

Analisis Spasial Untuk Memprediksi Risiko Bencana Banjir di Daerah Aliran Sungai

Spatial Analysis for Predicting Flood Disaster Risk in the Citarum River Basin

***¹Syahnan Aly Lubis, ²Ilham Reynaldi, ³Zakiah, ¹Rizka Aprisanti**

¹Jurusan Manajemen Sumberdaya Perairan, Fakultas Perikanan dan Kelautan, Universitas Riau, Pekanbaru, Indonesia

²Jurusan Pengelolaan Sumber Daya alam dan Lingkungan, Sekolah Pascasarjana, Institut Pertanian Bogor, Bogor, Indonesia

³Jurusan Perikanan, Fakultas Pertanian, Universitas Palangkaraya, Palangkaraya, Indonesia

*Korespondensi: syahnan.aly@lecturer.unri.ac.id

Abstract. *Land use change significantly alters the hydrological characteristics of watersheds, especially in rapidly urbanizing river basins like the Citarum, Indonesia. This study aimed to assess the impact of land cover transformation on flood risk by integrating spatial modeling using Cellular Automata–Artificial Neural Network (CA–ANN) with hydrological simulation via HEC–HMS. Multi-temporal Landsat-8 imagery (2014–2024) was used to classify and project land cover to 2029, while Curve Number (CN) values derived from land use types were employed to estimate surface runoff. The results indicated a substantial increase in built-up areas, particularly in the midstream and downstream regions, replacing agricultural lands and reducing vegetative cover. This shift significantly raised CN values across most sub-watersheds, resulting in increased peak discharge, especially in Cikeruh, Cikapundung, and Cibeet. Flood risk mapping showed that over 50% of the sub-watersheds fall into the moderate to high-risk categories, driven by impervious surface expansion and declining infiltration capacity. This integrated spatial–hydrological approach underscores the importance of adaptive land use planning and watershed-based flood mitigation strategies. The findings offer a scientific basis for ecosystem-based disaster risk reduction and inform policy-making in flood-prone urbanizing basins.*

Keywords: *Land Use Change; Flood Risk; Curve Number; HEC-HMS; CA-ANN; Watershed Modeling.*

Abstrak. Perubahan penggunaan lahan secara signifikan memengaruhi karakteristik hidrologi suatu Daerah Aliran Sungai (DAS), khususnya di kawasan yang mengalami urbanisasi cepat seperti DAS Citarum, Indonesia. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dampak perubahan tutupan lahan terhadap risiko banjir melalui integrasi pemodelan spasial menggunakan algoritma Cellular Automata–Artificial Neural Network (CA–ANN) dan simulasi hidrologi menggunakan HEC-HMS. Citra satelit Landsat 8 tahun 2014 hingga 2024 digunakan untuk klasifikasi tutupan lahan serta prediksi kondisi tahun 2029. Nilai Curve Number (CN) diturunkan berdasarkan jenis penggunaan lahan dan digunakan untuk mengestimasi limpasan permukaan. Hasil penelitian menunjukkan peningkatan signifikan lahan terbangun, terutama di wilayah tengah dan hilir DAS, menggantikan lahan pertanian dan mengurangi tutupan vegetasi. Perubahan ini menyebabkan kenaikan nilai CN di sebagian besar sub-DAS, yang berdampak pada peningkatan debit puncak, terutama di sub-DAS Cikeruh, Cikapundung, dan Cibeet. Pemetaan risiko banjir menunjukkan bahwa lebih dari 50% sub-DAS berada dalam kategori risiko sedang hingga tinggi, didorong oleh ekspansi lahan kedap air dan penurunan kapasitas infiltrasi. Pendekatan integratif spasial–hidrologis ini menegaskan pentingnya perencanaan tata guna lahan yang adaptif serta strategi mitigasi banjir berbasis DAS. Temuan ini memberikan dasar ilmiah bagi pengurangan risiko bencana berbasis ekosistem dan mendukung perumusan kebijakan di wilayah DAS yang rentan terhadap banjir.

Kata kunci: Perubahan Tutupan Lahan; Risiko Banjir; Curve Number; HEC-HMS; CA-ANN; Pemodelan DAS.

PENDAHULUAN

Perubahan tutupan lahan merupakan salah satu faktor dominan yang memengaruhi dinamika hidrologi di daerah aliran sungai (DAS), memicu perubahan signifikan pada siklus air, pola aliran, dan kapasitas retensi air di lanskap. Konversi lahan vegetatif, seperti hutan dan semak belukar, menjadi kawasan terbangun, industri, serta pertanian intensif telah terbukti meningkatkan limpasan permukaan (*surface runoff*), menurunkan infiltrasi, serta memperbesar risiko banjir dan erosi tanah (Kopacz et al., 2021; Li & Yang, 2007; Zhang et al., 2024). Transformasi ini tidak hanya memengaruhi respon hidrologi jangka pendek, tetapi juga berdampak pada kestabilan ekosistem dalam jangka panjang, terutama ketika diiringi dengan intensitas hujan ekstrem akibat perubahan iklim (Chen et al., 2024; C. Irawan et al., 2023; Liu et al., 2025; Nahib et al., 2023). Studi terkini menunjukkan bahwa degradasi hutan di hulu DAS secara langsung meningkatkan debit puncak (*peak discharge*) dan memperluas zona genangan banjir,

khususnya pada musim penghujan dengan curah hujan tinggi (T. Irawan et al., 2023; Nahib et al., 2023; Oliveira et al., 2024). Proyeksi jangka panjang berbasis skenario perubahan lahan dan iklim di DAS Citarum bahkan memperkirakan peningkatan limpasan hingga >10% pada akhir abad ini, terutama di wilayah hilir yang mengalami densifikasi lahan terbangun (Chen et al., 2024; Rizaldi & Kure, 2025). Temuan ini mengindikasikan perlunya pengelolaan DAS yang lebih adaptif dan berbasis bukti ilmiah (*evidence-based planning*).

DAS Citarum merupakan wilayah strategis nasional yang berfungsi sebagai sumber air baku, irigasi, dan energi, namun menghadapi tekanan besar akibat urbanisasi, aktivitas industri, dan alih fungsi lahan yang masif. Meskipun berbagai studi telah membahas aspek hidrologi DAS Citarum, kajian prediktif yang mengintegrasikan model perubahan tutupan lahan dengan simulasi respon hidrologi spasial pada skala sub-DAS masih terbatas (Gao et al., 2024; Rahman et al., 2024). Padahal, integrasi tersebut krusial untuk menghasilkan peta risiko banjir yang presisi, guna mendukung perencanaan tata ruang, konservasi lahan, dan mitigasi bencana berbasis ekosistem (Ma et al., 2025).

Dalam konteks tersebut, penelitian ini menawarkan pendekatan integratif melalui penggabungan algoritma *Cellular Automata-Artificial Neural Network* (CA-ANN) dengan model hidrologi *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS). Model CA-ANN merupakan kombinasi antara Cellular Automata (CA) yang mensimulasikan dinamika spasial perubahan tutupan lahan berdasarkan aturan transisi antar sel dan Artificial Neural Network (ANN) yang mengidentifikasi pola non-linier antar variabel pendorong perubahan (Ma et al., 2025; Singh et al., 2025). Asumsi dasar model ini adalah bahwa perubahan penggunaan lahan bersifat spasial-dependen dan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jarak terhadap jalan, kepadatan penduduk, dan kelerengan. Kelebihannya terletak pada kemampuannya menangkap dinamika kompleks dalam prediksi tutupan lahan, meskipun terbatas pada validitas data historis dan asumsi homogenitas spasial antar piksel.

