

PEMANTAUAN JASA EKOSISTEM UNTUK PENGATURAN AIR DAS CISANGKUY BAGIAN TENGAH DAN HULU

Monitoring of Ecosystem Services for Water Regulation in the Central and Upper Cisangkuy Watersheds

Miesriany Hidiya^{1)*}, Eggy Arya Giofandi¹⁾, Andini Tribuana Tunggadewi¹⁾, Beata Ratnawati¹⁾, dan Boedi Tjahjono²⁾

¹⁾ Program Studi Teknik dan Manajemen Lingkungan, Sekolah Vokasi, IPB University

²⁾ Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, IPB University

ABSTRACT

Water regulation ecosystem services in the middle and upper parts of the Cisangkuy watershed play a vital role in the lives of humans and other living beings in the downstream areas. This is related to daily water needs as well as the threat of disasters, given that ecosystem damage in the upstream areas can lead to floods, as has frequently occurred in the research area. This study aims to monitor water regulation ecosystem services based on the biophysical characteristics of the region. The approach used is based on Multi Criteria Evaluation of three main parameters: Topographic Wetness Index, Normalized Difference Vegetation Index, and Slope Gradient. The main data used were 30m SRTM DEM and Landsat 5 TM and 8/9 OLI-TIRS satellite imagery for the period 2000–2024. The results of the study show that the TWI values of the research area are spatially dominated by “high” (40.72%) and “very high” (36.79%) classes. For the slope classes, they are dominated by “moderately steep” (23.09%) and “steep” (23.07%) classes. Meanwhile, for vegetation density (NDVI), there was a dynamic change in area. The “very dense” class experienced a significant increase in area from 0.43% (2000) to 1.19% (2004), and sharply increased to 45.26% (2024). Meanwhile, the “dense” class briefly rose from 30.53% (2000) to 38.58% (2004), but then decreased to 26.16% (2024). For the “medium” density class, it briefly rose from 45.05% (2000) to 47.43% (2004) but then decreased to 18.47% (2024). This dynamic change in area impacted the value of water regulating ecosystem services, where the “high” class initially decreased from 37.95% (2000) to 17.23% (2004), but then increased again to 37.76% (2024). These findings confirm that there has been an improvement in the ecosystem of the upper and middle Cisangkuy Watershed over a 20-year period (2004 to 2024). This ecosystem condition is expected to be maintained or further improved to effectively reduce the incidence of floods and their impacts in downstream areas in the future.

Key words: ecosystem services, Cisangkuy Watershed, MCE, NDVI, TWI, water regulation, West Java

ABSTRAK

Jasa ekosistem pengaturan air di Daerah Aliran Sungai (DAS) Cisangkuy bagian tengah dan hulu mempunyai peran penting untuk kehidupan manusia dan makhluk hidup lain di wilayah bawahnya. Hal ini terkait dengan kebutuhan air sehari-hari ataupun terkait dengan ancaman bencana, dikarenakan kerusakan ekosistem di wilayah atas dapat mendatangkan bencana banjir seperti yang selama ini terjadi di daerah penelitian. Penelitian ini bertujuan memantau jasa ekosistem pengatur air berdasarkan karakteristik biofisik wilayah. Pendekatan yang digunakan berbasis *Multi Criteria Evaluation* (MCE) terhadap tiga parameter utama yaitu *Topographic Wetness Index* (TWI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), dan kemiringan lereng. Data utama yang digunakan adalah DEM SRTM 30m dan citra satelit Landsat 5 TM dan 8/9 OLI-TIRS periode 2000–2024. Hasil kajian menunjukkan bahwa nilai TWI daerah penelitian secara luas didominasi oleh kelas “tinggi” (40.72%) dan “sangat tinggi” (36.79%). Adapun untuk kelas lereng didominasi oleh kelas “agak curam” (23.09%) dan “curam” (23.07%). Sementara itu untuk kerapatan vegetasi (NDVI) terjadi perubahan luasan yang cukup dinamis. Kelas “sangat rapat” mengalami penambahan luas cukup signifikan dari 0.43% (2000) menjadi 1.19% (2004), dan meningkat tajam menjadi 45.26% (2024). Sementara itu pada kelas “rapat” sempat naik dari 30.53% (2000) menjadi 38.58% (2004), namun mengalami penurunan menjadi 26.16% (2024). Untuk kelas kerapatan “sedang” sempat naik dari 45.05% (2000) menjadi 47.43% (2004) namun turun menjadi 18.47% (2024). Dinamika perubahan luas ini berdampak pada nilai jasa ekosistem pengatur air di mana kelas “tinggi” sempat turun dari 37.95% (2000) menjadi 17.23% (2004), namun meningkat kembali menjadi 37.76% (2024). Temuan ini menegaskan bahwa telah terjadi perbaikan ekosistem DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu dalam kurun waktu 20 tahun (2004 ke 2024). Diharapkan kondisi ekosistem tetap terjaga atau membaik sehingga dapat menekan dampak banjir wilayah hilir di masa mendatang.

Kata kunci: DAS Cisangkuy, jasa ekosistem, Jawa Barat, MCE, NDVI, pengaturan air, TWI

PENDAHULUAN

Bentanglahan (*landscape*) adalah hamparan permukaan bumi yang tersusun atas beragam ekosistem. Manusia termasuk salah satu komponen penting dalam

ekosistem dan memanfaatkan jasa ekosistem untuk keperluan hidup sehari-hari. Jasa ekosistem menurut *Mellenium Ecosystem Assessment* (2005) adalah manfaat yang bisa diperoleh manusia dari ekosistem, dan jasa ini dikelompokkan menjadi empat kategori yang berfungsi

*) Penulis Korespondensi: Telp. +6281210155472; Email: miesriany@apps.ipb.ac.id DOI: <http://dx.doi.org/10.29244/jitl.27.2.102-114>

sebagai penyedia, pengatur, budaya, dan pendukung. Mengingat pentingnya jasa ekosistem, maka pengelolaan terhadap ekosistem menjadi hal yang sangat krusial agar fungsinya dapat terus berlangsung secara berkelanjutan. Jika kelalaian terhadap pengelolaan terjadi maka dapat melahirkan ketidak-seimbangan ekologis yangujungnya dapat menyumbangkan suatu bencana, seperti banjir, longsor, atau yang lainnya.

Kejadian banjir di Indonesia menurut catatan Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) mempunyai frekuensi kejadian yang paling banyak di setiap tahunnya. Untuk tahun 2024 misalnya telah mencapai angka 1,240 kejadian atau 40.90% dari seluruh kejadian bencana yang ada di tanah air (BNPB, 2024). Melihat tingginya frekuensi banjir tersebut maka bisa tergambaran bagaimana kondisi pengelolaan ekosistem yang ada di Indonesia saat ini. Banjir oleh BNPB digolongkan sebagai bencana hidrometeorologis, sehingga kewaspadaan terhadap bahaya banjir di musim hujan merupakan hal penting terutama di wilayah hilir yang umumnya merupakan kawasan budidaya dalam suatu Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW).

Wilayah Bandung, khususnya di bagian selatan, merupakan bentanglahan dataran atau cekungan yang sering mengalami banjir (Irawan *et al.*, 2018; Mazlan *et al.*, 2020). Peristiwa banjir ini sering melanda beberapa kecamatan, antara lain Bojongsoang, Baleendah, Margahayu, dan Dayeuhkolot (Resubun *et al.*, 2018; Mazlan *et al.*, 2020; Kompas, 2025). Kewaspadaan terhadap banjir dalam bentuk kesiapsiagaan harus selalu hadir di wilayah ini, agar dampak yang ditimbulkan bisa diminimalisir. Untuk kasus di Kecamatan Baleendah, wilayah yang sering tergenangi oleh banjir adalah Kelurahan Andir (Mazlan *et al.*, 2020), di mana pada tahun 2013 dan 2014 misalnya, kedalaman banjir di daerah ini mencapai 2 meter menggenangi permukiman (Resubun *et al.*, 2018). Menurut informasi warga lokal, Sungai Cisangkuy yang melewati kelurahan ini meluapkan banjirnya pertama kali pada tahun 2005 terutama di area sekitar pertemuan antara Sungai Cisangkuy dengan sungai induknya, yaitu Sungai Citarum (Sulfa *et al.*, 2017). Sejak tahun tersebut hingga kini luapan masih terus berlangsung dengan tingkat keparahan yang beragam.

Fenomena di Kelurahan Andir ini cukup menarik dikaji untuk membantu dan mengevaluasi program-program mitigasi yang telah ada, terutama terhadap faktor penyebab banjir di bagian tengah dan hulu daerah aliran sungai (DAS). Dalam hal ini pengetahuan tentang kondisi bentanglahan DAS dan jasa ekosistem perlu difahami dan bisa digunakan sebagai kunci atau indikator terhadap fenomena banjir yang terjadi di wilayah hilir; lebih jauh dapat pula digunakan untuk mengetahui performa DAS. Penelitian ini bertujuan untuk memantau jasa ekosistem pengatur air di dalam DAS Cisangkuy terutama di bagian tengah dan hulu berlandaskan pada perubahan ekosistem yang ada di bentanglahan DAS. Unsur penting bentanglahan yang berkaitan erat dengan jasa ekosistem pengatur air adalah penutup lahan (*land cover*) dan

bentuklahan (*landform*), di mana kemiringan lereng dan indeks kebasahan permukaan lahan (*topographic wetness index*) merupakan bagian dari bentuklahan yang dapat dipakai sebagai parameter jasa pengaturan air dalam ekosistem karena berkaitan erat dengan proses infiltrasi dan retensi air hujan yang jatuh di dalam DAS Cisangkuy. Melalui analisis bentanglahan ini diharapkan faktor TWI, lereng, dan penutup lahan bisa dijadikan sebagai parameter terobosan untuk mencapai tujuan penelitian.

