

LAPORAN AKHIR
PENELITIAN INTERNAL DOSEN
Program Studi Teknik Sipil Fakultas Sains dan Teknik



SIMULASI HIDROLOGI DEBIT PUNCAK BANJIR BANDANG DI
WILAYAH HULU BOJONEGORO SELATAN

Tim Peneliti:

Yuliani Wahyu Sardana, ST., MT.
Bagas Pramudya Yudistira
Jaka Setiana
Roghib Afnani

Nomor Kontrak

063 / LPPM-PENGMAS / UB / XI / 2025

Dibiayai oleh:

Universitas Bojonegoro

Periode 1 Tahun Anggaran 2025/2026

UNIVERSITAS BOJONEGORO

2025

HALAMAN PENGESAHAN
PENELITIAN PENDANAAN PERGURUAN TINGGI

1. **Judul Penelitian** : Simulasi Hidrologi Debit Puncak Banjir Bandang di Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan
2. **Ketua Peneliti**
 - a. Nama Peneliti : Yuliani Wahyu Sardana, ST., MT.
 - b. NIDN/NUPTK : 7057776677230233
 - c. Program Studi : Teknik Sipil
 - d. E-mail : yulianiwahyusardana98@gmail.com
 - e. Bidang Keilmuan : Sumber Daya Air
3. **Anggota Peneliti 1**
 - a. Nama (Mahasiswa) : Bagas Pramudya Yudistira
 - b. NIDN/NIM : 22222011057
 - c. Program Studi : Teknik Sipil
 - d. E-mail : bagaspramudya836@gmail.com
 - e. Bidang Keilmuan : -**Anggota Peneliti 2**
 - a. Nama (Mahasiswa) : Jaka Setiana
 - b. NIDN/NIM : 22222011008
 - c. Program Studi : Teknik Sipil
 - d. E-mail : jakasetiana02gmail.com
 - e. Bidang Keilmuan : -**Anggota Peneliti 3**
 - a. Nama (Mahasiswa) : Roghib Afnani
 - b. NIDN/NIM : 22222011192
 - c. Program Studi : Teknik Sipil
 - d. E-mail : roghibafnani10@gmail.com
 - e. Bidang Keilmuan : -
4. **Jangka Waktu Penelitian** : 6 Bulan
6. **Lokasi Penelitian** : Kabupaten Bojonegoro
7. **Dana Diusulkan** : Rp. 3.000.000

Bojonegoro, 2 Februari 2026

Mengetahui,
Ketua LPPM Universitas Bojonegoro

Pengusul,

Laily Agustina Rahmawati, S.Si., M.Sc.
NIDN 07 2108 8601

Yuliani Wahyu Sardana, ST., MT.
NUPTK. 7057776677230233

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyusun Laporan penelitian ini sebaik-baiknya. Laporan penelitian ini merupakan bagian dari kewajiban dan tanggung jawab dosen dalam Catur Darma Perguruan Tinggi di Universitas Bojonegoro. Hal ini sesuai dengan Standar Tenaga Pendidik yang tercantum dalam UU No.12 tahun 2012. Laporan penelitian ini berjudul “Simulasi Hidrologi Debit Puncak Banjir Bandang di Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan”. Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada Rektor Universitas Bojonegoro dan semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam proses pelaksanaan kegiatan penelitian. Laporan ini dibuat berdasarkan buku panduan dalam pedoman pengabdian Masyarakat LPPM Universitas Bojonegoro. Namun demikian penulis menyadari bahwa kesempurnaan dalam pengabdian masyarakat ini belum tercapai dengan maksimal sehingga kritik dan saran yang bersifat membangun sangat penulis harapkan untuk perbaikan pembuatan Laporan selanjutnya.

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	i
KATA PENGANTAR	ii
DAFTAR ISI.....	iii
DAFTAR TABEL.....	v
DAFTAR GAMBAR	vi
RINGKASAN	vii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Hidrologi Banjir Bandang.....	5
2.2 Limpasan Permukaan Metode HSS SCS-CN	9
2.3 Pemodelan Transformasi Hujan-Debit	14
2.4 Pemodelan HEC-HMS (<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System</i>).....	18
2.5 Penelitian Terdahulu	21
BAB III METODE PENELITIAN.....	23
3.1 Jenis dan Lokasi Penelitian.....	23
3.2 Pengumpulan dan Analisis Data	25
3.3 Tahapan Penelitian.....	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Karakteristik Morfometri DAS.....	29
4.2 Parameter Hidrologi DAS.....	31
4.3 Analisis Curah Hujan.....	35
4.4 Penyiapan Model Simulasi Hidrologi.....	38
4.5 Debit Puncak Banjir (Q_p)	39
BAB V PENUTUP.....	43

5.1	Kesimpulan	43
5.2	Saran	43
	DAFTAR PUSTAKA	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Kelompok Tanah Hidrologi	12
Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu	22
Tabel 4.1 Luasan Penggunaan Lahan DAS Pacal Hulu	32
Tabel 4.2 Luasan Jenis Tanah DAS Pacal Hulu	32
Tabel 4.3 Nilai Curve Number (CN) Composite	33
Tabel 4.4 Nilai Impervious Composite	34
Tabel 4.5 Parameter Hidrologi DAS Pacal Hulu	35
Tabel 4.6 Hujan harian maksimum DAS Pacal Hulu	36
Tabel 4.7 Hujan Rancangan DAS Pacal Hulu	36
Tabel 4.8 Distribusi Hujan Rancangan Jam-Jaman Interval 15 Menit	37
Tabel 4.8 Debit Puncak Banjir Tiap Kala Ulang 100, 500, Dan 1000 Tahun DAS Pacal Hulu	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Bagan Alir Tahapan Penelitian	28
Gambar 4.1 Peta Hasil Delineasi DAS Pacal Hulu.....	29
Gambar 4.2 Topografi DAS Pacal Hulu	30
Gambar 4.3 Penggunaan Lahan DAS Pacal Hulu.....	31
Gambar 4.4 Jenis Tanah DAS Pacal Hulu	32
Gambar 4.5 Polygon Thiessen	35
Gambar 4.6 Pemodelan HEC-HMS	38
Gambar 4.7 Gambar Hidrograf Banjir Pacal Hulu.....	39

RINGKASAN

Banjir bandang merupakan ancaman hidrometeorologi paling merusak di Indonesia, ditandai dengan kenaikan debit air yang ekstrem dan cepat. Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan sangat rentan karena karakteristik geomorfologi DAS kecil, lereng curam, dan perubahan tata guna lahan, yang secara kolektif menghasilkan waktu konsentrasi air sangat singkat (*flashy response*). Tingginya frekuensi dan magnitudo banjir di wilayah ini mengindikasikan kegagalan sistem mitigasi saat ini. Penelitian ini mengusulkan Simulasi Hidrologi Debit Puncak Banjir Bandang menggunakan model berbasis fisik HEC-HMS terintegrasi SIG. Integrasi SIG (dengan DEM) digunakan untuk ekstraksi parameter spasial vital: Curve Number (CN) dan Lag Time (T_L). *Transform Method* menggunakan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) SCS, yang cocok untuk DAS minim data. Tujuannya adalah menghasilkan Q_p yang akurat untuk berbagai periode ulang ($T = 2$ hingga 100 tahun). Penelitian ini menunjukkan bahwa Hulu DAS Pacal dengan luas 67,09 km² memiliki karakteristik hidrologi yang sangat responsif terhadap banjir bandang, yang ditunjukkan oleh nilai Curve Number (CN) Composite sebesar 73,09. Perpaduan antara nilai CN yang tinggi, penggunaan lahan dominan hutan semak, serta topografi yang curam menyebabkan waktu konsentrasi (t_c) menjadi singkat dan menghasilkan Time Lag (T_L) yang rendah, di mana puncak banjir tercapai hanya dalam waktu 4 jam setelah hujan dimulai. Berdasarkan simulasi model HEC-HMS, didapatkan besaran debit puncak banjir rencana (Q_p) yang sangat signifikan, yaitu sebesar 1233,07 m³/s untuk periode ulang 100 tahun, 1377,07 m³/s untuk 500 tahun, dan mencapai 1722,06 m³/s untuk periode ulang 1000 tahun. Temuan ini mengonfirmasi kerentanan tinggi wilayah hulu Bojonegoro Selatan terhadap risiko banjir bandang ekstrem yang memerlukan sistem peringatan dini yang cepat dan akurat.

Keywords : Banjir bandang, debit puncak, curve number, waktu tunda, HEC-HMS

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bencana hidro-meteorologi khususnya banjir telah menjadi ancaman tahunan signifikan di Indonesia yang menyebabkan kerugian ekonomi dan sosial yang masif. Di antara berbagai jenis banjir, banjir bandang merupakan fenomena yang paling berbahaya dan merusak. Fenomena ini dicirikan oleh kenaikan debit air yang tiba-tiba dan ekstrem dengan kecepatan tinggi dan seringkali membawa material padat yang secara langsung berkaitan dengan karakteristik unik DAS di wilayah dataran tinggi (Khan et al, 2020). Studi mendalam mengenai mekanisme terbentuknya dan besaran debit puncaknya sangat merupakan kebutuhan mendesak untuk kepentingan mitigasi (Sanit, 2018).

Wilayah dataran tinggi di Bojonegoro bagian selatan mencakup banyak Sub-Daerah Aliran Sungai (Sub-DAS) kecil yang memiliki kondisi geomorfologi yang ideal untuk terbentuknya banjir bandang. Kondisi ini mencakup kemiringan lereng yang relatif curam, panjang aliran sungai yang pendek, topografi berbukit dan perubahan penggunaan lahan akibat deforestasi secara kolektif menghasilkan waktu konsentrasi air yang sangat singkat (Destro et al., 2018; Ginting, 2021). Ketika curah hujan intensitas sedang maupun tinggi terjadi dalam durasi pendek (hujan ekstrem), respon DAS terhadap hujan menjadi sangat cepat (*flashy*) sehingga menyebabkan limpasan permukaan dalam volume besar dengan kecepatan yang destruktif (Rinat et al., 2018; Syaifullah, 2020; Wang et al., 2024).

Tingginya frekuensi dan magnitudo banjir bandang di beberapa Sub-DAS dataran tinggi di Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan telah dikonfirmasi oleh laporan BPBD, penelitian-penelitian regional dan pemberitaan yang beredar. Kerusakan yang ditimbulkan tidak hanya terbatas pada infrastruktur sipil seperti jembatan dan jalan, tetapi juga merusak lahan pertanian dan ekosistem sepanjang daerah terdampak (Lestari, 2022; Mardhatillah, 2025). Hal ini menggarisbawahi kegagalan sistem mitigasi saat ini yang mungkin didasarkan pada perhitungan hidrologi konvensional yang tidak memadai.

Inti dari perencanaan mitigasi dan desain infrastruktur pengendali banjir adalah penentuan nilai debit puncak banjir rencana (Q_p). Parameter ini vital karena menentukan dimensi dan kapasitas bangunan air (seperti tanggul, waduk mini, atau check dam) agar mampu menampung beban hidrologi maksimum pada periode ulang tertentu (Prastica et al, 2020). Kesalahan dalam estimasi Q_p berakibat fatal, di mana struktur yang dibangun dapat jebol atau tidak berfungsi secara optimal saat terjadi bencana yang sesungguhnya (Milanesi & Pilotti, 2021).

Di banyak Sub-DAS dataran tinggi, tantangan utama adalah keterbatasan data hidrometri (debit) terukur secara kontinu dan akurat. Stasiun pengamatan debit umumnya terletak di bagian hilir sungai utama, sementara DAS kecil di hulu, yang menjadi sumber utama banjir bandang, seringkali tidak memiliki instrumentasi yang memadai. Kondisi data scarcity ini memaksa penggunaan pendekatan pemodelan hidrologi yang mampu mensimulasikan proses fisik hujan-limpasan dengan input data yang tersedia (Mardiatno & Marfai, 2021).

Metode empiris tradisional meskipun cepat sering kali tidak memadai untuk kasus banjir bandang karena tidak mampu memperhitungkan variasi spasial parameter DAS. Metode ini mengasumsikan DAS sebagai sistem sederhana yang mengabaikan heterogenitas tata guna lahan, jenis tanah, dan distribusi kemiringan yang kompleks. Dalam kasus banjir bandang, faktor-faktor spasial ini sangat menentukan nilai koefisien limpasan dan waktu konsentrasi (Singh & Kansal, 2024).

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan penggunaan pemodelan hidrologi terdistribusi melalui perangkat lunak HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*). HEC-HMS adalah model berbasis fisik yang terbukti andal dalam mereplikasi proses hujan-limpasan secara dinamis dan mampu mengintegrasikan data spasial dari SIG untuk mendapatkan parameter input yang lebih realistis dan akurat (Odey & Cho, 2025).

Model HEC-HMS akan diintegrasikan dengan data geospasial, terutama *Digital Elevation Model* (DEM) resolusi tinggi, yang diolah menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Integrasi ini memungkinkan delineasi batas DAS, jaringan sungai, dan ekstraksi parameter morfometri secara otomatis (Anees,

2024). Proses ini krusial untuk menentukan parameter kunci seperti *Curve Number* (CN) dan waktu tunda (lag time, T_L) yang menjadi input bagi metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) SCS (Shatnawi & Ibrahim, 2022).

Pemilihan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) metode SCS (*Soil Conservation Service*) adalah langkah metodologis yang tepat karena metode ini telah divalidasi dan digunakan secara luas dalam studi banjir bandang di Indonesia, terutama untuk DAS dengan data terbatas (Sabriyati & Hadi, 2022). HSS-SCS memungkinkan simulasi hidrograf dengan hanya menggunakan parameter fisik DAS dan CN yang secara langsung menghubungkan respons limpasan dengan kondisi permukaan dan tanah.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menghasilkan data debit puncak banjir rencana yang akurat untuk berbagai periode ulang di Sub-DAS target di Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan. Hasil simulasi yang tervalidasi ini akan menjadi basis ilmiah yang kuat bagi pemerintah daerah dan instansi terkait untuk menyusun Rencana Induk Mitigasi Banjir Bandang dan mengembangkan Sistem Peringatan Dini (EWS) yang efektif guna mengurangi risiko bencana di masa depan.