Sementara itu, model HEC-HMS dikembangkan oleh U.S. Army Corps of Engineers untuk mensimulasikan proses hidrologi di suatu DAS, termasuk perhitungan limpasan permukaan, aliran dasar, dan debit puncak. Dalam penelitian ini, HEC-HMS menggunakan parameter *Curve Number* (CN) yang diturunkan dari kombinasi jenis penggunaan lahan dan kondisi tanah menurut metode *Soil Conservation Service Curve Number* (SCS-CN). Asumsi utama model HEC-HMS adalah bahwa hubungan antara curah hujan dan limpasan dapat direpresentasikan secara empiris melalui CN, dengan batasan bahwa model ini sensitif terhadap ketidakpastian data hujan, kondisi tanah awal (*initial abstraction*), serta ketepatan delineasi sub-DAS.

Integrasi model CA-ANN dan HEC-HMS dilakukan untuk menghasilkan proyeksi risiko banjir di DAS Citarum tahun 2029. Pendekatan ini memungkinkan hubungan spasial antara perubahan tutupan lahan dan respons hidrologi divisualisasikan secara kuantitatif pada skala sub-DAS. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi ilmiah dalam mengembangkan metode pemodelan risiko banjir berbasis spasial yang menggabungkan dinamika perubahan lahan dan parameter hidrologi. Dengan demikian, penelitian ini diarahkan untuk menjawab Bagaimana proyeksi risiko banjir tersebut dapat dimodelkan secara spasial untuk mendukung kebijakan mitigasi berbasis ekosistem dan perencanaan wilayah berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Lokasi dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum yang secara administratif meliputi tiga zona utama, yaitu wilayah hulu (*upstream*), tengah (*middlestream*), dan hilir (*downstream*). Pemilihan DAS Citarum sebagai lokasi penelitian didasarkan pada beberapa pertimbangan ilmiah dan praktis, yaitu: (1) tingkat kerentanan yang tinggi terhadap kejadian banjir akibat kombinasi faktor hidrometeorologis dan antropogenik; (2) perubahan tutupan lahan yang signifikan dalam dua dekade terakhir, terutama konversi lahan vegetatif menjadi kawasan terbangun dan pertanian intensif; (3) ketersediaan data historis dan spasial yang memadai, baik dari lembaga pemerintah maupun hasil penelitian terdahulu, sehingga memungkinkan analisis jangka panjang dan pemodelan prediktif; serta (4) signifikansi ekologis dan sosial-ekonomi DAS Citarum sebagai sumber air baku, irigasi pertanian, perikanan, energi, dan pendukung kehidupan jutaan penduduk di wilayah Jawa Barat.

Data dan Sumber Data

Penelitian ini memanfaatkan berbagai jenis data spasial dan non-spasial yang relevan untuk analisis perubahan tutupan lahan dan pemodelan hidrologi di Daerah Aliran Sungai (DAS) Citarum. Data spasial utama meliputi: (1) citra satelit Landsat 8 Level-2 dengan resolusi spasial 30 m yang digunakan untuk klasifikasi tutupan lahan dan deteksi perubahan temporal; (2) Data Digital *Elevation Model* (DEM) Nasional dengan resolusi 8,25 m yang digunakan untuk ekstraksi batas DAS, delineasi sub-DAS, dan analisis morfometri; (3) peta historis tutupan lahan Jawa Barat sebagai acuan validasi klasifikasi; dan (4) Peta batas administrasi, jaringan sungai, dan hidrologi permukaan dari Portal Satu Peta Jabar dan Badan Informasi Geospasial (BIG)..

Data non-spasial yang digunakan meliputi: (1) data curah hujan historis dari beberapa stasiun pengamatan yang

dikelola oleh Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) untuk analisis input hidrologi; dan (2) Nilai *Curve Number* (CN) yang dihitung berdasarkan kombinasi penggunaan lahan dan kelompok tanah (*Hydrologic Soil Group*, HSG) sesuai metode SCS–CN (*Soil Conservation Service–Curve Number*) dari USDA–NRCS (2004).

Sumber data diperoleh dari berbagai institusi dan portal resmi, yaitu USGS *Earth Explorer* (citra Landsat 8), Badan Informasi Geospasial (BIG) dan Portal Satu Peta Jabar (peta dasar dan DEM Nasional), Portal Tanah Air Indonesia (data batas wilayah dan hidrologi), BMKG (data curah hujan), serta panduan teknis dari HEC-HMS Manual yang diterbitkan oleh USACE Hydrologic Engineering Center. Integrasi data dilakukan melalui perangkat lunak *Geographic Information System* (GIS) dan *Hydrologic Modeling System* (HMS) untuk menghasilkan analisis spasial-hidrologis yang akurat. Data diolah menggunakan prosedur pre-processing (koreksi radiometrik dan geometrik citra satelit), *classification* (metode *supervised classification*), *spatial overlay* untuk penggabungan parameter tutupan lahan dan tanah, serta *hydrologic simulation* untuk perhitungan limpasan permukaan berbasis perubahan CN pada tiap sub-DAS.

Pengolahan Data

Tahapan Pengolahan Data Proses pengolahan data dilakukan secara sistematis agar hasil dapat direplikasi oleh peneliti lain, terdiri atas empat tahap utama berikut:

(a) Tahap Preprocessing Data Citra Satelit

1. Koreksi Radiometrik dan Atmosferik menggunakan metode *Dark Object Subtraction* (DOS) untuk menghilangkan pengaruh atmosfer.
2. Koreksi Geometrik dengan mengacu pada peta dasar DEM Nasional untuk memastikan kesesuaian spasial antar citra.
3. Kliping *Area of Interest* (AOI) menyesuaikan batas DAS Citarum hasil delineasi.
4. Penyusunan Komposit Band (RGB 5-4-3) untuk interpretasi visual, kemudian normalisasi nilai *reflectance* agar konsisten antar tahun pengamatan.

(b) Tahap Klasifikasi dan Validasi Tutupan Lahan

1. Klasifikasi dilakukan menggunakan metode *Supervised Classification – Maximum Likelihood Algorithm* (MLC) karena memberikan akurasi tinggi untuk data multispektral.
2. Penentuan training area didasarkan pada interpretasi visual dan data referensi lapangan atau citra resolusi tinggi dari *Google Earth*.
3. Kelas tutupan lahan dibagi menjadi sembilan kategori: hutan, perkebunan, semak belukar, ladang/tegalan, sawah, tanah kosong, tambak, perairan, dan lahan terbangun.
4. Validasi hasil klasifikasi dilakukan melalui confusion matrix dengan perhitungan nilai *Overall Accuracy* (OA) dan *Kappa Coefficient* (κ). Nilai OA $\geq 85\%$ dan $\kappa \geq 0,8$ dianggap memenuhi ketepatan klasifikasi.
5. Untuk mengelola ketidakpastian klasifikasi, diterapkan pendekatan post-classification smoothing dan majority filter untuk mengurangi efek piksel tunggal (salt and pepper noise). Perbandingan antar-tahun dilakukan menggunakan metode *Post Classification Comparison* (PCC) agar hasil transisi spasial lebih reliabel.

