

DINAMIKA NORMALIZED DIFFERENCE VEGETATION INDEX AKIBAT PERUBAHAN TUTUPAN LAHAN PERKOTAAN DI DAS WAE BATU MERAH KOTA AMBON

Normalized Difference Vegetation Index Dynamics Resulting from Urban Land Cover Change in the Wae Batu Merah Watershed, Ambon City

Bokiraiya Latuamury¹, Husain Marasabessy², Miranda H. Hadidjah³, Moda Talaohu⁴ dan Syamsul Fallah Kelihu⁵

¹ Program Studi Ilmu Lingkungan, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia; e-mail: penulis_bokiraiya.latuamury@lecturer.unpatti.ac.id

² Program Studi Kehutanan, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia; e-mail: husain.marasabessy@lecturer.unpatti.ac.id

³ Program Studi Kehutanan, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia; e-mail: miranda.hadidjah@lecturer.unpatti.ac.id

⁴ Program Studi Kehutanan, Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia; e-mail: moda.talaohu@lecturer.unpatti.ac.id

⁵ Program Studi Manajemen Hutan, Pascasarjana Universitas Pattimura, Jl. Ir. M. Putuhena, Kampus Poka, Ambon, Maluku, 97233, Indonesia; e-mail: sulkelihu@gmail.com

Diterima : 06-05-2026

Direvisi : 24-05-2026

Disetujui : 25-05-2026

ABSTRACT

Urbanisation and land-use conversion in tropical urban watersheds have increasingly contributed to ecological degradation and hydrological instability, particularly through the reduction of vegetation cover and the expansion of impervious surfaces. This study aimed to analyse the spatial dynamics of vegetation cover using the Normalised Difference Vegetation Index (NDVI) and to evaluate its implications for hydrological changes in the Wae Batu Merah Watershed, Ambon City, Indonesia, during the period 2013–2024. A quantitative spatial–hydrological approach was employed by integrating remote sensing analysis, Geographic Information Systems (GIS), and hydrological interpretation. Satellite imagery from Landsat and Sentinel platforms was processed to generate NDVI classifications, while hydrological data were used to assess changes in peak discharge. The results revealed a substantial decline in vegetation quality and watershed ecological function over the observation period. The average NDVI value in the upstream watershed decreased from 0.46 in 2013 to 0.28 in 2023, representing a decline of 39.13%. Simultaneously, buffer vegetation area decreased by 42%, whereas built-up and settlement areas increased by 84%. Spatial analysis demonstrated that areas classified as high greenness and medium greenish became increasingly fragmented, while low greenness, very low greenness, and non-vegetation classes expanded significantly, particularly in the western and transitional watershed zones. These land-cover changes were accompanied by an increase in peak discharge from 58.0 m³/s to 69.8 m³/s, indicating intensified surface runoff and reduced infiltration capacity. The findings confirm a strong ecological–hydrological relationship between vegetation degradation and watershed response in tropical small-island urban catchments. This study highlights the effectiveness of NDVI as a spatial indicator for watershed health assessment and provides scientific evidence to support vegetation-based watershed conservation, ecological restoration, and sustainable urban land-use planning.

Keywords: NDVI, watershed degradation, vegetation dynamics, urban hydrology, land-use change, Wae Batu Merah Watershed

ABSTRAK

Urbanisasi dan perubahan penggunaan lahan pada DAS perkotaan tropis semakin meningkatkan tekanan ekologis dan ketidakstabilan hidrologi, terutama melalui penurunan tutupan vegetasi dan perluasan area kedap air. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dinamika spasial vegetasi menggunakan pendekatan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) serta mengevaluasi implikasinya terhadap perubahan hidrologi DAS Wae Batu Merah, Kota Ambon, selama periode 2013–2024. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis spasial dan hidrologi dengan

mengintegrasikan penginderaan jauh, Sistem Informasi Geografis (SIG), dan interpretasi hidrologi. Data citra satelit Landsat dan Sentinel digunakan untuk menghasilkan klasifikasi NDVI, sedangkan data hidrologi digunakan untuk mengevaluasi perubahan debit puncak. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas vegetasi dan fungsi ekologis DAS mengalami penurunan yang cukup signifikan selama periode pengamatan. Nilai NDVI rata-rata kawasan hulu DAS menurun dari 0,46 pada tahun 2013 menjadi 0,28 pada tahun 2023 atau mengalami penurunan sebesar 39,13%. Pada periode yang sama, luas vegetasi penyangga berkurang sebesar 42%, sedangkan luas permukiman dan lahan terbangun meningkat sebesar 84%. Analisis spasial memperlihatkan bahwa kelas high greenness dan medium greenish mengalami fragmentasi dan penyusutan area, sementara kategori low greenness, very low greenness, dan non-vegetation semakin meluas, terutama pada bagian barat dan zona transisi DAS. Perubahan tutupan lahan tersebut diikuti oleh peningkatan debit puncak dari 58,0 m³/det menjadi 69,8 m³/det yang menunjukkan meningkatnya limpasan permukaan dan menurunnya kapasitas infiltrasi kawasan DAS. Temuan ini menegaskan adanya hubungan ekologis-hidrologis yang kuat antara degradasi vegetasi dan respons hidrologi DAS perkotaan tropis kepulauan. Penelitian ini menegaskan bahwa NDVI efektif digunakan sebagai indikator spasial kesehatan DAS serta menjadi dasar ilmiah dalam mendukung konservasi vegetasi, rehabilitasi kawasan kritis, dan pengelolaan DAS perkotaan berkelanjutan.

Kata kunci: NDVI, degradasi DAS, dinamika vegetasi, hidrologi perkotaan, perubahan penggunaan lahan, DAS Wae Batu Merah.

A. PENDAHULUAN

Daerah Aliran Sungai (DAS) merupakan satuan ekosistem hidrologis yang memiliki fungsi penting dalam menjaga keseimbangan tata air, stabilitas lingkungan, serta keberlanjutan sistem ekologis dan sosial di suatu wilayah (Latuamury *et al.*, 2019, 2020). Dalam konteks wilayah perkotaan tropis, DAS tidak hanya berfungsi sebagai kawasan tangkapan air, tetapi juga sebagai penyangga ekologis yang mengendalikan limpasan permukaan, infiltrasi, erosi, sedimentasi, dan ketersediaan air tanah. Namun demikian, perkembangan urbanisasi yang semakin pesat menyebabkan banyak DAS perkotaan mengalami tekanan ekologis yang signifikan akibat perubahan tata guna lahan, fragmentasi vegetasi, dan ekspansi kawasan terbangun. Perubahan tersebut berdampak langsung terhadap penurunan kapasitas resapan air, meningkatnya limpasan permukaan, serta meningkatnya frekuensi dan intensitas kejadian banjir perkotaan (Marasabessy *et al.*, 2019; Siahaya *et al.*, 2025). Oleh karena itu, kajian mengenai dinamika vegetasi dan perubahan fungsi hidrologi DAS menjadi isu yang semakin penting dalam pengelolaan lingkungan perkotaan berkelanjutan.

