang dapat menjalar dan menimbulkan kerusakan pada jarak yang jauh. (Gambar 14) menunjukkan runtuhnya sisi gunung berapi dan kerusakan yang diakibatkannya. Lahar ini menewaskan lebih dari 2.000 orang saat melanda kota El Porvenir dan Rolando Rodriguez (Foto oleh K.M. Smith, Survei Geologi AS.)

3) *Landslides Due to Seismic Activity* (Longsor Akibat Aktivitas Seismik)

Gempa bumi dapat memicu tanah longsor akibat guncangan tanah yang hebat karena gelombang seismic. Guncangan tersebut melemahkan stabilitas lereng dan dapat menyebabkan material bumi bergerak ke bawah. Banyak daerah pegunungan yang



Gambar 14. Ilustrasi landslides due to volcanic activity [longsor akibat aktivitas gunung berapi]. [Foto oleh: K.M. Smith, Survei Geologi AS].



Gambar 15. Ilustrasi landslides due to seismic activity (longsor akibat aktivitas seismik)

rentan terhadap longsor juga sering mengalami gempa bumi dengan intensitas sedang dalam periode yang tercatat. Terjadinya gempa bumi di daerah rawan longsor yang curam meningkatkan kemungkinan terjadinya longsor. Dapat disebabkan karena guncangan tanah saja atau pelebaran material tanah yang disebabkan oleh guncangan, guncangan ini memungkinkan infiltrasi air dengan cepat. Runtuhan batu juga dapat disebabkan oleh melonggarnya batu atau formasi berbatu akibat guncangan tanah karena gempa bumi. (Gambar 15) menunjukkan kerusakan tanah longsor akibat gempa bumi pada rumah yang dibangun di atas timbunan buatan.

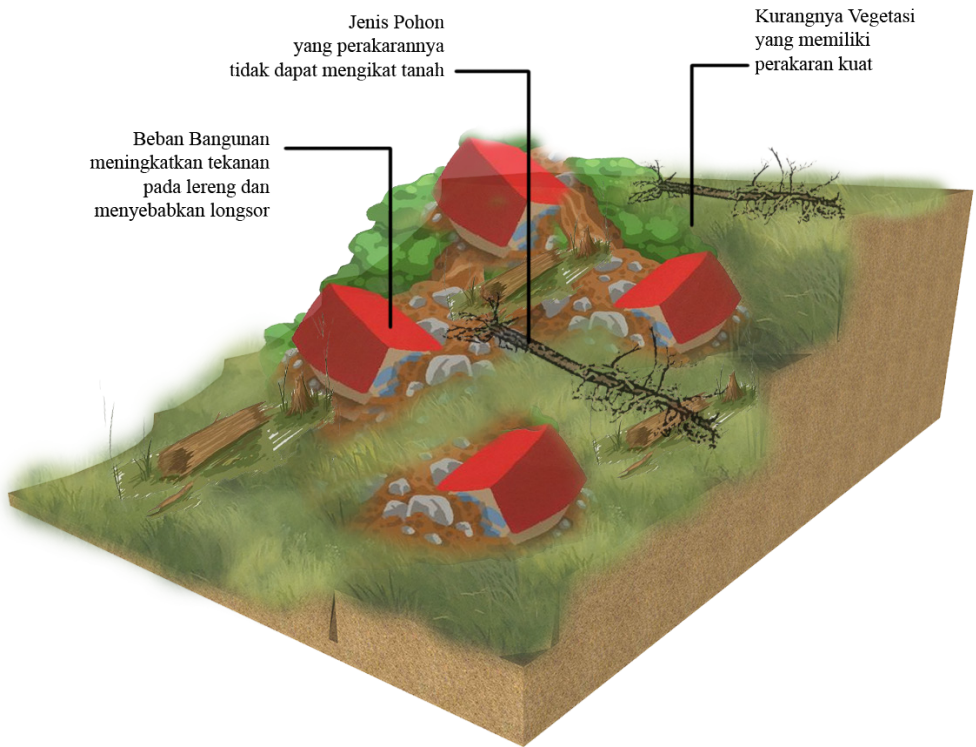
Ada juga bahaya besar terbentuknya bendungan tanah longsor di aliran sungai dan anak sungai di bawah lereng curam, akibat

terguncangnya batu dan tanah oleh gempa bumi. Bendungan tanah longsor ini sering kali menghalangi aliran air secara keseluruhan atau sebagian, menyebabkan air menggenang di belakang bendungan tanah yang longsor, membanjiri daerah di hulu sungai. Dikarenakan bendungan ini sering kali tidak stabil, bendungan dapat terkikis dengan cepat atau dalam jangka waktu tertentu dapat runtuh secara dahsyat. Jika hal ini terjadi, air yang tertahan akan dilepaskan secara tiba-tiba, mengakibatkan banjir besar di area hilir dan berpotensi menimbulkan kerusakan yang parah. Di seluruh dunia, tanah longsor yang disebabkan oleh gempa bumi menimbulkan korban jiwa dan kerusakan bangunan pada tingkat yang cukup tinggi.

4) *Landslides Due to Human Activities* (Longsor Akibat Aktivitas Manusia)

Aktivitas manusia seperti penebangan hutan, pembangunan hunian di badan lereng, penggalian di kaki lereng atau penggunaan alat berat yang menimbulkan getaran dapat menyebabkan terjadinya longsor (Gambar 16). Penebangan hutan secara besar-besaran akan mengurangi tutupan vegetasi yang berfungsi sebagai penahan air hujan. Akar tanaman juga berperan penting dalam mengikat partikel tanah sehingga tanah menjadi lebih stabil.

Pembangunan di lereng tanpa perencanaan yang matang, seperti pembuatan jalan atau pemukiman, dapat mengganggu stabilitas lereng. Beban tambahan dari bangunan dapat meningkatkan tekanan pada lereng dan memicu longsor. Penggalian tanah pada lereng dapat menciptakan lereng yang curam dan tidak stabil. Selain itu, penggalian juga dapat memotong akar tanaman yang berfungsi mengikat tanah. Aktivitas seperti peledakan atau penggunaan alat berat yang menimbulkan getaran dapat memicu longsor, terutama pada lereng yang memang sudah labil.



Gambar 16. Ilustrasi landslides due to human activities (longsor akibat aktivitas manusia).

2.4 Dampak Longsor

Longsor bukan hanya sekadar pergerakan tanah. Peristiwa ini membawa dampak yang sangat luas dan kompleks, baik terhadap lingkungan, sosial, maupun ekonomi. Memahami dampak longsor secara mendalam akan membantu kita lebih menghargai pentingnya upaya mitigasi untuk meminimalisir kerugian yang ditimbulkannya.

1) Dampak longsor terhadap lingkungan

Longsor bukan hanya sekadar pergerakan tanah. Peristiwa ini meninggalkan bekas luka yang dalam pada lingkungan, mengubah lanskap secara drastis dan mengganggu keseimbangan alam,

perubahan topografi, terganggunya sistem drainase, erosi, dan sedimentasi, serta kerusakan geologi juga akan terjadi.

- a. Perubahan topografi terjadi ketika longsor menciptakan tebing-tebing curam dan lembah-lembah yang dalam, mengubah kontur permukaan tanah secara signifikan. Longsor juga akan menyebabkan perubahan ketinggian tanah, di mana beberapa area mengalami penurunan ketinggian, sementara area lain mengalami peningkatan, menyebabkan perubahan drainase dan aliran air. Selain itu, longsor juga akan menyebabkan kerusakan lahan dengan hilangnya lapisan tanah subur. Lapisan tanah bagian atas yang kaya akan nutrisi terkikis dan terbawa oleh material longsor, mengurangi kesuburan tanah dan kemampuannya untuk mendukung kehidupan tanaman. Lahan yang terkena longsor sering kali menjadi tandus dan sulit untuk direhabilitasi, membutuhkan waktu yang lama untuk memulihkan kesuburannya.
- b. Gangguan drainase terjadi ketika longsor menyebabkan penyumbatan saluran air akibat material yang jatuh menyumbat sungai, saluran irigasi, dan drainase alami, menciptakan genangan air yang akan meningkatkan risiko banjir. Longsor juga akan mengakibatkan perubahan pola aliran air. Perubahan topografi akibat longsor dapat mengubah arah aliran air permukaan, menyebabkan erosi pada daerah yang sebelumnya tidak terpengaruh.
- c. Erosi dan sedimentasi terjadi ketika longsor akibat hujan deras dapat memicu erosi tanah yang lebih parah, membawa sedimen ke sungai dan danau. Endapan sedimen dapat mengubur habitat ikan, mengurangi kedalaman sungai, dan meningkatkan kekeruhan air. Selain itu, endapan sedimen di waduk dapat mengurangi kapasitas tampung air dan memperpendek umur waduk.
- d. Kerusakan geologi terjadi ketika longsor dapat memicu retakan dan geseran tanah pada area di sekitarnya, meningkatkan potensi

terjadinya longsor susulan. Selain itu, pada beberapa kasus, longsor dapat mengikis batuan dasar, memperlemah struktur tanah, dan meningkatkan kerentanan terhadap erosi.

2) Dampak Longsor Terhadap Sosial Ekonomi

Longsor bukan hanya peristiwa alam yang merusak lingkungan. Bencana ini juga membawa dampak yang sangat signifikan terhadap kehidupan sosial dan ekonomi masyarakat. Longsor menyebabkan kerugian materiel dan imateriel, seperti menimbulkan korban jiwa dan luka-luka, pengungsian dan trauma psikologis, gangguan aktivitas ekonomi, dan beban keuangan pemerintah.

- a. Kerugian materiel, yaitu longsor mengakibatkan kerusakan infrastruktur seperti jalan, jembatan, bangunan, dan fasilitas umum lainnya sering kali rusak parah sehingga akan menghambat aksesibilitas dan aktivitas ekonomi. Lahan pertanian yang terdampak longsor akan mengalami penurunan produktivitas, berdampak pada pendapatan petani dan ketersediaan pangan. Rumah-rumah warga yang berada di area rawan longsor sering kali hancur, menyebabkan masyarakat kehilangan tempat tinggal dan harta benda.
- b. Longsor sering kali mengakibatkan korban jiwa yang cukup besar, baik akibat tertimbun material longsor maupun cedera serius. Hal ini tentu saja akan meningkatkan beban biaya kesehatan masyarakat dan pemerintah karena kebutuhan perawatan medis yang intensif.
- c. Pengungsian dan trauma psikologis terjadi karena longsor merusak rumah-rumah penduduk sehingga mereka harus berpindah ke tempat yang lebih aman, menyebabkan gangguan terhadap aktivitas kehidupan sehari-hari. Pengalaman traumatis akibat longsor dapat menyebabkan gangguan mental seperti stres pasca-trauma, depresi, dan kecemasan.
- d. Gangguan aktivitas ekonomi, longsor dapat mengakibatkan kerusakan infrastruktur dan lahan pertanian, sehingga

produktivitas ekonomi menurun secara keseluruhan, banyak masyarakat kehilangan mata pencaharian. Masyarakat yang terdampak longsor sering kali menjadi bergantung pada bantuan kemanusiaan untuk memenuhi kebutuhan dasar.

- e. Beban keuangan pemerintah bertambah, karena pemerintah harus mengalokasikan anggaran yang besar untuk rehabilitasi infrastruktur, pemulihan lingkungan, dan bantuan kepada korban. Selain itu, pemerintah juga harus menanggung biaya pengungsian dan pemenuhan kebutuhan dasar para pengungsi.

2.5 Upaya Pencegahan Longsor Konvensional

Upaya metode konvensional yang telah diaplikasikan selama ini, meski masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan, kenyataannya metode ini telah memberikan kontribusi dalam mengurangi risiko bencana longsor.

- 1) Struktur dinding penahan tanah, baik yang terbuat dari beton maupun batu kali yang berfungsi untuk menahan massa tanah agar tidak bergerak. Selain itu, terdapat bronjong yang terbuat dari keranjang kawat berisi batu kali yang disusun membentuk dinding penahan tanah. *Sheet pile* adalah dinding penahan tanah yang terbuat dari baja atau beton yang dipancang ke dalam tanah. Struktur penahan tanah memiliki kelebihan yakni efektif menahan gaya dorong tanah dengan konstruksi yang relatif cepat. Namun juga memiliki kekurangan yaitu membutuhkan biaya konstruksi tinggi, perawatan rutin, dan minim estetika lingkungan.
- 2) Saluran drainase dengan sistem saluran terbuka atau tertutup yang berfungsi untuk mengalirkan air permukaan dan mengurangi tekanan air dalam tanah. Sumur resapan berupa lubang yang dibuat untuk menyerap air hujan ke dalam tanah. Drainase memiliki kelebihan karena bisa mencegah genangan air yang dapat memicu longsor. Namun drainase juga memiliki kekurangan karena membutuhkan perawatan rutin, tidak efektif untuk mengatasi masalah erosi yang parah.

- 3) Penanaman pohon dengan sistem perakaran yang kuat, baik secara lateral maupun vertikal dapat membantu mengikat tanah dan mengurangi erosi. Menanam rumput-rumputan dapat membantu melindungi permukaan tanah dari erosi akibat hujan. Vegetasi memiliki kelebihan yakni ramah lingkungan, biaya relatif murah, dapat meningkatkan keindahan lanskap dan berkelanjutan. Namun vegetasi juga memiliki kekurangan, pertumbuhan tanaman membutuhkan waktu yang relatif lama sehingga tidak efektif untuk mengatasi masalah longsor yang sudah parah.
- 4) Pengaturan tata ruang dapat dilakukan dengan membatasi pembangunan di daerah rawan longsor serta menetapkan zona aman di sekitar lereng. Pengaturan tata ruang memiliki kelebihan karena dapat mencegah peningkatan kerentanan terhadap longsor. Namun cara ini cukup sulit diterapkan jika sudah ada permukiman di sekitar kawasan.

Upaya pencegahan longsor konvensional telah memberikan kontribusi dalam mengurangi risiko bencana. Namun, metode-metode ini memiliki beberapa keterbatasan, seperti biaya yang tinggi, dampak lingkungan, dan kurang keberlanjutan. Oleh karena itu, perlu adanya inovasi dalam upaya mitigasi terhadap longsor, salah satunya adalah dengan menerapkan metode *soil bioengineering*.

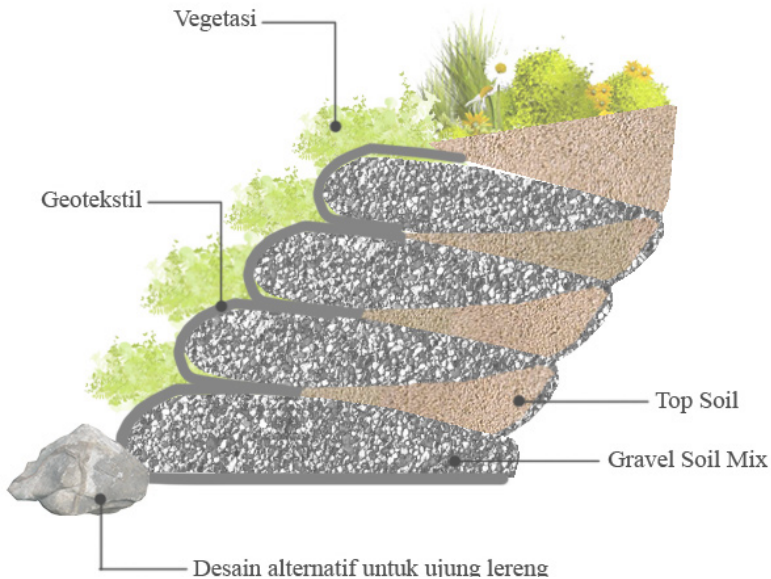
SOIL BIOENGINEERING

3.1 Konsep Dasar *Soil Bioengineering*

Soil Bioengineering adalah metode stabilisasi lereng dan pengendalian melalui pencegahan bencana longsor yang memanfaatkan tumbuhan hidup dan/atau bagian-bagiannya, dikombinasikan dengan teknik rekayasa sipil konvensional, untuk meningkatkan stabilitas tanah. Gambar 17 menjelaskan konsep dasar *soil bioengineering*, yaitu penggabungan kekuatan mekanik material non-hidup (misalnya, batu, kayu, geotekstil) dengan kemampuan tumbuhan hidup untuk memperkuat tanah dan mengendalikan erosi.

Selain bermanfaat untuk stabilisasi lereng dan mencegah longsor, *soil bioengineering* juga memiliki banyak manfaat untuk memperbaiki kualitas lingkungan secara umum, seperti diuraikan sebagai berikut:

- 1) Meningkatkan kualitas tanah karena memanfaatkan tanaman. Akar tanaman akan membantu mengikat partikel tanah, meningkatkan struktur tanah, porositas, dan permeabilitas. Proses ini juga meningkatkan kandungan bahan organik tanah dan aktivitas mikroorganisme tanah, yang berkontribusi pada peningkatan kesuburan tanah. Tanaman juga dapat membantu



Gambar 17. Konsep dasar soil bioengineering.

memperbaiki tanah yang terkontaminasi melalui proses fitoremediasi.

- 2) Meningkatkan kualitas air mengingat vegetasi yang ditanam dalam teknik *soil bioengineering* berperan sebagai filter alami. Akar tanaman dan mikroorganisme tanah dapat menyerap dan mengolah polutan dalam air limpasan permukaan, mengurangi erosi tanah, dan sedimentasi yang masuk ke badan air. Hal ini akan meningkatkan kualitas air di sungai, danau, dan perairan lainnya.
- 3) Meningkatkan keanekaragaman hayati karena *soil bioengineering* sering kali menggunakan beragam jenis tanaman lokal yang disesuaikan dengan kondisi lingkungan setempat. Hal ini dapat meningkatkan keanekaragaman hayati flora dan fauna, menyediakan habitat bagi berbagai spesies serangga, burung, dan hewan lainnya.
- 4) Memperbaiki estetika lanskap dengan merancang ruang luar dengan memanfaatkan tanaman sehingga tercipta lanskap yang lebih alami dan indah dibandingkan dengan struktur beton atau

batu. Nilai estetika lingkungan meningkat dengan terwujudnya ruang terbuka hijau yang lebih nyaman sehingga meningkatkan kualitas hidup masyarakat di sekitarnya.

- 5) Terealisasinya mitigasi perubahan iklim, mengingat tanaman dapat menyerap karbon dioksida dari atmosfer melalui proses fotosintesis, membantu mengurangi dampak perubahan iklim. Peningkatan kandungan bahan organik tanah juga dapat menyimpan karbon dalam jangka panjang.
- 6) Vegetasi yang ditanam dapat berperan sebagai peredam suara dan filter udara, mengurangi kebisingan serta polusi udara di lingkungan sekitarnya.