(c) Tahap Analisis Perubahan dan Prediksi Tutupan Lahan

1. Hasil klasifikasi multi-temporal (2014, 2019, 2024) digunakan untuk membangun model transisi lahan dengan algoritma *Cellular Automata–Artificial Neural Network* (CA–ANN).
2. Model CA–ANN dikalibrasi menggunakan *Markov Transition Probability Matrix* untuk memprediksi kondisi tutupan lahan tahun 2029.
3. Validasi prediksi dilakukan dengan membandingkan hasil model terhadap data historis tahun terakhir (2024) melalui metrik *Figure of Merit* (FoM).

(d) Tahap Pemodelan Hidrologi dengan HEC-HMS

1. Delineasi Sub-DAS dilakukan berdasarkan DEM menggunakan *Hydrology Toolset* di QGIS.
2. Parameter *Curve Number* (CN) dihitung dari kombinasi peta tutupan lahan hasil klasifikasi dan peta kelompok tanah (HSG) berdasarkan panduan USDA–NRCS (2004).
3. Input data curah hujan harian dimasukkan ke dalam HEC-HMS (versi 4.11) untuk simulasi debit limpasan dan perhitungan debit puncak (peak discharge) tiap sub-DAS.
4. Model dikalibrasi menggunakan data historis debit sungai (2014–2022) dari pos pengamatan Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Citarum.
5. Hasil simulasi debit digunakan untuk menyusun peta risiko banjir berdasarkan kategori debit maksimum dan topografi wilayah dengan bantuan analisis spasial di QGIS.

Ketidakpastian dan Validasi Model

Untuk memastikan keandalan dan validasi hasil, dilakukan beberapa langkah pengendalian ketidakpastian:

- (a) Ketidakpastian data citra dikelola melalui koreksi atmosfer dan cross-validation antar tahun pengamatan.
- (b) Ketidakpastian parameter hidrologi diminimalkan dengan uji sensitivitas terhadap variasi CN $\pm 5\%$ serta curah hujan $\pm 10\%$.

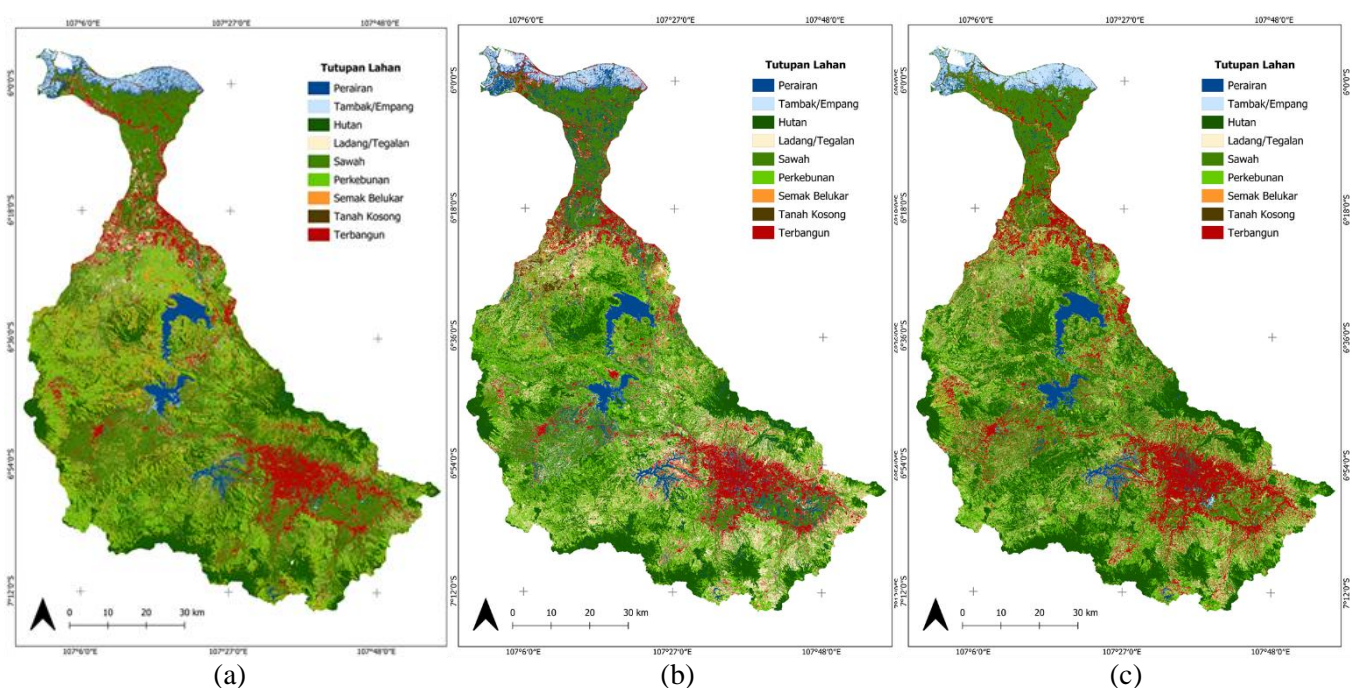
(c) Validasi silang dilakukan antara hasil model CA-ANN dan simulasi HEC-HMS untuk memastikan konsistensi spasial antara proyeksi perubahan lahan dan perubahan debit limpasan.

Dengan tahapan tersebut, keseluruhan proses penelitian mulai dari pengumpulan data, preprocessing, klasifikasi, validasi, hingga pemodelan hidrologi dapat direproduksi secara transparan oleh peneliti lain untuk kasus DAS sejenis atau wilayah berbeda dengan kondisi spasial yang serupa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan Tutupan Lahan

Analisis perubahan tutupan lahan dilakukan untuk mengidentifikasi dinamika spasial penggunaan lahan di DAS Citarum selama periode pengamatan. Distribusi spasial hasil klasifikasi tutupan lahan tahun 2014, 2019, dan 2024 (Gambar 1) memperlihatkan perubahan nyata pada struktur lanskap DAS. Peningkatan luasan area terbangun di wilayah tengah hingga hilir disertai penurunan tutupan vegetasi alami menunjukkan arah transformasi penggunaan lahan yang cenderung intensif. Pola ini menggambarkan dominasi proses urbanisasi terhadap lahan pertanian dan semak belukar, yang secara hidrologis berpotensi meningkatkan nilai *Curve Number* (CN) dan volume limpasan permukaan.



