

Integrasi Green–Blue Infrastructure untuk Ketahanan Iklim dan Air di Nusa Tenggara Timur: Sebuah Systematic Literature Review dari Perspektif Semi-Arid Urban Systems

Alvin Alfredo Bara^{1*}, Remigildus Cornelis¹, Debora Lau¹

¹Universitas Nusa Cendana, Indonesia

alvin_bara@staf.undana.ac.id*

| Received: 06/11/2025 | Revised: 18/11/2025 | Accepted: 25/11/2025 |

Copyright©2025 by authors. Authors agree that this article remains permanently open access under the
terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License

Abstrak

Wilayah Nusa Tenggara Timur (NTT) yang beriklim semi-arid menghadapi tekanan lingkungan berupa kekeringan berkepanjangan, peningkatan suhu permukaan, serta limpasan cepat saat hujan intens. Kondisi tersebut menuntut solusi berbasis alam untuk menjaga keseimbangan hidrologis dan ketahanan iklim. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi efektivitas *Green Infrastructure (GI)* dan *Blue Infrastructure (BI)* dalam mengatasi krisis air dan panas perkotaan, sekaligus merumuskan model integrasi GI–BI yang adaptif terhadap kondisi sosial-ekologis NTT. Kajian dilakukan melalui *Systematic Literature Review (SLR)* mengikuti pedoman PRISMA, dengan menelaah sembilan publikasi internasional terkini mengenai kinerja GI–BI di wilayah semi-arid. Sintesis dari sembilan studi tersebut menunjukkan bahwa kombinasi elemen GI (bioretensi, atap hijau, ruang vegetasi, pohon jalan) dan BI (kolam retensi, kanal alami, waduk mikro) secara konsisten dilaporkan mampu memulihkan neraca air pra-pengembangan sebesar 82–90%, menurunkan limpasan 35–45%, serta menurunkan suhu udara 3–5°C, bergantung pada konfigurasi spasial dan kondisi iklim setempat. Hambatan utama implementasi mencakup keterbatasan pendanaan, koordinasi lintas-sektor, serta minimnya data kinerja jangka panjang. Temuan ini menegaskan bahwa GI–BI bukan sekadar strategi teknis, tetapi instrumen kebijakan yang esensial untuk perencanaan tata ruang adaptif, penguatan pembiayaan hijau, dan pengembangan sistem pemantauan lingkungan berbasis penginderaan jauh. Penelitian ini menyoroti urgensi pengembangan kerangka implementasi jangka panjang yang terintegrasi guna memastikan keberlanjutan penerapan GI–BI dalam memperkuat ketahanan iklim NTT.

Kata kunci: *Green Infrastructure*; *Blue Infrastructure*; semi-arid; NTT; ketahanan air–iklim

Abstract

The semi-arid region of East Nusa Tenggara (NTT) faces increasing environmental pressures, including prolonged droughts, rising surface temperatures, and rapid

runoff during short, intense rainfall events. These conditions necessitate nature-based solutions to restore hydrological balance and strengthen climate resilience. This study aims to identify the effectiveness of Green Infrastructure (GI) and Blue Infrastructure (BI) in addressing water scarcity and urban heat challenges, and to formulate an integrated GI–BI model that is adaptive to the socio-ecological conditions of NTT. A Systematic Literature Review (SLR) was conducted following PRISMA guidelines by examining nine recent international publications on GI–BI performance in semi-arid regions. Synthesis of the nine studies indicates that combinations of GI elements (bio-retention, green roofs, vegetated spaces, street trees) and BI components (retention ponds, natural channels, micro-reservoirs) consistently contribute to restoring 82–90% of pre-development water balance, reducing runoff by 35–45%, and lowering air temperatures by 3–5°C, depending on spatial configuration and local climatic variability. Key barriers to implementation include limited financing, weak cross-sectoral coordination, and insufficient long-term performance data. These findings underscore that GI–BI functions not only as technical interventions but also as critical policy instruments for adaptive spatial planning, green financing frameworks, and remote-sensing-based environmental monitoring in NTT. The study highlights the urgency of developing an integrated long-term implementation framework to ensure the sustainability of GI–BI adoption in enhancing regional climate resilience.

