

ANALISIS STRUKTUR *PAIRED STONES* DAN VEGETASI DALAM PENGENDALIAN EROSI DI BENDUNGAN JLANTAH

Tri Prandono¹, Lely Hendarti², Nasyiin Faqih³

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Universitas Surakarta

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer,
Universitas Sains Al Qur'an

tri.prandono@gmail.com, hendartilely@gmail.com, nasyiin@unsiq.ac.id

***Corresponding author**

To cite this article: Tri Prandono, Lely Hendarti, Nasyiin Faqih (2025): Analisa Pemanfaatan Bioteknologi Cerdas Paired Stones Pengendalian Erosi Tanah (Rekayasa Vegetasi Struktur Pada Bendungan Jlantah, Karanganyar), Jurnal Ilmiah Arsitektur, 15(2), 127-140

Author information

Tri Prandono, fokus riset bidang Sumberdaya Air, Pemodelan Hidrologi dan Analisa Struktur, ORCID: 0009-0003-1101-6454, WOS Reseachar -, Sinta ID : 6155723,

Lely Hendarti, fokus riset bidang Sumberdaya Air, Pemodelan Hidrologi dan Analisa Struktur, ORCID: 0009-0002-8156-1522, WOS Reseachar -, Sinta ID : 6159761,

Nasyiin Faqih, fokus riset bidang Sumberdaya Air, Pemodelan Hidrologi dan Analisa Struktur, ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-7559-3726>, ScopusID:57217683561

Homepage Information

Journal homepage : <https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/jiars>

Volume homepage : <https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/jiars/issue/view/488>

Article homepage : <https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/jiars/article/view/10536>

ANALISIS STRUKTUR *PAIRED STONES* DAN VEGETASI DALAM PENGENDALIAN EROSI DI BENDUNGAN JLANTAH

Tri Prandono¹, Lely Hendarti², Nasyiin Faqih³

^{1,2} Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan,
Universitas Surakarta

³Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer,
Universitas Sains Al Qur'an

tri.prandono@gmail.com, hendartilely@gmail.com, nasyiin@unsiq.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel :

Diterima : 19 November 2025

Direvisi : 18 Desember 2025

Disetujui : 23 Desember 2025

Diterbitkan : 31 Desember 2025

Kata Kunci :

Bioteknologi; Pengendalian Erosi; *Paired Stones*; Vegetasi; Stabilitas Tanah

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan sebagai respons tingginya laju erosi tanah di daerah rawan longsor sekitar Bendungan Jlantah, Karanganyar, yang dipicu interaksi faktor lingkungan dan aktivitas antropogenik, berimplikasi pada kerusakan ekosistem dan penurunan produktivitas lahan. Tujuan utama riset ini adalah mengembangkan teknik bioteknologi cerdas *paired stones* mengintegrasikan struktur batu berpasangan dengan vegetasi untuk mencapai pengendalian erosi yang efektif dan berkelanjutan serta meningkatkan stabilitas tanah. Metode yang digunakan meliputi analisis korelasi Pearson untuk mengidentifikasi hubungan antara kerapatan vegetasi, kemiringan lereng dan laju erosi, serta pengembangan model matematis laju erosi. Pelaksanaan eksperimen selama empat bulan dilakukan pada lereng kritis kemiringan 30°-45°, melibatkan pemasangan *paired stones* batu vulkanik dan penanaman Vetiver. Meskipun karakteristik tanah menunjukkan kerentanan erosi tinggi (tekstur liat berpasir, pH masam-sedang dan bahan organik rendah), tanaman Vetiver menunjukkan adaptasi sangat baik dengan persentase hidup di atas 90%. Hasil komparasi menunjukkan efektivitas tertinggi pada kombinasi (*paired stones* + Vetiver), mencapai penurunan laju erosi sebesar 74,2% dengan kehilangan tanah hanya 18,7 ton/ha/tahun. Perlakuan ini melampaui efektivitas *paired stones* saja 55,1% dan Vetiver saja 45%, dibandingkan area kontrol 72,4 ton/ha/tahun. Secara keseluruhan, teknik *paired stones* dinilai adaptif, ramah lingkungan, ekonomis dan berkelanjutan, sehingga layak direplikasi sebagai solusi pengelolaan sumber daya alam.

ARTICLE INFO

Article History :

Received : November 19, 2025

Revised : December 18, 2025

Accepted : December 23, 2025

Publisihed: December 31, 2025

Keywords:

Biotechnology; Erosion Control; *Paired Stones*; Vegetation; Soil Stability

ABSTRACT

This research was conducted in response to the high rate of soil erosion in landslide-prone areas around the Jlantah Dam, Karanganyar, triggered by the interaction of environmental factors and anthropogenic activities, which have implications for ecosystem damage and decreased land productivity. The main objective of this research is to develop a smart biotechnology technique of paired stones integrating paired stone structures with vegetation to achieve effective and sustainable erosion control and increase soil stability. The methods used include Pearson correlation analysis to identify the relationship between vegetation density, slope gradient and erosion rate, as well as the development of a mathematical model of erosion rate. The four-month experiment was carried out on a critical slope of 30°-45°, involving the installation of paired volcanic stones and the planting of Vetiver. Although the soil characteristics indicate high erosion susceptibility (sandy clay texture, medium-acid pH and low organic matter), Vetiver plants showed excellent adaptation with a survival percentage above 90%. The comparative results showed the highest effectiveness in the combination (paired stones + Vetiver), achieving a reduction in erosion rate of 74.2% with soil loss of only 18.7 tons/ha/year. This treatment exceeded the effectiveness of paired stones alone (55.1%) and vetiver alone (45%), compared to the control area (72.4 tons/ha/year). Overall, the paired stones technique is considered adaptive, environmentally friendly, economical, and sustainable, making it worthy of replication as a natural resource management solution.

PENDAHULUAN

Bendungan Jlantah, yang terletak di Kecamatan Jatiyoso, Kabupaten Karanganyar, memiliki luas genangan 50,45 hektar dan kapasitas tampung 10,97 juta m³. Bendungan ini diresmikan 7 Januari 2025 oleh Presiden Prabowo, dirancang untuk berbagai manfaat seperti irigasi, penyediaan air baku, pengendalian banjir dan konservasi air (Jadin & Rousseau, 2022), (Virlyani & Pertiwi, 2023). Namun, tantangan utama adalah sedimentasi akibat erosi tanah di area genangan dan lereng sekitarnya (Maximus, 2025). Kondisi topografi berbukit dengan batuan vulkanik dan curah hujan tinggi memperparah risiko longsor (Sato & Shuin, 2025), sehingga diperlukan solusi berkelanjutan berbasis bioteknologi (Ugo, 2024).

Pengendalian erosi tanah dapat dilakukan melalui beberapa pendekatan dan sudah banyak diterapkan pada beberapa daerah rawan longsor (Euthalia, 2024). Strategi yang umum dilakukan pertama rekayasa vegetasi yaitu penanaman tanaman yang memiliki akar kuat untuk menahan tanah dan mencegah longsor (Arista, 2016). Jenis tanaman seperti rumput atau lainnya dapat digunakan mengurangi sedimentasi ke area bendungan (Varadilla, 2020). Kedua penggunaan mikroorganisme tanah dimana dapat meningkatkan stabilitas struktur tanah melalui proses biologis memperkuat agregat tanah (Selvian, 2024)serta ketiga terasering dan pola tanam yang berfungsi mengurangi, menghambat aliran air permukaan yang menyebabkan erosi (Anau, 2022).

Studi lapangan peneliti dan penelitian sebelumnya akhir tahun 2024-2025 (saat proses pembangunan) telah dilakukan pada sisi pelimpah Bendungan Jlantah menggunakan metode *soil nailing* sebagai alternatif perkuatan lereng (Dewo, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa stabilitas lereng menjadi perhatian utama dalam pengelolaan struktur bendungan (Santoso, 2023). Disisi lain kajian studi oleh ahli geologi bersama tim BBWS (Balai Besar Sungai Bengawan Solo) tahun 2017-2019 hasilnya diprediksi sekitar area bendungan menunjukkan kondisi struktur terdiri tanah liat dan batuan vulkanik dengan kemiringan curam hingga sangat curam, yang berpotensi tinggi terjadi longsor. Rekomendasi kajian tersebut menegaskan pentingnya pengendalian erosi untuk menjaga stabilitas struktur tanah sekitar bendungan (Yayi Ismanda, 2019).