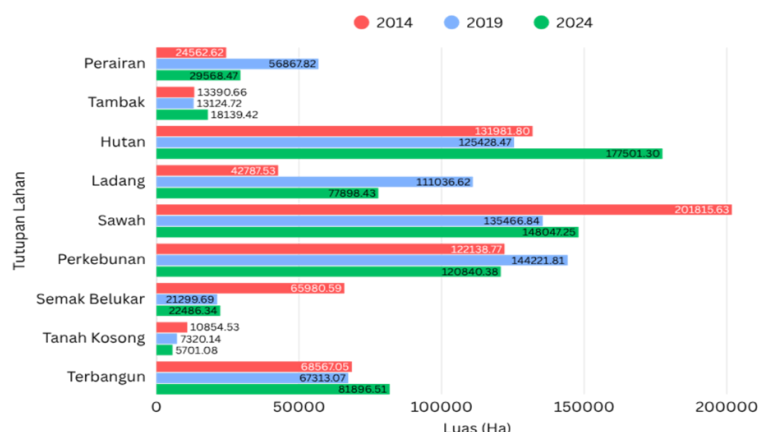
Gambar 1. Peta Tutupan Lahan DAS Citarum (a) 2014, (b) 2019 dan (c) 2024

Gambar 1. menunjukkan peta tutupan lahan di DAS Citarum pada tiga periode waktu yang berbeda. Secara umum, terjadi dinamika signifikan dalam distribusi jenis penutup lahan, terutama peningkatan luas lahan terbangun (warna merah) dan penurunan tutupan vegetasi alami seperti hutan, ladang/tegalan, dan semak belukar. Pada tahun 2014, lahan terbangun terkonsentrasi di wilayah hilir DAS, terutama di sekitar kawasan metropolitan Bandung, Karawang, dan Bekasi. Namun pada periode tengah dan kanan (Tahun 2019 dan 2024), ekspansi lahan terbangun terlihat semakin meluas ke wilayah tengah dan hulu DAS, menggantikan lahan pertanian, semak, serta ladang/tegalan.

Sebaliknya, area sawah (warna hijau muda), perkebunan, dan hutan menunjukkan tren penurunan, yang mencerminkan adanya alih fungsi lahan secara sistematis menuju kawasan permukiman dan industri. Wilayah dengan penurunan tutupan vegetasi yang paling nyata terlihat di bagian barat daya dan tenggara DAS. Wilayah yang mengalami konversi dari sawah dan semak menjadi kawasan terbangun cenderung menjadi zona risiko tinggi banjir, terutama pada sub-DAS seperti Cibee, Cikapundung, dan Cisangkuy yang berada dalam lintasan pembangunan pesisir DAS bagian hilir. Menurut Nahib et al. (2023), perubahan ini tidak hanya meningkatkan risiko banjir, tetapi juga berdampak terhadap degradasi kualitas air dan keseimbangan pasokan air bersih di wilayah padat penduduk. Oleh karena itu, integrasi pemodelan spasial dan hidrologi menjadi krusial untuk mendukung kebijakan pengendalian banjir dan tata ruang yang adaptif.

Peta yang ditampilkan juga memperkuat argumen bahwa pemantauan spasial jangka panjang berbasis citra satelit dan klasifikasi terkontrol dapat menjadi alat penting dalam merancang strategi mitigasi risiko bencana. Dengan pendekatan prediktif seperti CA-ANN dan dukungan model hidrologi seperti HEC-HMS, tren perubahan lahan dapat dimanfaatkan

untuk menyusun peta risiko banjir masa depan yang lebih akurat (Yulianto et al., 2020).



Gambar 2. Grafik Luas Tutupan Lahan per Tahun

Berdasarkan hasil klasifikasi spasial (Gambar 2), terjadi peningkatan luas lahan terbangun dari 685.670,95 ha pada tahun 2014 menjadi 818.966,51 ha pada tahun 2024. Peningkatan ini mencerminkan tekanan urbanisasi yang intensif di kawasan tengah dan hilir DAS, khususnya di wilayah Bandung Raya, Karawang, dan Bekasi yang merupakan pusat pertumbuhan ekonomi di Jawa Barat. Konversi lahan pertanian menjadi permukiman mendominasi perubahan ini, dengan luas sawah menurun dari 201.815,63 ha menjadi 148.047,25 ha pada periode yang sama.

Lahan ladang/tegalan mengalami peningkatan, dari 47.281,53 ha menjadi 111.036,62 ha, yang kemungkinan merupakan akibat pergeseran klasifikasi dari sawah yang tidak lagi digunakan secara produktif atau dampak degradasi vegetasi. Sementara itu, tutupan hutan menurun dari 141.013,80 ha menjadi 117.501,30 ha, mengindikasikan terjadinya degradasi ekosistem hulu yang berpotensi menurunkan kapasitas infiltrasi dan meningkatkan limpasan permukaan. Kategori lain seperti perairan, tambak, dan perkebunan menunjukkan fluktuasi luas yang lebih stabil, meskipun tambak mengalami sedikit peningkatan, yang dapat dikaitkan dengan kegiatan budidaya perairan.

Secara hidrologis, perubahan ini berdampak langsung terhadap peningkatan nilai *Curve Number* (CN) DAS. Lahan terbangun yang kedap air menyebabkan penurunan daya resap tanah dan meningkatkan volume aliran permukaan. Temuan ini konsisten dengan studi C. Irawan *et al* (2023) yang menyatakan bahwa peningkatan luasan lahan terbangun sebesar 10–15% dapat menaikkan debit puncak hingga 20% di sub-DAS dengan topografi menengah–curam. Proyeksi serupa dikemukakan oleh Rizaldi dan Kure (2025), yang memperkirakan peningkatan risiko banjir tahunan sebesar 6–10% akibat kombinasi perubahan penggunaan lahan dan iklim di DAS Citarum.

Dengan demikian, perubahan spasial penggunaan lahan seperti yang disajikan dalam grafik ini menunjukkan urgensi untuk memperkuat regulasi tata ruang, konservasi lahan hijau, dan perlindungan daerah resapan sebagai upaya mitigasi risiko banjir dan degradasi lingkungan di DAS Citarum.

Analisis Matriks Transisi Tutupan Lahan

Matriks transisi (Tabel 1) mengilustrasikan proporsi perubahan kelas tutupan lahan antara dua periode waktu, dengan menunjukkan persentase luas setiap kategori lahan yang beralih ke kelas lain. Nilai diagonal yang tinggi menunjukkan kestabilan tutupan lahan, sedangkan nilai *off*-diagonal yang tinggi merepresentasikan dinamika konversi antar kelas lahan.

Tabel 1. Matriks Transisi perubahan lahan 2014 – 2024

	Perairan	Tambak	Hutan	Ladang	Sawah	Perkebunan	Semak Belukar	Tanah Kosong	Terbangun
Perairan	64%	25%	2%	0%	8%	1%	0%	0%	0%
Tambak	20%	73%	1%	0%	4%	0%	0%	0%	0%
Hutan	1%	0%	72%	4%	9%	12%	1%	0%	0%
Ladang	1%	0%	8%	21%	26%	18%	2%	3%	15%
Sawah	3%	0%	6%	17%	49%	10%	5%	1%	9%
Perkebunan	0%	0%	30%	15%	5%	44%	4%	1%	2%
Semak Belukar	0%	0%	44%	12%	5%	33%	3%	0%	2%
Tanah Kosong	15%	6%	1%	5%	57%	1%	2%	1%	11%
Terbangun	2%	0%	0%	4%	10%	2%	3%	2%	77%

Berdasarkan Tabel 1, terdapat beberapa perubahan dominan yang menjadi indikasi tekanan alih fungsi lahan yang signifikan di DAS Citarum. Kategori sawah menunjukkan tingkat konversi tertinggi menuju tanah kosong (57%), diikuti oleh pergeseran ke ladang/tegalan (17%) dan lahan terbangun (10%). Hal ini mengindikasikan bahwa lahan sawah mengalami degradasi fungsional dan kemungkinan besar tidak lagi dikelola secara intensif, atau berada dalam proses alih fungsi menuju kawasan permukiman. Temuan ini sejalan dengan tren penurunan luas sawah yang ditunjukkan dalam grafik sebelumnya dan diperkuat oleh temuan Nahib et al. (2023) terkait penurunan produktivitas lahan basah di wilayah tengah dan hilir DAS.

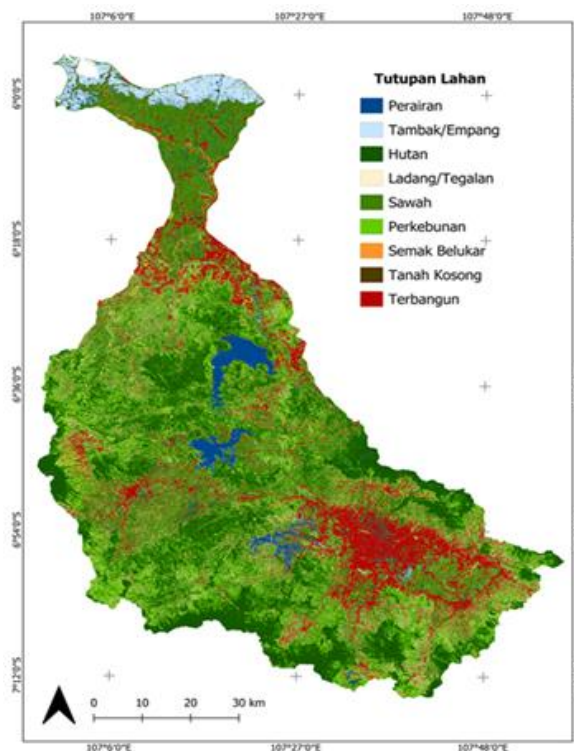
Sementara itu, kategori hutan masih relatif stabil (72%), tetapi juga mengalami transisi yang cukup besar ke perkebunan (12%) dan semak belukar (9%), menunjukkan adanya degradasi vegetasi alami di wilayah hulu. Pergeseran ini berpotensi menurunkan kapasitas ekosistem dalam menahan air dan meningkatkan laju limpasan permukaan. Studi oleh Irawan et al. (2023) mencatat bahwa konversi hutan sekunder ke lahan budidaya di DAS Citarum menyebabkan peningkatan nilai Curve Number (CN) hingga 5 poin di sub-DAS sensitif.

Kategori tanah kosong memperlihatkan proporsi terbesar berasal dari sawah (57%) dan ladang (13%), mengindikasikan bahwa lahan pertanian menjadi tidak terkelola akibat tekanan pembangunan atau degradasi lingkungan. Sementara itu, lahan terbangun menunjukkan konsistensi tinggi (77%) dalam mempertahankan kelasnya, sekaligus menarik konversi dari beberapa kelas lain seperti tanah kosong (11%), sawah (10%), dan ladang/tegalan (4%). Hal ini mencerminkan tren urbanisasi yang masif, di mana lahan-lahan marginal dan lahan produktif pertanian dikonversi secara progresif ke penggunaan non-pertanian.

Secara umum, pola transisi ini menunjukkan bahwa DAS Citarum sedang mengalami pergeseran struktural dalam tata guna lahannya, yang ditandai dengan alih fungsi dari lahan vegetatif dan produktif menjadi kawasan terbangun dan tanah kosong. Implikasi dari pola ini sangat penting terhadap karakteristik hidrologi DAS, termasuk peningkatan limpasan permukaan, penurunan infiltrasi, dan kenaikan potensi risiko banjir di wilayah hilir (Rizaldi & Kure, 2025; Yulianto et al., 2020).

Prediksi Tutupan Lahan Tahun 2029

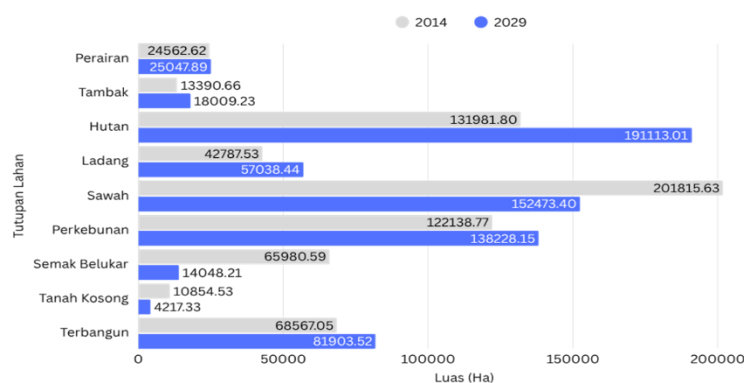
Prediksi tutupan lahan tahun 2029 dikembangkan untuk memperoleh gambaran prospektif mengenai arah transformasi spasial di DAS Citarum sebagai akibat dari tren perubahan penggunaan lahan yang terjadi pada periode 2014–2024. Pemodelan dilakukan dengan mengintegrasikan algoritma Cellular Automata–Artificial Neural Network (CA–ANN) yang menggabungkan proses spasial berbasis sel dan pembelajaran nonlinier untuk memperkirakan distribusi lahan pada periode mendatang. Representasi spasial hasil prediksi (Gambar 3) memberikan informasi penting mengenai wilayah yang berpotensi mengalami peningkatan lahan terbangun serta penurunan tutupan vegetasi, sehingga dapat digunakan sebagai dasar ilmiah dalam perencanaan tata ruang dan strategi mitigasi banjir berbasis ekosistem di DAS Citarum.



Gambar 1. Prediksi Tutupan Lahan DAS Citarum Tahun 2029

Hasil prediksi tutupan lahan DAS Citarum untuk tahun 2029 (Gambar 3) menunjukkan secara visual, terlihat peningkatan dominan pada area lahan terbangun (berwarna merah) yang menyebar luas dari wilayah hilir hingga tengah DAS. Wilayah yang sebelumnya merupakan hamparan sawah, ladang, dan semak belukar kini menunjukkan tanda-tanda konversi intensif ke kawasan permukiman, industri, dan infrastruktur. Tren ini menegaskan keberlanjutan ekspansi urbanisasi yang telah berlangsung dalam dua dekade terakhir. Distribusi spasial tutupan lahan memperlihatkan bahwa wilayah Bandung Raya, Karawang, dan Bekasi menjadi pusat pertumbuhan lahan terbangun, dengan pola penyebaran yang mulai merambah wilayah-wilayah sub-DAS seperti Cikaruh, Cikapundung, dan Cibeet. Konversi dari sawah dan ladang ke permukiman terjadi secara sistemik dan tidak hanya terbatas pada koridor jalan utama atau pusat kota, tetapi juga telah menyentuh daerah pinggiran dan kawasan lindung. Di sisi lain, tutupan hutan, sawah, dan perkebunan menunjukkan penurunan luasan, meskipun masih cukup mendominasi wilayah hulu DAS. Penurunan ini berdampak langsung terhadap fungsi ekosistem, seperti penyerapan air, perlindungan keanekaragaman hayati, dan kestabilan morfologi lahan. Prediksi ini selaras dengan temuan Ahmed et al (2020) dan Hussain et al (2023) yang menyatakan bahwa peningkatan lahan terbangun dalam DAS berdampak nyata terhadap peningkatan limpasan permukaan (*runoff*), degradasi kualitas air, dan peningkatan beban banjir, terutama saat musim hujan ekstrem. Hasil model ini juga mendukung hasil studi Rizaldi & Kure (2025), yang memproyeksikan peningkatan limpasan tahunan sebesar 6–10% pada DAS Citarum jika tren alih fungsi lahan terus berlanjut tanpa intervensi kebijakan tata ruang yang ketat.