Keywords: Green Infrastructure; Blue Infrastructure; semi-arid; urban resilience; Indonesia

Pendahuluan

Wilayah semi-arid seperti Nusa Tenggara Timur (NTT) menghadapi tekanan ekologis yang meningkat akibat pola hujan pendek berintensitas tinggi, kekeringan berkepanjangan, serta konversi lahan yang memperburuk kondisi mikroklimat. Variabilitas iklim tersebut menurunkan kapasitas infiltrasi, meningkatkan limpasan permukaan, dan memicu kenaikan suhu di kawasan urban dan semi-urban, terutama di pusat permukiman pesisir (Attar et al., 2025; Dolman et al., 2025). Kondisi ini menuntut strategi pengelolaan lingkungan yang adaptif dengan pendekatan berbasis alam untuk meningkatkan ketahanan air dan iklim.

Studi mengenai efektivitas *Green Infrastructure (GI)* dan *Blue Infrastructure (BI)* di wilayah semi-arid masih terbatas, terutama untuk konteks tropis seperti NTT. Sebagian besar penelitian sebelumnya dilakukan di wilayah subtropis atau lembap, sehingga diperlukan analisis yang lebih terfokus terhadap karakteristik ekologis dan sosial semi-arid tropis (Meerow et al., 2021; Okour & Shaweesh, 2024). Penelitian ini menerapkan metode *Systematic Literature Review (SLR)* berbasis PRISMA dengan ruang lingkup yang eksplisit pada kajian GI–BI di kawasan urban dan semi-urban semi-arid, sehingga hasilnya dapat dikontekstualisasikan untuk kebutuhan perencanaan ruang NTT.

Kerangka teoretis penelitian ini merujuk pada *Ecosystem Services Theory*, yang menekankan bahwa GI–BI berperan sebagai bagian dari *ecological engineering* untuk meningkatkan jasa lingkungan seperti regulasi air, penyejukan mikroklimat, dan penyimpanan air permukaan (Feng et al., 2016; Liu et al., 2025). Dalam perspektif *nature-based solutions*, GI

seperti vegetasi kota, atap hijau, dan bioretensi meningkatkan infiltrasi dan mengurangi panas permukaan. Sementara BI seperti kolam retensi dan kanal alami memperkuat detensi air dan mereduksi risiko banjir musiman.

Agar konsisten dengan karakteristik metodologis SLR, penelitian ini tidak merumuskan hipotesis kausal, tetapi mengarahkan kajian melalui dua pertanyaan penelitian utama, yaitu:

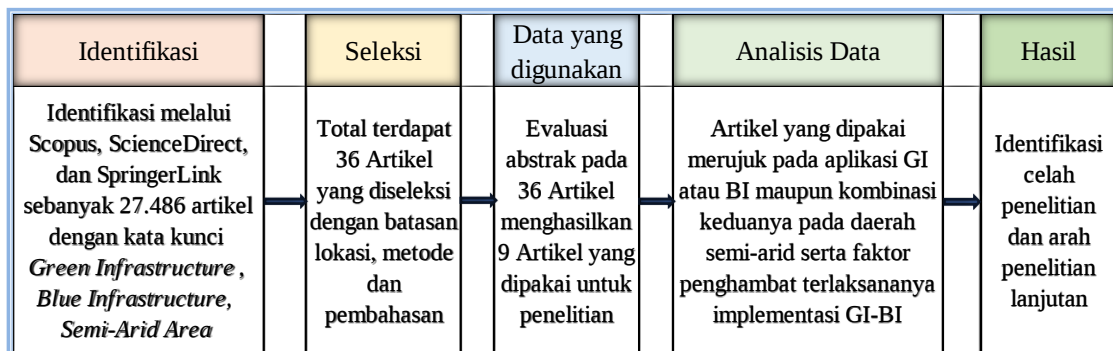
1. Bagaimana efektivitas GI-BI dalam meningkatkan regulasi hidrologis dan penurunan suhu di wilayah semi-arid berdasarkan bukti empiris dari studi global?
2. Bagaimana temuan tersebut dapat diadaptasikan menjadi model integrasi GI-BI yang relevan bagi kondisi sosial-ekologis urban dan semi-urban di NTT?

