Rekayasa Hijau: Jurnal Teknologi Ramah Lingkungan Volume 10 | Nomor 3
ISSN [e]: 2579-4264 | DOI: https://doi.org/10.26760/jrh.V10i3.231-246 November 2026

Analisis Spasial Deforestasi Berdasarkan Zona Hulu, Tengah, dan Hilir DAS Citarum Tahun 2015-2024

Spatial Analysis of Deforestation Based on the Upstream, Midstream, and Downstream Zones of the Watershed 2015–2024

Muhammad Hisyam Hidayat[1], Hilyatul Ashfiya[1], Siti Zahrotunisa[2*], Finauly Hadiyantini[3], Iyon Sugiono[3]

[1]Survei Pemetaan dan Informasi Geografis, Fakultas Pendidikan Ilmu Pengetahuan Sosial, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
[2]Sains Informasi Geografis, Fakultas Pendidikan Ilmu Pengetahuan Sosial, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia
[3]Dinas Kehutanan Provinsi Jawa Barat, Indonesia

Received 25 September 2026| Revised 5 Oktober 2026| Accepted 8 Oktober 2026

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan menganalisis pola spasial deforestasi berdasarkan zona hulu, tengah, dan hilir DAS Citarum periode 2015–2024 menggunakan data Global Forest Change (GFC) dan Kernel Density Estimation (KDE) berbasis Sistem Informasi Geografis. Penelitian dilakukan karena kajian deforestasi pada tingkat DAS umumnya masih berfokus pada luas kehilangan hutan tanpa mengintegrasikan analisis zonasi dan konsentrasi spasial. Analisis meliputi identifikasi kehilangan tutupan hutan, perhitungan luas deforestasi, analisis temporal, dan KDE. Hasil penelitian menunjukkan total kehilangan tutupan hutan sebesar 9.814,98 ha, dengan kontribusi terbesar berada pada zona tengah sebesar 4.993,43 ha (50,88%). Puncak deforestasi terjadi pada tahun 2019, sedangkan hasil KDE menunjukkan hotspot deforestasi terkonsentrasi pada zona tengah. Integrasi GFC, zonasi DAS, dan KDE memberikan informasi yang lebih komprehensif mengenai distribusi spasial, dinamika temporal, dan konsentrasi deforestasi sebagai dasar penentuan prioritas rehabilitasi hutan dan lahan serta pengelolaan DAS Citarum berbasis informasi geospasial.

***Kata kunci**: Deforestasi, Daerah Aliran Sungai, Global Forest Change, Kernel Density Estimation, Sistem Informasi Geografis.*

ABSTRACT

This study aims to analyze the spatial patterns of deforestation in the upstream, middle, and downstream zones of the Citarum Watershed during 2015–2024 using Global Forest Change (GFC) data and Kernel Density Estimation (KDE) within a Geographic Information System (GIS). The study was conducted because watershed-scale deforestation research generally focuses on forest loss extent without integrating watershed zonation and spatial concentration analysis. The analysis included annual forest loss identification, deforestation area calculation, temporal trend analysis, and KDE. The results showed that total forest loss reached 9,814.98 ha, with the largest contribution occurring in the middle zone (4,993.43 ha; 50.88%). The highest deforestation occurred in 2019, while KDE identified deforestation hotspots primarily concentrated in the middle zone. The integration of GFC, watershed zonation, and KDE provides more comprehensive information on the spatial distribution, temporal dynamics, and concentration of deforestation, supporting the prioritization of forest and land rehabilitation as well as geospatial-based watershed management.

***Keywords**: Deforestation, Watershed, Global Forest Change, Kernel Density Estimation, Geographic Information System.*

1. PENDAHULUAN

Deforestasi masih menjadi salah satu isu lingkungan yang berdampak terhadap penurunan kualitas ekosistem serta terganggunya keseimbangan hidrologi pada daerah aliran sungai (DAS). Perubahan tutupan lahan dari kawasan berhutan menjadi lahan pertanian, permukiman, maupun kawasan terbangun menurunkan kapasitas infiltrasi tanah sehingga meningkatkan limpasan permukaan, erosi, sedimentasi, dan potensi banjir, terutama di wilayah hilir [1]. Dalam suatu sistem DAS, perubahan tutupan lahan pada satu bagian wilayah turut memengaruhi kondisi hidrologi di bagian lainnya [2]. Berkurangnya tutupan vegetasi juga mempercepat degradasi lahan serta menurunkan kemampuan DAS dalam menjaga keseimbangan tata air dan stabilitas lingkungan [3]. Oleh karena itu, hutan berperan penting dalam mempertahankan fungsi hidrologi, mengendalikan degradasi lahan, serta menjaga keberlanjutan lingkungan.

Perkembangan teknologi penginderaan jauh telah meningkatkan kemampuan pemantauan perubahan tutupan hutan melalui data satelit multi-temporal dengan resolusi spasial yang semakin baik. Berbagai penelitian memanfaatkan data tersebut untuk mengidentifikasi kehilangan tutupan hutan pada skala regional maupun global [4]. Meskipun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada kuantifikasi kehilangan tutupan hutan, sedangkan kajian yang mengintegrasikan analisis zonasi DAS dengan konsentrasi spasial deforestasi masih relatif terbatas.

DAS Citarum merupakan salah satu DAS strategis di Indonesia yang berfungsi sebagai penyedia air baku, irigasi, pembangkit listrik tenaga air, serta penunjang aktivitas ekonomi di Provinsi Jawa Barat. DAS ini juga menjadi daerah tangkapan air bagi Waduk Saguling, Cirata, dan Jatiluhur yang berperan penting dalam penyediaan energi listrik, irigasi, serta pengelolaan sumber daya air. Tingginya tekanan akibat pertumbuhan penduduk, urbanisasi, dan perubahan penggunaan lahan menyebabkan kondisi lingkungan DAS Citarum terus mengalami degradasi [5]. Alih fungsi kawasan berhutan menjadi lahan pertanian, perkebunan, permukiman, maupun kawasan terbangun mengakibatkan berkurangnya tutupan vegetasi dan meningkatnya tekanan terhadap fungsi ekologis DAS. Kondisi tersebut meningkatkan sedimentasi sungai, mengganggu tata air, menurunkan kualitas lingkungan, serta meningkatkan risiko banjir dan degradasi lahan [6], [7]. Oleh karena itu, informasi mengenai distribusi dan dinamika deforestasi menjadi dasar penting dalam penyusunan strategi rehabilitasi hutan dan pengelolaan DAS secara berkelanjutan.

Berbagai penelitian telah memanfaatkan teknologi penginderaan jauh dan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk menganalisis perubahan tutupan hutan dan deforestasi. Ekasari et al. [8] mengidentifikasi perubahan tutupan lahan menggunakan citra satelit multi-temporal, sedangkan Yulianto et al. [9] memanfaatkan data penginderaan jauh untuk mengevaluasi dinamika tutupan hutan pada skala regional. Fadhil et al. [10] menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan berpengaruh terhadap karakteristik hidrologi DAS, sementara Permatasari et al. [11] menjelaskan bahwa konversi tutupan lahan meningkatkan limpasan permukaan dan potensi banjir. Pada skala global, Pendrill et al. [12] mengidentifikasi ekspansi pertanian sebagai salah satu pendorong utama deforestasi tropis, sedangkan Curtis et al. [13] mengelompokkan penyebab kehilangan hutan ke dalam kategori pertanian, kehutanan, kebakaran, dan urbanisasi.

