

Segment-Based Adaptive Landscape Design for Riparian Restoration of the Amprong River

Dimas Wahyu Pratama ¹,
Irawan Setyabudi ¹,
Mochammad Azkari
Hisbulloh Akbar ¹

¹ Landscape Architecture
Study Program, University
of Tribhuwana Tungadewi,
Malang, Indonesia

Correspondence:

Irawan Setyabudi

 [0000-0002-3663-3294](https://orcid.org/0000-0002-3663-3294)

E-mail: isetyabudi.st@gmail.com

 [10.26593/risa.v10i1.56-68](https://doi.org/10.26593/risa.v10i1.56-68)

ABSTRACT

*The Riparian zone of the Amprong River in the Upper Brantas Sub-watershed, Malang City, has undergone ecological degradation due to land conversion, informal settlements, and domestic waste pollution. This study aims to assess riparian conditions and develop an adaptive landscape design strategy for ecological restoration. A descriptive-spatial case study approach was employed, integrating field observation, vegetation surveys across five purposively selected segments, photographic documentation, and spatial analysis using ArcGIS. The results reveal high ecological vulnerability in segments characterized by steep slopes, low vegetation cover, and building distances of less than 10 meters from the riverbank. The proposed design emphasizes a layered ecological zoning strategy incorporating native and pioneer species such as *Gigantochloa apus*, *Swietenia macrophylla*, and *Imperata cylindrica* to enhance hydrological buffering capacity and restore habitat connectivity. This study proposes a segment-based adaptive ecological zoning model that links site-specific vulnerability with targeted design interventions, offering a practical framework for restoring degraded urban riparian systems.*

Keywords: adaptive zoning, Amprong River, ecological restoration, landscape design, Riparian Zone

Desain Lanskap Adaptif Berbasis Segmentasi untuk Restorasi Riparian Sungai Amprong

ABSTRAK

Kawasan Riparian Sungai Amprong pada Sub-DAS Brantas Hulu di Kota Malang mengalami degradasi ekologis akibat konversi lahan, permukiman sempadan, dan pencemaran limbah domestik. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi kondisi riparian serta merumuskan strategi desain lanskap adaptif untuk restorasi ekologis. Pendekatan yang digunakan adalah studi kasus deskriptif-spasial melalui observasi lapangan, survei vegetasi pada lima segmen terpilih, dokumentasi foto, serta analisis spasial menggunakan ArcGIS. Hasil penelitian menunjukkan tingkat kerentanan tinggi pada segmen dengan kemiringan curam, tutupan vegetasi rendah, dan jarak bangunan kurang dari 10 meter dari tepi sungai. Konsep desain yang diusulkan menekankan zonasi ekologis berlapis dengan integrasi spesies lokal dan pionir seperti *Gigantochloa apus*, *Swietenia macrophylla*, dan *Imperata cylindrica* untuk meningkatkan fungsi penyangga hidrologis dan memulihkan konektivitas habitat. Penelitian ini menghasilkan model zonasi ekologis adaptif berbasis segmentasi yang menghubungkan tingkat kerentanan tapak dengan strategi intervensi desain secara spesifik, sebagai kerangka operasional untuk restorasi sistem riparian perkotaan yang terdegradasi.

Kata Kunci: desain lanskap, restorasi ekologi, Sungai Amprong, Kawasan Riparian, zonasi adaptif.

This article was submitted to Jurnal
RISA (Riset Arsitektur)

Received: 31 Juli 2025

Accepted: 16 April 2026

Published: 30 April 2026



Content from this work may be used under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 license. Any further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the title of the work, journal citation and DOI.

PENDAHULUAN

Kawasan riparian berperan penting sebagai penyangga hidrologis dan zona transisi ekologis antara ekosistem darat dan perairan; fungsi utamanya meliputi stabilisasi tebing, penyerapan dan penyaringan limpasan polutan, pengaturan aliran air, serta dukungan terhadap keanekaragaman hayati dan jaring makanan akuatik–terestrial (Majumdar & Avishek, 2023). Di daerah perkotaan tropis, tekanan urbanisasi, konversi lahan, dan pendudukan sempadan secara informal cenderung mengurangi luas dan kontinuitas zona riparian sehingga memperbesar risiko erosi, sedimentasi, dan penurunan kualitas air (Vollmer et al., 2015). Kondisi serupa tercatat pada Sungai Amprong yang merupakan bagian dari Sub-DAS Brantas Hulu di Kota Malang, di mana studi kualitas air dan kajian awal menunjukkan urgensi adanya tekanan dari alih fungsi lahan dan pencemaran domestik yang berpotensi menurunkan fungsi ekosistem riparian (Andini & Purnomo, 2019). Dalam konteks tersebut, perumusan konsep desain lanskap yang bersifat adaptif sangat diperlukan untuk memulihkan fungsi ekologis riparian sekaligus menyesuaikan intervensi dengan dinamika sosial-spasial lokal, sehingga restorasi dapat berlangsung efektif dan berkelanjutan (Majumdar & Avishek, 2025).

Berbagai penelitian dalam satu dekade terakhir menegaskan bahwa keberhasilan restorasi kawasan riparian sangat ditentukan oleh penerapan prinsip zonasi vegetasi berlapis, peningkatan fungsi hidrologis, serta kolaborasi masyarakat dalam pengelolaan berkelanjutan. Struktur vegetasi yang berlapis meliputi strata pohon, perdu, dan penutup tanah yang diketahui meningkatkan stabilitas tebing sungai, menurunkan beban sedimen, serta memperkuat konektivitas ekologis antarhabitat (Naiman & Décamps, 1997; Wohl et al., 2019). Pendekatan ini menjadi dasar dari konsep *ecological layering* dan *adaptive buffer management* yang kini diadopsi dalam desain lanskap ekologis (Baruah & Sarma, 2021). Di Indonesia, penerapan prinsip tersebut mulai berkembang melalui proyek restorasi berbasis vegetasi lokal dan partisipasi masyarakat, seperti pada Sungai Ciliwung yang mengintegrasikan fungsi ekologis dengan nilai sosial-budaya setempat (Wardiningsih & Salam, 2019), kajian dengan menekankan efektivitas fitoremediasi (Solihat & Luth, 2021), kajian

dengan mengembangkan agroforestri (Prastiyo et al., 2020), kajian dengan menekankan pentingnya struktur vegetasi berlapis dalam menurunkan risiko erosi dan meningkatkan daya serap air di DAS Citarum (Ilhami & Affandy, 2018), kajian dengan menunjukkan efektivitas penggunaan vegetasi lokal adaptif dalam mengembalikan biodiversitas kawasan riparian di Timor Tengah Utara (Messah et al., 2025). Terakhir, penelitian yang dilakukan oleh Setyabudi & Santoso (2024) menunjukkan bahwa kawasan riparian dapat dibagi menjadi empat zona, yaitu zona inti, zona khusus, zona penyangga, dan zona pemanfaatan untuk mendukung pemberdayaan masyarakat. Berbagai studi tentang pengelolaan sempadan sungai menekankan pentingnya pendekatan *nature-based solutions* untuk menjaga fungsi ekologis koridor riparian perkotaan. Kajian yang secara spesifik menganalisis segmen kritis pada sungai perkotaan yang berkonflik dengan permukiman padat dan menghubungkannya langsung dengan arahan desain lanskap ekologis masih sangat terbatas, sehingga diperlukan penelitian yang lebih kontekstual dan komparatif.