Kota Ambon sebagai salah satu kota kepulauan di wilayah timur Indonesia menghadapi tantangan ekologis yang cukup

kompleks terkait pengelolaan DAS perkotaan. Pertumbuhan penduduk, ekspansi permukiman, pembangunan infrastruktur, dan perubahan penggunaan lahan telah meningkatkan tekanan terhadap kawasan hulu dan tengah DAS, termasuk pada DAS Wae Batu Merah (Latuamury, 2020). DAS ini memiliki peranan strategis sebagai daerah tangkapan air sekaligus kawasan penyangga ekologis bagi wilayah perkotaan di sekitarnya. Akan tetapi, dalam beberapa tahun terakhir, kawasan DAS Wae Batu Merah menunjukkan indikasi degradasi lingkungan yang ditandai oleh meningkatnya area terbangun, berkurangnya vegetasi penyangga, serta meningkatnya kerentanan terhadap limpasan permukaan dan banjir. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan struktur lanskap DAS telah memengaruhi keseimbangan hidrologi kawasan secara signifikan (Kelihu *et al.*, 2025).

Salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk memantau perubahan vegetasi dan degradasi lingkungan DAS adalah analisis Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) berbasis penginderaan jauh. NDVI merupakan indeks vegetasi yang mampu merepresentasikan tingkat kehijauan dan kerapatan vegetasi melalui analisis spektral citra satelit (Latuamury, 2013; Priya *et al.*, 2023). Pendekatan ini memiliki keunggulan karena mampu memberikan informasi spasial dan temporal secara efisien, objektif, dan

berkelanjutan dalam skala lanskap (Daoa *et al.*, 2023; Siahaya *et al.*, 2025). Dalam konteks pengelolaan DAS, NDVI dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan tutupan vegetasi, mendeteksi kawasan kritis, mengevaluasi dampak urbanisasi, serta menganalisis keterkaitan antara degradasi vegetasi dan perubahan respons hidrologi. Dengan demikian, integrasi analisis NDVI dan data hidrologi menjadi pendekatan penting dalam memahami dinamika ekologis DAS perkotaan secara komprehensif (Bejagam & Sharma, 2023; Gandri *et al.*, 2023).

Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa penurunan kualitas vegetasi akibat konversi lahan memiliki hubungan erat dengan peningkatan limpasan permukaan dan debit puncak sungai (Latuamury *et al.*, 2016, 2025). Vegetasi berperan penting dalam proses intersepsi hujan, infiltrasi air ke dalam tanah, evapotranspirasi, serta pengendalian erosi (Intopiana *et al.*, 2020; Wiedarti *et al.*, 2014). Ketika tutupan vegetasi mengalami degradasi, maka kemampuan DAS dalam menyerap dan menyimpan air akan menurun sehingga sebagian besar air hujan langsung berubah menjadi limpasan permukaan. Kondisi tersebut menyebabkan waktu konsentrasi aliran menjadi lebih singkat dan meningkatkan potensi terjadinya banjir. Namun demikian, kajian mengenai hubungan perubahan NDVI terhadap dinamika hidrologi DAS perkotaan di wilayah kepulauan tropis, khususnya di Kota Ambon, masih relatif terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada perubahan penggunaan lahan secara umum tanpa mengintegrasikan analisis spasial vegetasi dengan indikator hidrologi secara temporal (Waiyasusri, 2021; Zha *et al.*, 2003).

Pemahaman mengenai keterkaitan antara dinamika vegetasi, perubahan penggunaan lahan, dan respons hidrologi DAS Wae Batu Merah berbasis pendekatan spasial-temporal merupakan hal penting dalam pengembangan kajian ekohidrologi DAS perkotaan di wilayah tropis kepulauan. Perubahan tutupan vegetasi

yang terjadi di kawasan hulu dan tengah DAS diduga memengaruhi peningkatan debit puncak dan degradasi fungsi tata air secara progresif (Haulussy *et al.*, 2024; Latuamury *et al.*, 2019). Kajian ini juga memperkuat penggunaan NDVI sebagai indikator ekologis dalam evaluasi kesehatan DAS dan kerentanan hidrologi kawasan perkotaan (Askar *et al.*, 2022; Latuamury & Talaohu, 2021). Secara praktis, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar ilmiah bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dalam merumuskan strategi pengelolaan DAS berbasis konservasi vegetasi, rehabilitasi kawasan kritis, pengendalian urbanisasi, dan penguatan tata ruang berkelanjutan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berorientasi pada analisis perubahan lingkungan, tetapi juga mendukung upaya pembangunan kota yang lebih adaptif terhadap risiko degradasi ekologis dan perubahan hidrologi di masa depan. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis dinamika spasial NDVI, perubahan tutupan vegetasi, serta implikasinya terhadap perubahan fungsi hidrologi DAS Wae Batu Merah selama periode 2013–2024.

B. METODE PENELITIAN

1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di DAS Wae Batu Merah yang secara administratif berada di Kota Ambon, Provinsi Maluku. DAS tersebut merupakan salah satu DAS perkotaan yang memiliki peranan strategis dalam sistem hidrologi Kota Ambon, karena berfungsi sebagai daerah tangkapan air, pengendali limpasan permukaan, serta penyangga ekologis bagi kawasan permukiman di bagian hilir. Secara geografis, DAS ini terletak pada kawasan dengan karakteristik topografi bergelombang hingga curam dan berbatasan langsung dengan Teluk Ambon pada bagian utara. Secara ekologis, DAS Wae Batu Merah merepresentasikan karakteristik DAS kecil tropis monsun di wilayah kepulauan yang sensitif terhadap perubahan tata guna lahan.

Kawasan hulu DAS sebelumnya didominasi oleh vegetasi sekunder, semak belukar, dan kebun campuran yang berfungsi sebagai zona infiltrasi dan penyimpanan air tanah. Namun demikian, perkembangan kawasan perkotaan menyebabkan terjadinya fragmentasi vegetasi dan peningkatan area non-vegetasi secara progresif.

Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada beberapa pertimbangan ilmiah dan ekologis. Pertama, DAS Wae Batu Merah mengalami tekanan penggunaan lahan yang cukup intensif akibat pertumbuhan permukiman dan ekspansi kawasan terbangun dalam dua dekade terakhir. Kedua, DAS ini memiliki tingkat kerentanan hidrologi yang tinggi terhadap banjir perkotaan dan limpasan permukaan, terutama pada musim hujan dengan intensitas curah hujan tinggi. Ketiga, perubahan tutupan vegetasi di kawasan hulu dan tengah DAS diduga berpengaruh langsung terhadap dinamika debit puncak dan degradasi fungsi tata air. Penelitian difokuskan pada wilayah hulu DAS karena kawasan ini memiliki fungsi penting dalam mengendalikan proses hidrologi, terutama infiltrasi, intersepsi, dan pengaturan aliran dasar. Selain itu, kawasan hulu DAS merupakan wilayah yang paling rentan mengalami perubahan tutupan lahan akibat ekspansi permukiman dan pembangunan infrastruktur. Pendekatan spasial digunakan untuk mengidentifikasi distribusi vegetasi dan perubahan penggunaan lahan selama periode pengamatan. Dengan demikian, lokasi penelitian dipilih secara purposif karena mampu merepresentasikan dinamika degradasi ekologis dan perubahan fungsi hidrologi DAS perkotaan di wilayah tropis kepulauan.