Sementara itu, beberapa kesenjangan penelitian teridentifikasi pada konteks wilayah semi-arid tropis, antara lain keterbatasan data jangka panjang, minimnya kajian mengenai konfigurasi spasial GI-BI, serta rendahnya kapasitas kelembagaan dalam implementasi (Dolman et al., 2025). Studi ini berupaya menutup celah tersebut dengan menyintesis bukti empiris terbaru dan mengonseptualisasikan model GI-BI yang sesuai dengan realitas ekologis NTT.

Secara keseluruhan, GI-BI berperan strategis dalam penguatan ketahanan air dan iklim di wilayah semi-arid. Integrasi kedua sistem ini meningkatkan infiltrasi, evapotranspirasi, serta kapasitas detensi air permukaan, sekaligus menciptakan lingkungan yang lebih sejuk dan produktif (Masoudi et al., 2025). Temuan ini menunjukkan bahwa GI-BI merupakan pendekatan penting bagi pembangunan berketahanan iklim di NTT yang berorientasi pada keberlanjutan ekologis dan kesejahteraan masyarakat.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan desain *Systematic Literature Review* (SLR) untuk mengidentifikasi dan mensintesis bukti ilmiah mengenai efektivitas *Green Infrastructure* (GI) dan *Blue Infrastructure* (BI) pada wilayah semi-arid. Pendekatan SLR dipilih karena memungkinkan analisis berbasis bukti yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi untuk menjawab pertanyaan penelitian yang kompleks (Okour & Shaweesh, 2024). Dalam konteks penelitian lingkungan, SLR berfungsi sebagai pendekatan yang menstandarkan proses peninjauan literatur sehingga hasilnya lebih objektif dan bebas bias interpretatif. Kerangka analisis penelitian ini mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA), yang mencakup empat tahapan utama: identifikasi, penyaringan, kelayakan, dan inklusi artikel (Masoudi et al., 2025). Gambar 1 menampilkan Diagram Prisma Proses SLR.



Gambar 1. Proses SLR

Tahapan identifikasi dilakukan dengan menelusuri basis data ilmiah internasional seperti Scopus, ScienceDirect, dan SpringerLink menggunakan rentang waktu publikasi 2015–2025. Kombinasi kata kunci seperti “*green infrastructure*”, “*blue infrastructure*”, “*semi-arid*”, “*water resilience*”, dan “*urban heat*” digunakan untuk memastikan cakupan tematik yang luas. Selanjutnya, kriteria inklusi ditetapkan untuk membatasi artikel yang bersifat empiris atau *review* kuantitatif yang memuat indikator performa hidrologis (neraca air, limpasan, evapotranspirasi) dan termal (penurunan suhu udara atau suhu permukaan). Artikel yang bersifat konseptual murni, tidak berbahasa Inggris, atau tanpa data kuantitatif dieksklusi dari analisis guna menjaga konsistensi komparatif hasil.

Setelah proses penyaringan, data primer dari setiap artikel yang memenuhi syarat diekstraksi secara sistematis. Informasi yang dikumpulkan meliputi lokasi penelitian, jenis intervensi GI–BI, metode analisis, dan hasil utama yang terukur. Data tersebut kemudian dikodekan ke dalam kategori tematik: (1) kinerja hidrologis, (2) efektivitas pendinginan mikroklimat, (3) sinergi ekologi hijau-biru, (4) hambatan implementasi, dan (5) implikasi kebijakan (Kumar et al., 2024; Marquez-Torres et al., 2025). Pendekatan ini terinspirasi dari sintesis komparatif yang digunakan oleh Meerow et al., (2021) dalam menilai *green stormwater infrastructure* di kota semi-arid, yang menekankan pentingnya replikasi spasial antar konteks iklim.