1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang masalah yang diuraikan, peneliti dapat merumuskan masalah sebagai berikut :

1. Bagaimana karakteristik morfometri Sub-DAS Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan, tata guna lahan, dan jenis tanah (dikuantifikasi sebagai *Curve Number*, CN) memengaruhi waktu konsentrasi (t_c) dan waktu tunda (lag time, T_L) DAS tersebut?
2. Berapa besaran debit puncak banjir bandang rencana (Q_p) untuk berbagai periode ulang hidrologi ($T = 100, 500, \text{ dan } 1000$ tahun) yang dihasilkan melalui simulasi model HEC-HMS?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang hendak dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Menganalisis karakteristik morfometri DAS, tata guna lahan, dan jenis tanah Sub-DAS Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan untuk mendapatkan parameter input model hidrologi yang akurat (t_c , T_L , dan CN).
2. Menentukan besaran debit puncak banjir bandang Q_p untuk berbagai periode ulang menggunakan model HEC-HMS.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian memuat manfaat yang diharapkan dari hasil penelitian, baik yang bersifat teoritis maupun praktis serta menjelaskan manfaat kepada pemberi hibah (Universitas Bojonegoro)

Berdasarkan rumusan masalah dan tujuan penelitian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat sebagai berikut:

1. Akademis

Menawarkan kontribusi metodologis dalam aplikasi HEC-HMS dan HSS-SCS terintegrasi SIG untuk pemodelan banjir bandang di DAS kecil, menambah literatur ilmiah terindeks mengenai hidrologi bencana di Bojonegoro.

2. Praktis

Menyediakan data teknis debit puncak banjir bandang yang kredibel kepada pemerintah daerah (BPBD, Dinas PU) sebagai dasar untuk perancangan infrastruktur pengendali banjir, penentuan sempadan sungai, dan pengembangan Sistem Peringatan Dini Banjir Bandang.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hidrologi Banjir Bandang

2.1.1. Definisi dan Klasifikasi Banjir

Banjir merupakan salah satu bencana hidro-meteorologi paling umum di dunia, namun terdapat perbedaan fundamental antara jenis-jenis banjir berdasarkan mekanisme pembentukannya. Secara umum, banjir dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama: Banjir Sungai Biasa (*River Flood*) atau *overbank flood*, dan Banjir Bandang (*Flash Flood*). Pemahaman yang jelas mengenai perbedaan keduanya sangat krusial dalam menentukan strategi mitigasi dan perencanaan tata ruang, karena masing-masing memiliki karakteristik risiko dan waktu tanggap yang sangat berbeda (Grecu et al, 2016).

Banjir Sungai Biasa didefinisikan sebagai luapan air sungai yang terjadi secara bertahap dan meluas ke dataran banjir (*floodplain*) di sekitarnya. Mekanisme utamanya adalah akumulasi air hujan dalam durasi waktu yang panjang (harian hingga mingguan) di Daerah Aliran Sungai (DAS) yang besar. Akumulasi ini melampaui kapasitas tampung saluran sungai, menyebabkan air meluber secara perlahan (Cheng et al, 2020). Fenomena ini biasanya memberikan waktu peringatan yang cukup lama bagi masyarakat untuk evakuasi.

Sebaliknya, Banjir Bandang dicirikan oleh kenaikan muka air yang luar biasa cepat (*rapid onset*) dan tiba-tiba, mencapai puncaknya hanya dalam hitungan menit hingga beberapa jam (Prayitno, 2017). Definisi teknis yang diterima secara luas menyebutkan bahwa banjir bandang adalah banjir yang mencapai debit puncak (Q_p) kurang dari enam jam setelah kejadian hujan pemicu. Perbedaan utama ini terletak pada waktu respons DAS yang sangat singkat (*flashy response*) (Memengko et al, 2022).

Perbedaan mendasar lainnya adalah pada daya rusak dan muatan material yang dibawa. Banjir sungai biasa cenderung membawa sedimen halus, tetapi banjir bandang memiliki daya hancur yang jauh lebih besar karena kecepatan alirannya yang ekstrem, membawa serta material padat berukuran besar seperti

batu, batang pohon, dan lumpur pekat. Muatan padat ini menambah volume dan berat jenis aliran, yang secara signifikan meningkatkan tekanan hidrodinamik pada infrastruktur (Karimae & Zarrati, 2015).

Secara hidrograf, perbedaan kedua jenis banjir ini sangat jelas. Hidrograf Banjir Sungai Biasa ditandai dengan kurva yang lebar dan landai, menunjukkan periode kenaikan (*rising limb*) yang panjang, puncak yang membulat, dan periode penurunan (*recession limb*) yang juga panjang. Hal ini mencerminkan proses perambatan debit yang lambat dalam saluran sungai yang panjang dan melandai (Rodda, 2021).

Sebaliknya, Hidrograf Banjir Bandang menampilkan kurva yang sangat tajam, hampir berbentuk segitiga siku-siku. Puncak hidrograf sangat runcing, menandakan bahwa aliran mencapai debit maksimum dalam waktu singkat. Parameter Waktu Menuju Puncak adalah indikator kunci pada banjir bandang, sangat kecil, yang mengimplikasikan bahwa Sistem Peringatan Dini (EWS) harus beroperasi dengan kecepatan respons yang sangat tinggi (Wu et al., 2020).

Kondisi geomorfologi DAS juga membedakan keduanya. Banjir sungai biasa umumnya terjadi pada DAS yang besar dengan kemiringan lereng yang relatif landai, memungkinkan waktu tunda (*lag time*, T_L) yang panjang. Sementara itu, banjir bandang hampir selalu terjadi di DAS kecil yang terletak di wilayah pegunungan atau perbukitan dengan kemiringan lereng yang curam, di mana laju limpasan sangat tinggi (Wahid et al., 2016).

Klasifikasi risiko bencana juga dipengaruhi oleh perbedaan ini. Risiko pada banjir sungai biasa terutama terkait dengan durasi genangan dan potensi kerusakan jangka panjang. Sedangkan risiko pada banjir bandang bersifat katastrofik dan mendadak, dengan ancaman langsung terhadap keselamatan jiwa karena minimnya waktu untuk evakuasi yang aman. Hal ini menuntut perencanaan infrastruktur yang berbeda, seperti penggunaan *check dam* atau *gully plug* untuk mengendalikan aliran debris di DAS (He et al., 2018).

Konteks pemodelan hidrologi, perbedaan ini menentukan pilihan metode. Banjir sungai biasa di DAS besar, model yang digunakan adalah metode perambatan debit (*routing*) yang kompleks (misalnya Muskingum) pada *reach*

yang panjang (Farzin et al., 2018). Namun, untuk banjir bandang, fokus utamanya adalah akurasi perhitungan hujan efektif (*loss method*) dan transformasi hujan-debit (*transform method*) dengan asumsi *lag time* yang sangat pendek, seringkali mengabaikan *routing* di saluran pendek (Zhou et al., 2025).

Klasifikasi antara banjir bandang dan banjir sungai biasa sangat penting untuk studi simulasi hidrologi. Studi mengenai banjir bandang secara spesifik harus memprioritaskan analisis faktor-faktor yang mempercepat respons DAS, yaitu karakteristik morfometri dan kondisi permukaan, yang menjadi landasan untuk memilih metode pemodelan yang sesuai seperti HSS-SCS (Sabriyati & Hadi, 2022), yang mampu mereplikasi dinamika aliran yang cepat.

2.1.2. Karakteristik Morfometri dan Respons Cepat DAS

Karakteristik morfometri DAS adalah deskripsi kuantitatif mengenai bentuk fisik dan topografi suatu DAS. Parameter-parameter ini bukan sekadar angka, melainkan faktor penentu utama yang mendikte seberapa cepat dan seberapa besar volume air yang dapat dialirkan oleh DAS ke *outlet* (Yousefi et al., 2018). Dalam studi banjir bandang, analisis morfometri menjadi langkah awal yang paling krusial untuk memahami dan memodelkan respons DAS yang cepat.

Salah satu parameter morfometri paling kritis adalah Kemiringan Rata-Rata DAS (*Average Watershed Slope*) dan Kemiringan Rata-Rata Saluran Sungai (*Channel Slope*). Di DAS pegunungan, kemiringan yang curam meningkatkan percepatan gravitasi pada aliran permukaan dan aliran di saluran. Semakin curam kemiringannya, semakin tinggi kecepatan aliran, yang secara langsung berkontribusi pada penurunan drastis waktu konsentrasi (t_c) dan waktu tunda (T_L) (Mahmood & Rahman, 2019).

Parameter kedua yang vital adalah Luas dan Bentuk DAS. Banjir bandang cenderung terjadi pada DAS yang memiliki luas kecil, yang secara inheren memiliki jalur aliran yang pendek. Selain itu, bentuk DAS yang memanjang dan sempit cenderung memiliki respons yang lebih lambat dibandingkan DAS yang berbentuk kompak atau membulat. DAS yang kompak memungkinkan curah

hujan mencapai *outlet* hampir bersamaan, meningkatkan puncak debit secara signifikan (Dutal, 2023).

Konsep Waktu Konsentrasi (t_c) adalah parameter morfometri-hidrologi yang paling langsung berhubungan dengan *flash flood*. t_c merupakan fungsi dari panjang jalur aliran terpanjang (L) dan kemiringan (S) DAS. Formula empiris seperti Kirpich Equation atau formula yang dikembangkan oleh SCS digunakan untuk mengestimasi t_c dan T_L berdasarkan data morfometri yang diekstraksi dari DEM (*Digital Elevation Model*), sebagai representasi fisik respons cepat DAS (Mahmood & Rahman, 2019).

Dari t_c diturunkan parameter Waktu Tunda (*Lag Time*, T_L), yang menjadi input kunci dalam metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS), khususnya HSS-SCS. T_L mencerminkan penundaan antara pusat massa hujan efektif dan puncak hidrograf. Sabriyati dan Hadi (2022) menekankan bahwa dalam pemodelan HSS-SCS, T_L yang akurat, dihitung dari formula yang mengintegrasikan panjang sungai, kemiringan, dan nilai *Curve Number* (CN), adalah penentu utama akurasi simulasi Q_p .

Pengaruh morfometri diperkuat oleh penggunaan Sistem Informasi Geografis (SIG). Melalui SIG dan *tools* seperti QGIS, data DEM diolah untuk secara otomatis mendelineasi batas DAS dan mengekstraksi parameter morfometri secara presisi. Proses ini sangat penting karena data morfometri manual rawan kesalahan, dan simulasi modern memerlukan input spasial yang akurat untuk mewakili heterogenitas topografi yang kompleks (Wu et al., 2020).

Selain kemiringan dan bentuk, Kerapatan Saluran Sungai (*Drainage Density*) juga memainkan peran. DAS dengan kerapatan saluran tinggi berarti terdapat banyak jalur yang efisien untuk mengalirkan air limpasan. Kerapatan tinggi ini mempercepat proses pengumpulan air ke saluran utama, sehingga memperpendek t_c dan memperparah risiko banjir bandang, terutama ketika dikombinasikan dengan kemiringan yang curam (Wu et al., 2019).

Parameter morfometri juga memengaruhi pemilihan *Routing Method* dalam model HEC-HMS. Pada DAS pegunungan, kemiringan saluran yang ekstrem seringkali membuat model hidrolika yang mengasumsikan aliran lambat

menjadi tidak relevan. Metode *routing* seperti Kinematic Wave atau Muskingum-Cunge lebih disukai karena secara fisik lebih mampu mereplikasi perambatan *flood wave* dengan kecepatan tinggi di saluran yang curam, meskipun dalam DAS banjir bandang, *routing* di saluran yang sangat pendek seringkali dapat diabaikan atau disederhanakan (Yousefi et al., 2018).

Ketidakkuratan dalam penentuan parameter morfometri, yang sering terjadi jika menggunakan peta lama atau DEM resolusi rendah, akan langsung menghasilkan kesalahan signifikan pada perhitungan t_c dan T_L . Misalnya, kesalahan dalam mengestimasi kemiringan akan menyebabkan T_L yang terlalu panjang atau terlalu pendek, yang pada akhirnya menghasilkan Q_p simulasi yang tidak valid, sehingga gagal memprediksi besaran banjir bandang yang sebenarnya.

Oleh karena itu, kesuksesan simulasi hidrologi debit puncak banjir bandang sangat bergantung pada fondasi yang kuat dari analisis morfometri. Karakteristik fisik DAS, yang dikuantifikasi melalui parameter seperti kemiringan dan waktu konsentrasi, harus dihitung secara akurat menggunakan teknologi geospasial (DEM dan SIG) untuk memastikan bahwa model HEC-HMS yang dibangun mampu mereplikasi respons cepat alamiah Sub-DAS, yang merupakan target utama dari penelitian berbasis simulasi bencana ini.

2.2 Limpasan Permukaan Metode HSS SCS-CN

2.2.1 Loss Method dan Hujan Efektif

Proses pertama dan paling krusial yang harus dihitung dalam pemodelan hidrologi hujan-limpasan adalah pemisahan total curah hujan (*Gross Rainfall*) menjadi dua komponen yaitu Hujan Efektif (*Effective Rainfall*) dan Kehilangan Air (*Loss*). Konsep Hujan Efektif didefinisikan sebagai bagian dari curah hujan yang benar-benar menghasilkan aliran permukaan atau limpasan (*Runoff*), dan oleh karena itu, merupakan input langsung ke modul transformasi hujan-debit (*Transform Method*) dalam model hidrologi (Chandra et al., 2017). Simulasi akurat sangat vital, terutama di wilayah hulu yang rentan banjir bandang, karena menentukan besaran Debit Puncak (Q_p).

Kehilangan Air (*Loss*) mencakup semua air hujan yang dicegat, disimpan, dan diresapkan sebelum air dapat mengalir di permukaan sebagai limpasan. Komponen utama *loss* meliputi intersepsi (penahanan air oleh tajuk vegetasi), penyimpanan di cekungan permukaan (*depression storage*), evapotranspirasi, dan yang paling signifikan dalam skala waktu banjir, adalah infiltrasi (peresapan air ke dalam lapisan tanah). Metode yang digunakan untuk menghitung *Loss* dalam pemodelan dikenal sebagai *Loss Method*.

Terdapat berbagai macam *Loss Method* yang dapat digunakan dalam perangkat lunak hidrologi seperti HEC-HMS, termasuk Metode Indeks ϕ , Metode Green-Ampt, dan Metode Holtan. Metode-metode ini didasarkan pada prinsip fisika tanah dan memerlukan data terperinci seperti konduktivitas hidrolis jenuh dan *capillary head*. Namun, untuk penelitian di wilayah hulu yang sering mengalami keterbatasan data hidrometri dan data sifat fisik tanah yang detail, metode yang lebih empiris dan mengintegrasikan data spasial, seperti Metode *Curve Number* (SCS-CN), menjadi pilihan metodologis yang paling cocok.