2 Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif berbasis analisis spasial dan hidrologi dengan memanfaatkan data penginderaan jauh, data hidrologi, serta data pendukung lainnya. Teknik pengumpulan data

dilakukan melalui beberapa tahapan yang meliputi pengumpulan data citra satelit, data debit sungai, data penggunaan lahan, dan observasi spasial wilayah penelitian.

a. Pengumpulan Data Citra Satelit

Data utama dalam penelitian ini berupa citra satelit Landsat dan Sentinel yang digunakan untuk menganalisis dinamika vegetasi melalui pendekatan Normalized Difference Vegetation Index (NDVI). Data citra diperoleh dari United States Geological Survey (USGS) dan Copernicus Open Access Hub dengan periode pengamatan tahun 2014 dan 2024. Pemilihan citra dilakukan berdasarkan beberapa kriteria, yaitu: memiliki tingkat tutupan awan rendah (<10%); direkam pada musim yang relatif sama untuk mengurangi bias musiman; Memiliki resolusi spasial yang memadai untuk analisis DAS skala kecil-perkotaan. Citra satelit yang digunakan kemudian melalui tahapan pra-pemrosesan (pre-processing) yang meliputi koreksi geometrik, koreksi radiometrik, mosaik citra, clipping sesuai batas DAS, dan masking area awan. Proses ini bertujuan untuk meningkatkan akurasi interpretasi spasial dan konsistensi analisis temporal.

b. Pengumpulan Data Penggunaan Lahan

Data penggunaan lahan diperoleh melalui interpretasi visual citra satelit dan verifikasi spasial menggunakan perangkat lunak Sistem Informasi Geografis (SIG). Klasifikasi penggunaan lahan dilakukan untuk mengidentifikasi perubahan area vegetasi penyangga, kawasan permukiman, lahan terbuka, dan area non-vegetasi lainnya. Pembagian kategori tersebut didasarkan pada rentang nilai NDVI yang merepresentasikan tingkat kehijauan vegetasi dan kondisi penutupan lahan (Tabel 1).

Tabel 1. Klasifikasi NDVI dan karakteristik tutupan lahan

Kelas NDVI	Rentang Nilai NDVI	Karakteristik Tutupan Lahan
Kehijauan Tinggi	0.61 – 1.00	Vegetasi rapat dengan tingkat kehijauan tinggi, didominasi hutan sekunder, tegakan pohon lebat, dan kawasan berhutan
Kehijauan Sedang	0.41 – 0.60	Vegetasi sedang seperti agroforestri, kebun campuran, semak belukar, dan vegetasi dengan kerapatan menengah
Kehijauan Rendah	0.21 – 0.40	Vegetasi jarang, lahan terbuka sebagian, dan area dengan penutupan vegetasi rendah
Kehijauan Sangat Rendah	0.01 – 0.20	Area minim vegetasi, lahan kritis, tanah terbuka, dan kawasan dengan penutupan vegetasi sangat terbatas
Non-Vegetasi	-1.00 – 0.00	Kawasan non-vegetasi seperti permukiman, infrastruktur, badan jalan, area terbangun, dan badan air

c. Observasi dan Verifikasi Lapangan

Observasi lapangan dilakukan untuk memverifikasi kondisi aktual tutupan lahan dan karakteristik vegetasi di beberapa titik representatif dalam DAS. Verifikasi lapangan bertujuan untuk meningkatkan validitas interpretasi citra satelit serta memastikan kesesuaian klasifikasi NDVI dengan kondisi eksisting di lapangan. Pengamatan lapangan meliputi identifikasi tipe vegetasi, kondisi lahan terbuka, kepadatan permukiman, dan indikasi degradasi lingkungan seperti erosi dan sedimentasi. Titik observasi dipilih secara purposif berdasarkan variasi kelas NDVI dan distribusi penggunaan lahan.

4. Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui pendekatan spasial, statistik deskriptif, dan interpretasi hidrologi untuk mengevaluasi hubungan antara perubahan NDVI, perubahan penggunaan lahan, dan dinamika debit puncak DAS Wae Batu Merah.

a. Analisis NDVI

Analisis NDVI dilakukan untuk mengukur tingkat kehijauan vegetasi dan perubahan tutupan lahan dalam DAS Wae Batu Merah. Perhitungan NDVI menggunakan formula:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Keterangan:

NDVI = Normalized Difference Vegetation Index;

NIR = reflektansi spektrum inframerah dekat;

Red = reflektansi spektrum merah.

Nilai NDVI berkisar antara -1 hingga +1. Nilai mendekati +1 menunjukkan vegetasi yang rapat dan sehat, sedangkan nilai mendekati 0 atau negatif menunjukkan lahan terbuka, permukiman, atau area non-vegetasi.

Hasil perhitungan NDVI kemudian diklasifikasikan menjadi lima kelas vegetasi untuk mempermudah interpretasi spasial perubahan tutupan lahan. Analisis dilakukan secara temporal untuk membandingkan kondisi tahun 2014 dan 2024 serta mengevaluasi tren perubahan vegetasi selama periode penelitian.

b. Analisis Perubahan Tutupan Lahan

Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan dengan membandingkan hasil klasifikasi NDVI antarperiode pengamatan. Perubahan luas vegetasi penyangga, area permukiman, dan lahan non-vegetasi dihitung untuk mengetahui tingkat konversi lahan dalam DAS.