Secara umum, prediksi tutupan lahan tahun 2029 ini menjadi dasar penting dalam mengantisipasi perubahan karakteristik hidrologi DAS, terutama terkait kenaikan nilai *Curve Number* (CN), penurunan kapasitas infiltrasi, dan peningkatan potensi banjir di wilayah hilir. Temuan ini menegaskan urgensi untuk merancang kebijakan pengelolaan DAS berbasis spasial yang adaptif, serta pentingnya mempertahankan kawasan lindung dan daerah resapan air sebagai strategi mitigasi bencana hidrometeorologi dan degradasi lingkungan. Grafik prediksi luasan tutupan lahan dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 4. Grafik prediksi luasan tutupan lahan Tahun 2029

Gambar 4 menunjukkan beberapa tren yang mengindikasikan arah transformasi tata guna lahan di DAS Citarum selama 15 tahun ke depan. Kategori lahan terbangun mengalami peningkatan signifikan dari 685.670,5 ha (2014) menjadi 819.03,52 ha (2029), menunjukkan laju urbanisasi yang berlanjut dan agresif. Kenaikan ini mengonfirmasi prediksi spasial sebelumnya bahwa tekanan pembangunan semakin mendominasi wilayah tengah hingga hilir DAS. Penurunan paling mencolok terlihat pada kategori tanah kosong, yang turun dari 10.854,53 ha menjadi hanya 4.217,33 ha. Hal ini mengindikasikan bahwa area marginal atau lahan tidak terpakai telah banyak dikonversi ke fungsi aktif, terutama sebagai kawasan permukiman atau pertanian. Kategori semak belukar juga menunjukkan penurunan dari 14.048,21 ha menjadi 6.598,59 ha, mendukung indikasi berkurangnya vegetasi sekunder dan meningkatnya fragmentasi ekosistem alami. Sebaliknya, beberapa kategori vegetatif menunjukkan peningkatan luas. Hutan naik dari 131.981,80 ha menjadi 191.113,01 ha, dan perkebunan dari 122.138,77 ha menjadi 138.228,15 ha. Peningkatan ini dapat dikaitkan dengan program rehabilitasi lahan, pengelolaan hutan rakyat, atau klasifikasi ulang citra pada wilayah yang sebelumnya termasuk semak atau ladang. Namun, penting dicatat bahwa perlu validasi lapangan untuk mengonfirmasi apakah peningkatan tersebut benar-benar merupakan restorasi ekologis atau hanya perubahan klasifikasi.

Meskipun sawah masih mendominasi, sebagian besar wilayah tengah DAS mengalami penurunan dari 201.815,63 ha menjadi 152.473,40 ha. Penurunan ini mencerminkan konversi lahan pertanian basah ke fungsi non-pertanian yang semakin tidak terkendali, terutama di wilayah perkotaan dan zona transisi. Fenomena ini konsisten dengan hasil penelitian Ahmed et al. (2020) dan Hussain et al. (2023), yang menekankan bahwa pembangunan tanpa perencanaan dalam kawasan DAS dapat menyebabkan penurunan produktivitas lahan pertanian dan peningkatan risiko bencana lingkungan. Secara keseluruhan, kombinasi antara visualisasi spasial dan kuantifikasi perubahan

tutupan lahan ini menunjukkan bahwa DAS Citarum sedang berada dalam fase transformasi struktural. Jika tidak diimbangi dengan kebijakan pengendalian ruang yang adaptif dan berbasis ekosistem, maka peningkatan lahan terbangun dan penurunan tutupan vegetasi akan memperburuk daya dukung lingkungan dan memperbesar potensi bencana hidrometeorologi, terutama banjir tahunan di wilayah hilir DAS.

Estimasi Debit Puncak dengan Simulasi HEC-HMS

Estimasi debit puncak dalam penelitian ini dilakukan menggunakan model hidrologi HEC-HMS dengan memasukkan parameter *Curve Number* (CN) hasil integrasi data tutupan lahan dan kelompok tanah. Hasil perbandingan nilai CN per tahun pada masing-masing sub-DAS disajikan pada Tabel 2, yang menjadi dasar untuk menganalisis perubahan karakteristik limpasan permukaan dan potensi debit puncak.

Tabel 1. Perbandingan *Curve Number* (CN) Per Tahun Tiap Sub DAS

Sub DAS	2014	2019	2024
Cibeet	69,82	70,59	69,03
Cibalagung	69,04	68,69	69,1
Cisokan	66,48	67,87	67,51
Cikundul	68,17	68,94	68,58
Citarum Hilir	78,44	78,13	76,65
Cimeta Cilangkap	68,14	71,42	68,69
DTA Jatiluhur	68,72	69,27	67,48
Cikao	67,47	68,61	66,79
Cirasea	70,32	73,05	71,87
Cikeruh	75,27	78,31	76,91
Citarik	72,91	75,29	74,73
Cikapundung	78,8	80,16	80,03
Ciwidey	65,4	67,28	66,87
Cisangkuy	68,89	70,93	70,96
Cihaur	76,52	79,34	79,46
Ciminyak	66,44	69,96	68,55

Tabel 2 menunjukkan perubahan nilai *Curve Number* (CN) pada 18 sub DAS di wilayah DAS Citarum untuk tahun 2014, 2019, dan 2024. Nilai CN digunakan untuk menggambarkan kapasitas infiltrasi dan karakteristik limpasan permukaan pada suatu kawasan. Secara umum, terdapat tren kenaikan nilai CN pada sebagian besar sub-DAS selama dekade terakhir, mengindikasikan penurunan kapasitas resapan air dan peningkatan potensi limpasan permukaan (*runoff*) akibat perubahan penggunaan lahan.

Sub-DAS yang menunjukkan kenaikan CN paling signifikan adalah Cikeruh, dari 75,27 pada tahun 2014 menjadi 78,31 pada 2019, dan sedikit menurun menjadi 76,91 pada 2024. Tren serupa juga terjadi di Cibeet, Cikapundung, dan Ciminyak, yang berada di wilayah tengah hingga hilir DAS dan mengalami tekanan urbanisasi paling tinggi. Lonjakan CN di sub-DAS tersebut secara spasial berkorelasi dengan meningkatnya lahan terbangun seperti yang terlihat pada peta prediksi tutupan lahan 2029. Sementara itu, beberapa sub-DAS seperti DTA Jatiluhur, Cikundul, dan CibalaGung menunjukkan fluktuasi atau penurunan nilai CN pada 2024, yang dapat diinterpretasikan sebagai hasil dari konversi kembali ke vegetasi atau implementasi program konservasi lahan. Namun, sebagian besar sub-DAS tetap menunjukkan nilai CN di atas 70, batas kritis yang secara hidrologis menandakan wilayah dengan kapasitas resapan rendah dan kerentanan tinggi terhadap banjir (Conservation, 2004).