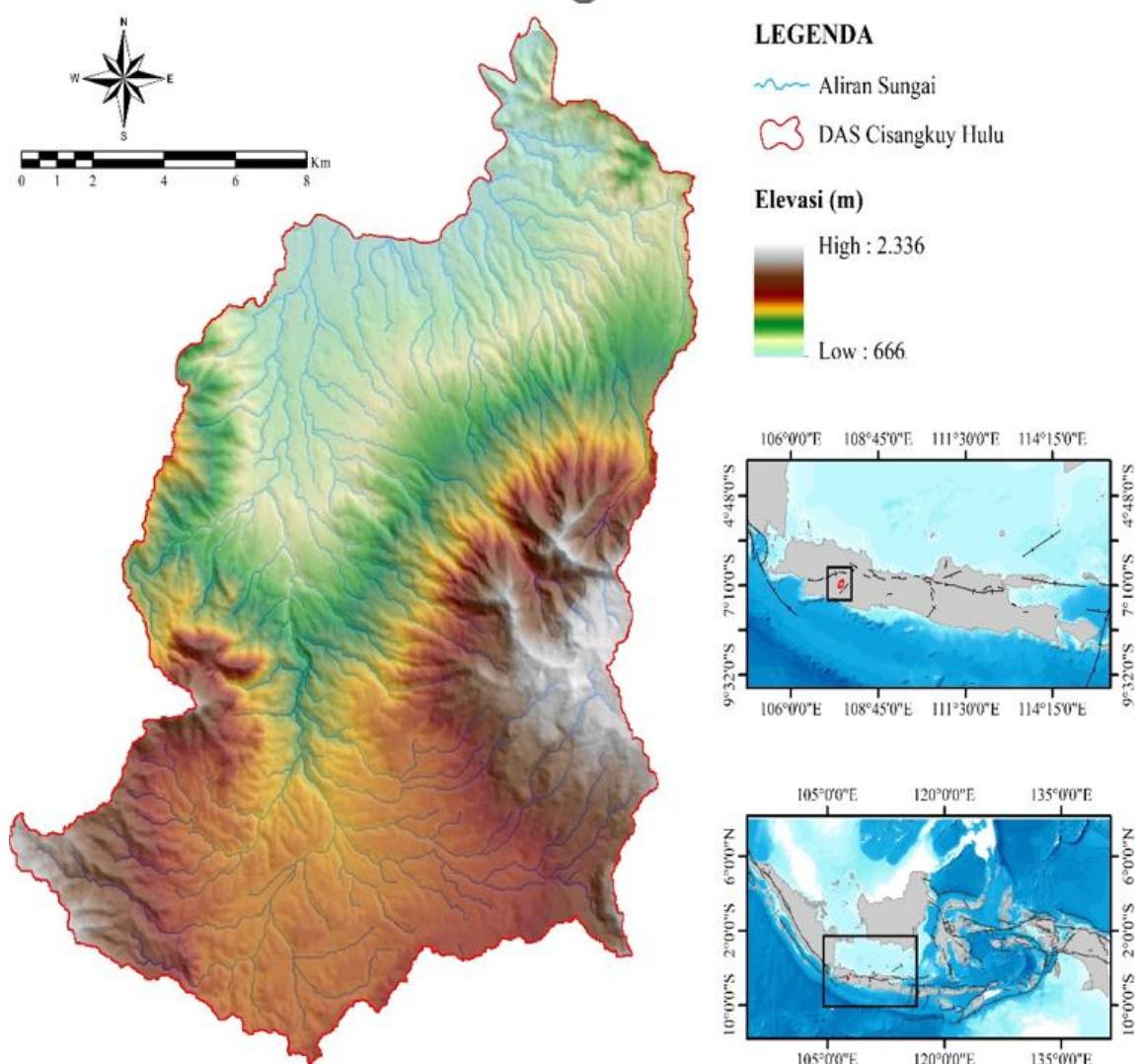
BAHAN DAN METODE

Lokasi Penelitian

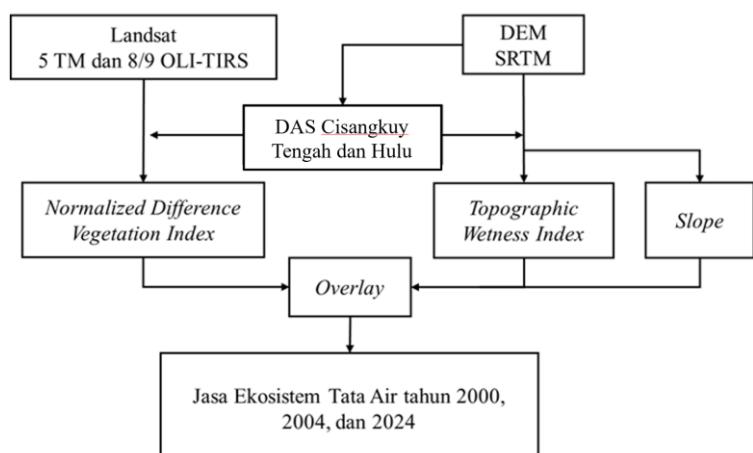
Wilayah penelitian secara administratif masuk dalam Kabupaten Bandung yang meliputi DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu. Lokasi ini dipilih dengan asumsi bahwa sumbangan terbesar debit sungai yang menghasilkan banjir di wilayah hilir DAS adalah dari kondisi jasa ekosistem di wilayah DAS bagian tengah dan hulu. Secara astronomis wilayah ini terletak di antara 107°20' BT – 107°45' BT dan di antara 7°00' LS – 7°15' LS, mencakup wilayah seluas 262.92 km². Secara topografis lokasi ini mempunyai elevasi antara 666 m dpl hingga 2,300 m dpl serta mempunyai bentuk DAS yang agak memanjang (Gambar 1). Secara geomorfologis lokasi penelitian tersusun secara dominan atas morfologi pegunungan dan perbukitan, dan secara morfogenesis merupakan wilayah vulkanik denudasional. Tubuh gunungapi yang masuk dalam wilayah kajian adalah milik Gunungapi Malabar dan gunungapi lain namun gunungapi-gunungapi tersebut sudah tidak aktif lagi (*dormant*), sehingga proses denudasi secara aktif terus bekerja membentuk relief di wilayah ini. Dari Gambar 1 terlihat bahwa area DAS bagian tengah dicirikan oleh elevasi yang berwarna hijau hingga biru, didominasi oleh lereng agak miring hingga landai, sementara itu untuk bagian hulu dicirikan oleh warna kuning hingga coklat tua dan putih, di mana kemiringan lahan yang miring hingga terjal mendominasi wilayah ini. Jaringan sungai yang terbentuk di dalam DAS secara umum mempunyai pola dendritik.

Pengolahan Data

Pengolahan data dilakukan setelah tahap pengumpulan data dari berbagai sumber, seperti informasi penginderaan jauh dan data spasial lainnya. Data utama yang diperlukan dalam penelitian meliputi 3 parameter, yaitu *Topographic Wetness Index* (TWI), *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), dan kemiringan lereng. Ketiga parameter ini merepresentasikan nilai jasa ekosistem pengaturan air atau tata air melalui kinerja aspek infiltrasi dan retensi bentanglahan terhadap air hujan yang jatuh di permukaan DAS. Dengan demikian semakin tinggi kemampuan ekosistem dalam menginfiltrasi dan meretensi air hujan maka semakin tinggi pula nilai jasa ekosistemnya. Kerangka pemikiran jasa ekosistem ini disajikan dalam Gambar 2.



Gambar 1. Lokasi penelitian: DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Topographic Wetness Index (TWI)

Pendekatan TWI ini diterapkan untuk menganalisis akumulasi air, kapasitas retensi, dan infiltrasi air berdasarkan karakteristik topografi di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu. *Topographic Wetness Index* (TWI) selain dapat mencerminkan fungsi morfologi juga mampu menggambarkan secara tidak langsung morfogenes

bentuklahan (*landform*) di dalam DAS. Morfologi cekungan atau dataran misalnya adalah bagian dari topografi yang mempunyai potensi besar menampung air hujan, sementara morfologi tersebut secara morfogenesis akan tersusun oleh material deposisional baru yang berstruktur remah dan bertekstur lepas yang disebut sebagai alluvium. Jadi karakter TWI pada *landform* yang demikian ini akan mempunyai potensi tinggi dalam mengatur air