Perubahan luas tutupan lahan dihitung menggunakan persamaan:

$$\Delta L = L_t - L_0$$

Keterangan:

ΔL = perubahan luas lahan;

L_t = luas lahan pada tahun pengamatan;

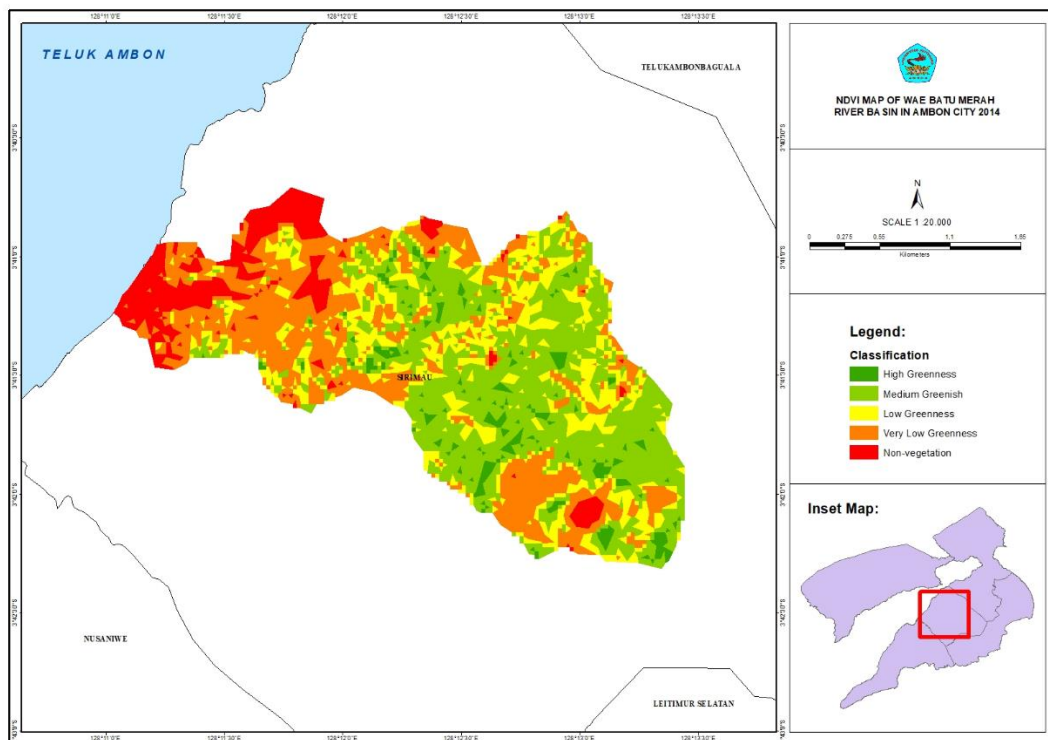
L_0 = luas lahan pada tahun awal.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Dinamika Spasial Tutupan Vegetasi DAS Wae Batu Merah Tahun 2014–2024

Hasil analisis spasial menggunakan pendekatan Normalized Difference Vegetation

Index (NDVI) menunjukkan adanya perubahan signifikan terhadap distribusi dan kualitas tutupan vegetasi di DAS Wae Batu Merah selama periode 2014–2024 (Gambar 1 dan Gambar 2). Berdasarkan interpretasi visual peta NDVI tahun 2014 dan 2024, terlihat bahwa struktur vegetasi mengalami penurunan kualitas yang ditandai dengan meningkatnya area berkategori **low greenness**, **very low greenness**, dan **non-vegetation**. Sebaliknya, area dengan kategori **high greenness** dan **medium greenish** menunjukkan kecenderungan menyusut dan terfragmentasi.



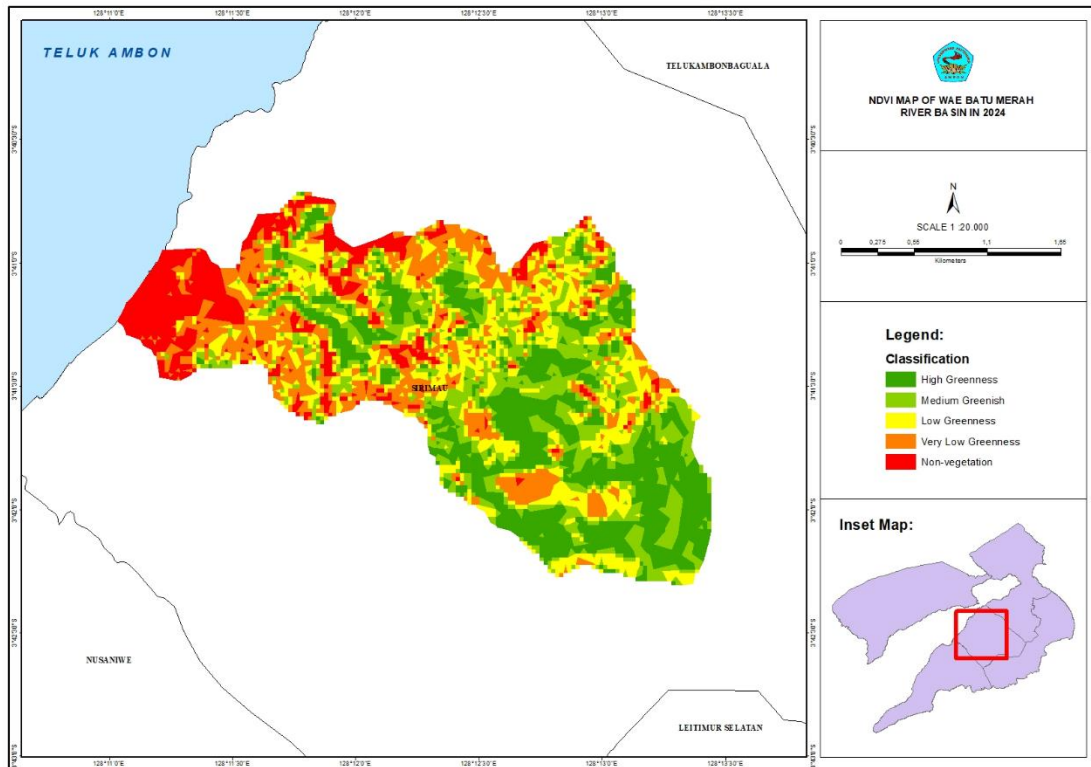
Gambar 1. Peta NDVI DAS Wae Batu Merah Tahun 2014

Pada peta NDVI tahun 2014, wilayah tengah hingga bagian timur DAS masih didominasi oleh warna hijau tua dan hijau muda yang merepresentasikan vegetasi rapat dan vegetasi sedang. Pola ini menunjukkan bahwa pada periode tersebut, kawasan hulu DAS masih memiliki kemampuan ekologis yang relatif baik dalam menjaga stabilitas hidrologi. Keberadaan vegetasi dengan tingkat kehijauan

tinggi berperan penting dalam meningkatkan kapasitas infiltrasi tanah, memperlambat limpasan permukaan, serta menjaga keseimbangan tata air pada musim hujan maupun musim kemarau (Askar *et al.*, 2022; Zha *et al.*, 2003). Namun demikian, hasil interpretasi peta tahun 2024 memperlihatkan perubahan spasial yang cukup kontras. Area berwarna merah dan oranye yang

mengindikasikan kelas non-vegetasi dan vegetasi sangat rendah tampak semakin meluas, terutama pada bagian barat dan zona transisi DAS. Fenomena ini menunjukkan adanya ekspansi lahan terbangun dan degradasi tutupan vegetasi yang berlangsung secara progresif

selama satu dekade terakhir. Fragmentasi vegetasi juga semakin terlihat melalui munculnya patch-patch vegetasi kecil yang terisolasi dan tidak lagi membentuk konektivitas ekologis yang utuh.