Prinsip *soil bioengineering* berpusat pada pemanfaatan tumbuhan hidup dan material alami lainnya untuk menstabilkan dan melindungi tanah, terutama pada lereng dan tepi sungai. Prinsip-prinsip ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

1) Pemanfaatan Proses Biologis dan Mekanis Tumbuhan

- a. Akar tumbuhan berperan penting dalam memperkuat tanah. Akar yang kuat dan ekstensif mengikat partikel-partikel tanah, meningkatkan kohesi dan kekuatan geser tanah. Akar juga dapat menembus lapisan tanah yang lebih dalam, memberikan stabilitas tambahan.
- b. Tajuk tumbuhan membantu mengurangi dampak erosi akibat air hujan dan angin. Tajuk mengurangi kecepatan air hujan yang jatuh ke tanah, menyerap sebagian air hujan, dan mengurangi kekuatan angin di permukaan tanah.
- c. Tumbuhan yang mati dan membusuk menambahkan bahan organik ke dalam tanah. Bahan organik ini memperbaiki struktur tanah, meningkatkan porositas, dan meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air.

2) Integrasi dengan Lingkungan

- a. *Soil Bioengineering* memprioritaskan penggunaan spesies tumbuhan lokal yang telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan setempat. Spesies lokal lebih tahan terhadap hama

dan penyakit, dan lebih mampu bertahan dalam kondisi iklim dan tanah yang ada.

- b. Pemanfaatan beragam jenis tumbuhan meningkatkan keanekaragaman hayati dan menciptakan ekosistem yang lebih stabil dan tahan terhadap gangguan.
- c. Teknik *soil bioengineering* dirancang untuk menyatu dengan lanskap alami, meminimalkan dampak visual dan menjaga keindahan lingkungan.

3) Pendekatan Holistik dan Terpadu

- a. *Soil Bioengineering* mempertimbangkan interaksi antara faktor-faktor lingkungan seperti tanah, air, iklim, dan vegetasi.
- b. *Soil Bioengineering* menggabungkan prinsip-prinsip keilmuan Teknik Sipil dengan pengetahuan tentang proses biologis tumbuhan untuk merancang solusi yang efektif dan berkelanjutan.
- c. *Soil Bioengineering* melibatkan proses pemeliharaan dan monitoring jangka panjang untuk memastikan keberhasilan dan keberlanjutan proyek.

Secara singkat, prinsip *soil bioengineering* adalah memanfaatkan tumbuhan dan proses alami untuk menstabilkan tanah, dengan pendekatan yang terintegrasi, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Kestabilan lereng dan longsor sangat dipengaruhi oleh *soil bioengineering*, alasannya adalah sebagai berikut:

- 1) Akar tumbuhan berperan penting dalam memperkuat tanah. Akar-akar tersebut menembus dan mengikat partikel-partikel tanah, membentuk semacam jaring pengaman alami. Hal ini meningkatkan kohesi dan sudut geser internal tanah, sehingga lereng menjadi lebih tahan terhadap gaya-gaya yang dapat memicu longsor. Kekuatan akar bervariasi tergantung jenis tumbuhan. Tumbuhan dengan sistem perakaran yang dalam dan luas lebih efektif dalam menstabilkan lereng yang dalam.
- 2) Tajuk tumbuhan dan serasah yang dihasilkan membantu melindungi permukaan tanah dari erosi akibat air hujan dan

angin. Tajuk tumbuhan mengurangi energi kinetik air hujan yang jatuh, sementara serasah membentuk lapisan pelindung di permukaan tanah. Dengan mengurangi erosi, kelongsoran tanah dapat dicegah.

- 3) Beberapa jenis tumbuhan dapat membantu meningkatkan drainase lereng. Akar-akar tumbuhan menciptakan jalur-jalur kecil di dalam tanah yang memungkinkan air mengalir lebih mudah. Dengan demikian, tekanan air pori dalam tanah berkurang, yang merupakan salah satu faktor utama penyebab longsor.
- 4) *Soil Bioengineering* menggabungkan aspek mekanik dan biologis. Material non-hidup seperti bronjong, kayu, atau geotekstil memberikan dukungan struktural awal, sementara tumbuhan hidup berperan memperkuat struktur tersebut seiring waktu. Akar tumbuhan yang tumbuh menembus dan mengikat material-material tersebut, menciptakan struktur komposit yang lebih kuat dan tahan lama.

Keberhasilan implementasi *soil bioengineering* dipengaruhi oleh 3 (tiga) faktor utama yaitu pemilihan jenis tumbuhan yang dipilih dengan cermat berdasarkan kondisi lingkungan setempat, seperti iklim, jenis tanah, dan tingkat curah hujan; teknik penanaman yang tepat untuk memastikan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan yang optimal serta faktor pemeliharaan rutin, seperti pemangkasan dan penyiraman, diperlukan untuk menjaga kesehatan dan kekuatan tumbuhan.

3.1.1 Pemilihan Tumbuhan

Pemilihan jenis tumbuhan dalam *soil bioengineering* sangat krusial dan bergantung pada beberapa faktor, seperti kondisi iklim, jenis tanah, ketersediaan air, dan tujuan spesifik proyek. Namun, secara umum, tumbuhan yang dipilih harus memiliki karakteristik tertentu seperti sistem perakaran yang kuat dan ekstensif, pertumbuhan yang cepat, adaptasi terhadap lingkungan yang keras, dan kemampuan untuk menahan erosi.

Beberapa jenis tumbuhan yang umum digunakan dalam *soil bioengineering*, dikelompokkan berdasarkan fungsinya, misalnya:

1) Tumbuhan untuk penguatan lereng:

- a. Rumput Vetiver (*Vetiveria Zizanioides*) memiliki sistem perakaran yang sangat dalam dan kuat, mampu mengikat tanah secara efektif dan tahan terhadap kekeringan. Sangat cocok untuk stabilisasi lereng curam dan pengendalian erosi *gully*.
- b. Beberapa jenis bambu, terutama yang berakar serabut dan *rhizomatous*, efektif dalam menstabilkan lereng. Pertumbuhannya yang cepat dan sistem perakaran yang ekstensif menjadikannya pilihan yang baik.
- c. Pohon Beringin (*Ficus Benjamina*) memiliki akar yang kuat dan menjalar jauh dapat memperkuat lereng, namun perlu dipertimbangkan potensi kerusakan infrastruktur di sekitarnya.

2) Tumbuhan untuk pengendalian erosi permukaan:

- a. Rumput Gajah (*Pennisetum Purpureum*) tumbuh cepat dan membentuk tajuk yang lebat, efektif dalam melindungi permukaan tanah dari erosi air hujan dan angin.
- b. Tumbuhan Penutup Tanah (*Legume Cover Crop*) jenis *legume* (misalnya, *Arachis pintoii*, *Centrosema pubescens*) dapat membantu mengendalikan erosi, memperbaiki struktur tanah, dan menambahkan nitrogen ke dalam tanah.

3) Tumbuhan untuk vegetasi riparian (Tepi Sungai)

- a. Bambu Air (*Schizostachyum Brachycladum*) cocok untuk stabilisasi tepi sungai dan mencegah erosi tebing sungai.
- b. Pohon Pulai (*Alstonia Scholaris*) dapat tumbuh di daerah riparian dan membantu menjaga kualitas air.

4) Tumbuhan untuk Remediasi Tanah:

Akar Wangi (*Vetiveria Zizanioides*) selain untuk stabilisasi lereng, akar wangi juga dapat digunakan untuk fitoremediasi, yaitu menyerap logam berat dan polutan lainnya dari tanah.

Pertimbangan penting yang perlu diperhatikan dalam pemilihan tanaman adalah memprioritaskan penggunaan spesies lokal yang telah beradaptasi dengan kondisi lingkungan setempat. Selain itu, perlu dilakukan kombinasi berbagai jenis tumbuhan untuk meningkatkan keanekaragaman hayati dan ketahanan ekosistem. Tidak ada salahnya melakukan konsultasi terlebih dahulu dengan ahli *soil bioengineering* atau ahli botani untuk pemilihan jenis tumbuhan yang tepat dan sesuai dengan kondisi lokasi proyek.

3.1.2 Teknik Penanaman

Teknik penanaman vegetasi dalam *soil bioengineering* memang krusial, baik untuk mencegah longsor maupun memperbaiki kualitas lingkungan. Teknik penanaman yang tepat dapat memastikan pertumbuhan dan perkembangan tumbuhan yang optimal. Berikut beberapa teknik penanaman vegetasi dalam *soil bioengineering* :

1) *Live staking*

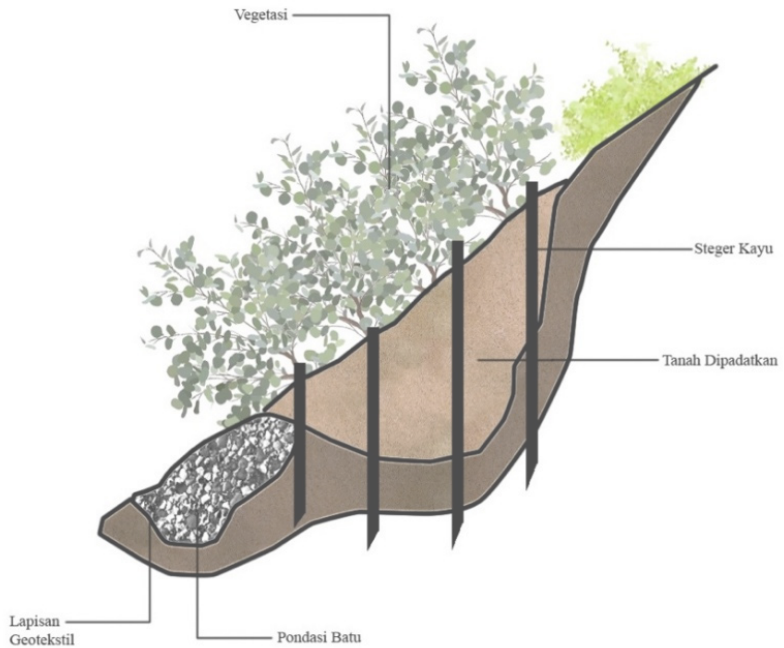
Teknik penanaman stek hidup dari tumbuhan berkayu untuk stabilisasi lereng dan pengendalian erosi (Gambar 18).

Prinsip kerja *live staking* adalah sebagai berikut:

- a. Stek yang ditanam akan mengembangkan akar yang akan mengikat partikel-partikel tanah, meningkatkan kohesi tanah, dan memperkuat lereng. Akar-akar ini juga membantu menyerap air, mengurangi erosi, dan meningkatkan stabilitas lereng.
- b. Setelah tumbuh, tajuk tanaman akan membantu mengurangi dampak erosi akibat air hujan dan angin. Tajuk juga dapat membantu memperlambat aliran air permukaan, mengurangi risiko erosi dan longsor.
- c. Daun dan ranting yang gugur akan terurai dan menjadi bahan organik, yang akan memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air.

Pelaksanaan penanaman dengan teknik *live staking* secara berturut-turut adalah sebagai berikut:

- a. Memilih stek dari tumbuhan berkayu yang mudah berakar, cepat tumbuh, dan adaptif terhadap kondisi lingkungan setempat. Stek



Gambar 18. Ilustrasi *live staking*.

yang sehat dan bebas dari hama serta penyakit sangat penting. Contoh tumbuhan yang umum digunakan untuk *live staking* antara lain *willow*, *dogwood*, dan *elderberry*.

- b. Stek dipotong dengan panjang dan diameter tertentu, biasanya dengan panjang 20-50 cm dan diameter 1-5 cm. Pangkal stek dipotong miring untuk memperluas permukaan penyerapan air dan mempercepat pembentukan akar.
- c. Lubang tanam dibuat di lereng dengan kedalaman dan jarak tanam tertentu, tergantung pada jenis tanaman dan kondisi lereng. Stek ditanam dengan posisi tegak atau miring, dengan pangkal stek tertanam sepenuhnya di dalam tanah.
- d. Pada tahap awal pertumbuhan, stek membutuhkan penyiraman dan perlindungan dari hama dan penyakit. Pemangkasan juga diperlukan untuk mendorong pertumbuhan akar dan tajuk yang sehat.

Teknik penanaman secara *live staking* sangat disukai mengingat banyaknya keunggulan dari teknik ini, di antaranya:

- a. *Live staking* relatif lebih murah dibandingkan metode stabilisasi lereng lainnya.
- b. Teknik ini relatif sederhana dan mudah diterapkan, bahkan oleh masyarakat awam.
- c. *Live staking* menggunakan bahan alami dan tidak merusak lingkungan.
- d. Tanaman yang tumbuh akan memberikan tampilan yang alami dan estetis pada lereng.

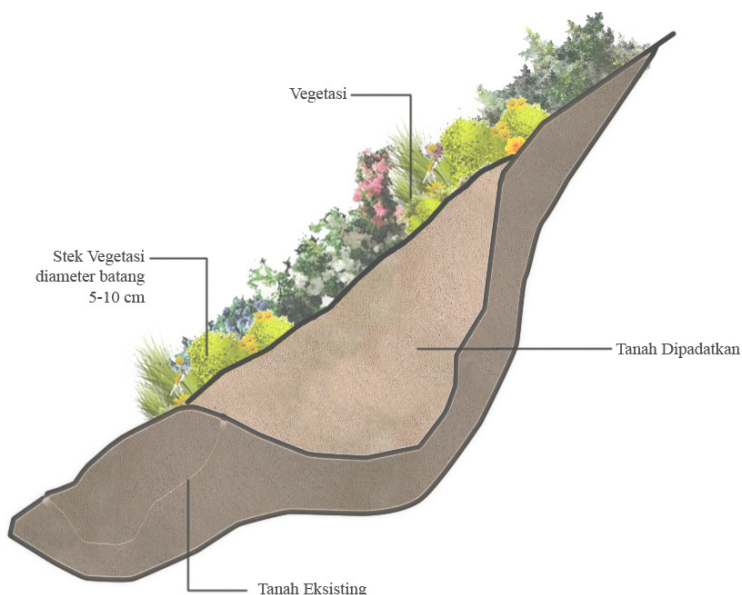
Namun demikian, masih dijumpai keterbatasan penanaman dengan teknik *live staking*, yaitu:

- a. *Live staking* kurang efektif untuk lereng yang sangat curam atau tidak stabil.
- b. Pertumbuhan tanaman membutuhkan waktu, sehingga stabilisasi lereng tidak secepat metode konvensional.
- c. Stek membutuhkan perawatan yang intensif pada tahap awal pertumbuhan.

Dengan demikian *live staking* merupakan teknik *soil bioengineering* yang efektif dan ramah lingkungan untuk stabilisasi lereng dan pengendalian erosi, terutama pada lereng yang tidak terlalu curam. Meskipun membutuhkan waktu dan perawatan awal, namun diharapkan teknik ini tetap menarik sebagai solusi yang berkelanjutan dan estetis untuk mengatasi longsor dan pemeliharaan kualitas lingkungan.

2) *Brush layering*

Brush layering salah satu teknik *soil bioengineering* yang menggunakan potongan cabang atau ranting tanaman hidup untuk menstabilkan lereng dan mencegah erosi (Gambar 19). Teknik ini memanfaatkan kemampuan tanaman untuk berakar dan tumbuh dari potongan cabang, sehingga membentuk vegetasi yang rapat dan sistem perakaran yang kuat di lereng. *Brush layering* dianggap efektif



Gambar 19. Ilustrasi *bush layering*.

dan ramah lingkungan untuk menstabilkan lereng dan mencegah erosi, mudah diterapkan dan biaya yang dibutuhkan relatif rendah. Namun, keberhasilan teknik ini bergantung pada pemilihan spesies tumbuhan yang tepat, persiapan lereng yang baik, dan pemeliharaan yang teratur.

Prinsip kerja *brush layering* yaitu dengan memanfaatkan kemampuan beberapa jenis tumbuhan untuk berkembang biak secara vegetatif. Potongan cabang atau ranting yang masih hidup, ketika ditempatkan dalam kondisi yang tepat, akan membentuk akar dan tunas baru. Akar-akar ini akan mengikat tanah dan batuan, sementara tunas-tunas baru akan tumbuh menjadi tanaman dewasa yang berfungsi sebagai penutup tanah dan penahan erosi.

Prosedur pelaksanaan penanaman dengan *brush layering* secara berturut-turut adalah sebagai berikut:

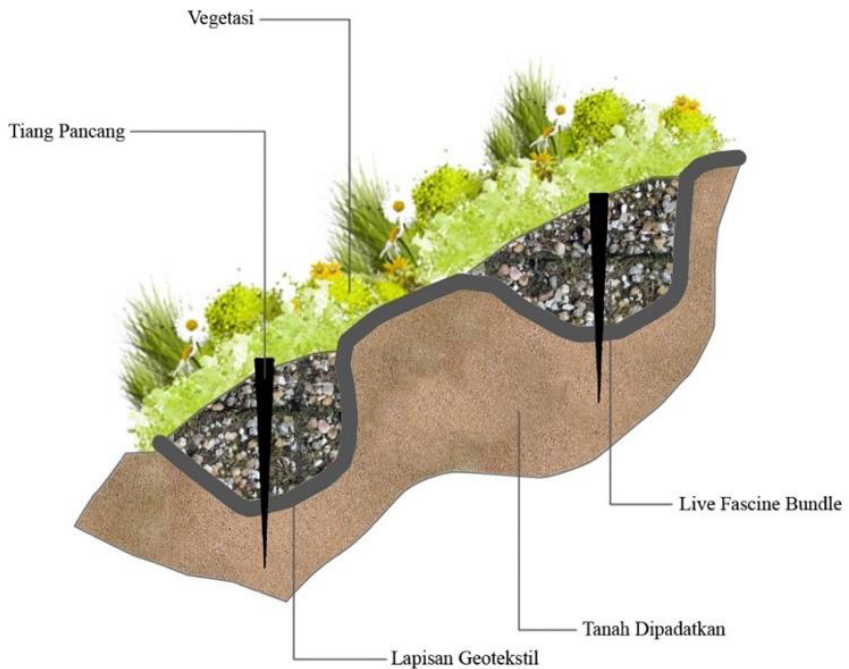
- a. Memilih cabang atau ranting dari spesies tumbuhan yang sesuai dengan kondisi lingkungan setempat dan memiliki kemampuan

untuk berakar dengan mudah. Cabang yang digunakan sebaiknya sehat, bebas dari hama, penyakit, dan memiliki diameter sekitar 2-5 cm. Spesies lokal yang cepat tumbuh dan memiliki sistem perakaran yang kuat sangat dianjurkan.

- b. Mempersiapkan lereng yang akan ditanami perlu dilakukan terlebih dahulu. Membersihkan lereng dari vegetasi yang tidak diinginkan dan gemburkan tanah. Jika lereng sangat curam atau tererosi parah, mungkin diperlukan pembuatan teras atau penambahan material organik untuk memperbaiki kondisi tanah.
- c. Membuat lapisan (*layering*), dimulai dengan membuat parit atau alur dangkal di sepanjang kontur lereng. Potongan cabang atau ranting diletakkan di dalam parit tersebut secara horizontal atau sedikit miring. Sebagian besar cabang perlu dipastikan tertimbun tanah, sementara ujung-ujungnya dapat sedikit terlihat di atas permukaan tanah. Cabang-cabang dapat disusun berlapis-lapis untuk membentuk struktur yang lebih kuat.
- d. Menimbun cabang-cabang dengan tanah dan memadatkan tanah dengan hati-hati. Tanah dipastikan menutupi cabang dengan rapat untuk mencegah kekeringan dan mempercepat proses perakaran.
- e. Setelah penanaman, dilakukan pemeliharaan secara teratur, termasuk penyiraman, pemupukan, pengendalian gulma, pengendalian hama, dan penyakit. Pemeliharaan yang baik akan memastikan pertumbuhan tanaman yang optimal dan keberhasilan stabilisasi lereng.

Keunggulan *brush layering* sebagai salah satu teknik yang disukai adalah:

- a. Bahan yang digunakan relatif mudah didapatkan dan murah.
- b. Teknik ini memanfaatkan bahan alami dan tidak merusak lingkungan.
- c. Sistem perakaran yang terbentuk dapat mengikat tanah dan mencegah erosi.



Gambar 20. Ilustrasi *live fascines*.

- d. Vegetasi yang tumbuh dapat memperindah tampilan lereng.
- Pemilihan teknik penanaman vegetasi dengan *brush layering* perlu mempertimbangkan keterbatasan teknik tersebut, yaitu:
- a. Proses perakaran dan pertumbuhan tanaman membutuhkan waktu.
 - b. Tidak cocok untuk lereng yang sangat curam: Teknik ini lebih efektif untuk lereng dengan kemiringan sedang.
 - c. Ketersediaan cabang atau ranting yang sesuai dapat menjadi kendala di beberapa daerah.

3) *Live fascines*

Teknik penanaman vegetasi dengan cara menanam bundel batang tanaman hidup di sepanjang kontur lereng untuk stabilisasi dan pengendalian erosi (Gambar 20). Bahan-bahan yang dibutuhkan adalah:

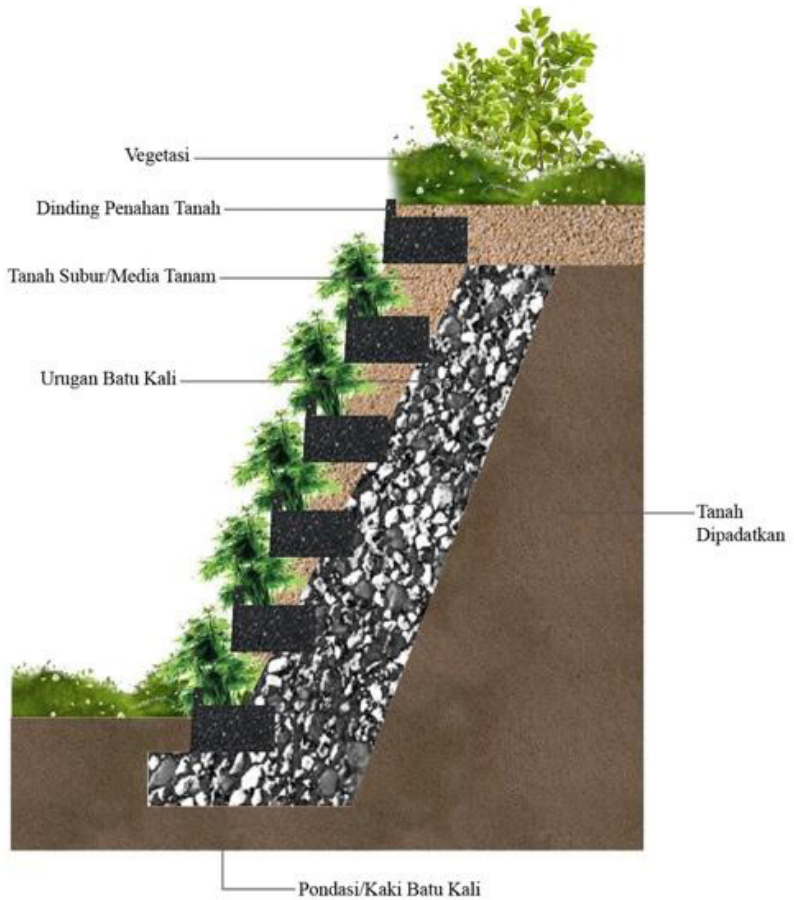
- a. Batang tanaman yang masih segar, lentur, dan mudah berakar. Jenis tanaman yang umum digunakan antara lain *willow*, *dogwood*, dan spesies lain yang dikenal cepat tumbuh serta memiliki sistem perakaran yang kuat. Diameter batang biasanya berkisar antara 2-5 cm, dan panjangnya sekitar 1-2 meter.
- b. Bahan pengikat yang ramah lingkungan dan kuat, seperti tali rami, kawat baja berlapis *biodegradable*, atau bahkan stek tanaman yang lentur.

Prosedur penanaman teknik *live fascines* secara berturut-turut adalah sebagai berikut:

- a. Mempersiapkan parit dangkal di sepanjang kontur lereng dengan kedalaman sekitar 15-20 cm dan lebar yang sesuai dengan diameter *fascine*.
- b. Menyusun batang tanaman menjadi bundel dengan diameter sekitar 15-30 cm. Ikat bundel dengan kuat pada interval tertentu (sekitar 30-50 cm) untuk menjaga kekompakannya.
- c. Meletakkan bundel *fascine* di dalam parit yang telah disiapkan, dengan ujung-ujung batang menghadap ke arah aliran air. Pastikan *fascine* tertanam dengan baik dan rapat di dalam parit.
- d. Menimbun *fascine* dengan tanah yang subur dan padatkan dengan hati-hati. Pastikan tanah menutupi seluruh bundel *fascine*, sehingga tunas baru dapat tumbuh dengan baik.
- e. Menanam stek tanaman atau bibit di sepanjang sisi hulu *fascine* untuk memperkuat stabilisasi dan meningkatkan vegetasi.

Berdasarkan prosedur kerja tersebut, prinsip kerja *live fascine* adalah sebagai berikut:

- a. Stabilisasi mekanis, mengingat *fascine* berfungsi sebagai struktur penahan yang memperkuat tanah dan mencegah longsor. Bundel batang yang terikat erat akan memberikan kekuatan tarik dan menahan pergerakan tanah.
- b. Pengendali erosi, karena *fascine* memperlambat aliran air permukaan, mengurangi erosi, dan membantu menjebak



Gambar 21. Ilustrasi *vegetated retaining walls*.

sedimen. Akar tanaman yang tumbuh dari *fascine* akan semakin memperkuat tanah, mengikat partikel tanah, dan mencegah erosi lebih lanjut.

- c. Tanaman yang tumbuh dari *fascine* akan meningkatkan kualitas tanah, menyediakan habitat bagi satwa liar, dan memperbaiki estetika lanskap.

Keunggulan teknik penanaman vegetasi secara *live fascines* adalah:

- a. Ramah Lingkungan karena menggunakan material alami dan *biodegradable*.

- b. Efektif karena memberikan stabilisasi lereng dan pengendalian erosi yang baik.
- c. Ekonomis karena material relatif mudah didapat dan biayanya terjangkau.
- d. Estetis karena menciptakan tampilan alami dan menyatu dengan lingkungan.

Meskipun banyak keunggulan teknik ini, namun tidak selalu teknik ini menjadi pilihan karena keterbatasan hal-hal berikut:

- a. Tidak cocok untuk lereng yang sangat curam karena lebih efektif diimplementasikan pada lereng dengan kemiringan kurang dari 45 derajat.
- b. Membutuhkan waktu bagi vegetasi untuk tumbuh sehingga efektivitas maksimal baru tercapai setelah tanaman tumbuh dan berkembang dengan baik.
- c. Membutuhkan tenaga dan biaya untuk pemeliharaan dengan melakukan pemangkasan dan perawatan agar memastikan pertumbuhan tanaman yang optimal.

4) *Vegetated retaining walls* (Dinding penahan vegetasi)

Teknik ini adalah solusi rekayasa yang menggabungkan struktur dinding penahan tanah konvensional dengan elemen vegetasi untuk stabilisasi lereng dan peningkatan kualitas lingkungan (Gambar 21). Dinding penahan vegetasi bekerja dengan dua cara utama, yaitu:

- a. Stabilisasi struktural, seperti dinding penahan konvensional, struktur *vegetated retaining walls* mampu menahan tekanan lateral dari tanah, mencegah longsor, dan menjaga stabilitas lereng. Material dinding bisa berupa beton, batu, kayu, atau gabion.
- b. Penguatan bioteknis, mengingat elemen vegetasi, seperti tanaman dan sistem perakarannya, mampu memberikan penguatan tambahan pada struktur dinding dan tanah di sekitarnya. Akar tanaman mengikat partikel tanah, meningkatkan kohesi tanah, dan menyerap air, mengurangi risiko erosi dan longsor.

Ada beberapa jenis-jenis *vegetated retaining walls*, yaitu:

- a. Dinding penahan tanah bertingkat (*Terraced Walls*), dinding penahan yang dibangun bertingkat, menciptakan teras-teras yang ditanami vegetasi. Cocok untuk lereng yang curam dan membutuhkan stabilisasi yang kuat.
- b. Dinding gabion vegetasi, yaitu keranjang kawat (gabion) yang diisi dengan batu dan ditanami vegetasi. Sistem perakaran tanaman akan tumbuh menembus celah-celah batu, memperkuat struktur gabion, dan meningkatkan stabilitas lereng yang curam. Penggunaan material keras memberikan kekuatan dan stabilitas langsung, sementara vegetasi memberikan penguatan jangka panjang dan manfaat lingkungan. Gabion adalah struktur kotak atau keranjang yang terbuat dari kawat baja galvanis yang diisi dengan batu. Struktur ini disusun dan ditumpuk membentuk dinding penahan. Vegetasi dapat diintegrasikan dengan gabion melalui beberapa cara:
 - Penanaman di antara gabion, yaitu tanah dan tanaman ditempatkan di antara lapisan-lapisan gabion.
 - Penanaman di atas gabion, yaitu tanah dan tanaman ditempatkan di atas lapisan gabion.
 - Stek tanaman dimasukkan ke dalam gabion, yaitu stek tanaman yang mudah berakar (misalnya *willow*) ditancapkan langsung ke dalam isi batu gabion.

Gabion bersifat permeabel, memungkinkan air mengalir dan mengurangi tekanan hidrostatik pada dinding. Struktur ini juga fleksibel dan dapat menyesuaikan dengan pergerakan tanah. Vegetasi pada gabion akan memperkuat struktur, mengendalikan erosi, dan memperbaiki estetika.

- c. Dinding kotak berongga (*Crib walls*) yaitu struktur seperti kotak-kotak berongga yang terbuat dari unit-unit kayu atau *prefabrikasi* yang saling terhubung. Kotak-kotak ini diisi dengan tanah dan ditanami vegetasi. Tanaman ditanam langsung di dalam tanah yang mengisi *crib walls*. Sistem perakaran tanaman akan tumbuh dan mengikat tanah di dalam struktur, memperkuat

dinding penahan. *Crib walls* bersifat fleksibel, permeabel, dan dapat dibangun di berbagai ketinggian. Vegetasi pada *crib walls* membantu mengendalikan erosi, meningkatkan stabilitas lereng, dan menciptakan tampilan yang alami.

- d. Dinding penahan seluler (*Cellular retaining walls*), yaitu modul-modul *prefabrikasi* yang saling terhubung membentuk struktur dinding berongga. Rongga-rongga tersebut diisi dengan tanah dan ditanami vegetasi. Sistem ini fleksibel dan dapat menyesuaikan dengan berbagai bentuk lereng.
- e. Dinding penahan tanah dengan geotekstil dan vegetasi, lapisan geotekstil ditempatkan di belakang dinding penahan untuk memperkuat tanah dan menyediakan media tanam bagi vegetasi.

Keunggulan *vegetated retaining walls* adalah:

- a. Terbangun stabilisasi lereng yang efektif karena teknik penanaman ini menggabungkan kekuatan struktural dan bioteknis untuk stabilisasi lereng yang optimal.
- b. Menjaga kualitas lingkungan, karena vegetasi mampu melakukan fotosintesis yang menghasilkan oksigen untuk meningkatkan kualitas udara. Vegetasi juga menjadi barier untuk mengurangi polusi suara, dapat menyediakan habitat bagi satwa liar, dan memperbaiki estetika lanskap.
- c. Sistem perakaran tanaman membantu mengikat tanah dan mencegah erosi.
- d. Tanaman menyerap air hujan, mengurangi limpasan permukaan dan risiko banjir.
- e. Menciptakan tampilan yang lebih alami dan menyatu dengan lingkungan dibandingkan dinding penahan konvensional.

Berdasarkan keunggulan tersebut, untuk membangun *vegetated retaining walls*, perlu dipertimbangkan:

- a. Kondisi lereng, yang meliputi kemiringan, jenis tanah, dan kondisi drainase.

- b. Jenis vegetasi, perlu dipilih yang sesuai dengan kondisi lingkungan setempat dan memiliki sistem perakaran yang kuat.
- c. Material dinding perlu dipilih yang bersifat tahan lama, ramah lingkungan, dan sesuai dengan anggaran.

3.1.3 Pemeliharaan Tanaman

Pemeliharaan rutin merupakan investasi penting untuk keberhasilan jangka panjang implementasi *soil bioengineering*. Dengan perawatan yang tepat, struktur *soil bioengineering* dapat berfungsi secara optimal, memberikan manfaat stabilisasi lereng, pengendalian erosi, dan perbaikan lingkungan dalam jangka waktu yang lama. Sebagai makhluk hidup, tanaman membutuhkan pemeliharaan yang tepat dan berkelanjutan agar dapat berfungsi optimal, seperti:

- a. Pemangkasan secara teratur untuk menjaga bentuk, ukuran, dan kepadatan vegetasi. Pemangkasan juga merangsang pertumbuhan akar yang lebih kuat, hal ini krusial untuk stabilisasi lereng. Tanaman yang terlalu lebat atau tinggi dapat menjadi beban tambahan bagi lereng dan meningkatkan risiko roboh.
- b. Penyiraman yang cukup, terutama pada tahap awal pertumbuhan tanaman agar dapat bertahan hidup dan berkembang. Kebutuhan air akan bervariasi tergantung jenis tanaman, iklim, dan kondisi tanah.
- c. Pengendalian hama dan penyakit yang dapat merusak atau bahkan membunuh tanaman, mengurangi efektivitas *soil bioengineering*. Pemantauan, pengendalian hama, dan penyakit yang tepat sangat penting untuk menjaga kesehatan tanaman.

Pemeliharaan yang kurang baik dapat mengurangi efektivitas dan umur pakai struktur, sehingga memberikan dampak negatif, seperti:

- a. Tanaman yang tidak sehat atau mati tidak dapat menjalankan fungsinya dalam stabilisasi lereng dan pengendalian erosi secara efektif. Akar yang lemah atau kosong akan mengurangi kekuatan dan stabilitas struktur *soil bioengineering*.

- b. Struktur *soil bioengineering* yang tidak dirawat dengan baik akan lebih cepat rusak. Tanaman yang mati dapat menyebabkan erosi pada tanah di sekitarnya, melemahkan struktur, dan memperpendek umur pakainya.

Meskipun biaya pemeliharaan jangka panjang *soil bioengineering* relatif rendah, namun biaya awal untuk pengadaan material tanaman, persiapan lahan, dan tenaga kerja terampil terkadang bisa lebih tinggi dibandingkan dengan metode konvensional. Diskusi mengenai manfaat jangka panjang penerapan *soil bioengineering*, seperti peningkatan kualitas tanah dan air, dapat menjadi pertimbangan mengenai tingginya biaya awal tersebut.

3.2 Perbandingan *Soil Bioengineering* dengan Metode Konvensional

Soil Bioengineering dan metode konvensional (dinding beton, bronjong tanpa vegetasi) menawarkan pendekatan berbeda untuk stabilisasi lereng. Masing-masing metode memiliki keunggulan dan kelemahan.

Keunggulan Soil Bioengineering

- 1) Bersifat ramah lingkungan, dengan memanfaatkan material alami dan proses biologis, mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.
- 2) Bersifat berkelanjutan karena tumbuhan dapat tumbuh dan berkembang, memberikan solusi jangka panjang dan mengurangi kebutuhan pemeliharaan intensif.
- 3) Menghasilkan tampilan yang estetis namun tetap lebih alami dan menyatu dengan lingkungan sekitar.
- 4) Meningkatkan keanekaragaman hayati dengan menciptakan habitat bagi flora dan fauna serta meningkatkan nilai ekologis area tersebut.

- 5) Biaya material dan konstruksi sering kali lebih rendah dibandingkan metode konvensional, terutama untuk proyek skala kecil dan menengah.
- 6) Sistem perakaran tumbuhan dapat memperbaiki struktur tanah, meningkatkan infiltrasi air, dan mengurangi erosi.

Kelemahan *Soil Bioengineering*

- 1) *Soil Bioengineering* mengandalkan pertumbuhan tanaman, sehingga membutuhkan waktu yang lebih lama untuk mencapai hasil yang optimal dibandingkan dengan metode rekayasa sipil konvensional. Kesabaran dan pemeliharaan jangka panjang diperlukan untuk memastikan keberhasilan proyek. Pertumbuhan tumbuhan membutuhkan waktu, sehingga stabilisasi lereng tidak secepat metode konvensional.
- 2) *Soil Bioengineering* tidak cocok untuk semua jenis kondisi lingkungan dan jenis tanah. Kondisi tanah yang sangat tidak stabil, lereng yang terlalu curam, atau iklim yang ekstrem dapat membatasi penerapan teknik ini.
- 3) Terkadang sulit untuk menemukan material tanaman yang tepat dan berkualitas, terutama untuk proyek skala besar. Pemilihan jenis tanaman yang sesuai dengan kondisi lingkungan setempat sangat penting untuk keberhasilan proyek.
- 4) Tumbuhan dapat rusak oleh hama, penyakit, atau aktivitas manusia. Tumbuhan muda membutuhkan perawatan dan pemeliharaan yang intensif pada tahap awal pertumbuhan.
- 5) Bencana alam seperti banjir, badai, atau kebakaran dapat merusak struktur *soil bioengineering* dan menghambat pertumbuhan tanaman. Perencanaan yang matang dan pemilihan jenis tanaman yang tahan terhadap gangguan alam penting untuk meminimalkan risiko ini.

Dari uraian tersebut, perencanaan dan pelaksanaan *soil bioengineering* membutuhkan pengetahuan tentang botani, hidrologi, Teknik Sipil, Teknik Lingkungan, dan ilmu lain yang relevan.

Keunggulan Metode Konvensional

- 1) Memberikan stabilisasi lereng dengan cepat dan efektif.
- 2) Cocok untuk lereng yang sangat curam atau tidak stabil.
- 3) Struktur konvensional umumnya membutuhkan perawatan yang lebih sedikit dibandingkan *soil bioengineering*.

Kelemahan Metode Konvensional

- 1) Material dan konstruksi metode konvensional umumnya lebih mahal.
- 2) Penggunaan material seperti beton dan baja dapat berdampak negatif terhadap lingkungan.
- 3) Struktur konvensional sering kali terlihat kurang alami dan mengganggu pemandangan.
- 4) Struktur konvensional kurang fleksibel dalam beradaptasi dengan perubahan lingkungan, seperti erosi atau perubahan aliran air.

Pemilihan metode yang tepat bergantung pada kondisi lokasi, tujuan proyek, anggaran, dan pertimbangan lingkungan. *Soil Bioengineering* menawarkan solusi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, sementara metode konvensional menawarkan stabilisasi yang cepat dan efektif untuk kondisi yang lebih menantang. Sering kali, kombinasi kedua pendekatan ini dapat memberikan hasil yang optimal.

TEKNIK *SOIL BIOENGINEERING*

4.1 Komponen Teknik *Soil Bioengineering*

Teknik *soil bioengineering* memanfaatkan kombinasi antar komponen yang meliputi vegetasi penutup, struktur vegetatif, dan struktur mekanik yang dijelaskan sebagai berikut:

1) Vegetasi Penutup (Rumput, Semak, Pohon)

Vegetasi penutup berperan penting dalam melindungi permukaan tanah dari dampak langsung air hujan dan aliran permukaan. Akar tanaman mengikat partikel tanah, meningkatkan kohesi, dan mencegah erosi. Tajuk tanaman juga membantu memperlambat kecepatan aliran air dan mengurangi daya erosifnya.

- a. Rumput memiliki akar serabut yang efektif mengikat tanah di lapisan atas. Cocok untuk lereng landai hingga sedang. Contohnya, rumput vetiver dan rumput gajah.
- b. Semak memiliki sistem perakaran yang lebih dalam dan luas dibandingkan rumput, cocok untuk lereng yang lebih curam. Contohnya akar wangi dan kembang sepatu.

- c. Pohon memiliki akar yang sangat dalam dan kuat, memberikan stabilisasi jangka panjang untuk lereng yang curam dan area yang luas. Contohnya beringin dan bambu.

2) Struktur Vegetatif (Tanaman Merambat, Pagar Hidup)

Struktur vegetatif menggunakan tanaman hidup sebagai elemen struktural untuk memperkuat tanah dan mengendalikan erosi.

- a. Tanaman merambat biasanya ditanam di sepanjang lereng dan dibiarkan menjalar, akar dan batangnya akan mengikat tanah dan mengurangi erosi permukaan. Contohnya, ubi jalar.
- b. Pagar hidup adalah tanaman yang ditanam rapat membentuk pagar, berfungsi sebagai penghalang fisik terhadap erosi dan longsor. Contohnya, bambu dan teh-tehan.

3) Struktur Mekanik (Jaring, Tiang Pancang)

Struktur mekanik berupa material non-hidup yang dikombinasikan dengan vegetasi untuk memberikan dukungan struktural tambahan dan mempercepat proses stabilisasi.

- a. Jaring geotekstil atau jaring kawat dipasang di lereng untuk menahan tanah dan menyediakan media tanam bagi vegetasi. Jaring membantu menstabilkan lereng sementara tanaman tumbuh dan mengembangkan akar.
- b. Tiang kayu atau bambu ditancapkan di lereng untuk memperkuat tanah dan mencegah longsor. Vegetasi dapat ditanam di sekitar tiang pancang untuk memberikan penguatan tambahan.

Ketiga komponen *soil bioengineering* tersebut bekerja secara sinergis. Struktur mekanik memberikan stabilitas awal, vegetasi penutup dan struktur vegetatif memberikan penguatan jangka panjang. Bersama-sama mereka menciptakan sistem yang efektif untuk stabilisasi lereng dan pengendalian erosi. Pemilihan jenis vegetasi dan struktur mekanik harus disesuaikan dengan kondisi lereng, jenis tanah, dan iklim setempat.

4.2 Pemilihan Teknik Soil Bioengineering yang Tepat

Pemilihan teknik *soil bioengineering* yang tepat untuk suatu lokasi membutuhkan pendekatan yang terintegrasi dan mempertimbangkan berbagai faktor. Berikut langkah-langkah dan faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan:

1) Analisis kondisi Lokasi

- a. Keadaan lereng, meliputi kemiringan, ketinggian, panjang lereng, dan bentuk lereng (cekung, cembung, lurus). Lereng yang lebih curam dan tinggi membutuhkan metode yang lebih intensif.
- b. Jenis tanah, meliputi tekstur tanah (pasir, lempung, liat), struktur tanah, kandungan bahan organik, permeabilitas, dan pH. Jenis tanah memengaruhi pemilihan jenis tumbuhan dan metode konstruksi.
- c. Kondisi hidrologi, meliputi curah hujan, aliran air permukaan, keberadaan mata air, dan tingkat kelembapan tanah. Kondisi hidrologi penting untuk menentukan metode drainase dan jenis tumbuhan yang tahan terhadap kondisi air tertentu.
- d. Iklim, meliputi suhu, kelembapan udara, angin, dan radiasi matahari. Iklim memengaruhi pertumbuhan dan kelangsungan hidup tumbuhan.
- e. Vegetasi *eksisting*, yaitu jenis vegetasi yang sudah ada di lokasi, termasuk jenis tumbuhan, kerapatan, dan kondisi kesehatan. Vegetasi *eksisting* dapat diintegrasikan dengan desain *soil bioengineering*.
- f. Potensi bencana meliputi risiko longsor, erosi, banjir, dan gempa bumi. Metode yang dipilih harus mampu mengurangi risiko bencana tersebut.

2) Menentukan tujuan proyek

Metode yang digunakan untuk stabilisasi jangka pendek mungkin berbeda dengan stabilisasi jangka panjang. Metode yang digunakan untuk mengendalikan erosi permukaan berbeda dengan metode untuk mencegah longsor dalam. Selain itu,

aspek estetika dan dampak visual dari metode yang dipilih perlu menjadi pertimbangan, terutama jika lokasi berada di area publik.

3) Memilih teknik penanaman vegetasi yang sesuai

Berdasarkan analisis kondisi lokasi dan tujuan proyek, memilih metode *soil bioengineering* yang paling sesuai seperti dijelaskan pada Bab 3.

4) Konsultasi dengan Ahli

Sangat disarankan untuk berkonsultasi dengan ahli *soil bioengineering*, ahli geoteknik, atau ahli lingkungan untuk mendapatkan rekomendasi yang tepat dan desain yang optimal. Keahlian mereka akan membantu memastikan keberhasilan dan keberlanjutan proyek.

Dengan mempertimbangkan faktor-faktor di atas dan melakukan analisis yang cermat, pemilihan *soil bioengineering* yang tepat dapat dilakukan untuk mencapai tujuan proyek dan memastikan kestabilan lereng secara efektif dan berkelanjutan.

4.3 Penerapan Soil Bioengineering

Penerapan *soil bioengineering*, baik untuk kepentingan preventif maupun solusi terhadap longsor yang telah terjadi dilakukan secara berurutan dalam beberapa tahap, yaitu diawali dengan tahap perencanaan, tahap pelaksanaan, tahap *monitoring* dan evaluasi, serta tahap pelaksanaan tindak lanjut. Setiap tahap akan diuraikan sebagai berikut.

1) Tahap Perencanaan

Soil Bioengineering merupakan teknik rekayasa yang memanfaatkan tumbuhan dan bagian-bagiannya untuk menstabilkan tanah dan melindungi lereng dari erosi serta longsor. Penerapan *soil bioengineering* memerlukan perencanaan yang matang agar hasilnya efektif dan berkelanjutan. Tahap ini melibatkan beberapa analisis mendalam untuk memastikan keberhasilan suatu proyek.

a. Identifikasi dan Analisis Kondisi Lokasi

- Survei lapangan dengan melakukan survei langsung ke lokasi untuk mengamati kondisi lereng, jenis tanah, vegetasi yang ada, kemiringan lereng, dan faktor-faktor lain yang memengaruhi kestabilan lereng.
- Pengambilan data dengan mengumpulkan data-data penting seperti data curah hujan, data geologi, data hidrologi, dan data penggunaan lahan di sekitar lokasi.
- Analisis laboratorium. Melakukan analisis pengujian tanah di laboratorium untuk mengetahui sifat-sifat fisis dan mekanik tanah seperti tekstur, kandungan organik, dan kekuatan geser tanah.
- Evaluasi risiko longsor berdasarkan data dan analisis yang ada untuk menentukan tingkat kerawanan lereng.

b. Pemilihan Jenis Tanaman yang Sesuai

- Kriteria pemilihan tanaman dengan memilih jenis tanaman yang memiliki perakaran kuat dan dalam, mampu beradaptasi dengan kondisi tanah dan iklim setempat, serta memiliki pertumbuhan yang cepat untuk memberikan perlindungan terhadap erosi.
- Jenis tanaman yang umum digunakan dalam penerapan *soil bioengineering* antara lain adalah vetiver, lamtoro, epikalipthus, suren, damar, kopi, kaliandra, dan berbagai jenis rumput-rumputan.
- Konsultasikan ke ahli botani atau pertanian untuk mendapatkan rekomendasi jenis tanaman yang paling sesuai untuk kondisi lokasi.

c. Teknik *Soil Bioengineering* yang Relevan

- Teknik *soil bioengineering* diaplikasikan sesuai dengan kondisi lereng dan jenis tanaman yang dipilih. Beberapa teknik yang umum digunakan antara lain adalah *Live stake*; *Live fascine*; *Brushlayer*; *Branchpacking*; *Live cribwall*; *Vegetated rock gabions*, dan *Joint planting*.

- Desain teknis *soil bioengineering* yang akan diterapkan dibuat secara detail, termasuk tata letak tanaman, jarak tanam, dan dimensi bangunan penunjang jika diperlukan. Dalam hal ini termasuk perencanaan jenis drainase yang sesuai dengan kondisi hidrologi lereng dan sistem drainase berfungsi untuk mengurangi tekanan air pori dalam tanah dan mencegah terjadinya longsor.
 - Menghitung perkiraan biaya yang dibutuhkan untuk pelaksanaan *soil bioengineering*, termasuk biaya pengadaan bibit tanaman, biaya tenaga kerja, dan biaya material penunjang serta biaya kebutuhan pemeliharaan.
- d. Penyusunan Rencana Pelaksanaan
- Menyusun jadwal pelaksanaan dengan mempertimbangkan faktor-faktor seperti musim dan ketersediaan sumber daya.
 - Menentukan penanggung jawab untuk setiap tahapan pelaksanaan, mulai dari persiapan lahan hingga pemeliharaan tanaman.
 - Melakukan koordinasi dengan pihak-pihak terkait seperti masyarakat setempat, pemerintah daerah, dan instansi terkait lainnya.

2) Tahap Pelaksanaan

Setelah dilakukan perencanaan yang matang, tahapan selanjutnya adalah pelaksanaan di lapangan yang merupakan langkah konkret dalam penerapan teknik *soil bioengineering*. Tahapan ini melibatkan beberapa kegiatan yang saling terkait untuk memastikan keberhasilan proyek.

- a. Persiapan lahan, dengan melakukan pembersihan lahan dari sampah, gulma, atau vegetasi yang tidak diinginkan; melakukan pengolahan tanah jika diperlukan, seperti penggemburan tanah atau penambahan bahan organik untuk memperbaiki struktur tanah. Jika teknik *soil bioengineering* yang dipilih memerlukan pembuatan terasering, maka perlu dilakukan pembuatan terasering sesuai dengan desain teknis yang telah dibuat.

- b. Penyiapan material dan peralatan. Menyiapkan bibit tanaman yang berkualitas dan sesuai dengan jenis yang telah dipilih. Perlu dipastikan, bibit tanaman yang dipilih dalam kondisi sehat dan siap tanam; menyiapkan material penunjang yang diperlukan, seperti pupuk, tali pengikat, dan material lainnya sesuai dengan teknik *soil bioengineering* yang akan diterapkan. Selain itu, siapkan pula peralatan seperti cangkul, sekop, parang, gergaji, alat penyiram, dan peralatan lainnya yang relevan
- c. Penanaman tanaman sesuai dengan teknik yang telah ditentukan. Jarak tanam, kedalaman lubang tanam, dan cara menanam yang benar perlu diperhatikan agar tanaman dapat tumbuh dengan baik. Jika menggunakan teknik penanaman rumput, maka bibit rumput disebarkan secara merata di area yang telah disiapkan. Jika menggunakan teknik penanaman pohon, maka lubang tanam disesuaikan dengan ukuran diameter pohon dan kemudian bibit pohon ditanam dengan hati-hati. Selanjutnya dilakukan penyiraman setelah penanaman untuk menjaga kelembapan tanah.
- d. Pemasangan struktur bahan hayati seperti cabang kayu, batang pohon, atau matras vegetasi dilakukan sesuai dengan desain metode *soil bioengineering* yang telah dibuat.
- e. Pemeliharaan dimulai dengan melakukan penyiraman secara teratur, terutama pada awal masa pertumbuhan tanaman untuk memastikan tanah tetap lembap, tetapi tidak terlalu basah. pupuk secara teratur untuk membantu pertumbuhan tanaman. Pilih jenis pupuk yang sesuai dengan jenis tanaman yang ditanam. Bila diperlukan, untuk pengendalian hama dan penyakit dapat diaplikasikan pestisida atau fungisida yang ramah lingkungan. Selanjutnya penyiangan secara teratur perlu rutin dilakukan untuk membersihkan gulma yang dapat mengganggu pertumbuhan tanaman. Pemeriksaan secara berkala terhadap struktur yang telah dipasang juga perlu dilakukan untuk memastikan kondisinya

tetap baik. Selanjutnya, perbaikan perlu segera dilakukan jika ditemukan kerusakan pada struktur.

3) **Monitoring dan Evaluasi**

Setelah pelaksanaan *soil bioengineering*, tahap *monitoring* dan evaluasi sangat penting untuk memastikan keberhasilan proyek dan keberlanjutan sistem. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa teknik yang diterapkan berjalan efektif dan sesuai dengan yang diharapkan dalam melindungi lereng dari longsor. Tahap ini melibatkan pemantauan secara berkala terhadap berbagai parameter untuk menilai kinerja sistem dan melakukan penyesuaian jika diperlukan. Tahap ini diawali dengan penyusunan rencana *monitoring* dan evaluasi yang terdiri dari:

- a. Menentukan tujuan dari *monitoring*, misalnya untuk mengetahui tingkat keberhasilan pertumbuhan tanaman, mengamati perubahan kondisi lereng, atau mengukur efektivitas *soil bioengineering* dalam mencegah erosi.
- b. Melakukan identifikasi indikator-indikator yang akan dipantau, seperti persentase tanaman yang tumbuh, tinggi tanaman, diameter batang, luas tutupan vegetasi, tingkat erosi, dan perubahan stabilitas lereng.
- c. Menentukan metode *monitoring* yang akan digunakan, misalnya pengamatan visual, pengukuran langsung, atau penggunaan alat-alat khusus seperti *drone* atau *remote sensing*.
- d. Menyusun jadwal *monitoring* yang teratur, misalnya mingguan, bulanan, atau musiman, sesuai dengan kebutuhan dan jenis tanaman yang ditanam.
- e. Membentuk tim *monitoring* yang terdiri dari tenaga ahli yang kompeten di bidang *soil bioengineering*, pertanian, atau lingkungan.

Indikator keberhasilan dalam penerapan *soil bioengineering* dapat dilihat dari beberapa aspek, antara lain:

- a. Pertumbuhan tanaman, yang meliputi pemantauan tingkat kelulusan tanaman dengan persentase tanaman yang hidup dan tumbuh sehat serta tingkat pertumbuhan tinggi tanaman, jumlah daun, dan perkembangan akar.
- b. Kestabilan lereng, yang diketahui dengan melakukan pengukuran tingkat erosi tanah, baik secara kuantitatif maupun kualitatif, pemantauan pergerakan tanah menggunakan alat ukur seperti *total station* atau *inclinometer* serta pemeriksaan terhadap kerusakan struktur vegetasi atau bahan hayati yang digunakan.
- c. Kondisi tanah, yang diketahui dengan melakukan pengukuran kadar air tanah untuk memastikan ketersediaan air bagi tanaman, pengukuran kandungan bahan organik tanah untuk menilai kesuburan tanah dan pengamatan terhadap perubahan struktur tanah akibat penerapan *soil bioengineering*.
- d. Peningkatan keanekaragaman hayati di area proyek dan pemulihan fungsi ekosistem seperti siklus hidrologi dan daur hara.

Frekuensi *monitoring* bergantung pada beberapa faktor, seperti jenis tanaman yang digunakan, kondisi lingkungan, dan tujuan proyek.

- a. Pada tahap awal (1-2 tahun setelah penanaman), dapat dilakukan *monitoring* secara intensif untuk memantau pertumbuhan awal tanaman dan perkembangan struktur vegetasi.
- b. Pada tahap menengah (2-5 tahun setelah penanaman), frekuensi *monitoring* dapat dikurangi, namun tetap dilakukan secara berkala untuk memastikan sistem berjalan dengan baik.
- c. Pada tahap jangka panjang (> 5 tahun setelah penanaman), *monitoring* dilakukan secara periodik untuk mengevaluasi kinerja jangka panjang sistem dan melakukan perawatan rutin.

Ada beberapa metode *monitoring* yang dapat dipilih, antara lain:

- a. Melakukan pengamatan visual langsung terhadap kondisi tanaman dan struktur vegetasi.
- b. Menggunakan alat ukur seperti meteran, jangka sorong, atau alat ukur curah hujan.

- c. Mengambil sampel tanah dan air untuk analisis di laboratorium.
- d. Menggunakan teknologi seperti *drone*, citra satelit, atau sensor untuk memantau area yang luas.

