

## **ANALISIS KOMPARATIF DAN VALIDASI METODOLOGI DELINEASI DAS OTOMATIS BERBASIS ARTIFICIAL INTELLIGENCE (AI)**

Lutfi<sup>1</sup>, Indra Kurniawan<sup>2</sup>, Erwin Ernanda<sup>1</sup>, dan Yunita Ayu Setiyowati<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> PT. Tsuroya Multi Gia

<sup>2</sup>Balai Hidrologi dan Lingkungan Keairan, Direktorat Bina Teknik Sumber Daya Air, Direktorat Jenderal Sumber Daya Air, Kementerian PU

\* yunita.wre@gmail.com

Pemasukan: 14 November 2025

Perbaikan: 31 Desember 2025

Diterima: 31 Desember 2025

### **Intisari**

Delineasi Daerah Aliran Sungai (DAS) yang akurat merupakan tahapan fundamental dalam pemodelan hidrologi dan pengelolaan sumber daya air. Namun, delineasi otomatis yang mengandalkan algoritma Deterministic 8 (D8) sering mengalami penurunan akurasi pada wilayah dengan topografi kompleks, sistem drainase buatan, maupun perubahan penggunaan lahan akibat aktivitas manusia. Penelitian ini menyajikan analisis komparatif terhadap tiga pendekatan delineasi DAS otomatis, yaitu penerapan standar D8 pada perangkat lunak HEC-HMS dan WMS, serta platform inovatif ACAP (Advanced Catchment Analysis Platform). Berbeda dari dua perangkat lunak konvensional, ACAP mengintegrasikan komponen Artificial Intelligence (AI) untuk pra-pemrosesan dan penyempurnaan data DEM dengan memanfaatkan informasi dari citra satelit, sehingga meningkatkan kualitas input elevasi sebelum proses delineasi. Dengan demikian, AI pada penelitian ini tidak menggantikan algoritma delineasi inti (D8), melainkan berperan sebagai penguat kualitas data dan dukungan otomasi agar batas DAS fungsional dapat terpetakan lebih akurat. Pengujian dilakukan pada tiga Daerah Tangkapan Air (DTA) bendungan di Indonesia—Napun Gete, Batutegi, dan Greneng yang mewakili karakteristik geomorfologi dan tingkat kompleksitas yang berbeda. Akurasi spasial hasil delineasi dievaluasi terhadap data ground truth menggunakan metrik Intersection over Union (IoU). Hasil menunjukkan bahwa HEC-HMS dan WMS cenderung andal pada DAS alami, sementara ACAP memberikan kinerja superior pada DTA Greneng yang kompleks, dengan IoU 0,98 dibandingkan metode konvensional 0,84–0,85. Temuan ini menegaskan potensi pendekatan AI-augmented untuk meningkatkan akurasi delineasi berbasis D8, terutama pada wilayah yang mengalami modifikasi antropogenik.

Kata kunci : Delineasi DAS, HEC-HMS, WMS, Artificial Intelligence, Jaccard Index

### **Latar Belakang**

Daerah Aliran Sungai (DAS) atau *watershed* secara universal didefinisikan sebagai suatu ekosistem daratan yang dibatasi oleh punggung topografi (Asdak, 2018).

Akurasi dalam mendefinisikan batas fisik DAS, atau delineasi, merupakan langkah paling krusial yang menjadi fondasi bagi seluruh analisis hidrologi turunan, mulai dari pemodelan banjir hingga studi kualitas air. Secara historis, proses ini dilakukan secara manual dengan menginterpretasi peta kontur, sebuah metode yang padat karya dan sangat subjektif (Maidment, 1993). Namun, revolusi teknologi geospasial melalui ketersediaan data Digital Elevation Model (DEM) telah memungkinkan proses delineasi dilakukan secara otomatis. Alur kerja dasarnya meliputi persiapan DEM, penentuan arah aliran dari setiap sel grid, kalkulasi akumulasi aliran untuk mengidentifikasi jaringan sungai, dan akhirnya penentuan batas DAS berdasarkan lokasi outlet yang ditentukan (O'Callaghan & Mark, 1984).

