



**ANALISIS DAMPAK HIDROLOGI PERUBAHAN TUTUPAN
LAHAN BERDASARKAN RENCANA TATA RUANG WILAYAH:
STUDI KASUS DAS SAMBONG KABUPATEN BATANG**

Mustofa Fajar Nugraha^{1,2*}, Reza Januar Hidayat², Retno Ajeng Mega Indriyani³

¹Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Batang

²Magister Pengelolaan Sumber Daya Air, Institut Teknologi Bandung

¹mustofa.fn@gmail.com*, ²rezajanuar7@gmail.com, ³retnoajeng41@gmail.com

ABSTRAK

Banjir merupakan bencana yang paling sering terjadi di Indonesia, khususnya di Jawa Tengah, akibat pertumbuhan kota dan perubahan tata guna lahan. Penelitian ini menerapkan simulasi HEC-HMS kontinu untuk menilai dampak rencana tata ruang wilayah (RTRW) terhadap dinamika limpasan di DAS Sambong, Kabupaten Batang. Analisis membandingkan tutupan lahan tahun 2017 dan 2023 dengan proyeksi pola ruang RTRW 2019–2039, menggunakan data curah hujan 2014–2023. Kalibrasi dan validasi menunjukkan kinerja model yang baik (NSE 0.553–0.655; R^2 0.65–0.67; PBIAS -5.81–3.47; RSR 0.668–0.587). Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan area terbangun menaikkan debit puncak dan volume limpasan, serta meningkatkan debit tinggi (Q5%, Q10%, Q20%), sementara debit rendah (Q80%, Q90%, Q95%) menurun. Kondisi ini mengindikasikan risiko banjir yang lebih besar pada musim hujan dan kerentanan kekeringan lebih tinggi pada musim kemarau. Sub-DAS S5 dan S7 mengalami kenaikan area terbangun terbesar—78,57% dan 213,24%—dengan peningkatan debit puncak masing-masing 4,20% dan 27,37%. Temuan tersebut menunjukkan bahwa implementasi RTRW saat ini berpotensi meningkatkan bahaya banjir dan mengurangi ketersediaan air, sehingga diperlukan pengendalian tata guna lahan dan pengelolaan DAS terpadu untuk mendukung pembangunan berkelanjutan di Kabupaten Batang.

Kata Kunci : dinamika limpasan, rencana tata ruang wilayah, model hidrologi kontinu, kebijakan tata guna lahan

ABSTRACT

Flooding is one of the most frequent disasters in Indonesia, particularly in Central Java, driven by rapid urban growth and land-use change. This study applies continuous HEC-HMS simulations to assess the impact of the regional spatial plan (RTRW) on runoff dynamics in the Sambong Watershed, Batang Regency. The analysis compares land-cover data from 2017 and 2023 with the projected spatial pattern of RTRW 2019–2039, using rainfall data from 2014 to 2023. Model calibration and validation show good performance (NSE 0.553–0.655; R^2 0.65–0.67; PBIAS -5.81–3.47; RSR 0.668–0.587). The results indicate that increasing built-up areas raises peak discharge and runoff volume, and increases high-flow conditions (Q5%, Q10%, Q20%), while reducing low flows (Q80%, Q90%, Q95%). This pattern suggests a higher flood risk during the rainy season and greater drought vulnerability during dry periods. Sub-watersheds S5 and S7 show the most significant increases in built-up areas—78.57% and 213.24%—with corresponding peak discharge increases of 4.20% and 27.37%. These findings demonstrate that the current RTRW may intensify flood hazards and reduce water availability, highlighting the need for stronger land-use control and integrated watershed management to support sustainable development in Batang Regency.

Keywords: runoff dynamics, spatial plan, continuous hydrologic model, land use policy



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

1. Pendahuluan

Banjir merupakan bencana yang paling sering terjadi di Indonesia, selain gempa bumi [1]. Jawa Tengah di mana Kabupaten Batang berada, merupakan provinsi dengan indeks bahaya banjir (*Flood Hazard Indeks*) tertinggi kedua setelah Jakarta. Faktor penyebabnya antara lain hujan lebat yang terkonsentrasi dan pertumbuhan daerah perkotaan [2]. Kabupaten Batang diperkirakan akan mengalami pertumbuhan daerah perkotaan seluas 8379.28 hektar dan daerah industri seluas 3640.87 hektar pada 2039 berdasarkan Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) 2019 – 2039, karena adanya pengembangan Kawasan Industri yang salah satunya adalah Kawasan Industri Terpadu Batang yang saat ini dikenal dengan Industropolis Batang [3].

Perubahan tutupan lahan dan iklim memberikan dampak yang besar terhadap kualitas dan kuantitas sumber daya air, seperti pola aliran air, kejadian aliran ekstrem, dan ketersediaan air secara keseluruhan. Industrialisasi dan pertumbuhan perkotaan yang cepat dapat mengurangi kapasitas resapan tanah, sehingga dapat memicu kejadian hidrologi ekstrem seperti banjir dan kekeringan [4]. Kejadian banjir di Kabupaten Batang meningkat dari tahun ke tahun, kejadian terbaru adalah banjir bandang yang terjadi pada awal tahun 2025 yang merendam 10 desa dan merusak berbagai fasilitas publik seperti jembatan dan jalan serta permukiman [5]. Kawasan perkotaan di berbagai belahan dunia mengalami peningkatan risiko bencana akibat air. Sehingga upaya untuk meningkatkan dan mempercepat pembangunan ketahanan terhadap banjir harus diprioritaskan, terutama di wilayah dengan pertumbuhan cepat [6]. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan mengendalikan perubahan tutupan lahan melalui peraturan RTRW. Namun beberapa studi menunjukkan bahwa RTRW di berbagai wilayah Indonesia belum sepenuhnya

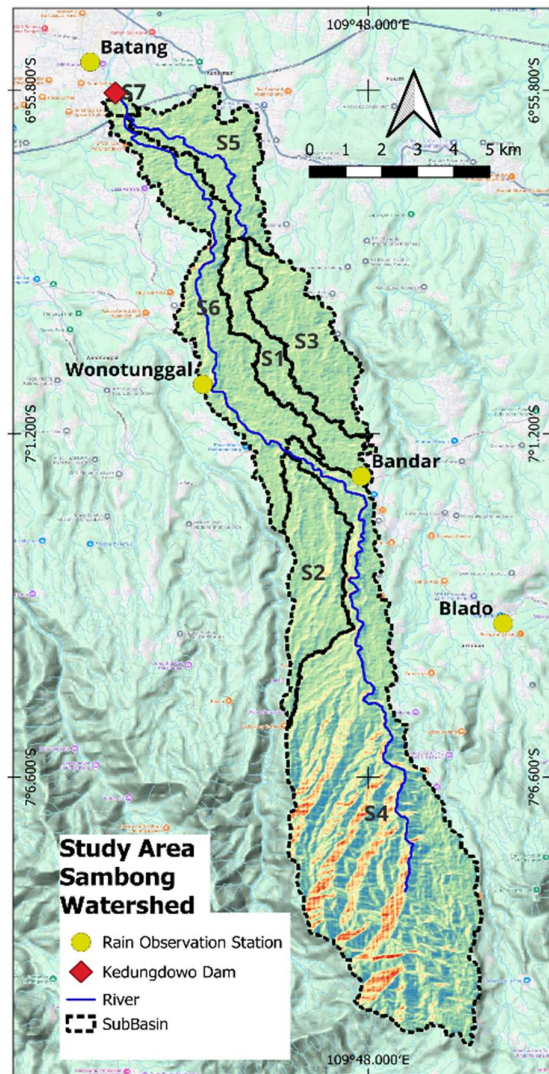
mendukung pembangunan yang berkelanjutan dengan memperhatikan kelestarian sumber daya air [7], [8], [9], [10]. Kebijakan tata guna lahan dapat memberikan efek positif maupun negatif terhadap lingkungan. Jika dibandingkan antara pengelolaan lahan dan kebijakan iklim, kebijakan penggunaan lahan biasanya lebih berperan dalam mengubah kondisi hidrologi [11]. Maka dari itu penting untuk menganalisis bagaimana pengaruh perubahan tutupan lahan dan kebijakannya terhadap dinamika hidrologi di suatu daerah aliran sungai (DAS) untuk mengidentifikasi potensi bencana akibat air seperti banjir dan kekeringan.