melalui proses retensi dan infiltrasi air hujan. Dalam penelitian ini informasi TWI diolah dari data *Digital Elevation Model* (DEM) yang diambil dari data *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) dengan resolusi spasial 30-meter yang diterbitkan oleh *United States Geological Survey* (USGS) melalui laman <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Perhitungan TWI diawali dengan pengolahan *Digital Elevation Model* (DEM) yang diperoleh dari citra SRTM. Langkah awal dalam pengolahan data ini adalah melakukan koreksi hidrologis menggunakan algoritma *fill-sink*, yang bertujuan untuk menghilangkan depresi buatan agar tidak mengganggu pola aliran hidrologi (Grimm *et al.*, 2018). Selanjutnya, dilakukan perhitungan arah aliran (*flow direction*) menggunakan metode *Deterministic Eight-Neighbor* (D8) pada perangkat lunak QGIS 3.34. Metode ini menentukan arah pergerakan air dengan mempertimbangkan perbedaan elevasi antar-piksel dalam DEM (Altunel, 2023). Langkah selanjutnya adalah menghitung akumulasi aliran (*flow accumulation*) untuk setiap sel yang disebut *Specific Catchment Area* (A_s). Area tangkapan air spesifik (A_s) ini merepresentasikan seberapa besar area di atas suatu titik berkontribusi terhadap aliran air ke titik tersebut. Berikutnya dilakukan penghitungan terhadap kemiringan lereng (*slope*, β) menggunakan metode diferensiasi untuk menentukan tingkat kemiringan permukaan tanah dalam satuan radian. Nilai kemiringan ini akan menjadi komponen penting dalam analisis TWI. Adapun persamaan yang digunakan dalam perhitungan ini adalah sebagai berikut (Beven & Kirkby, 1979):

$$TWI = \ln \left(\frac{A_s}{\tan \beta} \right)$$

di mana, A_s merupakan luas area tangkapan spesifik dan $\tan \beta$ adalah nilai kemiringan lereng.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Tajuk vegetasi salah satunya mempunyai fungsi menahan air hujan melalui luasan dan kerapatan daun-daunnya, kemudian mengalirkannya ke dalam tanah melalui ranting, dahan, batang, dan juga melalui seresah daun yang ada di atas permukaan tanah. Oleh karenanya kepadatan vegetasi menjadi faktor penting untuk dapat dianalisis melalui *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) menggunakan citra penginderaan jauh. NDVI adalah algoritma yang dikembangkan untuk mengidentifikasi dan mengevaluasi kerapatan vegetasi (Spadoni *et al.*, 2020). Sumber data utama untuk NDVI dalam penelitian ini berasal dari citra Landsat 5 *Thematic Mapper* (TM) dan Landsat 8/9 *Operational Land Imager and Thermal Infrared Sensor* (OLI-TIRS) yang diakses melalui katalog *Google Earth Engine* (GEE) dengan resolusi spasial 30 meter. Untuk memastikan kualitas data, penelitian ini menggunakan koleksi Landsat *Collection 2* dengan *atmospherically corrected surface reflectance*, yang telah dilakukan proses koreksi atmosferik dan geometrik oleh GEE. Setiap citra diatur dalam kumpulan data multi-temporal sesuai dengan periode pengamatan, yaitu Landsat 5 untuk tahun 2000 dan tahun 2004, serta Landsat 8/9 untuk tahun 2024. Ketiga citra Landsat tersebut diambil pada bulan yang sama, yakni dari hasil akusisi bulan Juni. Selain itu, seluruh dataset dikonversi dari sistem koordinat *World*

Geodetic System (WGS) 1984 ke sistem *Universal Transverse Mercator* (UTM) zona 48 Selatan untuk memastikan keseragaman referensi spasial pada wilayah observasi. Untuk dapat meningkatkan akurasi hasil analisis, maka citra dengan cakupan awan di bawah 10% digunakan untuk meminimalkan gangguan akibat keberadaan awan. Setelah tahap pre-processing ini dilakukan, maka nilai NDVI dihitung menggunakan rumus berikut (Rouse *et al.*, 1973):

$$NDVI = \frac{(NIR - RED)}{(NIR + RED)}$$

di mana NIR (*Near-Infrared Band*) adalah Band 4 pada Landsat 5 dan Band 5 pada Landsat 8/9, sementara RED (*Red Band*) adalah Band 3 pada Landsat 5 dan Band 4 pada Landsat 8/9. Dalam hal ini nilai NDVI berkisar antara -1 hingga 1, di mana nilai mendekati 1 menunjukkan vegetasi yang sehat dan rapat, sedangkan nilai mendekati -1 mengindikasikan objek lain seperti air, tanah terbuka, atau area non-vegetasi lainnya (Tabel 1).

Tabel 1. Kategori tingkat kerapatan vegetasi

Transformasi NDVI	Kerapatan Vegetasi
-1 s/d -0.32	Non Vegetasi
-0.32 s/d 0.25	Jarang
0.25 s/d 0.42	Cukup rapat
0.42 s/d 0.50	Rapat
0.50 s/d 1	Sangat Rapat

Sumber: (Giofandi & Sekarjati, 2020)

Data NDVI dari tahun 2000, 2004, dan 2024 kemudian dibandingkan untuk mengidentifikasi pola perubahan tutupan vegetasi di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu. Analisis perubahan NDVI ini berperan dalam memahami bagaimana dinamika vegetasi memengaruhi jasa ekosistem, terutama dalam aspek infiltrasi dan retensi air, serta kaitannya dengan pengaturan air di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu. NDVI yang bernilai tinggi mencerminkan kerapatan vegetasi yang tinggi pula, di mana akar dari setiap vegetasi dapat memperkaya pori tanah sehingga meningkatkan daya infiltrasi tanah. Daun-daun tanaman dan seresah yang terakumulasi di permukaan tanah pun juga membantu proses retensi air sebelum air hujan mengalir menjadi aliran permukaan (*overland flow*) tatkala pori tanah telah jenuh oleh air.

Kemiringan Lereng

Aspek kemiringan lereng dapat juga mencerminkan aspek retensi terhadap air yang jatuh di permukaan bumi, di mana semakin besar nilai kemiringan lereng, maka air yang jatuh ke tanah akan lebih mudah dialirkan ke lereng bawah berkat adanya gravitasi, sehingga nilai retensi menjadi rendah. Kemiringan lereng dalam penelitian ini dihitung menggunakan data DEM SRTM dengan metode diferensiasi berbasis GIS. Data kemiringan lereng ini diklasifikasikan ke dalam lima kategori, yaitu datar (0-8%), landai (8-15%), agak curam (15-25%), curam (25-45%), dan sangat curam (>45%) yang selanjutnya digunakan dalam analisis *Multi Criteria Evaluation* (MCE) untuk mengkaji jasa ekosistem pengatur air.

Multi Criteria Evaluation (MCE)

Analisis tumpang susun tertimbang (*Weighted Overlay Analysis*) digunakan untuk mengintegrasikan berbagai parameter dengan menerapkan skala nilai yang seragam pada setiap variabel (Baidya *et al.*, 2014). Dalam proses ini, setiap parameter tematik yang telah diklasifikasikan akan dikonversi ke dalam skala rasio potensi, seperti tinggi, sedang, dan rendah. Melalui penerapan *Multi Criteria Evaluation* (MCE), faktor-faktor yang telah dikelompokkan diberikan bobot untuk mengevaluasi kontribusi parameter indeks kebasahan topografis, kerapatan vegetasi, dan kemiringan lereng terhadap jasa ekosistem pengatur air. Bobot diberikan berdasarkan signifikansi dari masing-masing parameter dalam mempengaruhi kapasitas infiltrasi dan retensi. Formulasi penilaian jasa ekosistem untuk pengatur air mengacu pada pola MCE, yaitu penjumlahan dari hasil perkalian antara nilai/skor dan bobot dari masing-masing parameter (Sulfa *et al.*, 2017):

$$JE = To.a + Ve.a + Ke.a$$

di mana, *JE* adalah jasa ekosistem pengatur air, *To* merupakan nilai indeks kebasahan topografis, *Ve* mewakili nilai kerapatan vegetasi, dan *Ke* merepresentasikan nilai dari kemiringan lereng. Dalam hal ini *a* merupakan nilai bobot atau koefisien yang merepresentasikan kontribusi relatif dari masing-masing parameter terhadap jasa ekosistem pengatur air. Adapun nilai atau skor dan bobot untuk perhitungan MCE yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Tabel 2, di mana setiap parameter diasumsikan mempunyai kontribusi atau bobot yang sama terhadap jasa ekosistem yang dihasilkan.

Tabel 2. Skor dan bobot penilaian jasa ekosistem pengatur air di DAS Cisangkuy

Parameter	Sub Kelas	Skor	Bobot
Kemiringan Lereng	Datar	5	0.33
	Landai	4	
	Agak Curam	3	
	Curam	2	
	Sangat Curam	1	
Normalized Difference Vegetation Index	Sangat Rapat	5	0.33
	Rapat	4	
	Cukup rapat	3	
	Jarang	2	
	Non Vegetasi	1	
Topographic Wetness Index	Sangat Tinggi	5	0.33
	Tinggi	4	
	Sedang	3	
	Rendah	2	
	Sangat Rendah	1	

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh beberapa data spasial meliputi indeks kebasahan topografis (TWI), indeks vegetasi (NDVI), dan kemiringan lereng seperti terlihat pada Gambar 3.