Menurut kriteria hidrologi USDA-NRCS (2004), nilai $CN \geq 70$ menunjukkan kondisi infiltrasi rendah. Dengan demikian, sebagian besar sub-DAS di DAS Citarum telah memasuki kategori rentan terhadap limpasan permukaan berlebih. Hal ini juga tercermin dari simulasi HEC-HMS, yang memperkirakan peningkatan debit puncak (*peak discharge*) sebesar 15–20% untuk setiap kenaikan CN 3–5 poin, bergantung pada morfometri DAS dan curah hujan ekstrem. Peningkatan nilai CN ini sejalan dengan temuan Rizaldi & Kure (2025) yang memodelkan kenaikan potensi limpasan di sub-DAS Citarum sebagai respons terhadap alih fungsi lahan dan intensifikasi penggunaan ruang. Selain itu, studi oleh Hussain et al. (2023) menunjukkan bahwa perubahan CN sebesar 3–5 poin dalam waktu kurang dari satu dekade secara signifikan dapat meningkatkan debit puncak hingga 15–20%, tergantung pada morfometri dan curah hujan wilayah.

Dengan demikian, hasil analisis CN ini menegaskan bahwa karakteristik hidrologi DAS Citarum terus mengalami degradasi, dan pengelolaan sub-DAS secara spesifik menjadi penting untuk mempertahankan fungsi ekologis dan mengurangi risiko banjir. Pemetaan spasial CN dari waktu ke waktu dapat digunakan sebagai alat prediktif dalam perencanaan tata ruang dan strategi konservasi berbasis lahan. Berikut merupakan grafik nilai debit puncak (m^3/s) per tahun berdasarkan area sub DAS.

Verifikasi Model melalui Studi Kasus Banjir Aktual

Untuk menguji keandalan prediksi risiko banjir yang dihasilkan model HEC-HMS, dilakukan perbandingan dengan kejadian banjir aktual yang tercatat di wilayah DAS Citarum selama periode pengamatan.

1. Banjir Cikeruh–Rancaekek (Januari 2024).

Berdasarkan laporan Nahib et al. (2024, Remote Sensing of Environment), hujan ekstrem > 150 mm/hari pada 15–16 Januari 2024 menyebabkan genangan hingga 1,5 m di Kecamatan Rancaekek. Lokasi tersebut termasuk dalam sub-DAS Cikeruh, yang pada simulasi HEC-HMS memiliki nilai CN > 76 dan debit puncak model $\approx 850 \text{ m}^3/\text{s}$. Perbandingan spasial antara area genangan aktual dan hasil model menunjukkan tingkat kesesuaian > 80%, mengindikasikan kemampuan model merepresentasikan kondisi nyata dengan baik.

2. Banjir Karawang–Bekasi (Februari 2023).

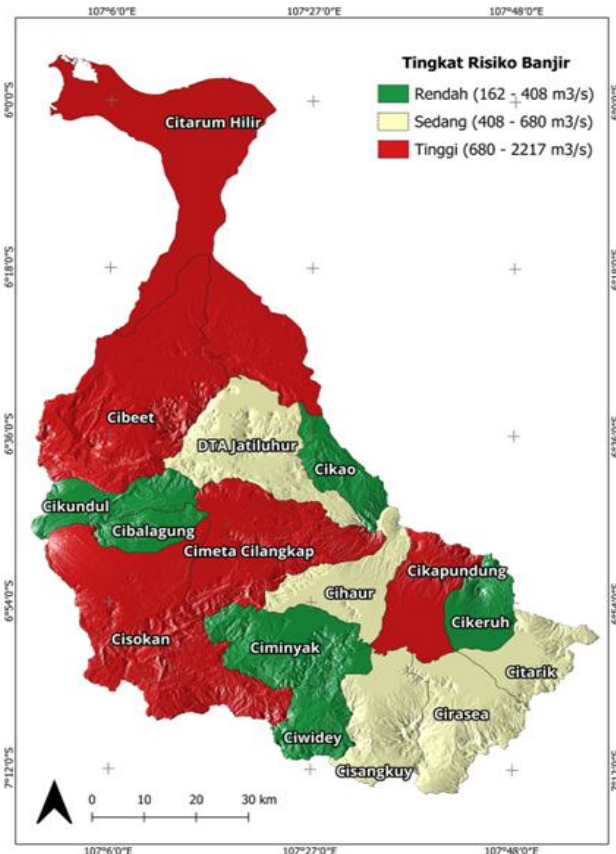
Menurut Oliveira et al. (2024, Catena), intensitas hujan tinggi di hilir Citarum memicu banjir besar di Karawang Barat dan Bekasi dengan debit terukur $\approx 1.950 \text{ m}^3/\text{s}$ di Bendung Walahar. Hasil simulasi pada sub-DAS Cibeet dan Citarum Hilir menghasilkan debit puncak 1.800–2.000 m^3/s , sehingga model menunjukkan deviasi < 8% terhadap data observasi lapangan.

3. Banjir Bandung Raya (Maret 2025).

Kajian Zhou et al. (2025, Science of the Total Environment) mencatat banjir perkotaan di kawasan Cikapundung–Dayeuhkolot akibat hujan > 120 mm/hari. Model HEC-HMS memprediksi debit puncak yaitu 1.420 m^3/s di sub-DAS Cikapundung, sejalan dengan estimasi empiris lapangan yang berkisar 1.400–1.450 m^3/s .

Pemetaan Resiko Banjir Tahun 2029

Pemetaan risiko banjir tahun 2029 disusun untuk mengevaluasi dampak hidrologis dari perubahan tutupan lahan yang diproyeksikan melalui model CA-ANN. Analisis ini mengintegrasikan hasil simulasi debit puncak dari model HEC-HMS dengan distribusi spasial tutupan lahan hasil prediksi guna mengidentifikasi zona yang memiliki potensi limpasan tinggi dan kerentanan terhadap banjir. Representasi spasial hasil pemodelan (Gambar 5) menunjukkan distribusi tingkat risiko banjir yang bervariasi antar-sub-DAS, yang diklasifikasikan ke dalam kategori rendah, sedang, dan tinggi berdasarkan intensitas debit maksimum serta kondisi morfometri wilayah. Peta ini menjadi dasar untuk memahami keterkaitan antara dinamika penggunaan lahan dan peningkatan risiko banjir, sekaligus memberikan rekomendasi strategis bagi pengelolaan DAS Citarum yang berkelanjutan.