Studi ini mengevaluasi RTRW Kabupaten Batang tahun 2019 – 2039 yang telah ada melalui analisis pengaruh tutupan lahannya terhadap dinamika debit limpasan di DAS Sambong. Tutupan lahan berdasarkan kebijakan RTRW digunakan sebagai proyeksi masa depan dibandingkan dengan kondisi eksisting untuk mengetahui bagaimana respons DAS terhadap perubahan tutupan lahan yang terjadi. Evaluasi respons menggunakan data historis dan proyeksi sangat dibutuhkan agar pemodelan DAS secara langsung dapat lebih efektif. Pemahaman yang mendalam terhadap catatan hidrologi historis juga sangat penting untuk memprediksi karakteristik hidrologi di masa depan dengan lebih akurat [12]. Studi ini menggunakan model HEC-HMS *continuous* (kontinu) untuk menyimulasikan debit limpasan (*runoff*) yang terjadi di DAS Sambong dengan menggunakan data hujan harian berdasarkan tutupan lahan historis dan RTRW. Pemodelan hidrologi kontinu sangat penting untuk pengelolaan sumber daya air jangka panjang, penilaian dampak perubahan iklim, dan pemahaman efek perubahan tutupan lahan [13]. Hasil dari studi ini diharapkan dapat memberikan pandangan dan bahan pertimbangan tambahan untuk pemangku kebijakan dalam penyusunan

RTRW sehingga pengambilan kebijakan lebih memperhatikan dampak lingkungan dan mendukung pembangunan yang berkelanjutan melalui pelestarian sumber daya air.

2. Metode Penelitian

DAS Sambong berada di Kabupaten Batang Provinsi Jawa Tengah yang mencakup 5 wilayah kecamatan dari hulu hingga hilir, yaitu Kecamatan Blado, Bandar, Wonotunggal, Kandeman dan Batang. Kecamatan Batang menjadi wilayah dengan kejadian banjir paling tinggi setiap tahunnya. DAS ini terletak di antara $6^{\circ}55'44.626''$ sampai $7^{\circ}10'47.261''$ LS (lintang selatan) dan $109^{\circ}43'57.214''$ sampai $109^{\circ}49'45.279''$ BT (bujur timur) (lihat Gambar 1). Titik pengukuran aliran debit air terdapat pada bendung Kedungdowo Kramat di $6^{\circ}55'50.412''$ LS dan $109^{\circ}44'11.251''$ BT. Area studi DAS Sambong memiliki luas 92.40 km^2 dengan elevasi tertinggi pada 2109.39 meter dan elevasi terendah pada 16 meter. Kemiringan lahan di area studi berkisar antara 0.046% hingga 47.78%.



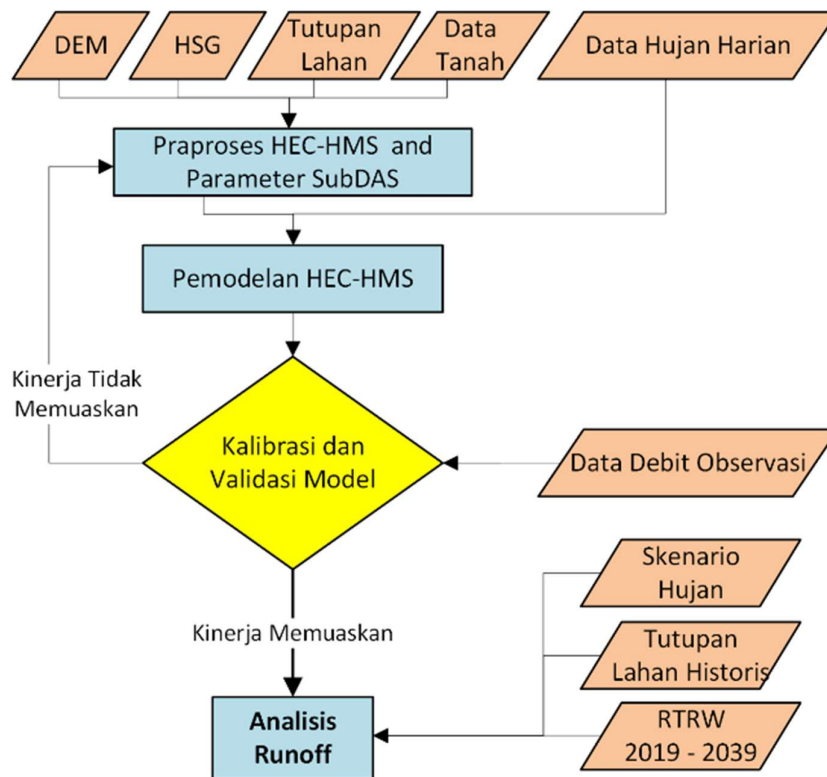
Gambar 1. Area Studi

2.1. Metode

Studi ini mensimulasikan debit limpasan langsung untuk tutupan lahan historis tahun 2017 dan 2023 serta tutupan lahan berdasarkan RTRW Kabupaten Batang tahun 2019 – 2039. Hasil simulasi HEC-HMS yang dievaluasi berupa debit puncak, volume limpasan, debit tinggi (Q5%, Q10%, Q20%) dan debit rendah (Q80%, Q90%, Q95%). Untuk mengevaluasi debit limpasan dari masing-masing tutupan lahan digunakan curah hujan yang sama yaitu data hujan selama 10 tahun terakhir dari data yang tersedia (2014 - 2023). Pendekatan ini telah digunakan dalam studi-studi terdahulu [14], [15], [16], [17]. Dalam periode 10 tahun

tersebut, hujan harian tertinggi terjadi pada tahun 2014 dan 2021 dengan tinggi hujan 152.21 mm dan 155.82 serta hujan tahunan tertinggi terjadi pada tahun 2021 dan 2022

dengan hujan tahunan 4124.07 mm dan 4143.83 mm. Gambar 2 menunjukkan data dan langkah-langkah utama yang digunakan dalam studi ini.



Gambar 2 Metodologi Studi

2.2. Data

Penelitian ini memanfaatkan data curah hujan harian dari 4 stasiun pengamatan, yaitu Blado, Bandar, Wonotunggal, dan Batang yang diperoleh dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Batang. Untuk keperluan kalibrasi debit aliran digunakan data debit harian dari bendungan Kedungdowo Kramat yang dilengkapi dengan stasiun AWLR (*Automatic Water Level Recorder*) yang dikombinasikan dengan pengamatan *peilschall* (papan duga air), data ini bersumber dari Balai Pengelolaan Sumber Daya Air Pemali Comal di bawah Dinas Pekerjaan Umum dan Sumber Daya Air Provinsi Jawa Tengah. Data suhu harian yang bersumber dari data satelit NASA juga digunakan untuk mendukung pemodelan

evapotranspirasi dalam HEC-HMS, yang dapat diakses melalui *website* (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Seluruh data hidrologi dan iklim diambil pada periode waktu yang sama dengan data yang dipakai dalam model hidrologi ini.

Informasi terkait tanah seperti data elevasi, jenis tanah, *hydrological soil group* (HSG) dan tutupan lahan juga diperlukan untuk mengestimasi parameter hidrologi di DAS Sambong. Data elevasi didapatkan dari DEMNAS yang dikeluarkan oleh Badan Informasi Geografi Nasional dengan resolusi 0.27 *arcseconds* (<https://tanahair.indonesia.go.id/portal-web/unduh/demnas>). Data jenis tanah diperoleh dari *Harmonized World Soil*

Database versi 2.0 dari FAO tahun 2023. Sedangkan Peta HSG menggunakan *the Global Hydrologic Soil Groups (HYSOGs250m) for Curve Number-Based Runoff Modeling* [18] (https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=1566). Kemudian untuk data tutupan lahan historis menggunakan peta yang bersumber dari *the Sentinel-2 10m land use/land cover time series of the world, produced by Impact Observatory and Esri* [19] (<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=cfc7609de5f478eb7666240902d4d3d>). Tutupan lahan historis yang digunakan adalah tutupan lahan tahun 2017, 2020, dan 2023. Tutupan lahan berdasarkan tata ruang didapatkan berdasarkan Peraturan Daerah Nomor 12 Tahun 2019 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Batang Tahun 2019-2039 yang *shape file* (.shp) petanya didapatkan dari Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kabupaten Batang.

2.2. Model HEC-HMS

HEC-HMS versi 4.12 digunakan untuk mengevaluasi dampak tutupan lahan historis dan kebijakan pola ruang RTRW. Model semi terdistribusi diterapkan dengan membagi DAS menjadi beberapa sub-DAS. Persebaran spasial perubahan tutupan lahan dapat memengaruhi respons lahan terhadap dinamika limpasan dibandingkan dengan model *lumped* (digabungkan). Pada model terdistribusi debit puncak dan volume limpasan dipengaruhi oleh lokasi terjadinya perubahan tutupan lahan. Luas dan posisi permukaan ke arah air menjadi faktor penting dalam perhitungan debit puncak dan volume limpasan [20].