Proses otomatis ini kini telah diimplementasikan dalam berbagai platform perangkat lunak hidrologi, di mana dua di antaranya yang paling menonjol di kalangan praktisi adalah *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) dan *Watershed Modeling System* (WMS). HEC-HMS, yang dikembangkan oleh *The United States Army Corps of Engineers* (USACE), telah menjadi standar global untuk pemodelan hujan-limpasan. Platform ini memiliki modul GIS terintegrasi yang mampu menjalankan seluruh proses delineasi menggunakan implementasi standar dari algoritma D8 (U.S. Army Corps of Engineers, 2023). Di sisi lain, WMS dari Aquaveo menawarkan sebuah lingkungan pemodelan yang lebih komprehensif dengan fleksibilitas tinggi, termasuk penggunaan model TOPAZ untuk ekstraksi parameter topografi (Garbrecht & Martz, 1997). Karena kedua platform dapat menggunakan pendekatan internal yang sedikit berbeda untuk memproses data DEM, perbandingan kinerjanya menjadi relevan untuk memahami bagaimana pilihan perangkat lunak dapat memengaruhi hasil delineasi, sebuah topik yang juga menjadi fokus dalam studi oleh Setiyowati et al. (2025).

Namun, tantangan yang lebih fundamental pada semua implementasi delineasi berbasis Deterministic 8 (D8) terletak pada keterbatasannya yang inheren. Karena bergantung secara eksklusif pada informasi elevasi, algoritma ini tidak memiliki kapabilitas untuk mengidentifikasi atau memperhitungkan fitur-fitur hidrologis penting yang tidak memiliki ekspresi topografis yang jelas dalam data DEM. Akibatnya, hasil delineasi D8 sering merepresentasikan DAS topografis, yaitu batas tangkapan air yang ditentukan murni oleh kontur dan arah aliran permukaan berdasarkan topografi, tetapi tidak selalu sesuai dengan DAS fungsional, yakni wilayah tangkapan air yang secara nyata mengalir menuju outlet tertentu karena dipengaruhi oleh intervensi manusia dan infrastruktur hidrologi. Sistem drainase buatan seperti kanal irigasi, gorong-gorong, saluran pengalihan, maupun jaringan drainase bawah permukaan merupakan contoh nyata infrastruktur yang secara fungsional mengendalikan alur aliran, tetapi tidak terdeteksi oleh D8 standar. Keterbatasan ini dapat menyebabkan diskrepansi signifikan antara batas DAS hasil delineasi berbasis DEM dan kondisi hidrologis aktual di lapangan, sebagaimana ditunjukkan pada studi kasus wilayah urban oleh Nugroho (2012).

Meskipun berbagai penelitian telah membahas keterbatasan D8, masih terdapat gap penelitian berupa minimnya evaluasi komparatif yang sistematis terhadap pendekatan delineasi DAS otomatis pada wilayah dengan kompleksitas

antropogenik, khususnya yang menguji apakah peningkatan kualitas input DEM melalui pendekatan berbasis data tambahan (misalnya citra satelit dan AI) mampu memperkecil perbedaan antara DAS topografis dan DAS fungsional. Oleh karena itu, studi ini menjadi penting untuk menilai performa pendekatan yang diusulkan dalam menghasilkan delineasi yang lebih representatif terhadap kondisi hidrologis aktual.

Untuk mengatasi masalah kualitas input ini secara langsung, sebuah platform inovatif bernama *Advanced Catchment Analysis Platform* (ACAP) telah dikembangkan sebagai bagian dari penelitian ini. ACAP secara fundamental mengubah paradigma dengan tidak menggantikan algoritma D8 yang telah teruji, melainkan memberdayakannya. Platform ini menggunakan *Artificial Intelligence* (AI) untuk menciptakan data input yang lebih cerdas dengan mengintegrasikan informasi visual dari citra satelit (Shen, 2018), sebuah pendekatan yang sejalan dengan meningkatnya penerapan AI untuk manajemen bencana di Indonesia (Pratama et al., 2022). Oleh karena itu, penelitian ini akan melakukan perbandingan tiga cabang secara komprehensif: (1) kinerja D8 pada platform HEC-HMS, (2) kinerja D8 pada platform WMS, dan (3) kinerja D8 yang sama namun diimplementasikan pada platform ACAP dengan input DEM yang telah disempurnakan oleh AI.

