

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air hujan yang jatuh ke permukaan bumi mengalami proses siklus hidrologi, di mana sebagian air akan meresap ke dalam tanah melalui infiltrasi, sebagian menguap melalui evapotranspirasi, dan sisanya mengalir di atas permukaan tanah sebagai limpasan permukaan. Limpasan permukaan memiliki peranan yang sangat penting dalam neraca air dari suatu daerah aliran sungai, karena secara langsung memengaruhi ketersediaan air tanah, erosi, sedimentasi, serta kemungkinan terjadinya banjir dan kekeringan. Dengan meningkatnya volume limpasan permukaan, cadangan air tanah yang bisa dimanfaatkan untuk pertanian akan semakin berkurang, yang berujung pada penurunan produktivitas lahan., terdapat permasalahan serius terkait aksesibilitas, kontinuitas, dan kualitas air yang tidak memenuhi standar di berbagai wilayah

Indonesia sebagai negara dengan laju pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi yang pesat di Asia Tenggara berada di garis depan krisis hidrologis yang dipicu oleh perubahan lanskap dan alih fungsi lahan di berbagai Daerah Aliran Sungai (DAS). Perubahan tata guna lahan, ekspansi permukiman, dan aktivitas pembangunan infrastruktur secara masif telah mengurangi tutupan vegetasi, berdampak pada menurunnya kemampuan infiltrasi tanah, meningkatnya limpasan permukaan, dan berkurangnya kapasitas alami DAS untuk mengatur aliran air (Rafi et al., 2025). Kondisi ini berdampak langsung pada meningkatnya frekuensi banjir, erosi, dan sedimentasi di banyak sungai dan waduk, sekaligus mempercepat degradasi fungsi regulasi air alami DAS di berbagai wilayah tanah air.

Badan Nasional Penanggulangan Bencana, (2024) mencatat bahwa sepanjang tahun 2024, terdapat 2.107 kejadian bencana di Indonesia, dengan banjir sebagai bencana yang paling mendominasi. Risiko banjir ini mengancam luas wilayah sebesar 49,7 juta hektar dan memapar lebih dari 109 juta jiwa penduduk. Fenomena ini diperparah oleh rendahnya Indeks Kualitas Lahan (IKL) dan Indeks Kualitas Air (IKA) nasional yang tetap berada pada predikat sedang, yang mengindikasikan bahwa fungsi regulasi air alami DAS di Indonesia telah mengalami penurunan signifikan.

DAS Bengawan Solo merupakan sistem sungai terbesar dan terpanjang di Pulau Jawa yang memiliki peran vital bagi kehidupan jutaan orang. Namun, sistem ini juga merupakan salah satu yang paling rentan terhadap perubahan penggunaan lahan dan

bencana banjir. Studi di berbagai sub-DAS Bengawan Solo menunjukkan tren peningkatan debit puncak banjir yang signifikan dalam satu dekade terakhir. Sebagai contoh, di Sub DAS Serenan, debit puncak meningkat dari 139,61 m³/s pada tahun 2015 menjadi 194,56 m³/s pada tahun 2021 (Barid & Afanda, 2022). Peningkatan ini secara langsung dikorelasikan dengan perubahan parameter fisik DAS, di mana tutupan lahan bervegetasi berkurang dan area pemukiman meluas, yang menyebabkan air hujan tidak tertahan oleh sistem perakaran atau infiltrasi tanah.

Dinamika hidrologis di Bengawan Solo juga dipengaruhi oleh pola curah hujan yang ekstrem. Di Jawa, durasi hujan rata-rata adalah 4 jam dengan curah hujan efektif mencapai 90% dari total curah hujan harian. Kondisi ini, dikombinasikan dengan karakteristik tanah yang didominasi oleh kelompok hidrologi tanah (HSG) tipe C dan D yang memiliki kapasitas infiltrasi rendah, menjadikan wilayah ini sangat responsif terhadap kejadian hujan lebat (Barid & Afanda, 2022). Pemodelan hidrologi menggunakan model HEC-HMS atau metode hidrograf sintetik Snyder telah dilakukan di beberapa titik, namun keterbatasan data pengamatan debit di lapangan (*ungauged catchment*) sering kali menjadi kendala dalam validasi model (Cantik et al., 2022). Oleh karena itu, pendekatan berbasis parameter fisik lahan seperti SCS-CN yang diintegrasikan dengan Sistem Informasi Geografis (SIG) menawarkan solusi yang lebih robust untuk pemetaan kerentanan banjir secara spasial di wilayah yang minim stasiun duga air.