Setelah mengumpulkan data karakteristik DAS seperti batas, luas, kemiringan dan panjang sungai, nilai *curve number* (CN) dihitung dengan menggabungkan

karakteristik tersebut dengan tutupan lahan dan HSG seperti pada Tabel 1. Nilai CN ini penting untuk memperkirakan potensi limpasan hujan di dalam DAS [21]. Nilai CN ini kemudian digunakan untuk menentukan *lag time* (waktu tunda) sebagai masukan pada metode transformasi hujan unit hidrograf SCS (*Soil Conservation Service*) dalam HEC-HMS. Selanjutnya dihitung nilai CN komposit dari masing-masing sub-DAS yang kemudian digunakan untuk menghitung *lag time* dengan rumus berikut [22], [23] :

$$CN_c = \sum_{i=1}^n \frac{CN_i \times A_i}{A}$$

$$t_l = \frac{L^{0.8} (2540 - 22.86 CN_c)^{0.7}}{14104 CN_c^{0.7} S_s^{0.5}}$$

Di mana CN_c adalah CN komposit, CN_i adalah nilai CN pada sub wilayah, A_i adalah luas dari sub wilayah, A adalah luas total sub-DAS, L adalah panjang sungai (m), dan S_s adalah kemiringan rata-rata dari sub-DAS.

Tabel 1 Nilai CN dari masing-masing tutupan lahan

Tutupan Lahan	HSG C	HSG D
<i>Water</i> (Badan Air)	100	100
<i>Trees</i> (Pepohonan)	70	77
<i>Crops</i> (Pertanian)	78	81
<i>Built Area</i> (Area terbangun)	90	92
<i>Rangeland</i> (Rumput dan semak)	65	73

Dua bagian utama dalam membangun model hidrologi adalah proses pembentukan limpasan dan proses aliran. Komponen pembentukan limpasan memperkirakan total limpasan dari sub-DAS selama terjadinya hujan. Total limpasan dihitung dengan mengurangi kehilangan air, mengonversi hujan berlebih menjadi limpasan dan menambahkan aliran dasar. Parameter yang memengaruhi pembentukan limpasan terdiri dari intersepsi oleh kanopi, penyimpanan di permukaan tanah, infiltrasi, transformasi hujan berlebih serta kontribusi aliran dasar [24]. Perkiraan dampak perubahan tutupan

lahan bergantung pada nilai *lag time* oleh CN dan komponen kehilangan kelembapan tanah. Salah satu parameter yang mempengaruhi kedua faktor tersebut adalah nilai *impervious* (area kedap air) yang pada studi ini diasumsikan sama dengan nilai persentase area terbangun di masing-masing sub-DAS. Kemudian daftar-daftar parameter yang digunakan dalam model hidrologi kontinu ini dapat dilihat pada Tabel 2. Nilai awal dari parameter-parameter ini diestimasi berdasarkan kondisi karakteristik sub-DAS dengan nilai-nilai pada literatur yang sesuai [25], [26], [27], [28].

Tabel 2 Komponen Model HEC-HMS

Komponen Model	Parameter (Unit)
Simple Canopy	Initial Storage (%)
	Max Storage (mm)
	Crop Coefficient
Simple Surface	Initial Storage (%)
	Max Storage (mm)
Soil Moisture Accounting	Initial Soil (%)
	Initial GW 1 (%)
	Initial GW 2 (%)
	Max. Infiltration (mm/hour)
	Impervious (%)
	Soil Storage (mm)
	Tension Storage (mm)
	Soil Percolation (mm/hour)
	GW 1 Storage (mm)
	GW 1 Percolation (mm/hour)
	GW 1 Coefficient (hour)
	GW 2 Storage (mm)
	GW 2 Percolation (mm/hour)
	GW 2 Coefficient (hour)
Linear Reservoir Baseflow	GW 1 Initial (m ³ /s)
	GW 1 Fraction
	GW 1 Coefficient (hour)
	GW 2 Initial (m ³ /s)
	GW 2 Fraction
SCS Unit Hydrograph	GW 2 Coefficient (hour)
	Lag Time (menit)
Muskingum Routing	K (jam)
	X
	Number of subreach

Kemudian dilakukan kalibrasi dan validasi terhadap model hidrologi yang telah dibuat untuk menyesuaikan parameter dan

menilai apakah model dapat menggambarkan kondisi hidrologi DAS secara akurat. Kalibrasi model dilakukan dengan menggunakan data pada tahun 2020, yang kemudian parameternya divalidasi dengan data tahun 2023. Proses kalibrasi dan validasi ini membandingkan debit *outflow* simulasi dan observasi pada titik *outlet* bendung Kedungdowo Kramat. Kalibrasi dilakukan dengan mengombinasikan teknik otomatis dan manual hingga hasil simulasi menunjukkan kinerja yang dapat diterima. Semua parameter hidrologi dikalibrasikan kecuali 4 parameter yaitu % *impervious*, *lag time*, *canopy storage* (penyimpanan kanopi), dan *surface storage* (penyimpanan permukaan) yang mewakili kondisi tutupan lahan yang ada.

Tabel 3 Metrik Evaluasi Kinerja Model

Metrik Efisiensi Model	Evaluasi Kinerja	Kriteria
R ²	Sangat Baik	R ² ≥ 0,8
	Baik	0,8 ≥ R ² > 0,6
	Memuaskan	0,6 ≥ R ² > 0,4
	Tidak Memuaskan	0,4 ≥ R ²
NSE	Sangat Baik	NSE ≥ 0,75
	Baik	0,75 ≥ NSE > 0,65
	Memuaskan	0,65 ≥ NSE > 0,5
	Tidak Memuaskan	0,5 ≥ NSE
PBIAS	Sangat Baik	PBIAS < 10
	Baik	10 ≤ PBIAS < 15
	Memuaskan	15 ≤ PBIAS < 25
	Tidak Memuaskan	PBIAS ≥ 25
RSR	Sangat Baik	RSR ≤ 0,5
	Baik	0,5 < RSR ≤ 0,6
	Memuaskan	0,6 < RSR ≤ 0,7
	Tidak Memuaskan	RSR > 0,7

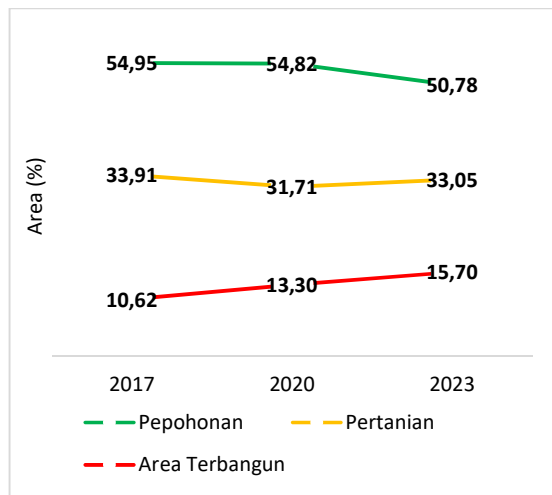
Untuk menilai keandalan *output* simulasi seperti debit dan volume aliran perlu dilakukan evaluasi terhadap performa model. Evaluasi ini bisa dilakukan dengan cara

membandingkan hasil simulasi debit dan volume aliran secara visual serta menghitung parameter statistik [29]. Empat metrik statistik yang digunakan untuk mengukur kinerja model adalah *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), *Ratio of The Root Meas Square Error to the Standard Deviation* (RSR), *Percent Bias* (PBIAS) dan Koefisien Determinasi (R2) dengan kriteria dari masing-masing metrik seperti pada Tabel 3 [30], [31].

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Tutupan Lahan dan Pola Ruang di DAS Sambong

Tutupan lahan yang digunakan dalam penelitian ini bersumber dari Sentinel 2 yang terdiri dari 5 kategori lahan utama yaitu *Water* (Badan Air), *Trees* (Pepohonan), *Crops* (Pertanian), *Built Area* (Area Terbangun) dan *Rangeland* (Rumput dan Semak), serta satu tambahan kategori *Clouds* (Awan) yang berarti pada saat klasifikasi tutupan lahan dilakukan citra satelit tertutup oleh awan. Persentase *clouds* ini berkisar antara 0.06% hingga 0.40% yang berarti tidak signifikan sehingga data tutupan lahan masih dapat digunakan.