Infiltrasi merupakan komponen terbesar dari *Loss*. Laju infiltrasi sangat dinamis dan bergantung pada tekstur dan struktur tanah, kelembaban tanah awal (*Antecedent Moisture Condition*, AMC), dan keberadaan tutupan vegetasi. Laju infiltrasi akan tinggi di awal kejadian hujan (kecuali kondisi AMC III) dan akan menurun seiring dengan meningkatnya kejenuhan tanah. Model *Loss* harus mampu menangkap dinamika temporal ini untuk mensimulasikan Hujan Efektif yang realistis sepanjang durasi hujan (Chandra et al., 2017).

Konsep kunci dalam *Loss Method* adalah Initial Abstraction (I_a), atau kehilangan air awal. I_a adalah jumlah air hujan yang hilang sebelum limpasan permukaan dimulai. I_a mencakup air yang terserap oleh vegetasi, disimpan di cekungan kecil, dan infiltrasi awal yang cepat sebelum tanah menjadi jenuh. Dalam Metode SCS-CN, I_a diasumsikan memiliki hubungan proporsional dengan potensi retensi total (S), yaitu $I_a \approx 0,2 S$, yang secara signifikan menyederhanakan perhitungan dan mengurangi kebutuhan data input.

Prinsip dasar yang menghubungkan *Gross Rainfall* (P) dengan *Effective Rainfall* (P_e) adalah bahwa limpasan tidak akan terjadi hingga curah hujan

kumulatif melebihi I_a . Setelah $P > I_a$, air yang tersisa akan dibagi antara infiltrasi tambahan dan limpasan. Semakin besar I_a , semakin lama waktu yang dibutuhkan DAS untuk menghasilkan limpasan, dan sebaliknya. I_a yang kecil (khas DAS dengan CN tinggi) berkontribusi langsung pada respons *flashy* yang menyebabkan banjir bandang.

Hujan Efektif yang dihasilkan dari *Loss Method* digunakan untuk membuat Hyetograph Hujan Efektif. *Hyetograph* ini kemudian dimasukkan ke modul *Transform* untuk menghasilkan Hidrograf Limpasan Langsung. Kesalahan dalam perhitungan *Loss* akan menghasilkan kesalahan yang termanifestasi langsung dalam bentuk hidrograf, baik dalam hal waktu mencapai puncak maupun besaran debit puncaknya. Oleh karena itu, *Loss Method* sering dianggap sebagai modul paling sensitif dalam pemodelan hidrologi debit banjir.

Pada wilayah hulu, di mana tanah KTH (Kelompok Tanah Hidrologi) C atau D sering ditemukan (tanah liat yang padat atau dangkal), laju infiltrasi secara inheren rendah. Ditambah dengan perubahan tata guna lahan (misalnya dari hutan menjadi perkebunan monokultur), kapasitas *loss* DAS akan berkurang drastis, menyebabkan sebagian besar hujan dengan intensitas tinggi langsung berubah menjadi P_e . Kondisi ini secara fisik memvalidasi mengapa wilayah hulu pegunungan sangat rentan terhadap banjir bandang.

Model HEC-HMS menyediakan fleksibilitas untuk membagi DAS menjadi sub-DAS (basin elements), memungkinkan penerapan *Loss Method* yang berbeda atau *Loss Method* yang sama dengan parameter yang berbeda (CN) untuk setiap sub-DAS. Pendekatan semi-terdistribusi ini jauh lebih unggul daripada model lumpung (*lumped model*) karena mampu merefleksikan variasi spasial tata guna lahan dan jenis tanah di wilayah hulu.

Penentuan hujan efektif melalui *Loss Method* adalah langkah esensial untuk simulasi banjir bandang. Pilihan metode SCS-CN didasarkan pada kemampuannya untuk mengkuantifikasi *loss* menggunakan parameter fisik (CN), yang merupakan prasyarat mutlak untuk menghasilkan Q_p yang valid dan berbasis kondisi fisik wilayah hulu.

2.2.2 *Curve Number* (CN) sebagai Fungsi Kelompok Tanah Hidrologi (KTH) dan Tata Guna Lahan

Parameter *Curve Number* (CN) adalah jantung dari Metode SCS-CN, yang berfungsi sebagai indeks numerik untuk merepresentasikan potensi limpasan suatu area (Sabriyati & Hadi, 2022). CN adalah parameter tak berdimensi yang nilainya berkisar antara 0 hingga 100. Nilai CN secara langsung mencerminkan kemampuan suatu DAS untuk menahan atau meresapkan air; semakin tinggi nilai CN, semakin besar potensi limpasan permukaan yang dihasilkan.

Nilai CN diperoleh melalui kombinasi dua faktor spasial utama yaitu Kelompok Tanah Hidrologi (KTH) dan Tata Guna Lahan (*Land Use*), yang dikonsolidasikan dalam tabel standar yang diterbitkan oleh SCS (sekarang NRCS). Kombinasi ini memastikan bahwa CN adalah representasi fisik dari kondisi permukaan DAS, mengatasi kekurangan model empiris sederhana yang tidak mempertimbangkan heterogenitas permukaan.

Kelompok Tanah Hidrologi (KTH) membagi jenis-jenis tanah menjadi empat kategori, yaitu A, B, C, dan D, berdasarkan laju infiltrasi minimum tanah yang telah jenuh air. KTH ditentukan oleh tekstur tanah (misalnya kandungan pasir, lempung, atau liat) dan kedalaman lapisan pembatas (*impermeable layer*) di bawahnya.

Tabel 2.1 Kelompok Tanah Hidrologi

Kelompok Tanah Hidrologi (KTH)	Laju Infiltrasi	Contoh Tanah
A	Tinggi	Pasir, kerikil dalam
B	Sedang	Lempung berpasir, tanah liat sedang
C	Rendah	Lempung berpasir liat, tanah liat dangkal
D	Sangat Rendah	Lempung liat padat, lapisan batuan kedap air

Faktor kedua, Tata Guna Lahan, mengklasifikasikan penutup permukaan, yang mempengaruhi intersepsi air hujan dan kondisi pemadatan tanah. Misalnya, lahan hutan dengan kondisi baik akan memiliki CN yang lebih rendah

dibandingkan lahan pertanian yang sama karena hutan meningkatkan porositas dan infiltrasi. Lahan dengan permukaan kedap air (bangunan, jalan aspal) akan memiliki CN mendekati 98-100, mencerminkan limpasan total.

Proses penentuan CN yang akurat dalam penelitian modern dilakukan melalui integrasi SIG (Sistem Informasi Geografis). Peta Tata Guna Lahan terbaru dan Peta Jenis Tanah (yang telah diklasifikasikan menjadi KTH) di-overlay di lingkungan SIG. Setiap unit spasial (poligon) dari kombinasi tata guna lahan dan KTH kemudian diberi nilai CN yang sesuai berdasarkan tabel referensi SCS.

Setelah CN ditentukan untuk setiap poligon di DAS, nilai CN Rata-Rata Tertimbang (*Area-Weighted* CN) dihitung untuk setiap sub-DAS. Rumus pembobotan luasan memastikan bahwa nilai CN yang digunakan dalam simulasi HEC-HMS mencerminkan kontribusi relatif dari setiap jenis penutup lahan dan tanah. Kesalahan dalam pembobotan ini dapat secara signifikan mengganggu hasil Q_p , sehingga perhitungan spasial yang presisi sangat diperlukan.

Peran CN dalam Menentukan Potensi Limpasan terletak pada hubungan matematisnya dengan Potensi Retensi Maksimum (S) melalui persamaan: $S = (1000/CN) - 10$ (satuan inci). Nilai S ini adalah total kapasitas penyimpanan air maksimum yang dimiliki DAS setelah limpasan dimulai. CN yang tinggi (misalnya 90) menghasilkan S yang kecil, yang berarti hanya sedikit air yang dapat disimpan atau diresapkan, sehingga sebagian besar curah hujan menjadi limpasan.

Selain CN, kondisi kelembaban awal tanah (Antecedent Moisture Condition, AMC) juga memengaruhi potensi limpasan. Nilai CN tabel standar mengasumsikan kondisi AMC II (kondisi rata-rata). Namun, untuk simulasi banjir bandang, seringkali digunakan kondisi AMC III (tanah jenuh) karena curah hujan ekstrem pemicu banjir bandang sering didahului oleh periode hujan yang lama. CN dapat dikonversi dari AMC II ke AMC III menggunakan rumus SCS, sehingga CN yang lebih tinggi digunakan dalam pemodelan untuk merefleksikan potensi limpasan yang lebih ekstrem (Kusumastuti et al., 2021).

CN dalam konteks penelitian di Wilayah Hulu memiliki peran diagnostik. DAS hulu yang rentan banjir bandang akan dicirikan oleh CN yang tinggi

(misalnya, lahan yang didominasi KTH C/D dengan tata guna lahan terdegradasi). Peningkatan CN karena perubahan tata ruang (misalnya, konversi hutan menjadi pemukiman atau ladang terbuka) secara langsung menunjukkan peningkatan kerentanan DAS terhadap limpasan dan merupakan indikasi perlunya intervensi mitigasi.

Parameter CN adalah faktor tunggal yang merangkum interaksi kompleks antara faktor permukaan dan sub-permukaan DAS dalam menentukan *Loss Method*. Akurasi penentuan CN melalui integrasi data KTH dan tata guna lahan sangat penting untuk menghasilkan Hyetograph Hujan Efektif yang valid, yang merupakan input utama bagi modul transformasi di HEC-HMS, dan pada akhirnya, menentukan keandalan estimasi Q_p banjir bandang.

2.3 Pemodelan Transformasi Hujan-Debit

2.3.1 Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) untuk *Transform Method*

Proses sentral dalam simulasi hidrologi banjir adalah Transformasi Hujan-Debit (*Transform Method*), yakni konversi Hujan Efektif (P_e) menjadi Hidrograf Limpasan Langsung (*Direct Runoff Hydrograph*). Untuk wilayah hulu yang rentan banjir bandang dan seringkali mengalami keterbatasan data debit terukur, metodologi yang paling andal adalah menggunakan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS). HSS adalah representasi matematis dari respons unik suatu Daerah Aliran Sungai (DAS) terhadap input hujan, memungkinkan prediksi limpasan hanya dari parameter fisik DAS.

Hidrograf Satuan (HS) didefinisikan secara fundamental sebagai hidrograf limpasan langsung yang dihasilkan oleh 1 satuan (misalnya 1 cm atau 1 inci) Hujan Efektif yang terdistribusi secara merata di seluruh DAS dalam durasi waktu tertentu. HS mencerminkan semua karakteristik fisik DAS baik morfologi, tata guna lahan, dan tanah yang memengaruhi waktu dan besaran limpasan. HS menjadi fungsi transfer sistem DAS.

HS bekerja berdasarkan prinsip Linearitas dan Superposisi. Prinsip linearitas mengasumsikan bahwa perubahan besaran hujan efektif menghasilkan perubahan proporsional pada limpasan. Prinsip superposisi memungkinkan

hidrograf banjir total dihitung dengan menjumlahkan (mengkonvolusikan) respon HS yang dihasilkan dari setiap blok waktu hujan efektif, ($P_{e,i}$) digeser sesuai urutan waktu kejadiannya.

$$DRH(t) = \sum_{i=1}^n P_{e,i} \cdot U(t - i)$$

Dimana :

DRH (t) = hidrograf limpasan langsung

$P_{e,i}$ = hujan efektif pada interval i

U = ordinat hidrograf satuan

HS empiri yang diukur langsung dari data hujan dan debit dalam praktiknya sulit didapatkan untuk wilayah hulu. Oleh karena itu, Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) dikembangkan. HSS adalah prosedur untuk mensintesis HS berdasarkan parameter morfometri DAS, yang diekstrak dari peta topografi (DEM) dan peta tematik. HSS memastikan bahwa bentuk dan skala waktu hidrograf yang dihasilkan secara fisik konsisten dengan karakteristik DAS.

Perangkat lunak pemodelan seperti HEC-HMS menyediakan beberapa metode HSS, termasuk Snyder, Clark, dan SCS. Pemilihan HSS didasarkan pada karakteristik DAS; untuk DAS kecil, curam, dan *flashy* yang khas di wilayah hulu, HSS-SCS sering menjadi pilihan karena hanya bergantung pada parameter fisik kunci yang mudah diestimasi (Sabriyati & Hadi, 2022).

Karakteristik kritis yang dihitung dari HSS adalah Waktu Menuju Puncak, yaitu waktu dari awal limpasan hingga Q_p . Waktu Menuju Puncak yang sangat singkat adalah indikator utama risiko banjir bandang. HSS yang dipilih harus mampu menghasilkan Waktu Menuju Puncak yang realistis, jika yang dihasilkan terlalu panjang, model akan gagal memprediksi gelombang banjir bandang yang cepat dan ekstrem.

Fungsi HSS juga menjamin kekonsistenan volume. Total area di bawah kurva HSS harus setara dengan volume 1 satuan limpasan di seluruh luas DAS. Dalam sistem satuan metrik, ini berarti area tersebut harus setara dengan 1 cm

dikalikan luas DAS dalam satuan cm^2 . Persyaratan ini memastikan bahwa *Transform Method* tidak melanggar hukum konservasi massa air.

HSS menyediakan kerangka kerja yang fleksibel untuk memproyeksikan berbagai skenario risiko. Bentuk HSS, yang mencerminkan karakteristik fisik DAS, tetap konstan. Perubahan risiko diakomodasi dengan mengubah input Hujan Efektif (P_e) yang berasal dari analisis frekuensi hujan rencana ($T = 25, 50, 100$ tahun) dan *Loss Method* (SCS-CN) sehingga dihasilkan hidrograf banjir rencana yang sesuai.

Keberhasilan HSS bergantung pada asumsi bahwa DAS beroperasi sebagai sistem linier dan invarian terhadap waktu. Meskipun realitasnya DAS adalah sistem non-linier, pendekatan linieritas HS telah terbukti memadai dan efektif untuk tujuan rekayasa hidrologi dan simulasi banjir bandang, memberikan keseimbangan antara akurasi model dan ketersediaan data (Pamungkas et al., 2019).