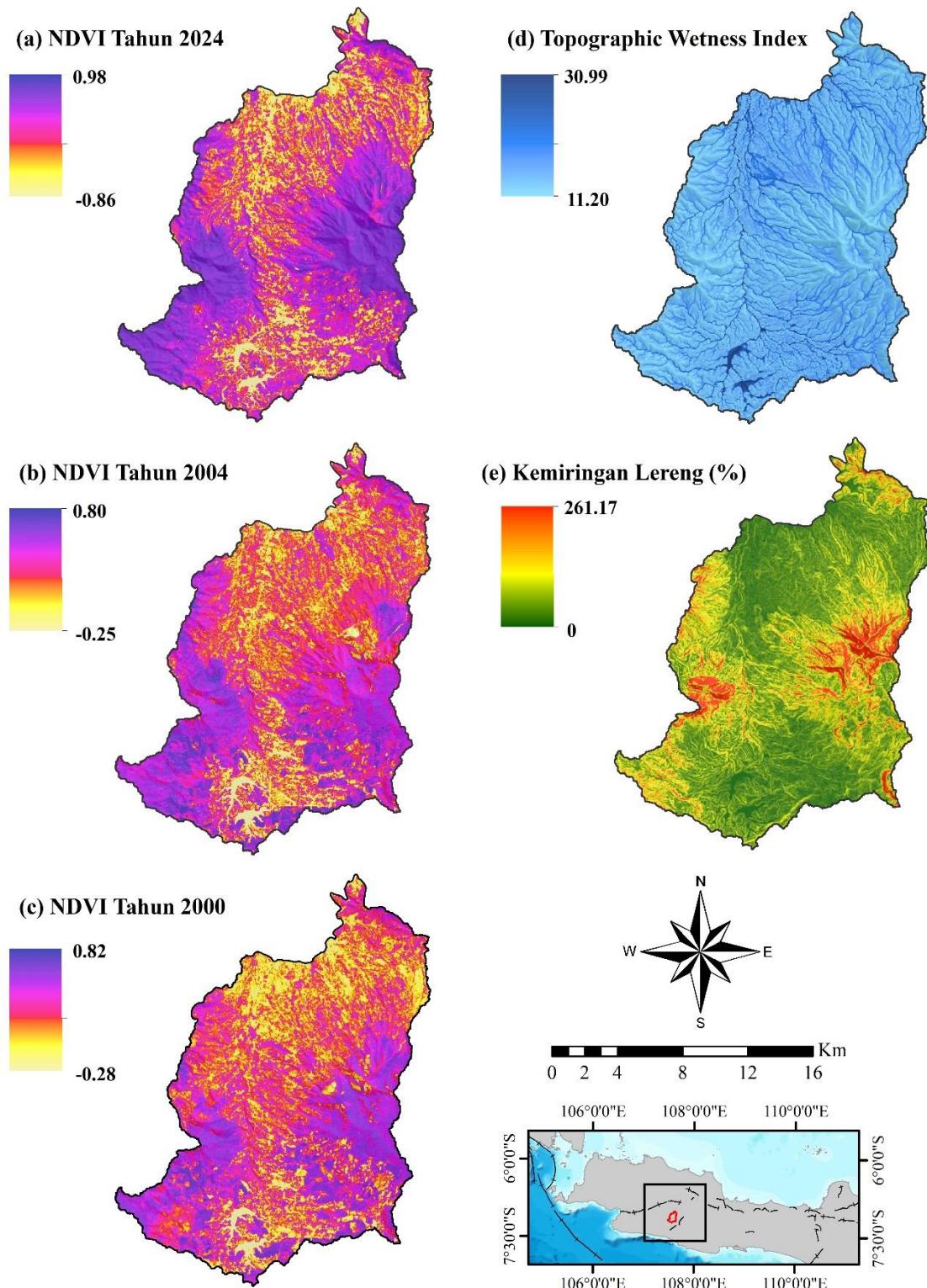
Indeks Kebasahan Topografis (TWI) pada DAS Cisangkuy Tengah dan Hulu

Indeks kebasahan topografis menjadi indikator penting dalam analisis tata air suatu daerah aliran sungai (DAS). TWI menggambarkan kapasitas suatu wilayah dalam menahan dan menyimpan air permukaan (melalui proses infiltrasi) berdasarkan faktor kelerengan dan konvergensi aliran air yang ditunjukkan oleh perbedaan elevasi dari setiap piksel. Nilai TWI yang tinggi seperti yang terdapat di wilayah pelembahan dan cekungan menunjukkan wilayah yang mempunyai potensi menahan air tinggi baik dalam bentuk genangan atau kelembapan tanah yang lebih besar. Sebaliknya nilai rendah mengindikasikan daerah dengan kemampuan infiltrasi yang rendah dan kelembapan tanah yang lebih kecil seperti yang terjadi pada area punggungan perbukitan/pegunungan. Menurut Sørensen *et al.* (2006) pemahaman mengenai distribusi TWI sangat penting dalam pengelolaan DAS, terutama untuk mitigasi bencana, perencanaan penggunaan lahan, serta konservasi ekosistem berbasis air.

Berdasarkan hasil analisis TWI di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu, terlihat bahwa mayoritas wilayah tergolong dalam kategori “sangat tinggi” dan “tinggi”, dengan luas berturut-turut 40.72% dan 36.79% dari luas total daerah penelitian (Tabel 3). Hal ini menunjukkan bahwa lebih dari 77% dari luas wilayah DAS memiliki potensi kelembapan tinggi, yang dipengaruhi oleh karakteristik morfologi DAS serta pola aliran air permukaan yang cenderung berkumpul dan meresapkan air pada zona pelembahan atau cekungan. Material vulkanik seperti piroklastik dan alluvium juga banyak mendukung dalam meloloskan air masuk ke dalam tanah karena sifat porositasnya yang relatif tinggi. Adapun untuk kategori “sedang” mencakup luasan 13.82% yang menunjukkan area transisi dengan tingkat kebasahan moderat. Sementara itu, untuk kategori “rendah” dan “sangat rendah” memiliki cakupan yang lebih kecil, berturut-turut 6.71% dan 1.95% yang umumnya berada di daerah dengan kemiringan lebih curam atau pada punggungan relief (*ridges*). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian Thomas *et al.* (2018) yang menyatakan bahwa wilayah dengan elevasi rendah dan lereng landai cenderung memiliki nilai TWI yang lebih tinggi, sedangkan daerah perbukitan atau pegunungan dengan lereng curam memiliki nilai lebih rendah akibat aliran air yang lebih mudah mengalir secara cepat ke wilayah hilir. Dengan demikian, distribusi TWI di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu (Gambar 3-d) memberikan wawasan penting bagi pengelolaan tata air dan strategi konservasi dalam menghadapi tantangan hidrologis di wilayah ini.

Tabel 3. Luas dan persentase indeks kebasahan topografis

Kategori	(km ²)	(%)
Sangat Tinggi	107.07	40.72
Tinggi	96.74	36.79
Sedang	36.33	13.82
Rendah	17.65	6.71
Sangat Rendah	5.13	1.95

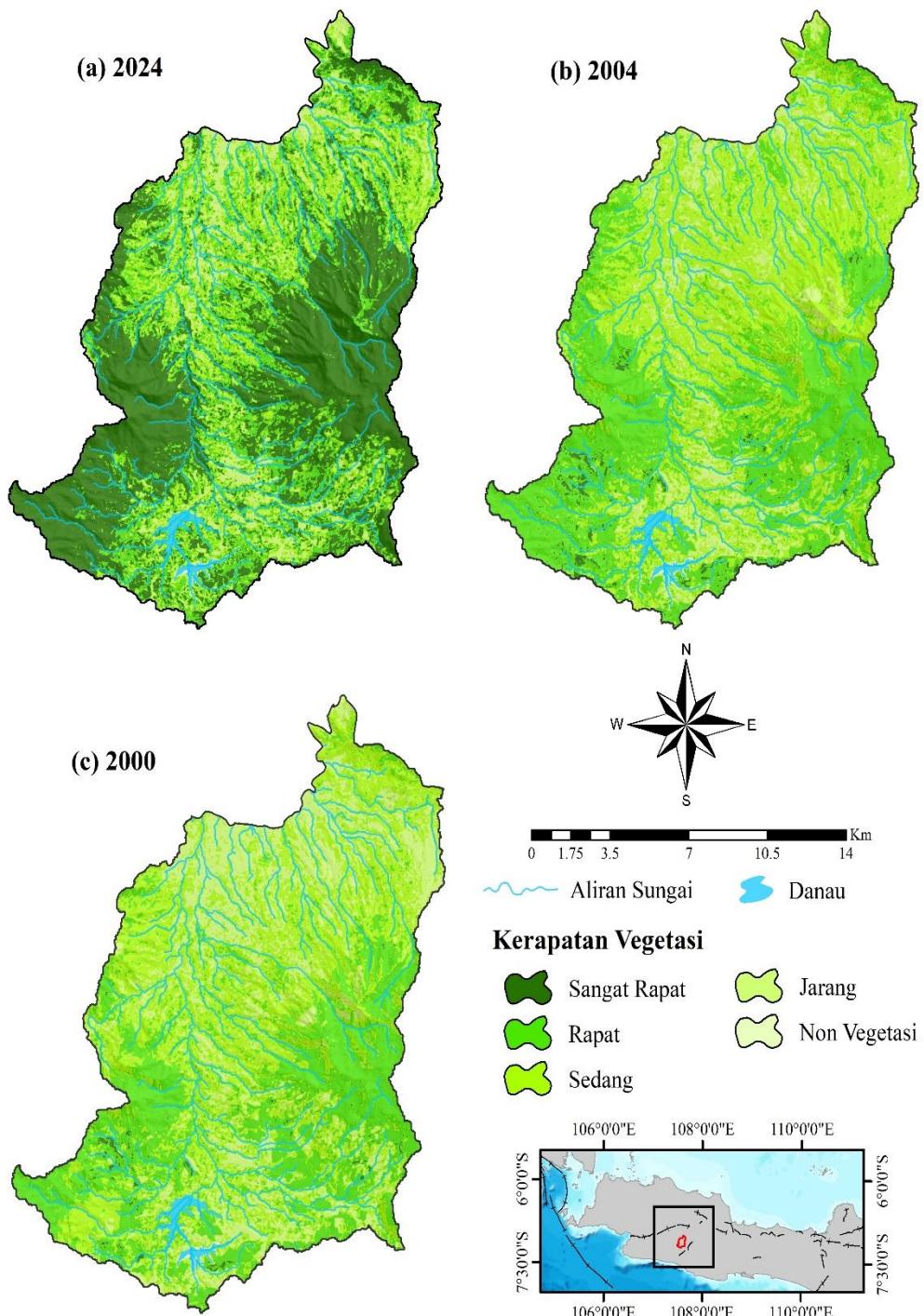


Gambar 3. Informasi data (a) NDVI tahun 2024, (b) NDVI tahun 2004, (c) NDVI tahun 2000, (d) TWI, dan (e) kemiringan lereng pada lokasi pengamatan

Kerapatan Vegetasi DAS Cisangkuy Tengah dan Hulu tahun 2000 sampai 2024

Perubahan tutupan vegetasi mencerminkan dinamika kondisi ekosistem dalam suatu DAS. Oleh karena itu, analisis perubahan kerapatan vegetasi dari tahun 2000,

2004, dan 2024 dilakukan untuk memahami bagaimana perubahan tutupan lahan memengaruhi kapasitas jasa ekosistem pengatur air di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu. Hasil spasial dari analisis pada tiga periode waktu pengamatan ditampilkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Persebaran spasial kerapatan vegetasi di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu tahun (a) 2024, (b) 2004, dan (c) 2000

Gambar 4 menunjukkan hasil analisis kerapatan vegetasi pada tahun 2000, 2004, dan 2024. Ilustrasi tersebut menunjukkan bahwa telah terjadi peningkatan luasan tutupan vegetasi yang lebih rapat dalam kurun waktu tersebut. Data menunjukkan (Tabel 4) bahwa luas area vegetasi yang mempunyai kerapatan "sangat rapat" (nilai NDVI 0.50 s/d 1) meningkat drastis, dari 0.43% pada tahun 2000 menjadi 1.19% di tahun 2004, lalu melonjak menjadi 45.26% pada tahun 2024. Peningkatan ini bisa jadi disebabkan oleh program rehabilitasi lahan atau penerapan sistem pertanian agro-forestry yang cukup pesat. Dengan

demikian kebijakan konservasi lingkungan telah mampu meningkatkan tutupan vegetasi di DAS yang sebelumnya mengalami degradasi (Gunawan *et al.*, 2024). Sementara itu untuk kategori vegetasi "rapat" (dengan nilai NDVI 0.42 s/d 0.50) juga mengalami peningkatan yakni dari luasan 30.53% pada 2000 menjadi 38.58% pada 2004, tetapi pada tahun 2024 menurun luasannya menjadi 26.16%. Penurunan ini kemungkinan terjadi karena sebagian wilayah yang sebelumnya masuk kategori "rapat" telah berubah menjadi "sangat rapat", atau menunjukkan pemulihan vegetasi yang lebih intensif.

Tabel 4. Luas dan persentase kerapatan vegetasi tahun 2000 sampai 2024

Kategori	2000		2004		2024		Perubahan 2004-2024 (km ² per tahun)
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	
Sangat Rapat	1.14	0.43	3.13	1.19	118.99	45.26	4.91
Rapat	80.28	30.53	101.44	38.58	68.77	26.16	-0.48
Sedang	118.45	45.05	124.7	47.43	48.55	18.47	-2.91
Jarang	61.20	23.28	31.7	12.06	25.16	9.57	-1.50
Non Vegetasi	1.85	0.70	1.95	0.74	1.45	0.55	-0.02

Sementara itu, untuk kategori "sedang" (dengan nilai NDVI 0.25 s/d 0.42) dan kategori "jarang" (yang diwakili nilai NDVI -0.32 s/d 0.25) menunjukkan tren penurunan luasan, di mana pada tahun 2000, vegetasi dengan kerapatan "sedang" mencakup luas 45.05% kemudian meningkat sedikit menjadi 47.43% pada 2004, namun akhirnya menurun tajam menjadi 18.47% pada 2024. Penurunan ini menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah yang sebelumnya memiliki indeks vegetasi "sedang" berubah menjadi kategori "rapat". Begitu pula dengan kategori "jarang", luasnya juga berkurang dari 23.28% pada 2000 menjadi 12.06% pada 2004, dan menurun lagi menjadi 9.57% pada 2024. Kategori non-vegetasi dengan nilai NDVI (-1 s/d -0.32), yang mencerminkan area terbuka atau lahan terbangun nilainya relatif stabil dari tahun ke tahun. Luasnya hanya mengalami sedikit fluktuasi, dari 0.70% pada tahun 2000 menjadi 0.74% pada 2004, dan menurun lagi menjadi 0.55% pada 2024. Minimnya perubahan pada kategori ini menunjukkan bahwa ekspansi lahan terbangun di wilayah ini tidak terjadi secara besar-besaran, sehingga perubahan utama dalam kerapatan vegetasi lebih banyak disebabkan oleh peningkatan tutupan hutan dan lahan hijau.

Lahan hijau yang penuh dengan vegetasi, termasuk agro-forestry, adalah unsur alam yang memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem Daerah Aliran Sungai (DAS), terutama dalam mengatur tata air, menjaga kestabilan tanah, dan menyerap karbon. Namun demikian aspek vegetasi adalah aspek yang paling mudah mengalami perubahan yang diakibatkan oleh banyaknya aktivitas manusia dalam memanfaatkan lahan di permukaan bumi. Oleh sebab itu, perubahan tutupan vegetasi di dalam DAS akan berdampak besar terhadap siklus hidrologi dan ketersediaan air bagi ekosistem serta kebutuhan manusia (Aduah *et al.*, 2017).

Jika melihat hasil analisis NDVI di atas maka DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu telah banyak mengalami peningkatan kerapatan vegetasi yang cukup signifikan dalam dua dekade terakhir. Hal ini bisa menjadi indikator keberhasilan program rehabilitasi hutan dan pengelolaan DAS berbasis ekosistem. Peningkatan vegetasi yang lebih rapat tentu akan membawa manfaat bagi lingkungan, seperti menjaga keseimbangan tata air, mengurangi erosi, dan meningkatkan serapan karbon di wilayah ini. Namun demikian agar bisa memahami lebih jauh, penelitian lanjut masih diperlukan untuk memahami faktor-faktor utama yang mendorong perubahan ini serta dampaknya terhadap kondisi hidrologi di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu.

Kemiringan Lereng pada DAS Cisangkuy Tengah dan Hulu

Kemiringan lereng merupakan salah satu faktor geomorfologi yang berpengaruh signifikan terhadap proses hidrologi di suatu daerah aliran sungai (DAS). Lereng yang curam cenderung meningkatkan laju limpasan permukaan (*runoff*) dan mempercepat erosi tanah, sementara daerah dengan lereng landai atau datar lebih mampu menyerap dan menyimpan air ke dalam tanah (Zhao *et al.*, 2015). Karakteristik kemiringan lereng juga berpengaruh terhadap infiltrasi, stabilitas tanah, serta risiko bencana hidrologi. Oleh karena itu, pemetaan kemiringan lereng di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu menjadi aspek penting dalam pengelolaan jasa ekosistem, terutama terkait dengan regulasi air dan konservasi tanah.

Dari hasil analisis kemiringan lereng di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu (Tabel 5) menunjukkan bahwa distribusi kemiringan lereng relatif seimbang antara kategori "curam", "agak curam", dan "landai". Wilayah yang memiliki kemiringan "agak curam" memiliki luas terbesar, yaitu 23.09%, diikuti oleh kategori "curam" dengan luas 23.07% dan "landai" seluas 23.01%. Sementara itu untuk kategori "datar" mencakup 16.54% dan kategori "sangat curam" memiliki cakupan terkecil, yaitu 14.28%. Distribusi ini mengindikasikan bahwa DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu memiliki topografi yang cukup beragam, dengan potensi resapan air yang lebih rendah pada daerah curam dan sangat curam, sedangkan pada daerah landai dan datar berpotensi lebih baik dalam mendukung resapan air (infiltrasi) dan kestabilan tanah. DAS dengan proporsi lereng curam yang tinggi cenderung akan mengalami tingkat degradasi lahan yang lebih besar, terutama jika tekanan antropogenik seperti deforestasi dan perubahan tata guna lahan juga tinggi (Fenta *et al.*, 2016). Oleh karena itu, pengelolaan lahan berbasis kemiringan lereng menjadi langkah strategis dalam upaya konservasi DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu, terutama dalam menjaga stabilitas ekosistem dan jasa yang diberikan, seperti jasa pengatur air, serta mengurangi risiko degradasi tanah.