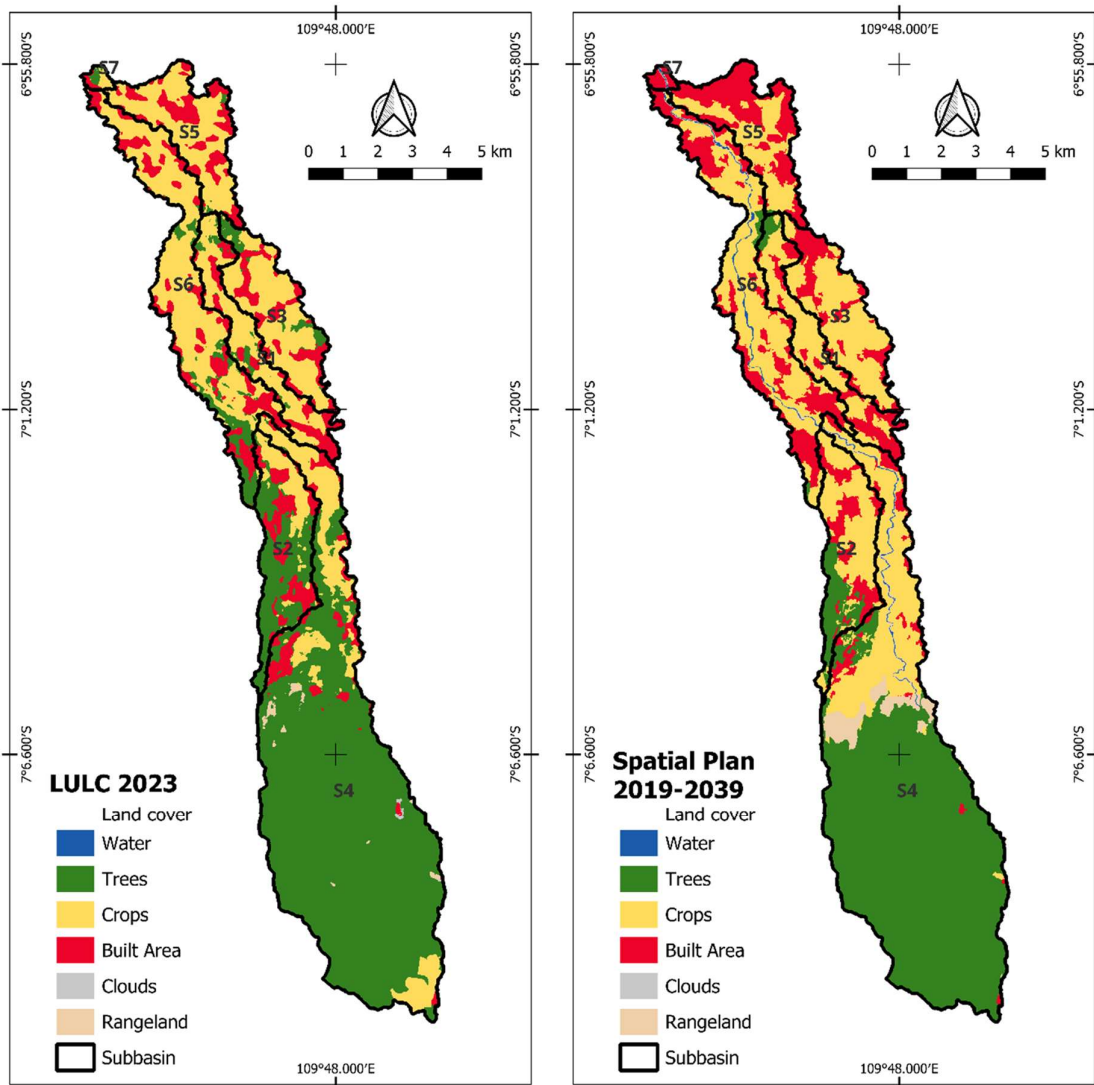


Gambar 3 Grafik perubahan luas tutupan lahan tahun 2017 – 2023

Gambar 3 menunjukkan bahwa area terbangun meningkat secara konsisten dari tahun ke tahun dengan diikuti fluktuasi perubahan area pepohonan dan lahan pertanian. Area terbangun meningkat 25.20% dalam periode 2017 hingga 2020 dan 18.01% dari 2020 hingga 2023 dengan rata-rata peningkatan 3.60% per tahun. Pertumbuhan area terbangun didorong oleh meningkatnya kebutuhan hunian. Sedangkan fluktuasi area pepohonan dan pertanian terjadi karena banyak kasus di mana lahan ditamani pohon produktif yang setelah panen kemudian ditanami tanaman pertanian, begitu juga sebaliknya. Selain itu sebagian lahan pohon dan pertanian juga dikonversi menjadi area terbangun. Kemudian untuk melihat perbandingan pola ruang RTRW dengan tutupan lahan yang lain maka dilakukan reklasifikasi kelas pola ruang disesuaikan dengan kelas tutupan lahan Sentinel 2 seperti pada Tabel 4.

Tabel 4 Reklasifikasi tutupan lahan pola ruang RTRW terhadap klasifikasi tutupan lahan Sentinel 2

Pola Ruang RTRW 2039	Nilai raster	Klasifikasi Sentinel 2
Sungai	1	<i>Water</i> (Badan Air)
Kawasan Hutan Produksi Terbatas Kawasan Hutan Produksi Tetap Kawasan Hutan Rakyat Kawasan Perkebunan	2	<i>Trees</i> (Pepohonan)
Kawasan Tanaman Pangan Kawasan Hortikultura	5	<i>Crops</i> (Pertanian)
Kawasan Permukiman Pedesaan Kawasan Permukiman Perkotaan Kawasan Peruntukan Industri	7	<i>Built Area</i> (Area terbangun)
Kawasan Rawan Bencana Gerakan Tanah Sempadan Sungai	11	<i>Rangeland</i> (Rumput dan semak)



Gambar 4 Perbandingan tutupan lahan tahun 2023 dan tutupan lahan reklasifikasi RTR 2019 - 2039

Tabel 5 Perbandingan luas tutupan lahan area terbangun pada masing-masing sub-DAS tahun 2023 dengan RTRW 2019 - 2039

Sub-DAS	2023	RTRW 2039 (ha)	Δ RTRW-2023 (ha)	% Perubahan
S1	180.89	203.58	22.69	12.54
S2	212.53	206.31	-6.22	-2.92
S3	197.93	241.94	45.01	22.74
S4	215.94	171.53	-44.41	-20.57
S5	249.00	444.64	195.64	78.57
S6	377.66	528.77	151.12	40.02
S7	12.73	39.86	27.14	213.24

Dilihat dari perbandingan distribusi tutupan lahan berdasarkan sub-DAS pada Tabel 5 dan Gambar 4, ditemukan potensi pelanggaran tata ruang terutama dengan kategori area terbangun di beberapa sub-DAS. Sub-DAS 2 dan Sub-DAS 4 memiliki luas

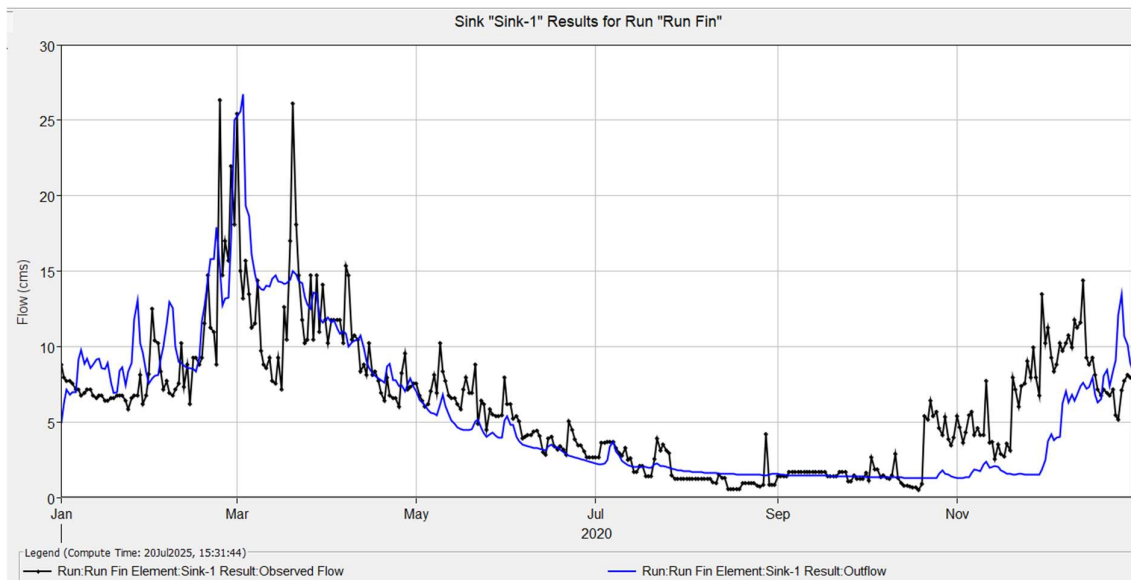
area terbangun yang lebih luas pada 2023 dibandingkan dengan rencana tata ruang wilayah sebesar 2.92% dan 20.57% lebih besar dari aturan pola ruang yang telah ditetapkan. Oleh karena itu perlu peningkatan pengawasan, inventarisasi serta tindak lanjut terhadap kemungkinan pelanggaran yang terjadi sehingga arah penggunaan ruang tetap sesuai dengan yang telah diatur dalam peraturan daerah. Kemudian jika dilihat dari tren perubahan tutupan lahan yang terjadi dari historis hingga rencana pola ruang didapatkan bahwa area terbangun terus meningkat, hasil ini sejalan dengan studi tentang prediksi perubahan tutupan lahan di Indonesia yang

menunjukkan bahwa area terbangun diperkirakan terus meningkat dengan penurunan pada area pepohonan dan pertanian [32], [33].