Untuk menjamin validitas dan reliabilitas hasil, dilakukan triangulasi antar sumber data dan pemeriksaan keseragaman metodologi antar studi. Keseragaman hasil dievaluasi berdasarkan kemunculan pola efektivitas yang konsisten di berbagai iklim semi-arid, seperti kasus Phoenix (AS), Amman (Yordania), dan Marrakech (Maroko), yang menunjukkan pola serupa dalam penurunan suhu dan limpasan (Attar et al., 2025; Feng et al., 2016). Pendekatan ini juga mempertimbangkan heterogenitas konteks sosial-ekologis sebagaimana direkomendasikan dalam studi PRISMA berbasis NbS (*Nature-based Solutions*) untuk sistem urban kering (Dolman et al., 2025; Okour & Shaweesh, 2024).

Keterbatasan penelitian ini meliputi perbedaan desain eksperimen dan variabilitas data kuantitatif antar studi, sebagaimana diakui pula oleh Kumar et al., (2024) yang menyoroti ketimpangan data observasi lapangan. Meski demikian, pendekatan sistematis ini menghasilkan dasar empiris yang kuat untuk mengadaptasi konsep GI–BI dalam konteks lokal NTT, dengan mempertimbangkan kondisi topografi, iklim, serta kapasitas kelembagaan daerah.

Hasil dan Pembahasan

Systematic Literature Review (SLR) terhadap sembilan studi empiris internasional mengenai kinerja *Green Infrastructure* (GI) dan *Blue Infrastructure* (BI) pada wilayah semi-arid mencakup efektivitas hidrologis, mitigasi termal, variabilitas spasial, hambatan implementasi, serta implikasi bagi konteks ekohidrologis Nusa Tenggara Timur (NTT). Temuan studi lain disajikan sebagai bukti, sementara penulis memberikan analisis interpretatif untuk relevansi dengan NTT. Tabel 1 merangkum karakteristik utama penelitian yang direview.

Distribusi Studi dan Karakteristik Penelitian

Berdasarkan proses *Systematic Literature Review* (SLR) yang mengikuti protokol PRISMA, sebanyak 27.486 artikel awal berhasil diidentifikasi melalui basis data Scopus, ScienceDirect, dan SpringerLink. Setelah melalui proses skrining dan evaluasi kelayakan, sembilan artikel utama dipilih untuk analisis sintesis mendalam. Studi-studi tersebut mencakup konteks iklim semi-arid di Amerika Utara (Phoenix, Tucson), Asia Barat (Amman, Yordania), Afrika Utara (Marrakech, Maroko), serta Australia bagian barat dan Kanada selatan.

Secara umum, penelitian yang dianalisis menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis model hidrologi (SWMM, InVEST, MIKE-URBAN) dan penginderaan jauh (*Landsat*, MODIS, NDVI, dan LST) untuk mengukur efek GI–BI terhadap suhu permukaan, neraca air, dan limpasan permukaan. Sebagian kecil studi juga mengintegrasikan analisis sosial-ekologis menggunakan kerangka DPSIR (*Driver–Pressure–State–Impact–Response*) untuk menilai hambatan implementasi di konteks perkotaan semi-arid (Okour & Shaweesh, 2024).

Efektivitas Hidrologis GI–BI di Wilayah Semi-Arid

Temuan utama menunjukkan bahwa kombinasi GI dan BI dapat memulihkan neraca air pra-pengembangan hingga 82–90%. Menurut Feng et al., (2016) dan Masoudi et al., (2025), sistem bioretensi, *rain garden*, dan *permeable pavements* efektif menahan limpasan antara 35–45%, dengan efisiensi lebih tinggi pada desain vegetasi berlapis dan infiltrasi dalam. Pada konteks NTT yang memiliki curah hujan singkat namun intens, pendekatan ini relevan untuk meningkatkan infiltrasi dan kapasitas tampungan air mikro (*micro detention*).

Studi global juga menegaskan bahwa *blue infrastructure* seperti *retention ponds*, *swales*, dan kanal alami meningkatkan detensi air hingga 40% pada skenario iklim kering (Attar et al., 2025) Integrasi GI dan BI menghasilkan efek sinergis yaitu GI meningkatkan infiltrasi dan evapotranspirasi, sementara BI berperan menunda limpasan permukaan dan menjaga cadangan air perkotaan.