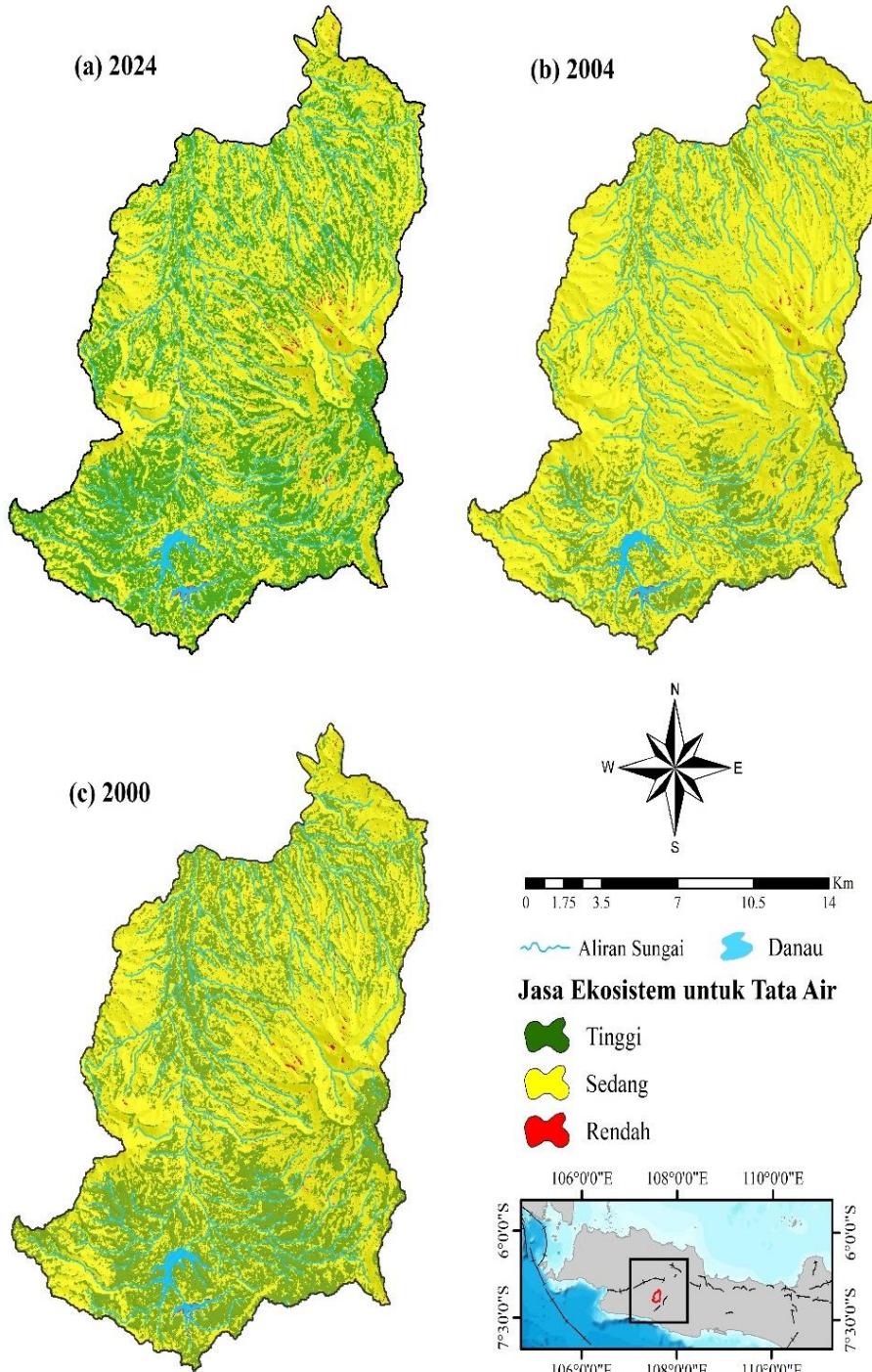
Tabel 5. Luas dan persentase kemiringan lereng

Kategori	Luas	
	(km ²)	(%)
Sangat Curam	37.54	14.28
Curam	60.66	23.07
Agak Curam	60.71	23.09
Landai	60.51	23.01
Datar	43.50	16.54

Jasa Ekosistem Pengatur Air DAS Cisangkuy Tengah dan Hulu tahun 2000 – 2024

Jasa ekosistem pengatur air adalah aspek krusial untuk menjaga keseimbangan hidrologis suatu daerah aliran sungai (DAS). Kemampuan DAS dalam menyediakan, mengatur, dan menyerap air sangat bergantung pada kondisi ekosistemnya, terutama keberadaan vegetasi, jenis tutupan lahan, dan tingkat permeabilitas tanah (Brauman *et al.*, 2005).

2007). DAS Cisangkuy sebagai sub-DAS Sungai Citarum telah mengalami dinamika cukup signifikan dalam penyediaan jasa ekosistem terhadap tata airnya selama periode 2000 hingga 2024 (Gambar 5). Dinamika perubahan ekosistem biasanya disebabkan oleh tekanan antropogenik, seperti alih fungsi lahan, ekspansi permukiman, serta dampak perubahan iklim yang semakin meningkatkan fluktuasi pola curah hujan (Foley *et al.*, 2005).



Gambar 5. Informasi jasa ekosistem untuk pengatur air di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu tahun (a) 2024, (b) 2004, dan (c) 2000

Berdasarkan hasil analisis data spasial didapatkan bahwa pada tahun 2000 luas jasa ekosistem pengatur air kelas "tinggi" mencapai 37.95% dari luas total daerah penelitian. Namun luasan kelas ini menurun menjadi 17.23% pada tahun 2004, dan kemudian mengalami peningkatan yang signifikan menjadi 37.76% pada tahun 2024 (Tabel 6). Dinamika perubahan ini menunjukkan bahwa degradasi ekosistem telah terjadi di periode awal selama 4 tahun (2000 -2004) namun selanjutnya membaik kembali di periode kedua dalam kurun waktu 20 tahun (2004-2024). Penyebab utama degradasi tersebut adalah terjadinya alih fungsi lahan dari hutan menjadi lahan pertanian yang mengakibatkan menurunnya kapasitas infiltrasi tanah dan retensi. Penurunan ini selain mempengaruhi ketersediaan air tanah di wilayah hulu, juga mempengaruhi kenaikan aliran permukaan yang selanjutnya terakumulasi dan menyebabkan banjir di daerah hilir (Ouyang *et al.*, 2010); Liu *et al.*, 2021). Fenomena ini sejalan dengan informasi yang diberikan oleh penduduk setempat (Kelurahan Andir) yang menyatakan bahwa banjir pertama kali Sungai Cisangkuy hingga menggenangi wilayah permukiman terjadi pada tahun 2005. Dengan demikian dampak dari penurunan luas jasa ekosistem kelas "tinggi" dan meningkatnya kelas "sedang" di DAS Cisangkuy dari tahun 2000 ke 2004 adalah banjir di wilayah hilir.

Tabel 6. Luas jasa ekosistem untuk pengatur air tahun 2000 sampai 2024

Kategori	2000		2004		2024	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Tinggi	99,77	37.95	45,29	17,23	99,28	37,76
Sedang	156,97	59,70	211,88	80,59	156,93	59,69
Rendah	6,18	2,35	5,75	2,19	7,61	2,89

Selanjutnya pada periode kedua (2004-2024) jasa ekosistem pengatur air kelas "tinggi" mengalami perbaikan dan luasnya kembali mendekati kondisi pada tahun 2000. Perbaikan ini adalah berkat adanya kenaikan luasan NDVI kelas "sangat tinggi" rata-rata sebesar 4.91% per tahun (Tabel 4). Dengan kondisi ekosistem yang semakin membaik ini secara teoritik seharusnya banjir di Kelurahan Andir sudah mulai menyusut, kecuali jika ada faktor lain yang menyebabkan luapan banjir masih terjadi, antara lain seperti luapan air dari Sungai Citarum sebagai sungai induk yang tetap tinggi, atau terjadi anomali klimatik seperti meningkatnya curah hujan sebagai akibat dari perubahan iklim global. Jika hal ini terjadi maka ancaman banjir akan tetap ada di kelurahan ini, dan untuk mengetahui hal ini diperlukan suatu kajian yang lebih luas.

Sementara itu untuk kategori jasa ekosistem kelas "sedang" tampak mengalami fluktuasi yang cukup besar. Pada tahun 2000, luas kelas ini mencapai 59.70%, kemudian mengalami peningkatan menjadi 80.59% pada tahun 2004, dan kembali menurun hingga 59.69% pada tahun 2024. Tren yang terakhir ini menunjukkan bahwa terjadi pergeseran jasa ekosistem dari kategori "sedang" ke kategori "tinggi" atau tergantung pada kondisi spesifik di setiap lokasi. Pergeseran ini menunjukkan bahwa aktivitas reforestasi telah meningkatkan kapasitas jasa ekosistem secara bertahap (Lamb, 2018). Sementara itu untuk kategori jasa ekosistem pengatur air kelas "rendah" juga mengalami perubahan walaupun tidak begitu signifikan. Pada tahun

2000, luasnya tercatat hanya sebesar 2.35%, lalu turun menjadi 2.19% pada tahun 2004, dan terjadi sedikit peningkatan kembali menjadi 2.89% pada tahun 2024. Meskipun secara menyeluruh tren ini menunjukkan adanya peningkatan area dengan kapasitas pengatur air lebih baik, namun perhatian terhadap faktor-faktor lain yang dapat mempengaruhi ketersediaan air tetap perlu diperhatikan, antara lain pembangunan infrastruktur yang meningkatkan kestabilan sistem hidrologi alami (Gunawardana *et al.*, 2021).

Dinamika perubahan luas jasa ekosistem pengatur air di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu selama periode pengamatan tahun 2000 hingga 2024 disajikan dalam Tabel 7. Pada periode 2000–2004, tampak terjadi penurunan area kategori jasa ekosistem pengatur air "tinggi" sebesar -20.72%, yang diikuti dengan penambahan luas kategori "sedang" sebesar 20.88%. Hal ini mengindikasikan bahwa penurunan fungsi pengatur air di sebagian wilayah DAS telah terjadi, diduga akibat peningkatan konversi tutupan lahan bervegetasi. Namun, pada periode berikutnya yaitu 2004–2024, kembali terjadi penambahan luas pada kategori "tinggi" sebesar 20.53%, yang menandakan adanya aktivitas perbaikan pada ekosistem dalam mengatur tata air. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan berbagai bentuk rehabilitasi lahan, konservasi vegetasi, atau pengelolaan tata guna lahan yang lebih berkelanjutan untuk menekan dampak tekanan pembangunan dan ekspansi pertanian yang berpotensi mempercepat konversi lahan alami menjadi area terbangun atau lahan terbuka. Selain itu, sangat dimungkinkan pula adanya faktor perubahan iklim yang berkontribusi terhadap perubahan kapasitas ekosistem dalam menyimpan dan mengalirkan air (Li *et al.*, 2023).

Tabel 7. Perubahan luas jasa ekosistem untuk Pengatur air tahun 2000 sampai 2024

Kategori	2000 - 2004		2004 - 2024		2000 - 2024	
	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)	(km ²)	(%)
Tinggi	-54.48	-20.72	53.99	20.53	0.49	0.19
Sedang	54.91	20.88	-54.95	-20.90	0.04	0.02
Rendah	-0.43	-0.16	1.86	0.71	-1.43	-0.54

Untuk melihat alur perubahan jasa ekosistem ini, visualisasi diagram Sankey pada Gambar 6 sangat membantu memperjelas jalur transisi antar kategori jasa ekosistem pengatur air selama periode pengamatan. Pada awal periode (2000–2004), terdapat aliran substansial dari kelas "tinggi" ke "sedang", yang menunjukkan penurunan fungsi jasa pengatur air di sebagian besar wilayah DAS. Fenomena ini mencerminkan terjadinya degradasi vegetasi dan peningkatan limpasan permukaan akibat konversi hutan menjadi lahan pertanian atau lainnya. Secara ekologis, pergeseran ini menandakan berkurangnya kemampuan bentang lahan dalam menahan air hujan, menurunkan infiltrasi, serta meningkatkan ancaman banjir di bagian hilir DAS. Sementara itu, pada periode 2004–2024, diagram menunjukkan adanya transisi balik dari kategori "sedang" ke "tinggi" dengan proporsi yang lebih besar dibandingkan dengan periode sebelumnya. Pola ini menandakan adanya proses pemulihan fungsi ekosistem (*ecological recovery*) sebagai hasil dari peningkatan tutupan vegetasi seperti agroforestry di wilayah pengamatan. Peningkatan kelas "tinggi" juga memperlihatkan perbaikan struktur vegetasi dan tanah

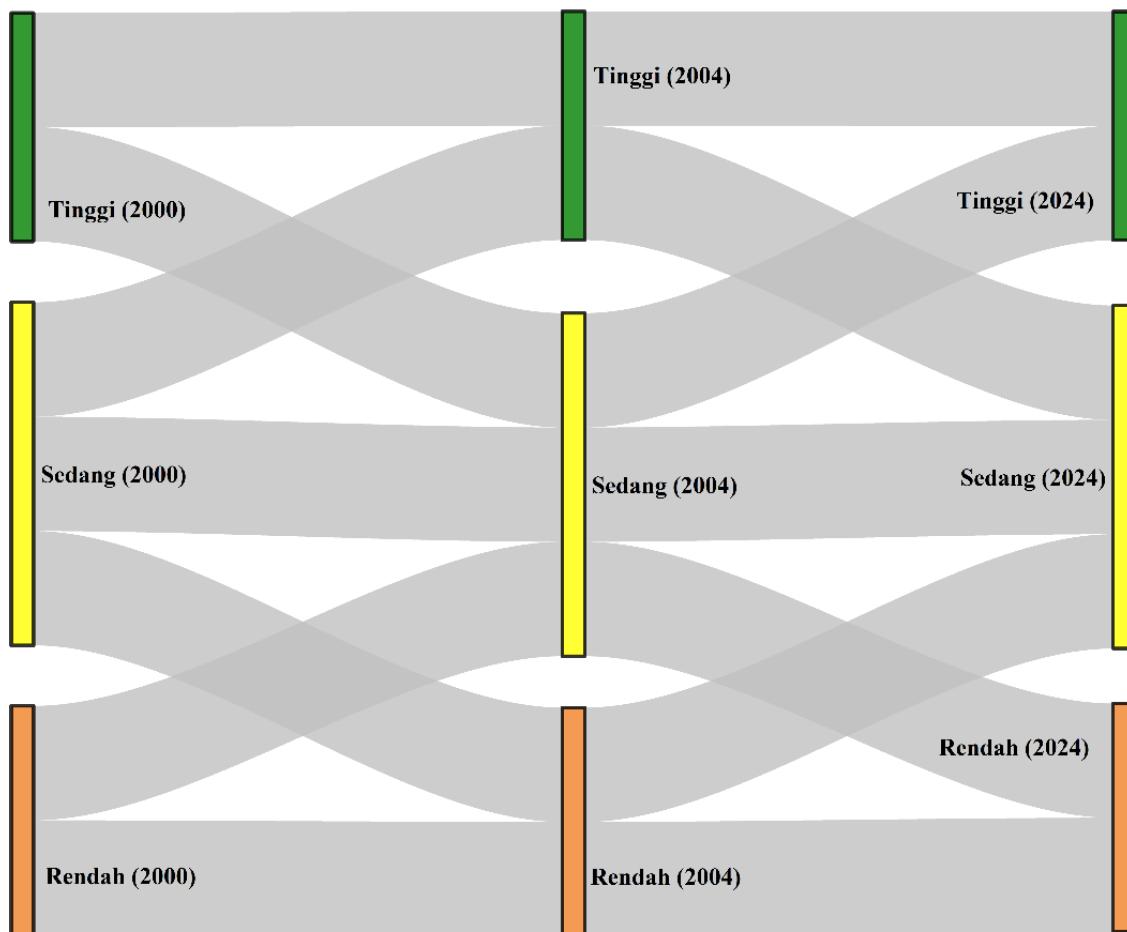
yang berdampak langsung terhadap peningkatan kapasitas infiltrasi dan retensi air. Dengan demikian, perlu didukung oleh intervensi konservasi dan praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan.

Hasil penelitian ini menegaskan bahwa pengelolaan suatu bentang lahan atau lingkungan berbasis ekosistem (*ecosystem-based management*) menjadi strategi yang esensial terutama dalam menjaga keberlanjutan jasa ekosistem pengatur air di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu. Upaya mitigasi seperti peningkatan tutupan vegetasi melalui reforestasi, penerapan praktik pertanian berkelanjutan, serta perencanaan tata ruang berbasis daya dukung lingkungan dapat membantu mempertahankan kapasitas ekosistem dalam menyediakan dan mengatur air (Lu *et al.*, 2021). Oleh karena itu, kebijakan yang mengintegrasikan konservasi ekosistem dalam perencanaan pembangunan DAS perlu terus dikembangkan guna memastikan ketahanan ekohidrologi jangka panjang.

Selain itu, pola transisi ini sangat selaras dengan hasil analisis vegetasi yang menunjukkan peningkatan luas kerapatan “sangat rapat” secara signifikan. Peningkatan nilai NDVI ini berimplikasi langsung terhadap meningkatnya kapasitas jasa ekosistem pengatur air, karena vegetasi yang rapat meningkatkan infiltrasi dan menurunkan limpasan permukaan. Pergeseran kategori pada diagram Sankey dari “sedang” ke “tinggi”

merepresentasikan refleksi dari peningkatan tutupan vegetasi yang teridentifikasi melalui NDVI. Selanjutnya, pada indeks kebasahan topografis “tinggi” dan “sangat tinggi” beririsan dengan area yang mengalami peningkatan kelas jasa pengatur air pada periode 2004–2024, di mana topografi berperan penting dalam mendukung retensi air seperti zona pelembahan dan dataran yang mampu menampung aliran permukaan. Integrasi hasil TWI dan NDVI ini memperkuat pemahaman bahwa jasa ekosistem pengatur air di DAS Cisangkuy ditentukan oleh kombinasi faktor biofisik (vegetasi) dan morfologi (bentuk lahan/topografi). Dengan demikian, perubahan yang terjadi mencerminkan sinergi antara peningkatan kerapatan vegetasi dan karakter topografi dalam mendukung akumulasi air.

Meskipun penelitian ini telah berhasil mengidentifikasi adanya perubahan jasa ekosistem pengatur air di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu, namun terdapat keterbatasan akurasi, dikarenakan data citra satelit yang digunakan mempunyai resolusi menengah (30 m), sehingga ada kemungkinan perubahan kecil di lapangan yang tidak terdeteksi. Penggunaan data dengan resolusi lebih tinggi, seperti data dari drone atau Quickbird, diharapkan bisa membantu mendapatkan hasil yang lebih akurat.