Oleh karena itu, HSS adalah landasan teoretis untuk mengubah data hujan menjadi debit puncak. Dalam penelitian ini, HSS-SCS dipilih karena kemampuannya mengatasi kekurangan data hidrometri di wilayah hulu dan menghasilkan hidrograf dengan waktu respons cepat, yang merupakan syarat wajib untuk simulasi Debit Puncak Banjir Bandang.

2.3.2 Penggunaan HSS-SCS dan parameter kunci Waktu Tunda (T_L)

Hidrograf Satuan Sintetis SCS (HSS-SCS) adalah salah satu model transformasi paling andal dalam hidrologi rekayasa, terutama diaplikasikan pada DAS yang tidak memiliki stasiun pengamatan debit terukur. Model ini dikembangkan oleh US *Soil Conservation Service* (sekarang NRCS) dan menggunakan hidrograf standar berdimensi yang dibangun dari analisis data empiris berbagai DAS di Amerika Serikat. Keunggulannya adalah ketergantungannya pada satu parameter waktu kritis: Waktu Tunda (Lag Time, T_L).

Waktu Tunda (T_L) adalah interval waktu yang diukur dari pusat massa hujan efektif hingga puncak hidrograf limpasan langsung. T_L merepresentasikan

waktu yang dibutuhkan air rata-rata untuk mengalir dari seluruh DAS ke outlet. Parameter ini sangat penting karena berfungsi sebagai faktor penskalaan (baik horizontal maupun vertikal) untuk hidrograf SCS standar agar sesuai dengan karakteristik waktu dan debit DAS spesifik yang disimulasikan.

T_L dalam HSS-SCS memiliki hubungan langsung dengan Waktu Menuju Puncak Hidrograf Satuan ($T_{P,U}$): $T_{P,U} = T_L + D/2$, di mana D adalah durasi satuan hujan. Karena hidrograf SCS standar memiliki bentuk tetap, T_L yang kecil (khas wilayah hulu) secara otomatis akan menghasilkan $T_{P,U}$ yang kecil, dan sesuai dengan prinsip volume, ini akan menghasilkan Debit Puncak Satuan $Q_{P,U}$ yang tinggi.

Nilai T_L tidak diukur, melainkan diestimasi dari karakteristik fisik DAS. Formula SCS yang umum digunakan untuk menghitung T_L (dalam jam) mengintegrasikan tiga parameter fisik: panjang hidrolik DAS (L), persentase kemiringan rata-rata DAS (Y), dan potensi retensi maksimum (S) yang diturunkan dari *Curve Number* (CN).

Persamaan SCS untuk T_L menunjukkan secara eksplisit bagaimana morfometri dan kondisi permukaan DAS hulu memengaruhi respons banjir:

$$T_L = \frac{L^{0.8}(S + 1)^{0.7}}{1900Y^{0.5}} \text{ (dalam jam, dengan satuan kaki)}$$

T_L berbanding terbalik dengan kemiringan (Y) dan berbanding lurus dengan panjang sungai (L) dan potensi retensi (S). Di wilayah hulu yang curam (Y besar) dan memiliki CN tinggi (S kecil), T_L akan sangat pendek, membenarkan klasifikasi respons DAS sebagai banjir bandang (Sabriyati & Hadi, 2022).

Penggunaan T_L dalam model HEC-HMS bersifat deterministik. Setelah T_L dihitung dan dimasukkan ke dalam modul Transform SCS, HEC-HMS menggunakan nilai tersebut untuk menyesuaikan skala hidrograf standar. Proses ini memungkinkan model untuk secara efisien dan konsisten menghasilkan hidrograf limpasan yang secara fisik terikat pada kondisi morfologi dan tata guna lahan yang telah ditetapkan.

Penelitian menunjukkan bahwa T_L adalah salah satu parameter paling sensitif dalam model HEC-HMS-SCS. Variasi kecil pada T_L dapat menyebabkan perubahan signifikan pada waktu dan besaran debit puncak. Oleh karena itu, keakuratan data input yang digunakan untuk menghitung T_L khususnya L dan Y yang diekstrak dari DEM sangat penting untuk menjamin validitas simulasi Q_p banjir bandang (Sabriyati & Hadi, 2022).

Model HSS-SCS juga terbukti efektif untuk simulasi dampak perubahan tata guna lahan. Peningkatan urbanisasi atau deforestasi di wilayah hulu akan menaikkan nilai CN (menurunkan S), yang, berdasarkan formula T_L , akan memperpendek T_L . T_L yang semakin pendek menghasilkan Q_p yang semakin besar, secara kuantitatif memodelkan bagaimana intervensi manusia meningkatkan kerentanan DAS terhadap banjir bandang.

Validasi HSS-SCS dilakukan dengan membandingkan hidrograf simulasi dengan data historis (jika ada) atau melalui validasi komparatif dengan metode HSS lainnya atau metode empiris regional. Keberhasilan validasi diukur dengan metrik kinerja, di mana model harus menunjukkan kinerja yang memuaskan, ditunjukkan dengan nilai *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE) yang melebihi batas penerimaan akademik (misalnya $NSE \geq 0,5$) (Hadiani et al., 2024).

Secara keseluruhan, HSS-SCS dipilih sebagai Transform Method karena ketergantungannya pada parameter T_L . T_L menjadi jembatan yang kuat antara data fisik DAS hulu dan prediksi debit puncak, memungkinkan simulasi hidrologi yang akurat dan berbasis ilmiah untuk penentuan Q_p banjir bandang dalam kerangka pemodelan HEC-HMS.

2.4 Pemodelan HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*)

HEC-HMS adalah perangkat lunak komputer open source yang dikembangkan oleh *US Army Corps of Engineering* Pusat Rekayasa Hidrologi yang membantu dalam mensimulasikan siklus hidrologi (presipitasi, evapotranspirasi, infiltrasi, limpasan permukaan dan aliran dasar) dari suatu

daerah tangkapan dengan menggambarkan sifat fisik dan meteorologi. Berbagai pilihan model matematika untuk semua komponen hidrologi yang secara konseptual mewakili perilaku DAS tergabung dalam program ini. Program ini menggunakan model terpisah untuk mewakili setiap komponen proses limpasan seperti model untuk menghitung volume limpasan, model aliran limpasan langsung/aliran dasar/saluran serta model alternatif untuk memperhitungkan kerugian kumulatif misalnya: model kerugian SCS CN. Kemudian, menghitung volume limpasan dengan mengurangi kerugian (infiltrasi, penyimpanan, intersepsi, penguapan dll) dari curah hujan (Khadka & Bhaukajee, 2018).

- a. *Basin Models*: Area fisik cekungan dengan elemen hidrologi (*subbasin, junction, reach, reservoir*) dan jaringan drainase daerah tangkapan termasuk dalam model cekungan.
- b. *Meteorological Models*: Informasi mengenai komponen meteorologi seperti suhu, evapotranspirasi curah hujan, sinar matahari, kelembaban, pencairan salju didefinisikan dalam model meteorologi. HEC-HMS menyediakan berbagai pilihan untuk mendefinisikan setiap elemen meteorologi.
- c. *Control Specification*: Tanggal dan waktu mulai, tanggal dan waktu berakhir dan langkah waktu komputasi untuk simulasi ditentukan dalam spesifikasi kontrol.
- d. *Timeseries Data*: Data deret waktu nyata untuk semua elemen meteorologi yang ditentukan dalam model meteorologi dimasukkan ke bagian ini. Selain elemen meteorologi yang disebutkan di atas, data debit juga dapat diberikan untuk kalibrasi dan simulasi model yang dikembangkan. Ini dapat dipasok ke perangkat lunak secara manual atau dalam bentuk HEC-DSS, Sistem Penyimpanan Data Pusat Rekayasa Hidrologi.
- e. *Paired Data*: Data meteorologi dalam bentuk tabel/grafik disediakan sebagai data berpasangan.

Dalam HEC-HMS, prosedur hidrologi perubahan curah hujan menjadi limpasan telah diwakili oleh empat proses sebagai berikut :

1. *Loss method*

Model ini menghitung volume limpasan daerah tangkapan dengan menghitung kehilangan air melalui intersepsi, penyimpanan permukaan, infiltrasi, penguapan, transpirasi dan kemudian mengurangkannya ke curah hujan pada setiap langkah waktu. HEC-HMS menyediakan lima opsi untuk menghitung kehilangan air .

2. *Transform method*

Metode transformasi adalah suatu pendekatan untuk menghitung limpasan langsung di outlet daerah aliran sungai dari kelebihan curah hujan yang jatuh di atasnya dan ini dilakukan berdasarkan prinsip hidrograf satuan. Hidrograf satuan dapat didefinisikan sebagai hidrograf limpasan yang dihasilkan dari kelebihan curah hujan dengan satuan kedalaman yang terjadi di atas DAS. Teori hidrograf satuan adalah kelebihan curah hujan dan limpasan yang dihasilkan berbanding lurus satu sama lain, kelebihan curah hujan didistribusikan secara merata terhadap waktu dan ruang di atas daerah aliran sungai, dan limpasan yang dihasilkan dari kelebihan curah hujan tidak tergantung pada waktu kejadian dan preseden kadar air.

3. *Base-flow Method*

Aliran bawah permukaan di daerah tangkapan diilustrasikan oleh aliran dasar di HEC-HMS. Baseflow terdiri dari interflow dan flow di akuifer airtanah. Kontribusi aliran dasar yang tidak signifikan jika terjadi curah hujan pendek, sehingga dapat diabaikan. Sedangkan pada kejadian curah hujan yang panjang, aliran dasar memberikan kontribusi pada cabang resesi hidrograf dan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap volume banjir.

4. *Route Method*

Perutean banjir adalah suatu teknik penentuan hidrograf aliran pada titik hilir DAS dengan informasi yang baik mengenai hidrograf di hulunya. Ini adalah pendekatan untuk memperkirakan bagaimana besarnya dan kecepatan gelombang banjir bervariasi dari pada titik masuk saat bergerak di sepanjang daerah

tangkapan. Rute banjir di sepanjang daerah tangkapan merupakan fungsi dari karakteristik cekungan seperti kemiringan dan panjang saluran, kekasaran saluran, bentuk saluran, kontrol hilir dan kondisi aliran awal. Pemodelan hidrologi didasarkan pada persamaan kontinuitas sedangkan pemodelan hidrolis didasarkan pada kombinasi persamaan kontinuitas dan momentum yang dikenal sebagai persamaan Saint-Venant.

2.5 Penelitian Terdahulu

Beberapa hasil penelitian yang relevan dan yang pernah dilakukan sebelumnya serta dapat dijadikan referensi dalam penelitian ini disajikan dalam Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penelitian Terdahulu

No	Penulis & Tahun	Judul Penelitian	Metode	Variabel / Instrumen	Hasil Penelitian
1	Sabriyati & Hadi (2023)	Kajian Hidrologi Debit Puncak Penyebab Banjir Bandang Menggunakan Pemodelan HSS-SCS	HEC-HMS, HSS-SCS	Curah hujan, CN, karakteristik DAS	Model HSS-SCS mampu memodelkan debit puncak pada berbagai periode ulang dengan akurat setelah kalibrasi
2	Sabriyati et al. (2022)	Penilaian Bahaya Banjir Bandang Berdasarkan Skenario Genangan Menggunakan Analisis Spasial dan Pemodelan Hidrodinamik	HEC-HMS, HEC-RAS	Debit puncak, hujan rencana, morfologi sungai	Menghasilkan peta bahaya banjir bandang dengan variasi kedalaman dan kecepatan aliran
3	Destro et al. (2018)	Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: Application on an alpine extreme flood event	Pemodelan hidrologi–hidraulik terintegrasi; coupling model respons banjir bandang & debris flow	Curah hujan ekstrem, karakteristik DAS alpine, respon aliran, parameter debris flow	Model terkopel mampu memprediksi debit puncak banjir bandang dan kejadian debris flow secara bersamaan, meningkatkan akurasi prediksi pada kejadian ekstrem di wilayah pegunungan
4	Rinat et al. (2018)	Controls of flash flood peak discharge in Mediterranean basins and the special role of runoff-contributing areas	Analisis statistik hidrologi & pemodelan hubungan fisiografi DAS-debit puncak	Luas area berkontribusi limpasan, intensitas hujan, karakteristik topografi, debit puncak	Faktor paling dominan yang mengontrol debit puncak adalah ukuran dan distribusi area penyumbang limpasan; menemukan bahwa “runoff-contributing areas” menentukan besarnya debit puncak lebih daripada parameter DAS lain
5	Wang et al. (2024)	Prediction of flash flood peak discharge in hilly areas with ungauged basins based on machine learning	Machine Learning (Random Forest, SVM, ANN); estimasi debit puncak di daerah tak terukur	Curah hujan, kemiringan, tutupan lahan, bentuk DAS, parameter geomorfologi	Model ML menghasilkan prediksi debit puncak paling akurat pada DAS perbukitan tidak terukur; Random Forest memberikan performa terbaik dibandingkan metode lain

Sumber: Hasil penelitian sebelumnya diolah (2025)

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif-deterministik dengan fokus pada pemodelan hidrologi spasial. Pendekatan deterministik dipilih karena tujuan utamanya adalah mensimulasikan proses fisis hujan-limpasan berdasarkan input data yang terukur dan hubungan matematis yang terdefinisi dengan baik, untuk mendapatkan nilai Debit Puncak Banjir (Q_p) sebagai output yang terukur. Pemodelan spasial dilakukan melalui integrasi Sistem Informasi Geografis (SIG) dan perangkat lunak hidrologi.

Lokasi studi yang akan dipilih adalah satu Sub-Daerah Aliran Sungai (Sub-DAS) di Wilayah Hulu Bojonegoro Selatan yang memiliki riwayat kejadian banjir bandang berulang dan memiliki karakteristik morfometri yang curam (*flashy response*). Pemilihan lokasi ini sangat penting untuk memastikan relevansi hasil simulasi dengan fenomena bencana alam yang sebenarnya.

Kriteria utama penentuan lokasi penelitian adalah kemiringan lereng rata-rata DAS yang curam (umumnya $> 15\%$), luas DAS yang relatif kecil (misalnya $< 100 \text{ km}^2$), dan keterbatasan data debit terukur di outlet DAS. Karakteristik ini membenarkan penggunaan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) dan model semi-terdistribusi seperti HEC-HMS.