Analisis data hasil *monitoring* untuk mengetahui tren pertumbuhan tanaman, perubahan kondisi lereng, dan efektivitas *soil bioengineering* dalam mencegah erosi. Data yang diperoleh dari *monitoring* perlu dianalisis secara teratur untuk mengevaluasi kinerja sistem *soil bioengineering*. Analisis data dapat dilakukan secara kuantitatif maupun kualitatif. Hasil analisis dapat digunakan untuk mengambil keputusan terkait perawatan, perbaikan, atau penyesuaian desain sistem. Data hasil *monitoring* dibandingkan dengan target yang telah ditetapkan sebelumnya untuk mengetahui apakah tujuan dari penerapan *soil bioengineering* telah tercapai. Selanjutnya, masalah-masalah yang mungkin timbul selama periode *monitoring* dicatat dan dianalisis, seperti serangan hama penyakit, erosi, atau longsor.

Laporan *monitoring* disusun secara berkala, berisi data hasil *monitoring*, analisis data, dan rekomendasi perbaikan jika diperlukan. Demikian pula laporan evaluasi disusun secara komprehensif, berisi ringkasan hasil *monitoring* dan evaluasi secara keseluruhan, kesimpulan mengenai efektivitas *soil bioengineering*, dan rekomendasi untuk perbaikan atau pengembangan lebih lanjut.

4) Tindak Lanjut

Tahap akhir dari penerapan *soil bioengineering*

- a. Melakukan perbaikan, jika ditemukan masalah atau kekurangan berdasarkan hasil *monitoring* dan evaluasi, segera lakukan perbaikan yang diperlukan.
- b. Melakukan pengembangan, jika *soil bioengineering* terbukti efektif, lakukan pengembangan lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitasnya.
- c. Melakukan pembelajaran dengan menggunakan hasil *monitoring* dan evaluasi sebagai pembelajaran untuk meningkatkan

perencanaan dan pelaksanaan *soil bioengineering* di masa mendatang.

Dengan *monitoring* dan evaluasi secara berkala dan komprehensif, dapat dipastikan bahwa *soil bioengineering* yang diterapkan berjalan efektif dan berkelanjutan dalam melindungi lereng dari longsor dan menjaga kelestarian lingkungan.

PERUBAHAN IKLIM DAN *SOIL BIOENGINEERING*

Perubahan iklim merupakan fenomena global dan menjadi perhatian utama di seluruh dunia. Perubahan iklim merupakan perubahan jangka panjang terkait dengan pola suhu, curah hujan, dan kondisi klimatologi yang terjadi akibat aktivitas manusia. Perubahan-perubahan tersebut tercatat dalam sebuah laporan dan dikumpulkan oleh badan antar pemerintah yang dibentuk oleh Program Lingkungan PBB (UNEP) serta Organisasi Meteorologi Dunia (WMO) yakni *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC). Laporan IPCC berisi tentang pengetahuan ilmiah, teknis, dan sosial ekonomi terkait perubahan iklim.

Laporan pertama IPCC diawali pada tahun 1990, pada laporan ini mengidentifikasi potensi bahaya yang ditimbulkan oleh perubahan iklim global akibat faktor manusia yaitu adanya gas rumah kaca (GRK) sehingga suhu bumi meningkat akibat CO₂. Gambar 22 merupakan ilustrasi yang terjadi di Indonesia akibat perubahan iklim meliputi penggundulan hutan, banjir besar, kekeringan, erosi pantai, dan peristiwa cuaca ekstrem.



Gambar 22. Ilustrasi dampak perubahan iklim di Indonesia.

IPCC telah melakukan penilaian sebanyak 6 (enam) kali dari tahun 1990 hingga 2022. Suhu permukaan bumi secara global telah meningkat 1,40C dimulai tahun 2001 akibat perkembangan aktivitas manusia pada sektor industri. Hal ini sesuai dengan penelitian yang telah dilakukan pada kajian perubahan suhu permukaan tanah yang dilakukan di daerah Sumatera Utara, Jawa Tengah dan Jakarta yaitu suhu permukaan tanah di daerah tersebut rata-rata meningkat sebesar 1,040C. Daerah Sumatera Utara dan Jawa Tengah meningkat sebesar 0,80 C - 1,20C, sementara itu daerah Jakarta meningkat sebesar 1,080C (Kurniyaningrum, 2022; Kurniyaningrum, 2024).

Berdasarkan hasil penelitian terkait suhu permukaan tanah di wilayah Jakarta dan Jawa Tengah (Semarang) yang telah dilakukan (Trinugraha, 2024; Abdilla, 2025; Mulia, 2025) bahwa jenis tutupan lahan merupakan faktor yang memengaruhi tingkat suhu permukaan tanah yang menyebabkan kemampuan tanah akan memengaruhi kondisi koefisien limpasan permukaan (Gambar 23). Peningkatan



Jawa Tengah



Jakarta

Gambar 23. Kondisi lereng sungai akibat pengaruh peningkatan suhu permukaan tanah.

suhu membuat kondisi kerapatan vegetasi menjadi berkurang yang menyebabkan kondisi tanah bersifat terbuka sehingga mengurangi kemampuan tanah untuk mempertahankan kelembapan dikarenakan sedikitnya akar yang menahan tanah.

Tanah yang terbuka memiliki infiltrasi yang lebih rendah karena air tidak lagi diserap dengan baik oleh akar tanaman. Tanah yang terpapar langsung oleh sinar matahari juga lebih cepat mengering, sehingga kemampuan infiltrasi air menjadi lebih terbatas. Perubahan suhu dapat menyebabkan penurunan kerapatan vegetasi hingga 10%–50% dalam jangka panjang, yang berkontribusi pada pengurangan infiltrasi hingga 20%–60%.

5.1 Dampak Perubahan Iklim Terhadap Longsor

Perubahan iklim memiliki dampak signifikan terhadap peningkatan risiko longsor di lereng, dan ini menjadi pertimbangan penting dalam perencanaan *soil bioengineering*.

- 1) Perubahan iklim menyebabkan peningkatan intensitas curah hujan di beberapa wilayah. Hujan deras dalam waktu singkat dapat menjenuhkan tanah dengan cepat, melebihi kapasitas infiltrasi, dan memicu longsor, terutama di lereng yang tidak stabil. Peningkatan frekuensi badai dan hujan lebat juga meningkatkan frekuensi kejadian longsor. Lereng yang sebelumnya stabil mungkin menjadi rentan terhadap longsor akibat hujan yang lebih sering dan intens. Hujan dengan durasi yang lebih lama, meskipun dengan intensitas sedang, juga dapat menjenuhkan tanah dan memicu longsor.
- 2) Peningkatan suhu dapat mengeringkan tanah dan vegetasi, mengurangi kohesi tanah, serta meningkatkan risiko longsor, terutama di daerah yang kering. Perubahan pola evaporasi dapat memengaruhi kadar air tanah. Peningkatan evaporasi dapat membuat tanah lebih kering dan rentan, sementara penurunan evaporasi dapat menyebabkan jenuh air.
- 3) Kenaikan permukaan air laut, dapat meningkatkan erosi pantai, yang dapat memicu longsor di daerah pesisir dan lereng yang berbatasan dengan laut.
- 4) Deforestasi akibat aktivitas manusia memperburuk dampak perubahan iklim terhadap longsor. Hilangnya vegetasi mengurangi stabilitas lereng dan meningkatkan erosi tanah.

Dengan demikian, dampak perubahan iklim ini perlu dipertimbangkan dalam perencanaan dan implementasi *soil bioengineering*, seperti:

- 1) Memilih tanaman yang tahan terhadap kondisi iklim ekstrem, seperti kekeringan atau hujan lebat, sangat penting.
- 2) Memperkuat desain dan konstruksi untuk menahan curah hujan yang lebih tinggi dan kejadian ekstrem lainnya. Misalnya,

menggunakan teknik drainase yang lebih efektif dan struktur yang lebih kuat.

- 3) Meningkatkan frekuensi & intensitas pemeliharaan untuk memastikan vegetasi tetap sehat dan efektif dalam menstabilkan lereng.
- 4) Melakukan pemantauan secara teratur untuk mendeteksi tanda-tanda ketidakstabilan lereng dan melakukan tindakan pencegahan yang diperlukan.

Dengan mempertimbangkan dampak perubahan iklim, *soil bioengineering* dapat menjadi solusi yang lebih efektif dan berkelanjutan untuk mitigasi risiko longsor di lereng.

5.2 Peran *Soil Bioengineering* dalam Adaptasi Perubahan Iklim

Soil Bioengineering memainkan peran penting dalam adaptasi perubahan iklim, terutama dalam menghadapi dampaknya terhadap stabilitas lereng dan pengelolaan sumber daya air.

- 1) Menangani peningkatan risiko longsor, seperti:
 - Stabilisasi lereng dengan penanaman vegetasi yang memiliki akar kuat (vetiver, bambu), pembangunan teras vegetatif, dan penggunaan *bioengineering* struktur (*live crib wall*, *brush mattress*) dapat memperkuat lereng dan mengurangi risiko longsor yang diperparah oleh curah hujan ekstrem akibat perubahan iklim.
 - Vegetasi yang ditanam dalam *soil bioengineering* membantu mengendalikan erosi permukaan yang disebabkan oleh hujan deras dan limpasan air, melindungi tanah dari kerusakan, dan kehilangan nutrisi.
- 2) Meningkatkan kapasitas retensi air
 - Akar tanaman meningkatkan porositas tanah dan memfasilitasi infiltrasi air hujan ke dalam tanah, mengurangi limpasan permukaan, dan meningkatkan ketersediaan air tanah. Hal

ini penting dalam menghadapi perubahan pola curah hujan dan potensi kekeringan.

- *Soil Bioengineering* berpotensi membantu mengurangi limpasan permukaan yang dapat menyebabkan banjir dan erosi. Air yang tertahan oleh vegetasi dan struktur *bioengineering* dapat meresap ke dalam tanah atau mengalir lebih lambat, mengurangi dampak negatif pada lingkungan.

3) Meningkatkan ketahanan ekosistem

- *Soil Bioengineering* dapat digunakan untuk merestorasi habitat yang rusak akibat perubahan iklim atau aktivitas manusia. Vegetasi yang ditanam menyediakan habitat bagi berbagai spesies dan meningkatkan keanekaragaman hayati.
- Beberapa teknik *soil bioengineering* dapat meningkatkan ketahanan ekosistem terhadap kekeringan dengan meningkatkan kapasitas retensi air tanah dan mengurangi evaporasi.

4) Mitigasi perubahan iklim

- Vegetasi yang digunakan dalam *soil bioengineering* menyerap karbon dioksida dari atmosfer melalui fotosintesis, berkontribusi pada mitigasi perubahan iklim.
- *Soil Bioengineering* dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian dan kehutanan dengan mengurangi kebutuhan akan pupuk kimia dan bahan bakar fosil untuk mesin berat.

5) Adaptasi perubahan iklim

Adaptasi terhadap perubahan iklim merupakan upaya yang dilakukan untuk mengurangi dampak negatif dari perubahan kondisi iklim serta memanfaatkan peluang yang mungkin timbul. Perubahan iklim yang ditandai dengan peningkatan suhu global, perubahan pola curah hujan, serta meningkatnya frekuensi dan intensitas bencana alam, seperti banjir dan kekeringan, memerlukan strategi adaptasi yang komprehensif di berbagai sektor, termasuk pertanian, infrastruktur, sumber daya air, dan ekosistem. Langkah-langkah adaptasi dapat bersifat struktural,

seperti pembangunan infrastruktur hijau dan sistem drainase berkelanjutan, maupun non-struktural, seperti kebijakan tata ruang yang berbasis risiko iklim dan peningkatan kapasitas masyarakat dalam menghadapi perubahan lingkungan.

Salah satu contoh adaptasi yang efektif adalah penerapan teknologi berbasis ekosistem, seperti restorasi hutan mangrove untuk mengurangi risiko abrasi dan gelombang tinggi di pesisir, serta penggunaan metode *hydroseeding* dalam *bioengineering* untuk mencegah erosi dan memperbaiki lahan kritis. Selain itu, dalam sektor pertanian, penerapan sistem irigasi hemat air, pengembangan varietas tanaman tahan kekeringan, serta diversifikasi sumber penghidupan bagi petani menjadi strategi penting dalam menghadapi perubahan iklim. Adaptasi yang berbasis ilmu pengetahuan dan teknologi, dengan dukungan kebijakan yang tepat serta partisipasi aktif masyarakat, menjadi kunci dalam meningkatkan ketahanan lingkungan dan sosial terhadap dampak perubahan iklim yang semakin nyata.

Bioengineering berperan secara signifikan dalam mengontrol suhu permukaan tanah, memitigasi, serta beradaptasi terhadap perubahan iklim. Intervensi berbasis *bioengineering* dapat membantu mengurangi efek pemanasan global dengan meningkatkan kapasitas tanah untuk menyerap karbon, mengatur kelembapan, serta mengurangi efek *urban heat island* (UHI).

1) *Bioengineering* dalam regulasi suhu permukaan tanah. Suhu permukaan tanah dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk jenis vegetasi, kadar kelembapan tanah, serta aktivitas manusia seperti urbanisasi dan pertanian intensif. *Bioengineering* menawarkan beberapa solusi untuk menurunkan suhu permukaan tanah, antara lain:

a. Rekayasa Vegetasi dan Tanaman Adaptif

Rekayasa genetika pada tanaman dapat meningkatkan efisiensi fotosintesis dan kemampuan tanaman untuk menyerap dan memantulkan sinar matahari. Tanaman yang mampu

mempertahankan kadar air lebih tinggi juga dapat menurunkan suhu tanah melalui proses transpirasi.

b. *Biochar* dan Modifikasi Tanah

Biochar, hasil pirolisis biomassa, dapat ditambahkan ke dalam tanah untuk meningkatkan kapasitas penyimpanan air dan menstabilkan suhu tanah. *Biochar* juga membantu menyerap karbon dalam jangka panjang, sehingga menurunkan konsentrasi CO₂ atmosferik.

c. Mikroba Tanah untuk Regulasi Termal

Rekayasa mikroba tanah dapat meningkatkan kesehatan ekosistem tanah, memungkinkan lebih banyak karbon organik tersimpan di dalam tanah, yang pada akhirnya menurunkan suhu permukaan tanah dengan meningkatkan kemampuan tanah untuk mempertahankan kelembapan serta mengurangi laju evaporasi.

2) *Soil Bioengineering* memainkan peran penting dalam mitigasi perubahan iklim dengan mengoptimalkan interaksi antara ekosistem tanah dan atmosfer. Beberapa teknologi berbasis *bioengineering* yang dapat mendukung mitigasi perubahan iklim meliputi:

a. Tanaman rekayasa genetika (*GM Crops*) untuk penyerapan karbon. Pengembangan tanaman dengan akar lebih dalam dapat meningkatkan penyimpanan karbon di dalam tanah dan meminimalkan emisi CO₂.

b. Restorasi ekosistem dengan *bioengineering*. Pemulihan lahan terdegradasi menggunakan kombinasi vegetasi rekayasa dan mikroba tanah dapat meningkatkan ketahanan lingkungan terhadap perubahan iklim dengan memperbaiki struktur tanah serta meningkatkan kapasitas serapan karbon.

c. Teknologi *bio-based* untuk mengurangi efek *urban heat island*. Penggunaan material *bio-based*, seperti atap hijau dengan tanaman adaptif, dapat menurunkan suhu permukaan di wilayah perkotaan dan memitigasi efek *urban heat island* (UHI).

Biomaterial hasil *bioengineering* dapat digunakan untuk mengontrol suhu permukaan tanah melalui berbagai mekanisme, termasuk peningkatan reflektivitas permukaan (albedo), peningkatan retensi air tanah, serta pengayaan tanah dengan karbon dan unsur hara. Beberapa inovasi utama dalam biomaterial berbasis *bioengineering* meliputi:

1) Biochar untuk penyimpanan karbon dan regulasi termal tanah.

Biochar merupakan biomaterial yang dihasilkan melalui pirolisis biomassa, seperti limbah pertanian atau kayu, dalam kondisi minim oksigen. Penggunaan *biochar* dalam tanah memiliki manfaat berikut:

- a. Meningkatkan retensi air dan kelembapan tanah. *Biochar* memiliki porositas tinggi yang memungkinkan tanah menyerap dan menyimpan lebih banyak air, sehingga memperlambat kehilangan air akibat evaporasi serta menjaga kestabilan suhu tanah.
- b. Meningkatkan kapasitas penyimpanan karbon. *Biochar* membantu menyerap karbon dalam jangka panjang, menekan emisi gas rumah kaca, dan memperbaiki kualitas tanah.
- c. Mengurangi penyerapan panas oleh tanah. Warna *biochar* yang lebih terang dibandingkan tanah normal dapat meningkatkan refleksi sinar matahari, sehingga mengurangi suhu tanah akibat radiasi matahari.

2) Biokomposit berbasis selulosa untuk penutup tanah (*Mulsa Biodegradable*).

Biokomposit berbasis *bioengineering*, seperti mulsa *biodegradable* dari polimer alami (misalnya selulosa bakteri dan lignin), dapat digunakan sebagai penutup tanah untuk mengurangi suhu permukaan. Keunggulan biokomposit ini adalah:

- a. Mengurangi pemanasan permukaan yaitu dengan kemampuan memantulkan cahaya matahari dan ketahanan terhadap paparan sinar UV, biokomposit ini membantu mengurangi penyerapan panas oleh tanah.

- b. Meningkatkan retensi air tanah. Mulsa *biodegradable* menjaga kelembapan tanah dengan menekan laju evaporasi, sehingga membantu tanaman bertahan dalam kondisi panas ekstrem.
- c. Meningkatkan kesuburan tanah, karena setelah mulsa *biodegradable* terdekomposisi, biomaterial ini menjadi bahan organik yang dapat memperkaya tanah sehingga dapat merangsang aktivitas mikroorganisme yang bermanfaat bagi ekosistem tanah.

Di daerah perkotaan, suhu permukaan tanah meningkat lebih tinggi dibandingkan daerah alami akibat dominasi material buatan seperti beton dan aspal yang menyerap panas secara berlebihan. *Bioengineering* juga menawarkan solusi berbasis biomaterial yang dapat membantu menurunkan suhu lingkungan perkotaan, seperti diuraikan sebagai berikut:

1) Biobeton dan biokomposit untuk infrastruktur ramah lingkungan

- a. Mikroba yang direkayasa secara genetika, seperti *Bacillus* sp., dapat digunakan untuk memproduksi biobeton yang lebih tahan lama dan memiliki porositas tinggi, memungkinkan evaporasi air serta meningkatkan keseimbangan termal infrastruktur perkotaan.
- b. Penggunaan biopolimer dari sumber alami, seperti pati dan lignoselulosa, sebagai bahan campuran jalan dapat membantu menekan akumulasi panas di jalan raya dan infrastruktur perkotaan.