Secara teoretis, penelitian ini berangkat dari integrasi tiga kerangka utama, yaitu *riparian ecology*, *landscape ecological design*, dan *adaptive planning*. *Riparian ecology* menekankan pentingnya zona transisi sebagai sistem penyangga yang dinamis antara ekosistem darat dan perairan (Naiman & Décamps, 1997), sementara pendekatan *landscape ecological design* menggarisbawahi peran struktur spasial dan komposisi vegetasi dalam membentuk stabilitas ekologis (Forman, 1995). Di sisi lain, konsep *adaptive planning* menekankan bahwa intervensi desain harus responsif terhadap variasi kondisi biofisik dan tekanan antropogenik yang berbeda pada setiap segmen ruang (Ahern, 2013).

Berdasarkan kerangka tersebut, kebaruan penelitian ini terletak pada pengembangan pendekatan segmentasi riparian berbasis tingkat kerentanan yang diintegrasikan dengan model zonasi ekologis berlapis dalam kerangka desain lanskap adaptif. Pendekatan ini menghubungkan secara langsung analisis biofisik, tekanan spasial, dan sintesis desain pada skala segmen, sehingga menghasilkan model konseptual yang lebih operasional,

kontekstual, dan aplikatif untuk restorasi ekologis sungai perkotaan.

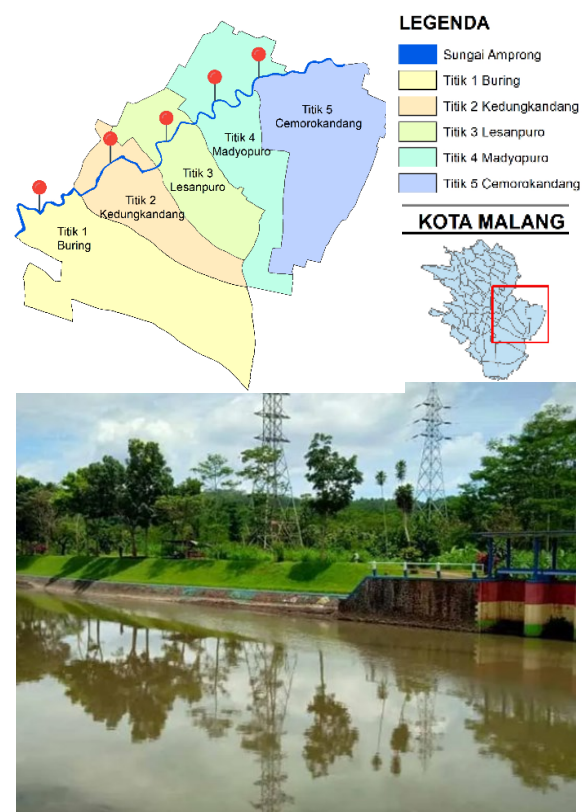
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis karakter biofisik dan pemanfaatan ruang pada kawasan riparian Sungai Amprong serta merumuskan konsep desain lanskap adaptif untuk mendukung upaya restorasi ekologis di Sub-DAS Brantas Hulu, Kota Malang. Ruang lingkup kajian mencakup identifikasi kondisi eksisting, pemetaan tingkat kerentanan pada segmen riparian terpilih, serta penilaian potensi vegetasi lokal sebagai elemen utama perancangan. Analisis dilakukan pada aspek tutupan vegetasi, stabilitas tebing, jarak bangunan dari tepi sungai, serta tekanan aktivitas manusia yang memengaruhi kualitas kawasan riparian. Manfaatnya adalah digunakan untuk menyusun arah desain zonasi ekologis adaptif yang berfungsi sebagai dasar rekomendasi restorasi serta pengelolaan berkelanjutan kawasan riparian di wilayah studi. Dengan demikian, desain lanskap dalam penelitian ini tidak diposisikan sebagai tujuan akhir, melainkan sebagai hasil sintesis dari analisis biofisik dan spasial yang bertujuan menghasilkan arahan restorasi berbasis bukti (*evidence-based design*).

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif dengan analisis spasial dan pendekatan studi kasus. Tujuannya untuk menggambarkan karakter biofisik dan pemanfaatan ruang kawasan riparian Sungai Amprong secara komprehensif. Pendekatan ini banyak digunakan dalam penelitian restorasi riparian untuk mengidentifikasi struktur vegetasi, tingkat kerentanan, dan dinamika ruang di sepanjang koridor sungai (Veról et al., 2020). Proses penelitian mengikuti tahapan perancangan lanskap, meliputi inventarisasi, analisis, dan sintesis, sehingga memungkinkan integrasi antara data biofisik dan pertimbangan desain adaptif. (Gold, 1980; Setyabudi & Santoso, 2024). Pemilihan lokasi studi dilakukan pada lima segmen riparian yang ditentukan secara *purposive sampling* berdasarkan variasi tingkat degradasi ekologis, kemiringan tebing, kepadatan vegetasi, dan tekanan aktivitas manusia.

Pengumpulan data dilaksanakan pada Mei 2025. Data primer diperoleh melalui: 1)

Observasi lapangan untuk mendokumentasikan kondisi fisik, tutupan vegetasi, jarak bangunan terhadap tepi sungai, serta aktivitas masyarakat. 2) Survei vegetasi pada setiap segmen dengan metode jalur kuadrat untuk mengidentifikasi komposisi spesies, kepadatan, dan kondisi kesehatan vegetasi. 3) Pemetaan spasial menggunakan drone dan perangkat lunak ArcGIS untuk menghasilkan peta batas riparian, topografi lokal, dan sebaran vegetasi. Data sekunder mencakup peta RBI, peta kemiringan, data penggunaan lahan, dan dokumen perencanaan wilayah yang diperoleh dari instansi terkait (Wohl et al., 2019).