Meskipun berbagai penelitian tersebut telah memberikan kontribusi dalam memahami perubahan tutupan hutan dan faktor penyebab deforestasi, sebagian besar masih berfokus pada identifikasi kehilangan tutupan hutan, analisis perubahan penggunaan lahan, atau faktor pendorong deforestasi secara umum. Kajian yang mengintegrasikan analisis kehilangan tutupan hutan multi-temporal, zonasi hulu–tengah–hilir DAS, serta

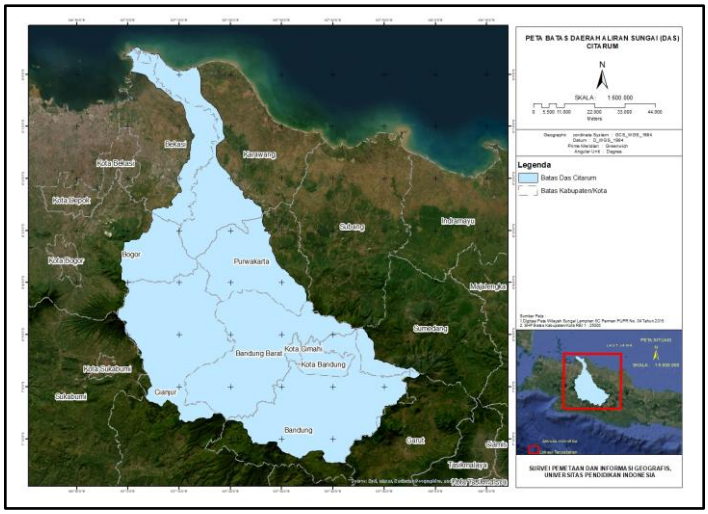
identifikasi konsentrasi spasial deforestasi menggunakan KDE masih relatif terbatas, khususnya pada DAS Citarum.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini mengintegrasikan data GFC, pendekatan zonasi hulu–tengah–hilir DAS, KDE untuk menganalisis distribusi spasial, dinamika temporal, serta konsentrasi hotspot deforestasi di DAS Citarum selama periode 2015–2024. Pendekatan ini tidak hanya mengidentifikasi kehilangan tutupan hutan, tetapi juga mengevaluasi distribusi spasial, dinamika temporal, dan konsentrasi hotspot deforestasi pada setiap zona DAS dalam satu kerangka analisis. Hasil penelitian diharapkan menjadi dasar dalam penentuan prioritas rehabilitasi hutan dan lahan serta penyusunan strategi pengelolaan DAS Citarum berbasis informasi geospasial.

2. METODOLOGI

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di DAS Citarum, Provinsi Jawa Barat, Indonesia, yang secara geografis terletak pada koordinat 106°57′50″–107°56′59″ BT dan 5°55′06″–7°14′41″ LS. DAS Citarum merupakan salah satu DAS strategis nasional dengan luas sekitar 661.000 hektare yang melintasi beberapa wilayah administratif di Provinsi Jawa Barat. Secara fisiografis, DAS ini memiliki karakteristik bentang alam yang beragam, mulai dari daerah pegunungan di bagian hulu, wilayah transisi di bagian tengah, hingga dataran rendah di bagian hilir. Variasi tersebut menyebabkan perbedaan karakteristik hidrologi, penggunaan lahan, dan tingkat tekanan lingkungan pada setiap zona.Sebagai DAS prioritas nasional, DAS Citarum berfungsi sebagai penyedia air baku, irigasi pertanian, pembangkit listrik tenaga air (PLTA), serta penunjang aktivitas domestik, pertanian, dan industri. DAS ini juga merupakan daerah tangkapan air bagi Waduk Saguling, Cirata, dan Jatiluhur yang berperan dalam penyediaan energi listrik, irigasi, pengendalian banjir, dan pengelolaan sumber daya air di Pulau Jawa. Oleh karena itu, keberlanjutan kondisi ekologis DAS Citarum memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan sumber daya air dan pembangunan wilayah. Tingginya tekanan akibat pertumbuhan penduduk, perkembangan permukiman, industrialisasi, pembangunan infrastruktur, dan ekspansi lahan budidaya mendorong terjadinya konversi kawasan berhutan menjadi lahan non-hutan. Perubahan tersebut berpotensi menurunkan kualitas lingkungan, mengganggu keseimbangan hidrologi, serta meningkatkan degradasi lahan pada berbagai bagian DAS. Kondisi ini menjadikan DAS Citarum sebagai lokasi yang representatif untuk menganalisis pola spasial deforestasi berdasarkan zona hulu, tengah, dan hilir menggunakan pendekatan GFC dan KDE berbasis SIG. Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

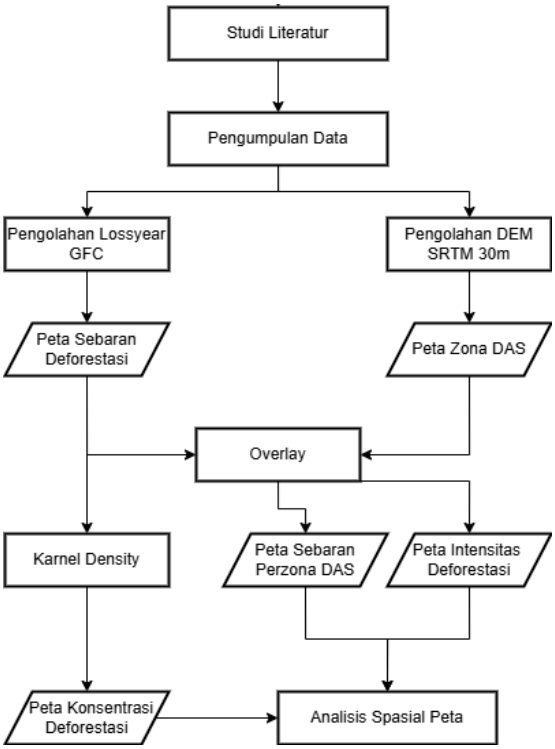
2.2 Data dan Peralatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan data sekunder berbasis spasial yang terdiri atas dataset GFC, Digital Elevation Model (DEM) Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), batas DAS Citarum, serta perangkat lunak SIG. Data dipilih berdasarkan kesesuaian resolusi spasial, cakupan wilayah, dan relevansinya terhadap tujuan penelitian. Informasi kehilangan tutupan hutan diperoleh dari dataset GFC)yang dikembangkan oleh Hansen et al. [4] dengan resolusi spasial 30 meter. Dataset ini menyediakan informasi kehilangan tutupan pohon (*tree cover loss*) tahunan yang dipetakan secara konsisten menggunakan citra Landsat sehingga memungkinkan analisis perubahan tutupan hutan secara spasial dan temporal. GFC menjadi salah satu dataset yang paling banyak digunakan dalam penelitian deforestasi karena menyediakan data yang konsisten, terbuka, dan dapat dibandingkan antarperiode pengamatan. Pengembangan lebih lanjut melalui integrasi berbagai sumber data penginderaan jauh juga mempertahankan GFC sebagai salah satu rujukan utama dalam pemantauan dinamika hutan global [14].

Dalam penelitian ini, kawasan berhutan didefinisikan menggunakan nilai *tree cover threshold* ≥30%. Pemilihan ambang tersebut didasarkan pada karakteristik GFC yang merepresentasikan persentase tutupan tajuk pohon (*tree canopy cover*) pada setiap piksel. Meskipun Food and Agriculture Organization (FAO) mendefinisikan hutan sebagai lahan dengan tutupan tajuk minimal 10% [15], ambang ≥30% banyak diterapkan pada penelitian berbasis GFC untuk menghasilkan representasi kawasan berhutan yang lebih konsisten serta mengurangi kemungkinan vegetasi berkerapatan rendah teridentifikasi sebagai hutan [4]. Oleh karena itu, *threshold* tersebut dinilai sesuai untuk analisis kehilangan tutupan hutan pada skala DAS. Data elevasi diperoleh dari DEM SRTM beresolusi 30 meter yang diunduh melalui USGS Earth Explorer. DEM digunakan sebagai dasar pembentukan zonasi hulu, tengah, dan hilir karena elevasi memengaruhi arah aliran permukaan, karakteristik hidrologi, dan morfologi DAS. Data SRTM dipilih karena memiliki cakupan luas, resolusi yang memadai untuk analisis skala DAS, serta telah banyak digunakan dalam penelitian hidrologi dan analisis morfometri DAS [16]. Batas DAS Citarum diperoleh melalui digitasi visual berdasarkan Lampiran 5C Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia Nomor 04/PRT/M/2015 tentang Kriteria dan Penetapan Wilayah Sungai [17]. Hasil digitasi kemudian dikoreksi secara visual dengan memperhatikan kesesuaian pola kontur topografi dan jaringan sungai utama agar tetap merepresentasikan karakteristik hidrologi wilayah penelitian. Seluruh pengolahan dan analisis spasial dilakukan menggunakan ArcMap 10.8 berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG). Perangkat lunak ini digunakan untuk *pre-processing* data, meliputi reproyeksi, penyesuaian sistem koordinat, *clipping*, dan *overlay*, serta pembentukan zonasi DAS, analisis kehilangan tutupan hutan, KDE, perhitungan luas area, dan penyusunan peta hasil penelitian.