2) Atap hijau dan dinding hidup dengan tanaman rekayasa

- a. Tanaman yang telah direkayasa secara genetika untuk memiliki transpirasi lebih tinggi dapat digunakan dalam atap hijau dan dinding hijau, membantu mendinginkan lingkungan perkotaan secara alami.
- b. Biofiber dari alga atau limbah pertanian dapat digunakan sebagai material insulasi termal yang membantu mengurangi kebutuhan energi pendingin pada bangunan.



Gambar 24. Penerapan *cocomesh* pada teknik *hydroseeding* di IKN [Ardiasa, 2024].

Ibu Kota Negara (IKN) merupakan salah satu wilayah yang menggunakan penerapan metode *hydroseeding* dan *bioengineering* dikarenakan karakteristik wilayah ini merupakan tanah podsolik merah kuning yang bersifat masam, memiliki kandungan bahan organik rendah, serta daya tahan rendah terhadap erosi. Selain itu, terdapat tanah latosol yang umumnya kurang subur akibat tingginya tingkat pencucian unsur hara. Struktur tanah ini cenderung kurang stabil, terutama di area dengan kemiringan tinggi yang rentan terhadap longsor, sehingga diperlukan teknik *hydroseeding* untuk *revegetasi*, serta penerapan konsep *bioengineering* guna meningkatkan stabilitas tanah.

Metode *Cocomesh* (Gambar 24) dalam *hydroseeding* di bidang *bioengineering* adalah teknik yang menggabungkan *hydroseeding* (penyebaran campuran benih dengan bantuan air) dengan penggunaan jaring atau bahan pembungkus, dalam hal ini *Cocomesh*. *Cocomesh* adalah bahan jaring yang terbuat dari serat kelapa (*coco fiber*) yang digunakan untuk memperbaiki teknik *hydroseeding*. Bahan ini berfungsi sebagai penahan atau pelindung benih dan tanah yang disebar selama proses *hydroseeding*. Adapun manfaat *cocomesh* adalah untuk memberikan perlindungan tanah, meningkatkan infiltrasi air, menjaga kerapatan vegetrasi, stabilitas tanah, dan ramah lingkungan.

Bahan tersebut berfungsi sebagai penahan atau pelindung benih dan tanah yang disebar selama proses *hydroseeding*. Adapun manfaat *cocomesh* adalah untuk memberikan perlindungan tanah, meningkatkan infiltrasi air, menjaga kerapatan vegetrasi, stabilitas tanah, dan ramah lingkungan.

Penggunaan *cocomesh* dapat membantu menstabilkan suhu tanah dan lingkungan sekitarnya melalui beberapa mekanisme, yang akan dijelaskan sebagai berikut:

1) Pengendalian erosi dan peningkatan kelembapan tanah

Tanah yang mengalami erosi cenderung kehilangan kandungan air dan bahan organiknya, menyebabkan peningkatan suhu permukaan. *Cocomesh* bertindak sebagai penutup tanah alami dengan cara:

- a. Mengurangi kehilangan kelembapan akibat angin dan paparan sinar matahari langsung.
- b. Meningkatkan infiltrasi air ke dalam tanah, sehingga mencegah efek pemanasan akibat permukaan tanah yang kering dan terdegradasi.
- c. Memungkinkan pertumbuhan akar tanaman yang lebih baik, membantu menciptakan mikroiklim yang lebih sejuk dan meningkatkan stabilitas tanah.

2) Restorasi lahan kering dan terdegradasi

Cocomesh digunakan dalam program restorasi lahan yang mengalami degradasi akibat aktivitas manusia atau perubahan iklim. Dengan menjaga stabilitas tanah dan menyediakan lingkungan yang mendukung pertumbuhan vegetasi, *cocomesh* membantu menurunkan suhu permukaan melalui:

- a. Evapotranspirasi dari tanaman: Tanaman yang tumbuh pada *cocomesh* berkontribusi dalam proses pendinginan alami dengan menguapkan air ke atmosfer.
- b. Peningkatan kandungan bahan organik: *Cocomesh* yang terurai menambah karbon organik ke dalam tanah, meningkatkan kapasitas tanah untuk mempertahankan kelembapan dan mengurangi fluktuasi suhu.

3) Aplikasi pada lahan urban dan pengurangan efek Urban Heat Island (UHI)

Cocomesh juga dapat diterapkan di daerah perkotaan untuk mengurangi suhu permukaan, terutama pada area dengan permukaan tanah yang tertutup material buatan seperti beton dan aspal. Beberapa aplikasinya meliputi:

- a. *Cocomesh* dapat digunakan sebagai media tanam vertikal untuk mendukung pendinginan pasif dan meningkatkan kualitas udara.
- b. *Cocomesh* digunakan untuk menutup permukaan tanah yang terpapar sinar matahari langsung, mencegah pemanasan berlebihan, dan menjaga keseimbangan termal lingkungan.

Selain di perkotaan, *bioengineering* juga dapat diterapkan dalam pengelolaan ekosistem alami untuk menstabilkan suhu permukaan bumi. Beberapa strategi yang dapat diterapkan meliputi:

1) *Reforestasi dengan tanaman rekayasa*

Hutan memiliki peran besar dalam mengatur suhu permukaan melalui penyerapan karbon dan pelepasan uap air ke atmosfer. *Bioengineering* dapat digunakan untuk mengembangkan pohon dengan pertumbuhan lebih cepat dan kapasitas serapan karbon yang lebih tinggi, sehingga memperkuat efek pendinginan alami hutan.

2) *Restorasi tanah terdegradasi dengan mikrobioma rekayasa*

Lahan kering dan terdegradasi memiliki suhu permukaan yang lebih tinggi karena kurangnya vegetasi dan rendahnya kandungan bahan organik. Mikroba hasil rekayasa dapat meningkatkan kesuburan tanah, memungkinkan vegetasi tumbuh kembali, serta membantu menurunkan suhu tanah melalui peningkatan kelembapan dan kandungan karbon organik.

3) *Modifikasi sistem agroforestri untuk regulasi iklim mikro*

Sistem pertanian berbasis agroforestri dengan tanaman hasil *bioengineering* dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap suhu ekstrem serta membantu membentuk mikroiklim yang lebih seimbang, dengan suhu yang lebih terkendali.

Dengan demikian, *soil bioengineering* menawarkan solusi berbasis alam yang efektif dan berkelanjutan untuk beradaptasi dengan dampak perubahan iklim, melindungi infrastruktur, dan meningkatkan ketahanan ekosistem.

FAKTOR KEBERHASILAN IMPLEMENTASI *SOIL BIOENGINEERING*

Kebhasilan *soil bioengineering* sangat bergantung pada pemilihan spesies tumbuhan yang sesuai dengan kondisi lingkungan setempat. Perencanaan yang matang dan mempertimbangkan faktor-faktor alam seperti iklim, curah hujan, dan jenis tanah sangat penting untuk memastikan keberhasilan dan keberlanjutan proyek *soil bioengineering*.

6.1 Faktor Alam

Faktor alam seperti iklim, curah hujan, dan jenis tanah sangat memengaruhi keberhasilan *soil bioengineering* karena teknik ini bergantung pada pertumbuhan dan kesehatan tanaman untuk menstabilkan tanah. Berikut penjelasan secara rinci:

1) Iklim

- a. Suhu udara dan tanah memengaruhi laju pertumbuhan tanaman. Suhu yang terlalu tinggi atau terlalu rendah dapat menghambat pertumbuhan, bahkan mematikan tanaman. Setiap spesies tumbuhan memiliki rentang suhu optimal untuk pertumbuhannya.

- b. Intensitas dan durasi cahaya matahari juga penting untuk fotosintesis. Tanaman membutuhkan cahaya matahari yang cukup untuk menghasilkan energi dan tumbuh dengan baik. Kurangnya cahaya matahari dapat menyebabkan pertumbuhan tanaman yang lemah dan rentan terhadap penyakit.
- c. Angin kencang dapat merusak tanaman, terutama tanaman muda. Angin juga dapat meningkatkan laju evapotranspirasi, menyebabkan tanaman kekurangan air. Di daerah yang berangin kencang, pemilihan spesies tumbuhan yang tahan angin sangat penting.

2) Curah Hujan

- a. Air merupakan faktor penting untuk pertumbuhan tanaman. Curah hujan yang cukup akan menyediakan air yang dibutuhkan tanaman untuk bertahan hidup dan tumbuh. Kekurangan air dapat menghambat pertumbuhan dan menyebabkan tanaman layu atau mati. Sebaliknya, curah hujan yang berlebihan dapat menyebabkan erosi dan genangan air, yang juga dapat merusak tanaman.
- b. Drainase yang baik penting untuk mencegah genangan air yang dapat membusukkan akar tanaman. Jenis tanah dan topografi lereng memengaruhi drainase.

3) Jenis Tanah

- a. Tekstur tanah (komposisi pasir, debu, dan lempung) memengaruhi drainase, aerasi, dan kemampuan tanah dalam menahan air dan nutrisi. Tanaman membutuhkan tanah yang gembur dan memiliki drainase yang baik untuk pertumbuhan akar yang optimal.
- b. Struktur tanah mengacu pada susunan partikel-partikel tanah. Struktur tanah yang baik akan meningkatkan porositas tanah, yang penting untuk aerasi dan drainase.
- c. pH tanah memengaruhi ketersediaan nutrisi bagi tanaman. Setiap spesies tumbuhan memiliki rentang pH optimal untuk pertumbuhannya.

- d. Tanah yang subur mengandung nutrisi yang dibutuhkan tanaman untuk tumbuh. Kekurangan nutrisi dapat menghambat pertumbuhan tanaman.
- e. Bahan organik memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas tanah dalam menahan air dan nutrisi, serta menyediakan makanan bagi mikroorganisme tanah yang bermanfaat bagi tanaman.

6.2 Faktor Manusia

Faktor manusia sangat krusial dalam keberhasilan *soil bioengineering*, karena pemilihan tanaman, desain, pelaksanaan, dan pemeliharaan semuanya bergantung pada keputusan dan tindakan manusia.

1) Pemilihan Tanaman

Kesesuaian memilih spesies tumbuhan yang tepat sangat penting. Faktor yang perlu dipertimbangkan antara lain:

- a. Spesies tumbuhan harus sesuai dengan iklim, jenis tanah, dan curah hujan setempat.
- b. Spesies yang dipilih harus sesuai dengan tujuan proyek, misalnya untuk stabilisasi lereng, pengendalian erosi, atau perbaikan kualitas air.
- c. Spesies yang cepat tumbuh akan mempercepat proses stabilisasi.
- d. Spesies dengan sistem perakaran yang kuat dan dalam lebih efektif dalam menstabilkan tanah.
- e. Kualitas bibit juga berpengaruh. Bibit yang sehat dan bebas penyakit akan memiliki tingkat keberhasilan yang lebih tinggi. Penggunaan spesies lokal atau spesies yang sudah terbukti adaptif di area tersebut sangat dianjurkan.

2) Desain

Perencanaan desain yang baik harus mempertimbangkan faktor-faktor seperti kemiringan lereng, kondisi hidrologi, jenis tanah dan integrasi dengan lingkungan. *Soil Bioengineering* bukan sekadar menanam tanaman di lereng. Dibutuhkan pengetahuan

tentang jenis tanaman yang sesuai, teknik penanaman, dan cara mengintegrasikan vegetasi dengan material rekayasa. Perencanaan yang buruk, misalnya memilih tanaman yang salah atau teknik konstruksi yang tidak tepat, dapat menyebabkan kegagalan proyek.

Manusia berperan dalam mengambil keputusan penting pada setiap tahap proyek, mulai dari pemilihan lokasi, desain, konstruksi, hingga pemeliharaan. Keputusan yang tepat, berdasarkan analisis yang cermat terhadap kondisi lingkungan dan kebutuhan proyek, sangat penting untuk keberhasilan. *Soil Bioengineering* membutuhkan pemeliharaan rutin, seperti pemangkasan, penyiraman, serta pengendalian hama dan penyakit. Komitmen manusia untuk melakukan pemeliharaan jangka panjang sangat penting untuk menjaga efektivitas dan keberlanjutan proyek.

Keberhasilan *soil bioengineering* sangat bergantung pada faktor manusia. Perencanaan yang cermat, pengambilan keputusan yang tepat, dan komitmen untuk pemeliharaan jangka panjang merupakan kunci untuk menciptakan solusi yang efektif, berkelanjutan, dan ramah lingkungan. Keahlian dan pengalaman dalam penerapan teknik *soil bioengineering* sangat penting untuk mencapai hasil yang optimal. Faktor-faktor yang perlu dipertimbangkan manusia dalam perencanaan desain:

- a. Kemiringan lereng memengaruhi pemilihan teknik *soil bioengineering* yang tepat. Lereng yang lebih curam membutuhkan struktur yang lebih kuat dan tanaman dengan sistem perakaran yang lebih dalam.
- b. Kondisi hidrologi yang meliputi pola drainase, aliran air permukaan, dan tingkat kelembapan tanah perlu dipertimbangkan untuk mencegah erosi dan memastikan tanaman dapat tumbuh dengan baik.
- c. Jenis tanah memengaruhi stabilitas lereng, kemampuan tanah menahan air, dan kesuburan tanah yang akan mendukung pertumbuhan tanaman.

- d. Desain *soil bioengineering* harus mempertimbangkan dampak terhadap lingkungan sekitar, misalnya dengan memilih tanaman asli dan menghindari penggunaan material yang berbahaya.

3) Pelaksanaan

- a. Teknik penanaman yang tepat sangat penting untuk memastikan keberhasilan pertumbuhan tanaman. Kedalaman dan jarak tanam harus sesuai dengan jenis tanaman.
- b. Penggunaan material pendukung seperti kayu, batu, atau geotekstil dapat meningkatkan stabilitas lereng dan membantu pertumbuhan tanaman. Pemasangan material ini harus dilakukan dengan benar.
- c. Waktu penanaman yang tepat akan meningkatkan peluang keberhasilan. Penanaman sebaiknya dilakukan pada musim hujan atau saat kondisi lingkungan mendukung pertumbuhan tanaman.

4) Pemeliharaan

- a. Tanaman muda membutuhkan penyiraman yang cukup, terutama pada musim kemarau.
- b. Pemupukan dapat membantu pertumbuhan tanaman, tetapi harus dilakukan dengan hati-hati agar tidak mencemari lingkungan.
- c. Pengendalian gulma secara teratur sangat penting karena gulma dapat bersaing dengan tanaman utama dalam mendapatkan air, nutrisi, dan cahaya matahari.
- d. Pemantauan serta pengendalian hama dan penyakit secara teratur sangat penting karena hama dan penyakit dapat merusak atau mematikan tanaman.
- e. *Monitoring* secara berkala penting untuk mengevaluasi keberhasilan proyek dan melakukan tindakan korektif jika diperlukan.

6.3 Faktor Sosial Ekonomi

Faktor sosial dan ekonomi juga sangat berperan penting dalam keberhasilan implementasi *soil bioengineering*. Keberlanjutan dan efektivitas jangka panjang dari teknik ini sering kali bergantung pada bagaimana faktor-faktor ini dipertimbangkan dan diatasi. Keberhasilan *soil bioengineering* tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga oleh faktor sosial dan ekonomi seperti pelibatan masyarakat lokal, mempertimbangkan pengetahuan tradisional, mengatasi potensi konflik, memastikan ketersediaan dana, dan menciptakan manfaat ekonomi jangka panjang merupakan faktor kunci untuk keberhasilan dan keberlanjutan proyek *soil bioengineering*.

1) Faktor Sosial

- a. Dukungan dan partisipasi aktif masyarakat lokal sangat penting, terutama dalam pemeliharaan jangka panjang. Proyek *soil bioengineering* yang melibatkan masyarakat sejak tahap perencanaan cenderung lebih berhasil. Sosialisasi, pelatihan, dan pemberdayaan masyarakat dapat meningkatkan rasa kepemilikan dan tanggung jawab terhadap proyek.
- b. Masyarakat lokal sering kali memiliki kearifan atau pengetahuan tradisional tentang tanaman lokal dan teknik pengelolaan lahan yang dapat diintegrasikan ke dalam proyek *soil bioengineering*. Integritasi pengetahuan modern dan kearifan lokal dapat meningkatkan keberhasilan dan keberlanjutan proyek *soil bioengineering*.
- c. Potensi konflik lahan harus diidentifikasi dan diatasi sejak awal. Proyek *soil bioengineering* yang dilaksanakan di lahan yang disengketakan dapat menghadapi hambatan dan bahkan kegagalan.
- d. Adat istiadat dan kepercayaan lokal terkait penggunaan lahan dan sumber daya alam perlu dihormati dan dipertimbangkan dalam perencanaan sampai pelaksanaan proyek.

2) Faktor Ekonomi

- a. Meskipun *soil bioengineering* umumnya lebih murah daripada solusi rekayasa keras, tetap ada biaya yang terkait dengan pengadaan bibit, penyiapan lahan, penanaman, dan pemeliharaan. Ketersediaan dana yang cukup sangat penting untuk keberhasilan proyek.
- b. *Soil Bioengineering* dapat memberikan manfaat ekonomi jangka panjang bagi masyarakat lokal, misalnya melalui peningkatan produktivitas lahan, penyediaan bahan baku, dan ekowisata. Mempertimbangkan aspek keberlanjutan ekonomi dapat meningkatkan dukungan masyarakat terhadap proyek.
- c. Kemudahan akses ke sumber daya seperti bibit, air, dan tenaga kerja dapat memengaruhi biaya dan kelancaran pelaksanaan proyek.
- d. Kebijakan dan regulasi pemerintah terkait pengelolaan lahan dan lingkungan dapat mendukung atau menghambat pelaksanaan proyek *soil bioengineering*. Dukungan pemerintah dalam bentuk insentif, penyediaan pelatihan, dan penyederhanaan perizinan dapat meningkatkan keberhasilan proyek.

STUDI KASUS PENERAPAN *SOIL BIOENGINEERING*

Indonesia sering mengalami bencana alam, baik bencana yang diakibatkan oleh aktivitas di dalam bumi, seperti pergerakan lempeng tektonik, gunung api, maupun bencana yang diakibatkan oleh faktor hidrometeorologis, seperti banjir, longsor, kekeringan, dan kebakaran hutan. Pada tahun 2019, Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mencatat ada sebanyak 355 kejadian tanah longsor di Indonesia. Provinsi Jawa Barat menjadi wilayah dengan jumlah kejadian tanah longsor terbanyak yaitu 158 kali dan Sukabumi sebagai salah satu kabupaten di provinsi Jawa Barat, termasuk wilayah yang rawan longsor.