Gambar 2. Peta NDVI DAS Wae Batu Merah Tahun 2024

Secara ekologis, fragmentasi vegetasi memiliki implikasi penting terhadap fungsi lingkungan DAS. Vegetasi yang terfragmentasi cenderung memiliki kemampuan lebih rendah dalam mengontrol erosi, mempertahankan kelembapan tanah, serta menstabilkan aliran permukaan dibandingkan vegetasi yang masih terkoneksi secara spasial. Kondisi ini menyebabkan sistem hidrologi DAS menjadi lebih sensitif terhadap intensitas hujan tinggi dan perubahan penggunaan lahan. Interpretasi spasial juga menunjukkan bahwa tekanan perubahan tutupan lahan tidak tersebar secara merata. Bagian barat DAS memperlihatkan dominasi area non-vegetasi yang lebih tinggi

dibandingkan bagian timur dan tenggara DAS. Pola tersebut mengindikasikan bahwa wilayah barat DAS mengalami tekanan antropogenik yang lebih intensif, terutama akibat perkembangan permukiman, pembukaan lahan, dan aktivitas pembangunan. Sementara itu, beberapa area di bagian tenggara DAS masih mempertahankan vegetasi dengan tingkat kehijauan sedang hingga tinggi, meskipun mulai mengalami penyusutan luas area (Franke & Menz, 2007; Zhihao & Wei, 2024).

Perubahan distribusi kelas NDVI sebagaimana ditunjukkan pada kedua peta mengindikasikan bahwa DAS Wae Batu Merah sedang mengalami transformasi lanskap dari

kawasan dengan dominasi vegetasi menuju kawasan dengan tekanan urbanisasi yang semakin kuat. Dalam konteks pengelolaan DAS perkotaan, kondisi ini menjadi indikator awal terjadinya degradasi fungsi ekologis kawasan hulu dan tengah DAS. Hasil interpretasi tersebut diperkuat oleh data pada **Tabel 2** yang menunjukkan bahwa kelas high greenness mengalami penurunan akibat fragmentasi dan penyusutan area vegetasi rapat. Kategori

medium greenish juga mengalami penurunan akibat ekspansi lahan terbangun. Sebaliknya, kategori low greenness, very low greenness, dan non-vegetation mengalami peningkatan yang cukup signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa perubahan struktur tutupan lahan berlangsung secara sistematis dan berkorelasi dengan meningkatnya tekanan pembangunan pada kawasan DAS (Lai *et al.*, 2024; Tempa *et al.*, 2024).

Tabel 2. Perubahan Tutupan Vegetasi Berdasarkan Interpretasi Peta NDVI DAS Wae Batu Merah Tahun 2014 dan 2024

Kategori NDVI	Karakteristik Tutupan Lahan	Kondisi Tahun 2014	Kondisi Tahun 2024	Tren Perubahan
Kehijauan Tinggi	Vegetasi rapat dan hutan sekunder	Relatif dominan pada bagian tengah dan timur DAS	Mengalami fragmentasi dan penyusutan area	Menurun
Kehijauan Sedang	Vegetasi sedang dan agroforestri	Menyebarkan pada lereng tengah DAS	Berkurang akibat ekspansi lahan terbangun	Menurun
Kehijauan Rendah	Vegetasi jarang dan lahan terbuka	Terbatas pada area tertentu	Semakin meluas pada zona transisi	Meningkat
Kehijauan Sangat Rendah	Lahan kritis dan area minim vegetasi	Masih terbatas	Meluas terutama pada wilayah barat DAS	Meningkat signifikan
Non-Vegetasi	Permukiman dan lahan terbangun	Terkonsentrasi di area hilir	Semakin meluas ke arah hulu DAS	Meningkat signifikan

Sumber: Interpretasi visual peta NDVI DAS Wae Batu Merah Tahun 2014 dan 2024.

Dalam perspektif hidrologi lanskap, penurunan kualitas vegetasi di kawasan hulu DAS akan berdampak terhadap berkurangnya kapasitas retensi air dan meningkatnya limpasan permukaan. Vegetasi memiliki fungsi penting sebagai pengendali intersepsi hujan, penstabil struktur tanah, serta pengatur proses evapotranspirasi. Ketika vegetasi mengalami degradasi, maka kemampuan DAS dalam menahan dan menyimpan air akan menurun sehingga respons aliran permukaan menjadi lebih cepat. Temuan ini sejalan dengan berbagai penelitian hidrologi tropis yang menunjukkan bahwa urbanisasi dan perubahan tutupan lahan merupakan faktor utama yang

memengaruhi peningkatan kerentanan DAS terhadap banjir dan degradasi hidrologis (Mehmood *et al.*, 2024; Waiyasusri, 2021). Oleh karena itu, perubahan pola NDVI pada DAS Wae Batu Merah dapat dipahami sebagai indikator spasial yang merepresentasikan penurunan kualitas ekologis kawasan DAS secara keseluruhan.

B. Perubahan NDVI dan Degradasi Fungsi Hidrologi DAS Wae Batu Merah

Hasil analisis temporal menunjukkan bahwa nilai NDVI rata-rata hulu DAS Wae Batu Merah mengalami penurunan secara konsisten selama periode 2014–2024.

Berdasarkan Tabel 4, nilai NDVI menurun dari 0,46 pada tahun 2013 menjadi 0,28 pada tahun 2023. Penurunan sebesar 39,13% ini menunjukkan adanya degradasi kualitas vegetasi yang cukup serius dalam kurun waktu sepuluh tahun. Penurunan nilai NDVI tersebut berbanding lurus dengan berkurangnya luas vegetasi penyangga DAS. Luas vegetasi penyangga tercatat menurun dari 100 ha menjadi 58 ha, atau mengalami penyusutan sebesar 42%. Pada saat yang sama, luas permukiman dan lahan terbangun meningkat dari 50 ha menjadi 92 ha atau meningkat sebesar 84%. Perubahan ini menunjukkan bahwa ekspansi pembangunan dan konversi lahan menjadi faktor dominan yang memengaruhi penurunan kualitas lingkungan DAS.

Dalam konteks hidrologi DAS, vegetasi penyangga memiliki fungsi penting dalam menjaga keseimbangan tata air. Vegetasi

mampu meningkatkan infiltrasi air hujan ke dalam tanah melalui sistem perakaran dan porositas tanah yang terbentuk secara alami. Selain itu, tajuk vegetasi juga berperan dalam mengurangi energi kinetik hujan sehingga erosi permukaan dapat ditekan. Ketika luas vegetasi penyangga menurun, maka kemampuan DAS dalam menyerap air hujan juga ikut menurun (Mehmood *et al.*, 2024; Pettorelli *et al.*, 2011).