2.3 Tahapan Penelitian

Tahapan penelitian disusun secara sistematis untuk menggambarkan alur pengolahan data mulai dari persiapan hingga penyajian hasil analisis. Secara umum, penelitian terdiri atas enam tahapan, yaitu pengumpulan data, *pre-processing* data, pembentukan zonasi DAS, analisis kehilangan tutupan hutan, analisis KDE, dan penyajian hasil penelitian. Alur penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Alur Penelitian

Tahap awal dilakukan melalui proses *pre-processing* data yang meliputi reproyeksi, penyesuaian sistem koordinat, dan pemotongan seluruh data spasial sesuai batas DAS Citarum. Tahapan ini bertujuan memastikan seluruh data berada pada sistem koordinat yang sama sehingga proses integrasi dan analisis spasial dapat dilakukan secara konsisten. Pembentukan zonasi DAS dilakukan menggunakan data DEM SRTM melalui reklasifikasi elevasi menjadi tiga zona, yaitu hulu, tengah, dan hilir. Klasifikasi menggunakan metode *Natural Breaks* (Jenks) karena mampu mengelompokkan data berdasarkan distribusi alami nilai sehingga menghasilkan batas kelas yang lebih representatif dibandingkan metode *equal interval* maupun *quantile*. Secara statistik, metode ini meminimalkan variasi di dalam kelas (*within-class variance*) dan memaksimalkan perbedaan antarkelas (*between-class variance*), sehingga sesuai diterapkan pada data elevasi dengan distribusi yang tidak seragam seperti DAS Citarum [18], [19]. Berdasarkan hasil reklasifikasi tersebut, kelas elevasi tertinggi ditetapkan sebagai zona hulu, kelas menengah sebagai zona tengah, dan kelas terendah sebagai zona hilir. Pendekatan ini dipilih karena elevasi memengaruhi karakteristik hidrologi, arah aliran permukaan, serta pola pemanfaatan ruang pada setiap zona DAS.

Tahapan berikutnya dilakukan dengan mengolah data kehilangan tutupan pohon tahunan dari dataset GFC selama periode 2015–2024. Data dipisahkan berdasarkan tahun kejadian, dipotong sesuai batas DAS Citarum, kemudian ditumpang susun dengan peta zonasi DAS untuk memperoleh informasi distribusi spasial kehilangan tutupan hutan pada setiap zona. Selain menghitung luas kehilangan tutupan hutan, penelitian ini menerapkan *Kernel Density Estimation* (KDE) untuk mengidentifikasi intensitas dan konsentrasi spasial deforestasi. Analisis dilakukan menggunakan *cell size* 30 meter sesuai resolusi spasial dataset GFC, sedangkan *search radius* ditetapkan sebesar 1000 meter dengan mempertimbangkan karakteristik persebaran kehilangan tutupan hutan pada skala DAS. Dalam metode KDE, parameter *search radius* (*bandwidth*) menentukan tingkat *smoothing* permukaan kepadatan. Radius yang terlalu kecil menghasilkan pola yang terfragmentasi, sedangkan radius yang terlalu besar dapat mengaburkan variasi spasial lokal. Oleh karena itu, radius 1000 meter dipilih untuk memperoleh keseimbangan antara

representasi pola umum dan variasi lokal sehingga *hotspot* deforestasi dapat diidentifikasi secara representatif [19], [20].

Hasil analisis KDE kemudian diklasifikasikan menjadi lima kelas intensitas, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi menggunakan metode Jenks. Metode ini dipilih karena mampu menghasilkan batas kelas yang mengikuti distribusi alami nilai kepadatan sehingga visualisasi variasi intensitas deforestasi menjadi lebih representatif. Peta hasil klasifikasi selanjutnya digunakan untuk mengidentifikasi wilayah dengan konsentrasi deforestasi tertinggi pada setiap zona DAS sebagai dasar analisis pola spasial deforestasi.

2.4 Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif dan analisis spasial untuk mengidentifikasi karakteristik deforestasi berdasarkan zona hulu, tengah, dan hilir DAS Citarum selama periode 2015–2024. Analisis deskriptif kuantitatif digunakan untuk menghitung luas dan persentase kehilangan tutupan hutan pada setiap zona DAS, sedangkan analisis spasial digunakan untuk mengevaluasi pola distribusi dan konsentrasi deforestasi berdasarkan hasil KDE. Tahap awal analisis dilakukan dengan menghitung luas kehilangan tutupan hutan pada masing-masing zona DAS dalam satuan hektare (ha). Nilai tersebut selanjutnya digunakan untuk menghitung persentase kontribusi kehilangan tutupan hutan setiap zona terhadap total kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum menggunakan Persamaan (1).

$$P = (Li/Lt)\ x\ 100\% \quad (1)$$

Keterangan:

P = persentase kehilangan hutan (%)
Li = luas kehilangan hutan pada masing-masing zona (ha)
Lt = total luas kehilangan hutan DAS Citarum (ha)

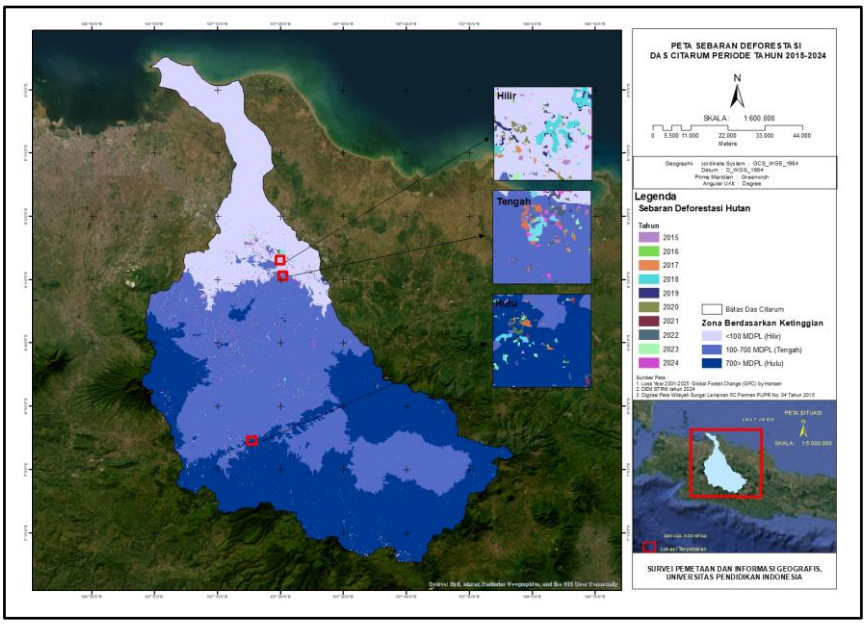
Hasil perhitungan luas dan persentase kehilangan tutupan hutan kemudian dibandingkan setiap zona DAS untuk mengidentifikasi perbedaan karakteristik deforestasi pada wilayah hulu, tengah, dan hilir selama periode penelitian. Selain analisis luas area, perubahan kehilangan tutupan hutan dianalisis menggunakan grafik *time series* periode 2015–2024 untuk mengidentifikasi kecenderungan peningkatan maupun penurunan deforestasi pada setiap tahun pengamatan. Selanjutnya, hasil KDE dianalisis secara deskriptif spasial untuk mengidentifikasi pola distribusi dan tingkat konsentrasi deforestasi pada masing-masing zona DAS. Nilai kepadatan diinterpretasikan ke dalam lima kelas intensitas, yaitu sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi sehingga wilayah yang memiliki kecenderungan pengelompokan deforestasi dapat diidentifikasi secara spasial. Interpretasi hasil dilakukan melalui analisis komparatif pada tiap zona DAS dengan membandingkan luas kehilangan tutupan hutan, tren perubahan tahunan, dan tingkat konsentrasi deforestasi pada setiap zona. Hasil analisis selanjutnya disajikan dalam bentuk peta distribusi kehilangan tutupan hutan, peta intensitas deforestasi, peta konsentrasi spasial hasil KDE, tabel luas kehilangan tutupan hutan berdasarkan zona DAS, serta grafik tren perubahan tahunan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Sebaran Spasial dan Luas Deforestasi DAS Citarum Periode 2015-2024

Sebaran spasial kehilangan tutupan hutan merupakan informasi awal yang penting untuk memahami karakteristik deforestasi pada suatu DAS. Analisis distribusi spasial tidak hanya menunjukkan lokasi terjadinya kehilangan hutan, tetapi juga menggambarkan variasi tekanan perubahan penggunaan lahan pada setiap zona DAS. Oleh karena itu, identifikasi pola persebaran deforestasi menjadi dasar untuk memahami dinamika kehilangan hutan sebelum dilakukan analisis terhadap luas maupun intensitas deforestasi.