Sub DAS Pacal, yang secara administratif terletak di Kabupaten Bojonegoro, merupakan salah satu wilayah yang paling terdampak oleh ketidakseimbangan hidrologis di dalam sistem Bengawan Solo. Waduk Pacal, sebagai infrastruktur utama di wilayah ini, memiliki sejarah panjang sejak zaman kolonial sebagai penyedia air irigasi bagi 35% produktivitas pertanian di Bojonegoro (Rofqy & Suparwoto, 2014). Namun, fungsi strategis ini kini terancam oleh degradasi lingkungan yang parah di wilayah hulunya. Hasil analisis kesehatan DAS menunjukkan bahwa kondisi hidrologi DAS Pacal saat ini berada dalam kategori buruk (*poor category*). Hal ini ditandai dengan nilai Koefisien Regim Sungai (KRS) yang sangat tinggi, mencapai rata-rata 282 pada periode 2013-2022. Nilai KRS yang Sangat Tinggi ini mencerminkan fluktuasi debit yang ekstrem antara musim hujan dan kemarau, yang merupakan indikator nyata bahwa fungsi regulasi air di DAS tersebut telah terdegradasi secara kritis (Sardana, 2025).

Masalah utama di Sub DAS Pacal diperburuk oleh rendahnya kapasitas simpanan air. Rata-rata nilai Koefisien Simpanan Air (KSA) di wilayah ini hanya sebesar 0,057, yang diklasifikasikan sebagai kategori buruk (Sardana, 2025). Nilai KSA yang sangat

rendah mengindikasikan bahwa kapasitas infiltrasi dan penyimpanan air tanah sangat terbatas, sehingga sebagian besar air hujan segera berubah menjadi limpasan permukaan yang cepat (*rapid surface runoff*), sementara aliran dasar (base flow) menjadi minimal saat musim kemarau. Konsekuensi langsung dari kondisi ini adalah tingginya laju erosi dan sedimentasi. Di Hulu Sub DAS Pacal, laju erosi tahunan tercatat mencapai 575.632,4 ton/tahun, dengan laju sedimentasi sebesar 66.801 ton/tahun yang secara perlahan mengurangi volume efektif Waduk Pacal (Aprilio et al., 2023).

Dampak nyata dari deteriorasi hidrologis ini terlihat jelas dari frekuensi dan intensitas banjir yang melanda Bojonegoro dalam beberapa tahun terakhir. Pada Februari 2026, luapan Sungai Pacal menyebabkan bencana banjir besar yang menggenangi ratusan rumah di berbagai kecamatan. Di Kecamatan Gondang, sebanyak 255 rumah di Dusun Gondang dan Dusun Tikung terendam air bercampur lumpur dengan ketinggian mencapai 50 cm (Yakub, 2026). Banjir ini memicu kelumpuhan aktivitas ekonomi dan kerusakan fasilitas umum seperti puskesmas, masjid, dan gedung serbaguna, serta memutus akses jalan poros kecamatan. Kejadian serupa melanda Kecamatan Kapas, di mana enam desa (Kapas, Plesungan, Mojodeso, Tanjungharjo, Bakalan, dan Tikusan) terendam akibat luapan sungai yang tidak lagi mampu menampung debit limpasan dari wilayah hulu (Yakub, 2026). Selain berdampak pada kawasan permukiman dan infrastruktur, peningkatan limpasan permukaan juga menimbulkan permasalahan serius pada sektor pertanian. Tingginya limpasan berkaitan erat dengan meningkatnya tingkat erosi tanah, khususnya pada lahan dengan tutupan vegetasi yang minim serta kondisi lereng tertentu (Hakim et al., 2025). Proses erosi tersebut mengakibatkan terkikisnya lapisan tanah bagian atas (*topsoil*) yang kaya akan unsur hara, sehingga kesuburan tanah mengalami penurunan. Sejumlah penelitian menunjukkan bahwa peningkatan limpasan mampu memperbesar kehilangan tanah hingga mencapai ratusan kilogram per hektar, yang pada akhirnya mempercepat terjadinya degradasi lahan pertanian (Devianti, 2018). Di samping itu, limpasan permukaan juga berkontribusi terhadap hilangnya unsur hara karena terbawa aliran air keluar dari lahan. Kondisi ini menyebabkan berkurangnya ketersediaan nutrisi yang diperlukan tanaman untuk tumbuh secara optimal.