Tabel 1. Rangkuman Karakteristik Utama Penelitian

N o	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Lokasi & Iklim	Metode / Model Analisis	Jenis GI– BI yang Dikaji	Hasil Utama	Relevansi bagi NTT
1	Feng et al. (2016)	Potential of Green Infrastructure to Restore Predevelopment Water Balance	Amerika Serikat (sub- humid & semi- arid)	Simulasi hidrolog i dengan model SWMM	Rain garden, permeable pavement, bio- retention cell	GI dapat memulihkan 80–90% neraca air pra- pengembangan dan menurunkan limpasan tahunan 35– 45%.	Sangat relevan – dapat diadaptasi untuk wilayah NTT dengan intensitas hujan singkat dan tinggi.

N o	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Lokasi & Iklim	Metode / Model Analisis	Jenis GI– BI yang Dikaji	Hasil Utama	Relevansi bagi NTT
2	Dolman et al. (2025)	Urban Heat Mitigation by Green and Blue Infrastructure: Drivers, Effectiveness, and Future Needs	Kanada, AS, Australi a (multi- climate)	Analisis spasial LST & NDVI (Landsat 8)	Taman kota, kanal air, danau buatan	Penurunan suhu udara 3– 5°C di area dengan kombinasi vegetasi–air.	Relevan – membuktikan efek sinergis GI–BI terhadap mitigasi panas kota di wilayah kering.
3	Attar et al. (2025)	Green Infrastructure Performance in Arid and Semi- Arid Urban Environments	Timur Tengah (iklim arid & semi- arid)	Eksperi men lapanga n dan model InVEST	Green roof, urban forest, rainwater pond	Efisiensi penurunan suhu permukaan 4,3°C dan peningkatan infiltrasi air 38%.	Memberikan dasar kuantitatif penerapan GI di kawasan tropis kering NTT.
4	Okour & Shaweesh (2024)	Identifying the Barriers to Green Infrastructure Implementation in Semi-Arid Urban Areas Using the DPSIR Framework: Case Study of Amman, Jordan	Amman, Yordani a (semi- arid urban)	Analisis kebijaka n & DPSIR	Elemen GI dan kebijakan tata ruang	Hambatan utama: pendanaan, koordinasi lintas sektor, dan kesadaran publik.	Relevan – menjelaskan tantangan kelembagaan GI–BI yang juga terjadi di NTT.
5	Masoudi et al. (2025)	Effects of Green Infrastructure Composition and Configuration on Runoff Regulation in Watersheds: A Global Meta- analysis	Global (beraga m iklim termasu k semi- arid)	Meta- analisis statistik 78 studi	Variasi GI di DAS perkotaan	GI menurunkan limpasan hingga 45%; konfigurasi clustered lebih efektif daripada dispersed.	Relevan – menjadi acuan perencanaan spasial GI di NTT (Kupang, Soe).

N o	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Lokasi & Iklim	Metode / Model Analisis	Jenis GI– BI yang Dikaji	Hasil Utama	Relevansi bagi NTT
6	Marquez-Torres et al. (2025)	Assessing the Cooling Potential of Green and Blue Infrastructure from Twelve US Cities with Contrasting Climate Conditions	AS (Phoenix, Tucson, Austin – semi-arid)	Analisis citra satelit & korelasi LST–NDVI–NDWI	Blue ponds, urban parks, street trees	Penurunan suhu maksimum 5°C dan peningkatan indeks kenyamanan termal 0.4°C.	Relevan – mendukung rancangan ruang hijau–biru kota Kupang.
7	Liu et al. (2025)	Synthesizing the Evidence on Green and Blue Infrastructure for Urban Temperature Mitigation in Canada	Kanada Selatan (semi-arid cold)	Meta-sintesis 48 publikasi & analisis regresi spasial	Kombinasi vegetasi & perairan	Hubungan positif antara proporsi GI–BI dan penurunan LST hingga 4°C.	Relevan untuk strategi mitigasi panas kota berbasis vegetasi–air.
8	Belkhir et al. (2024)	Modelling Water Scarcity and Water Footprint of Agricultural Crops: A Case from a Semi-Arid Region in Morocco	Marrakech, Maroko (semi-arid)	Model water footprint & skenario iklim	Sistem waduk dan kanal irigasi (BI)	BI menurunkan defisit air pertanian 30% dan meningkatkan efisiensi air 20%.	Menunjukkan relevansi BI untuk ketahanan pangan di NTT.
9	Singh et al. (2023)	Mapping Built Infrastructure in Semi-Arid Systems Using Data Integration	India Barat Daya (semi-arid)	Integrasi data satelit & urban GIS	Jaringan drainase alami & waduk	Identifikasi area potensial untuk koridor hijau-biru.	Dapat digunakan untuk pemetaan prioritas GI–BI di RTRW NTT.

Efektivitas Termal dan Mitigasi Panas Perkotaan

Analisis dari Dolman et al., (2025) menunjukkan bahwa area dengan kombinasi vegetasi tinggi dan elemen air mampu menurunkan suhu udara 3–5°C dibandingkan area terbangun padat. Studi serupa oleh Masoudi et al., (2025) juga memperlihatkan bahwa rasio tutupan hijau di atas 30% berkontribusi signifikan terhadap penurunan suhu permukaan, terutama ketika dikombinasikan dengan jaringan kanal dan kolam retensi.

Dalam konteks semi-arid, peran evapotranspirasi sangat dominan sebagai mekanisme pendinginan alami. Vegetasi pohon dengan tajuk lebar dan sistem akar dalam memberikan efek *shading* dan evaporasi ganda, sementara elemen air berperan dalam penyerapan panas laten (*latent heat flux*). Dengan kondisi NTT yang memiliki rata-rata suhu siang hari 33–36°C, penerapan GI–BI yang terintegrasi berpotensi menurunkan suhu permukaan hingga mendekati batas kenyamanan termal tropis kering (28–30°C).

Variabilitas Spasial dan Faktor Penentu Efisiensi

Kinerja GI–BI dipengaruhi oleh konfigurasi spasial dan rasio distribusi vegetasi terhadap permukaan terbangun. Studi yang dilakukan oleh Liu et al., (2025) menunjukkan bahwa pola *clustered green patches* (vegetasi terkonsentrasi dalam blok) memberikan kapasitas retensi air lebih tinggi dibandingkan *dispersed patches* (vegetasi tersebar acak). Hal ini relevan untuk perencanaan kota di Kupang dan Soe yang memiliki morfologi lahan bergelombang, di mana vegetasi berkelompok di lereng dapat mengurangi erosi dan limpasan. Sementara itu, Dolman et al., (2025) menyoroti bahwa integrasi sistem data geospasial penting untuk memetakan potensi lokasi *green-blue corridors* yang menghubungkan area tangkapan air dan jaringan drainase alami.

Hambatan Implementasi GI–BI di Wilayah Kering

Hambatan utama penerapan GI–BI di wilayah semi-arid meliputi:

- a. Pendanaan dan biaya awal tinggi, yang menyulitkan pemerintah daerah mengintegrasikan NbS dalam proyek infrastruktur.
- b. Keterbatasan kapasitas kelembagaan, terutama pada koordinasi antar instansi lingkungan, pekerjaan umum, dan perencanaan tata ruang.
- c. Keterbatasan data jangka panjang, yang menghambat evaluasi manfaat hidrologis dan termal jangka menengah.
- d. Kurangnya kesadaran publik, di mana GI–BI masih dipersepsikan hanya sebagai elemen estetika, bukan infrastruktur fungsional.

Dalam konteks NTT, kondisi sosial-ekonomi masyarakat yang bergantung pada pertanian musiman menuntut adaptasi desain GI–BI yang hemat biaya dan mudah dirawat. Model *community-based GI–BI* menjadi pendekatan potensial, di mana masyarakat berpartisipasi dalam pengelolaan kolam mikro, sumur resapan, dan taman komunal.

Implikasi untuk Nusa Tenggara Timur

Sintesis hasil lintas negara menunjukkan bahwa GI–BI dapat berfungsi sebagai sistem ketahanan air dan iklim (*climate–water resilience system*) di wilayah semi-arid tropis seperti NTT. Dengan konfigurasi spasial adaptif dan kombinasi vegetasi lokal (lontar, asam, flamboyan) serta elemen air buatan (waduk mikro, kanal resapan), diharapkan dapat dicapai:

- a. Peningkatan infiltrasi air tanah $\pm 40\%$,
- b. Reduksi limpasan musiman hingga 45%,
- c. Penurunan suhu permukaan 3–5°C,
- d. Pemulihan $\pm 85\%$ neraca air pra-pengembangan.