Kondisi tersebut berdampak langsung terhadap peningkatan limpasan permukaan dan debit puncak sungai. Berdasarkan data pada **Tabel 3**, debit puncak meningkat dari 58,0 m³/det pada tahun 2013 menjadi 69,8 m³/det pada tahun 2023 atau mengalami kenaikan sebesar 20,34%. Peningkatan debit puncak ini menunjukkan bahwa DAS Wae Batu Merah semakin responsif terhadap kejadian hujan, sehingga air hujan lebih cepat terkonsentrasi menuju saluran sungai.

Tabel 3. Indikator Degradasi Lingkungan DAS Berdasarkan Dinamika NDVI dan Perubahan Tata Guna Lahan

Parameter Lingkungan	2013	2023	Perubahan Absolut	Persentase Perubahan (%)	Dampak Lingkungan
NDVI Rata-rata Hulu DAS	0.46	0.28	-0.18	-39.13	Penurunan kualitas tutupan vegetasi
Luas Vegetasi Penyangga (ha)	100.0	58.0	-42.0	-42.00	Berkurangnya zona resapan air
Luas Permukiman dan Lahan Terbangun (ha)	50.0	92.0	+42.0	+84.00	Peningkatan tekanan antropogenik
Debit Puncak (m ³ /det)	58.0	69.8	+11.8	+20.34	Peningkatan risiko banjir dan limpasan
Dominasi Area Non-Vegetasi	Rendah	Tinggi	-	-	Fragmentasi tutupan lahan meningkat

Sumber: Hasil analisis spasial dan hidrologi DAS Wae Batu Merah, 2013–2023

Fenomena peningkatan debit puncak yang terjadi bersamaan dengan penurunan NDVI mengindikasikan adanya hubungan ekologis-hidrologis yang kuat antara kualitas vegetasi dan respons aliran DAS. Semakin rendah nilai NDVI, maka semakin rendah pula

kapasitas infiltrasi dan retensi air dalam kawasan DAS. Sebaliknya, limpasan permukaan menjadi semakin dominan sehingga debit puncak meningkat secara progresif. Peningkatan area non-vegetasi juga menyebabkan bertambahnya permukaan kedap

air seperti jalan, bangunan, dan infrastruktur perkotaan lainnya. Permukaan kedap air memiliki kemampuan infiltrasi yang sangat rendah sehingga sebagian besar air hujan langsung berubah menjadi limpasan permukaan. Kondisi ini mempercepat aliran menuju sungai dan meningkatkan risiko banjir, terutama pada periode curah hujan tinggi. Selain memengaruhi debit puncak, degradasi vegetasi juga berpotensi menurunkan kualitas air dan meningkatkan sedimentasi sungai. Hilangnya vegetasi penutup menyebabkan tanah menjadi lebih rentan terhadap erosi. Material sedimen yang terbawa limpasan kemudian akan masuk ke saluran sungai dan meningkatkan tingkat kekeruhan air. Dalam jangka panjang, kondisi ini dapat menyebabkan pendangkalan sungai dan menurunkan kapasitas tampung aliran.

Secara spasial, degradasi fungsi hidrologi DAS terlihat lebih dominan pada kawasan yang mengalami peningkatan area non-vegetasi. Wilayah-wilayah tersebut berpotensi menjadi sumber utama limpasan cepat (quick flow), terutama apabila berada pada lereng dengan kemiringan sedang hingga curam. Oleh karena itu, perubahan pola NDVI tidak hanya merepresentasikan perubahan vegetasi, tetapi juga menjadi indikator penting terhadap perubahan respons hidrologi DAS secara keseluruhan (Mehmood *et al.*, 2024; Zhao & Qu, 2024). Temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa perubahan tutupan lahan di DAS Wae Batu Merah telah melampaui perubahan ekologis biasa dan mulai memengaruhi stabilitas hidrologi kawasan. Dengan demikian, pengelolaan DAS perlu diarahkan pada upaya konservasi vegetasi, pengendalian urbanisasi, dan rehabilitasi kawasan kritis agar fungsi hidrologi DAS dapat dipulihkan secara berkelanjutan.

C. Implikasi Ekologis dari Pengelolaan DAS Berbasis Konservasi Vegetasi

Perubahan NDVI dan peningkatan area non-vegetasi pada DAS Wae Batu Merah

menunjukkan bahwa kawasan DAS sedang menghadapi tekanan ekologis yang cukup serius. Apabila tren degradasi vegetasi terus berlangsung, maka kemampuan DAS dalam menjaga keseimbangan hidrologi akan semakin menurun. Kondisi ini tidak hanya berdampak terhadap peningkatan risiko banjir, tetapi juga berpotensi menurunkan ketersediaan air pada musim kemarau akibat berkurangnya cadangan air tanah. Secara ekologis, vegetasi pada kawasan DAS berfungsi sebagai sistem biofisik yang menghubungkan atmosfer, tanah, dan aliran air. Vegetasi membantu menjaga siklus hidrologi melalui proses intersepsi, infiltrasi, evapotranspirasi, dan penyimpanan air tanah. Oleh karena itu, penurunan kualitas vegetasi akan berdampak langsung terhadap ketidakseimbangan sistem hidrologi dan meningkatnya kerentanan lingkungan (Ahmed & Akter, 2017; Xu *et al.*, 2022).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kawasan dengan nilai NDVI tinggi cenderung berada pada wilayah yang masih memiliki tutupan vegetasi relatif baik. Kawasan tersebut perlu diprioritaskan sebagai zona konservasi karena berfungsi sebagai daerah resapan utama dan pengendali limpasan permukaan. Perlindungan terhadap kawasan berhijau tinggi menjadi penting untuk menjaga stabilitas hidrologi DAS dalam jangka panjang. Sebaliknya, wilayah dengan kategori **very low greenness** dan **non-vegetation** perlu menjadi prioritas rehabilitasi lingkungan. Upaya rehabilitasi dapat dilakukan melalui revegetasi, penghijauan sempadan sungai, pembangunan ruang terbuka hijau, dan penguatan sistem agroforestri berbasis masyarakat. Pendekatan ini penting untuk meningkatkan kembali kapasitas infiltrasi tanah dan mengurangi tekanan limpasan permukaan.

Dalam konteks DAS perkotaan, pengendalian pembangunan menjadi aspek yang sangat penting. Ekspansi permukiman yang tidak terkendali pada kawasan hulu dan sempadan sungai berpotensi mempercepat degradasi hidrologi DAS. Oleh karena itu, diperlukan kebijakan tata ruang yang lebih

adaptif dan berbasis daya dukung lingkungan. Kawasan dengan fungsi konservasi tinggi perlu dibatasi dari aktivitas pembangunan intensif. Selain pendekatan struktural, pengelolaan DAS juga perlu melibatkan pendekatan partisipatif berbasis masyarakat. Keterlibatan masyarakat dalam rehabilitasi vegetasi, konservasi tanah dan air, serta perlindungan kawasan sempadan sungai menjadi faktor penting dalam menjaga keberlanjutan pengelolaan DAS. Penguatan kesadaran ekologis masyarakat dapat membantu menekan laju degradasi vegetasi dan meningkatkan efektivitas program rehabilitasi lingkungan (An *et al.*, 2022; Latuamury & Talaohu, 2021).