Berdasarkan hasil pemetaan kehilangan tutupan hutan selama periode 2015–2024, deforestasi di DAS Citarum tersebar pada seluruh zona DAS, yaitu hulu, tengah, dan hilir, namun memperlihatkan karakteristik spasial yang berbeda. Secara visual, kehilangan tutupan hutan lebih banyak dijumpai pada zona tengah dibandingkan zona hulu maupun hilir. Sebaliknya, zona hulu memperlihatkan persebaran yang relatif terbatas dan cenderung mengikuti kawasan lereng, sedangkan zona hilir menunjukkan jumlah kejadian yang lebih sedikit dengan distribusi yang tersebar. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa dinamika kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum tidak berlangsung secara homogen, tetapi dipengaruhi oleh karakteristik biofisik serta intensitas pemanfaatan ruang pada masing-masing zona.



Gambar 3. Peta Sebaran Deforestasinya Perzona DAS

Dominasi persebaran deforestasi pada zona tengah menunjukkan bahwa wilayah transisi DAS menjadi area dengan tekanan perubahan penggunaan lahan yang paling tinggi. Berbeda dengan zona hulu yang masih didominasi kawasan konservasi dan daerah tangkapan air, zona tengah berkembang sebagai kawasan pertanian, perkebunan, permukiman, serta didukung oleh jaringan transportasi yang relatif lebih baik. Kondisi tersebut meningkatkan aksesibilitas terhadap kawasan berhutan sehingga proses konversi lahan berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, pada zona hilir, luas kawasan berhutan yang relatif terbatas menyebabkan kejadian deforestasi lebih sedikit meskipun aktivitas pembangunan berlangsung cukup tinggi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa distribusi kehilangan tutupan hutan lebih dipengaruhi oleh tekanan antropogenik dibandingkan faktor biofisik semata. Temuan ini sejalan dengan Fadhil et al. [10] yang menyatakan bahwa perubahan penggunaan lahan di DAS Citarum berkaitan erat dengan meningkatnya aktivitas manusia sehingga memengaruhi karakteristik hidrologi DAS. Asdak [1] juga menjelaskan bahwa setiap zona DAS memiliki fungsi ekologis yang berbeda sehingga tekanan pemanfaatan ruang pada masing-masing zona menghasilkan karakteristik perubahan tutupan lahan yang berbeda pula.

Selain dipengaruhi oleh penggunaan lahan, distribusi deforestasi pada zona tengah juga berkaitan dengan posisinya sebagai wilayah transisi antara kawasan konservasi di bagian hulu dan kawasan perkotaan di bagian hilir. Posisi tersebut menyebabkan zona tengah menerima tekanan pembangunan yang lebih besar sehingga menjadi wilayah yang paling rentan mengalami konversi kawasan berhutan. Kondisi ini menunjukkan bahwa analisis spasial mampu mengidentifikasi wilayah prioritas yang tidak selalu dapat dikenali apabila evaluasi hanya didasarkan pada total luas kehilangan tutupan hutan. Untuk memperkuat interpretasi hasil pemetaan tersebut, dilakukan analisis kuantitatif terhadap luas kehilangan tutupan hutan

pada masing-masing zona DAS. Analisis ini bertujuan mengetahui kontribusi setiap zona terhadap total kehilangan tutupan hutan selama periode penelitian sehingga perbedaan karakteristik deforestasi dapat dibandingkan secara lebih objektif.

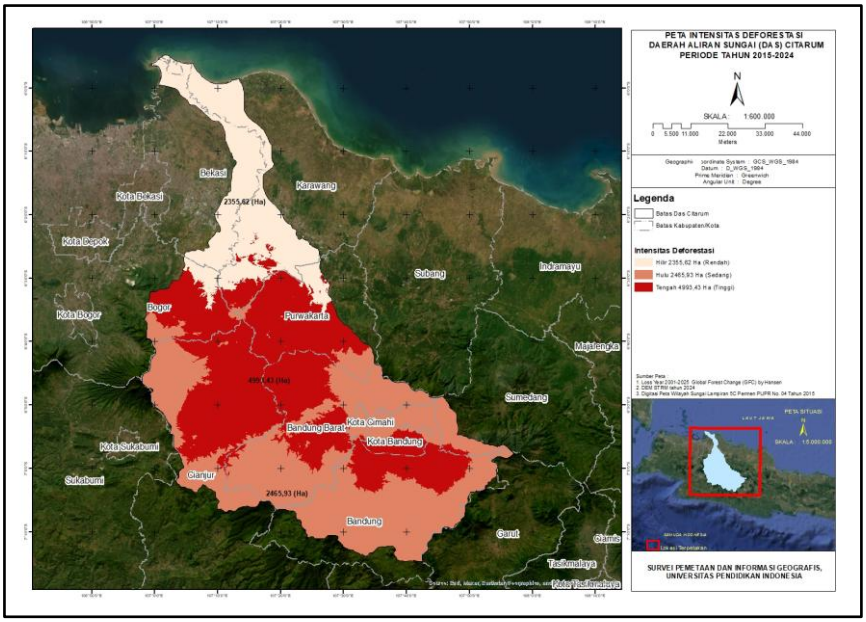
Tabel 1. Luasan Area Deforestasi Berdasarkan Zona DAS 2015-2024

No.	Tahun	Hilir (Ha)	Tengah (Ha)	Hulu (Ha)	Total Pertahun (Ha)
1.	2015	150,98	505,64	205,26	861,88
2.	2016	85,67	167,38	220,95	473,99
3.	2017	134,55	518,20	410,42	1063,17
4.	2018	326,23	541,51	213,67	1081,41
5.	2019	348,30	1072,46	261,51	1682,27
6.	2020	179,09	392,91	187,66	759,66
7.	2021	161,02	214,13	137,00	512,15
8.	2022	244,86	284,60	163,42	692,88
9.	2023	400,01	629,46	338,32	1367,79
10.	2024	324,91	667,15	327,71	1319,77
Total (Ha)		2355,62	4993,43	2465,93	9814,98

Berdasarkan Tabel 1, total kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum selama periode 2015–2024 mencapai 9.814,98 ha. Zona tengah memberikan kontribusi kehilangan tutupan hutan terbesar, yaitu 4.993,43 ha (50,87%), diikuti zona hulu sebesar 2.465,93 ha (25,12%), dan zona hilir sebesar 2.355,62 ha (24,00%). Hasil tersebut memperkuat pola spasial pada Gambar 3 bahwa lebih dari separuh kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum terkonsentrasi pada zona tengah. Proporsi tersebut menunjukkan bahwa distribusi kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum tidak merata. Sekitar setengah dari total deforestasi selama periode penelitian terjadi pada satu zona, sedangkan zona hulu dan hilir masing-masing hanya menyumbang sekitar seperempat dari total kehilangan tutupan hutan. Ketimpangan tersebut mengindikasikan bahwa tekanan perubahan penggunaan lahan lebih terkonsentrasi pada wilayah transisi DAS dibandingkan zona lainnya.

Besarnya kontribusi zona tengah menunjukkan bahwa luas kawasan berhutan bukan merupakan satu-satunya faktor yang menentukan tingkat deforestasi. Tingginya kehilangan tutupan hutan lebih mencerminkan besarnya tekanan pemanfaatan ruang yang terjadi pada suatu wilayah. Aktivitas pertanian, perluasan kawasan permukiman, pembangunan infrastruktur, serta perkembangan ekonomi menjadi faktor yang diduga mendorong meningkatnya konversi kawasan berhutan pada zona tersebut. Temuan ini mendukung hasil penelitian Permatasari et al. [11] yang menjelaskan bahwa perubahan penggunaan lahan akibat aktivitas manusia memberikan pengaruh terhadap karakteristik hidrologi DAS melalui berkurangnya tutupan vegetasi. Pada skala yang lebih luas, Pendrill et al. [12] dan Curtis et al. [13] juga menunjukkan bahwa ekspansi pertanian, pembangunan wilayah, dan aktivitas ekonomi merupakan faktor utama yang mendorong kehilangan hutan di berbagai kawasan tropis.