Temuan ini mendukung integrasi GI–BI dalam kebijakan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) dan Rencana Aksi Daerah Adaptasi Perubahan Iklim (RAD-API) NTT. Dengan

dukungan pendanaan hijau (*green bond*) dan sistem pemantauan berbasis penginderaan jauh, GI–BI dapat menjadi strategi nyata dalam mewujudkan pembangunan berketahanan iklim berbasis ekosistem di wilayah semi-arid Indonesia.

Pembahasan dan Implikasi Kebijakan

Sintesis SLR menunjukkan bahwa GI–BI memiliki kontribusi signifikan terhadap pemulihan fungsi hidrologis dan mitigasi panas di wilayah semi-arid. Temuan berbagai studi menegaskan kemampuan GI dalam meningkatkan infiltrasi dan evapotranspirasi, serta efektivitas BI dalam mendetensi limpasan dan menjaga cadangan air. Analisis penulis menempatkan fungsi sinergis ini sebagai basis bagi penguatan ekohidrologi NTT, yang membutuhkan pendekatan adaptif terhadap curah hujan singkat dan suhu tinggi.

Dalam konteks NTT, GI–BI perlu dipandang sebagai infrastruktur ekologis yang melampaui fungsi estetika dan dapat menggantikan sebagian peran drainase konvensional. Efektivitasnya terletak pada kemampuan mengurangi banjir musiman dan memperbaiki kenyamanan termal, sejalan dengan peningkatan jasa ekosistem seperti konservasi air tanah dan pengaturan suhu mikro. Pendekatan berbasis komunitas dinilai paling realistis karena menyesuaikan dengan kapasitas sosial-ekonomi lokal dan memungkinkan manajemen rutin yang berkelanjutan.

Dari sisi tata ruang, integrasi GI–BI harus dilembagakan dalam RTRW dan RAD-API melalui penetapan zona hijau-biru, pengembangan jaringan koridor hijau-biru, dan penyediaan ruang infiltrasi skala mikro. Penguatan kelembagaan menjadi syarat utama, mengingat hambatan implementasi yang diidentifikasi studi lain—seperti keterbatasan pendanaan, fragmentasi kebijakan, dan kurangnya data jangka panjang—juga terjadi di NTT. Karena itu, diperlukan koordinasi lintas-sektor serta mekanisme pendanaan inovatif seperti *green finance* dan CSR lingkungan.

Pemanfaatan teknologi seperti SIG dan penginderaan jauh penting untuk memetakan lokasi prioritas dan memantau perubahan suhu maupun tutupan vegetasi secara berkelanjutan. Dengan kapasitas infiltrasi yang berpotensi meningkat hingga $\pm 40\%$, pengurangan limpasan 35–45%, dan penurunan suhu 3–5°C sebagaimana ditunjukkan studi global, GI–BI dapat berperan sebagai *low-cost adaptive infrastructure* yang memperkuat ketahanan iklim dan ekonomi hijau NTT.

Secara keseluruhan, implementasi GI–BI membutuhkan kerangka kebijakan terintegrasi yang menekankan kolaborasi pemerintah–akademisi–komunitas serta pemantauan berbasis data. Dengan pendekatan tersebut, NTT memiliki peluang besar menjadi model penerapan *nature-based solutions* untuk wilayah semi-arid tropis.

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi *Green Infrastructure* (GI) dan *Blue Infrastructure* (BI) merupakan pendekatan paling efektif untuk meningkatkan ketahanan hidrologis dan termal di wilayah semi-arid seperti NTT. Sintesis sembilan studi internasional mengindikasikan bahwa GI–BI mampu memulihkan 80–90% neraca air pra-pengembangan,

menurunkan suhu permukaan 3–5°C, dan mengurangi limpasan 35–45%. Hal ini menegaskan potensi GI–BI sebagai strategi adaptasi iklim berbasis ekosistem.