Penggunaan teknologi penginderaan jauh berbasis NDVI sebagaimana diterapkan dalam penelitian ini terbukti efektif dalam memantau dinamika vegetasi secara spasial dan temporal. NDVI dapat digunakan sebagai instrumen monitoring lingkungan untuk mendeteksi perubahan tutupan lahan, mengidentifikasi kawasan kritis, dan mengevaluasi efektivitas program rehabilitasi DAS. Dengan demikian, pendekatan spasial berbasis citra satelit memiliki potensi besar dalam mendukung sistem pengelolaan DAS yang lebih adaptif dan berbasis data ilmiah. Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa penurunan NDVI, penyusutan vegetasi penyangga, dan peningkatan area non-vegetasi telah memengaruhi fungsi ekologis dan hidrologis DAS Wae Batu Merah secara signifikan. Oleh sebab itu, strategi pengelolaan DAS ke depan perlu diarahkan pada konservasi vegetasi, pengendalian konversi lahan, rehabilitasi kawasan kritis, dan penguatan tata kelola DAS berbasis keberlanjutan ekologis.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa DAS Wae Batu Merah mengalami perubahan ekologis dan hidrologis yang signifikan selama periode 2013–2024, yang ditandai oleh

penurunan kualitas tutupan vegetasi, peningkatan area non-vegetasi, serta meningkatnya respons limpasan permukaan DAS. Analisis berbasis Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) memperlihatkan bahwa nilai NDVI rata-rata hulu DAS menurun dari 0,46 menjadi 0,28 atau mengalami penurunan sebesar 39,13%, yang mengindikasikan terjadinya degradasi vegetasi secara progresif akibat tekanan urbanisasi dan konversi penggunaan lahan. Penurunan kualitas vegetasi tersebut diikuti oleh penyusutan luas vegetasi penyangga sebesar 42%, sementara luas permukiman dan lahan terbangun meningkat sebesar 84%, menunjukkan adanya transformasi lanskap DAS dari kawasan yang didominasi fungsi ekologis menuju kawasan dengan tekanan antropogenik yang semakin tinggi. Interpretasi spasial peta NDVI tahun 2014 dan 2024 memperlihatkan bahwa kelas high greenness dan medium greenish mengalami fragmentasi dan penyusutan area, sedangkan kategori low greenness, very low greenness, dan non-vegetation semakin meluas, terutama pada wilayah barat dan zona transisi DAS. Kondisi tersebut berdampak langsung terhadap penurunan kapasitas infiltrasi, melemahnya fungsi retensi air, serta meningkatnya limpasan permukaan yang tercermin melalui kenaikan debit puncak dari 58,0 m³/det menjadi 69,8 m³/det atau meningkat sebesar 20,34%. Temuan ini menegaskan adanya hubungan ekologis-hidrologis yang kuat antara degradasi vegetasi dan perubahan respons hidrologi DAS perkotaan di wilayah tropis kepulauan. Dengan demikian, NDVI terbukti efektif sebagai indikator spasial dalam memantau kesehatan lingkungan DAS dan mengevaluasi dampak perubahan penggunaan lahan terhadap fungsi hidrologi kawasan. Penelitian ini merekomendasikan perlunya strategi pengelolaan DAS berbasis konservasi vegetasi melalui rehabilitasi kawasan kritis, pengendalian ekspansi permukiman di wilayah hulu, perlindungan zona resapan air, serta penguatan tata ruang berkelanjutan guna menjaga stabilitas ekologis dan ketahanan

hidrologi DAS Wae Batu Merah di masa mendatang.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian, pengelolaan DAS Wae Batu Merah perlu diarahkan pada pendekatan konservasi berbasis ekohidrologi yang menitikberatkan pada rehabilitasi vegetasi penyangga, pengendalian konversi lahan di kawasan hulu, serta penguatan tata ruang berbasis daya dukung lingkungan. Pemerintah daerah dan pemangku kepentingan disarankan untuk meningkatkan program revegetasi, perlindungan sempadan sungai, dan pengembangan ruang terbuka hijau guna menekan peningkatan limpasan permukaan dan risiko banjir. Selain itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan dengan mengintegrasikan analisis curah hujan, karakteristik tanah, kemiringan lereng, serta pemodelan hidrologi kuantitatif agar diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai dinamika hidrologi DAS perkotaan tropis.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, K. R., & Akter, S. (2017). Analysis of landcover change in southwest Bengal delta due to floods by NDVI, NDWI and K-means cluster with landsat multi-spectral surface reflectance satellite data. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2017.08.010>
- Ajar, B. (n.d.). *Hidrologi Pulau Kecil*.
- An, T. T., Izuru, S., Narumasa, T., Raghavan, V., Hanh, L. N., An, N. Van, Long, N. V., Thuy, N. T., & Minh, T. P. (2022). Flood vulnerability assessment at the local scale using remote sensing and GIS techniques: a case study in Da Nang City, Vietnam. *Journal of Water and Climate Change*, 13(9). <https://doi.org/10.2166/wcc.2022.029>
- Askar, S., Zeraat Peyma, S., Yousef, M. M., Prodanova, N. A., Muda, I., Elshahi, M., & Hatamiafkoueich, J. (2022). Flood Susceptibility Mapping Using Remote Sensing and Integration of Decision Table Classifier and Metaheuristic Algorithms. *Water (Switzerland)*, 14(19). <https://doi.org/10.3390/w14193062>
- Bejagam, V., & Sharma, A. (2023). Remote sensing-based multi-scale characterization of ecohydrological indicators (EHIs) in India. *Ecological Engineering*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2022.106841>
- Daoa, B., Loppies, R., & Latuamury, B. (2023). Studi Empiris Pengelolaan Hutan Kota Berkelanjutan Di Taman Makmur Siwalima Kota Ambon. *Jurnal Geografi, Lingkungan Dan Kesehatan*, 1(2), 131–142. <https://doi.org/10.30598/jglk.1.2.12021>
- Franke, J., & Menz, G. (2007). Multi-temporal wheat disease detection by multi-spectral remote sensing. *Precision Agriculture*, 8(3). <https://doi.org/10.1007/s11119-007-9036-y>
- Gandri, L., Indriyani, L., Bana, S., Ahmaliun, L. De, Alwi, L. O., & Fitriani, V. (2023). Analisis Perubahan Kerapatan Vegetasi Mangrove untuk Perencanaan Pengelolaan Konservasi Perairan Berkelanjutan di Teluk Moramo. In *Jurnal Perencanaan Wilayah* (Vol. 8, Issue 1, pp. 107–115). <https://doi.org/10.33772/jpw.v8i1.380>
- Haulussy, R., Latuamury, B., & Iskar, I. (2024). Analisis Pemangku Kepentingan (Stakeholder) Terhadap Pengelolaan Sumberdaya Air Das Wae Batu Merah Kota Ambon. *Makila*, 18(1), 52–67. <https://doi.org/10.30598/makila.v18i1.10561>
- Intopiana, L. V., Putuhena, J. D., & Boreel, A. (2020). Pemetaan Daerah Rawan Erosi Di DAS Wae Batu Merah Kota Ambon. *MAKILA*, 14(1). <https://doi.org/10.30598/makila.v14i1.2508>
- Lai, C., Sun, H., Wu, X., Li, J., Wang, Z., Tong, H., & Feng, J. (2024). Water availability may not constrain vegetation growth in Northern Hemisphere. *Agricultural Water Management*, 291. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108649>
- Latuamury, B. (2013). Hubungan Antara Indeks Vegetasi Ndzi (Normalized Difference Vegetation Index) Dan Koefisien Resesi Baseflow Pada Beberapa SubDAS Propinsi Jawa Tengah Dan Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Teknosains*, 2(2). <https://doi.org/10.22146/teknosains.5998>
- Latuamury, B. (2020). Buku Ajar Manajemen DAS Pulau-Pulau Kecil. *Sustainability (Switzerland)*, 11(1).
- Latuamury, B., Aponno, H. S. E. S., Marasabessy, H., Hadijah, M. H., & Imlabla, W. (2020). The spatial dynamics of land cover change along the Wallacea corridor in the key biodiversity area ‘Buano Island’, Maluku, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 7(4). <https://doi.org/10.15243/JDMLM.2020.074.2241>
- Latuamury, B., Gunawan, T., & Suprayogi, S. (2012). Pengaruh kerapatan vegetasi penutup lahan terhadap karakteristik resesi hidrograf pada beberapa subdas di Propinsi Jawa Tengah dan Propinsi DIY. *Mgi*, 26(2).
- Latuamury, B., Marasabessy, H., & Hadidjah, M. H. (2019). Menakar Kesiapsiagaan Masyarakat