Pada tahun 2019, tanah longsor terjadi di Kecamatan Cisolok tepatnya di Desa Sinar Resmi (Gambar 25). Tanah longsor terjadi karena hujan dengan intensitas tinggi, kemiringan lereng yang terjal, dan sifat tanah yang mudah menyerap air. Selain itu, longsor juga disebabkan oleh alih fungsi lahan di kawasan perbukitan tersebut,

yaitu daerah-daerah yang seharusnya menjadi kawasan konservasi, karena kemiringan lereng lebih dari 30 derajat, berubah menjadi kawasan budidaya pertanian dan tempat tinggal warga. Khusus daerah Cimapag, sebagian besar lahan digunakan untuk persawahan.

Terlebih lagi, dalam catatan BNPB, tanah longsor menjadi bencana tertinggi di Kabupaten Sukabumi, dengan total 132 kejadian selama periode 2009 hingga 2018. Tata ruang dan implementasinya menjadi kunci untuk mengatasi longsor. Tanah longsor disebabkan oleh tingkat kemiringan lereng, bentuk lereng akibat pelapukan material, dan perubahan tutupan vegetasi lereng, serta beban berlebih (Nasiah and Invanni, 2014). Vegetasi memiliki pengaruh terhadap stabilitas lereng, karenanya longsor jarang terjadi di daerah dengan kondisi vegetasi yang tertata dengan benar sesuai distribusi perakarannya (Zayadi *et al.*, 2020).

Desa Sinar Resmi ini cukup dikenal dan sering dikunjungi wisatawan, meski jaraknya cukup jauh yakni 23 kilometer dari Cisolok. Apalagi tak jauh dari desa tersebut terdapat empat mata air yang bisa dikunjungi yakni Cipanengah, Cisodong, Cidongkap, dan Cisolok. Namun di balik semua keindahan alam yang dimiliki, desa Sinar Resmi cukup rawan terhadap longsor. Hal inilah yang menjadi kekhawatiran banyak pihak termasuk masyarakat Kampung Adat yang sudah tinggal secara turun temurun. Dengan ketinggian antara 300-600 mdpl, desa ini berada di kawasan berlereng dengan kemiringan (25-45)°. Ditambah lagi dengan curah hujan yang cukup intens dan lama yakni (2,120-3,250) mm/tahun.

Setelah melakukan survei dan wawancara dengan pemuka Kampung Adat, diperoleh informasi bahwa banyak sumber daya alam di sekitar lokasi yang dapat dimanfaatkan sebagai material perkuatan lereng terhadap longsor dengan *metode soil bioengineering*. Material tersebut terdiri dari bambu dan tanaman lokal yang sebagian sudah tumbuh, namun masih perlu diseleksi dari peran sistem perakarannya yang dapat berkontribusi terhadap perkuatan lereng. Adanya kekhawatiran masyarakat Kampung Adat bahwa akan terulangnya kejadian longsor pada lereng-lereng di sekitar lahan hunian,



Gambar 25. Kampung Adat Kasepuhan di Desa Sinar Resmi, Sukabumi, Jawa Barat.

sementara terbatasnya pengetahuan dan keterampilan masyarakat dalam hal pencegahan longsor dengan metode perkuatan yang lebih murah dan mudah dilaksanakan serta ramah lingkungan, maka diperlukan edukasi sekaligus pendampingan.

Kejadian bencana tanah longsor dapat diminimalisir dengan melakukan pencegahan, mengidentifikasi lereng-lereng yang rentan longsor dan memberi perkuatan yang berbiaya murah, ramah lingkungan, dan mudah dilaksanakan secara mandiri oleh masyarakat adat secara gotong royong.

Penerapan *soil bioengineering* telah dilaksanakan di Desa Sinar Resmi, yang terletak di wilayah Sukabumi, Jawa Barat, suatu desa di Indonesia yang memiliki topografi yang curam dengan kemiringan lereng yang bervariasi sehingga sangat rentan terhadap bencana alam seperti tanah longsor. Kondisi geografis yang berbukit-bukit, curah hujan tinggi, dan tingkat erosi tanah yang signifikan menjadi faktor utama penyebab terjadinya bencana. Kondisi ini membuat tanah menjadi mudah longsor, terutama saat musim hujan. Curah hujan yang tinggi di wilayah Sukabumi menyebabkan peningkatan limpasan permukaan air, yang dapat mengikis lapisan tanah bagian atas dan memicu terjadinya erosi permukaan dan longsor kecil.

a.



b.



c.



Gambar 26. Kondisi kawasan desa Sinar Resmi: (a) Keindahan alam Kampung Adat Kasepuhan; (b) Bencana longsor terjadi pada kawasan hutan yang beralih fungsi menjadi lahan pertanian; (c) Lereng longsor disekitar hunian pascalongsor (Februari 2021)

Vegetasi alami yang ada sangat terbatas dan tidak mampu menahan erosi dengan efektif. Tingginya tingkat erosi tanah di Desa Sinar Resmi mengakibatkan penurunan kesuburan tanah, sehingga berdampak pada produktivitas pertanian dan ketahanan pangan masyarakat. Sering terjadinya bencana tanah longsor di Desa Sinar Resmi menyebabkan kerugian materiel dan imateriel yang cukup besar bagi masyarakat.

Penerapan teknologi *soil bioengineering* khususnya dengan metode *cribwall* menggunakan bambu merupakan salah satu solusi yang efektif dan ramah lingkungan untuk mengatasi masalah erosi dan ketidakstabilan lereng. Dengan memanfaatkan sumber daya alam yang tersedia secara lokal, metode ini dapat memberikan manfaat yang signifikan bagi lingkungan dan masyarakat.

Secara khusus, penerapan teknologi *soil bioengineering* dengan metode *cribwall* banyak memberikan manfaat, baik langsung maupun tidak langsung. Manfaat itu antara lain:

- 1) Menstabilkan lereng untuk mencegah terjadinya longsor.
- 2) Memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan infiltrasi air.
- 3) Mengembalikan fungsi ekologis lahan yang berpotensi sebagai kawasan wisata hijau dan aman dari bencana.
- 4) Mengedukasi masyarakat agar memiliki keterampilan untuk mencegah kejadian longsor dengan metode yang murah, mudah dilaksanakan, dan ramah lingkungan, serta berkelanjutan karena memanfaatkan sumber daya alam yang ada di sekitar kawasan.
- 5) Meningkatkan ketahanan masyarakat terhadap bencana

7.1 Soil Bioengineering dengan Metode Cribwall

Metode *cribwall* adalah salah satu teknik dalam *soil bioengineering* yang memanfaatkan struktur kayu atau bambu sebagai kerangka untuk menahan tanah, kemudian diisi dengan material seperti tanah dan tanaman. Kayu atau bambu tersebut disusun secara berlapis-lapis untuk menahan tanah pada lereng. Kombinasi ini menciptakan

struktur yang kuat dan tahan lama, sekaligus sangat efektif dalam mencegah erosi, meningkatkan stabilitas lereng, dan mendukung pertumbuhan vegetasi.

Cribwall bekerja dengan cara menciptakan struktur berongga yang diisi dengan tanah dan tanaman. Lapisan bambu yang disusun secara horizontal berfungsi sebagai dinding penahan tanah, sementara rongga-rongga di antara lapisan bambu berfungsi sebagai tempat tumbuh akar tanaman. Akar tanaman yang tumbuh akan mengikat tanah dan struktur bambu menjadi satu kesatuan yang kuat, sehingga meningkatkan stabilitas lereng.

Pelaksanaan kegiatan proteksi lereng sebagai upaya mitigasi terhadap longsor dilakukan dengan cara membuat perkuatan lereng dengan teknik *soil bioengineering*, khususnya dengan metode *cribwall* yang diawali dengan tahap persiapan memilih material yang tepat; dilanjutkan tahap perencanaan, kemudian diikuti dengan tahap pelaksanaan, pemeliharaan, serta tahap *monitoring*, seperti tampak pada Gambar 27.

1) Tahap Persiapan

Salah satu inovasi yang menarik dalam kegiatan ini adalah penggunaan bambu dan stek tanaman kaliandra sebagai material utama. Bambu yang mudah diperoleh di sekitar desa tidak hanya mengurangi biaya konstruksi, tetapi juga memberikan tampilan yang lebih natural dan menyatu dengan lingkungan. Teknik konstruksi yang sederhana, yaitu dengan menancapkan bambu secara berlapis-lapis, memungkinkan masyarakat untuk berpartisipasi secara aktif dalam proses pelaksanaannya.

Penggunaan bambu sebagai material utama pada metode *cribwall* semakin populer karena ketersediaannya yang melimpah, biaya yang relatif murah, dan sifatnya yang ramah lingkungan. Bambu mudah ditemukan di banyak daerah, terutama di daerah tropis. Biaya produksi bambu relatif murah dibandingkan dengan material konstruksi lainnya. Penggunaan bambu mendukung pelestarian lingkungan karena merupakan tanaman yang dapat diperbarui.

1 Persiapan Material

- Bambu
- Tambang/kawat
- Vegetasi
- Tanah dan pupuk

2 Pelaksanaan

- Sejumlah 8 potongan bambu (diameter 10cm dan Panjang 3cm) dipancang ke dalam tanah tegak lurus mengikuti kemiringan lereng
- Sejumlah 3 bundel terdiri dari (2 potongan bambu diameter 10cm dan panjang diikat menjadi 1 ikatan)
- Isikan bagian yang kosong dari rangkaian boks bambu dengan tanah dan pupuk
- Masukkan stek vegetasi

3 Pemeliharaan

- Pemeriksaan vegetasi yang mati
- Pemberian insektisida secara berkala (bila perlu)
- Penyiraman secara berkala

Gambar 27. Bagan alir proteksi lereng dengan metode *bamboo cribwall*.

Teknik pembuatan *cribwall* menggunakan bambu relatif sederhana dan dapat dilakukan oleh masyarakat setempat. Akar tanaman yang tumbuh di dalam rongga-rongga *cribwall* akan mengikat tanah dengan kuat, sehingga meningkatkan stabilitas lereng. Tanaman yang ditanam di dalam *cribwall* akan menarik berbagai jenis serangga dan hewan kecil, sehingga meningkatkan keanekaragaman hayati. Material untuk persiapan pembuatan *cribwall* dapat dilihat pada Gambar 28.

Selain bambu, metode *cribwall* dapat diterapkan dengan memanfaatkan stek Kaliandra. Kaliandra merupakan pilihan tanaman yang sangat baik untuk teknik ini karena beberapa alasan, yaitu kaliandra dikenal memiliki pertumbuhan yang sangat



a. Batang bambu diameter 10cm



b. Karung tanah dan pupuk



c. Karung pasir



d. Stek tanamaan kaliandra.

Gambar 28. Persiapan material proteksi lereng dengan metode *bamboo cribwall*.

cepat, sehingga dapat dengan cepat menutupi struktur *cribwall* dan membentuk lapisan pelindung. Sistem perakaran kaliandra yang kuat dan menyebar luas mampu mengikat tanah dengan sangat baik, sehingga meningkatkan stabilitas lereng. Kaliandra dapat tumbuh dengan baik di berbagai jenis tanah dan kondisi lingkungan, termasuk tanah yang kurang subur.

Akar kaliandra yang kuat akan mengikat partikel tanah, sehingga mengurangi risiko erosi dan longsor. Daun kaliandra yang rapat akan melindungi tanah dari terpapar tetesan hujan secara langsung, sehingga mengurangi erosi akibat percikan air. Akar kaliandra membantu memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kandungan bahan organik. Kaliandra memiliki bunga yang indah, sehingga dapat meningkatkan keindahan visual suatu area.

Penggunaan stek kaliandra pada metode *cribwall* merupakan salah satu solusi yang efektif dan berkelanjutan untuk mengatasi masalah erosi tanah dan stabilisasi lereng. Kombinasi antara struktur buatan manusia dan kekuatan alam dari tanaman kaliandra menghasilkan sistem yang kuat, tahan lama, dan ramah lingkungan.

2) Tahap Perencanaan

Setelah dilakukan persiapan material, selanjutnya dilakukan tahap perencanaan meliputi:

- a. Analisis kondisi lahan, dengan melakukan survei lapangan untuk mengidentifikasi kondisi tanah, kemiringan lereng, dan potensi bahaya longsor serta mengamati sumber daya alam setempat untuk digunakan sebagai material metode *soil bioengineering*. Selain itu, dilakukan juga wawancara dengan masyarakat setempat, pemerintah desa, dan ahli terkait untuk mendapatkan informasi mengenai kondisi lingkungan, penerapan teknologi *soil bioengineering*, dan dampaknya.
- b. Pemilihan teknik *soil bioengineering* yang sesuai dengan kondisi lahan, yaitu kombinasi *bamboo cribwall* dengan stek tanaman Kaliandra.

- c. Desain sistem proteksi, dengan merancang tata letak bambu dan stek kaliandra sesuai dengan model teknologi *soil bioengineering* yang digunakan.

3) Tahap Pelaksanaan

Tahap pelaksanaan pembuatan perkuatan lereng dengan metode *soil bioengineering* menggunakan material bambu dan stek tanaman kaliandra mengikuti tahapan pada Gambar 29. sebagai berikut.

- a. Penentuan titik lokasi penempatan perkuatan lereng dan pembersihan lahan.
- b. Pemotongan bambu dengan ukuran sesuai kebutuhan dan pemasangan bambu tahap boks pertama.
- c. Pemasangan boks selanjutnya sampai ketinggian yang dibutuhkan.
- d. Pengisian tanah yang dipadatkan pada rangkaian boks proteksi.
- e. Pemasangan rangkaian boks bambu selesai sesuai ketinggian yang direncanakan.
- f. Pengisian pupuk dan penanaman stek-stek kaliandra

Setelah pemasangan struktur perkuatan lereng dan penanaman model *Cribwall*, perlu dilakukan pemeliharaan secara rutin yang meliputi:

- a. Penyiraman tanaman secara berkala.
- b. Pemupukan untuk mempercepat pertumbuhan tanaman, namun perlu memangkas dedaunan agar tidak membebani lereng yang dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak
- c. Pengendalian gulma.
- d. Perbaikan struktur yang rusak.

4) Monitoring dan Evaluasi

Monitoring dilakukan secara berkala untuk mengevaluasi keberhasilan proyek. Indikator keberhasilan yang diamati tampak pada Gambar 30, meliputi:



a.



b.



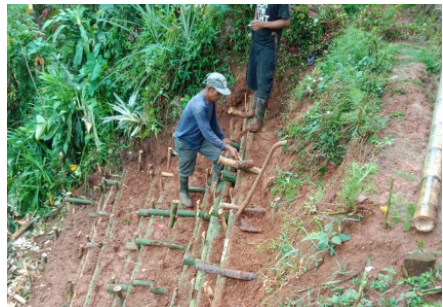
c.



d.



e.



f.

Gambar 29. Tahap pelaksanaan pembuatan proteksi lereng. a) Penentuan titik lokasi penempatan perkuatan lereng dan pembersihan lahan; b) Pemotongan bambu dengan ukuran sesuai kebutuhan dan pemasangan bambu tahap boks pertama; c) Pemasangan boks selanjutnya sampai ketinggian yang dibutuhkan; d) Pengisian tanah yang dipadatkan pada rangkaian boks proteksi; e) Pemasangan rangkaian boks bambu selesai sesuai ketinggian yang direncanakan; f) Pengisian pupuk dan penanaman stek-stek kaliandra.



Gambar 30. Kondisi lereng dengan proteksi metode *bamboo cribwall* pada bulan Mei 2021.

- a. Tingkat kelulusan hidup tanaman dan pertumbuhan vegetatif, terutama sistem perakarannya yang akan berinteraksi dengan tanah pada badan lereng.
- b. Kestabilan lereng yang ditandai dengan adanya tanda-tanda longsor, erosi, atau pergerakan tanah.
- c. Perubahan struktur tanah dan kandungan air tanah.

Penggunaan bambu untuk membuat struktur penahan massa tanah atau untuk pengendalian erosi tepi sungai telah dipraktikkan secara tradisional di berbagai tempat di seluruh dunia untuk waktu yang lama. Dinding boks bambu hidup adalah struktur tiga dimensi yang dibuat dari batang bambu yang tidak diolah, tanah bahan pengisi, dan stek hidup. Struktur boks ini, setelah diisi, bertindak sebagai struktur penahan dan pendukung lereng. Bambu dan tanaman terpasang lainnya memberikan perlindungan langsung dan stabilitas pada struktur. Namun harus diperhitungkan bahwa stabilitas struktur dan ketahanan terhadap kegagalan akan berangsur-angsur menurun seiring dengan terurainya bahan konstruksi. Saat elemen bambu dari dinding boks membusuk, akar stek tanaman hidup atau rumpun bambu akan tumbuh dan berkembang biak. Massa akar

yang dihasilkan kemudian akan mengikat bahan pengisi dan tanah pada badan lereng menjadi satu kesatuan, yang akan meningkatkan kekuatan dan berkontribusi terhadap stabilitas lereng.

7.2 Kendala dan Tantangan

Banyak kendala dan tantangan yang dihadapi pada saat penerapan teknologi *soil bioengineering* dengan metode *cribwall* tersebut, diantaranya:

- 1) Tumbuhnya gulma yang bersaing dengan stek kaliandra dalam mendapatkan nutrisi dan air, sehingga menghambat pertumbuhan tanaman. Kaliandra rentan terhadap serangan hama dan penyakit tertentu, yang dapat menyebabkan kematian tanaman. Kekeringan atau hujan yang berlebihan memengaruhi pertumbuhan dan kelangsungan hidup stek kaliandra.
- 2) Penggunaan bahan yang kurang berkualitas atau tidak tahan lama dapat menyebabkan kerusakan pada struktur *cribwall*, sehingga mengurangi efektivitasnya. Pemasangan struktur *cribwall* yang tidak sesuai dengan kondisi lapangan dapat menyebabkan ketidakstabilan dan kerusakan. Biaya pembuatan dan pemasangan struktur *cribwall* menjadi kendala, terutama untuk proyek berskala besar.
- 3) Jenis tanah yang kurang subur atau memiliki drainase yang buruk dapat menghambat pertumbuhan akar tanaman. Lereng yang terlalu curam dapat menyulitkan dalam melakukan pekerjaan konstruksi dan perawatan tanaman. Cuaca yang ekstrem seperti angin kencang atau hujan lebat dapat merusak struktur *cribwall* dan tanaman.
- 4) Tenaga kerja yang tidak memiliki keterampilan yang memadai dapat menyebabkan kesalahan dalam pelaksanaan pekerjaan. Kurangnya pemeliharaan terhadap tanaman dan struktur *Cribwall* dapat mengurangi efektivitas, serta kurangnya kesadaran masyarakat tentang pentingnya pelestarian lingkungan dapat menghambat penerapan metode ini.