GI–BI mendukung fungsi ekohidrologis melalui peningkatan infiltrasi, evapotranspirasi, dan pendinginan mikroklimat. Untuk NTT, sistem ini dapat diadaptasi dengan memanfaatkan vegetasi lokal, desain berbiaya rendah, serta pendekatan berbasis komunitas agar sesuai kapasitas sosial-ekonomi masyarakat. Selain kebutuhan teknis, keberhasilan implementasi GI–BI sangat bergantung pada dukungan kelembagaan, ketersediaan data, dan koordinasi lintas sektor.

Penelitian ini merekomendasikan: (1) pengintegrasian GI–BI ke dalam RTRW dan RAD-API, (2) pemberian insentif bagi proyek komunitas seperti taman resapan atau waduk mikro, dan (3) penggunaan GIS serta penginderaan jauh untuk pemantauan. Untuk riset selanjutnya, diperlukan pengujian spasial berbasis data lokal NTT, termasuk pemodelan efektivitas GI–BI, evaluasi biaya-manfaat, serta eksplorasi desain yang paling sesuai dengan karakter ekologis dan budaya setempat. Dengan demikian, GI–BI dapat menjadi paradigma pembangunan berketahanan iklim yang adaptif dan berkelanjutan di wilayah semi-arid tropis.

Daftar Pustaka

- Attar, O., Leone, M., De Girolamo, A. M., Bouchaou, L., Brouziyne, Y., El Khalki, E. M., Berrouch, H., Taia, S., Hssaisoune, M., & Ait Brahim, Y. (2025). Modelling water scarcity and water footprint of agricultural crops: A case from a semi-arid region in Morocco. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59, 102455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102455>
- Dolman, M. R., Kolarik, N. E., Caughlin, T. T., Brandt, J. S., Som Castellano, R. L., & Cattau, M. E. (2025). Mapping built infrastructure in semi-arid systems using data integration and open-source approaches for image classification. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 37, 101472. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rsase.2025.101472>
- Feng, Y., Burian, S., & Pomeroy, C. (2016). Potential of green infrastructure to restore predevelopment water budget of a semi-arid urban catchment. *Journal of Hydrology*, 542, 744–755. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.09.044>
- Kumar, P., Debele, S. E., Khalili, S., Halios, C. H., Sahani, J., Aghamohammadi, N., Andrade, M. de F., Athanassiadou, M., Bhui, K., Calvillo, N., Cao, S.-J., Coulon, F., Edmondson, J. L., Fletcher, D., Dias de Freitas, E., Guo, H., Hort, M. C., Katti, M., Kjeldsen, T. R., ... Jones, L. (2024). Urban heat mitigation by green and blue infrastructure: Drivers, effectiveness, and future needs. *The Innovation*, 5(2). <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2024.100588>
- Liu, L., Chen, Z., Lu, X., & Wang, Y. (2025). Effects of green infrastructure composition and configuration on runoff regulation in watersheds: A global meta-analysis. *Journal of Hydrology*, 664, 134418. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.134418>
- Marquez-Torres, A., Kumar, S., Aznarez, C., & Jenerette, G. D. (2025). Assessing the cooling potential of green and blue infrastructure from twelve US cities with contrasting climate conditions. *Urban Forestry & Urban Greening*, 104, 128660.

<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ufug.2024.128660>

- Masoudi, M., Ferguson, J., Khan, A., Liu, G., Skoyles, A., & Drescher, M. (2025). Synthesizing the evidence on green and blue infrastructure for urban temperature mitigation in Canada. *Environmental Reviews*, 33, 1–17. <https://doi.org/10.1139/er-2025-0104>
- Meerow, S., Natarajan, M., & Krantz, D. (2021). Green infrastructure performance in arid and semi-arid urban environments. *Urban Water Journal*, 18(4), 275–285. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2021.1877741>
- Okour, Y., & Shaweesh, H. (2024). Identifying the barriers to green infrastructure implementation in semi-arid urban areas using the DPSIR framework: A case study of Amman, Jordan. *City and Environment Interactions*, 24, 100165. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cacint.2024.100165>