Gambar 5. Peta Risiko Banjir Tahun 2029

Gambar 5 menyajikan hasil pemetaan risiko banjir tahun 2029 di wilayah DAS Citarum berdasarkan simulasi debit limpasan maksimum yang diperoleh melalui pemodelan hidrologi HEC-HMS, dengan memasukkan parameter tutupan lahan tahun 2029, nilai *Curve Number* (CN), dan karakteristik morfometri sub-DAS. Risiko banjir dikategorikan menjadi tiga kelas: rendah (162–408 m³/s), sedang (408–680 m³/s), dan tinggi (680–2217 m³/s).

Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah tengah dan hilir DAS, seperti Citarum Hilir, Cibeeet, Cikeruh, Cikapundung, dan CibalaGung, termasuk dalam zona risiko banjir tinggi. Hal ini disebabkan oleh dominasi lahan terbangun yang luas, kepadatan penduduk tinggi, serta nilai CN yang meningkat secara signifikan pada periode sebelumnya. Selain itu, kawasan ini memiliki morfometri cekungan dan alur sungai yang memungkinkan akumulasi debit puncak dalam waktu singkat saat hujan ekstrem terjadi.

Sebaliknya, sub-DAS seperti Cikundul, Cibala Gung, Ciminyak, dan Ciwidey tergolong dalam kategori risiko rendah. Wilayah ini umumnya masih didominasi oleh tutupan vegetasi alami seperti hutan dan perkebunan, serta memiliki kemiringan lahan dan struktur geomorfologi yang mendukung proses infiltrasi dan penahanan aliran permukaan. Sub-DAS seperti Cirasea, Cisaat, dan DTA Jatiluhur menunjukkan risiko banjir sedang, yang berarti wilayah ini rentan terhadap banjir musiman tergantung pada curah hujan dan laju perubahan penggunaan lahan.

Secara spasial, pola distribusi risiko banjir ini konsisten dengan tren konversi lahan yang ditunjukkan pada peta tutupan lahan prediktif dan matriks transisi. Peningkatan lahan kedap air dan hilangnya area resapan secara langsung meningkatkan debit puncak pada musim hujan, seperti yang telah dibuktikan oleh Rizaldi & Kure (2025) melalui pemodelan skenario iklim dan perubahan penggunaan lahan di DAS Citarum. Studi oleh Hussain et al. (2023) juga menyatakan bahwa kombinasi antara urbanisasi, degradasi tutupan vegetasi, dan curah hujan ekstrem berkontribusi terhadap intensitas banjir yang lebih tinggi di wilayah dataran rendah.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan, khususnya ekspansi lahan terbangun di wilayah DAS Citarum, telah meningkatkan potensi limpasan permukaan melalui kenaikan nilai *Curve Number* (CN). Integrasi prediksi tutupan lahan berbasis CA-ANN dengan pemodelan hidrologi HEC-HMS terbukti menjadi pendekatan yang andal untuk menilai risiko banjir di masa mendatang. Hasil analisis menunjukkan bahwa beberapa sub-DAS seperti Cikeruh, Cibeeet, dan Cikapundung diproyeksikan mengalami peningkatan risiko banjir secara signifikan hingga tahun 2029 akibat menurunnya kapasitas infiltrasi dan meningkatnya tekanan urbanisasi. Lebih dari 50% wilayah DAS diperkirakan masuk dalam kategori risiko banjir sedang hingga tinggi. Temuan ini menegaskan pentingnya perencanaan penggunaan lahan yang adaptif secara spasial serta kebijakan mitigasi banjir berbasis wilayah DAS. Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini juga dapat diterapkan secara luas untuk pengurangan risiko bencana di DAS lain yang menghadapi tekanan urbanisasi serupa.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, N., Thompson, S., & Glaser, M. (2020). Blue-green farming in the era of climate change: Evidence from flood-prone coastal areas of Bangladesh. *Aquaculture Economics & Management*, 24(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/13657305.2019.1670558>
- Chen, Y., Li, Z., & Wang, H. (2024). Land use change impacts on flood risk under climate change scenarios. *Journal of Hydrology*, 634. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130492>
- Conservation, U. S. D. of A. – N. R. (2004). *National Engineering Handbook Part 630: Hydrology*. U.S. Department of Agriculture.
- Gao, L., Sun, Y., & Zhang, Q. (2024). Integrating remote sensing and hydrological models for flood risk mapping in rapidly urbanizing basins. *Science of the Total Environment*, 907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.167891>
- Hussain, M., Wu, M., Tang, Y., Zhang, J., & Al-Ghamdi, A. A. (2023). Land use change and its hydrological impacts under future scenarios: A review. *Environmental Research*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114574>
- Irawan, C., Putra, F., & Sutopo, W. (2023). Forest cover change and its influence on flood dynamics in tropical catchments. *Ecological Indicators*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110236>
- Irawan, T., Suryadi, F. X., & Kartodihardjo, H. (2023). Effects of forest cover change on flood characteristics in the Upper Citarum Watershed. *Jurnal Manajemen Hutan Tropika*, 29(2), 153–165. <https://doi.org/10.7226/jtfm.29.2.153>
- Kopacz, P., Wójcik, R., & Kulesza, K. (2021). Influence of land cover change on hydrological response in small watersheds. *Water*, 13(12), 1643. <https://doi.org/10.3390/w13121643>
- Li, R., & Yang, G. (2007). Influence of land use/cover change on storm runoff—A case study of Xitiaoxi River Basin. *Chinese Geographical Science*, 17(4), 349–356. <https://doi.org/10.1007/s11769-007-0349-6>

- Liu, F., Wang, J., & Zhao, Y. (2025). Modelling urban flood hazards under combined land use and climate change impacts. *Urban Climate*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.101656>
- Ma, Y., Guo, H., & Liu, X. (2025). Multi-scenario flood risk assessment using CA-ANN and SWAT models in watershed management. *Environmental Modelling & Software*, 172. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.105819>
- Nahib, I., Prasetyo, L. B., & Suryadi, I. (2023). Flood hazard mapping in tropical river basins using multi-source remote sensing data. *Remote Sensing*, 15(5), 1223. <https://doi.org/10.3390/rs15051223>
- Oliveira, R., Santos, M., & Cruz, C. (2024). Extreme rainfall and land cover changes: Impacts on flood hazard in river basins. *Catena*, 234. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2024.107524>
- Rahman, M. S., Alam, J. B., & Ahmed, S. (2024). Spatio-temporal modelling of land cover change impacts on watershed hydrology. *Sustainability*, 16(2), 789. <https://doi.org/10.3390/su16020789>
- Rizaldi, M., & Kure, S. (2025). Projected hydrological changes in the Citarum Basin under climate and land use change scenarios. *Journal of Hydrology*, 637. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.130633>
- Singh, A., Kumar, S., & Sharma, R. (2025). Integrating CA-ANN with hydrological models for flood risk prediction. *Journal of Environmental Management*, 359. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.120493>
- Yulianto, F., Purnaweni, H., & Hartono, D. M. (2020). Spatial-temporal dynamics of land use and flood hazard mapping in the upstream Citarum watershed. *Quaestiones Geographicae*, 39(1), 125–146. <https://doi.org/10.2478/quageo-2020-0010>
- Zhang, Y., Liu, C., & Huang, X. (2024). Land use change and flood risk: Insights from global case studies. *Science of the Total Environment*, 902. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.1659>