Kehilangan unsur hara akibat erosi dan limpasan menjadi salah satu faktor utama yang menyebabkan menurunnya produktivitas lahan pertanian (Mustikasari et al., 2018). Apabila genangan air berlangsung dalam waktu yang cukup lama, tanaman pangan seperti padi dan palawija berpotensi mengalami gagal panen akibat terganggunya sistem perakaran serta proses fisiologis tanaman. Lebih jauh lagi, perubahan kondisi hidrologis

yang dipicu oleh peningkatan limpasan permukaan turut memengaruhi pola tanam petani. Ketidakstabilan ini menyebabkan musim tanam menjadi sulit diprediksi, karena frekuensi banjir cenderung meningkat pada musim hujan, sementara infiltrasi air yang menurun dapat memicu kekeringan pada musim kemarau. Dampak lanjutan dari kondisi tersebut adalah munculnya kerugian ekonomi bagi petani, penurunan hasil produksi pertanian, serta meningkatnya risiko kerawanan pangan di tingkat lokal.

Metode *Soil Conservation Service-Curve Number* (SCS-CN) merupakan pendekatan empiris yang dikembangkan oleh *United States Department of Agriculture* (USDA) untuk memperkirakan volume limpasan permukaan dari peristiwa curah hujan (Cantik et al., 2022). Metode ini sangat populer dalam bidang hidrologi dan manajemen sumber daya air karena kesederhanaannya namun memiliki efektivitas tinggi dalam mengintegrasikan berbagai karakteristik DAS. Penentuan nilai CN sangat bergantung pada tiga faktor utama: Jenis Penggunaan Lahan (*Land Use*), Kelompok Hidrologi Tanah (*Hydrological Soil Group/HSG*), dan Kondisi Kelengasan Tanah (*Antecedent Moisture Condition/AMC*) (Tikno et al., 2012). Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG) dalam aplikasi metode SCS-CN memberikan keunggulan dalam analisis spasial yang terdistribusi. SIG memungkinkan peneliti untuk melakukan *overlay* peta tutupan lahan dari citra satelit (seperti Sentinel-2 atau Landsat) dengan peta jenis tanah dan topografi secara presisi (Adlyansah et al., 2019). Dengan pendekatan ini, nilai CN tidak lagi dianggap seragam untuk seluruh DAS, melainkan dihitung untuk setiap unit lahan (*pixel* atau *polygon*), sehingga menghasilkan peta komposit CN yang akurat.

Meskipun Sub DAS Pacal telah menjadi subjek penelitian hidrologi sebelumnya, masih terdapat kesenjangan penelitian yang signifikan yang mendasari urgensi penelitian ini. Sebagian besar studi terdahulu di wilayah Pacal lebih menitikberatkan pada aspek sedimentasi waduk dan laju erosi menggunakan metode *Universal Soil Loss Equation* (USLE). Selain itu, pemetaan area genangan banjir yang ada umumnya menggunakan model hidraulik seperti *HEC-RAS 2D* yang bersifat deterministik dan memerlukan data debit banjir rancangan sebagai input utama. Belum terdapat penelitian yang secara spesifik memetakan intensitas limpasan permukaan secara spasial menggunakan metode SCS-CN yang mengintegrasikan dinamika perubahan tutupan lahan terbaru pasca-2020 dengan karakteristik fisik tanah lokal secara mendetail. Kesenjangan lainnya terletak pada ketiadaan basis data spasial *Curve Number* (CN) yang terverifikasi untuk wilayah Bojonegoro. Mengingat variabilitas jenis tanah yang tinggi dan laju konversi lahan pertanian yang mencapai ribuan hektar per tahun, penggunaan nilai CN standar dari

literatur internasional tanpa penyesuaian lokal berisiko menghasilkan estimasi limpasan yang tidak akurat. Padahal, pemahaman mengenai distribusi spasial limpasan sangat penting untuk mengidentifikasi area *hotspot* yang berkontribusi paling besar terhadap banjir luapan Kali Pacal (Widyasasi et al., 2024). Tanpa data spasial ini, upaya mitigasi bencana seperti pembangunan sumur resapan, kolam retensi, atau reboisasi sering kali dilakukan secara tidak tepat sasaran.