7.3 Upaya Mitigasi

Untuk mengatasi kendala-kendala tersebut, beberapa upaya mitigasi yang dapat dilakukan antara lain:

- 1) Pemilihan lokasi yang tepat, sesuai dengan karakteristik tanaman kaliandra dan kondisi lingkungan.
- 2) Persiapan lahan yang baik dengan pembersihan lahan dari gulma dan perbaiki struktur tanah sebelum penanaman.
- 3) Pemilihan bahan berkualitas baik dan tahan lama untuk pembuatan struktur *cribwall*.
- 4) Pemantauan dan perawatan rutin terhadap pertumbuhan tanaman dan kondisi struktur *cribwall*, serta lakukan perawatan yang diperlukan.
- 5) Pengendalian hama dan penyakit secara terpadu dengan menggunakan metode yang ramah lingkungan.
- 6) Pelatihan dan penyuluhan kepada masyarakat tentang pentingnya metode *soil bioengineering* dan cara pelaksanaannya.

Dengan mengantisipasi dan mengatasi kendala-kendala tersebut, diharapkan penggunaan stek tanaman kaliandra pada metode *cribwall* dapat berjalan efektif dan memberikan hasil yang optimal.

7.4 Penutup

Berdasarkan hasil *monitoring* dan evaluasi, penerapan teknologi *soil bioengineering* di Desa Sinar Resmi telah berhasil mengupayakan lereng menjadi lebih stabil dan mengurangi risiko longsor. Pertumbuhan tanaman yang baik menunjukkan keberhasilan dalam memperbaiki kualitas tanah dan meningkatkan infiltrasi air. Teknik ini terbukti efektif dalam mengurangi tingkat erosi, meningkatkan kestabilan lereng, dan memperbaiki kualitas lingkungan. Namun, masih terdapat beberapa kendala dan tantangan yang perlu diatasi agar penerapan teknologi ini dapat berjalan secara optimal. Berikut adalah upaya yang dapat dilakukan untuk meningkatkan peran aktif masyarakat:

- 1) Melakukan sosialisasi yang lebih intensif kepada masyarakat di lokasi yang berbeda mengenai pentingnya penerapan teknologi *soil bioengineering* dan manfaatnya.
- 2) Melakukan pelatihan kepada masyarakat dan petugas mengenai teknik konstruksi dengan diversifikasi tanaman untuk meningkatkan keanekaragaman hayati.
- 3) Melibatkan masyarakat secara aktif dalam proses perencanaan, pelaksanaan, dan pemantauan penerapan serta pemeliharaan secara berkelanjutan untuk menjaga keberlangsungan sistem teknologi *soil bioengineering*.
- 4) Melakukan penelitian lebih lanjut untuk mengembangkan jenis tanaman dan teknik konstruksi yang lebih sesuai dengan kondisi lingkungan di Desa Sinar Resmi.

Penerapan teknologi *soil bioengineering* merupakan langkah yang tepat dalam upaya mengatasi permasalahan erosi dan tanah longsor di Desa Sinar Resmi. Dengan dukungan dari berbagai pihak, diharapkan teknologi ini dapat diterapkan secara lebih luas dan berkelanjutan sehingga dapat meningkatkan kualitas lingkungan dan kesejahteraan masyarakat.

Beberapa rekomendasi dalam implementasi metode *soil bioengineering* untuk proteksi lereng rawan longsor berdasarkan hasil kajian dan penerapan di lapangan yang telah dilakukan, adalah:

- 1) Perencanaan yang matang perlu dilakukan dengan menganalisis secara menyeluruh terhadap kondisi lereng, termasuk kemiringan, jenis tanah, curah hujan, dan vegetasi yang ada. Pemilihan teknik *soil bioengineering* yang sesuai dengan kondisi lereng dan tujuan yang ingin dicapai. Aspek sosial dan ekonomi perlu dipertimbangkan, misalnya dengan melibatkan masyarakat setempat dalam perencanaan dan pelaksanaan proyek untuk meningkatkan keberlanjutan.
- 2) Pemilihan vegetasi yang tepat sesuai dengan kondisi lingkungan setempat, seperti kekeringan, banjir, atau serangan hama. Vegetasi dipilih yang memiliki sistem perakaran yang kuat

secara lateral dan vertikal untuk meningkatkan stabilitas lereng. Selain itu variasi jenis tanaman perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan keanekaragaman hayati dan ketahanan ekosistem.

- 3) Pembuatan struktur pendukung sebaiknya menggunakan bahan alami seperti kayu, bambu, atau batu untuk mengurangi dampak lingkungan. Desain struktur pendukung yang fleksibel menjadi pertimbangan agar dapat menyesuaikan diri dengan pergerakan tanah. Perawatan berkala dilakukan pada struktur pendukung untuk memastikan fungsinya tetap optimal.
- 4) Pemantauan secara berkala terhadap pertumbuhan tanaman dan kondisi lereng serta melakukan evaluasi efektivitas metode *soil bioengineering* dalam meningkatkan stabilitas lereng dan mengurangi risiko longsor. Jika diperlukan, melakukan penyesuaian terhadap desain atau teknik yang digunakan.
- 5) Melakukan sosialisasi kepada Masyarakat tentang pentingnya metode *soil bioengineering* dan manfaatnya, dengan melakukan antara lain: pembinaan kepada masyarakat dalam merawat dan memelihara tanaman serta struktur pendukung, disamping melibatkan masyarakat dalam pelaksanaan proyek untuk meningkatkan rasa memiliki dan tanggung jawab.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdila, R. 2025. Analisis Kerapatan Vegetasi Terhadap Koefisien Limpasan Permukaan Pada DAS Juana. Tugas Akhir. Universitas Trisakti: Jakarta.
- Arunava Ray and Dr. Mahender Choudharym (2015). Bio-Engineering Slope Protection: Urgent Need of the Himalayas.
- Asian Development Bank (2018). Timor-Leste Transport Operations. <http://dx.doi.org/10.22617/TCS179142-2>
- Bioengineering for green infrastructure. Asian Development Bank, 2020.
- Deivaseeno Dorairaj and Normaniza Osman (2020). Present practices and emerging opportunities in bioengineering for slope stabilization in Malaysia: An overview.
- Deivaseeno Dorairaj and Normaniza Osman (2021). Present practices and emerging opportunities in bioengineering for slope stabilization in Malaysia: An overview. DOI:10.7717/peerj.10477
- Field Guide on Soil Bioengineering for Slope Stabilization in Timor Leste, World Bank Office, Dili, Timor Leste. May 2012
- Frank van Steenberg et al., (2021). Green Roads for Water: Guidelines for Road Infrastructure in Support of Water Management and Climate Resilience. World Bank Group.

- Frank van Steenberg et al., 202. Green Roads for Water: Guidelines for Road Infrastructure in Support of Water Management and Climate Resilienc. World Bank Group.
- Gian Battista Bischetti, et a., 2021. Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements
- Gian Battista Bischetti, et al., (2021). Design and temporal issues in Soil Bioengineering structures for the stabilisation of shallow soil movements. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106309>
- Giupponi L. et al., 2018. How to renew soil bioengineering for slope stabilization: some proposals. DOI:10.1007/s11355-018-0359-9
- Giupponi L. et al., 2018. How to renew soil bioengineering for slope stabilization: some proposals.
- Gordon Rex Keller (2023). Infrastructure Adaptation and Climate Resilience for California's National Forests. DOI:10.1177/03611981221148701
- Gordon Rex Keller (2023). Infrastructure Adaptation and Climate Resilience for California's National Forests
- Green Infrastructure. Publications | Asian Development Bank
- Guillermo Tardio, et al., (2016). Bamboo structures as a resilient erosion control measure. DOI:10.1680/jfoen.16.00033
- Guillermo Tardio, et al., 2016. Bamboo structures as a resilient erosion control measure.
- Kurniyaningrum, E., Kurniawan, M.A. Climate Change Effect on Water Balance For Water Critically in Upper Bogowonto Watershed, Indonesia. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2022, pp. 1-10.
- Kurniyaningrum, E., Rinanti, A., Herlina, L., Putra, D.T., Sattar, H. 2024. The Relationship Between Land Surface Temperature

and Water Availability: A Preliminary study. Understanding Global Digital Era Technologies and Transformations in Social, Environment, Peace & Business Development Perspectives in Society, 40-53.

Mulia, E. 2025. Pengaruh Kerapatan Vegetasi Terhadap Koefisien Limpasan Permukaan Pada DAS Jragung. Tugas Akhir. Universitas Trisakti: Jakarta.

Putra, D.T. 2024. Pengaruh Tutupan Lahan Terhadap Suhu Permukaan dan Indeks Kekeringan di Wilayah DAS Ciliwung (Studi Kasus DKI Jakarta). Tugas Akhir. Universitas Trisakti: Jakarta.

Salter, David; Howell, John; Eagle, Stephe (2020). Bioengineering for

Schmitt, K. et al., (2018). River bank stabilisation by bioengineering: potentials for ecological diversity. <https://doi.org/10.1080/23249676.2018.1466735>

Schmitt, K. et., 2018. River bank stabilisation by bioengineering: potentials for ecological diversity.

Septasawala, A. 2024. Faktor Yang Mempengaruhi Implementasi Manajemen Konstruksi Berkelanjutan Terhadap Pengelolaan Limbah Konstruksi (Studi Kasus Proyek di Ibu Kota Negara). Tesis. Universitas Trisakti: Jakarta.

Sriwati. M., S, Pallu., Selintung, M., R, Lopa. 2017. "Bioengineering with Yellow Bamboo Culture (*Bambusa Vulgaris*) As Land Surface in Control of Improvement Erosion." Proseeding of 85th the IRes International Conference, Yokohama, Japan, 9th – 10th October 2017.

Sriwati. M., S, Pallu., Selintung, M., R, Lopa. 2018. Study experimental on bio-engineering as cover plant on riverbank for erosion control.

- Taran Jandyal 1 and Mohammad Yousuf Shah (2024). Bioengineering stabilization of marginal soil at the sloping face of the embankment using the vetiver root system.
- Zayadi, et al. (2020). *The influence of vegetation roots on slope stability in landslide susceptible areas.*
- Zayadi, et al. (2022). Landslide disaster mitigation training using the vegetative method in the Kasepuhan Traditional Village, Sukabumi Regency. <https://doi.org/10.31603/ce.6772>
- Zayadi, et al. (2022). *Landslide disaster mitigation training using the vegetative method in the Kasepuhan Traditional Village, Sukabumi Regency.* <https://doi.org/10.31603/ce.6772>
- Zayadi, R., et al. 2022. Soil Reinforcement Modelling on a Hilly Slope with Vegetation of Five Species in the Area Prone to Landslide in Malang, Indonesia. *Environmental Research, Engineering and Management*, 78(3), 56–72. <https://doi.org/10.5755/j01.erem.78.3.30670>.

TENTANG PENULIS



Dr. Ruwaida Zayadi, S.T., M.T.

Ruwaida Zayadi, Dosen Tetap di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti, Jakarta. Sejak tahun 1996 mengajar beberapa mata kuliah khusus pada Bidang Konsentrasi Geoteknik.

Ruwaida Zayadi sejak tahun 2021 menjabat sebagai Kepala Laboratorium Geoteknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Trisakti. Beliau memiliki pengalaman luas dalam mengajar mata kuliah terkait Geoteknik, termasuk Mekanika Tanah, Stabilitas Lereng, dan Teknik Perkuatan Tanah. Sebelum bergabung dengan Universitas Trisakti, pada tahun (1984 -1995) beliau bekerja sebagai Tenaga Ahli di Konsultan Teknik PT. Duta Hari Murthi dan Manajemen Konstruksi PT. Indecon Adi Karsa. Dengan pendekatan yang inovatif dan mendalam, beliau tidak hanya memberikan ilmu teoretis, tetapi juga mengarahkan mahasiswanya untuk memahami praktik lapangan secara holistik. Penelitian beliau menyoroti pentingnya pemanfaatan vegetasi alami sebagai solusi ramah lingkungan untuk mengurangi risiko longsor, terutama di wilayah rawan bencana yang kerap kali terjadi di Indonesia. Hasil risetnya telah dipublikasikan di beberapa jurnal

ilmiah bereputasi dan diaplikasikan sebagai upaya mitigasi longsor serta menghasilkan buku berjudul, “Peran Akar Vegetasi Terhadap Stabilitas Lereng”.

Dengan kombinasi keahlian akademik, dedikasi terhadap pengajaran, dan kontribusi riset yang inovatif, Ruwaida Zayadi terus berupaya memberikan dampak positif, baik di lingkungan akademis maupun dalam pengelolaan Geoteknik berkelanjutan.



**Dr. Ir. Endah Kurniyaningrum, S.T.,
M.T., IPM., ASEAN Eng, APEC Eng.**

*Endah Kurniyaningrum, Dosen Tetap di
Teknik Sipil, Universitas Trisakti, Jakarta.
Penulis mengajar beberapa mata kuliah di
Jurusan Teknik Sipil pada Program Studi
Sarjana dan Magister.*

Endah Kurniyaningrum merupakan seorang akademisi dan praktisi yang memiliki ketertarikan terhadap *Climate Change* dan *Sustainable Development Goals* (SDGs). Beberapa karya ilmiah telah terbit secara nasional dan internasional. Penulis aktif menjadi anggota editor dan *reviewer* di beberapa jurnal nasional dan internasional. Selain itu, aktif pada organisasi profesi dan badan usaha seperti Persatuan Insinyur Indonesia (PII), Asosiasi Ahli Tenaga Konstruksi Indonesia (ATAKI) dan Asosiasi Sahabat Kontraktor Nusantara (Batara) serta menjadi Asesor Sertifikasi Kompetensi Kerja Konstruksi (SKK-BNSP)
Email: kurniyaningrum@trisakti.ac.id



**Prof. Dr. Ir. Astri Rinanti, M.T., IPM.,
ASEAN Eng.**

Astri Rinanti, Guru Besar bidang Rekayasa Lingkungan di Teknik Lingkungan, Universitas Trisakti, Jakarta. Sejak tahun 1995, mengajar beberapa mata kuliah di Jurusan Teknik Lingkungan, dan kini mengajar pula di Teknik Sipil.

Prof. Astri menjabat sebagai Direktur Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Universitas Trisakti dari tahun 2019 hingga sekarang dan Kepala Laboratorium Mikrobiologi Lingkungan, Universitas Trisakti. Selain itu, beliau juga Editor *in Chief Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology* (SINTA-2, terindeks Scopus), anggota Editor beberapa Jurnal Nasional Terakreditasi, menjadi *reviewer* di beberapa jurnal nasional dan internasional bereputasi.

Sebagai dosen yang berkomitmen untuk menyebarluaskan dan meningkatkan pengetahuan kepada masyarakat, Prof. Astri secara kontinu mempublikasikan artikel ilmiah terkait rekayasa lingkungan di jurnal nasional dan internasional, menerbitkan 8 buku dan memiliki 9 Paten (*granted*). Beliau telah memenangkan banyak hibah penelitian dan PKM dari Pemerintah Republik Indonesia. Beberapa kali mendapat undangan menjadi pembicara di berbagai konferensi dan seminar ilmiah. Hingga saat ini nilai SINTA berada di posisi terbaik selama 10 tahun terakhir di Universitas Trisakti. Selain itu, aktif pula pada organisasi profesi seperti Ikatan Ahli Teknik Penyehatan dan Lingkungan Indonesia (IATPI), Persatuan Insinyur Indonesia (PII), Asosiasi Mikrobiologi Indonesia, *Asean Federation of Biotechnology* (AFOB).

Email: astririnanti@trisakti.ac.id



Reza Fauzi, S.T., M.Ars

*Reza Fauzi, Dosen di Program Studi
Arsitektur Lanskap, Fakultas Arsitektur
Lanskap dan Teknologi Lingkungan
Universitas Trisakti, Sejak Tahun 2020, dan
mengajar beberapa mata kuliah di Program
Studi Arsitektur Lanskap.*

Reza Fauzi merupakan seorang dosen di Program Studi Arsitektur Lanskap, Universitas Trisakti. Saat ini mengajar di beberapa mata kuliah yang berfokus pada perancangan lanskap, serta aktif sebagai tim pengelola Jurnal *of Synergy Landscape*, Jurnal Juara, dan Jurnal Bhuwana. Saat ini Reza Fauzi ditugaskan sebagai Kepala Laboratorium Teknologi Lanskap, Program Studi Arsitektur Lanskap, Universitas Trisakti

Sebagai dosen, Reza Fauzi secara kontinu melakukan kegiatan penelitian ilmiah terkait perancangan lanskap dan mempublikasikan artikel ilmiah ke Jurnal Nasional dan aktif membuat HKI pada setiap hasil rancangan yang didapatkan dalam kegiatan penelitian. Dalam bidang penelitian, Reza Fauzi mengeksplorasi berbagai aspek perancangan lanskap, mulai dari segi ekologis, keberlanjutan lingkungan yang memiliki tujuan untuk mengembangkan konsep lanskap yang tidak hanya estetis, tetapi juga berfungsi optimal dalam mendukung keberlanjutan lingkungan. Selain itu, Reza Fauzi aktif terlibat dalam kegiatan Pengabdian kepada Masyarakat, di mana dalam kegiatan tersebut menerapkan kemampuan merancang untuk mengembangkan ruang terbuka yang lebih asri, nyaman, dan sesuai dengan kebutuhan lokal.

PROTEKSI LERENG RAWAN LONGSOR

DENGAN METODE *SOIL BIOENGINEERING*

Buku “Proteksi Lereng Rawan Longsor dengan Metode *Soil Bioengineering*” hadir dengan perspektif inovatif dan berkelanjutan dalam upaya mitigasi bencana longsor.

Metode *soil bioengineering* tidak hanya memberikan perlindungan fisik, tetapi juga mendukung pelestarian lingkungan dengan meningkatkan kualitas tanah, mengurangi erosi, serta menciptakan ekosistem yang lebih stabil.

Buku ini mengupas secara mendalam konsep, prinsip, dan teknik *soil bioengineering*, dengan fokus pada penerapan di Indonesia. Dengan pendekatan multidisiplin yang mencakup teknik sipil, biologi, dan lingkungan, buku ini tidak hanya memberikan wawasan teoritis, tetapi juga menyajikan contoh aplikasi nyata, studi kasus, serta rekomendasi tanaman lokal yang potensial digunakan dalam stabilisasi lereng.

Saatnya beralih ke solusi berbasis alam untuk melindungi, menyelamatkan, dan membangun masa depan yang lebih aman.