- Pemukim Di Sempadan Sungai Das Wae Batu Merah Kota Ambon Dalam Menghadapi Banjir. *Prosiding Seminar Perhutanan Sosial, Fakultas Pertanian Universitas Pattimura*, 230.
- Latuamury, B., Sahureka, M., Hadijah, M. H., Parera, L. R., Iskar, & Talaohu, M. (2025). The community understanding and attitude related to the protection area function of the Wae Batu Merah watershed in Ambon City. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1527(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1527/1/012012>
- Latuamury, B., Sudarmadji, S., & Suprayogi, S. (2016). Variasi Perubahan Penggunaan Lahan Pada Berbagai Tipe Bentuklahan Dan Kaitannya Dengan Aliran Dasar Sungai Pada DAS Keduang Provinsi Jawa Tengah (The Variation of Land-Use Change in Various Landform Type and Its Correlation With River Baseflow). *Jurnal Manusia Dan Lingkungan*, 23(2). <https://doi.org/10.22146/jml.18790>
- Latuamury, B., & Talaohu, M. (2021). Correlating Spatial Pattern of Canopy Greenness Derived from the NDVI with Hydrological Characteristics of Small Island Watersheds. *Journal of Geographical Studies*, 5(1). <https://doi.org/10.21523/gcj5.21050101>
- Marasabessy, S., Latuamury, B., Iskar, I., & Suhendy, C. C. V. (2019). Persepsi Masyarakat Mengenai Peranan Vegetasi Kawasan Sabuk Hijau Di Sempadan Sungai DAS Wae Batu Gajah. *MAKILA*, 13(1). <https://doi.org/10.30598/makila.v13i1.2317>
- Mehmood, K., Anees, S. A., Rehman, A., Pan, S., Tariq, A., Zubair, M., Liu, Q., Rabbi, F., Khan, K. A., & Luo, M. (2024). Exploring spatiotemporal dynamics of NDVI and climate-driven responses in ecosystems: Insights for sustainable management and climate resilience. *Ecological Informatics*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2024.102532>
- Pettorelli, N., Ryan, S., Mueller, T., Bunnefeld, N., Jedrzejewska, B., Lima, M., & Kausrud, K. (2011). The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI): Unforeseen successes in animal ecology. In *Climate Research* (Vol. 46, Issue 1). <https://doi.org/10.3354/cr00936>
- Priya, M. V., Kalpana, R., Pazhanivelan, S., Kumaraperumal, R., Ragunath, K. P., Vanitha, G., Nihar, A., Prajesh, P. J., & Vasumathi, V. (2023). Monitoring vegetation dynamics using multi-temporal Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Enhanced Vegetation Index (EVI) images of Tamil Nadu. *Journal of Applied and Natural Science*, 15(3). <https://doi.org/10.31018/jans.v15i3.4803>
- Siahaya, J. S., Latuamury, B., & Loppies, R. (2025). Persepsi Pemangku Kepentingan Terhadap Pengelolaan Lanskap Hutan DASs Wae Batu Merah Kota Ambon. *Jurnal Nusa Sylva*, 24(2). <https://doi.org/10.31938/jns.v24i2.760>
- Syamsul Fallah Kelihul, Bokiraiya Latuamury, & Rina Suryani Oktari. (2025). Pemetaan Kerentanan Banjir Berbasis Karakteristik Sosio-Hidrologi di DAS Wae Batu Merah, Kota Ambon. *MAKILA*.
- Tempa, K., Ilunga, M., Agarwal, A., & Tashi. (2024). Utilizing Sentinel-2 Satellite Imagery for LULC and NDVI Change Dynamics for Gelephu, Bhutan. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/app14041578>
- Waiyasusri, K. (2021). Monitoring the land cover changes in mangrove areas and urbanization using normalized difference vegetation index and normalized difference built-up index in Krabi Estuary Wetland, Krabi province, Thailand. *Applied Environmental Research*, 43(3). <https://doi.org/10.35762/AER.2021.43.3.1>
- Wiedarti, S., Ramdan, H., & Sudrajat, C. (2014). Keanekaragaman Jenis Tumbuhan Pencegah Erosi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Ciliwung. *Ekologia*, 14(2), 1–9.
- Xu, Y., Yang, Y., Chen, X., & Liu, Y. (2022). Bibliometric Analysis of Global NDVI Research Trends from 1985 to 2021. In *Remote Sensing* (Vol. 14, Issue 16). <https://doi.org/10.3390/rs14163967>
- Zha, Y., Gao, J., & Ni, S. (2003). Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24(3). <https://doi.org/10.1080/01431160304987>
- Zhao, Q., & Qu, Y. (2024). The Retrieval of Ground NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) Data Consistent with Remote-Sensing Observations. *Remote Sensing*, 16(7). <https://doi.org/10.3390/rs16071212>
- Zhihao, W., & Wei, F. (2024). UV-NDVI for real-time crop health monitoring in vertical farms. *Smart Agricultural Technology*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100462>