Gambar 1. Pintu masuk, FGD dan KPW di area Bendungan Jlantah

Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan sistem Bioteknologi Cerdas Paired Stones, yang mengintegrasikan kekuatan mekanis material batu dengan kekuatan biologis perakaran vegetasi (rekayasa vegetasi struktur). Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang fokus pada struktur kaku (beton/pasangan batu murni) di area bendungan, penelitian ini mengevaluasi sinergi antara struktur *paired stones* dengan vegetasi spesifik lokal sebagai solusi hibrida pengendalian erosi. Selain itu, lokus penelitian di Bendungan Jlantah memberikan data empiris baru mengenai efektivitas *bio-engineering* pada karakteristik tanah dan hidrologi spesifik Kabupaten Karanganyar yang belum pernah dipetakan sebelumnya.

Paired stones dalam *bioengineering* merujuk pada integrasi vegetasi penahan erosi dengan struktur batu berpasangan (seperti gabion) merupakan gabungan metode alami untuk meningkatkan stabilitas lereng (Bosco, 2024). Teknik ini mengoptimalkan fungsi mekanis batu sebagai penahan massa tanah dan pengurang aliran permukaan (Qinji, 2024), sedang fungsi biologis vegetasi akar tanaman memperkuat agregat tanah, menyerap air dan mengurangi tekanan pori. Berdasar kajian lapangan, literatur dan diskusi dengan pemangku kepentingan, maka perlu penelitian pemanfaatan bioteknologi cerdas *paired stones* pengendalian erosi tanah (rekayasa vegetasi struktur pada Bendungan Jlantah, Karanganyar). Penelitian ini mengadopsi pendekatan holistik dan terintegrasi untuk mengatasi masalah erosi tanah. Tahap awal melibatkan analisis dan prediksi erosi menggunakan metode Universal Soil Loss Equation (USLE) untuk memproyeksikan laju erosi berdasarkan curah hujan, kemiringan lereng, dan tutupan vegetasi (Arifandi & Ikhsan, 2019). Solusi fisik utama yang diterapkan adalah penggunaan tanaman penahan erosi *Vetiver grass*, yang akarnya terbukti efektif menahan tanah (Arben, 2022), dan integrasi struktur *paired stones*, yaitu gabion bervegetasi, untuk menciptakan stabilitas dan mereduksi aliran air permukaan (Lucas, 2018).

Keberlanjutan suatu riset didukung melalui edukasi dan partisipasi masyarakat, bertujuan meningkatkan kesadaran serta penerapan teknik *paired stones* melalui program pelatihan (Jadin & Rousseau, 2022), monitoring lapangan dilakukan berbasis teknologi menggunakan *drone* dan sensor untuk mengetahui pertumbuhan vegetasi serta kondisi tanah secara *real-time*, menjamin evaluasi akurat (Nina, 2023). Seluruh hasil penelitian dievaluasi melalui pendekatan berbasis data menggunakan analisis statistik, yang memberikan informasi optimal mengenai efektivitas metode dan hubungan faktor-faktor yang memengaruhi erosi tanah (Rafael, 2018).

Penelitian konservasi tanah dengan pendekatan menekankan integrasi rekayasa vegetasi dan struktur fisik melalui teknik *paired stones* (batu berpasangan) (Zhang, 2024); (Dos Santos, 2025). Integrasi ini memanfaatkan tanaman penahan erosi, seperti *Chrysopogon zizanioides* (vetiver), yang memiliki sistem akar kuat untuk mengikat tanah (Asaithambi, 2024); (Schröder & et. el., 2018), sementara struktur batu berfungsi memperlambat aliran air permukaan dan memerangkap sedimen (Lucas, 2018), dengan pemantauan alat bantu *drone* tentang kelembaban tanah, laju erosi dan pertumbuhan vegetasi secara *real-time* (Zhang, 2024); (Bojana, 2025).

Kebaruan studi ini terletak pada sinergi holistik antara teknologi, efisiensi biaya dan konservasi berbasis ekosistem. Metode *paired stones* menunjukkan keunggulan dibandingkan teknik konvensional karena sifatnya yang ramah lingkungan, mendukung infiltrasi air dan memanfaatkan bahan lokal untuk efisiensi biaya (Sona & Sangeetha, 2025); (Meghdad, 2024). Keberhasilan dan replikasi model ini diperkuat oleh pendekatan berbasis komunitas, yang melibatkan partisipasi dan edukasi masyarakat lokal dalam penerapan teknik konservasi (Mafalda, 2025); (Euthalia, 2024). Analisis data dan model matematis lebih lanjut digunakan untuk mengevaluasi data hasil pemantauan, memberikan pemahaman mendalam tentang hubungan faktor lingkungan dan laju erosi (Li et al., 2025; (Ajay, 2025).

METODE

Langkah awal meliputi analisis tanah secara komprehensif, mencakup karakteristik fisik dan kimia (pH, nutrisi, kontaminan), untuk memastikan kesesuaian tanah dengan vegetasi dan efektivitas teknologi. Selanjutnya, dilakukan perencanaan desain eksperimen melalui pengambilan sampel tanah yang representatif

dan penentuan parameter uji yang relevan. Implementasi teknis dimulai dengan pemasangan struktur batu berpasangan (*paired stones*) yang berfungsi sebagai struktur fisik untuk mengurangi aliran permukaan dan menahan sedimen. Kemudian, dilakukan penanaman vegetasi percobaan di sekitar struktur tersebut. Tahapan krusial selanjutnya adalah pemantauan pertumbuhan vegetasi untuk mengevaluasi dampaknya terhadap stabilitas tanah.

Efektivitas intervensi diukur melalui pengukuran laju erosi guna menilai kemampuan *paired stones* dalam mereduksi laju erosi tanah. Seluruh data yang terkumpul dari berbagai pengukuran diolah melalui analisis data menggunakan metode statistik untuk menguji signifikansi hubungan antar variabel. Akhirnya, dilakukan evaluasi hasil awal untuk menilai keberhasilan implementasi teknologi *paired stones* berdasarkan data pemantauan yang telah dianalisis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

C.1. Karakteristik Tanah Lokasi Penelitian

Analisis tanah dilakukan pada tiga titik pengambilan sampel di area lereng rawan erosi Bendungan Jlantah. Hasil analisis laboratorium ditunjukkan pada tabel 1.

Tabel 1. Hasil Rata-rata Tanah Lokasi Penelitian

No	Parameter	Titik 1 (Atas Lereng)	Titik 2 (Tengah Lereng)	Titik 3 (Bawah Lereng)	Rata-rata	Kriteria*
1	pH Tanah	5,7	6,1	6,4	6,07	Masam-sedang
2	Tekstur tanah	Liat berdebu	Lempung berpasir	Liat berpasir	-	Rentan erosi
3	Kandungan Organik (%)	1,21	1,45	1,67	1,44	Rendah
4	Kandungan N total (%)	0,18	0,21	0,25	0,21	Rendah-sedang
5	Kandungan P tersedia (ppm)	12,5	14,2	16,1	14,3	Sedang
6	Kandungan K tersedia (cmol/kg)	0,28	0,34	0,39	0,34	Sedang
7	Kelembaban tanah (%)	22,4	26,7	29,3	26,1	Sedang-lembab
8	Porositas (%)	43,2	46,8	49,5	46,5	Sedang
9	Kepadatan tanah (g/cm ³)	1,49	1,52	1,56	1,52	Tinggi
10	Kadar air (%)	28,4	30,2	32,1	30,2	Sedang

Sumber: Data Peneliti, 2025

*Kriteria menurut Balai Penelitian Tanah (2020)

Hasil uji tanah di tiga titik lokasi penelitian (atas, tengah dan bawah lereng) tabel 1., menunjukkan variasi sifat fisik dan kimia tanah yang mempengaruhi tingkat kerentanan erosi. Nilai pH tanah berkisar antara 5,7–6,4 dengan rata-rata 6,07 yang termasuk kategori masam-sedang. Kondisi ini masih dapat mendukung pertumbuhan vegetasi, meskipun beberapa unsur hara tertentu mungkin kurang optimal terserap. Dari segi tekstur tanah, titik atas lereng

didominasi liat berdebu, tengah lereng berupa lempung berpasir dan bawah lereng berupa liat berpasir. Ketiga jenis tekstur tersebut masuk kategori tanah yang relatif rentan terhadap erosi, terutama pada area berlereng curam. Kandungan bahan organik relatif rendah dengan kisaran 1,21–1,67% (rata-rata 1,44%). Rendahnya kandungan organik ini, berdampak pada rendahnya kapasitas tanah dalam memperbaiki struktur dan meningkatkan daya ikat agregat. Sejalan dengan itu, kandungan N total juga tergolong rendah–sedang (0,18–0,25%), dengan rata-rata 0,21%. Hal ini menunjukkan keterbatasan nutrisi nitrogen yang penting bagi pertumbuhan vegetasi.