Gambar 1. Lokasi Penelitian dan Distribusi Lima Segmen Studi pada Sungai Amprong

Objek studi dalam penelitian ini adalah koridor riparian Sungai Amprong pada segmen yang berada di wilayah Kecamatan Kedungkandang, Kota Malang (lihat Gambar 1). Lima segmen terpilih merepresentasikan kondisi kritis hingga semi-alami berdasarkan karakter biofisik dan tekanan antropogenik. Unit analisis penelitian adalah sempadan sungai pada masing-masing segmen dengan parameter yang mencakup kondisi fisik tapak, struktur vegetasi, serta interaksi sosial masyarakat terhadap sungai.

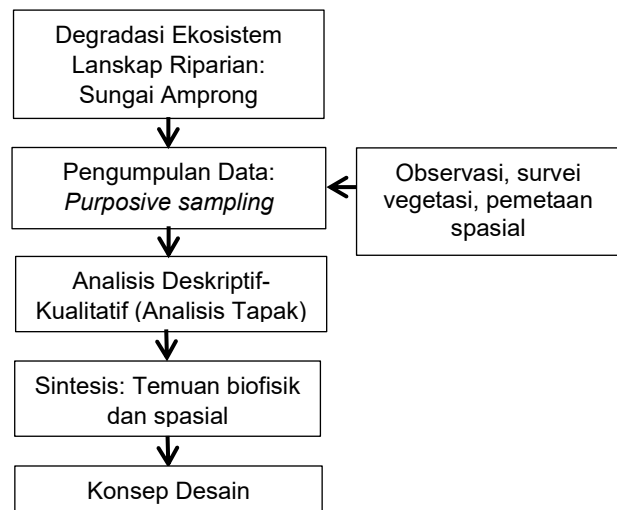
Analisis dilakukan menggunakan pendekatan analisis spasial tapak untuk mengidentifikasi karakteristik, permasalahan, dan potensi tiap segmen riparian. Data koordinat dan morfologi tapak dianalisis menggunakan perangkat lunak untuk menghasilkan peta sebaran titik dan hubungan spasial antar-lokasi. Kondisi vegetasi dievaluasi melalui identifikasi spesies, komposisi, dan fungsi ekologis sebagai bioengineering dalam pengendalian erosi. Sementara itu, analisis sosial dilakukan secara observasional terhadap bentuk interaksi masyarakat dengan sungai. Seluruh variabel dianalisis dengan menghubungkannya dengan tujuan penelitian, yaitu merumuskan arahan desain lanskap ekologis yang kontekstual sesuai karakter tiap titik.

Penentuan tingkat kerentanan riparian dilakukan secara komparatif dengan mengacu pada tiga parameter utama, yaitu: (1) tutupan vegetasi (%), (2) jarak bangunan terhadap tepi sungai (m), dan (3) kondisi stabilitas tebing. Masing-masing parameter dikategorikan secara kualitatif ke dalam tingkat rendah, sedang, dan tinggi berdasarkan hasil observasi lapangan dan interpretasi spasial. Segmen dengan tutupan vegetasi <40%, jarak bangunan <10 m, serta kondisi tebing tidak stabil diklasifikasikan sebagai kerentanan tinggi.

Kesimpulan ditarik melalui sintesis komparatif antarlima titik lokasi dengan menilai keterkaitan antara tekanan ekologis, kondisi vegetasi, dan potensi pemulihan lanskap. Proses inferensi dilakukan secara logis untuk menghasilkan arahan desain yang relevan, berbasis temuan empiris (lihat [Gambar 2](#)), dan dapat diterapkan sebagai strategi restorasi ekologis sempadan Sungai Amprong. Dengan demikian, validitas kesimpulan diperkuat oleh konsistensi hasil analisis data spasial dan ekologis yang mendukung rekomendasi desain secara menyeluruh.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, analisis dilakukan pada lima segmen terpilih menggunakan teknik *purposive sampling* sehingga hasil tidak dimaksudkan untuk generalisasi terhadap seluruh koridor Sungai Amprong. Kedua, data vegetasi dan kondisi tapak bersifat temporal berdasarkan periode survei Mei 2025 sehingga belum menangkap dinamika musiman secara penuh. Ketiga, analisis sosial dilakukan secara

observasional tanpa pendekatan partisipatif mendalam, sehingga interpretasi interaksi masyarakat terhadap sungai masih bersifat indikatif. Meskipun demikian, pendekatan ini tetap relevan untuk merumuskan arahan desain konseptual berbasis kondisi biofisik dan spasial aktual.



Gambar 2. Diagram Alur Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini disajikan dalam tiga tahapan utama, yaitu (1) temuan kondisi biofisik dan spasial, (2) analisis tingkat kerentanan riparian, dan (3) sintesis dalam bentuk arahan desain lanskap adaptif.

Kondisi Umum Kawasan Studi

Kawasan studi berada pada koridor Sungai Amprong yang terletak di Kecamatan Kedungkandang, Kota Malang, dan merupakan bagian dari Sub-DAS Brantas Hulu. Berdasarkan hasil pemetaan spasial dan observasi lapangan yang dilakukan pada periode survei 2025, kawasan ini menunjukkan karakter lanskap transisional dari daerah perkotaan menuju semiperdesaan. Topografi kawasan didominasi oleh kelas kemiringan 0–15%, yang termasuk kategori datar hingga landai. Kondisi ini memengaruhi pola aliran permukaan, di mana segmen dengan kemiringan <10% cenderung menghasilkan genangan limpasan saat curah hujan tinggi.

Jenis tanah di sepanjang koridor sungai didominasi oleh Latosol dan Andosol, yang secara fisik memiliki tekstur lempung–berpasir

dengan kapasitas infiltrasi sedang, namun rentan mengalami erosi apabila tutupan vegetasi menurun. Iklim kawasan termasuk dalam kategori tropis basah, dengan rata-rata curah hujan tahunan 2.000–2.500 mm/tahun. Curah hujan tertinggi terjadi pada bulan November–Maret, berimplikasi pada meningkatnya debit puncak Sungai Amprong serta peningkatan material sedimen yang terbawa aliran.

Secara umum, kondisi ekologis bantaran sungai memperlihatkan degradasi yang bervariasi di lima titik lokasi studi. Permasalahan yang ditemukan mencakup: (1) penyempitan sempadan akibat permukiman yang dibangun terlalu dekat dengan tepi sungai; (2) penurunan kualitas vegetasi riparian, ditandai dengan dominasi rumput dan semak non-endemik; (3) pembuangan limbah domestik pada beberapa segmen; dan (4) kontur tebing yang memperlihatkan tingkat kerentanan erosi rendah hingga tinggi. Kondisi-kondisi ini menjadi dasar analisis lebih lanjut untuk memahami tingkat kerentanan ekologis dan menyusun rekomendasi desain lanskap adaptif yang sesuai.