Menariknya, zona hulu memiliki kehilangan tutupan hutan yang sedikit lebih besar dibandingkan zona hilir meskipun berfungsi sebagai kawasan konservasi dan daerah tangkapan air. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa tekanan terhadap kawasan berhutan juga mulai terjadi pada wilayah konservasi, terutama akibat aktivitas budidaya pada lereng, pertanian lahan kering, serta perkembangan permukiman di sekitar kawasan hutan. Temuan ini menunjukkan pentingnya pengelolaan kawasan hulu secara lebih ketat mengingat perannya dalam menjaga fungsi hidrologi DAS. Meskipun analisis luas kehilangan tutupan hutan mampu menunjukkan besarnya deforestasi pada setiap zona DAS, informasi tersebut belum sepenuhnya menggambarkan tingkat tekanan spasial yang terjadi pada suatu wilayah. Oleh karena itu, dilakukan analisis intensitas deforestasi untuk mengidentifikasi variasi tingkat tekanan kehilangan tutupan hutan sebagaimana disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta Intensitas Deforestasi

Hasil analisis menunjukkan bahwa intensitas deforestasi memiliki pola yang relatif konsisten dengan distribusi kehilangan tutupan hutan. Zona tengah didominasi oleh kelas intensitas tinggi hingga sangat tinggi, sedangkan zona hulu dan hilir umumnya berada pada kelas rendah hingga sedang. Hal tersebut menunjukkan bahwa kehilangan tutupan hutan pada zona tengah tidak hanya terjadi dalam luasan yang besar, tetapi juga berlangsung secara berulang pada lokasi-lokasi tertentu sehingga membentuk area dengan tekanan deforestasi yang tinggi. Perbedaan antara luas kehilangan hutan dan intensitas deforestasi memberikan informasi yang saling melengkapi. Luas kehilangan hutan menggambarkan besarnya area yang mengalami deforestasi, sedangkan intensitas menunjukkan tingkat konsentrasi tekanan spasial pada lokasi tertentu. Dengan demikian, suatu wilayah dapat memiliki luas kehilangan hutan yang relatif kecil, tetapi tetap memperlihatkan intensitas tinggi apabila kejadian deforestasi terkonsentrasi pada area yang sempit. Pendekatan ini memberikan pemahaman yang lebih komprehensif dibandingkan analisis yang hanya didasarkan pada luas kehilangan tutupan hutan.

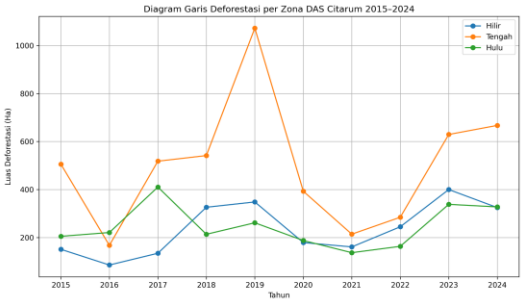
Pola intensitas yang lebih tinggi pada zona tengah diduga berkaitan dengan karakteristik penggunaan lahan yang lebih dinamis dibandingkan zona lainnya. Sebagai wilayah transisi, zona tengah berkembang sebagai kawasan pertanian, perkebunan, permukiman, serta didukung oleh aksesibilitas yang relatif lebih baik dibandingkan kawasan hulu. Kondisi tersebut meningkatkan tekanan terhadap kawasan berhutan sehingga proses konversi lahan berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, kawasan hulu masih didominasi oleh fungsi

konservasi dan daerah tangkapan air, sedangkan zona hilir memiliki luas kawasan berhutan yang lebih terbatas akibat dominasi kawasan perkotaan dan industri. Temuan ini sejalan dengan Pendrill et al. [12] yang menyatakan bahwa ekspansi pertanian merupakan salah satu pendorong utama deforestasi di kawasan tropis. Curtis et al. [13] juga menunjukkan bahwa kehilangan hutan pada berbagai wilayah di dunia umumnya berkaitan dengan aktivitas pertanian, pembangunan infrastruktur, dan perkembangan ekonomi yang meningkatkan tekanan terhadap kawasan berhutan. Dibandingkan penelitian Fadhil et al. [10] maupun Permatasari et al. [11] yang lebih berfokus pada hubungan perubahan penggunaan lahan terhadap kondisi hidrologi DAS, penelitian ini memberikan informasi yang lebih rinci mengenai variasi distribusi, luas, dan intensitas deforestasi pada setiap zona DAS melalui pendekatan spasial berbasis zonasi.

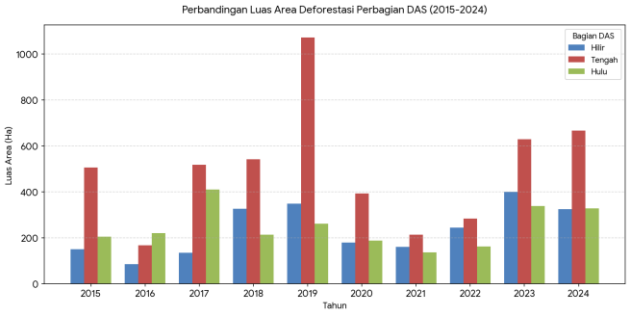
Secara keseluruhan, integrasi antara analisis distribusi spasial, luas kehilangan tutupan hutan, dan intensitas deforestasi menunjukkan bahwa karakteristik deforestasi di DAS Citarum selama periode 2015–2024 tidak berlangsung secara seragam pada setiap zona DAS. Zona tengah menjadi wilayah yang mengalami tekanan deforestasi terbesar, baik ditinjau dari luas kehilangan tutupan hutan maupun tingkat intensitasnya, sedangkan zona hulu dan hilir menunjukkan tingkat kehilangan hutan yang relatif lebih rendah. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa tekanan antropogenik memiliki peran yang lebih dominan dibandingkan faktor biofisik dalam membentuk pola deforestasi di DAS Citarum. Informasi ini menjadi dasar untuk memahami dinamika perubahan deforestasi secara temporal yang selanjutnya dibahas pada Subbab 3.2.

3.2 Dinamika Deforestasi Berdasarkan Zona DAS Tahun 2015–2024

Selain mengetahui distribusi spasial kehilangan tutupan hutan sebagaimana telah dibahas pada Subbab 3.1, analisis temporal diperlukan untuk memahami dinamika deforestasi dari waktu ke waktu pada setiap zona DAS. Analisis ini bertujuan mengidentifikasi kecenderungan peningkatan maupun penurunan kehilangan tutupan hutan selama periode penelitian sehingga perubahan tekanan terhadap kawasan berhutan dapat dievaluasi secara lebih komprehensif. Hasil analisis temporal disajikan melalui grafik garis dan diagram batang yang saling melengkapi dalam menggambarkan perkembangan deforestasi tahunan pada masing-masing zona DAS.



Gambar 5. Diagram Garis



Gambar 6. Diagram Batang

Berdasarkan Gambar 5 dan Gambar 6, kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum selama periode 2015–2024 menunjukkan pola yang berfluktuasi pada seluruh zona DAS. Grafik garis memperlihatkan perubahan luas kehilangan tutupan hutan dari tahun ke tahun, sedangkan diagram batang menunjukkan besarnya kontribusi masing-masing zona terhadap total kehilangan tutupan hutan pada setiap tahun pengamatan. Kedua visualisasi tersebut memperlihatkan bahwa dinamika deforestasi tidak berlangsung secara linier, melainkan mengalami peningkatan dan penurunan pada periode tertentu, sehingga menunjukkan bahwa tekanan terhadap kawasan berhutan berubah secara dinamis sepanjang periode penelitian. Secara keseluruhan, kehilangan tutupan hutan tertinggi terjadi pada tahun 2019 dengan luas mencapai 1.682,27 ha, sedangkan kehilangan terendah terjadi pada tahun 2016 sebesar 473,99 ha. Setelah mengalami peningkatan sejak tahun 2017 hingga mencapai puncaknya pada tahun 2019, luas kehilangan tutupan hutan menurun

cukup tajam pada tahun 2020 menjadi 759,66 ha dan kembali menurun menjadi 512,15 ha pada tahun 2021. Selanjutnya, kehilangan tutupan hutan kembali meningkat selama periode 2022–2024, meskipun belum mencapai tingkat kehilangan hutan seperti yang terjadi pada tahun 2019.

Apabila ditinjau berdasarkan zona DAS, pola fluktuasi kehilangan tutupan hutan menunjukkan karakteristik yang berbeda. Zona tengah memperlihatkan dinamika paling besar dibandingkan zona hulu maupun hilir. Luas kehilangan tutupan hutan pada zona ini meningkat dari 505,64 ha pada tahun 2015 menjadi 1.072,46 ha pada tahun 2019, kemudian menurun hingga 214,13 ha pada tahun 2021 sebelum kembali meningkat menjadi 667,15 ha pada tahun 2024. Sebaliknya, zona hulu dan hilir menunjukkan perubahan yang relatif lebih moderat. Kehilangan tutupan hutan tertinggi pada zona hulu terjadi pada tahun 2017 sebesar 410,42 ha, sedangkan pada zona hilir mencapai puncaknya pada tahun 2023 sebesar 400,01 ha. Perbedaan pola tersebut menunjukkan bahwa setiap zona DAS memiliki karakteristik dinamika deforestasi yang berbeda sesuai dengan kondisi biofisik dan tingkat pemanfaatan ruangnya.

Fluktuasi kehilangan tutupan hutan yang terjadi selama periode penelitian mengindikasikan bahwa proses deforestasi dipengaruhi oleh perubahan intensitas aktivitas pemanfaatan ruang. Peningkatan kehilangan tutupan hutan pada periode 2017–2019 diduga berkaitan dengan meningkatnya konversi kawasan berhutan menjadi lahan pertanian, kawasan permukiman, pembangunan infrastruktur, maupun aktivitas ekonomi lainnya yang memerlukan pembukaan lahan. Sebaliknya, penurunan kehilangan tutupan hutan setelah tahun 2019 menunjukkan bahwa laju konversi kawasan berhutan tidak berlangsung secara konstan, tetapi berubah mengikuti dinamika pemanfaatan ruang pada masing-masing wilayah. Meskipun penelitian ini tidak menganalisis faktor penyebab secara langsung pada setiap tahun, pola temporal yang diperoleh menunjukkan bahwa tekanan antropogenik berperan penting dalam memengaruhi perubahan luas deforestasi di DAS Citarum.

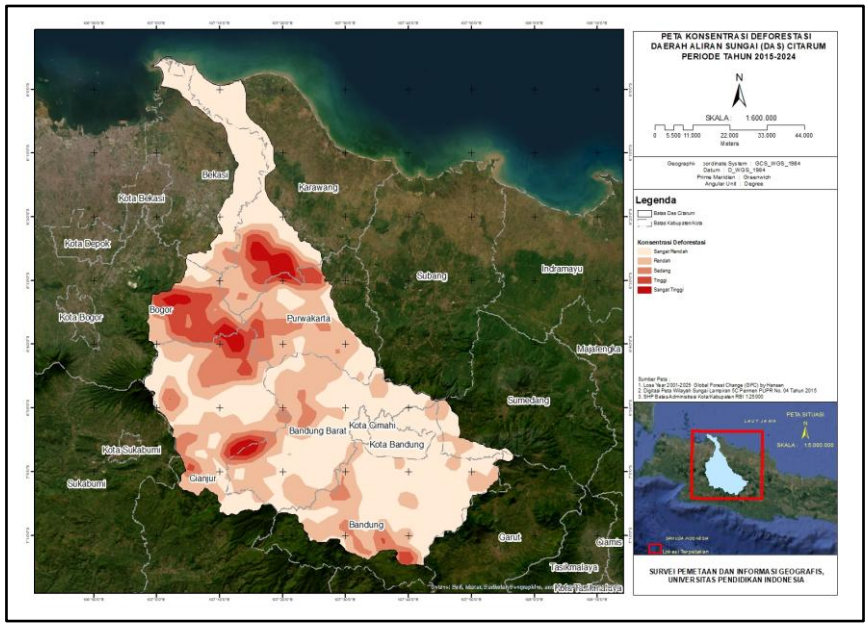
Zona tengah memperlihatkan fluktuasi yang paling besar karena merupakan wilayah transisi yang memiliki tingkat aksesibilitas lebih tinggi dibandingkan kawasan hulu serta masih memiliki ketersediaan lahan berhutan yang relatif luas untuk berbagai aktivitas budidaya. Kondisi tersebut menyebabkan tekanan terhadap kawasan berhutan berlangsung lebih intensif dibandingkan zona lainnya. Sebaliknya, kawasan hulu masih didominasi oleh fungsi konservasi dan topografi yang lebih curam sehingga konversi lahan relatif lebih terbatas, sedangkan zona hilir didominasi kawasan terbangun sehingga luas kawasan berhutan yang tersisa semakin sedikit. Temuan tersebut sejalan dengan Pendrill et al. [12] yang menyatakan bahwa dinamika deforestasi di kawasan tropis berkaitan erat dengan perubahan penggunaan lahan, terutama akibat ekspansi pertanian. Curtis et al. [20] juga menjelaskan bahwa variasi kehilangan hutan pada berbagai wilayah di dunia umumnya dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik, seperti pembukaan lahan, pembangunan infrastruktur, dan perkembangan kegiatan ekonomi. Dibandingkan penelitian sebelumnya yang lebih berfokus pada besarnya kehilangan tutupan hutan, penelitian ini menunjukkan bahwa pola temporal deforestasi juga berbeda pada setiap zona DAS, sehingga evaluasi perubahan hutan perlu mempertimbangkan aspek spasial dan temporal secara bersamaan.

Selama periode 2015–2024, total kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum mencapai 9.814,98 ha dengan rata-rata kehilangan hutan sekitar 981,50 ha per tahun. Zona tengah memberikan kontribusi terbesar terhadap total kehilangan tutupan hutan, yaitu sekitar 50,9%, sedangkan zona hulu dan hilir masing-masing berkontribusi sekitar 25,1% dan 24,0%. Dominasi zona tengah yang terjadi hampir pada seluruh periode pengamatan menunjukkan bahwa tekanan deforestasi pada wilayah transisi berlangsung lebih konsisten dibandingkan dua zona lainnya. Secara keseluruhan, hasil analisis temporal menunjukkan bahwa kehilangan tutupan hutan di DAS Citarum mengalami dinamika yang berbeda pada setiap zona selama

periode 2015–2024. Fluktuasi yang terjadi mengindikasikan bahwa tekanan terhadap kawasan berhutan dipengaruhi oleh perubahan aktivitas pemanfaatan ruang yang berlangsung secara dinamis dari waktu ke waktu. Analisis temporal ini melengkapi hasil analisis spasial pada Subbab 3.1 dengan menunjukkan kapan peningkatan dan penurunan deforestasi terjadi. Namun demikian, pendekatan temporal belum mampu mengidentifikasi lokasi-lokasi yang menjadi pusat konsentrasi kehilangan tutupan hutan. Oleh karena itu, analisis selanjutnya menggunakan Kernel Density Estimation (KDE) dilakukan untuk mengidentifikasi hotspot deforestasi dan tingkat konsentrasi spasial kehilangan tutupan hutan sebagaimana dibahas pada Subbab 3.3.

3.3 Konsentrasi Deforestasi Menggunakan Kernel Density Estimation

Selain menggambarkan besarnya kehilangan tutupan hutan dan dinamika perubahannya dari waktu ke waktu, penelitian ini juga menganalisis pola konsentrasi spasial deforestasi menggunakan pendekatan Kernel Density Estimation (KDE). Berbeda dengan analisis luas kehilangan tutupan hutan yang hanya menunjukkan besarnya area yang mengalami deforestasi, KDE menghasilkan permukaan kepadatan (*density surface*) yang mampu mengidentifikasi lokasi-lokasi dengan konsentrasi kehilangan tutupan hutan tinggi (*hotspot*) maupun rendah (*coldspot*). Pendekatan ini memberikan informasi mengenai tingkat tekanan spasial terhadap kawasan berhutan sehingga wilayah yang memerlukan prioritas pengelolaan dapat diidentifikasi secara lebih akurat.



Gambar 7. Konsentrasi Deforestasi

Berdasarkan Gambar 7, hasil analisis Kernel Density Estimation menunjukkan bahwa konsentrasi deforestasi di DAS Citarum tidak tersebar secara merata. Sebagian besar wilayah berada pada kelas kepadatan rendah hingga sedang, sedangkan *hotspot* dengan tingkat kepadatan tinggi hingga sangat tinggi hanya muncul pada lokasi-lokasi tertentu. Pola tersebut menunjukkan bahwa kehilangan tutupan hutan cenderung membentuk kelompok-kelompok spasial, sehingga tekanan terhadap kawasan berhutan berlangsung secara terkonsentrasi, bukan tersebar secara acak di seluruh wilayah DAS. *Hotspot* deforestasi terutama berkembang pada bagian barat dan barat laut zona tengah DAS Citarum. Wilayah ini merupakan kawasan transisi antara daerah konservasi di bagian hulu dan kawasan budidaya menuju wilayah hilir, sehingga memiliki karakteristik penggunaan lahan yang lebih dinamis. Kondisi topografi yang relatif lebih landai dibandingkan kawasan hulu, didukung oleh aksesibilitas yang lebih baik melalui jaringan jalan serta

berkembangnya aktivitas pertanian, permukiman, dan infrastruktur, diduga menjadi faktor yang meningkatkan tekanan terhadap kawasan berhutan. Kombinasi faktor biofisik dan aktivitas antropogenik tersebut menyebabkan proses konversi hutan berlangsung lebih intensif dan terkonsentrasi pada wilayah tertentu.

Sebaliknya, zona hulu umumnya didominasi oleh kelas kepadatan rendah hingga sedang dengan hanya beberapa *hotspot* lokal. Kondisi ini diduga berkaitan dengan karakteristik topografi yang lebih curam, fungsi kawasan sebagai daerah tangkapan air (*catchment area*), serta dominasi kawasan konservasi yang membatasi perubahan penggunaan lahan. Faktor-faktor tersebut menyebabkan akses terhadap kawasan berhutan relatif lebih terbatas sehingga tekanan deforestasi cenderung lebih rendah dibandingkan zona tengah. Pada zona hilir, *hotspot* deforestasi juga relatif terbatas meskipun aktivitas manusia berlangsung cukup intensif. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa tingginya aktivitas pembangunan tidak selalu diikuti oleh tingginya kehilangan tutupan hutan. Sebagian besar wilayah hilir telah didominasi oleh kawasan terbangun dan lahan budidaya sehingga luas kawasan berhutan yang masih tersedia untuk mengalami konversi relatif lebih sedikit dibandingkan wilayah tengah. Dengan demikian, peluang terjadinya deforestasi baru menjadi semakin terbatas.

Hasil tersebut menunjukkan bahwa pola konsentrasi deforestasi di DAS Citarum lebih dipengaruhi oleh kombinasi kondisi fisik wilayah dan tekanan aktivitas manusia dibandingkan oleh luas kawasan berhutan semata. Wilayah dengan aksesibilitas tinggi, perkembangan penggunaan lahan yang pesat, serta masih memiliki kawasan berhutan cenderung membentuk *hotspot* deforestasi yang lebih jelas. Sebaliknya, kawasan konservasi maupun wilayah yang telah didominasi lahan terbangun menunjukkan tingkat konsentrasi kehilangan tutupan hutan yang relatif lebih rendah. Temuan ini sejalan dengan Pendrill et al. [12] yang menyatakan bahwa ekspansi pertanian merupakan salah satu pendorong utama deforestasi di kawasan tropis. Curtis et al. [13] juga menjelaskan bahwa aktivitas antropogenik, seperti pembukaan lahan, pembangunan infrastruktur, dan perkembangan kawasan permukiman, berperan penting dalam membentuk pola kehilangan hutan. Selain itu, hasil penelitian ini konsisten dengan penelitian pada DAS Lasolo [20] yang menunjukkan bahwa *hotspot* deforestasi cenderung berkembang pada zona DAS dengan tekanan pemanfaatan ruang yang lebih tinggi dibandingkan kawasan konservasi.

Penerapan KDE dalam penelitian ini memberikan informasi yang melengkapi analisis distribusi dan luas kehilangan tutupan hutan sebagaimana dibahas pada Subbab 3.1 dan 3.2. Analisis luas kehilangan tutupan hutan mampu menunjukkan besarnya deforestasi yang terjadi, sedangkan KDE mengungkap lokasi-lokasi yang mengalami konsentrasi tekanan deforestasi paling tinggi. Dengan demikian, pendekatan ini memberikan nilai tambah karena mampu mengidentifikasi wilayah prioritas rehabilitasi dan pengendalian deforestasi berdasarkan tingkat konsentrasi spasial, bukan hanya berdasarkan besarnya luas kehilangan tutupan hutan. Secara keseluruhan, hasil analisis Kernel Density Estimation menunjukkan bahwa deforestasi di DAS Citarum memiliki pola konsentrasi spasial yang berbeda pada setiap zona DAS. *Hotspot* yang terkonsentrasi terutama pada zona tengah mengindikasikan bahwa wilayah tersebut memerlukan perhatian lebih dalam upaya pengendalian deforestasi dan rehabilitasi hutan. Integrasi hasil analisis distribusi spasial, dinamika temporal, dan konsentrasi deforestasi memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai karakteristik deforestasi di DAS Citarum serta menjadi dasar dalam penyusunan rekomendasi pengelolaan DAS berbasis informasi geospasial yang dibahas pada Subbab 3.4.

3.4 Implikasi Pengelolaan Deforestasi Berdasarkan Zona DAS

Hasil analisis spasial menunjukkan bahwa karakteristik deforestasi di DAS Citarum berbeda pada setiap zona, baik ditinjau dari luas kehilangan tutupan hutan, dinamika temporal, maupun tingkat konsentrasi

hotspot. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan deforestasi tidak dapat dilakukan menggunakan pendekatan yang seragam pada seluruh wilayah DAS. Sebaliknya, strategi pengelolaan perlu disusun berdasarkan karakteristik biofisik, tingkat tekanan pemanfaatan ruang, serta pola spasial deforestasi yang teridentifikasi pada masing-masing zona. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan informasi yang dapat dimanfaatkan sebagai dasar penyusunan strategi pengelolaan DAS yang lebih efektif dan berbasis bukti.

Pada zona hulu, luas kehilangan tutupan hutan relatif lebih kecil dibandingkan zona tengah, namun wilayah ini memiliki fungsi ekologis yang sangat penting sebagai daerah tangkapan air dan kawasan konservasi. Meskipun hotspot deforestasi tidak berkembang secara luas, kehilangan tutupan hutan pada kawasan hulu tetap memerlukan perhatian karena berpotensi memengaruhi fungsi hidrologi DAS, meningkatkan limpasan permukaan, mempercepat erosi, serta menambah sedimentasi pada bagian hilir [1], [3]. Oleh karena itu, strategi pengelolaan pada zona hulu sebaiknya diprioritaskan pada upaya mempertahankan kawasan hutan yang masih tersisa melalui penguatan perlindungan kawasan konservasi, rehabilitasi lahan pada area yang mengalami degradasi, serta pengendalian perubahan penggunaan lahan pada wilayah berlereng curam. Pendekatan preventif tersebut dinilai lebih efektif dibandingkan rehabilitasi setelah kerusakan terjadi dalam skala yang lebih luas.

Zona tengah merupakan wilayah dengan kehilangan tutupan hutan terbesar sekaligus memiliki konsentrasi hotspot tertinggi berdasarkan hasil analisis KDE. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa wilayah ini menjadi prioritas utama dalam upaya pengendalian deforestasi di DAS Citarum. Berdasarkan hasil analisis spasial, kegiatan rehabilitasi hutan dan lahan sebaiknya diprioritaskan pada lokasi yang termasuk kelas kepadatan tinggi dan sangat tinggi hasil KDE, karena wilayah tersebut menunjukkan tekanan deforestasi yang paling intensif. Selain itu, penguatan pengawasan pemanfaatan ruang, pengendalian konversi lahan berhutan, serta penerapan praktik penggunaan lahan yang berkelanjutan perlu difokuskan pada kawasan transisi yang mengalami peningkatan kehilangan tutupan hutan secara konsisten selama periode pengamatan. Pendekatan ini memungkinkan alokasi sumber daya rehabilitasi dilakukan secara lebih efektif dan tepat sasaran dibandingkan apabila seluruh wilayah memperoleh perlakuan yang sama.