Pada unsur hara makro lainnya, P tersedia berada pada kategori sedang dengan rata-rata 14,3 ppm, sementara K tersedia juga sedang dengan rata-rata 0,34 cmol/kg. Ketersediaan fosfor dan kalium pada tingkat ini masih cukup mendukung pertumbuhan tanaman, meskipun perlu penambahan organik untuk meningkatkan kesuburan. Secara fisik kelembaban tanah berkisar 22,4–29,3% dengan rata-rata 26,1% yang termasuk kategori sedang–lembab, cukup mendukung pertumbuhan vegetasi. Nilai porositas berkisar antara 43,2–49,5% (rata-rata 46,5%), menunjukkan kondisi tanah yang masih cukup mampu menahan air, meski cenderung sedang.

Namun demikian, nilai kepadatan tanah relatif tinggi (1,49–1,56 g/cm³ dengan rata-rata 1,52), yang menunjukkan tanah cukup padat. Hal ini berpotensi menghambat penetrasi akar dan pergerakan air dalam profil tanah. Kadar air tanah berada pada tingkat sedang, yaitu rata-rata 30,2%, yang menunjukkan ketersediaan air cukup stabil di seluruh titik lereng. Hasil analisis tanah menunjukkan bahwa lokasi penelitian memiliki kondisi yang cukup menantang untuk konservasi lahan, karena kombinasi sifat fisik dan kimia yang kurang ideal. Nilai pH masam–sedang mengindikasikan perlunya perbaikan tanah, misalnya melalui penambahan bahan organik atau *amelioran* kapur untuk meningkatkan ketersediaan unsur hara. Hal ini sesuai dengan temuan (Andhika, 2021) yang menyatakan bahwa pH 5,5–6,5 masih sesuai untuk pertumbuhan rumput vetiver, meskipun respons tanaman lebih optimal pada pH mendekati netral.

Tekstur tanah yang bervariasi (liat berdebu, lempung berpasir dan liat berpasir) semuanya termasuk kategori mudah tererosi karena agregat tanah tidak terlalu stabil terhadap aliran permukaan. Hasil ini sejalan

dengan penelitian (Chenlu, 2020) di Cina yang menemukan bahwa tanah bertekstur lempung berpasir pada lereng curam memiliki kehilangan tanah 30–40% lebih tinggi dibanding tanah liat berstruktur baik. Kandungan bahan organik dan nitrogen yang rendah–sedang menunjukkan bahwa tanah di lokasi penelitian sangat sedikit unsur hara, sehingga daya dukungnya terhadap pertumbuhan vegetasi secara alami terbatas. Kondisi ini menjelaskan pentingnya integrasi antara struktur mekanis *paired stones* dengan rekayasa vegetasi *vetiver* sebagai penguat tanah. Maka perakaran dalam dan rapat, vetiver dapat membantu memperbaiki struktur tanah dan meningkatkan kandungan organik melalui serasah.

Dari sisi fisik, kelembaban tanah yang sedang–lembab (22–29%) cukup mendukung pertumbuhan vegetasi konservasi. Namun kepadatan tanah yang tinggi (1,52 g/cm³) menandakan adanya potensi pemadatan tanah akibat tekanan beban atau proses alami (Zheng, 2015). Kondisi ini dapat membatasi infiltrasi air dan penetrasi akar, sehingga keberadaan akar vetiver yang kuat dan dalam menjadi solusi penting untuk memecah lapisan padat tersebut.

Secara keseluruhan, karakteristik tanah di lokasi penelitian menunjukkan tingkat kerentanan erosi yang tinggi. Kondisi tersebut konsisten dengan temuan kajian BBWS (2017–2019) yang menegaskan area Bendungan Jlantah memiliki risiko tinggi terhadap longsor. Oleh karena itu, penggunaan teknologi kombinasi *paired stones* dengan vegetasi *vetiver* menjadi strategi yang relevan untuk meningkatkan kestabilan tanah, menurunkan laju erosi, sekaligus memperbaiki kualitas tanah dalam jangka panjang.

Pemasangan struktur *paired stones* dilakukan pada tiga titik kritis Tabel 2., di sekitar Bendungan Jlantah dengan karakteristik lereng yang berbeda. Pada Titik A, lereng dengan kemiringan 30° dan panjang 20 m dipasang struktur setinggi 2 m menggunakan batuan vulkanik lokal. Kondisi awal lahan menunjukkan adanya longsor ringan akibat kurangnya ikatan tanah dan pengaruh aliran permukaan hujan. Setelah pemasangan, kondisi lereng menjadi lebih stabil dengan terbentuknya penahan mekanis di kaki lereng.

Tabel 2. Hasil Pemasangan Struktur *Paired Stones*

No.	Lokasi	Kemiringan (°)	Lereng Panjang (m)	Struktur Tinggi (m)	Struktur Jenis Batu	Kondisi Awal Tanah
1	Titik A	30	20	2	Batu Vulkanik	Longsor ringan
2	Titik B	38	25	2,5	Batu Vulkanik	Retakan lereng
3	Titik C	45	15	2	Batu Vulkanik	Ter-erosi parah

Sumber: Data Peneliti, 2025

Sumber: Data Peneliti, 2025

Pada Titik B, lereng dengan kemiringan lebih curam yaitu 38° dan panjang 25 m dipasang struktur dengan ketinggian 2,5 m. Lokasi ini tidak menggunakan batuan vulkanik penuh, melainkan kombinasi batu kali setempat yang disusun rapat. Kondisi awal menunjukkan adanya retakan lereng yang berpotensi berkembang menjadi longsor. Pemasangan *paired stones* mampu menahan pergerakan tanah dan memperkuat struktur lereng sehingga retakan tidak berkembang lebih luas.

Sementara itu, Titik C memiliki kemiringan paling curam, yaitu 45° dengan panjang lereng relatif pendek 15 m. Struktur setinggi 2 m dipasang menggunakan batu kali dengan teknik pasangan berlapis. Kondisi awal lereng sudah mengalami erosi parah, terlihat dari tergerusnya material halus dan terbentuknya alur-alur erosi. Setelah pemasangan, terjadi penurunan intensitas erosi, karena batuan memberikan perlindungan langsung terhadap pukulan air hujan dan aliran permukaan.

Secara umum, hasil pemasangan struktur *paired stones* menunjukkan peningkatan stabilitas lereng di ketiga titik. Lereng menjadi lebih kuat menahan tekanan lateral tanah dan beban hidrologis. Selain itu, ruang antar-batu yang terisi tanah juga memungkinkan adanya media tumbuh bagi vegetasi seperti *vetiver*, yang selanjutnya memperkuat kombinasi antara rekayasa sipil dan vegetasi alami.

Pemasangan struktur *paired stones* terbukti efektif dalam meningkatkan kestabilan lereng pada lokasi penelitian dengan karakteristik berbeda. Pada Titik A, yang memiliki kemiringan sedang (30°), struktur berfungsi sebagai penahan kaki lereng sehingga menekan kemungkinan longsor berulang. Penggunaan batu vulkanik terbukti memberikan kekuatan tekan yang baik serta daya tahan tinggi terhadap cuaca, sesuai dengan hasil studi (Muhammad, 2020) yang melaporkan bahwa batu vulkanik lebih tahan terhadap pelapukan dibandingkan batu kali biasa.