Analisis Tapak Kawasan Riparian Sungai Amprong

Area Tapak Titik 1

Area Tapak 1 (Buring) berada pada koordinat –7.988830, 112.648200, terletak di koridor sempadan Sungai Amprong dekat Pasar Kedungkandang. Hasil pemetaan spasial menunjukkan bahwa segmen ini memiliki jarak bangunan yang sangat dekat terhadap tepian sungai, yakni 3–7 meter, sehingga zona penyangga ekologis (*riparian buffer*) praktis tidak terbentuk. Topografi cenderung landai dengan struktur tanah berketahanan rendah, ditandai oleh permukaan rapuh dan rawan erosi. Tidak ditemukan sistem drainase lingkungan yang mampu menahan atau mengolah limpasan air hujan, sehingga aliran permukaan langsung bergerak menuju badan sungai dan membawa sedimen, limbah domestik, serta partikel organik tanpa proses filtrasi alami.

Survei lapangan mencatat keberadaan vegetasi seperti *Pterocarpus indicus* (angsana) dan *Gigantochloa apus* (bambu apus). Namun distribusi vegetasi tersebut tidak membentuk konfigurasi berlapis yang lazim dijumpai pada

ekosistem riparian yang stabil. Di beberapa bagian tepian sungai, vegetasi penyangga hanya terdiri atas semak sporadis dan spesies rumput, dengan tutupan vegetasi yang tidak merata sehingga tidak berfungsi optimal menahan erosi maupun memperlambat aliran permukaan.

Dari aspek sosial–ruang, kawasan ini menunjukkan hubungan negatif antara masyarakat dan sungai. Aktivitas yang memanfaatkan tepi sungai nyaris tidak ditemukan, sementara indikasi pembuangan limbah rumah tangga ke arah sungai tampak pada beberapa titik. Rendahnya interaksi sosial ini menjadikan sempadan sungai berfungsi sebagai area belakang permukiman, bukan ruang publik atau ruang ekologis.

Area Tapak Titik 2

Area Tapak 2 (–7.988950, 112.649150) terletak pada koridor Jembatan dan DAM Rolak Kedungkandang, yang berfungsi sebagai zona peralihan antara infrastruktur teknis sungai dan ekosistem sempadan alami. Pengamatan lapangan menunjukkan bahwa topografi kawasan relatif datar, dengan limpasan permukaan tinggi akibat kontribusi aliran dari permukiman padat di hulu segmen. Ketidadaan zona resapan vegetatif menyebabkan air permukaan bergerak langsung menuju badan sungai, menciptakan potensi genangan pada musim hujan dan meningkatkan beban sedimen pada aliran.

Keberadaan DAM Rolak sebagai pengendali debit tidak diimbangi oleh elemen penunjang seperti saluran resapan, vegetasi stabilisasi tebing, atau sistem penahan limpasan, sehingga turbulensi aliran pada sisi bendung memicu kerentanan erosi tebing. Tutupan vegetasi riparian berada pada kisaran 35–40%, dengan keberadaan spesies potensial seperti mahoni (*Swietenia macrophylla*) dan karet merah (*Ficus elastica*), namun tidak membentuk koridor ekologis yang kontinu. Komposisi vegetasi penutup tanah didominasi oleh semak dan rumput, sehingga tidak mampu memberi fungsi ekologis yang signifikan terhadap penguatan tebing maupun filtrasi limpasan.

Secara sosial-ruang, kawasan ini berfungsi terutama sebagai jalur transit antarpemukiman dan pasar, dengan tingkat interaksi masyarakat

terhadap sungai yang rendah. Sempadan sungai teridentifikasi sebagai ruang terlantar yang tidak dimanfaatkan untuk aktivitas sosial, rekreasi, maupun fungsi ekologis, sehingga pengelolaannya kurang dan degradasi berlangsung secara pasif.

Area Tapak Titik 3

Area Tapak 3 terletak di sekitar Jembatan Lesanpuro dan menunjukkan kontras yang kuat antara sisi timur dan barat sungai. Sisi timur memiliki rumpun *Gigantochloa apus* (bambu apus) yang tumbuh rapat pada beberapa titik, memberikan fungsi stabilisasi dasar melalui sistem perakaran yang kuat. Namun, keberadaan bambu tidak didukung oleh struktur vegetasi penutup tanah, sehingga fungsi ekologisnya sebagai penahan erosi dan pemecah limpasan belum optimal.

Sebaliknya, sisi barat sungai didominasi oleh dinding belakang permukiman yang berdiri sangat dekat dengan tepi sungai tanpa zona penyangga vegetatif. Kondisi ini menciptakan sempadan yang kritis karena tidak ada elemen alami yang melindungi tebing dari abrasi atau memperlambat aliran permukaan. Topografi di kedua sisi relatif datar hingga landai, menyebabkan limpasan permukaan meningkat secara signifikan saat hujan dan mempercepat pergerakan sedimen ke arah badan sungai.

Secara sosial-ruang, aktivitas masyarakat di segmen ini bersifat pasif, namun pola sirkulasi informal yang terjadi di sepanjang sempadan terutama pada sisi barat mengakibatkan pemadatan tanah, hilangnya vegetasi kecil, dan penurunan kualitas tebing. Ruang tepi sungai tidak diperlakukan sebagai bagian dari lingkungan bersama, melainkan sebagai akses belakang permukiman, sehingga degradasi berlangsung tanpa pengelolaan atau kontrol komunitas.

Area Tapak Titik 4

Area Tapak 4 (–7.988430, 112.655820) berada di sekitar jembatan akses menuju Madyopuro dan memiliki karakter geomorfologi yang berbeda dibandingkan dengan titik lainnya. Segmen ini ditandai oleh lereng tebing yang curam, alur sungai yang lebih sempit, serta pola aliran yang berkelok, sehingga membentuk mikrohabitat riparian yang relatif terjaga. Analisis vegetasi menunjukkan tutupan riparian

yang masih relatif utuh, didominasi oleh spesies lokal adaptif seperti *Gigantochloa apus* (bambu apus), *Hibiscus tiliaceus* (waru), dan *Piper aduncum* (kipait). Distribusi vegetasi ini telah membentuk struktur stabilisasi alami melalui sistem perakaran dalam dan rapat, sehingga fungsi ekologis seperti penahan erosi, peneduh alami, dan pemecah aliran permukaan masih berjalan efektif.

Meskipun memiliki integritas ekologi yang tinggi, area ini tetap menghadapi tekanan fisik, terutama risiko instabilitas lereng pada titik dengan kemiringan ekstrem. Getaran kendaraan yang melintasi jembatan berpotensi mempercepat pergeseran struktur tanah pada tebing yang tidak terproteksi penuh oleh akar vegetasi besar. Selain itu, absennya jalur inspeksi atau pembatas fisik menyebabkan akses informal warga ke tepi lereng, yang menimbulkan pemadatan tanah, kerusakan vegetasi kecil, dan pelemahan struktur permukaan tebing. Aktivitas masyarakat di lokasi ini sangat rendah dan bersifat pasif, tanpa adanya kegiatan ekonomi maupun domestik, sehingga perubahan lanskap lebih banyak disebabkan oleh faktor fisik dibandingkan tekanan sosial.