Penelitian akan dibagi menjadi tiga tahap utama: (1) Tahap Pengumpulan dan Pra-Pemrosesan Data, yang meliputi analisis data geospasial (DEM, Tata Guna Lahan) dan hidrometeorologi (Curah Hujan); (2) Tahap Pemodelan dan Simulasi HEC-HMS, termasuk perhitungan CN dan T_L , serta eksekusi skenario hujan rencana; dan (3) Tahap Kalibrasi, Validasi, dan Analisis Hasil, termasuk pengujian kinerja model dan perumusan rekomendasi.

Data yang digunakan bersifat data sekunder yang diolah dan diintegrasikan. Data geospasial akan diperoleh dari instansi pemerintah

(BIG, Kementerian LHK), sementara data hidrometeorologi (Curah Hujan Harian Maksimum Tahunan) akan diperoleh dari BMKG atau stasiun penakar hujan terdekat. Validitas sumber data sekunder ini wajib dipastikan melalui verifikasi akurasi geografis dan konsistensi temporal.

Pemodelan hidrologi dilakukan menggunakan perangkat lunak HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*) versi terbaru. Pemilihan HEC-HMS didasarkan pada kemampuannya untuk memodelkan proses hujan-limpasan (*Loss* dan *Transform*) secara terintegrasi dan semi-terdistribusi, yang sangat sesuai untuk mereplikasi respons DAS yang cepat (Hadiani et al., 2024).

Integrasi spasial merupakan keharusan metodologis. Sistem Informasi Geografis (SIG), khususnya perangkat lunak QGIS dengan akan digunakan untuk semua pekerjaan pra-pemodelan. QGIS berfungsi sebagai interface yang secara otomatis mengekstrak parameter fisik DAS dari DEM dan peta tematik menjadi format input yang dibutuhkan oleh HEC-HMS (Pamungkas et al., 2019).

Penelitian ini bersifat event-based dan frequency-based. Event-based digunakan untuk kalibrasi dan validasi model dengan mereplikasi kejadian banjir historis (jika data hujan tersedia), sementara *frequency-based* digunakan untuk simulasi Debit Puncak Rencana pada berbagai periode ulang ($T = 2, 5, 10, 25, 50, 100$ tahun).

Aspek waktu dalam penelitian ini sangat krusial. Interval waktu simulasi (*Time Step*) dalam HEC-HMS akan diatur secara pendek (misalnya 5 atau 10 menit). Interval pendek ini diperlukan untuk menangkap dinamika Waktu Menuju Puncak yang sangat singkat, yang merupakan karakteristik utama dari banjir bandang. Interval yang lebih lama dapat menyebabkan distorsi dan meremehkan besaran debit puncak.

Hasil akhir penelitian akan berupa nilai Debit Puncak Rencana yang tervalidasi merupakan informasi kuantitatif untuk kebutuhan rekayasa. Hasil ini tidak hanya berhenti pada angka debit, tetapi diperluas menjadi rekomendasi teknis mitigasi (misalnya, penentuan batas sempadan sungai

baru atau spesifikasi kapasitas bangunan pengendali banjir) berdasarkan tingkat risiko hidrologi yang dihitung.

3.2 Pengumpulan dan Analisis Data

Pengumpulan dan analisis data yang dilakukan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Pengumpulan Data Topografi (DEM) : Data dasar yang paling utama adalah *Digital Elevation Model* (DEM) dengan resolusi spasial tinggi (misalnya 5 meter atau lebih baik). DEM akan digunakan untuk seluruh analisis morfometri dan hidrologi. Data DEM diperoleh dari Badan Informasi Geospasial (BIG) atau sumber terpercaya lainnya, dan harus diuji koreksi kesalahan topologinya sebelum digunakan dalam SIG.
2. Pengumpulan Data Hujan : Data Curah Hujan Harian Maksimum Tahunan dari stasiun penakar hujan terdekat (minimal 15 - 20 tahun data) dikumpulkan. Konsistensi data diuji menggunakan Uji Konsistensi Ganda (*Double Mass Curve*) untuk memastikan keandalan stasiun. Data jam-jaman dari kejadian banjir bandang historis juga diupayakan untuk keperluan kalibrasi model.
3. Analisis Frekuensi Curah Hujan Rencana : Data Curah Hujan Harian Maksimum Tahunan akan diolah dengan analisis frekuensi statistik. Metode yang umum digunakan adalah Gumbel Tipe I atau Log Pearson Tipe III. Uji kecocokan distribusi (*Goodness of Fit*) dilakukan menggunakan uji Smirnov-Kolmogorov atau Chi-Kuadrat untuk memilih distribusi terbaik, yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai Curah Hujan Rencana untuk periode ulang 2, 5, 10, 25, 50, dan 100 tahun (Kusumastuti et al., 2021).
4. Transformasi Hujan menjadi Hyetograph : Nilai Curah Hujan Rencana yang diperoleh harus diubah menjadi Hyetograph (grafik intensitas hujan terhadap waktu). Intensitas hujan (I) dihitung menggunakan persamaan Mononobe atau kurva IDF regional. Hyetograph hujan rencana kemudian disusun menggunakan metode Alternating Block Method atau SCS Type Distribution

yang sesuai dengan karakteristik hujan di Indonesia, yang akan menjadi input untuk modul Meteorologic Model di HEC-HMS.

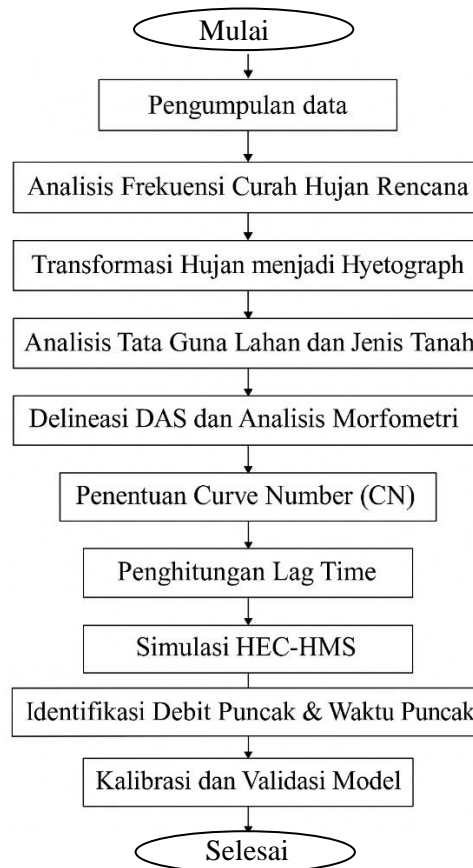
5. Analisis Tata Guna Lahan dan Jenis Tanah : Peta Tata Guna Lahan terbaru dan Peta Jenis Tanah (berskala minimal 1:50.000) dikumpulkan. Peta Jenis Tanah harus dikonversi dan diklasifikasikan menjadi Kelompok Tanah Hidrologi (KTH) A, B, C, atau D, sesuai dengan literatur hidrologi. Klasifikasi KTH ini sangat kritis untuk menentukan parameter limpasan.
6. Delineasi DAS dan Analisis Morfometri (QGIS) : DEM dimasukkan ke QGIS. Proses hidrologi meliputi Fill Sinks, Flow Direction, Flow Accumulation, dan penentuan ambang batas untuk delineasi batas Sub-DAS secara otomatis. QGIS kemudian mengekstrak parameter morfometri penting seperti luas DAS, panjang sungai terpanjang (L), dan kemiringan rata-rata saluran (Y).
7. Penentuan *Curve Number* (CN) Spasial : Peta Tata Guna Lahan dan Peta KTH di-overlay di SIG. Nilai CN untuk setiap kombinasi tutupan lahan dan KTH ditetapkan menggunakan Tabel Standar SCS, disesuaikan dengan kondisi Indonesia. CN Rata-Rata Tertimbang (*Area-Weighted CN*) dihitung untuk setiap Sub-DAS, yang merupakan input untuk *Loss Method* (SCS-CN) di HEC-HMS.
8. Penghitungan Waktu Tunda (Lag Time, T_L) : Parameter T_L dihitung menggunakan formula empiris *SCS Lag Equation* atau modifikasi yang relevan, dengan input L, Y, dan nilai S (yang merupakan fungsi dari CN). T_L ini adalah parameter kunci untuk *Transform Method* (HSS-SCS) dan secara langsung memengaruhi waktu respons DAS (Sabriyati & Hadi, 2022).
9. Struktur Model HEC-HMS : Semua parameter yang telah dianalisis (CN, T_L , Hyetograph) diinput ke dalam struktur model HEC-HMS. Modul yang digunakan: *Loss Method* (SCS-CN), *Transform Method* (HSS-SCS), dan *Routing Method* (Kinematic Wave atau Muskingum-Cunge untuk segmen sungai yang ada) (Hadiani et al., 2024). Spesifikasi kontrol diatur dengan interval waktu yang singkat.

10. Eksekusi Simulasi HEC-HMS Rencana : Model HEC-HMS yang telah dikonstruksi dan terparameterisasi dieksekusi enam kali, masing-masing dengan input Hyetograph Hujan Rencana untuk periode ulang $T = 100, 500$ dan 1000 tahun. Output utama dari setiap simulasi adalah Hidrograf Banjir Rencana di outlet Sub-DAS.
11. Identifikasi Debit Puncak dan Waktu Puncak : Dari setiap hidrograf output, nilai maksimum debit (Debit Puncak) dan waktu yang dibutuhkan untuk mencapai puncak tersebut (Waktu Menuju Puncak) dicatat. Analisis Waktu Menuju Puncak sangat penting; jika kurang dari 6 jam maka secara kuantitatif membenarkan simulasi fenomena banjir bandang.
12. Kalibrasi Model (*Event-Based*) : Jika data debit historis tersedia, model akan dikalibrasi. Kalibrasi dilakukan dengan menjalankan simulasi menggunakan data hujan dari kejadian historis, dan membandingkan hidrograf simulasi dengan hidrograf observasi. Penyesuaian iteratif dilakukan pada parameter sensitif (CN dan T_L) hingga kecocokan antara hidrograf simulasi dan observasi tercapai (Kusumastuti et al., 2021).
13. Validasi Kinerja Model : Kinerja model dievaluasi secara kuantitatif menggunakan metrik statistik standar. Metrik utama yang digunakan adalah *Nash-Sutcliffe Efficiency* (NSE), yang mengukur kecocokan antara hidrograf simulasi dan observasi.
14. Validasi Lanjut (Komparatif): Jika data debit observasi tidak tersedia, validasi dilakukan secara komparatif. Debit Puncak hasil HEC-HMS akan dibandingkan dengan hasil perhitungan dari metode empiris regional yang lazim digunakan (misalnya Metode Nakayasu atau Rational Formula yang dimodifikasi). Perbandingan ini memastikan bahwa order of magnitude berada dalam rentang yang wajar sesuai praktik rekayasa hidrologi regional.
15. Analisis Karakteristik Hidrograf Banjir: Selain Q_p , bentuk hidrograf, terutama *rising limb* (lengan naik) dan Waktu Puncak akan dianalisis. *Rising limb* yang sangat curam menunjukkan respon DAS yang cepat dan kecepatan aliran yang tinggi, yang menjadi data penting untuk mendesain bangunan pengendali energi air (Sabriyati & Hadi, 2022).

16. Penyusunan Tabel Debit Puncak Rencana : Hasil akhir simulasi Debit Puncak Rencana dalam $m^3/detik$ untuk setiap periode ulang akan direkapitulasi dalam bentuk tabel standar. Tabel ini merupakan data teknis utama yang akan direkomendasikan untuk digunakan oleh pihak terkait.

3.3 Tahapan Penelitian

Pelaksanaan penelitian ini memerlukan suatu tahapan yang membantu dalam menentukan langkah-langkah penelitian. Dengan adanya tahapan penelitian diharapkan dapat memperlancar serta mempermudah dalam mencapai sasaran sesuai yang diharapkan. Berikut merupakan tahapan penelitian yang akan dilakukan oleh penulis yang tersaji pada bagan alir tahapan pada Gambar 3.1.

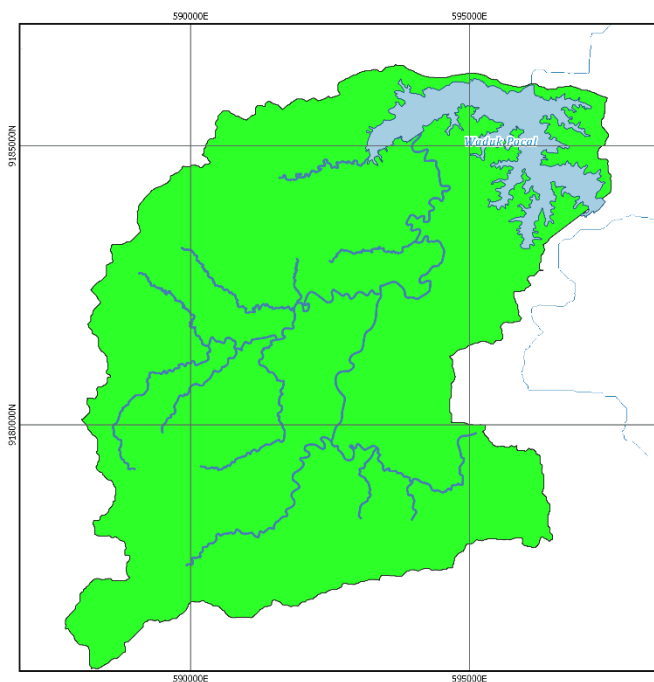


Gambar 3.1 Bagan Alir Tahapan Penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Morfometri DAS

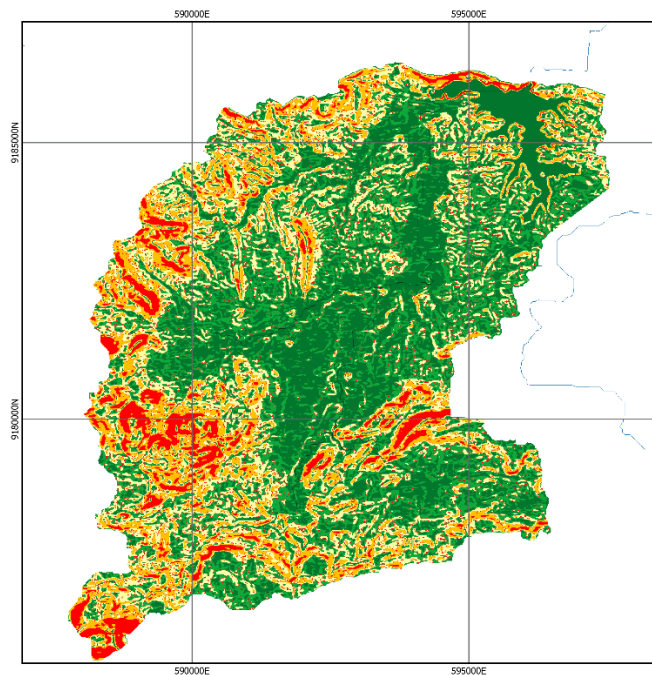
Proses delineasi otomatis menggunakan data Digital Elevation Model (DEM) berhasil mengidentifikasi batas-batas hidrologis di wilayah hulu Bojonegoro Selatan, yang menghasilkan total luasan DAS sebesar 67,09 km². Visualisasi spasial pada Gambar 4.1 menunjukkan bentuk DAS yang cenderung melebar di bagian tengah dengan jaringan drainase yang rapat, mencerminkan karakteristik wilayah hulu yang berfungsi sebagai daerah tangkapan air utama bagi Bendungan Pacal. Pola aliran yang terbentuk memberikan indikasi awal mengenai waktu konsentrasi (*tc*) dan kecepatan respons DAS terhadap curah hujan yang jatuh di wilayah tersebut.