Pada zona hilir, luas kehilangan tutupan hutan relatif lebih kecil, namun wilayah ini merupakan penerima dampak dari perubahan lingkungan yang terjadi pada bagian hulu dan tengah DAS. Berkurangnya tutupan vegetasi di wilayah atas DAS dapat meningkatkan debit puncak, sedimentasi, dan risiko banjir pada kawasan hilir [1], [20]. Oleh karena itu, pengelolaan zona hilir tidak hanya diarahkan pada perlindungan kawasan berhutan yang masih tersisa, tetapi juga pada pengurangan dampak hidrologi melalui peningkatan ruang terbuka hijau, rehabilitasi sempadan sungai, penguatan pengendalian tata ruang kawasan perkotaan, serta pengembangan infrastruktur hijau yang mampu meningkatkan infiltrasi dan mengurangi limpasan permukaan. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa deforestasi di DAS Citarum merupakan fenomena spasial yang saling berkaitan pada tiap zona. Perubahan penggunaan lahan yang terjadi pada wilayah hulu dan tengah dapat memengaruhi kondisi lingkungan di wilayah hilir sehingga pengelolaan DAS perlu dilakukan secara terpadu dalam satu kesatuan sistem hidrologi. Pendekatan berbasis zonasi memberikan keuntungan karena memungkinkan penyusunan prioritas pengelolaan sesuai karakteristik masing-masing wilayah, sehingga intervensi yang dilakukan menjadi lebih efektif dibandingkan penerapan kebijakan yang bersifat seragam pada seluruh DAS.

Selain menghasilkan informasi mengenai distribusi kehilangan tutupan hutan, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi dataset GFC dengan pendekatan KDE mampu memberikan informasi tambahan mengenai lokasi-lokasi yang mengalami konsentrasi tekanan deforestasi tertinggi. Informasi tersebut dapat

dimanfaatkan oleh pemerintah daerah maupun instansi pengelola DAS untuk melakukan pemantauan deforestasi secara berkala, mengevaluasi efektivitas program rehabilitasi hutan dan lahan, serta menentukan lokasi prioritas intervensi berdasarkan tingkat konsentrasi deforestasi, bukan hanya berdasarkan besarnya luas kehilangan tutupan hutan. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa karakteristik deforestasi di DAS Citarum tidak hanya berbeda dari segi luas kehilangan tutupan hutan, tetapi juga dari pola distribusi, dinamika temporal, dan tingkat konsentrasi spasial pada setiap zona DAS. Integrasi analisis kehilangan tutupan hutan berbasis GFC, pendekatan zonasi hulu–tengah–hilir, dan KDE menghasilkan informasi spasial yang lebih komprehensif dibandingkan analisis perubahan tutupan hutan secara konvensional. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan gambaran mengenai dinamika deforestasi, tetapi juga menawarkan pendekatan yang dapat mendukung penyusunan prioritas rehabilitasi hutan, pengendalian perubahan penggunaan lahan, dan pengelolaan DAS berbasis informasi geospasial secara lebih efektif, adaptif, dan terarah.

4. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa deforestasi di DAS Citarum selama periode 2015–2024 memiliki karakteristik spasial yang berbeda pada setiap zona DAS. Hasil analisis menunjukkan bahwa zona tengah merupakan wilayah dengan kehilangan tutupan hutan terbesar, yaitu 4.993,43 ha (50,88%), diikuti zona hulu sebesar 2.465,93 ha (25,14%) dan zona hilir sebesar 2.355,62 ha (23,99%). Analisis temporal memperlihatkan bahwa kehilangan tutupan hutan berfluktuasi selama periode pengamatan dengan puncak deforestasi terjadi pada tahun 2019, sedangkan analisis Kernel Density Estimation (KDE) menunjukkan bahwa deforestasi membentuk pola konsentrasi spasial (*hotspot*) yang terutama berkembang pada zona tengah. Temuan tersebut mengindikasikan bahwa tekanan pemanfaatan ruang dan aktivitas antropogenik tidak berlangsung secara merata, tetapi terkonsentrasi pada wilayah-wilayah tertentu di dalam DAS Citarum. Penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah melalui integrasi Global Forest Change (GFC), pendekatan zonasi hulu–tengah–hilir, dan Kernel Density Estimation (KDE) dalam satu kerangka analisis spasial. Pendekatan tersebut tidak hanya mampu mengidentifikasi besarnya kehilangan tutupan hutan, tetapi juga mengungkap variasi distribusi spasial, dinamika temporal, serta konsentrasi hotspot deforestasi pada setiap zona DAS. Dengan demikian, penelitian ini memberikan informasi yang lebih komprehensif dibandingkan analisis deforestasi yang hanya berfokus pada perubahan luas tutupan hutan, sekaligus menyediakan dasar yang lebih kuat dalam penentuan prioritas rehabilitasi hutan dan lahan, pengendalian perubahan penggunaan lahan, serta pengelolaan DAS berbasis informasi geospasial. Penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena analisis difokuskan pada identifikasi pola spasial deforestasi berdasarkan data kehilangan tutupan pohon tanpa mengevaluasi secara kuantitatif faktor-faktor yang memengaruhi terjadinya deforestasi. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan mengintegrasikan variabel penggunaan lahan, kepadatan penduduk, jaringan jalan, aksesibilitas, kondisi topografi, maupun kebijakan pemanfaatan ruang, serta menerapkan analisis spasial yang lebih lanjut untuk mengidentifikasi hubungan antara faktor-faktor tersebut dengan dinamika deforestasi. Pengembangan tersebut diharapkan dapat menghasilkan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai proses deforestasi sekaligus mendukung penyusunan kebijakan pengelolaan DAS yang lebih efektif, adaptif, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] C. Asdak, *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Yogyakarta: Gadjah Mada University Press, 2023.

[2] O. Soemarwoto, *Ekologi, Lingkungan Hidup dan Pembangunan*. Jakarta: Djambatan, 2004.

[3] Suripin, *Pelestarian Sumber Daya Tanah dan Air*. Yogyakarta: Andi, 2002.

[4] M. C. Hansen *et al.*, "High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change," *Science (1979).*, vol. 342, no. 6160, 2013.
[5] Balai Besar Wilayah Sungai Citarum, "Profil Daerah Aliran Sungai Citarum," Bandung.
[6] Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia, "Status Lingkungan Hidup Indonesia Tahun 2022," Jakarta, 2022.
[7] Badan Pusat Statistik Provinsi Jawa Barat, "Provinsi Jawa Barat Dalam Angka 2023," Bandung, 2023.
[8] A. M. Ekasari, H. Burhanuddin, and I. Fardani, "Analisis Perubahan Tutupan Lahan Menggunakan Data Penginderaan Jauh Multi Temporal," *Media Komunikasi Geografi*, vol. 23, no. 1, 2022.
[9] F. Yulianto, Suwarsono, U. C. Nugroho, N. P. Nugroho, W. Sunarmodo, and M. R. Khomarudin, "Spatial-Temporal Dynamics of Land Use/Land Cover Change and Flood Hazard Mapping in the Upstream Citarum Watershed, West Java, Indonesia," *Quaestiones Geographicae*, vol. 39, no. 1, 2020.
[10] M. Y. Fadhil, Y. Hidayat, and D. P. T. Baskoro, "Identifikasi Perubahan Penggunaan Lahan dan Karakteristik Hidrologi DAS Citarum Hulu," *Jurnal Ilmu Pertanian Indonesia*, vol. 26, no. 2, 2021.
[11] R. Permatasari, A. Sabar, and D. K. Natakusumah, "Pengaruh Perubahan Penggunaan Lahan terhadap Rezim Hidrologi DAS," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 24, no. 1, 2017.
[12] F. Pendrill *et al.*, "Agricultural and Forestry Trade Drives Large Share of Tropical Deforestation Emissions," *Global Environmental Change*, vol. 56, 2019.
[13] P. G. Curtis, C. M. Slay, N. L. Harris, A. Tyukavina, and M. C. Hansen, "Classifying Drivers of Global Forest Loss," *Science (1979).*, vol. 361, 2018.
[14] P. V. Potapov *et al.*, "The Global 2000–2020 Land Cover and Land Use Change Dataset Derived from the Landsat Archive," *Sci. Data*, vol. 9, 2022.
[15] Food and Agriculture Organization of the United Nations, "Global Forest Resources Assessment 2020: Main Report," Rome, 2020.
[16] United States Geological Survey, "Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global," Sioux Falls.
[17] Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia, "Peraturan Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat Nomor 04/PRT/M/2015 tentang Kriteria dan Penetapan Wilayah Sungai," Jakarta, 2015.
[18] G. F. Jenks, "The Data Model Concept in Statistical Mapping," *International Yearbook of Cartography*, vol. 7, 1967.
[19] Environmental Systems Research Institute, "How Kernel Density Works."
[20] C. Ramadhan, D. Ruslanjari, and E. Nurjani, "Spatial and Temporal Based Deforestation Proclivity Analysis on Flood Events with Applying Watershed Scale (Case Study: Lasolo Watershed in Southeast Sulawesi, Indonesia)," *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 93, 2023.