Area Tapak Titik 5

Area Tapak 5 (–7.989150, 112.657900) berada pada segmen hilir Sungai Amprong di bawah permukiman Cemorokandang dan memperlihatkan karakter morfologi sungai yang melengkung secara alami. Segmen ini diapit oleh zona hijau semi-alami dengan dominasi semak belukar yang memperlihatkan kondisi vegetasi yang relatif tidak terkelola. Topografi tapak bersifat asimetris, dengan satu sisi tebing yang curam dan sisi lainnya lebih datar, sehingga menciptakan potensi erosi terutama pada bagian dengan kemiringan ekstrem. Kondisi ini semakin dipengaruhi oleh volume limpasan dari permukiman hulu meskipun tekanan aktivitas manusia langsung di lokasi ini sangat rendah.

Tutupan vegetasi terdiri atas *Gigantochloa apus* (bambu apus), *Pterocarpus indicus* (angsana), serta vegetasi domestik seperti *Musa spp.* (pisang). Namun, pola distribusi spesies tersebut masih parsial dan tidak membentuk struktur riparian berlapis. Sistem perakaran bambu memberikan stabilisasi lokal, tetapi

ketidakhadiran strata vegetasi penutup tanah menyebabkan perlindungan ekologis yang tidak merata di sepanjang tebing sungai. Kurangnya aktivitas sosial di sempadan menjadikan area ini sebagai zona pasif, di mana perubahan lanskap terutama dikendalikan oleh faktor hidrologis dan dinamika morfologi sungai.

Berdasarkan hasil analisis lapangan dan pemetaan spasial, diperoleh perbandingan kuantitatif antar segmen riparian sebagai berikut:

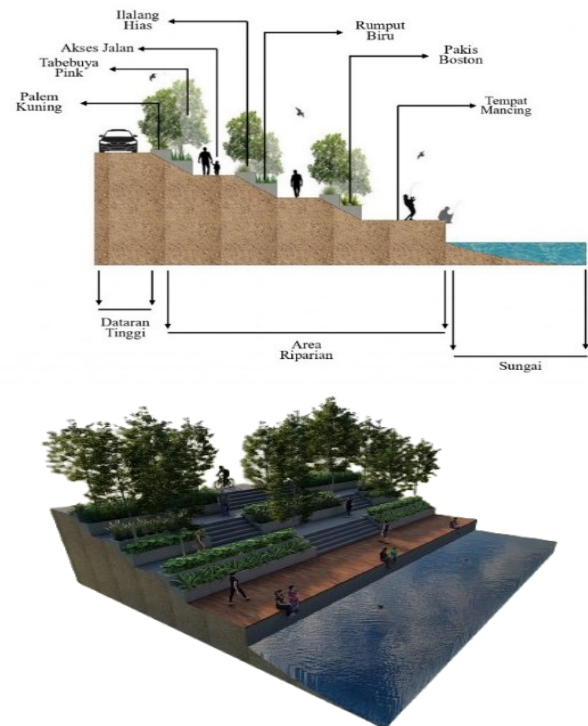
- Tutupan vegetasi: Titik 1–3 berkisar 20–40%, sedangkan Titik 4–5 mencapai >60%
- Jarak bangunan dari tepi sungai: Titik 1–3 berkisar 3–10 m, sedangkan Titik 4–5 >15 m
- Tingkat kerentanan erosi: tinggi pada Titik 1 dan 3, sedang pada Titik 2 dan 5, serta rendah pada Titik 4

Data ini menunjukkan korelasi langsung antara rendahnya tutupan vegetasi dan kedekatan permukiman dengan meningkatnya kerentanan ekologis kawasan riparian.

Sintesis Area

Area Titik 1

Kondisi Titik 1 mencerminkan bentuk degradasi riparian khas kawasan urban padat, di mana hilangnya ruang transisi ekologis menyebabkan penurunan fungsi penahan erosi dan filtrasi alami. Jarak bangunan yang sangat dekat dengan sungai mengakibatkan hilangnya riparian buffer, situasi yang telah diidentifikasi sebagai pemicu naiknya beban sedimen dan polutan pada sungai perkotaan (Vollmer et al., 2015). Struktur vegetasi yang tidak berlapis menunjukkan kegagalan fungsi ekologis, sejalan dengan konsep *ecological layering* (Wohl et al., 2019) yang menekankan pentingnya stratifikasi vegetasi untuk stabilitas tebing dan perlambatan limpasan. Hubungan sosial yang negatif antara warga dan sungai ditandai kurangnya aktivitas dan kehadiran limbah domestik menggambarkan orientasi ruang belakang. Studi perkotaan menunjukkan bahwa pola ini berkaitan dengan rendahnya kepedulian terhadap kualitas lingkungan sungai (Winarni et al., 2025). Berdasarkan sintesis data fisik, ekologis, dan sosial, Titik 1 dapat dikategorikan sebagai zona kerentanan tinggi yang memerlukan intervensi restoratif berbasis vegetasi berlapis (lihat Gambar 3) dan pengelolaan limbah permukiman.



Gambar 3. Konsep Perancangan Lanskap Area 1

Area Titik 2

Kondisi Titik 2 menggambarkan ketidakterpaduan antara infrastruktur rekayasa teknis dan fungsi alamiah ekosistem sungai. Tutupan vegetasi yang rendah dan tidak berlapis menyebabkan tidak adanya dukungan biofisik bagi DAM Rolak, sehingga sistem hidraulik di segmen ini bekerja tanpa penyangga ekologis yang dapat mengurangi erosi, memecah limpasan, atau meningkatkan penyaringan polutan. Fenomena ini konsisten dengan literatur *nature-based solutions* yang menekankan peran vegetasi riparian dalam memperkuat kinerja infrastruktur hidrologi (Wohl et al., 2019). Kurangnya aktivitas sosial yang positif turut mempercepat degradasi karena sempadan kehilangan fungsi pemeliharaan berbasis komunitas, sebagaimana diidentifikasi dalam kajian ruang publik perkotaan. Secara keseluruhan, Titik 2 merupakan zona transisi dengan potensi restorasi tinggi, di mana integrasi elemen vegetasi adaptif dapat meningkatkan efektivitas bendung sekaligus memulihkan kontinuitas ekologis koridor sungai (lihat Gambar 4).