Gambar 4.1 Peta Hasil Delineasi DAS Pacal Hulu

Analisis peta tersebut menjadi dasar penting dalam penentuan parameter hidrologi selanjutnya, terutama untuk pemodelan HEC-HMS. Dengan luasan mencapai 67,09 km², karakteristik morfometri ini akan diintegrasikan dengan data tata guna lahan dan jenis tanah untuk menghasilkan nilai *Curve Number* (CN)

yang akurat. Informasi spasial ini sangat krusial dalam mensimulasikan debit puncak banjir bandang, karena bentuk dan luasan DAS secara langsung memengaruhi volume limpasan permukaan dan besarnya debit puncak (Q_p) yang akan dihasilkan pada berbagai periode ulang.



Gambar 4.2 Topografi DAS Pacal Hulu

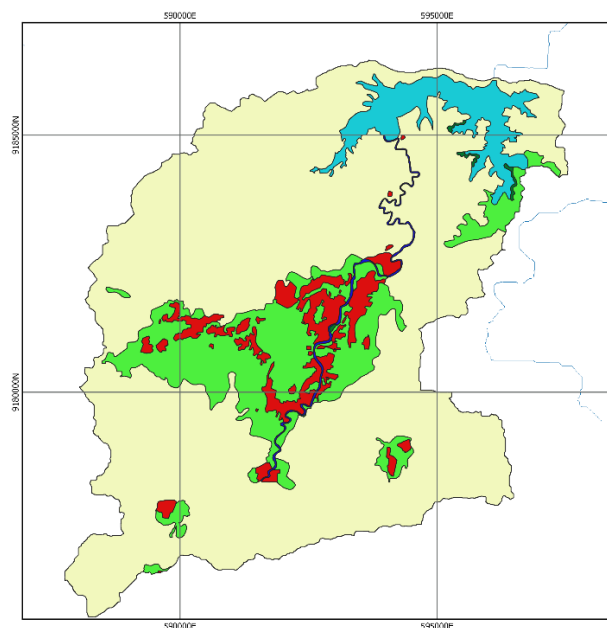
Peta elevasi pada Gambar 4.2 menunjukkan variasi topografi yang signifikan di wilayah Hulu DAS Pacal, di mana elevasi tertinggi didominasi oleh warna merah yang melambangkan daerah perbukitan curam di sisi barat dan selatan. Gradasi warna dari hijau tua ke merah menggambarkan transisi ketinggian yang ekstrem, yang secara hidrologis mempercepat waktu limpasan (*runoff*) menuju badan sungai utama. Kondisi topografi yang didominasi oleh kelerengan terjal ini menjadi faktor pemicu utama terjadinya banjir bandang, karena energi potensial air yang jatuh di ketinggian akan berubah menjadi energi kinetik yang besar saat mengalir ke daerah yang lebih rendah.

Selain itu, distribusi elevasi ini secara langsung mempengaruhi nilai parameter *Time of Concentration* (t_c) dan *Lag Time* (TL) dalam model HEC-HMS. Wilayah dengan elevasi tinggi dan kemiringan lereng yang curam memiliki kapasitas retensi air yang rendah, sehingga hampir seluruh curah hujan efektif

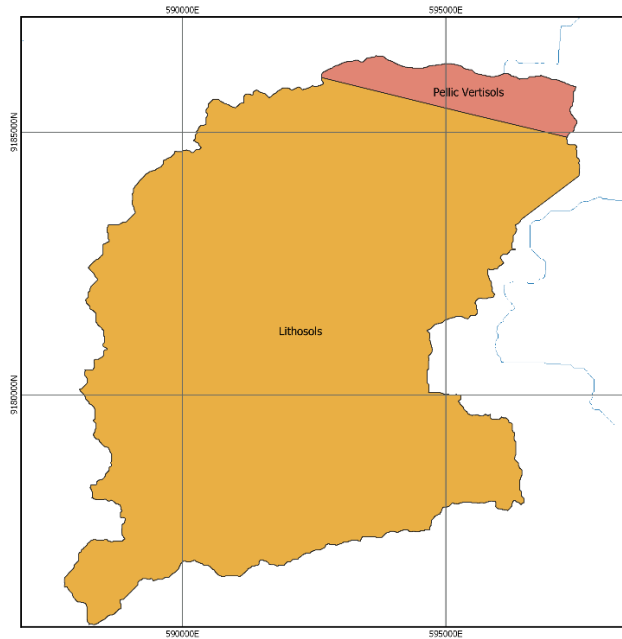
akan segera terkonversi menjadi debit aliran permukaan. Data elevasi ini, yang diekstraksi dari analisis DEM, menjadi input kritikal dalam menentukan akumulasi aliran dan arah aliran (*flow direction*), yang pada akhirnya menentukan titik-titik rawan genangan dan besarnya debit puncak (Q_p) yang terakumulasi di outlet hulu DAS Pacal.

4.2 Parameter Hidrologi DAS

Penentuan nilai *Curve Number* (CN) dilakukan melalui teknik *overlay* (tumpang susun) antara peta tata guna lahan dan peta kelompok tanah hidrologis (*Hydrologic Soil Group*). Berdasarkan pengamatan spasial pada Gambar 4.3 tersaji dalam peta tata guna lahan, wilayah hulu DAS Pacal didominasi oleh kawasan hutan dan lahan pertanian kering, dengan beberapa titik pemukiman yang tersebar secara sporadis. Karakteristik penutupan lahan ini, dikombinasikan dengan data jenis tanah terlihat pada Gambar 4.4 yang didominasi oleh tanah Lithosol dan Pelic Vertisols, memberikan gambaran mengenai besarnya potensi air hujan yang akan terserap ke dalam tanah maupun yang akan menjadi limpasan permukaan. Besar luasan masing-masing jenis penggunaan lahan disajikan pada Tabel 4.1 sedangkan untuk jenis tanah pada Tabel 4.2.



Gambar 4.3 Penggunaan Lahan DAS Pacal Hulu



Gambar 4.4 Jenis Tanah DAS Pacal Hulu

Tabel 4.1 Luasan Penggunaan Lahan DAS Pacal Hulu

No	Penggunaan Lahan	Luas (km ²)	Persentase (%)
1	<i>Agriculture</i>	9,79	14,59
2	<i>Land without scrub</i>	0,10	0,16
3	<i>Reservoir</i>	3,18	4,75
4	<i>River</i>	0,34	0,51
5	<i>Scrub forest</i>	50,60	75,42
6	<i>Village</i>	3,07	4,57
Total		67,09	100,00

Tabel 4.2 Luasan Jenis Tanah DAS Pacal Hulu

No	Jenis Tanah	HSGS	Luas (m ²)	Persentase (%)
1	Lithosols	D	3,54	5,27
2	Pellic Vertisols	D	63,55	94,73
Total			67,09	100,00

Secara hidrologis, jenis tanah di wilayah ini termasuk dalam kelompok tanah yang memiliki kapasitas infiltrasi rendah hingga moderat saat jenuh. Hal ini menyebabkan nilai CN komposit di wilayah hulu cenderung tinggi, yang

mengindikasikan bahwa sebagian besar curah hujan akan segera berubah menjadi aliran permukaan (*surface runoff*). Semakin tinggi nilai CN yang dihasilkan dari kombinasi kedua parameter ini, semakin besar volume banjir yang disimulasikan dalam model HEC-HMS. Informasi CN ini menjadi parameter krusial untuk menghitung hujan efektif yang nantinya akan ditransformasikan menjadi debit puncak banjir bandang di outlet DAS. Perhitungan Nilai CN Composite disajikan pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 Nilai Curve Number (CN) Composite

Penggunaan Lahan	Jenis Tanah	Bobot Luasan	Nilai CN	Bobot CN
<i>Agriculture</i>	D	0,146	91	13,28
<i>Land without scrub</i>	D	0,002	83	0,13
<i>Reservoir</i>	D	0,047	100	4,75
<i>River</i>	D	0,005	97	0,50
<i>Scrub forest</i>	D	0,754	67	50,53
<i>Village</i>	D	0,046	91	4,16
CN Composite				73,34

Selain nilai *Curve Number* (CN), penentuan tingkat kedap air (*imperviousness*) pada permukaan tanah merupakan parameter krusial dalam model HEC-HMS untuk memisahkan volume hujan menjadi limpasan langsung dan infiltrasi. Berdasarkan hasil analisis terhadap tata guna lahan di Hulu DAS Pacal, nilai *impervious* dihitung menggunakan bobot luasan pada setiap klasifikasi lahan. Wilayah pemukiman (*village*) dan badan air seperti waduk (*reservoir*) serta sungai (*river*) memberikan kontribusi terbesar terhadap nilai kedap air dengan nilai *impervious* individu masing-masing sebesar 65% dan 100%.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai *Impervious Composite* pada Tabel 4.4 untuk wilayah studi adalah sebesar 8,97%. Angka ini mengindikasikan bahwa sebagian besar wilayah Hulu DAS Pacal masih didominasi oleh permukaan non-kedap air, seperti hutan semak (*scrub forest*) yang memiliki nilai *impervious* 0% namun mencakup bobot luasan terbesar yaitu 0,754. Meskipun persentase total kedap air tergolong rendah, keberadaan area kedap air yang terkonsentrasi pada badan air dan pemukiman tetap memberikan dampak signifikan terhadap

percepatan waktu tiba debit puncak banjir, terutama saat terjadi hujan dengan intensitas tinggi di wilayah hulu.

Tabel 4.4 Nilai Impervious Composite

Penggunaan Lahan	Bobot Luasan	Nilai Impervious	Bobot Impervious
<i>Agriculture</i>	0,146	5	0,73
<i>Land without scrub</i>	0,002	5	0,01
<i>Reservoir</i>	0,047	100	4,75
<i>River</i>	0,005	100	0,51
<i>Scrub forest</i>	0,754	0	0,00
<i>Village</i>	0,046	65	2,97
Impervious Composite			8,97

Nilai Potensi Retensi Maksimum (S) merupakan parameter yang merepresentasikan kemampuan maksimum DAS dalam menyerap dan menahan air hujan sebelum menjadi limpasan permukaan. Berdasarkan nilai CN Composite sebesar 73,34 yang telah dihitung sebelumnya, didapatkan nilai Potensi Retensi (S) sebesar 93,52. Nilai ini menunjukkan kapasitas penyimpanan air di dalam tanah dan permukaan lahan pada Hulu DAS Pacal. Secara hidrologis, nilai retensi yang cukup tinggi ini dipengaruhi oleh dominasi vegetasi berupa hutan semak (*scrub forest*) yang mencakup lebih dari 75% luas wilayah, sehingga memberikan ruang bagi proses infiltrasi dan intersepsi yang signifikan.

Selanjutnya, nilai *Initial Abstraction* (Ia) atau abstraksi awal dihitung untuk mengetahui besarnya curah hujan yang hilang di awal kejadian hujan akibat intersepsi, evaporasi, dan simpanan cekungan sebelum limpasan dimulai. Dari hasil perhitungan model, didapatkan nilai Ia sebesar 18,70. Angka ini menjadi ambang batas penting dalam simulasi HEC-HMS yang mana limpasan permukaan baru akan terbentuk apabila curah hujan yang jatuh telah melampaui nilai 18,70 mm. Besarnya nilai abstraksi awal ini sangat dipengaruhi oleh kondisi tutupan lahan dan tingkat kekeringan tanah awal, yang berperan penting dalam meredam volume banjir pada skala hujan dengan intensitas rendah hingga menengah. Parameter DAS Pacal dapat dilihat pada Tabel 4.5.

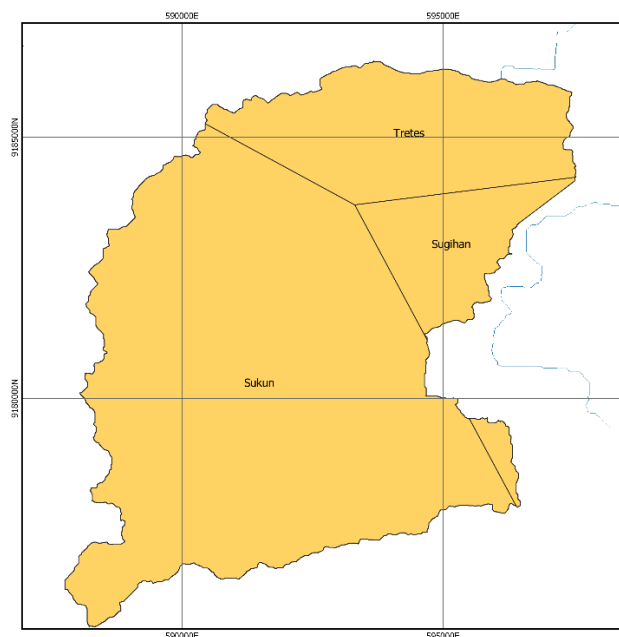
Tabel 4.5 Parameter Hidrologi DAS Pacal Hulu

Parameter	DAS Pacal Hulu
Luas DAS	67,09 km ²
Panjang Sungai (L)	20 km
<i>Curve Number</i> (CN)	73,09
<i>Imprevious</i>	8,97
Potensi Retensi (S)	93,52
<i>Initial Abstraction</i> (Ia)	18,70
<i>Time of Concentration</i> (tc)	3,758

4.3 Analisis Curah Hujan

4.3.1 Hujan Rata-rata Wilayah

Hujan yang digunakan dalam penelitian ini adalah hujan harian dari empat titik stasiun hujan yang berada pada DAS Pacal dengan panjang durasi pencatatan selama 20 tahun (2002 - 2021) yang bersumber dari Balai Besar Wilayah Sungai Bengawan Solo. Perhitungan hujan rata-rata DAS dilakukan menggunakan metode poligon Thiessen. Cara ini lebih efektif untuk memperoleh hujan kawasan. Hasil polygon thiessen dan perhitungan hujan harian rata-rata DAS dengan bantuan perangkat lunak QGIS disajikan pada Gambar 4.5 dan Tabel 4.6 berikut.