Penelitian ini menghadapi berbagai tantangan, salah satunya adalah perubahan tata guna lahan di wilayah Bojonegoro yang berlangsung secara dinamis sehingga hasil klasifikasi tutupan lahan sering kali belum mampu menggambarkan kondisi aktual di lapangan secara tepat. Permasalahan tersebut semakin kompleks karena keterbatasan data pengamatan debit sungai yang tersedia, sehingga proses validasi model limpasan permukaan menjadi sulit dilakukan dan memiliki tingkat ketidakpastian yang cukup tinggi. Selain itu, ketersediaan nilai *Curve Number* (CN) yang telah terverifikasi secara lokal masih terbatas, sehingga estimasi limpasan permukaan berpotensi kurang akurat apabila hanya menggunakan parameter standar tanpa penyesuaian terhadap karakteristik tanah dan penggunaan lahan di Sub DAS Pacal. Tantangan lainnya terletak pada proses integrasi berbagai data spasial, seperti tutupan lahan, *Hydrologic Soil Group* (HSG), dan topografi ke dalam Sistem Informasi Geografis (SIG) dengan resolusi yang memadai. Proses ini menjadi cukup rumit karena tingginya variasi karakteristik fisik lahan pada wilayah penelitian. Di samping itu, keterbatasan kapasitas teknis pemerintah daerah dalam memanfaatkan pemetaan kerentanan limpasan permukaan sebagai dasar penyusunan strategi mitigasi bencana juga menjadi kendala tersendiri. Oleh karena itu, diperlukan penyajian hasil penelitian yang lebih aplikatif, informatif, dan mudah dipahami agar dapat mendukung proses pengambilan keputusan secara lebih efektif.

Sebagai upaya dalam menjawab berbagai tantangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk memetakan intensitas limpasan permukaan secara spasial pada Sub DAS Pacal dengan menggunakan metode SCS-CN yang diintegrasikan ke dalam Sistem Informasi Geografis (SIG). Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pendukung dalam perencanaan mitigasi banjir serta pengelolaan daerah aliran sungai (DAS) secara lebih efektif dan berkelanjutan yang dapat digunakan oleh pemerintah daerah dan otoritas sungai (BBWS Bengawan Solo) sebagai alat bantu pengambilan keputusan dalam perencanaan infrastruktur hijau dan pengendalian tata ruang di wilayah hulu hingga hilir Sub DAS Pacal.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Berapa besar tebal dan volume limpasan permukaan di Sub DAS Pacal berdasarkan metode *Soil Conservation Service–Curve Number* (SCS-CN)?
2. Bagaimana tingkat kerawanan limpasan permukaan di Sub DAS Pacal yang dikelompokkan ke dalam kategori tidak rawan, cukup rawan, rawan, dan sangat rawan?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Menghitung tebal dan volume limpasan permukaan di daerah aliran sungai Pacal menggunakan metode *Soil Conservation Service Curve Number* (SCS-CN).
2. Menghitung tingkat kerawanan limpasan permukaan di Sub DAS Pacal yang dikelompokkan ke dalam kategori tidak rawan, cukup rawan, rawan dan sangat rawan?

1.4 Batasan Penelitian

Dari pemaparan rumusan masalah dan tujuan, maka di dapat batasan dari penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibatasi pada wilayah administratif dan hidrologis Sub DAS Pacal, Kabupaten Bojonegoro sebagai studi kasus.
2. Metode yang digunakan untuk estimasi limpasan permukaan adalah *Soil Conservation Service–Curve Number* (SCS-CN).
3. Penelitian ini hanya berfokus pada analisis kuantitas limpasan permukaan (volume dan tebal limpasan).
4. Sumber data yang digunakan terbatas pada data spasial yang tersedia (peta tata guna lahan, peta tanah, dan curah hujan) serta data sekunder yang relevan, tanpa melakukan pengukuran lapangan langsung terhadap debit sungai atau volume limpasan.
5. penelitian difokuskan sebagai pemetaan spasial potensi limpasan permukaan dan identifikasi kawasan berisiko tinggi, tanpa merancang detail teknis infrastruktur pengendali banjir atau rencana tata ruang secara operasional.

1.5 Manfaat Penelitian

Dari pemaparan rumusan masalah dan tujuan, maka manfaat dari penelitian tugas akhir ini sebagai berikut:

1. Manfaat Teoritis

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Sistem Informasi Geografis (SIG) dan hidrologi. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat memperkaya pemahaman mengenai karakteristik limpasan permukaan serta menjadi referensi bagi penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan analisis hidrologi berbasis SIG.

2. Manfaat Praktis

- a. Peta limpasan permukaan yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai salah satu dasar dalam upaya mitigasi bencana sejak tahap awal, serta menjadi acuan dalam pengambilan keputusan terkait perencanaan tata ruang dan pengelolaan konservasi wilayah tangkapan air.
- b. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi sumber informasi dan bahan pertimbangan dalam perencanaan serta pengelolaan Daerah Aliran Sungai (DAS) berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG).