

Efektifitas Penerapan Bio Engineering Untuk Pengendalian Erosi Di Sungai Cimanuk-Cisanggarung

Belicka Yan Oktaria^{1*}, Atie Tri Juniati², I Nyoman Teguh Prasadha³

^{1,2,3}Magister Rekayasa Infrastruktur dan Lingkungan, Fakultas Teknik Universitas Pancasila. Jakarta

Abstrak. Restorasi sungai merupakan upaya untuk mengembalikan kondisi sungai yang terdegradasi agar mendukung ekosistem yang berkelanjutan. Salah satu metode yang efektif dalam restorasi sungai adalah bioengineering, yang mengintegrasikan teknik biologis dan ekologis untuk mengatasi masalah seperti erosi, longsor, dan degradasi habitat. Penelitian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengevaluasi efektivitas bioengineering dalam stabilisasi lereng, pengurangan erosi tebing, dan pemulihan ekosistem sungai. Hasil kajian menunjukkan bahwa bioengineering, melalui teknik seperti penanaman vegetasi riparian dan pembangunan struktur berbasis tanaman hidup, mampu meningkatkan stabilitas lereng, kualitas air, dan keanekaragaman hayati. Selain itu, bioengineering juga mendukung mitigasi perubahan iklim dengan meningkatkan layanan ekosistem, seperti penyimpanan karbon. Namun, keberhasilannya dipengaruhi oleh kondisi lokasi, pilihan vegetasi, dan intervensi manusia. Studi ini merekomendasikan pendekatan kolaboratif, penggunaan teknologi analitis seperti Life Cycle Assessment (LCA), serta penegakan hukum untuk mengatasi aktivitas ilegal seperti penambangan pasir. Dengan penerapan yang terarah, bioengineering dapat menjadi solusi strategis dalam restorasi sungai yang berkelanjutan.

Kata kunci—*bio engineering; erosi; restorasi; sungai longsor; vegetasi*

1. PENDAHULUAN

Restorasi sungai adalah kegiatan untuk mengembalikan kondisi sungai seperti semula. Restorasi sungai merupakan salah satu dari SDGs, yaitu target 6.6, Ekosistem Perairan. Target SDGs 6.6 adalah melestarikan dan memulihkan ekosistem yang berhubungan dengan air seperti gunung, hutan, vegetasi lahan basah, sungai, waduk, dan danau [1].

Restorasi sungai adalah kegiatan untuk mengembalikan kondisi sungai seperti semula dan salah satu bidang paling penting dalam ilmu sumber daya air terapan. Dari fokus awal pada peningkatan habitat ikan atau penampilan sungai, terutama melalui modifikasi struktural bentuk saluran, restorasi telah berkembang mencakup berbagai kegiatan pengelolaan yang dirancang untuk meningkatkan proses dan bentuk sungai. Restorasi dilakukan pada sungai hulu, sungai dataran rendah besar, dan seluruh jaringan sungai di lingkungan perkotaan, pertanian, dan lingkungan yang kurang intensif diubah oleh manusia [2]. Menurut [3], Restorasi sungai dapat didefinisikan tindakan yang dilakukan pada sungai dan daerah alirannya yang mengalami pencemaran parah dan kerusakan pada habitat alaminya, dengan tujuan mengembalikannya ke kondisi semula sebelum kerusakan terjadi.

Restorasi sungai memberikan berbagai manfaat, antara lain meningkatkan ekosistem sungai dengan memperbaiki komponen fisikokimia dan biologisnya, seperti pemulihan populasi ikan, kualitas air, dan habitat yang terdegradasi. Restorasi juga meningkatkan resiliensi ekosistem, menjadikan sungai lebih mandiri dan mampu pulih dari gangguan eksternal seperti banjir atau tekanan manusia. Selain itu, restorasi dapat mengurangi risiko kerusakan lingkungan dengan meminimalkan dampak jangka panjang pada ekosistem sekitar. Secara sosial, restorasi memberikan kontribusi dalam ilmu pengetahuan, menyediakan peluang rekreasi, dan meningkatkan kepuasan masyarakat terhadap lingkungan [4].

Bioengineering merupakan gabungan antara teknik biologi dan irigasi yang dirancang untuk menciptakan sistem baru guna memenuhi kebutuhan manusia. Dalam beberapa tahun terakhir, solusi bioengineering semakin banyak diteliti. Konsep ini mencakup pemanfaatan proses ekologis dalam rekayasa yang meniru alam

* Corresponding author: Ichabelicka@gmail.com

atau sistem yang dibentuk oleh alam itu sendiri untuk mencapai tujuan teknis. Pendekatan bioengineering ini mengintegrasikan solusi berbasis alam dengan struktur pendukung, di mana vegetasi tepi sungai (riparian) berperan sangat penting dalam menciptakan solusi yang berkelanjutan [5]. Menurut [6] [7], bioengineering dapat menggunakan bahan tanaman hidup untuk menjalankan beberapa fungsi rekayasa. Teknik bioengineering tanah dapat digunakan untuk mengatasi tebing yang mengalami erosi, kelebihan kerikil, dan lereng yang tidak stabil serta dapat menghasilkan produk akhir yang tidak hanya mengatasi masalah, tetapi juga menyediakan vegetasi riparian yang sesuai. Proses suksesi alami yang terkait dengan perkembangan tutupan vegetasi riparian yang sehat dan berfungsi menjadi model yang digunakan untuk merancang sistem perbaikan yang mendorong pemulihan nilai-nilai riparian. Dengan menyediakan sistem hidup dan tumbuh untuk perbaikan situs yang rusak, yang mungkin melibatkan kayu dan batu, perbaikan ini dapat berkontribusi pada area riparian yang hidup.

Makalah ini ditulis untuk menganalisis dan mensintesis literatur mengenai efektifitas implementasi BioEngineering (BE) dalam restorasi sungai, dengan fokus pada evaluasi keberhasilannya dalam menstabilkan tebing sungai, keberhasilan BE dalam mengurangi erosi tebing sungai and efektifitas vegetasi yang digunakan dalam BE terhadap erosi dan pemulihan ekosistem.

2. METODE

Makalah ini ditulis dengan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) untuk mengkaji dan menganalisis efektifitas penerapan Bio Engineering untuk Restorasi Sungai. Literatur dikumpulkan dengan sistematis menggunakan database elektronik google scholar dan scopus dengan kata kunci Effectivity of Bio Engineering for River Restoration. Artikel diseleksi sesuai dengan topik. Pada tahap awal, artikel dipilih berdasarkan judul dan abstrak untuk memastikan bahwa artikel tersebut sesuai dengan topik, kemudian dilakukan evaluasi terhadap keseluruhan artikel. Analisis dilakukan untuk menjawab 3 variabel yang terkait dengan efektifitas Bio Engineering yaitu a).stabilitas lereng, b).erosi tebing sungai dan c).vegetasi yang digunakan.

3. ANALISIS DAN SINTESIS DATA

Bab ini mengkaji peran bioengineering sebagai pendekatan berbasis alam dalam menanggulangi permasalahan erosi lereng, khususnya di kawasan riparian dan tebing sungai. Berbagai teknik bioengineering telah diterapkan dalam studi-studi internasional untuk menstabilkan lereng, melindungi tebing sungai, dan memulihkan ekosistem. Dengan mengintegrasikan vegetasi lokal dan teknologi rekayasa, metode ini tidak hanya memberikan solusi untuk masalah stabilitas fisik, tetapi juga mendukung fungsi ekologis yang berkelanjutan.

Tabel 1 Analisis dan Sintetis Data

No	Peneliti	Efektifitas BioEngineering terhadap Stabilitas Lereng	Efektifitas BioEngineering terhadap Erosi Tebing Sungai	Efektifitas Vegetasi BioEngineering terhadap stabilitas Lereng dan Pemulihan Ekosistem	Sumber pustaka
1	[8]	√	√	√	IOP Conference Series
2	[9]	√	√	√	Proceedings of the International Forestry and Environment Symposium 2013
3	[10]	√	√	√	Elsevier
4	[11]	√	√	√	Elsevier
5	[6]	√	√	√	Proceedings of the 26th Annual British Columbia Mine Reclamation Symposium in Dawson Creek, BC, 2002. The Technical and Research Committee on Reclamation
6	[5]	√	√	√	International Journal of Technical & Scientific Research Engineering

No	Peneliti	Efektifitas BioEngineering terhadap Stabilitas Lereng	Efektifitas BioEngineering terhadap Erosi Tebing Sungai	Efektifitas Vegetasi BioEngineering terhadap stabilitas Lereng dan Pemulihan Ekosistem	Sumber pustaka
7	[12]	√	√	√	Of the 2006 Annual Conference of the Transportation Association of Canada Charlottetown, Prince Edward Island
8	[13]	√	√	√	Web of Conferences
9	[14]	√	√	√	Water–Society Interactions Proceedings of ICWRS2014, Bologna, Italy
10	[15]	√	√	√	WIT Transactions on Ecology and The Environment,
11	[16]	√	√	√	Published in the Life cycle analysis and assessment in civil engineering
12	[17]	√	√	√	Proceeding BBWS Cimanuk-Cisanggarung

a. Efektifitas BioEngineering terhadap Stabilitas Lereng

Penerapan teknik bioengineering telah terbukti menjadi solusi efektif untuk konservasi tebing sungai dan pemulihan fungsi ekologis. Studi di Sungai Deduru Oya, Sri Lanka, menunjukkan bahwa penggunaan agroforestri dan spesies endemik seperti *Madhuca longifolia* dan *Terminalia arjuna* mampu mengendalikan erosi dan meningkatkan kualitas air, meskipun tantangan seperti penambangan pasir ilegal tetap menjadi hambatan utama [8]. Selain itu, penelitian di Sungai Hron, Slovakia, menggarisbawahi pentingnya restorasi habitat melalui bioengineering untuk mendukung stabilitas dataran banjir dan mitigasi perubahan iklim dengan kolaborasi antara pemangku kepentingan sebagai kunci keberhasilan [9]. Keunggulan bioengineering juga tercermin dalam layanan ekosistem, seperti penyerapan nitrogen dan fosfor yang lebih tinggi hingga peningkatan kapasitas penyimpanan karbon, meskipun implementasinya masih terbatas karena kurangnya integrasi dalam pengelolaan sungai [10]. Tantangan ekologis lain seperti pengelolaan spesies invasif dan evaluasi siklus hidup lingkungan memerlukan harmonisasi tujuan ekologis dan teknik rekayasa [11].

Teknik bioengineering seperti *live staking* dan *live crib walls* telah berhasil memperkuat tebing sungai yang rentan erosi sambil mendukung restorasi habitat riparian [6]. Di Delta Sungai Mekong, Vietnam, penggunaan vegetasi mangrove seperti *Rhizophora apiculata* terbukti mampu mengurangi erosi dan meningkatkan keanekaragaman hayati dengan tingkat kelangsungan hidup tanaman yang tinggi [5]. Studi lain menyoroti perlunya adaptasi teknik bioengineering pada kondisi lapangan, seperti yang terlihat pada proyek stabilisasi tebing yang melibatkan masyarakat lokal dan desain kontrak fleksibel [12]. Pendekatan eksperimental juga terus dikembangkan untuk menyesuaikan kerangka kerja bioengineering dengan dinamika sungai, sebagaimana ditunjukkan oleh penelitian awal tentang teknik rip-rap berbasis vegetasi [13].

Penggunaan teknologi seperti "karpet hijau" berbasis vegetasi telah terbukti efektif dalam melindungi area hilir dari erosi, sementara integrasi vegetasi melalui *gabion* dan *matras Reno* memberikan perlindungan awal terhadap gesekan geser sebelum vegetasi matang [14], [15]. Namun, keterbatasan resistansi mekanis di bawah kondisi hidrolis ekstrem memerlukan metode dimensi yang lebih baik untuk meningkatkan efektivitas bioengineering [16]. Selain itu, pendekatan inovatif seperti Sistem Urug Perkuatan Wadah (SUPW) yang menggabungkan elemen struktural teknis dan vegetasi memberikan solusi adaptif untuk stabilisasi lereng sambil mengoptimalkan fungsi ekologis [17]. Secara keseluruhan, teknik bioengineering menunjukkan potensi besar dalam mengintegrasikan stabilitas struktural dan ekologis, mendukung tujuan konservasi dan keberlanjutan.

Teknik bioengineering telah terbukti sebagai pendekatan yang efektif dalam meningkatkan stabilitas lereng melalui kombinasi vegetasi lokal dan rekayasa struktural. Dengan dukungan penelitian internasional, metode ini menawarkan solusi berkelanjutan yang tidak hanya mengatasi erosi tetapi juga memulihkan fungsi ekologis. Meskipun demikian, keberhasilannya bergantung pada adaptasi lokal, harmonisasi tujuan ekologis

dan teknis, serta penguatan kolaborasi lintas sektor. Hal ini menunjukkan bahwa bioengineering merupakan pendekatan multifungsi yang dapat mendukung konservasi dan mitigasi perubahan iklim secara terpadu.

b. Efektifitas BioEngineering terhadap Erosi Tebing Sungai

Penerapan teknik bioengineering telah menjadi solusi utama dalam konservasi tebing sungai serta perencanaan penggunaan lahan yang berkelanjutan. Di Sri Lanka, pendekatan bioengineering menggunakan tanaman hidup seperti Mee dan bambu di Sungai Deduru Oya terbukti mampu mengurangi erosi tebing, meningkatkan kualitas air, dan mendukung keanekaragaman hayati. Kombinasi teknik ini dengan agroforestri menjadi solusi ramah lingkungan yang dapat disesuaikan dengan kondisi setempat [8]. Di Eropa, restorasi aliran Sungai Hron di Slovakia berhasil mengembalikan fungsi ekologis koridor alami dengan meningkatkan konektivitas ekologis dan melindungi keanekaragaman hayati, sejalan dengan European Green Deal [9]. Teknik bioengineering juga menunjukkan keunggulan dalam meningkatkan layanan ekosistem, seperti pengurangan nitrogen dan fosfor serta peningkatan penyimpanan karbon, meskipun aplikasinya masih terbatas dalam skala besar [10].

Namun, adopsi teknik ini menghadapi tantangan, termasuk spesies invasif, perubahan iklim, dan perlunya analisis siklus hidup lingkungan untuk mengoptimalkan dampak ekologis [11]. Teknik bioengineering seperti perlindungan tebing hidup dan pagar anyaman hidup memberikan solusi untuk mengatasi erosi sambil memulihkan habitat riparian, sebagaimana dibuktikan oleh pengalaman dua dekade penerapannya [11]. Studi kasus di Sungai Lung Tram, Vietnam, menyoroti efektivitas vegetasi mangrove dalam melindungi tebing sungai, meningkatkan biodiversitas, dan mendukung kesejahteraan masyarakat lokal [5]. Pendekatan eksperimental dan bioteknis yang melibatkan komunitas lokal juga meningkatkan stabilitas tebing sungai melalui kontrak non-konvensional dan pelatihan lapangan [12].

Metode inovatif seperti vegetasi fleksibel berupa "karpet hijau" telah digunakan untuk melindungi dasar sungai dari erosi lokal, sementara kombinasi gabion dan matras Reno memberikan stabilitas awal sebelum vegetasi tumbuh penuh [14], [15]. Kendati demikian, keterbatasan resistensi mekanis dan kurangnya standar dimensi menjadi hambatan dalam pengadopsian yang lebih luas [16] (Evette, 2018). Di Indonesia, metode sistematis melalui penanaman vegetasi berakar tunjang dan serabut secara berlapis terbukti efektif untuk sungai dengan karakteristik arus tertentu, menambah dimensi ekologis dan adaptabilitas pada proyek konservasi [17].

Bioengineering memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi erosi tebing sungai melalui integrasi vegetasi dan teknik konservasi yang ramah lingkungan. Penggunaan tanaman hidup, seperti mangrove dan semak endemik, tidak hanya mencegah degradasi fisik tetapi juga mendukung biodiversitas dan kesejahteraan masyarakat setempat. Namun, keberhasilannya masih terhambat oleh kendala ekologis dan teknis, termasuk spesies invasif dan kurangnya standar dimensi. Dengan mengatasi tantangan ini, bioengineering berpotensi menjadi strategi kunci dalam pengelolaan tebing sungai yang berkelanjutan.

c. Efektifitas Vegetasi BioEngineering terhadap stabilitas Lereng dan Pemulihan Ekosistem

Teknik bioengineering telah menjadi pendekatan yang efektif dalam mencegah erosi tebing sungai, mengurangi pendangkalan, dan meningkatkan kualitas air melalui kemampuan pemurnian akar tanaman. Selain memberikan perlindungan struktural, vegetasi hidup juga berfungsi sebagai habitat satwa liar. Penggunaan spesies endemik seperti *Madhuca longifolia* dan *Terminalia arjuna* menunjukkan nilai ekologis, budaya, dan medis yang signifikan, meskipun keberhasilannya memerlukan seleksi lokasi yang tepat dan pembatasan aktivitas penambangan pasir ilegal [8]. Contoh implementasi di Slovakia menunjukkan bahwa restorasi sungai dengan pendekatan bioengineering dapat memulihkan habitat akuatik dan meningkatkan konektivitas ekologis melalui integrasi perencanaan spasial dan analisis bio-koridor, yang relevan dalam mitigasi perubahan iklim [9].

Penelitian membandingkan layanan ekosistem antara metode bioengineering dan teknik konvensional menemukan bahwa bioengineering secara signifikan meningkatkan kapasitas pemurnian air, penyimpanan karbon, serta pengurangan beban nitrogen dan fosfor di sungai. Teknik seperti penanaman semak willow juga memiliki potensi besar dalam mitigasi perubahan iklim, meskipun penerapan skala luas masih terbatas [10]. Tantangan utama bioengineering adalah memilih spesies tanaman yang sesuai dan memahami dampaknya terhadap hidrologi dan sedimentologi tepi sungai. Harmonisasi strategi diperlukan untuk memastikan keamanan hidrolik dan keberlanjutan proyek. Analisis siklus hidup lingkungan (LCA) juga penting untuk menilai dampak ekologis selama proses konstruksi [11].

Teknik seperti pagar anyaman dan tiang hidup, yang memanfaatkan bahan tanaman hidup, telah terbukti efektif dalam mengatasi erosi tebing dan memulihkan ekosistem riparian, mendukung penggunaan vegetasi lokal untuk keberlanjutan [6]. Studi di Sungai Lung Tram, Vietnam, menunjukkan peran vegetasi mangrove dalam melindungi tebing sungai dari erosi, mendukung stabilitas sosial-ekonomi, dan meningkatkan keanekaragaman hayati di daerah salin [5]. Penelitian eksperimental lainnya menyoroti penggunaan "karpet hijau" dari vegetasi fleksibel nyata untuk melindungi tebing sungai, terutama pada saluran lurus, dengan hasil yang signifikan dalam mencegah erosi [14]. Gabungan vegetasi dengan produk kawat baja seperti gabion dan matras Reno juga meningkatkan stabilitas permukaan dan memungkinkan regenerasi lingkungan alami selama tahap awal pemulihan [15].

Meski bioengineering memberikan manfaat ekologis yang besar, tantangan terkait dimensi teknik dan ketahanan mekanis tetap menjadi hambatan. Misalnya, resistensi terhadap peristiwa banjir membutuhkan desain sistematis dan pengembangan standar yang lebih baik untuk penerapan yang luas [16]. Selain itu, vegetasi dalam bioengineering juga memiliki fungsi ekologis kompleks, seperti meningkatkan ketersediaan air melalui infiltrasi, menciptakan mikroiklim kondusif, dan berkontribusi pada kestabilan atmosfer dengan menurunkan temperatur permukaan serta menghasilkan aerosol untuk kondensasi [17]. Dengan berbagai manfaatnya, teknik ini mendukung keseimbangan ekosistem dan adaptasi terhadap perubahan iklim.

Penggunaan vegetasi dalam bioengineering telah membuktikan manfaatnya dalam mencegah erosi, meningkatkan kualitas air, dan memulihkan keanekaragaman hayati. Dengan pendekatan yang mengutamakan spesies lokal, teknik ini mendukung stabilitas ekologis dan struktur tebing sungai. Meski demikian, tantangan seperti keterbatasan mekanis dan harmonisasi hidrologi menuntut inovasi lebih lanjut. Dengan pengembangan teknologi dan peningkatan kolaborasi lokal, vegetasi bioengineering dapat memperkuat keberlanjutan ekosistem riparian dalam jangka panjang.

d. Tantangan dan Batasan

Tantangan dalam penerapan teknik bioengineering (BE) untuk konservasi tebing sungai dan restorasi sungai telah diidentifikasi melalui berbagai studi kasus. Salah satu kendala utama adalah penggunaan lahan yang tidak tepat serta aktivitas ilegal seperti penambangan pasir yang merusak keseimbangan ekosistem sungai. Studi di DAS Deduru Oya, Sri Lanka, merekomendasikan larangan aktivitas ilegal, pemulihan vegetasi, dan pendekatan agroforestri untuk mengatasi masalah ini [8]. Selain itu, intervensi antropogenik seperti kanal buatan juga mengurangi fungsi ekosistem sungai, seperti yang terlihat pada restorasi Sungai Hron di Slovakia. Pendekatan integratif diperlukan untuk mengembalikan habitat akuatik dan stabilisasi dataran banjir [9].

Keterbatasan layanan ekosistem dari bioengineering juga menjadi tantangan. Meski teknik ini meningkatkan penyerapan nitrogen, fosfor, dan penyimpanan karbon dibandingkan metode konvensional, efektivitasnya sangat tergantung pada skala implementasi dan kesesuaian lokasi [10]. Kompleksitas ekologi dalam teknik *Soil and Water Bioengineering* (SWBE) menambah tantangan, termasuk pemilihan spesies tanaman yang tepat, harmonisasi dampak hidrolis, dan pengelolaan spesies invasif. Penilaian siklus hidup lingkungan juga penting untuk mengurangi dampak konstruksi [11].

Keterbatasan pengetahuan lokal dan sumber daya menjadi kendala lain. Studi di Vietnam menunjukkan bahwa perlindungan tepi sungai dengan mangrove membutuhkan keahlian lokal untuk memahami dinamika ekosistem dan spesies endemik [5]. Proyek-proyek bioengineering juga memerlukan fleksibilitas desain, seperti yang ditunjukkan di Alberta, Kanada, di mana kerjasama antara perancang, kontraktor, dan pemilik proyek diperlukan untuk mengatasi tantangan lapangan [12]. Teknik bioengineering tanah, seperti perlindungan tebing hidup dan pemasangan batang hidup, telah terbukti efektif untuk restorasi riparian, tetapi keberhasilannya bergantung pada pemilihan material tanaman yang tepat dan adaptasi terhadap kondisi lokal [6].

Pada tingkat teknis, penerapan bio-rekayasa untuk perlindungan tebing sungai seringkali menghadapi keterbatasan desain yang kurang mempertimbangkan mekanisme gaya sungai terhadap struktur. Sebagian besar desain masih bergantung pada evaluasi subjektif, dengan kurangnya standar mekanistik yang sistematis [13]. Tantangan ini diperparah oleh kebutuhan akan ketahanan geser yang cukup pada tahap awal proyek, sebelum vegetasi yang ditanam tumbuh untuk mendukung stabilitas permukaan tanah [15]. Selain itu, kurangnya standar teknis dan panduan dimensi menjadi hambatan utama dalam mengarusutamakan teknologi ini secara luas [16].

Implementasi bioengineering juga dihadapkan pada keterbatasan sumber daya manusia dan minimnya pemetaan tanah secara komprehensif. Analisis SWOT menunjukkan bahwa kebijakan fiskal yang belum

berpihak sepenuhnya pada konservasi sumber daya air menambah kompleksitas ini. Oleh karena itu, diperlukan inovasi berkelanjutan, pengembangan aplikasi untuk menentukan jenis tanaman, serta pendekatan multidisipliner yang memadukan aspek teknis, ekologis, dan kebijakan untuk keberlanjutan pengelolaan konservasi tebing sungai [17].

Penerapan bioengineering menghadapi berbagai tantangan, termasuk keterbatasan desain, kekurangan standar teknis, dan aktivitas ilegal seperti penambangan pasir. Hambatan ini diperburuk oleh kurangnya dukungan kebijakan serta minimnya pengetahuan lokal dan sumber daya. Untuk mengatasi kendala tersebut, diperlukan pendekatan multidisipliner yang melibatkan teknologi, kebijakan, dan pemberdayaan masyarakat lokal. Dengan mengintegrasikan elemen-elemen ini, bioengineering dapat dioptimalkan sebagai solusi berkelanjutan untuk konservasi dan restorasi tebing sungai.

4. KESIMPULAN

Hasil kajian ini menggarisbawahi bahwa bioengineering merupakan pendekatan efektif dan berkelanjutan untuk restorasi sungai, dengan manfaat untuk stabilisasi lereng, pengurangan erosi, peningkatan keanekaragaman hayati, dan pemulihan layanan ekosistem. Studi menunjukkan bahwa penggunaan vegetasi lokal, seperti mangrove dan spesies endemik, tidak hanya mendukung stabilitas tebing sungai tetapi juga memberikan nilai tambah ekologis (Tabel 3.1). Meskipun demikian, tantangan seperti aktivitas ilegal, dampak intervensi manusia, dan kurangnya penerapan skala luas masih menjadi hambatan. Oleh karena itu, diperlukan integrasi yang lebih baik antara analisis ekologi, sosial, dan ekonomi, serta partisipasi aktif dari pemangku kepentingan untuk memastikan keberlanjutan restorasi sungai menggunakan teknik bioengineering. Hasil review ini selanjutnya akan digunakan pada penelitian mengenai efektifitas Bioengineering yang dilakukan di Sungai Cimanuk-Cisanggarung, Cirebon.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan penuh rasa hormat, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung penyelesaian penelitian dan artikel ini. Ucapan terima kasih khusus kami sampaikan kepada Fakultas Teknik Universitas Pancasila atas dukungan dan kesempatan melalui Hibah Internal Penelitian Skema Pusat Kajian dengan judul Transformasi Tata Air dan Risiko Kebencanaan Pesisir di Kawasan Bersejarah Kota Cirebon. Dukungan ini memberikan dasar yang kuat bagi pengembangan metode bioengineering dalam konservasi tebing sungai dan pengelolaan ekosistem riparian. Kami juga berterima kasih kepada rekan peneliti, mitra akademik, dan pihak-pihak lain yang telah memberikan masukan konstruktif selama proses penelitian ini. Semoga tulisan ini bermanfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan dan praktik konservasi berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. T. Juniati et al., "The Perception of High School Communities towards River Restoration Program," *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat (Indonesian Journal of Community Engagement)*, vol. 7, no. 4, p. 247, Dec. 2021, doi: 10.22146/jpkm.50076.
- [2] E. Wohl, S. N. Lane, and A. C. Wilcox, "The science and practice of river restoration," *Water Resour Res*, vol. 51, no. 8, pp. 5974–5997, Aug. 2015, doi: 10.1002/2014WR016874.
- [3] S. S. Sammen, T. A. Mohammad, and Q. G. Majeed, "Environmental Consideration in Flood Mitigation and River Restoration," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, Jun. 2019. doi: 10.1088/1757-899X/518/2/022088.
- [4] M. A. Palmer et al., "Standards for ecologically successful river restoration," Apr. 2005. doi: 10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x.
- [5] Nguyen, "Status of Riverbank Erosion and Proposal of Bioengineering Solution to Prevent Riverbank Erosion in Saline Soils Area: Case Study in Lung Tram River," 2024.
- [6] D. F. Polster, "The Technical and Research Committee on Reclamation," 2002. [Online]. Available: www.serbc.org
- [7] R. Raut and O. T. Gudmestad, "Use of bioengineering techniques to prevent landslides in Nepal for hydropower development," *International Journal of Design and Nature and Ecodynamics*, vol. 12, no. 4, pp. 418–427, 2017, doi: 10.2495/DNE-V12-N4-418-427.
- [8] R. M. Soyza and Manawadu L, "Model for River Bank Conservation and Proper Land Use Planning," 2020.
- [9] Á. Agócsová, M. Högyeová, Z. Chodasová, V. Ondrejčka, M. Husár, and L. Jamečný, "River restoration as a method towards harmonization of natural habitats in the context of ecological corridors preservation: A case study on the Hron River," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, IOP Publishing Ltd, Dec. 2020. doi: 10.1088/1757-899X/960/2/022058.

-
- [10] L. Symmank, S. Natho, M. Scholz, U. Schröder, K. Raupach, and C. Schulz-Zunkel, “The impact of bioengineering techniques for riverbank protection on ecosystem services of riparian zones,” *Ecol Eng*, vol. 158, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.ecoleng.2020.106040.
- [11] H. P. Rauch, M. von der Thannen, P. Raymond, E. Mira, and A. Evette, “Ecological challenges* for the use of soil and water bioengineering techniques in river and coastal engineering projects,” *Ecol Eng*, vol. 176, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ecoleng.2021.106539.
- [12] R. Skirrow and P. Eng, “STREAMBANK STABILIZATION USING BIOENGINEERING AND BIOTECHNICAL METHODS,” 2024.
- [13] S. Posi et al., “Experimental study of riverbank protection with bio-engineering techniques,” in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, Sep. 2018. doi: 10.1051/e3sconf/20184005023.
- [14] D. Termini, “River-bed erosion due to changing boundary conditions: Performance of a protective measure,” in *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, IAHS Press, 2014, pp. 112–117. doi: 10.5194/piahs-364-112-2014.
- [15] M. Vicari and D. Crowther, “Soil bio-engineering experiences in river works using wire mesh products,” *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, vol. 172, pp. 351–362, 2013, doi: 10.2495/RBM130291.
- [16] Andre Evette, “The limits of mechanical resistance in bioengineering for riverbank protection,” 2018.
- [17] Dwi Agus Kuncoro, “KONSERVASI ON STREAM SECARA VEGETATIF DENGAN BIO-ENGINEERING,” 2023.