Gambar 4.5 Polygon Thiessen

Tabel 4.6 Hujan harian maksimum DAS Pacal Hulu

Tahun	Tanggal	Rh max (mm)	Tahun	Tanggal	Rh max (mm)
2002	05-Apr	64	2012	14-Jan	61
2003	04-Des	61	2013	06-Apr	73
2004	23-Jan	62	2014	19-Des	44
2005	19-Feb	79	2015	31-Des	61
2006	03-Mei	54	2016	10-Nov	74
2007	19-Mar	50	2017	28-Feb	88
2008	31-Jan	51	2018	25-Feb	55
2009	09-Jan	42	2019	03-Nov	70
2010	02-Feb	36	2020	25-Jan	96
2011	01-Feb	49	2021	03-Mar	105

4.3.2 Analisis Frekuensi

Dilakukanya perhitungan untuk analisis frekuensi terhadap hujan harian maksimum DAS dengan menggunakan data hujan hujan maksimum harian tiap tahun dari tahun 2002 sampai 2021 yang dipilih seceara annual maximum series. Menurut uji Chi-Kuadrat diperoleh hasil distribusi terbaik untuk hujan rancangan DAS Pacal menggunakan distribusi Log Pearson III dengan nilai Chi-Kritik sebesar 9,488 dan nilai Chi-Kuadrat sebesar 3,400. Menurut uji Smirnov-Kolmogorov diperoleh hasil distribusi terbaik menggunakan distribusi Log-Pearson III dengan nilai Delta Kritik sebesar 0,34 dan nilai Delta Maksimum sebesar 0,1003. Parameter statistik hujan harian maksimum DAS Pacal adalah sebagai berikut: nilai rata-rata sebesar 63,675, simpangan baku sebesar 18,090, koefisien skewness sebesar 0,737 dan koefisien kurtosis 2,589. Hasil analisis statistik untuk hujan rancangan disajikan pada Tabel 4.7 berikut ini.

Tabel 4.7 Hujan Rancangan DAS Pacal Hulu

Kala Ulang (Tahun)	Tinggi Curah Hujan (Log Pearson III)
100	119,878
500	128,954
1000	150,261

4.3.3 Distribusi Hujan

Data hujan yang tersedia adalah data hujan harian. Hujan harian tersebut setelah dirata-rata dengan metode poligon Thiessen menjadi hujan rata-rata DAS

harian. Proses masukan data hujan pada perangkat lunak HEC-HMS diperlukan hujan jam-jaman, sehingga hujan rata-rata DAS harian maksimum dengan kala ulang tertentu (hujan harian rancangan) perlu didistribusikan menjadi hujan jam jaman. Durasi hujan rancangan dihitung menggunakan metode kirpich yang memberikan hasil sebesar 7 jam dengan interval 15 menit. Pada penelitian ini, banjir kala ulang yang digunakan adalah 100, 500, dan 1000 tahun dikarenakan fungsi dari Waduk Pacal ialah menyuplai air untuk daerah irigasi dan juga luasan tangkapan DAS Pacal tidak terlalu luas, yaitu sekitar 67,09 km². Hasil perhitungan distribusi hujan rancangan menggunakan metode ABM ditunjukkan dalam Tabel 4.8 berikut ini.

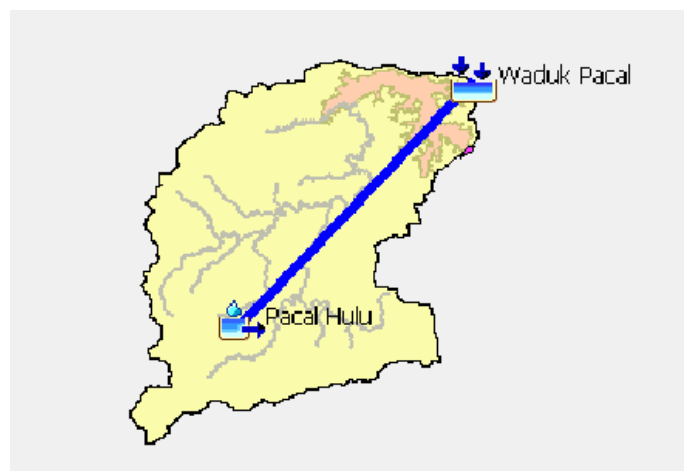
Tabel 4.8 Distribusi Hujan Rancangan Jam-Jaman Interval 15 Menit

Menit	Distribusi hujan jam-jaman (mm)		
	P100	P500	P1000
15	1,78	1,91	2,23
30	1,87	2,01	2,34
45	1,97	2,12	2,47
60	2,09	2,25	2,63
75	2,24	2,40	2,80
90	2,40	2,58	3,01
105	2,61	2,80	3,27
120	2,86	3,07	3,58
135	3,18	3,42	3,98
150	3,61	3,88	4,53
165	4,23	4,55	5,30
180	5,20	5,60	6,52
195	7,05	7,58	8,84
210	12,63	13,58	15,83
225	48,57	52,25	60,89
240	8,86	9,53	11,10
255	5,95	6,40	7,46
270	4,65	5,01	5,83
285	3,89	4,18	4,88
300	3,38	3,63	4,23
315	3,01	3,23	3,77
330	2,72	2,93	3,41
345	2,50	2,69	3,13
360	2,32	2,49	2,90
375	2,16	2,33	2,71
390	2,03	2,19	2,55
405	1,92	2,06	2,41
420	1,82	1,96	2,28

4.4 Penyiapan Model Simulasi Hidrologi

Tahap penyiapan model simulasi merupakan langkah krusial untuk mengintegrasikan seluruh parameter yang telah dihitung ke dalam sistem perangkat lunak HEC-HMS ditunjukkan pada Gambar 4.6. Pada tahap ini, dilakukan pembuatan skema model yang merepresentasikan kondisi aktual di lapangan, yang terdiri dari komponen utama berupa Sub-basin (Hulu DAS Pacal) dan Reach yang menghubungkan aliran menuju titik keluaran (outlet) di Waduk Pacal. Skema ini disusun berdasarkan hasil delineasi otomatis, di mana elemen sub-basin mewakili area tangkapan hujan sebesar 67,09 km² dan elemen reach merepresentasikan panjang sungai utama sejauh 20 km yang menjadi jalur utama transportasi debit banjir.

Dalam pengaturannya, model ini menggunakan metode *SCS Curve Number* sebagai *Loss Method* untuk menghitung infiltrasi, serta metode *SCS Unit Hydrograph* sebagai *Transform Method* untuk mengonversi curah hujan efektif menjadi hidrograf banjir. Seluruh parameter yang telah dihitung sebelumnya, seperti nilai *CN Composite* (73,09), persentase *Impervious* (8,97%), serta nilai *Initial Abstraction* (18,70), diinput ke dalam setiap elemen model untuk memastikan simulasi berjalan sesuai dengan karakteristik fisik wilayah hulu. Penyiapan model yang presisi ini sangat penting agar simulasi mampu menangkap fenomena banjir bandang dengan akurat, terutama dalam memprediksi besarnya debit puncak (Q_p) pada interval waktu pendek yaitu 15 menit.

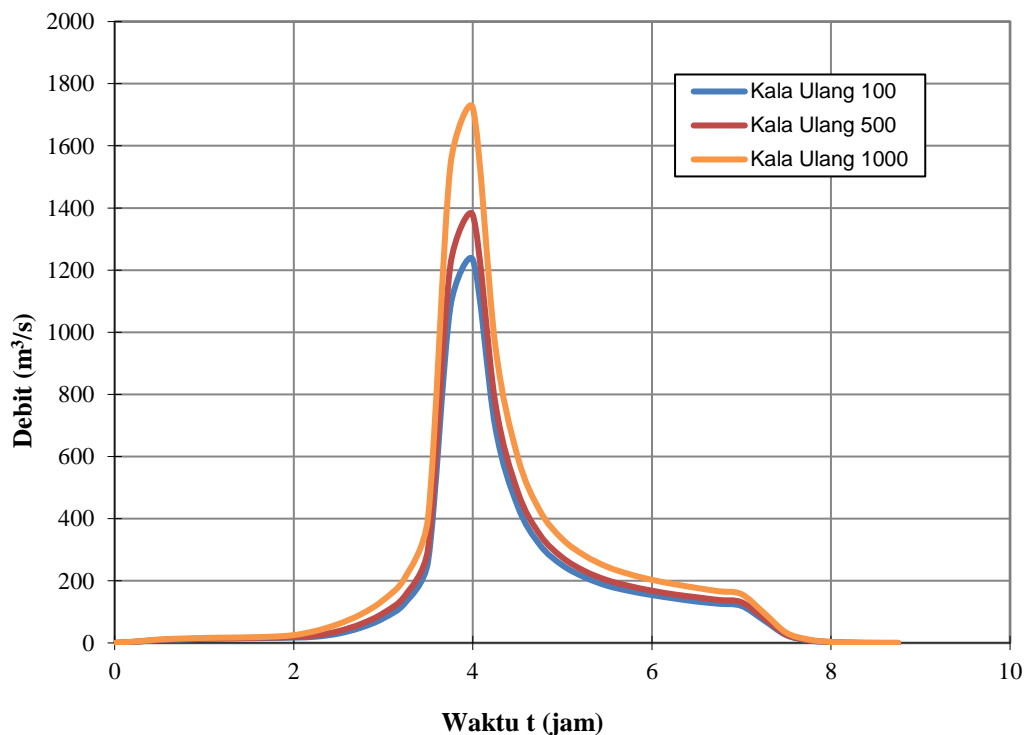


Gambar 4.6 Pemodelan HEC-HMS

4.5 Debit Puncak Banjir (Qp)

Hasil simulasi menunjukkan karakteristik banjir bandang yang sangat tipikal, di mana hidrograf banjir memiliki kurva naik (*rising limb*) yang sangat curam. Berdasarkan grafik Hidrograf Banjir DAS Pacal Hulu pada Gambar 4.7, terlihat bahwa debit mulai meningkat signifikan setelah jam ke-2 dan mencapai puncaknya tepat pada jam ke-4 (pukul 04.00). Rentang waktu yang singkat ini (hanya sekitar 2 jam dari awal kenaikan hingga puncak) mengonfirmasi bahwa wilayah Hulu DAS Pacal memiliki respons hidrologis yang sangat cepat terhadap curah hujan ekstrem, yang menjadi ciri utama fenomena banjir bandang.

Besaran debit puncak (Qp) yang dihasilkan bervariasi secara signifikan sesuai dengan periode ulang (kala ulang) yang disimulasikan. Berdasarkan data Tabel 4. , nilai debit puncak pada jam ke-4 adalah sebesar 1233,07 m³/s kala ulang 100 tahun, 1377,07 m³/s kala ulang 500 tahun, 1722,06 m³/s kala ulang 1000 tahun,



Gambar 4.7 Gambar Hidrograf Banjir Pacal Hulu

**Tabel 4.9 Debit Puncak Banjir Tiap Kala Ulang 100, 500, Dan 1000 Tahun
DAS Pacal Hulu**

Waktu	Jam	Debit Kala Ulang (m ³ /s)		
		100	500	1000
00.00	0,00	0,00	0,00	0,00
00.15	0,25	4,04	4,07	5,05
00.30	0,50	9,05	10,02	11,09
00.45	0,75	11,07	12,06	14,07
01.00	1,00	13,00	14,00	16,03
01.15	1,25	14,00	15,01	17,06
01.30	1,50	15,00	16,02	18,09
01.45	1,75	16,02	17,04	20,03
02.00	2,00	17,06	19,00	25,05
02.15	2,25	20,08	24,07	39,00
02.30	2,50	30,06	38,05	61,03
02.45	2,75	49,07	61,04	92,06
03.00	3,00	79,08	96,01	138,00
03.15	3,25	131,07	155,02	214,04
03.30	3,50	262,06	303,00	403,06
03.45	3,75	1083,08	1217,01	1538,06
04.00	4,00	1233,07	1377,07	1722,06
04.15	4,25	696,09	774,05	959,05
04.30	4,50	441,04	488,07	600,04
04.45	4,75	315,08	348,05	425,06
05.00	5,00	250,00	275,00	334,07
05.15	5,25	211,02	231,08	281,04
05.30	5,50	184,05	202,05	245,02
05.45	5,75	167,02	183,06	221,08
06.00	6,00	154,00	168,08	203,07
06.15	6,25	143,01	156,09	189,02
06.30	6,50	133,09	147,00	177,01
06.45	6,75	126,02	138,04	166,09
07.00	7,00	119,06	131,00	157,09
07.15	7,25	73,08	80,09	97,04
07.30	7,50	25,04	27,09	33,05
07.45	7,75	8,07	9,05	11,05
08.00	8,00	2,09	3,02	3,08
08.15	8,25	0,09	1,00	1,02
08.30	8,50	0,02	0,02	0,03
08.45	8,75	0,00	0,00	0,00
09.00	9,00	0,00	0,00	0,00

Tingginya debit puncak yang mencapai angka di atas 1200 m³/s bahkan untuk kala ulang 100 tahun dipengaruhi kuat oleh parameter fisik DAS yang telah diidentifikasi sebelumnya. Nilai CN Composite sebesar 73,09 dan persentase

Impervious 8,97% berkontribusi pada besarnya volume air yang dikonversi menjadi limpasan permukaan langsung.