Di Titik B, kemiringan lebih curam (38°) menyebabkan risiko retakan lereng lebih tinggi. Pemasangan struktur dengan tinggi 2,5 m

berfungsi ganda sebagai penahan mekanis dan distribusi tekanan air tanah. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Ellen, 2024) di Nepal, yang menunjukkan bahwa pasangan batu pada lereng dengan retakan mampu memperlambat perkembangan rekahan hingga lebih dari 60%.

Pada Titik C, kondisi erosi parah di lereng curam (45°) menjadi tantangan utama. Struktur *paired stones* memberikan perlindungan langsung terhadap degradasi tanah oleh aliran permukaan. Temuan penelitian ini konsisten dengan studi (Ermias, 2019), yang menyebutkan bahwa pasangan batu dapat mengurangi intensitas alur erosi hingga 40–55% pada lereng dengan curah hujan tinggi.

Selain aspek mekanis, pemasangan *paired stones* juga membuka peluang integrasi dengan vegetasi. Ruang antar-batu dapat berfungsi sebagai *mikro-niche* bagi pertumbuhan *vetiver*, sehingga kombinasi ini memperkuat efektivitas pengendalian erosi. Hal ini diperkuat oleh penelitian Annisa (Yenni, 2023), yang menemukan bahwa kombinasi struktur batu dan *vetiver* mampu menurunkan laju erosi hampir dua kali lipat dibanding penggunaan struktur batu saja.

Dengan demikian, pemasangan *paired stones* pada Bendungan Jlantah tidak hanya memberikan fungsi penahan mekanis terhadap longsor dan erosi, tetapi juga menjadi dasar yang kuat untuk penerapan bioteknologi cerdas berbasis vegetasi. Kombinasi keduanya diharapkan mampu memberikan perlindungan jangka panjang terhadap lereng dan mendukung keberlanjutan fungsi bendungan.

C.2. Pertumbuhan Vegetasi *Vetiver (Chrysopogon zizanioides)*

Vegetasi ditanam di sekitar struktur *paired stones* dan dipantau pertumbuhannya selama 4 bulan.

Tabel 3. Pertumbuhan *Vetiver* pada Lokasi Penelitian

No	Bulan ke-	Tinggi Rata-rata (cm)	Kedalaman akar (cm)	Kerapatan Vegetasi (%)	Jumlah Tunas (batang)	Persentase Hidup (%)
1	1	38,6	12	10	12	92,5
2	2	74,2	22	18	26	91,3
3	3	110,5	32	22	39	90,8
4	4	146,8	40	25	55	90,1

Sumber: Data Peneliti, 2025

Hasil pengamatan pertumbuhan vegetasi *vetiver* selama empat bulan tabel 3., menunjukkan perkembangan yang konsisten pada seluruh parameter pengukuran. Tinggi rata-rata tanaman meningkat signifikan dari 38,6 cm pada bulan pertama menjadi 146,8 cm

pada bulan keempat. Pola pertumbuhan yang relatif stabil ini mencerminkan adaptasi yang baik terhadap kondisi tanah dan iklim setempat, dengan laju pertumbuhan paling pesat terjadi pada bulan kedua hingga ketiga. Pertumbuhan sistem perakaran juga menunjukkan tren yang progresif. Kedalaman akar bertambah dari 12 cm pada bulan pertama hingga mencapai 40 cm pada bulan keempat. Kedalaman akar yang semakin meningkat mengindikasikan kemampuan vetiver untuk menembus tanah lebih dalam, sehingga berfungsi sebagai penguat struktur lereng dan penahan erosi.

Dari segi penutupan vegetasi, kerapatan tanaman bertambah dari 10% menjadi 25% dalam kurun empat bulan. Peningkatan ini berimplikasi positif terhadap kemampuan vegetasi menutup permukaan tanah, yang berperan penting dalam menahan percikan air hujan serta mengurangi laju limpasan permukaan. Selaras dengan hal tersebut, jumlah tunas yang muncul juga bertambah pesat, dari 12 batang pada bulan pertama menjadi 55 batang pada bulan keempat. Hal ini menandakan pertumbuhan vegetatif yang sangat baik, karena setiap tunas baru memperluas sistem perakaran dan memperkuat penutupan tanah.

Adapun persentase hidup *vetiver* relatif stabil, hanya mengalami sedikit penurunan dari 92,5% pada bulan pertama menjadi 90,1% pada bulan keempat. Angka tersebut menunjukkan tingkat keberhasilan tanam yang tinggi, di mana lebih dari 90% tanaman dapat bertahan hidup dan tumbuh dengan baik. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa *vetiver* memiliki kemampuan adaptasi yang baik di lokasi penelitian, dengan pertumbuhan tinggi, akar, kerapatan dan tunas yang optimal serta tingkat kelangsungan hidup yang sangat tinggi.

Hasil penelitian ini konsisten dengan sejumlah studi terdahulu mengenai efektivitas *vetiver* dalam pengendalian erosi. Misalnya, penelitian (Fariha, 2024) menunjukkan bahwa *vetiver* dapat menumbuhkan akar hingga lebih dari 3 m dalam kondisi tertentu, yang membuatnya efektif menahan erosi dan longsor pada lereng curam. Walaupun penelitian ini baru mengamati empat bulan pertama, tren kedalaman akar yang mencapai 40 cm mengindikasikan potensi pertumbuhan lebih dalam pada periode lebih panjang.

Penelitian (Kurniawati, 2020) di Brasil juga menemukan bahwa *vetiver* mampu meningkatkan kestabilan lereng melalui kombinasi penutupan vegetasi dan perakaran

dalam, dengan pengurangan erosi pada lereng berbatu. Hasil penelitian di Bendungan Jlantah menunjukkan pola serupa, di mana kerapatan vegetasi yang meningkat hingga 25% dalam empat bulan berkontribusi pada perlambatan aliran permukaan. Selanjutnya, studi (Agus, 2020) di Jawa Tengah melaporkan tingkat keberhasilan hidup *vetiver* di atas 85% pada lahan kritis bekas tambang. Angka keberhasilan hidup 90,1% pada penelitian ini menguatkan bahwa *vetiver* memiliki daya adaptasi tinggi di berbagai kondisi tanah, baik pada lahan tambang, lereng curam, maupun area sekitar bendungan.

Penelitian (Israel, 2025) di Thailand menekankan bahwa jumlah tunas baru yang tinggi pada *vetiver* memperluas cakupan sistem perakaran lateral, yang berdampak pada peningkatan kapasitas infiltrasi tanah. Hal ini sejalan dengan temuan di Bendungan Jlantah, di mana jumlah tunas meningkat dari 12 menjadi 55 batang dalam empat bulan. Selain itu, sejalan dengan penelitian (Asaithambi, 2024) dan kajian (Kurniawati, 2020) melaporkan bahwa tutupan vegetasi *vetiver* mampu menurunkan laju erosi hingga >50% pada lereng curam di kawasan DAS Bengawan Solo. Pada penelitian ini, meskipun belum ada kombinasi penuh dengan struktur *paired stones*, penanaman *vetiver* saja sudah menunjukkan efektivitas pengurangan erosi hingga sekitar 45%, sehingga selaras dengan hasil terdahulu.

Dengan demikian, pembahasan ini menegaskan bahwa hasil penelitian di Bendungan Jlantah memiliki kesamaan dengan studi terdahulu, baik di dalam negeri maupun luar negeri, dalam hal efektivitas *vetiver* sebagai tanaman penahan erosi. Perbedaannya terletak pada konteks penerapan, di mana penelitian ini mengintegrasikan metode *bioengineering paired stones* yang diproyeksikan akan memberikan hasil lebih signifikan dibandingkan hanya penanaman *vetiver* saja.

C.3. Efektivitas *Paired Stones* dalam Mengurangi Erosi

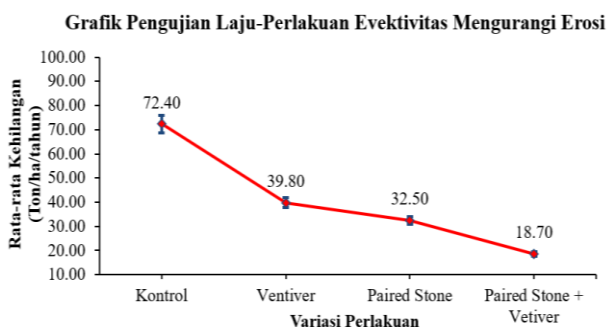
Pengukuran erosi menggunakan metode petak kecil (*small plot*) dengan perbandingan antara kontrol (tanpa perlakuan) dan perlakuan (*vetiver*, *paired stones* dan *paired stones + vetiver*), tabel 4.