Gambar 4. Konsep Perancangan Lanskap Area 2

Area Titik 3

Titik 3 mencerminkan kondisi ketidakseimbangan ekologis yang umum terjadi pada sungai perkotaan, di mana di satu sisi sempadan masih memiliki potensi biofisik (rumpun bambu apus), sedangkan di sisi lainnya mengalami degradasi berat akibat tekanan spasial permukiman. Vegetasi bambu yang tidak didukung oleh struktur vegetasi berlapis menunjukkan fungsi ekologis yang parsial, sejalan dengan temuan Wohl et al., (2019) bahwa stabilitas riparian membutuhkan kombinasi strata vegetasi, bukan dominasi satu spesies. Sementara itu, kedekatan bangunan dengan sungai menghilangkan zona penyangga, memicu erosi, dan mempercepat limpasan, fenomena yang telah diidentifikasi sebagai penyebab utama degradasi riparian di kawasan padat urban (Vollmer et al., 2015). Pola sirkulasi informal yang tidak terkelola turut mempercepat kerusakan, mengonfirmasi hubungan antara aktivitas sosial yang tidak teratur dengan peningkatan degradasi tebing sungai. Secara keseluruhan, Titik 3 dapat dikategorikan sebagai area dengan *dual character* atau memiliki aset ekologis penting namun juga tekanan fisik tinggi, yang membutuhkan strategi pemulihan untuk memulihkan kontinuitas ekologis di kedua sisi sempadan (lihat Gambar 5).



Gambar 5. Konsep Perancangan Lanskap Area 3

Area Titik 4

Titik 4 merupakan segmen riparian dengan tingkat keutuhan ekologis tertinggi dalam koridor penelitian, ditandai oleh keberadaan vegetasi lokal adaptif yang telah membentuk sistem biofisik stabil secara alami. Komunitas riparian berbasis spesies lokal cenderung memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap erosi dan gangguan hidrologis. Namun, kemiringan lereng yang curam serta aktivitas akses informal menunjukkan bahwa stabilitas ekologis dapat terganggu apabila tidak disertai pengelolaan kawasan yang terarah. Dalam konteks *green infrastructure*, area ini dikategorikan sebagai zona konservasi prioritas, di mana strategi intervensi kurang lebih efektif dibandingkan dengan pendekatan rekayasa struktural. Dengan demikian, Titik 4 menjadi lokasi ideal untuk mempertahankan fungsi ekologis yang sudah terbentuk sekaligus memperkuat ketahanan jangka panjang terhadap potensi gangguan fisik (lihat Gambar 6).



Gambar 6. Konsep Perancangan Lanskap Area 4

Area Titik 5

Titik 5 merupakan segmen semi-alami yang menunjukkan potensi pemulihan ekologi yang tinggi karena tekanan sosial yang rendah dan dominasi faktor fisik dalam pembentukan lanskap. Keberadaan vegetasi seperti bambu dan angsa memberi perlindungan parsial terhadap erosi, namun ketidakberaturan strata vegetasi menunjukkan bahwa fungsi riparian belum terbentuk secara optimal. Hal ini sejalan dengan literatur restorasi riparian yang menekankan pentingnya struktur vegetasi berlapis untuk meningkatkan ketahanan tebing dan kapasitas filtrasi alami. Kondisi topografi asimetris memperkuat urgensi penguatan fungsi ekologis melalui pendekatan restorasi pasif yang terbukti efektif pada kawasan dengan tekanan antropogenik rendah dan

memungkinkan suksesi alami berlangsung lebih stabil. Dengan demikian, Titik 5 dapat menjadi koridor ekologis strategis apabila dikelola sebagai zona penyangga alami untuk memperkuat integritas hidrologis dan kualitas lingkungan sungai (lihat [Gambar 7](#)).



Gambar 7. Konsep Perancangan Lanskap Area 5

Sintesis Komparasi Antar Lima Area

Hasil komparasi menunjukkan adanya gradasi kondisi ekologis pada koridor Sungai Amprong yang sangat dipengaruhi oleh kedekatan permukiman, intensitas aktivitas manusia, dan kualitas struktur vegetasi riparian. Titik 1–3 memiliki tutupan vegetasi rendah (<40%), bentuk bangunan yang menempel pada tepi sungai, serta ketiadaan zona penyangga berlapis sehingga meningkatkan laju erosi, sedimentasi, dan limpasan permukaan. Titik 1 memperlihatkan ketidakhadiran buffer vegetatif yang paling ekstrem, Titik 2 mengalami ketidakselarasan antara infrastruktur teknis dan fungsi ekologis, sedangkan Titik 3 menunjukkan ketimpangan vegetasi antara dua sisi sungai akibat tekanan pemanfaatan ruang. Fenomena ini selaras dengan temuan penelitian perkotaan bahwa intensitas aktivitas domestik dan akses informal mempercepat degradasi struktur riparian ([Vollmer et al., 2015](#)).

Sebaliknya, Titik 4 dan 5 menampilkan stabilitas ekologis yang lebih baik dengan tutupan vegetasi >60% serta tekanan sosial rendah. Vegetasi lokal adaptif yang tersusun secara natural memungkinkan fungsi ekologis berjalan efektif dalam memperkuat tebing, meminimalkan limpasan, dan meningkatkan

kualitas habitat, sejalan dengan teori restorasi riparian yang menekankan peran vegetasi berlapis dalam meningkatkan ketahanan ekosistem terhadap gangguan ([Wohl et al., 2019](#)). Perbedaan kondisi antarsegmen menegaskan perlunya strategi intervensi yang berbeda untuk setiap lokasi: mulai dari restorasi intensif pada segmen terdegradasi hingga konservasi dan penguatan pada segmen yang masih stabil. Segmentasi berbasis karakter ekologis ini menjadi dasar konseptual bagi pengembangan desain lanskap ekologis yang berbasis *nature-based solutions* pada Sungai Amprong.

Hasil ini menunjukkan adanya hubungan kausal yang konsisten antara tekanan antropogenik dan degradasi struktur ekologis riparian. Segmen dengan intensitas aktivitas manusia yang tinggi dan kedekatan bangunan terhadap sungai cenderung mengalami penurunan kualitas vegetasi dan peningkatan kerentanan terhadap erosi. Sebaliknya, segmen dengan tekanan rendah menunjukkan kemampuan pemulihan alami yang lebih tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa keberhasilan restorasi riparian tidak hanya ditentukan oleh intervensi vegetatif, tetapi juga oleh pengendalian pemanfaatan ruang di sempadan sungai. Dengan demikian, variasi tingkat kerentanan ini menjadi dasar dalam perumusan pendekatan desain lanskap adaptif berbasis segmentasi.

Untuk memperjelas perbandingan karakter biofisik, tekanan antropogenik, dan tingkat kerentanan antarsegmen riparian, dilakukan sintesis komparatif yang dirangkum pada [Tabel 1](#).

Tabel 1 menunjukkan bahwa kombinasi antara rendahnya tutupan vegetasi (<40%) dan kedekatan bangunan terhadap sungai (<10 m) menjadi indikator utama meningkatnya kerentanan ekologis pada segmen riparian perkotaan. Hal ini menunjukkan bahwa parameter spasial (jarak bangunan) dan parameter ekologis (struktur vegetasi) berfungsi sebagai indikator kunci dalam menentukan tingkat kerentanan riparian secara terpadu.

Tabel 1. Perbandingan Karakteristik Riparian Antar Segmen Sungai Amprong

Parameter	Titik 1 (Buring)	Titik 2 (DAM Rolak)	Titik 3 (Lesanpuro)	Titik 4 (Madyopuro)	Titik 5 (Cemorokandang)
Karakter Lanskap	Urban padat, dekat pasar	Zona transisi infrastruktur-ekologi	Dual karakter (bambu vs permukiman)	Semi-alami, mikrohabitat stabil	Semi-alami, morfologi meander
Topografi	Landai	Datar	Landai-datar	Curam	Asimetris (curam-landai)
Jarak Bangunan ke Sungai	3-7 m	±5-10 m	<10 m (sisi barat)	>15 m	>15 m
Tutupan Vegetasi (%)	Rendah (<30%)	Sedang (35-40%)	Sedang (tidak merata)	Tinggi (>60%)	Sedang-tinggi (>60%, tidak merata)
Struktur Vegetasi	Tidak berlapis	Tidak berlapis	Parsial (dominan bambu)	Berlapis (stabil alami)	Parsial (tidak berlapis)
Spesies Dominan	Angsana, bambu apus	Mahoni, karet merah	Bambu apus	Bambu apus, waru, kipait	Bambu apus, angsana, pisang
Kondisi Tebing	Rapuh, rawan erosi	Erosi akibat turbulensi bendung	Tidak stabil (tanpa buffer)	Stabil (akar vegetasi kuat)	Rawan lokal (asimetris)
Limpasan Permukaan	Tinggi (tanpa drainase)	Tinggi	Tinggi	Rendah-sedang	Sedang (dipengaruhi hulu)
Zona Buffer Riparian	Tidak terbentuk	Tidak optimal	Tidak ada (sisi barat)	Terbentuk alami	Terbatas/parsial
Tekanan Aktivitas Manusia	Tinggi (permukiman + limbah)	Sedang (transit)	Sedang-tinggi (akses informal)	Rendah	Rendah
Pola Interaksi Sosial	Negatif (area belakang)	Minim (ruang terlantar)	Pasif (akses informal)	Sangat rendah	Sangat rendah
Tingkat Kerentanan	Tinggi	Sedang-tinggi	Tinggi	Rendah	Sedang
Potensi Restorasi	Rendah (butuh intervensi intensif)	Tinggi	Sedang	Tinggi (konservasi)	Tinggi (restorasi pasif)
Arahan Intervensi	Restorasi intensif + control limbah	Restorasi integratif (vegetasi + infrastruktur)	Restorasi adaptif (dua sisi)	Konservasi & penguatan	Restorasi pasif & penguatan vegetasi

Temuan penelitian ini memperkuat argumen bahwa degradasi riparian dalam konteks perkotaan tidak hanya dipengaruhi oleh faktor biofisik, tetapi juga oleh konfigurasi spasial dan pola pemanfaatan ruang. Kedekatan bangunan terhadap sungai terbukti menjadi faktor dominan yang menghilangkan fungsi buffer ekologis, sementara rendahnya struktur vegetasi berlapis mempercepat proses erosi

dan limpasan permukaan. Hal ini menunjukkan bahwa restorasi riparian tidak dapat hanya mengandalkan intervensi vegetatif, tetapi harus disertai pengendalian tata ruang sempadan sungai. Dengan demikian, pendekatan segmentasi adaptif yang diusulkan dalam penelitian ini menjadi relevan sebagai strategi integratif antara desain lanskap dan pengelolaan ruang perkotaan.

Konsep Desain Lanskap Riparian

Berdasarkan pendekatan segmentasi berbasis kerentanan tersebut, strategi desain lanskap adaptif kemudian dirumuskan untuk masing-masing segmen. Konsep desain lanskap dirumuskan berdasarkan hasil analisis komparatif lima titik riparian Sungai Amprong yang menunjukkan gradasi kondisi ekologis dari segmen sangat terdegradasi hingga segmen semi-alami. Perancangan mengadopsi pendekatan *nature-based solutions* dan kerangka *green infrastructure*, yang menekankan pemulihan fungsi ekologis melalui penguatan struktur vegetasi berlapis, peningkatan kapasitas infiltrasi, stabilisasi tebing alami, dan restorasi habitat. Dengan pendekatan tersebut, setiap segmen sungai diperlakukan sebagai bagian dari infrastruktur ekologis perkotaan yang memiliki peran penting dalam pengendalian limpasan, filtrasi polutan, dan penyediaan konektivitas ekologis.

Intervensi desain dibagi menjadi tiga kategori berbasis tingkat tekanan ekologis: (1) restorasi intensif pada segmen dengan degradasi tinggi (Titik 1–2), (2) restorasi adaptif pada segmen transisi (Titik 3), dan (3) konservasi–penguatan ekologis pada segmen yang relatif stabil (Titik 4–5). Prinsip utama yang diterapkan meliputi penerapan vegetasi pionir berakar kuat pada lokasi kritis, optimalisasi vegetasi eksisting untuk memperbaiki fungsi koridor ekologis, serta konservasi aktif pada area yang masih memiliki integritas ekosistem tinggi. Pendekatan ini menghindari intervensi sosial rekreatif masif dan memastikan bahwa proses pemulihan ekologis tetap berlangsung secara alami dan berkelanjutan. Dengan demikian, konsep desain yang ditetapkan menjadi dasar dalam membentuk koridor Sungai Amprong yang tangguh, stabil, dan mendukung peningkatan kualitas lingkungan perkotaan dalam jangka panjang.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa degradasi riparian pada sungai perkotaan membentuk pola gradasi ekologis yang secara langsung dipengaruhi oleh intensitas tekanan antropogenik dan kualitas struktur vegetasi. Pada konteks Sungai Amprong, gradasi tersebut terlihat dari perbedaan kondisi antara segmen hulu–tengah (Titik 1–3) yang

mengalami tekanan berat akibat kedekatan permukiman, kurangnya zona penyangga, dan tingginya limpasan permukaan, serta segmen hilir–semi alami (Titik 4–5) yang menunjukkan stabilitas ekologi karena tutupan vegetasi lebih baik dan rendahnya aktivitas manusia.