Gambar 6. Diagram Sankey jasa ekosistem pengatur air tahun 2000 sampai 2024

SIMPULAN

Hasil pemantauan menunjukkan bahwa jasa ekosistem pengatur air di DAS Cisangkuy bagian tengah dan hulu mengalami dinamikan perubahan yang cukup signifikan selama dua periode pengamatan, yaitu tahun 2000–2004 dan 2004–2024. Pada periode pertama, luasan wilayah dengan kategori jasa ekosistem pengatur air “tinggi” mengalami penurunan dari 37.95% menjadi 17.23%. Penurunan ini secara kronologis bertepatan dengan awal terjadinya bencana banjir di Kelurahan Andir pada tahun 2005, yang terletak di bagian hilir DAS Cisangkuy. Dengan demikian, fenomena banjir tersebut dapat dijelaskan sebagai konsekuensi dari menurunnya kapasitas jasa ekosistem pengatur air di wilayah tengah dan hulu. Selanjutnya, pada periode kedua (2004–2024), terjadi pemulihan fungsi pengatur air yang ditunjukkan oleh peningkatan luas kategori jasa ekosistem “tinggi” dari 17.23% menjadi 37.76%, atau mendekati kondisi awal tahun 2000. Meskipun demikian, kejadian banjir masih terjadi di Kelurahan Andir dengan tingkat keparahan yang relatif lebih rendah. Kondisi tersebut bisa disebabkan oleh banyak hal, antara lain adanya luapan air dari Sungai Citarum yang masuk ke Sungai Cisangkuy (sebagai anak sungainya), serta peningkatan curah hujan akibat perubahan iklim global. Parameter iklim tersebut belum dianalisis dalam penelitian ini, sehingga menjadi tantangan sekaligus peluang untuk pengembangan penelitian selanjutnya. Secara metodologis, penelitian ini menegaskan bahwa tiga parameter utama, yaitu TWI, NDVI, dan kemiringan lereng, memiliki kemampuan representatif dalam menilai jasa ekosistem pengatur air. Kombinasi ketiga parameter ini mampu menggambarkan kondisi hidrologis, vegetatif, dan morfometrik suatu wilayah secara komprehensif, sehingga dapat dijadikan indikator utama dalam pemantauan keberlanjutan fungsi ekosistem di DAS Cisangkuy maupun DAS lain yang memiliki karakter serupa.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Teknik dan Manajemen Lingkungan, Sekolah Vokasi, IPB University, atas kemudahan sarana, bantuan data, serta fasilitas laboratorium yang diberikan selama penelitian berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Aduah, M.S., G.P.W. Jewitt and M.L.W. Toucher. 2017. Assessing impacts of land use changes on the hydrology of a lowland rainforest catchment in Ghana, West Africa. *Water*, 10(1): 9-19. <https://doi.org/10.3390/w10010009>
- Altunel, A.O. 2023. The effect of DEM resolution on topographic wetness index calculation and visualization: An insight to the hidden danger unraveled in Bozkurt in August, 2021. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 8(2): 165–172. <https://doi.org/10.26833/ijeg.1110560>
- Baidya, P., D. Chutia, S. Sudhakar, C. Goswami, J. Goswami, V. Saikhom, P.S. Singh and K.K. Sarma. 2014. Effectiveness of Fuzzy Overlay Function for Multi-Criteria Spatial Modeling—A Case Study on Preparation of Land Resources Map for Mawsynram Block of East Khasi Hills District of Meghalaya, India. *Journal of Geographic Information System*, 6(6): 605–612. <https://doi.org/10.4236/jgis.2014.66050>
- Beven, K.J. and M.J. Kirkby. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1): 43–69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- BNPB. 2024. Infografis bencana tahun 2024. <https://www.bnbp.go.id/infografis/infografis-bencana-tahun-2024> (diakses 18 April 2025)
- [BPBD] Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Bandung. 2013. Rekapitulasi Kejadian Bencana Banjir Tahun 2013 di Kabupaten Bandung.BPBD Kab. Bandung, Bandung.
- [BPBD] Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kabupaten Bandung. 2014. Rekapitulasi Kejadian Bencana Banjir Tahun 2014 di Kabupaten Bandung.BPBD Kab. Bandung, Bandung.
- Brauman, K.A., G.C. Daily, T.K. Duarte and H.A. Mooney. 2007. The nature and value of ecosystem services: An overview highlighting hydrologic services. *Annual Review of Environment and Resources*, 32(1): 67–98. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.32.031306.102758>
- Fenta, A.A., H. Yasuda, K. Shimizu, N. Haregeweyn and A. Negussie. 2016. Dynamics of Soil Erosion as Influenced by Watershed Management Practices: A Case Study of the Agula Watershed in the Semi-Arid Highlands of Northern Ethiopia. *Environmental Management*, 58(2016): 889–905. <https://doi.org/10.1007/s00267-016-0757-4>
- Foley, J.A., R. DeFries, G.P. Asner, C. Barford, G. Bonan, S.R. Carpenter, F.S. Chapin, M.T. Coe, G.C. Daily, H.K. Gibbs, J.H. Helkowski, T. Holloway, E.A. Howard, C.J. Kucharik, C. Monfreda, J.A. Patz, I.C. Prentice, N. Ramankutty and P.K. Snyder. 2005. Global consequences of land use. *Science*, 309(5734): 570–574. <https://doi.org/10.1126/science.1111772>
- Giofandi, E.A. dan D. Sekarjati. 2020. Persebaran Fenomena Suhu Tinggi melalui Kerapatan Vegetasi dan Pertumbuhan Bangunan serta Distribusi Suhu Permukaan. *Jurnal Geografi*, 17(2): 56–62. <https://doi.org/10.15294/jg.v17i2.24486>
- Grimm, K., M.T. Nasab and X. Chu. 2018. TWI computations and topographic analysis of depression-dominated surfaces. *Water*, 10(5): 663–674. <https://doi.org/10.3390/w10050663>
- Gunawan, H., T. Setyawati, T. Atmoko, Subarudi, R.T. Kwatraina, I. Yeny, T.W. Yuwati, R. Effendy, L. Abdullah, Mukhlisi, T. Lastini, D.I.D. Arini, U.K. Sari, B.S. Sitepu, F. Pattiselanno dan W. Kuswanda. 2024. A review of forest fragmentation in Indonesia under the DPSIR framework for biodiversity conservation strategies. *Global Ecology and*

- Conservation, 51(2024): e02918.
<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e02918>
- Gunawardana, S.K., S. Shrestha, S. Mohanasundaram, K.R. Salin and T. Piman. 2021. Multiple drivers of hydrological alteration in the transboundary Srepok River Basin of the Lower Mekong Region. *Journal of Environmental Management*, 278(P1): 111524.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111524>
- Irawan, M.F., Y. Hidayat dan B. Tjahjono. 2018. Penilaian Bahaya dan Arahan Mitigasi Banjir di Cekungan Bandung. *J. Il. Tan. Lingk.*, 20(1): 1-6.
<http://dx.doi.org/10.29244/jitl.20.1.1-6>
- Kompas. 2025. Empat Kecamatan di Kabupaten Bandung Terendam Banjir, Ratusan Warga Mengungsi:
<https://bandung.kompas.com/read/2025/03/09/185919278/empat-kecamatan-di-kabupaten-bandung-terendam-banjir-ratusan-warga-mengungsi> (Diakses 17 April 2025)
- Lamb, D. 2018. Undertaking large-scale forest restoration to generate ecosystem services. *Restoration Ecology*, 26(4): 657–666. <https://doi.org/10.1111/rec.12706>
- Li, R., G. Zhu, S. Lu, S., Sang, G. Meng, L. Chen, Y. Jiao and Q. Wang. 2023. Effects of urbanization on the water cycle in the Shiyang River basin: based on a stable isotope method. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(24): 4437–4452.
<https://doi.org/10.5194/hess-27-4437-2023>
- Liu, B., Pan, L., Qi, Y., Guan, X., & Li, J. 2021. Land use and land cover change in the yellow river basin from 1980 to 2015 and its impact on the ecosystem services. *Land*, 10(10): 1080-1102.
<https://doi.org/10.3390/land10101080>
- Lu, Y., M. Liu, S. Zeng and C. Wang. 2021. Screening and mitigating major threats of regional development to water ecosystems using ecosystem services as endpoints. *Journal of Environmental Management*, 293(2021): 112787.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112787>
- Mazlan, B. Tjahjono dan B. Barus. 2020. Bahaya Banjir dan Longsor di Kecamatan Baleendah Kabupaten Bandung Jawa Barat. *J. Il. Tan. Lingk.*, 22(1): 1-9.
- <http://dx.doi.org/10.29244/jitl.22.1.1-9>
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Ouyang, W., F. Hao, A.K. Skidmore and A.G. Toxopeus. 2010. Soil erosion and sediment yield and their relationships with vegetation cover in upper stream of the Yellow River. *Science of the Total Environment*, 409(2): 396–403.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.10.020>
- Resubun, M.L., E.D. Wahjunie dan S.D. Tarigan. 2018. Analisis Potensi Ketersediaan Kebutuhan Air di DAS Cisangkuy. *J. Il. Tan. Lingk.*, 20(2): 57-62.
<http://dx.doi.org/10.29244/jitl.20.2.57-62>
- Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell and D.W. Deering. 1973. Monitoring Vegetation Systems in The Great Plains with ERTS. *Paper A 20*. Pp. 309-317.
<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:133358670>
- Sørensen, R., U. Zinko and J. Seibert. 2006. On the calculation of the topographic wetness index: Evaluation of different methods based on field observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10(1): 101–112. <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>
- Spadoni, G.L., A. Cavalli, L. Congedo and M. Munafò. 2020. Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for the production of forest cartography. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 20(2020): 100419. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100419>
- Sulfa A.M., B. Tjahjono dan K. Munibah. 2017. Analisis Daya Dukung Bentanglahan di DAS Cisangkuy untuk Tata Air dan Pengendalian Banjir. [Skripsi] Departemen Ilmu Tanah dan Sumberdaya Lahan, Fakultas Pertanian, Institiut Pertanian Bogor
- Zhao, Q., D. Li, M. Zhuo, T. Guo, Y. Liao and Z. Xie. 2015. Effects of rainfall intensity and slope gradient on erosion characteristics of the red soil slope. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 29(2): 609–621.
<https://doi.org/10.1007/s00477-014-0896-1>