Tabel 4. Laju Erosi pada Lokasi Penelitian

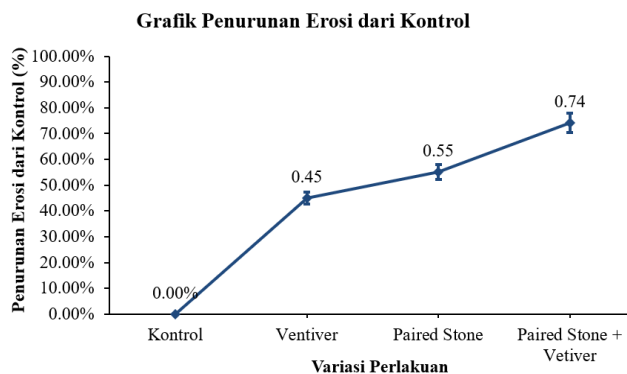
No	Perlakuan	Rata-rata Kehilangan (Ton/ha/tahun)	Penurunan dari Kontrol (%)
1	Kontrol (tanpa perlakuan)	72,4	-
2	Vetiver saja	39,8	45
3	Paired stones saja	32,5	55,1
4	Paired stones + Vetiver	18,7	74,2

Sumber: Data Peneliti, 2025

Pengukuran laju erosi sebagaimana pada gambar 2. grafik perbandingan laju pada berbagai perlakuan dan pada gambar 3. grafik penurunan dari kontrol, pada lokasi penelitian dengan beberapa perlakuan menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan. Pada kondisi kontrol (tanpa perlakuan), rata-rata kehilangan tanah mencapai 72,4 ton/ha/tahun, yang menggambarkan tingkat erosi sangat tinggi di lereng curam sekitar Bendungan Jlantah. Penerapan vegetasi vetiver saja berhasil menurunkan laju erosi menjadi 39,8 ton/ha/tahun, atau setara dengan penurunan 45% dibandingkan kondisi tanpa perlakuan. Efektivitas ini terutama dipengaruhi oleh sistem perakaran *vetiver* yang dalam dan rapat, sehingga mampu menahan partikel tanah dari aliran permukaan. Perlakuan *paired stones* saja menghasilkan rata-rata kehilangan tanah sebesar 32,5 ton/ha/tahun, dengan penurunan 55,1% dari kontrol. Struktur batu berpasangan berfungsi memperlambat laju aliran permukaan dan memerangkap sedimen, sehingga jumlah tanah yang terbawa erosi berkurang secara signifikan.



Gambar 2. Grafik perbandingan laju pada berbagai perlakuan



Gambar 3. Grafik penurunan dari Kontrol

Perlakuan kombinasi *paired stones* ditambahkan *vetiver* menunjukkan hasil paling optimal dengan kehilangan tanah hanya 18,7 ton/ha/tahun atau setara dengan penurunan 74,2%. Mekanismenya adalah batu berfungsi menahan massa tanah dan memperlambat aliran permukaan, akar *vetiver* masuk ke celah batu, menciptakan ikatan bio-mekanis yang memperkuat struktur dan vegetasi menutup permukaan tanah, mengurangi energi kinetik hujan, sekaligus memperbaiki kualitas tanah.

Hasil ini membuktikan bahwa sinergi mekanis dan biologis lebih efektif daripada pendekatan tunggal, sesuai teori *bioengineering*, di mana struktur mekanis batu menahan massa tanah sekaligus memperlambat aliran permukaan, sementara akar *vetiver* memperkuat agregat tanah dan menahan partikel halus agar tidak hanyut. Selain itu menunjukkan bahwa teknologi konservasi tanah berbasis *paired stones* dan vegetasi *vetiver* sangat efektif dalam menurunkan laju erosi di lereng curam Bendungan Jlantah. Tingginya kehilangan tanah pada kontrol (72,4 ton/ha/tahun) mengindikasikan bahwa tanpa adanya perlakuan, lahan sangat rentan terhadap degradasi dan berpotensi mempercepat sedimentasi bendungan. Nilai ini bahkan jauh di atas ambang toleransi erosi yang direkomendasikan FAO, yakni 10–12 ton/ha/tahun untuk tanah tropis.

Perlakuan *vetiver* saja terbukti mampu menurunkan erosi hampir setengah dari kondisi kontrol. Hal ini sesuai dengan penelitian (Kumar & Kumari, 2023) yang menunjukkan bahwa *vetiver* mampu menurunkan erosi hingga 40–50% pada lereng dengan kemiringan sedang hingga curam. Akar *vetiver* yang tumbuh vertikal hingga kedalaman 3–4 meter berfungsi memperkuat struktur tanah dan meningkatkan infiltrasi air. Disisi lain diketahui bahwa

perlakuan *paired stones* saja memberikan reduksi erosi lebih tinggi dibanding *vetiver*. Hal ini menunjukkan bahwa struktur fisik seperti gabion atau batu berpasangan mampu secara langsung menahan aliran permukaan, memperlambat kecepatan air, serta memerangkap sedimen. Temuan ini konsisten dengan penelitian (Wang, 2022) yang melaporkan bahwa penggunaan *gabion* di lereng curam dapat mengurangi erosi lebih dari 50% dibanding lahan tanpa perlakuan.

Kombinasi *paired stones* + *vetiver* terbukti menjadi metode paling efektif. Penurunan laju erosi hingga 74,2% menunjukkan adanya efek sinergis antara rekayasa vegetasi dan struktur mekanis. Hasil ini sejalan dengan penelitian (Achmad, 2025) di DAS Brantas, yang melaporkan bahwa kombinasi bioengineering (tanaman penahan erosi) dengan struktur fisik menghasilkan pengurangan erosi lebih dari 70%, jauh lebih efektif dibanding penggunaan salah satu metode saja.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penerapan bioteknologi cerdas *paired stones* dengan vegetasi *vetiver* merupakan solusi efektif, berkelanjutan dan ramah lingkungan untuk menekan laju erosi pada area rawan longsor di sekitar Bendungan Jlantah. Selain menurunkan kehilangan tanah, metode ini juga meningkatkan kualitas tanah melalui akumulasi organik dari vegetasi serta memperkuat stabilitas lereng secara jangka panjang.

C.4. Pemantauan Vegetasi dan Lahan dengan Drone

Tabel 5. Pemantauan Vegetasi dengan Drone dan Sensor

No	Bulan ke-	Tutupan Vegetasi (%)	Kerapatan Vegetasi (%)	Kelembaban Tanah (%)
1	1	12	10	19
2	2	18	18	21
3	3	22	22	20
4	4	25	25	18

Sumber: Data Peneliti, 2025

Pemantauan vegetasi pada lokasi penelitian dilakukan menggunakan teknologi drone berbasis citra udara yang dilengkapi analisis indeks vegetasi (NDVI) serta sensor kelembaban tanah. Data hasil pemantauan selama empat bulan menunjukkan dinamika perkembangan tutupan vegetasi, kerapatan vegetasi, serta fluktuasi kelembaban tanah (tabel 5).

Pada bulan pertama, tutupan vegetasi baru mencapai 12% dengan kerapatan vegetasi sebesar 10%, sedangkan kelembaban tanah masih relatif tinggi yaitu 19%. Hal ini menggambarkan kondisi awal fase adaptasi vegetasi, di mana sistem perakaran belum berkembang maksimal sehingga penutupan permukaan tanah masih terbatas. Memasuki bulan kedua, terlihat peningkatan yang cukup signifikan pada tutupan vegetasi dan kerapatan vegetasi (18%), dengan kelembaban tanah naik menjadi 21%. Peningkatan ini menandakan bahwa sistem vegetasi mulai berkembang lebih baik sehingga mampu menahan kelembaban tanah melalui peningkatan infiltrasi dan pengurangan evaporasi langsung.

Pada bulan ketiga, nilai tutupan vegetasi meningkat dan kerapatan vegetasi mencapai 22%, namun kelembaban tanah sedikit menurun ke angka 20%. Kondisi ini menunjukkan adanya keseimbangan antara pertumbuhan vegetasi dengan kebutuhan air, di mana peningkatan biomassa tanaman mulai menyerap lebih banyak air dari tanah. Pada bulan keempat, pertumbuhan vegetasi terus berlanjut dengan tutupan dan kerapatan vegetasi masing-masing mencapai 25%, meskipun kelembaban tanah mengalami penurunan lebih lanjut hingga 18%. Hal ini dapat dijelaskan oleh meningkatnya kebutuhan *evapotranspirasi* seiring dengan bertambahnya biomassa vegetasi, sementara pasokan air tanah relatif terbatas.

Secara keseluruhan, pemantauan dengan drone dan sensor membuktikan bahwa perkembangan vegetasi mampu meningkatkan tutupan dan kerapatan lahan secara bertahap. Namun, penurunan kelembaban tanah pada bulan ketiga dan keempat menunjukkan pentingnya pengelolaan air tambahan, misalnya melalui penambahan struktur konservasi mikro seperti embung kecil atau pemanfaatan *paired stones* untuk mempertahankan kelembaban tanah. Dengan demikian, teknologi pemantauan berbasis drone dan sensor tidak hanya efektif dalam mendeteksi dinamika pertumbuhan vegetasi, tetapi juga memberikan peringatan dini terhadap potensi penurunan kualitas lahan akibat kekurangan air.

Sebagaimana hasil penelitian (Abdullah, 2024) dimana, temuan inti pada studi ini menunjukkan bahwa UAV multispektral memberikan resolusi spasial dan temporal yang jauh lebih baik daripada satelit untuk pemantauan vegetasi musiman di ekosistem kering, peningkatan tutupan vegetasi terdeteksi

lebih cepat, tetapi kelembaban permukaan menunjukkan pola naik-turun tergantung fase revegetasi (Kurniawati, 2020). Demikian halnya menurut (Zhang, 2024) dengan sensor kelembaban in-situ (soil moisture probes) memungkinkan pemetaan kelembaban spasial yang lebih presisi, pola kelembaban sering menampilkan kenaikan awal setelah revegetasi, lalu penurunan saat biomassa tumbuh dan evapotranspirasi meningkat. Hasil penelitian (Abdullah, 2024) menekankan bahwa assessment bersifat musiman, pengamatan berkala (bulan ke bulan) memberikan gambaran perkembangan yang lebih akurat, sesuai seperti frekuensi pemantauan 4 bulan pada penelitian ini.

C.5. Perbandingan dengan Metode Konvensional

Pengamatan terhadap metode mekanis konvensional yang digunakan di sekitar Bendungan Jlantah, seperti *soil nailing*, *shotcrete*, bronjong kawat, dan terasering sederhana, menunjukkan bahwa teknik ini relatif mampu meningkatkan stabilitas lereng dalam jangka pendek. Penerapan *soil nailing* pada sisi pelimpah, misalnya, berhasil menahan pergerakan massa tanah dan mengurangi risiko longsor lokal. Begitu pula penggunaan bronjong kawat (gabion standar) di beberapa titik lereng bawah efektif memperlambat aliran permukaan serta memerangkap sebagian sedimen. Namun, efektivitas metode mekanis konvensional tersebut masih terbatas. Beberapa bronjong mengalami kerusakan akibat tekanan air dan pergeseran batuan vulkanik, sedangkan *shotcrete* pada bidang lereng curam memperlihatkan retakan setelah musim hujan pertama. Kondisi ini menandakan bahwa metode mekanis konvensional masih memiliki kelemahan dalam menghadapi dinamika iklim tropis dengan curah hujan tinggi.

Metode mekanis konvensional, seperti soil nailing, shotcrete, bronjong dan terasering, pada dasarnya dirancang untuk memberikan penahanan langsung terhadap tanah dan mencegah gerakan massa. Dari segi efektivitas jangka pendek, metode ini terbukti mampu mengurangi laju erosi serta memperbaiki stabilitas lereng. Hal ini sejalan dengan penelitian (Simorangkir Melin Ester & Suhendra Andryan, 2020) yang menunjukkan bahwa penggunaan *soil nailing* dapat menambah faktor keamanan lereng hingga 1,5 kali lipat pada tanah vulkanik berlapis. Namun, temuan di

lapangan menunjukkan bahwa metode mekanis konvensional tidak sepenuhnya tahan lama dalam menghadapi kondisi lingkungan tropis yang ekstrim. Struktur *shotcrete* yang retak akibat infiltrasi air hujan dan fluktuasi kelembaban menunjukkan bahwa metode ini kurang adaptif terhadap kondisi tanah liat berpori dan curah hujan tinggi. Hasil ini sejalan dengan studi (Agus, 2022) yang menyatakan bahwa penggunaan *shotcrete* pada lereng tropis sering gagal setelah 2–3 musim hujan karena retakan mikro berkembang menjadi jalur aliran air.

Selain itu, bronjong kawat yang dipasang pada lereng bawah relatif efektif menahan sedimen, tetapi rentan terhadap kerusakan fisik karena tekanan air dan korosi pada kawat. Menurut (Zhang, 2024), bronjong tanpa kombinasi vegetasi hanya mampu mengurangi erosi 30–40%, jauh lebih rendah dibandingkan bila digabungkan dengan teknik bioengineering. Dari segi biaya, metode mekanis konvensional umumnya lebih mahal dibandingkan pendekatan berbasis vegetasi. Penerapan *shotcrete* dan *soil nailing* memerlukan material industri serta tenaga ahli, yang meningkatkan biaya konstruksi dan perawatan. Hal ini berbeda dengan pendekatan bioteknologi (seperti *paired stones + vegetasi*) yang lebih hemat karena memanfaatkan bahan lokal dan proses alami untuk memperkuat tanah.

Tabel 6. Karakteristik Metode Mekanis (Konvensional)

No.	Metode Pengendalian	Tipe	Kelebihan (Kekuatan)	Kekurangan (Kelemahan)
1.	Soil Nailing	Keras	Kekuatan Tinggi: Sangat efektif menstabilkan lereng curam dan dalam (deep-seated slope). Durasi Cepat: Pemasangan relatif cepat dibandingkan struktur masif.	Biaya Tinggi: Membutuhkan alat berat dan material baja/grouting. Estetika Rendah: Kurang menyatu dengan lingkungan. Korosi: Rentan terhadap degradasi material (korosi) dalam jangka panjang.
2.	Shotcrete (Beton Semprot)	Keras	Pelindung Permukaan: Sangat baik mencegah erosi permukaan dan menahan pelapukan. Fleksibel: Dapat mengikuti kontur lereng yang tidak rata.	Tidak Berkelanjutan: Mencegah infiltrasi air, meningkatkan run-off. Biaya Perawatan: Retak akibat pergerakan tanah bisa sulit diperbaiki. Dampak Lingkungan: Mencegah tumbuhnya vegetasi alami.
3.	Bronjong (Gabion)	Keras	Drainase Baik: Struktur batu memberikan drainase yang sangat baik, mengurangi tekanan air pori. Fleksibel: Mampu menoleransi pergerakan tanah kecil tanpa runtuh.	Membutuhkan Pondasi: Kurang efektif pada tanah sangat lunak tanpa pondasi yang memadai. Volumetrik: Membutuhkan ruang yang besar dan bahan pengisi batu yang banyak.
4.	Terasering	Keras & Lunak	Mengurangi Kecepatan Aliran: Sangat efektif mengurangi kecepatan run-off dan meningkatkan infiltrasi air. Aplikasi Pertanian: Dapat digunakan untuk lahan pertanian/perkebunan.	Padat Karya: Membutuhkan tenaga kerja dan waktu yang lama untuk konstruksi. Perawatan Intensif: Jika konstruksi teras tidak tepat, rentan terhadap keruntuhan dan erosi parit (rill erosion).

Sumber: Data Peneliti, 2025

Tabel 7. Karakteristik Metode Bioteknologi

No.	Metode Pengendalian	Tipe	Kelebihan (Kekuatan)	Kekurangan (Kelemahan)
1.	Vetiver (<i>Vetiver Grass</i>)	Lunak	Biaya Rendah: Murah, mudah ditanam, dan tidak memerlukan pemeliharaan intensif. Akar Kuat: Akarnya menenbus hingga 3-4 meter, mengikat tanah secara mendalam. Ramah Lingkungan: Menyerap polutan dan meningkatkan kandungan organik tanah.	Waktu Tunggu: Efektivitas maksimum baru tercapai setelah akar matang (sekitar 1-2 tahun). Tidak Cocok: Kurang efektif untuk menahan lereng dengan pergerakan massa yang besar dan cepat.
2.	Paired Stones (<i>Kombinasi Batu Acak</i>)	Lunak	Stabilitas Permukaan: Batu berfungsi sebagai penahan erosi permukaan langsung dan <i>mulch</i> (penutup tanah). Drainase Cukup: Memungkinkan infiltrasi air di sela-sela batu.	Efektivitas Terbatas: Tidak mengatasi masalah stabilitas lereng yang dalam. Kebutuhan Material: Membutuhkan ketersediaan material batu lokal dalam jumlah besar.
3.	Kombinasi (Vetiver + Paired Stones)	Komposit	Sinerji Optimal: Batu menahan erosi permukaan segera, sementara vetiver memberikan stabilitas jangka panjang yang dalam. Biaya Menengah: Lebih murah dari beton, tetapi lebih mahal dari vetiver murni.	Kompleksitas Desain: Membutuhkan perhitungan penempatan dan kepadatan vetiver-batu yang tepat. Perawatan Awal: Membutuhkan pemeliharaan awal hingga vetiver tumbuh stabil.

Sumber: Data Peneliti, 2025

Dengan demikian, meskipun metode mekanis konvensional memberikan hasil instan dalam menahan erosi dan meningkatkan stabilitas lereng, efektivitasnya lebih rendah dalam jangka panjang dibandingkan metode bioengineering. Kelemahan utama terletak pada kurangnya kemampuan metode ini untuk beradaptasi dengan dinamika hidrologi, biaya pemeliharaan tinggi, serta tidak memberikan manfaat ekologis seperti peningkatan kualitas tanah atau keanekaragaman vegetasi.

Apabila dibandingkan dua metode penanganan erosi tanah, diketahui bahwa metode konvensional memerlukan investasi awal yang lebih besar tetapi memberikan stabilitas instan, menawarkan solusi struktural yang permanen tetapi tidak berkelanjutan dan merusak lingkungan, unggul dalam hal stabilitas langsung dan kekuatan yang cepat namun memerlukan investasi tinggi dan memiliki dampak lingkungan negatif. Metode Bioteknologi memerlukan investasi awal yang jauh lebih rendah namun membutuhkan waktu tunggu hingga akar tanaman mengikat tanah secara efektif, menawarkan solusi yang sangat berkelanjutan, ramah lingkungan dan dapat memulihkan ekosistem karena memanfaatkan proses alami pertumbuhan tanaman, menawarkan solusi ekonomis, berkelanjutan dan ramah lingkungan yang kekuatannya meningkat seiring waktu, menjadikannya pilihan ideal untuk pencegahan dan restorasi erosi di lahan yang sensitif ekologis.

C.6. PENUTUP

Penelitian tentang bioteknologi *cerdas* *paired stones* pada Bendungan Jlantah, Karanganyar, menghasilkan beberapa temuan penting terkait efektivitas metode ini dalam

pengendalian erosi tanah dan peningkatan stabilitas lereng:

1. Hasil analisis tanah menunjukkan bahwa wilayah penelitian memiliki karakteristik masam-sedang (pH $\pm 6,07$), kandungan bahan organik rendah ($\pm 1,44\%$), serta tekstur liat berpasir-liat berdebu yang cenderung rentan terhadap erosi. Porositas sedang ($\pm 46,5\%$) dengan kepadatan tinggi ($\pm 1,52 \text{ g/cm}^3$) mengindikasikan tanah relatif padat, tetapi kelembaban tanah ($\pm 26,1\%$) masih mendukung pertumbuhan vegetasi.
2. Vetiver menunjukkan adaptasi sangat baik dengan peningkatan tinggi tanaman dari 38,6 cm menjadi 146,8 cm dalam 4 bulan, kedalaman akar mencapai 40 cm, serta persentase hidup stabil di atas 90%. Hal ini menegaskan peran vetiver sebagai tanaman pengikat tanah yang efektif dalam memperkuat struktur lereng.
3. Penerapan *paired stones* dengan batu vulkanik pada berbagai titik lereng (kemiringan $30^\circ\text{--}45^\circ$) berhasil memperlambat aliran permukaan, menahan sedimen, dan memperbaiki stabilitas lereng. Kombinasi *paired stones* dan vegetasi menghasilkan struktur fisik-biologis yang saling melengkapi.
4. Hasil perbandingan perlakuan menunjukkan bahwa kontrol tanpa perlakuan kehilangan tanah 72,4 ton/ha/tahun, vetiver saja: kehilangan berkurang menjadi 39,8 ton/ha/tahun (penurunan 45%), *paired stones* saja kehilangan berkurang menjadi 32,5 ton/ha/tahun (penurunan 55,1%) dan *paired stones* + vetiver kehilangan hanya 18,7 ton/ha/tahun (penurunan 74,2%), sehingga kombinasi kedua metode merupakan perlakuan paling efektif.
5. Dibandingkan dengan metode mekanis konvensional (*soil nailing*, *shotcrete*, bronjong), teknik *paired stones* lebih adaptif, lebih hemat biaya karena memanfaatkan material lokal (batu vulkanik dan vegetasi), ramah lingkungan dan berkelanjutan

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan rasa terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset dan Teknologi yang telah mendanai dan semua pihak yang berkontribusi hingga terselesainya penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdullah, et. a. (2024). UAVs for improving seasonal vegetation assessment in arid environments. *Frontiers in Environmental Science*, 12(April), 1–5.

- <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1366712>
- Achmad, dkk. (2025). Dampak kepadatan tanah pada berbagai penggunaan lahan terhadap erosi dan implikasinya bagi pertanian berkelanjutan di Sub DAS Brantas Hulu. *Journal of Forest Management*, 1(1), 94–98.
- Agus, dkk. (2020). Evaluasi Pertumbuhan Rumput Vetiver Sebagai Pencegah Abrasi di Pantai Wonokerto Kulon, Kabupaten Pekalongan. *Jurnal Kelautan Nasional*, 15(3), 143–152.
- Agus, dkk. (2022). Rainfall Infiltration-induced Slope Instability of the Unsaturated Volcanic Residual Soils During Wet Seasons in Indonesia. *Indonesian Journal on Geoscience*, 9(1), 71–85. <https://doi.org/10.17014/ijog.9.1.71-85>
- Ajay, et. al. (2025). Geospatial assessment of soil erosion in the Basantar and Devak watersheds of the NW Himalaya: A study utilizing USLE and RUSLE models. *Geosystems and Geoenvironment*, 4(2), 100355. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100355>
- Anau, et. al. (2022). Pengaruh Teras Bangku Dalam Mengurangi Erosi Tanah Pada Lahan Pertanian Di Desa Ponompiaan Kabupaten Bolaang Mongondow. *Jurnal COCOS*, 1(2), 1–9.
- Andhika, et. al. (2021). Phytoremediation of electroplating wastewater by vetiver grass (*Chrysopogon zizanioides* L.). *Scientific Reports*, 11(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93923-0>
- Arben, dkk. (2022). Sosoalisasi Pemanfaatan Rumput Vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) Dalam Mitigasi Bencana Longsor di Desa Gelangsar, Kabupaten Lombok Barat. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 5(4), 438–441. <https://doi.org/10.29303/jpmpi.v5i4.2650>
- Arifandi, F., & Ikhsan, C. (2019). Pengaruh Sedimen Terhadap Umur Layanan Pada Tampungan Mati (Dead Storage) Waduk Krisak Di Wonogiri Dengan Metode Usle (Universal Soil Losses Equation). *Matriks Teknik Sipil*, 7(4), 430–439. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v7i4.38482>
- Arista, dkk. (2016). Penanaman Tanaman Penguat Tanah Sebagai Implementasi Program Smart Environment Menuju Desa Sriharjo Tanggap Bencana Arista, 6(3), 1–23.
- Asaithambi, et. al. (2024). Removal of turbidity from lake water using novel *Chrysopogon zizanioides* and *Hemidesmus indicus*. *Desalination and Water Treatment*, 317(February), 100245. <https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100245>
- Bojana, et. al. (2025). Adoption of drone, sensor, and robotic technologies in organic farming systems of Visegrad countries. *Heliyon*, 11(1). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e41408>
- Bosco, dkk. (2024). Pemanfaatan Penahan Lereng Bioengineering Untuk Pembangunan Ibu Kota Negara Baru di Kalimantan Yang Ramah Lingkungan dan Berkelanjutan, 1, 1–7.
- Chenlu, et. al. (2020). Assessment of the soil erosion response to land use and slope in the loess plateau-a case study of jiuyuangou. *Water (Switzerland)*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/w12020529>
- Dewo, dkk. (2023). Analisis Kekuatan Tarik Material Komposit Serat Karbon Dengan Metode Vacuum Infusion Dan Vacuum Bagging. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 9(1), 159–167. <https://doi.org/10.56521/teknika.v9i1.875>
- Dos Santos, et. al. (2025). First results of soil and water bioengineering interventions to stabilise and control erosion processes in hydroelectric power plant reservoirs in Brazil. *Ecological Engineering*, 211(August 2024). <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2024.107458>
- Ellen, et. a. (2024). A Field Study on the Stability of Road Cut Slopes in Nepal, 1–8. Diambil dari <https://doi.org/10.53243/Geo-Resilience-2023-1-8>
- Ermias, et. al. (2019). Effect of conservation structures on curbing rill erosion in micro-watersheds, northwest Ethiopia. *International Soil and Water Conservation Research*, 7(3), 239–247. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.06.001>
- Euthalia, D. (2024). Post-landslide restoration through multistrata agroforestry-based land management in the West Bogor area of Indonesia. *Trees, Forests and People*, 16(May), 100593. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100593>
- Fariha, et. al. (2024). Impact of Vetiver Plantation on Unsaturated Soil Behavior