Nilai CN yang didapatkan tersebut mencerminkan kondisi penggunaan lahan yang didominasi oleh hutan semak dan pertanian lahan kering di atas jenis tanah dengan kapasitas infiltrasi rendah. Secara hidrologis, nilai CN ini menjadi faktor penentu utama besarnya volume hujan yang berubah menjadi limpasan permukaan (surface runoff). Semakin tinggi nilai CN, maka semakin kecil air yang meresap ke dalam tanah (infiltrasi), sehingga volume air yang mengalir di permukaan tanah menjadi lebih besar dan memicu peningkatan debit puncak banjir secara signifikan.

Parameter CN tersebut kemudian berinteraksi dengan kondisi topografi curam untuk menentukan *Time of Concentration* (t_c), yaitu waktu yang diperlukan oleh air hujan untuk mengalir dari titik terjauh di hulu hingga mencapai titik kontrol di outlet DAS. Dengan luas DAS sebesar 67,09 km² dan panjang sungai utama mencapai 20 km, kemiringan lahan yang terjal mempercepat pergerakan air, sehingga menghasilkan nilai t_c yang relatif singkat. Kecepatan waktu konsentrasi ini menjadi indikator kritis dalam mengukur seberapa cepat DAS merespons kejadian hujan ekstrem menjadi aliran banjir.

Hubungan fungsional antara parameter ini bermuara pada nilai Time Lag (T_L), yang secara empiris ditentukan sebagai 0,6 kali dari t_c . Di Hulu DAS Pacal, perpaduan antara nilai CN yang tinggi (potensi limpasan besar) dan t_c yang singkat (respons cepat) menghasilkan Time Lag yang pendek, yang terlihat pada grafik hidrograf di mana puncak banjir tercapai hanya dalam waktu 4 jam setelah hujan dimulai. Rendahnya nilai Time Lag ini mengonfirmasi kerentanan wilayah tersebut terhadap banjir bandang, karena jeda waktu antara puncak hujan dengan puncak debit banjir sangat sempit, sehingga memberikan risiko hidrologis yang lebih tinggi bagi wilayah hilir dan operasional Waduk Pacal. Selain itu, profil hidrograf yang menguncup tajam menunjukkan bahwa kapasitas retensi di wilayah hulu tidak cukup kuat untuk meredam laju aliran, sehingga air terakumulasi dalam waktu yang bersamaan di titik outlet (Waduk Pacal).

Data ini memberikan peringatan teknis bahwa infrastruktur pengendalian banjir di hilir maupun kapasitas tampung Waduk Pacal harus mampu mengantisipasi lonjakan debit yang datang dalam durasi yang sangat singkat. Simulasi ini menjadi dasar penting bagi pengembangan sistem peringatan dini (*early warning system*), mengingat waktu tiba banjir (*time to peak*) yang hanya berkisar 4 jam sejak hujan dimulai, memberikan jendela waktu yang sangat sempit untuk evakuasi atau manajemen pembukaan pintu air waduk.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Karakteristik morfometri Hulu DAS Pacal yang memiliki luas 67,09 km² dan panjang sungai utama 20 km dengan topografi curam, berpadu dengan tata guna lahan hutan semak dan jenis tanah hidrologis tipe D, menghasilkan nilai *Curve Number* (CN) Composite sebesar 73,09. Nilai CN yang tinggi ini secara signifikan meningkatkan volume limpasan permukaan, sementara kemiringan lahan yang terjal memperpendek waktu konsentrasi (t_c) yaitu 3,758 jam dan waktu tunda (*lag time*, T_L), sehingga mengakibatkan DAS merespons hujan secara agresif dengan mencapai puncak banjir dalam durasi hanya 4 jam. Berdasarkan simulasi menggunakan model HEC-HMS, besaran debit puncak banjir bandang rencana (Q_p) di Hulu DAS Pacal untuk periode ulang 100 tahun adalah sebesar 1.233,07 m³/s, untuk periode ulang 500 tahun sebesar 1.377,07 m³/s, dan untuk periode ulang 1000 tahun mencapai 1.722,06 m³/s.

5.2 Saran

Saran atau masukan yang perlu dipertimbangkan dari hasil penelitian yang telah dilakukan adalah sebagai berikut.

1. Upaya penurunan nilai CN melalui konservasi lahan vegetatif dan pembangunan bangunan pengendali air di wilayah hulu perlu dilakukan untuk meningkatkan kapasitas retensi tanah sehingga volume limpasan permukaan dapat dikurangi dan waktu tunda banjir dapat diperlama.
2. Pemerintah daerah dan instansi terkait disarankan untuk mengintegrasikan hasil simulasi debit puncak ini ke dalam sistem peringatan dini banjir bandang, mengingat waktu tiba banjir yang sangat singkat menuntut kesiapsiagaan yang tinggi bagi penduduk di sepanjang aliran sungai Pacal.

DAFTAR PUSTAKA

- Anees, M. T. (2024). Role of Remote Sensing and GIS Applications in River-Related Studies: A Review. *Modern River Science for Watershed Management: GIS and Hydrogeological Application*, 195-216.
- Chandra Sari, Y., Suripin, S., & J Kodoatie, R. (2017). *Pendugaan Limpasan Permukaan dengan Modifikasi Parameter Metode Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN)* (Doctoral dissertation, Doctor Program in Civil Engineering).
- Cheng, T., Xu, Z., Yang, H., Hong, S., & Leitao, J. P. (2020). Analysis of effect of rainfall patterns on urban flood process by coupled hydrological and hydrodynamic modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(1), 04019061.
- Destro, E., Amponsah, W., Nikolopoulos, E. I., Marchi, L., Marra, F., Zocatelli, D., & Borga, M. (2018). Coupled prediction of flash flood response and debris flow occurrence: Application on an alpine extreme flood event. *Journal of Hydrology*, 558, 225-237.
- Dutal, H. (2023). Using morphometric analysis for assessment of flash flood susceptibility in the Mediterranean region of Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 195(5), 582.
- Farzin, S., Singh, V. P., Karami, H., Farahani, N., Ehteram, M., Kisi, O., ... & El-Shafie, A. (2018). Flood routing in river reaches using a three-parameter Muskingum model coupled with an improved bat algorithm. *Water*, 10(9), 1130.
- Ginting, S. (2021). Analisis curah hujan penyebab banjir bandang di ujung berung, bandung. *Akselerasi: Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 2(2).
- Greco, F., Zaharia, L., Ioana-Toroimac, G., & Armaş, I. (2016). Floods and flash-floods related to river channel dynamics. In *Landform dynamics and evolution in Romania* (pp. 821-844). Cham: Springer International Publishing.
- He, B., Huang, X., Ma, M., Chang, Q., Tu, Y., Li, Q., ... & Hong, Y. (2018). Analysis of flash flood disaster characteristics in China from 2011 to 2015. *Natural Hazards*, 90(1), 407-420.
- Karimaee Tabarestani, M., & Zarrati, A. R. (2015). Sediment transport during flood event: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(2), 775-788.

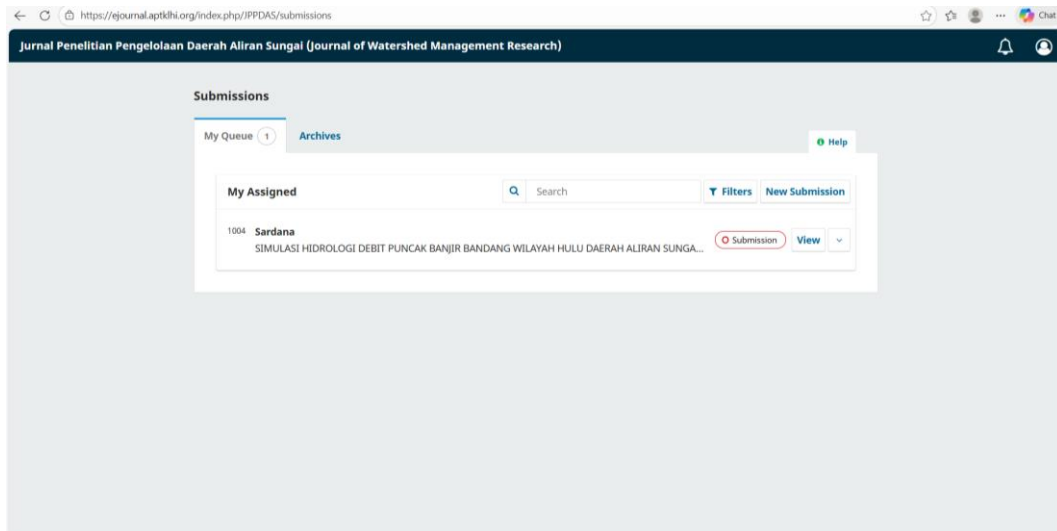
- Khadka, J., & Bhaukajee, J. (2018). Rainfall-Runoff Simulation and Modelling Using HEC-HMS and HEC-RAS Models : Case Studies from Nepal and Sweden. Lund University, 1–69. www.tvrl.lth.se
- Khan, T. A., Alam, M. M., Shahid, Z., & Su'Ud, M. M. (2020). Investigation of flash floods on early basis: A factual comprehensive review. *IEEE Access*, 8, 19364-19380.
- Lestari, T. (2022). *Upaya Pemerintah Daerah Dalam Melakukan Recovery Dan Pemulihan Perekonomian Masyarakat Pasca Banjir Bandang Di Kabupaten Luwu Utara* (Doctoral dissertation, Institut Agama Islam Negeri Palopo).
- Mahmood, S., & Rahman, A. U. (2019). Flash flood susceptibility modeling using geo-morphometric and hydrological approaches in Panjkora Basin, Eastern Hindu Kush, Pakistan. *Environmental earth sciences*, 78(1), 43.
- Mamengko, D. V., Samberi, S., Auri, Y. F., Kusumo, P. A., Rohmala, F. K., Hemetang, A., & Wurarah, R. N. (2022). Analisis Ancaman Banjir Bandang Sungai Sanduai dan Anggris Distrik Wasior Kabupaten Teluk Wonadama (Flash Flood Hazard Analysis of Sanduai and Anggris River Wasior District, TELuk Wondama Regency).
- Mardiatno, D., & Marfai, M. A. (2021). *Analisis bencana untuk pengelolaan daerah aliran sungai (das): studi kasus kawasan hulu das Comal*. Ugm Press.
- Mardhatillah, F. R. (2025). Pemetaan Dampak Bencana Banjir Bandang Pada Das Anai: Studi Kasus Kecamatan X Koto Dan Padang Panjang Barat. *Pendas: Jurnal Ilmiah Pendidikan Dasar*, 10(02), 221-239.
- Milanesi, L., & Pilotti, M. (2021). Coupling flood propagation modeling and building collapse in flash flood studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 147(12), 04021047.
- Odey, G., & Cho, Y. (2025). Event-Based vs. Continuous Hydrological Modeling with HEC-HMS: A Review of Use Cases, Methodologies, and Performance Metrics. *Hydrology*, 12(2), 39.
- Prastica, R. M. S., Adi, D. A. R., & Famila, N. (2020). Mitigasi banjir dan alternatif pemeliharaan infrastruktur keairan pada sub-DAS code Yogyakarta. *Teknika: Jurnal Sains dan Teknologi*, 16(1), 25-34.
- Prayitno, H. T. (2017). Kajian Banjir Bandang di Desa Sukolilo Melalui Tinjauan Peta Sungai. *Jurnal Litbang: Media Informasi Penelitian, Pengembangan dan IPTEK*, 13(1), 13-23.

- Rinat, Y., Marra, F., Zoccatelli, D., & Morin, E. (2018). Controls of flash flood peak discharge in Mediterranean basins and the special role of runoff-contributing areas. *Journal of Hydrology*, 565, 846-860.
- Rodda, J. C. (2021). The flood hydrograph. In *Water, earth, and man* (pp. 405-418). Routledge.
- Sabriyati, D., & Hadi, M. P. (2022). Kajian Hidrologi Debit Puncak Penyebab Banjir Bandang Menggunakan Pemodelan Hidrograf Satuan Sintesis-SCS (HSS-SCS). *Jurnal Akuatiklestari*, 5(2), 80-90.
- Sabriyati, D. (2023). Penilaian Bahaya Banjir Bandang Berdasarkan Skenario Genangan Menggunakan Analisis Spasial dan Pemodelan Hidrodinamik. *Jurnal Lingkungan dan Bencana Geologi*, 14(1), 9-24.
- Sanit, M. S. (2018). *Strategi mitigasi bencana banjir bandang berdasarkan nilai ketangguhan di Kabupaten Malaka, Nusa Tenggara Timur* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Nasional Malang).
- Shatnawi, A., & Ibrahim, M. (2022). Derivation of flood hydrographs using SCS synthetic unit hydrograph technique for Housha catchment area. *Water Supply*, 22(5), 4888-4901.
- Singh, S., & Kansal, M. L. (2024). A comparative study of morphometric, hydrologic, and semi-empirical methods for the prioritization of sub-watersheds against flash flood-induced landslides in a part of the Indian Himalayan Region. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(41), 53796-53822.
- Syaifullah, M. D. (2020). Kajian Banjir Bandang Masamba Juli 2020, Tinjauan Meteorologis. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 21(2), 73-83.
- Wahid, A., Madden, M., Khalaf, F., & Fathy, I. (2016). Geospatial analysis for the determination of hydro-morphological characteristics and assessment of flash flood potentiality in Arid Coastal Plains: A case in Southwestern Sinai, Egypt. *Earth Sciences Research Journal*, 20(1), 1-9.
- Wang, W., Sang, G., Zhao, Q., Liu, Y., Shao, G., Lu, L., & Xu, M. (2024). Prediction of flash flood peak discharge in hilly areas with ungauged basins based on machine learning. *Hydrology Research*, 55(8), 801-814.
- Wu, J., Liu, H., Wei, G., Fu, G., Markus, M., Ye, L., ... & Zhou, H. (2020). Flash flood peak estimation in small mountainous catchments based on distributed geomorphological unit hydrographs using fuzzy C-means clustering. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(12), 04020051.

- Yousefi, S., Mirzaee, S., Keesstra, S., Surian, N., Pourghasemi, H. R., Zakizadeh, H. R., & Tabibian, S. (2018). Effects of an extreme flood on river morphology (case study: Karoon River, Iran). *Geomorphology*, *304*, 30-39.
- Zhou, X., Huang, X., Jiang, X., & Jiang, J. (2025). Real-time error correction of multiple-hour-ahead flash flood forecasting based on the sliding runoff-rain data and deep learning models. *Journal of Hydrology*, *655*, 132918.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Bukti Submit Jurnal



Lampiran 1. Bukti Submit Jurnal