Tutupan vegetasi berlapis terbukti menjadi faktor penentu utama dalam menjaga stabilitas tebing, kualitas habitat, dan fungsi hidrologis. Konsep desain berbasis *nature-based solutions* memberikan arah pemulihan yang efektif melalui strategi bertingkat: restorasi intensif pada segmen terdegradasi, restorasi adaptif pada segmen transisi, serta konservasi–penguatan ekologis pada segmen yang masih utuh. Pendekatan ini memungkinkan pemulihan fungsi ekologis tanpa intervensi struktural berat, serta memperkuat konektivitas ekosistem di sepanjang koridor sungai. Secara keseluruhan, rehabilitasi Sungai Amprong menuntut pengelolaan berbasis ekologi yang adaptif dan kontekstual sesuai karakter tiap segmen. Implementasi strategi pemulihan yang tepat akan membentuk koridor sungai yang lebih *resilient* dan berfungsi sebagai infrastruktur ekologis perkotaan yang berkelanjutan.

Kontribusi utama penelitian ini terletak pada pengembangan pendekatan segmentasi riparian berbasis tingkat kerentanan sebagai dasar perumusan strategi restorasi ekologis adaptif pada sungai perkotaan, yang menjembatani analisis biofisik dengan implementasi desain lanskap berbasis bukti.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan pendekatan kuantitatif berbasis pemodelan hidrologi dan simulasi spasial guna mengukur efektivitas desain secara lebih terukur. Selain itu, integrasi metode partisipatif dengan masyarakat lokal perlu dilakukan untuk memperkuat keberlanjutan implementasi desain. Secara praktis, konsep zonasi adaptif yang dihasilkan dapat digunakan sebagai acuan dalam perencanaan koridor sungai perkotaan, khususnya dalam penyusunan kebijakan sempadan sungai berbasis ekologi di Kota Malang dan wilayah dengan karakteristik serupa.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahern, J. (2012). Urban Landscape Sustainability and Resilience: The Promise and Challenges of Integrating Ecology With Urban Planning and Design. *Landscape Ecology*, 28(6), 1203–1212. <https://doi.org/10.1007/s10980-012-9799-z>
- Andini, A. W. & Purnomo, A. (2019). Kajian Kelayakan Kualitas Sungai Amprong sebagai Air Baku PDAM Kota Malang Menggunakan Metode Storet. *Jurnal Purifikasi*, 19(2), 47–52. <https://doi.org/10.12962/j25983806.v19.i2.378>
- Baruah, A., & Sarma, A. K. (2021). Ecological Flow Assessment Using Hydrological and Hydrodynamic Routing Model in Bhogdoi River, India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4). <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00982-9>
- Forman, R. (1995). *Land Mosaics: The Ecology of Landscapes and Regions*. Cambridge University Press.
- Gold, S. M. (1980). *Recreation planning and design*. McGraw-Hill.
- Ilhami, W. T., & Affandy, A. (2018). Upaya Rehabilitasi DAS Citarum Dengan Desain Lanskap (Studi Kasus: Bantaran Sungai Citarum Desa Bojongsoang, Bandung dan Desa Purwadana, Karawang). *Jurnal Arsitektur Lansekap*, 4(1), 99–110. <https://doi.org/10.24843/jal.2018.v04.i01.p13>
- Majumdar, A., & Avishek, K. (2023). Riparian Zone Assessment and Management: An Integrated Review Using Geospatial Technology. *Water, Air, and Soil Pollution*. 234(5), 319. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06329-1>
- Majumdar, A., & Avishek, K. (2025). Mitigating Riparian Buffer Zone Degradation Through Policy Interventions and Learnings from Best Practices. *Discover Environment*, 3(1), 84. <https://doi.org/10.1007/s44274-025-00288-6>
- Messah, V. Y., Binsasi, R., Binsasi, Y., & Bani, P. W. (2025). Keanekaragaman Jenis Vegetasi Riparian pada Daerah Hulu dan Hilir Sungai Noemuti Kabupaten Timor Tengah Utara. *Biocaster: Jurnal Kajian Biologi*, 5(3), 126–142. <https://doi.org/10.36312/biocaster.v5i3.415>
- Naiman, R. J., & Décamps, H. (1997). The Ecology of Interfaces: Riparian Zones. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 28(Volume 28, 1997), 621–658. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.28.1.621>
- Prastiyo, Y. B., Kaswanto, R. L., & Arifin, H. S. (2020). Plants Diversity of Agroforestry System in Ciliwung Riparian Landscape, Bogor Municipality. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 477(1), 012024. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/477/1/012024>
- Setyabudi, I., & Santoso, D. K. (2024). *Teori Perancangan Taman Lingkungan: Membahas Tahapan Awal Proses Perancangan Taman Lingkungan*. Eureka Media Aksara, Purbalingga. <https://repository.unitri.ac.id/3562/>
- Solihat, R. F., & Luth, F. (2021). Keanekaragaman Tumbuhan Fitoremediasi Di Ekosistem Riparian DAS Citarum. *Paspalum: Jurnal Ilmiah Pertanian*, 9(2), 145–149. <https://doi.org/10.35138/paspalum.v9i2.298>
- Veról, A. P., Bigate Lourenço, I., Fraga, J. P. R., Battemarco, B. P., Linares Merlo, M., Canedo de Magalhães, P., & Miguez, M. G. (2020). River Restoration Integrated with Sustainable Urban Water Management for Resilient Cities. *Sustainability*, 12(11), 4677. <https://doi.org/10.3390/su12114677>
- Vollmer, D., Prescott, M. F., Padawangi, R., Girot, C., & Grêt-Regamey, A. (2015). Understanding the Value of Urban Riparian Corridors: Considerations in Planning for Cultural Services Along an Indonesian River. *Landscape and Urban Planning*, 138, 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2015.02.011>
- Wardiningsih, S., & Salam, B. F. (2019). Perencanaan RTH Sempadan Sungai Ciliwung D I Kawasan Kampung Pulo Dan Bukit Duri Jakarta. *NALARs*, 18(1), 65–74. <https://doi.org/10.24853/nalars.18.1.65-74>

- Winarni, S., Afdholy, A. R., Agustina, F. D., Mabrur, A. Y., & Widyarthara, A. (2025). Pola Permukiman Bantaran Sungai Brantas Kota Malang. *Pawon: Jurnal Arsitektur*, 9(01), 181–196. <https://doi.org/10.36040/pawon.v9i01.12954>
- Wohl, E., Brierley, G., Cadol, D., Coulthard, T. J., Covino, T., Fryirs, K. A., Grant, G., Hilton, R. G., Lane, S. N., Magilligan, F. J., Meitzen, K. M., Passalacqua, P., Poepl, R. E., Rathburn, S. L., & Sklar, L. S. (2019). Connectivity as an Emergent Property of Geomorphic Systems. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(1), 4–26. <https://doi.org/10.1002/esp.4434>