3.2. Kalibrasi dan Validasi Model

Kinerja statistik dari model terkalibrasi didapatkan NSE 0.553, PBIAS -5.81%, R^2 0.65 dan RSR 0.668 dengan grafik perbandingan debit simulasi dan observasi seperti pada Gambar 5. Nilai NSE sebesar 0.553 mengindikasikan bahwa model mampu merepresentasikan pola debit harian secara

umum, meskipun masih terdapat deviasi yang cukup signifikan antara hasil simulasi dan data observasi. Nilai PBIAS sebesar -5.81% menunjukkan bahwa model cenderung over-estimasi dalam memodelkan debit, namun nilai ini masih berada dalam kategori sangat baik. Koefisien determinasi R^2 sebesar 0.65 memperlihatkan bahwa sekitar 65% variasi debit observasi dapat dijelaskan oleh hasil simulasi model yang masuk dalam kategori baik. Sementara RSR sebesar 0.668 termasuk dalam kategori cukup menandakan bahwa tingkat kesalahan prediksi model masih dalam batas yang dapat diterima.



Gambar 5 Perbandingan debit hasil simulasi dan observasi pada proses kalibrasi model

Selain evaluasi kinerja statistik model, dilakukan juga evaluasi pada akurasi model dalam menyimulasikan debit tinggi atau debit puncak dan volume limpasan total. Model masih cukup akurat dalam menyimulasikan debit puncak dengan eror hanya sebesar 1.66% (simulasi 26.31 m^3/s dibandingkan observasi 26.748 m^3/s). Hal ini menunjukkan model cenderung over-estimasi debit puncak, namun sudah mampu menyimulasikan debit-debit tinggi meskipun dengan nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan debit observasi. Untuk volume limpasan, model menunjukkan

hasil dengan eror -5.76% (simulasi 191005.78 ribu m^3 dibandingkan observasi 180009.66 ribu m^3). Untuk keperluan validasi dan pemodelan lebih lanjut untuk skenario model yang lain, digunakan nilai parameter yang sudah terkalibrasi seperti pada Tabel 6.

Validasi model HEC-HMS dilakukan dengan menyimulasikan hujan dan tutupan lahan tahun 2023 menggunakan model HEC-HMS dengan parameter yang sudah terkalibrasi. Hasil validasi model HEC-HMS menunjukkan kinerja yang baik dengan nilai

NSE 0.655, PBIAS 3.47, R^2 0.67, dan RSR 0.587 dengan grafik debit seperti pada Gambar 6. Dibandingkan dengan hasil kalibrasi sebelumnya (NSE 0.553, PBIAS -5.81, R^2 0.65, RSR 0.668), kinerja model pada tahap validasi mengalami peningkatan di semua kriteria. Nilai NSE dan R^2 yang lebih tinggi pada validasi menunjukkan kecocokan pola debit simulasi dengan observasi semakin baik, sementara nilai RSR yang lebih rendah

menandakan tingkat kesalahan prediksi model juga menurun. PBIAS masih dalam kategori sangat baik, pada proses kalibrasi model over-estimasi terhadap debit observasi sedangkan hasil validasi menunjukkan *under-estimasi*. Kemudian eror debit puncak meningkat dari 1,66% saat kalibrasi menjadi -29.50% saat validasi. Sementara itu eror volume limpasan berkurang dari -5.76% pada kalibrasi menjadi 3.80% pada validasi.

Tabel 6 Parameter model HEC-HMS terkalibrasi

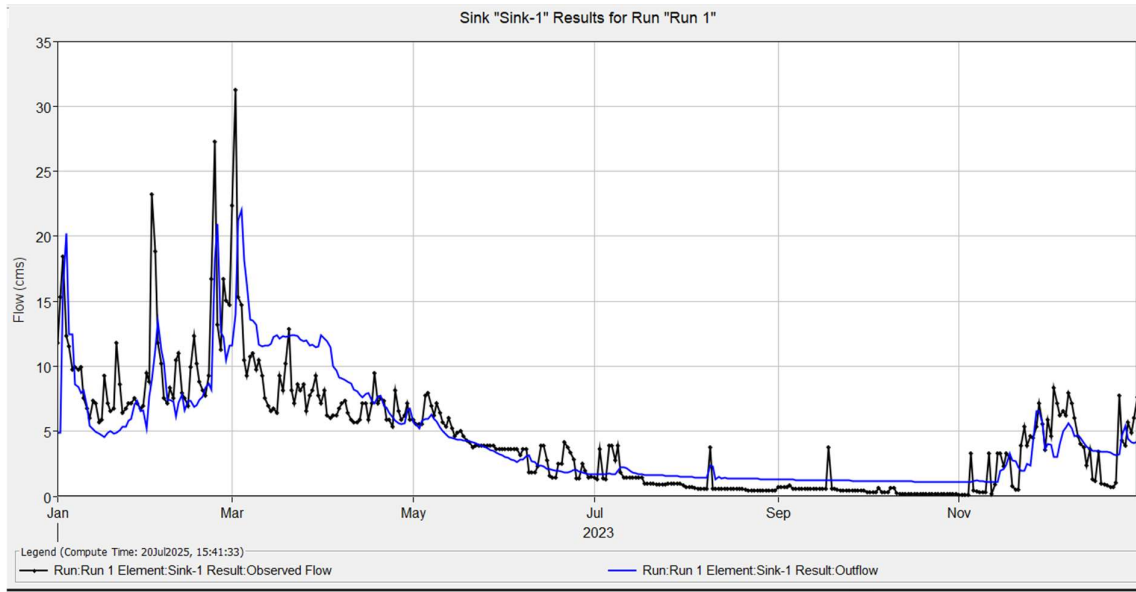
Komponen Model	Parameter (Unit)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	
Simple Canopy	Initial Storage (%)	25	25	25	25	25	25	25	
	Crop Coefficient	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	0.78	
Simple Surface	Initial Storage (%)	15	15	15	15	15	15	15	
	Initial Soil (%)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
	Initial GW 1	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	5.93	
	Initial GW 2	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	3.45	
	Max. Infiltration (mm/hour)	3.02	11.58	3.02	11.58	3.02	3.02	3.02	
	Impervious (%)	483.08	471.89	483.08	471.89	483.08	483.08	483.08	
	Soil Storage (mm)	10.39	8.70	10.39	8.70	10.39	10.39	10.39	
	Tension Storage (mm)	6.24	23.90	6.24	23.90	6.24	6.24	6.24	
	Soil Percolation (mm/hour)	442.74	379.49	442.74	379.49	442.74	442.74	442.74	
	GW 1 Storage (mm)	3.28	12.58	3.28	12.58	3.28	3.28	3.28	
	GW 1 Percolation (mm/hour)	172.26	129.97	165.39	235.53	169.44	239.04	41.86	
	GW 1 Coefficient (hour)	837.63	818.233	837.63	818.23	837.63	837.63	837.63	
	GW 2 Storage (mm)	25	25	25	25	25	25	25	
	GW 2 Percolation (mm/hour)	0.067	0.256	0.067	0.256	0.067	0.067	0.067	
	GW 2 Coefficient (hour)	3920.49	2958.05	3764.12	5360.40	3856.31	5440.51	952.65	
	Soil Moisture Accounting Loss	GW 1 Initial (m^3/s)	0.771	0.684	0.654	0.936	0.537	0.948	0.210
		GW 1 Fraction	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
GW 1 Coefficient (hour)		172.26	129.97	165.39	235.53	169.44	239.04	41.86	
GW 2 Initial (m^3/s)		0.026	0.023	0.022	0.031	0.018	0.032	0.007	
GW 2 Fraction		0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	
GW 2 Coefficient (hour)		3920.49	2958.05	3764.12	5360.40	3856.31	5440.51	952.65	
Linear Reservoir Baseflow		R1	R2	R3					
	K (hour)	5.27	82.80	43.81					
	x	0.21	0.21	0.21					
	Number of Subreaches	2	1	1					

Hasil validasi ini menegaskan bahwa model HEC-HMS yang digunakan cukup andal dalam menyimulasikan debit di DAS Sambong. Berdasarkan studi-studi terdahulu,

nilai NSE di atas 0.5 dianggap memuaskan, yang menunjukkan tingkat akurasi model yang dapat diterima dalam menyimulasikan aliran yang tercatat. Nilai R^2 minimal 0.6

diklasifikasikan sebagai baik yang menandakan adanya korelasi yang kuat antara data simulasi dan pengamatan. PBIAS yang mengukur kecenderungan *under-estimation* dan *over-estimation* dianggap memuaskan jika berada dalam rentang $\pm 25\%$ untuk pemodelan aliran. Kemudian RSR harus kurang dari atau

sama dengan 0.7 yang menunjukkan kinerja model yang memadai. Model yang memenuhi atau melampaui standar ini umumnya dianggap cukup andal untuk aplikasi hidrologi umum seperti prakiraan banjir dan pengelolaan sumber daya air [30], [34], [35], [36], [37].