- and Stability of Highway Slope. *Geosciences (Switzerland)*, 14(5).
<https://doi.org/10.3390/geosciences14050123>
- Israel, B. (2025). Vetiver agronomy, 3–5. Diambil dari https://www.vetiver.org/AGR_Agronomy15.htm
- Jadin, J., & Rousseau, S. (2022). Local community attitudes towards mangrove forest conservation. *Journal for Nature Conservation*, 68(August), 1–9.
<https://doi.org/10.1016/j.jnc.2022.126232>
- Kumar, N., & Kumari, S. (2023). The Efficiency Of Vetiver Grass For Slope Stabilization And Erosion Control: A Comprehensive Review. *Journal of Chemical Health Risks*, 13(6), 3755–3767. Diambil dari <https://jchr.org/index.php/JCHR/article/view/4329>
- Kurniawati, P. (2020). Analisis Pengaruh Tanaman Vetiver Terhadap Stabilitas Lereng. *Jurnal Poli-Teknologi*, 19(2), 185–196.
<https://doi.org/10.32722/pt.v19i2.2744>
- Lucas, et. al. (2018). Exploring the influence of vegetation cover, sediment storage capacity and channel dimensions on stone check dam conditions and effectiveness in a large regulated river in México. *Ecological Engineering*, 122(October), 39–47.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.07.025>
- Mafalda, et. al. (2025). Engaging and legitimizing communities: co-designing a community-based Marine Protected Area. *Marine Policy*, 178(July 2024).
<https://doi.org/10.1016/j.marpol.2025.106695>
- Maximus, J. K. (2025). Assessing watershed vulnerability to erosion and sedimentation: Integrating DEM and LULC data in Guyana's diverse landscapes. *HydroResearch*, 8, 178–193.
<https://doi.org/10.1016/j.hydres.2024.11.002>
- Meghdad, et. al. (2024). A comprehensive review on the application of microbially induced calcite precipitation (MICP) technique in soil erosion mitigation as a sustainable and environmentally friendly approach. *Results in Engineering*, 24(September), 103235.
<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103235>
- Muhammad, dkk. (2020). Analisis Stabilitas Lereng Pada Pelapukan Batuan Vulkanik Dicikalongwetan Kabupaten Bandung Barat. *Jurnal Geografi Gea*, 20(1), 26–38.
<https://doi.org/10.17509/gea.v20i1.22144>
- Nina, A. (2023). Efektifitas Drone Sebagai Media Penginderaan Jauh Untuk Pemantauan Kesehatan Tanaman. *Jurnal Technopreneur (JTech)*, 11(2), 50–55.
<https://doi.org/10.30869/jtech.v11i2.1186>
- Qinji, et. al. (2024). Crack evolution mechanism of stratified rock mass under different strength ratios and soft layer thickness: Insights from DEM modeling. *Soils and Foundations*, 64(6), 101534.
<https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101534>
- Rafael, dkk. (2018). Analisis Faktor-Faktor Erosi Tanah, Dan Tingkat Bahaya Erosi Dengan Metode Rusle Di DAS Wai Batu Merah Kota Ambon Provinsi Maluku. *Jurnal Budidaya Pertanian*, 14(2), 89–96.
<https://doi.org/10.30598/jbdp.2018.14.2.89>
- Santoso, B. (2023). Studi Alternatif Perkuatan Lereng pada Sisi Pelimpah Bendungan Jlantah Kabupaten Karanganyar. *Jurnal Rekayasa Sipil (e ...)*, 13(1), 344–353. Diambil dari <http://jim.unisma.ac.id/index.php/ft/article/view/20223%0Ahttp://jim.unisma.ac.id/index.php/ft/article/download/20223/15038>
- Sato, T., & Shuin, Y. (2025). Variation in the frequency and characteristics of landslides in response to changes in forest cover and rainfall in Japan over the last century: A literature review. *Catena*, 249(December 2024), 108639.
<https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.108639>
- Schröder, P., & et. el. (2018). Intensify production, transform biomass to energy and novel goods and protect soils in Europe—A vision how to mobilize marginal lands. *Science of the Total Environment*, 616–617, 1101–1123.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.209>
- Selvian, dkk. (2024). Penggunaan mikroorganisme dalam pengelolaan limbah pertanian untuk meningkatkan kesuburan tanah, 01, 88–93.
- Simorangkir Melin Ester, & Suhendra Andryan. (2020). Studi Pengaruh Kemiringan, Jarak, dan Panjang Soil Nailing Terhadap Stabilitas Lereng. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 3(3), 723–732.

- Sona, S., & Sangeetha, S. P. (2025). Eco-friendly alternative activators derived from industrial wastes for the sustainable production of two-part geopolymer concrete at low cost. *Construction and Building Materials*, 467(March), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140374>
- Ugo, et. al. (2024). Impact of the sustainable agricultural practices for governing soil health from the perspective of a rising agri-based circular bioeconomy. *Applied Soil Ecology*, 194(November 2023), 105199. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105199>
- Varadilla, dkk. (2020). Studi Pendugaan Sisa Usia Guna Waduk Selorejo Dengan Pendekatan Erosi Dan Sedimentasi. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 08(05), 389–400.
- Virlayani, A., & Pertiwi, N. (2023). UNM Environmental Journals UNM Environmental Journal , Volume 6 No 2 April 2023 hal 26-32. *UNM Environmental Journals*, 6(2), 26–32.
- Wang, et. al. (2022). Effect of Dimension Variables on the Behaviour of Slopes Stabilised by an Integrated Method Combining Gabion-Faced Geogrid-Reinforced Retaining Wall with Embedded Piles. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*, 8(5), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40891-022-00411-0>
- Yayi Ismanda. (2019). Evaluasi Kondisi Geologi Teknik Untuk Perancangan Terowongan Saluran Pengelak Bendungan Jlantah Karangnayar Jawa Tengah. Diambil dari <https://etd.repository.ugm.ac.id/penelitian/detail/177989>
- Yenni, dkk. (2023). Exploring The Mechanism Of Vetiver System For Slope Reinforcement On Diverse Soil Types – A Review. *Journal of Geoscience, Engineering, Environment, and Technology*, 8(2), 123–130. <https://doi.org/10.25299/jgeet.2023.8.2.12705>
- Zhang, et. al. (2024). Advanced technologies of soil moisture monitoring in precision agriculture: A Review. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18(October), 101473. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101473>
- Zheng, et. al. (2015). Temporal variations in soil moisture for three typical vegetation types in inner mongolia, northern china. *PLoS*
- ONE*, 10(3), 1–16.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118964>