Gambar 6 Perbandingan debit hasil simulasi dan observasi pada proses validasi model

3.3. Dampak RTRW terhadap Dinamika Limpasan (*Runoff*)

Perubahan tutupan lahan merupakan salah satu faktor utama yang memengaruhi karakteristik hidrologi suatu DAS. Dinamika penggunaan lahan dan kebijakannya, khususnya alih fungsi lahan pertanian dan hutan menjadi area terbangun dapat berdampak langsung pada pola aliran permukaan, debit puncak, dan volume limpasan. Pemahaman terhadap hubungan antara perubahan tutupan lahan dan respons hidrologi sangat penting dalam upaya pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan serta perencanaan tata ruang wilayah.

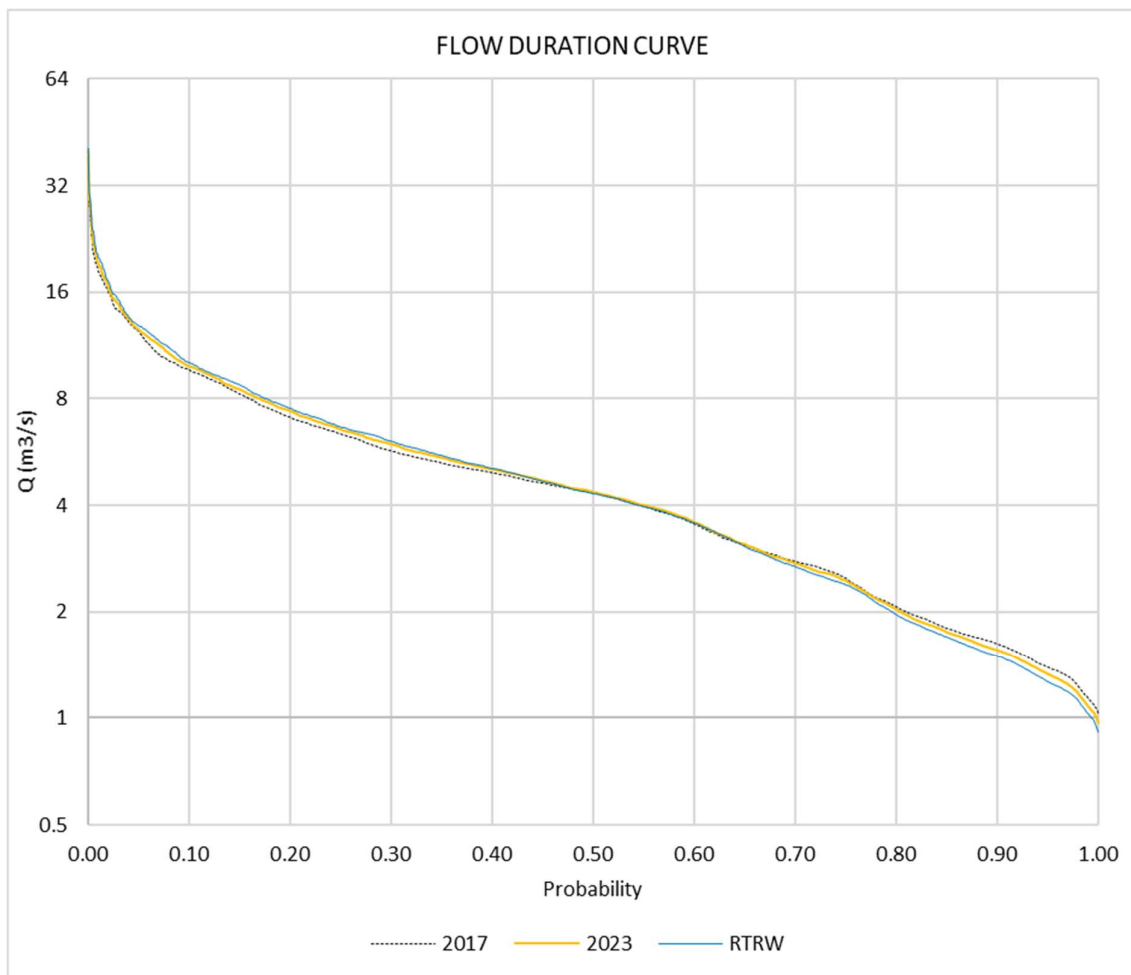
Tabel 7 Persentil debit limpasan dan persentase luas bangunan dari masing-masing skenario 2017, 2023, dan RTRW (m^3/s)

	2017	2023	RTRW
% Area terbangun	10.61	15.67	19.84
Q5%	12.394	12.531	12.861
Q10%	9.660	9.892	10.125
Q20%	7.093	7.399	7.525
Q30%	5.703	5.959	6.077
Q40%	4.949	5.065	5.088
Q50%	4.332	4.363	4.324
Q60%	3.545	3.586	3.572
Q70%	2.784	2.745	2.692
Q80%	2.070	2.032	1.967
Q90%	1.625	1.558	1.496
Q95%	1.392	1.332	1.266

Seperti yang ditampilkan pada grafik FDC (Gambar 7) terjadi kenaikan pada debit tinggi (Q5%, Q10%, dan Q20%) mengikuti kenaikan area terbangun, sedangkan pada debit rendah (Q80%, Q90% dan Q95%)

terjadi penurunan. Hal ini terjadi karena perubahan tutupan lahan (peningkatan area terbangun dan penurunan area vegetasi) dapat meningkatkan debit limpasan akibat berkurangnya infiltrasi, yang juga menyebabkan penurunan *baseflow* [16], [17], [38]. Sehingga saat terjadi hujan, debit limpasan langsung semakin besar, sedangkan saat musim kering aliran dasar menjadi semakin kecil karena cadangan air tanah berkurang. Tabel 7 menunjukkan debit tinggi pada skenario RTRW lebih tinggi daripada skenario 2023 yang berarti potensi banjir meningkat pada skenario RTRW dibandingkan dengan skenario 2023.

Kemudian pada debit rendah sebagai debit perencanaan penyediaan air seperti irigasi dan air minum, skenario RTRW memiliki nilai yang lebih kecil dibandingkan skenario 2023. Kondisi ini menunjukkan bahwa potensi kekeringan meningkat pada skenario RTRW. Maka berdasarkan hasil ini, pola ruang RTRW mengurangi keandalan DAS dalam meregulasi perubahan debit akibat perubahan tutupan lahan. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai dampak perubahan ini terhadap risiko kejadian banjir dan kekeringan di DAS Sambong sebagai bahan pertimbangan pengambilan kebijakan di masa depan.



Gambar 7 Grafik probabilitas debit hasil simulasi skenario tutupan lahan 2017, 2023 dan RTRW

Analisis respons hidrologi di tingkat sub-DAS berdasarkan skenario tutupan lahan

tahun 2023 dan RTRW menunjukkan variasi yang signifikan antar sub-DAS (Tabel 8).

Peningkatan area terbangun pada proyeksi RTRW umumnya diikuti oleh kenaikan debit puncak dan volume limpasan, meskipun sensitivitas tiap sub-DAS berbeda-beda. Ketika area terbangun bertambah debit akan naik, begitu pun sebaliknya saat area terbangun berkurang debit juga berkurang. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan tutupan lahan di sub-DAS tersebut sangat efektif meningkatkan limpasan permukaan. Perubahan signifikan terjadi pada S7 dengan kenaikan Q Peak sebesar 27.37% yang diikuti kenaikan volume limpasan sebesar 6.90%. Kemudian pada S2 dan S4 jika kondisi tutupan lahan dikembalikan sesuai dengan rencana tata ruang maka debit puncaknya akan berkurang sebanyak 2.12% dan 0.94%.

Sub-DAS lain meski terjadi peningkatan signifikan pada area terbangun, namun perubahan debit puncak dan volume limpasan masih di bawah 10% yang mana nilai ini tidak signifikan [39]. Ini menandakan adanya faktor lokal lain seperti karakteristik tanah, topografi dan lainnya yang membatasi respons hidrologi terhadap perubahan tutupan lahan. Respons hidrologi di tingkat sub-DAS sangat dipengaruhi oleh area terbangun, namun besarnya pengaruh sangat tergantung pada karakteristik lokal masing-masing sub-DAS. Pengelolaan tata ruang berbasis pada karakteristik dan sensitivitas hidrologi lokal sangat penting untuk mengoptimalkan pengendalian limpasan permukaan dan debit puncak di masa mendatang.

Tabel 8 Perbandingan persentase perubahan luas bangunan, debit puncak, dan volume limpasan berdasarkan sub-DAS untuk skenario 2023 dan RTRW

Sub-DAS	% perubahan area terbangun 2023 vs RTRW	Q Peak (m ³ /s)			Volume (1000 m ³)		
		2023	RTRW	% perubahan	2023	RTRW	% perubahan
S1	12.54	9.75	9.89	1.45	130419.36	131737.34	1.01
S2	-2.92	4.85	4.75	-2.12	172573.34	171832.09	-0.43
S3	22.74	13.33	13.58	1.85	197906.62	199949.83	1.03
S4	-20.57	23.18	22.96	-0.94	688562.10	685895.69	-0.39
S5	78.57	9.59	9.99	4.20	123418.14	131841.38	6.82
S6	40.02	22.02	22.47	2.02	315788.02	325815.73	3.18
S7	213.24	0.58	0.74	27.37	9004.63	9625.61	6.90

Beberapa rekomendasi yang dapat diberikan terhadap kebijakan RTRW Kabupaten Batang di DAS Sambong berdasarkan hasil studi ini adalah diperlukan pengawasan yang ketat dan penegakan aturan tata ruang agar tidak terjadi pelanggaran alih fungsi lahan yang melebihi batas RTRW seperti yang terjadi pada area terbangun beberapa sub-DAS yaitu S2 (Desa Pesalakan, Binangun, Wonodadi, dan Wonomerto, Kecamatan Bandar) sebesar 2.92% dan S4 (Desa Tambahrejo, Binangun, Bandar, Wonomerto, Tumbrep, dan Kambangan, Kecamatan Bandar) sebesar 20.57% di atas batas RTRW. Perlu dilakukan evaluasi jenis pelanggaran yang terjadi di S2 dan S4

sehingga dapat diberikan sanksi sesuai dengan Peraturan Bupati Batang Nomor 28 Tahun 2024 tentang Tata Cara Pengenaan Sanksi Administratif terhadap Pelanggaran Pemanfaatan Ruang. Menjalankan pengembangan wilayah seperti pada RTRW yaitu wilayah selatan sebagai kawasan pendukung fungsi konservasi (S4 dan S2), kawasan tengah sebagai kawasan pengembangan pertanian dan agrobisnis (S1, S3, dan sebagian S6) dan kawasan utara sebagai kawasan pertumbuhan ekonomi (S5, sebagian S6 dan S7).

Fokuskan upaya perlindungan dan pengendalian pada sub-DAS yang

menunjukkan respons hidrologi tinggi terhadap perubahan area terbangun, sehingga risiko banjir dan limpasan berlebih dapat diminimalkan. Selain pembatasan area terbangun, upayakan peningkatan tutupan vegetasi dan konservasi lahan untuk menambah kemampuan resapan air dan mengurangi limpasan. Bertambahnya area terbangun dan berkurangnya tutupan vegetasi dapat menyebabkan penurunan kualitas lingkungan. Karena vegetasi berperan penting sebagai pengatur keseimbangan lingkungan, sedangkan peningkatan area terbangun yang tidak terkontrol dapat mengurangi kemampuan penyerapan air tanah sehingga berdampak negatif pada kualitas lingkungan.

Penyusunan dan penerapan kebijakan *Low Impact Development* (LID) atau *Green Infrastructure* juga dapat disarankan untuk setiap pengembangan wilayah terbangun dengan pembangunan komponen LID berbasis infiltrasi seperti sumur resapan (*recharge wells*), taman hujan/sel bio retensi (*rain garden/bio-retention cells*), dan sistem perkerasan permeabel (*permeable pavement systems*) atau komponen berbasis penyimpanan air seperti kolam retensi (*retention ponds*), atap hijau (*green roof*) dan sistem pengumpulan air hujan (*rain water harvesting*). Pada studi pengelolaan banjir di Palembang, penerapan LID dapat mengurangi banjir >30% dengan luas area LID sebesar 9.81% dari total luas DAS [40].

4. Kesimpulan

Hasil studi menunjukkan peningkatan signifikan pada area terbangun dari data historis hingga proyeksi RTRW 2019-2039 yang berdampak pada kenaikan debit puncak, debit tinggi dan volume limpasan serta penurunan debit rendah yang berpeluang meningkatkan risiko banjir dan kekeringan. Analisis spasial mendetail pada tingkat sub-DAS mengungkapkan bahwa perubahan tutupan lahan terutama peningkatan area

terbangun secara lokal memiliki efek signifikan terhadap perilaku limpasan, namun respons tersebut juga dipengaruhi oleh karakteristik fisik lokal seperti jenis tanah dan kemiringan lahan serta morfometrik sub-DAS. Pola ruang RTRW menunjukkan potensi pelanggaran dalam pengelolaan area terbangun, khususnya pada sub-DAS 2 dan 4. Hal ini memerlukan langkah-langkah kebijakan penting dari Pemerintah/Pemerintah Daerah melalui tindakan nyata dalam pengawasan dan penegakan aturan serta kesadaran masyarakat untuk mematuhi berbagai regulasi yang ada. Hasil analisis menunjukkan dampak kebijakan RTRW yang mengurangi keandalan DAS dalam meregulasi perubahan debit, oleh karena itu perlu adanya penggunaan kebijakan yang sensitif terhadap keberlanjutan sumber daya air serta penerapan kebijakan *lowimpactdevelopment* untuk memitigasi risiko limpasan berlebih dan menambah simpanan air tanah untuk debit-debit rendah. Studi ini menyediakan pemahaman empiris mengenai dampak perubahan tutupan lahan akibat kebijakan tata ruang terhadap karakteristik hidrologi DAS Sambong yang dapat menjadi basis penting bagi perencanaan wilayah yang berkelanjutan dan kebijakan pengendalian risiko bencana hidrologi di masa depan. Kemudian penelitian lanjutan perlu dilakukan untuk mengetahui dampak langsung dari kebijakan RTRW terhadap kejadian banjir dan kekeringan di DAS Sambong serta bagaimana cara mitigasi dan mengelola risikonya

5. Daftar Pustaka

- [1] R. Djalante dan M. Garschagen, "A Review of Disaster Trend and Disaster Risk Governance in Indonesia: 1900–2015," dalam *Disaster Risk Reduction in Indonesia: Progress, Challenges, and Issues*, R. Djalante, M. Garschagen, F. Thomalla, dan R. Shaw, Ed., Cham: Springer International Publishing, 2017,

- hlm. 21–56. doi: 10.1007/978-3-319-54466-3_2.
- [2] M. Farid *dkk.*, “Development of flood hazard index under climate change scenarios in Java Island,” *Progress in Disaster Science*, vol. 20, hlm. 100302, Des 2023, doi: 10.1016/j.pdisas.2023.100302.
- [3] A. Pugara, B. Pradana, dan B. N. Priambudi, “The Impact of The Land Use Changes Through Batang Spatial Planning on The Ecosystem Services on Climate Management,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1082, no. 1, hlm. 012022, Sep 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1082/1/012022.
- [4] A. B. Mitiku, G. A. Meresa, T. Mulu, dan A. T. Woldemichael, “Examining the impacts of climate variabilities and land use change on hydrological responses of Awash River basin, Ethiopia,” *HydroResearch*, vol. 6, hlm. 16–28, 2023, doi: 10.1016/j.hydres.2022.12.002.
- [5] Gloria Setyvani Putri, “Banjir Batang Rendam 10 Kecamatan, 7.000 Warga Terdampak.” Diakses: 8 Agustus 2025. [Daring]. Tersedia pada: <https://regional.kompas.com/read/2025/01/22/161130378/banjir-batang-rendam-10-kecamatan-7000-warga-terdampak>
- [6] F. I. W. Rohmat, Z. Sa’adi, I. Stamataki, A. A. Kuntoro, M. Farid, dan R. Suwarman, “Flood modeling and baseline study in urban and high population environment: A case study of Majalaya, Indonesia,” *Urban Climate*, vol. 46, 2022, doi: 10.1016/j.uclim.2022.101332.
- [7] Y. Anwar, I. Setyasih, M. A. Setiawan, dan N. Christanto, “Evaluation of spatial plan in controlling stream flow rate in Wakung Watershed, Pemalang, Central Java, Indonesia,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 148, hlm. 012030, Apr 2018, doi: 10.1088/1755-1315/148/1/012030.
- [8] I. Ridwansyah, M. Yulianti, dan H. Wibowo, “Soil Water Analysis Tools (SWAT) hydrology modelling as a basis for spatial planning: a case study in Cimandiri Watershed, West Java Province,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 380, no. 1, hlm. 012017, Nov 2019, doi: 10.1088/1755-1315/380/1/012017.
- [9] A. W. Sejati *dkk.*, “More developed means dangerous: spatial evidence of multi-decadal urbanising watershed and its impact to flash flood in metropolitan Semarang-Indonesia,” *Environ. Hazards*, 2024, doi: 10.1080/17477891.2024.2341720.
- [10] I. Nahib *dkk.*, “Spatial Analysis of Water Conservation and Its Driving Factors in an Urban Citarum Tropical Watershed: Geospatial Approach,” *Resources*, vol. 14, no. 5, hlm. 77, Mei 2025, doi: 10.3390/resources14050077.
- [11] F. Xu, H. X. H. Bao, H. Li, M.-P. Kwan, dan X. Huang, “Land use policy and spatiotemporal changes in the water area of an arid region,” *Land Use Policy*, vol. 54, hlm. 366–377, Jul 2016, doi: 10.1016/j.landusepol.2016.02.027.
- [12] S. B. Atanaw, F. A. Zimale, T. Ayenew, dan G. T. Ayele, “Modeling future hydrological responses through parameter optimization and climate change scenarios in Dirima Watershed, Ethiopia,” *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 10, no. 1, hlm. 1117–1135, Feb 2024, doi: 10.1007/s40808-023-01817-z.
- [13] G. Odey dan Y. Cho, “Event-Based vs. Continuous Hydrological Modeling with HEC-HMS: A Review of Use Cases, Methodologies, and Performance Metrics,” *Hydrology*, vol. 12, no. 2, hlm. 39, Feb 2025, doi: 10.3390/hydrology12020039.
- [14] Y. Gao, J. Chen, H. Luo, dan H. Wang, “Prediction of hydrological responses to land use change,” *Science of The Total Environment*, vol. 708, hlm. 134998, Mar 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134998.
- [15] C. Kabeja *dkk.*, “The Impact of Reforestation Induced Land Cover Change (1990–2017) on Flood Peak Discharge Using HEC-HMS Hydrological Model and Satellite Observations: A Study in Two Mountain

- Basins, China,” *Water*, vol. 12, no. 5, hlm. 1347, Mei 2020, doi: 10.3390/w12051347.
- [16] L. Djellit, F. Laouacheria, dan R. Morbidelli, “Assessment of the impact of LULC changes on peak discharge and runoff volume in Kebir river catchment Northeastern of Algeria,” *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 10, no. 3, hlm. 3711–3726, Jun 2024, doi: 10.1007/s40808-024-01981-w.
- [17] M. Mewded, A. Abebe, S. Tilahun, dan Z. Agide, “Impact of land use and land cover change on the magnitude of surface runoff in the endorheic Hayk Lake basin, Ethiopia,” *SN Appl. Sci.*, vol. 3, no. 8, hlm. 742, Agu 2021, doi: 10.1007/s42452-021-04725-y.
- [18] C. W. Ross, L. Prihodko, J. Anchang, S. Kumar, W. Ji, dan N. P. Hanan, “HYSOGs250m, global gridded hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling,” *Sci Data*, vol. 5, no. 1, hlm. 180091, Mei 2018, doi: 10.1038/sdata.2018.91.
- [19] K. Karra, C. Kontgis, Z. Statman-Weil, J. C. Mazzariello, M. Mathis, dan S. P. Brumby, “Global land use / land cover with Sentinel 2 and deep learning,” dalam *2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS*, Brussels, Belgium: IEEE, Jul 2021, hlm. 4704–4707. doi: 10.1109/IGARSS47720.2021.9553499.
- [20] M. Paudel, E. J. Nelson, C. W. Downer, dan R. Hotchkiss, “Comparing the capability of distributed and lumped hydrologic models for analyzing the effects of land use change,” *Journal of Hydroinformatics*, vol. 13, no. 3, hlm. 461–473, Jul 2011, doi: 10.2166/hydro.2010.100.
- [21] R. Verma, M. Sharif, dan A. Husain, “Application of HEC-HMS for Hydrological Modeling of Upper Sabarmati River Basin, Gujarat, India,” *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 8, no. 4, hlm. 5585–5593, Nov 2022, doi: 10.1007/s40808-022-01411-9.
- [22] H. Al-Ghobari, A. Dewidar, dan A. Alataway, “Estimation of Surface Water Runoff for a Semi-Arid Area Using RS and GIS-Based SCS-CN Method,” *Water*, vol. 12, no. 7, hlm. 1924, Jul 2020, doi: 10.3390/w12071924.
- [23] S. K. Mishra dan V. P. Singh, *Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*, vol. 42. dalam *Water Science and Technology Library*, vol. 42. Dordrecht: Springer Netherlands, 2003. doi: 10.1007/978-94-017-0147-1.
- [24] B. K. Mishra, K. Kobayashi, A. Murata, S. Fukui, dan K. Suzuki, “Hydrologic modeling and flood-frequency analysis under climate change scenario,” *Model. Earth Syst. Environ.*, vol. 10, no. 4, hlm. 5621–5633, Agu 2024, doi: 10.1007/s40808-024-02082-4.
- [25] USACE, “Flood-Runoff Analysis (Engineer Manual 1110-2-1417).” U.S. Army Corps of Engineers, 31 Agustus 1994.
- [26] X. Song, F. Kong, dan Z. Zhu, “Application of Muskingum routing method with variable parameters in ungauged basin,” *Water Science and Engineering*, vol. 4, no. 1, 2011, doi: 10.3882/j.issn.1674-2370.2011.01.001.
- [27] A. Ahbari, L. Stour, A. Agoumi, dan N. Serhir, “Estimation of initial values of the HMS model parameters: application to the basin of Bin El Ouidane (Azilal, Morocco),” *jmes*, vol. 9, no. 1, hlm. 305–317, Jan 2018, doi: 10.26872/jmes.2018.9.1.34.
- [28] A. Satria Perdana dan W. Sejati, “Flood Water Level Simulation Bringin River, Semarang City By Using The HEC-RAS 6.3.1 Programming,” *ATM*, vol. 7, no. 3, hlm. 243–252, Sep 2023, doi: 10.33050/atm.v7i3.2134.
- [29] B. Abdelkebir, E. Mokhtari, dan B. Engel, “Assessment of land use and land cover changes on hydrological responses in the Wadi Soummam watershed, Algeria using the HEC–HMS model,” *Water Practice & Technology*, vol. 19, no. 9, hlm. 3555–3577, Sep 2024, doi: 10.2166/wpt.2024.224.
- [30] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. V. Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel, dan T. L. Veith, “Model Evaluation Guidelines for Systematic

- Quantification of Accuracy in Watershed Simulations,” *Transactions of the ASABE*, vol. 50, no. 3, hlm. 885–900, 2007, doi: 10.13031/2013.23153.
- [31] J. U. Guduru dan A. S. Mohammed, “Hydrological modeling using HEC-HMS model, case of Tikur Wuha River Basin, Rift Valley River Basin, Ethiopia,” *Environmental Challenges*, vol. 17, hlm. 101017, Des 2024, doi: 10.1016/j.envc.2024.101017.
- [32] A. E. Pravitasari *dkk.*, “Dynamics and Predictions of Urban Expansion in Java, Indonesia: Continuity and Change in Mega-Urbanization,” *IJGI*, vol. 13, no. 3, hlm. 102, Mar 2024, doi: 10.3390/ijgi13030102.
- [33] F. A. Rahman, E. N. Mahmudah, S. Supriyadi, dan G. H. Debaba, “Land use change prediction with deep learning approach using artificial neural network-cellular automata (ANN-CA),” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1469, no. 1, hlm. 012033, Mar 2025, doi: 10.1088/1755-1315/1469/1/012033.
- [34] P. Krause, D. P. Boyle, dan F. Bäse, “Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment,” *Adv. Geosci.*, vol. 5, hlm. 89–97, Des 2005, doi: 10.5194/adgeo-5-89-2005.
- [35] B. Rama, Fadhliani, Y. Khairullah, Fasdarsyah, S. Meutia, dan M. Anugrah, “Flood peak estimation for the keureuto watershed using the hydrological modeling system HEC-HMS,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1311, no. 1, hlm. 012040, Mar 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1311/1/012040.
- [36] Wahyuni, A. F. Damayanti, dan A. S. Soma, “Predicting Water Discharge Using Model The Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System in the Mallusetasi Watershed,” *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 1430, no. 1, hlm. 012014, Des 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1430/1/012014.
- [37] Y. P. Kau Suni, J. Sujono, dan Istiarto, “Modelling off-stream reservoir using rainfall-runoff transformation and satellite rainfall data in Liliba and Manikin watersheds of Indonesia,” *Kuwait Journal of Science*, vol. 52, no. 3, hlm. 100431, Jul 2025, doi: 10.1016/j.kjs.2025.100431.
- [38] H. Abdulai *dkk.*, “Modelling the Impact of Land Use Change on Hydrological Processes in the Katsina-Ala Basin Using SWAT,” *GEP*, vol. 13, no. 04, hlm. 235–251, 2025, doi: 10.4236/gep.2025.134013.
- [39] A. Talib dan T. O. Randhir, “Long-term effects of land-use change on water resources in urbanizing watersheds,” *PLOS Water*, vol. 2, no. 4, hlm. e0000083, Apr 2023, doi: 10.1371/journal.pwat.0000083.
- [40] M. B. Al Amin, J. Sujono, dan R. Triatmadja, “Urban Flood Mitigation by Implementing LIDs (Case Study: Bendung Watershed in Palembang City),” *JWMM*, 2024, doi: 10.14796/jwmm.c526.
- [41] Republik Indonesia, Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 26 Tahun 2007 tentang Penataan Ruang. Jakarta: Pemerintah Republik Indonesia, 2007.
- [42] Pemerintah Kabupaten Batang, Peraturan Daerah Kabupaten Batang Nomor 13 Tahun 2019 tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Kabupaten Batang Tahun 2019–2039. Batang: Pemkab Batang, 2019.