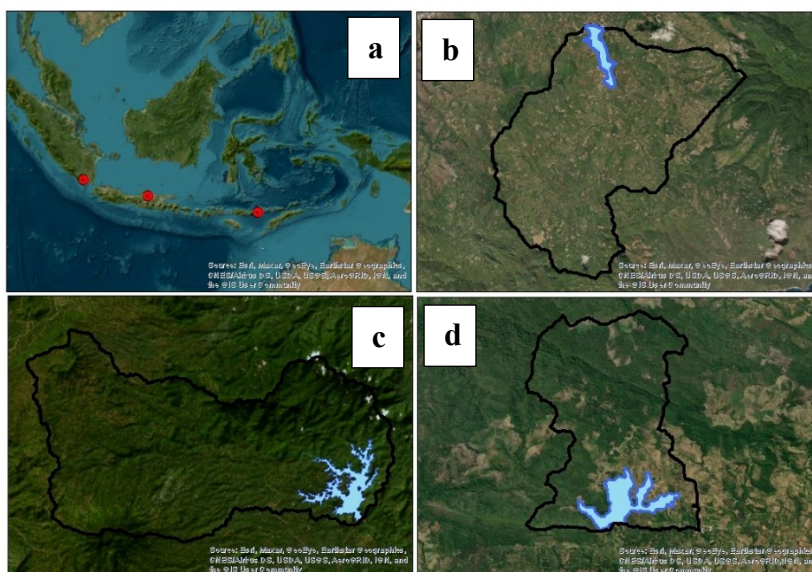
### Lokasi Studi

Untuk menguji dan memvalidasi kinerja platform delineasi pada kondisi geografis yang beragam, penelitian ini memilih tiga Daerah Tangkapan Air (DTA) bendungan yang representatif di Indonesia, yaitu Napun Gete (Nusa Tenggara Timur), Batutegi (Lampung), dan Greneng (Jawa Tengah). Dalam konteks penelitian ini, DTA merujuk pada wilayah tangkapan air yang secara hidrologis berkontribusi langsung ke inlet/area genangan bendungan (reservoir), sedangkan DAS umumnya merujuk pada sistem tangkapan air yang mengalir ke suatu outlet alami seperti sungai utama atau muara. Dengan kata lain, DTA dapat dipahami sebagai unit tangkapan air yang lebih spesifik dan terdefinisi oleh infrastruktur bendungan sebagai titik keluaran (outlet) dibandingkan DAS alami.

Pemilihan lokasi didasarkan pada variasi topografi, tutupan lahan, dan tingkat modifikasi antropogenik, sehingga memungkinkan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap keunggulan dan keterbatasan masing-masing metode. Secara ringkas, ketiga lokasi berada pada wilayah administratif berikut: (1) Napun Gete di Provinsi Nusa Tenggara Timur, (2) Batutegi di Provinsi Lampung, dan (3) Greneng di Provinsi Jawa Tengah. Visualisasi lokasi studi ditampilkan pada Gambar 1, yang memuat peta Indonesia dan posisi masing-masing DTA secara lebih rinci.

1. DTA Bendungan Napun Gete (Provinsi Nusa Tenggara Timur): Lokasi ini dipilih untuk merepresentasikan wilayah semi-kering dengan topografi berbukit hingga curam. Kondisi tutupan vegetasi yang relatif tidak lebat serta adanya kontras musiman (kemarau-hujan) berpotensi memengaruhi kualitas interpretasi citra satelit dan representasi permukaan lahan pada data DEM.

2. DTA Bendungan Batutege (Provinsi Lampung): DTA Batutege mencakup area yang luas dan heterogen, termasuk kawasan hutan di hulu dengan topografi curam serta area pertanian dan permukiman di hilir. Lokasi ini digunakan untuk menguji kemampuan metode dalam mendelineasi tangkapan skala besar yang memiliki gradien elevasi signifikan dan variasi tutupan lahan yang tinggi.
3. DTA Bendungan Greneng (Provinsi Jawa Tengah): DTA ini dipilih untuk merepresentasikan lanskap yang padat aktivitas manusia, dengan topografi relatif landai serta dominasi lahan pertanian sawah dan permukiman. Pada kondisi seperti ini, batas hidrologi alami berpotensi menjadi ambigu dan dipengaruhi oleh jaringan irigasi atau drainase buatan, sehingga lokasi ini penting untuk mengevaluasi performa pendekatan berbantuan data tambahan (misalnya AI pada ACAP) dibandingkan delineasi D8 konvensional.



Gambar 1. Lokasi Studi a) Peta Wilayah Indonesia, b) Lokasi Napun Gete, c) Lokasi Batutege, d) Lokasi Greneng

### Metode Delineasi Algoritma Deterministic 8 (D8)

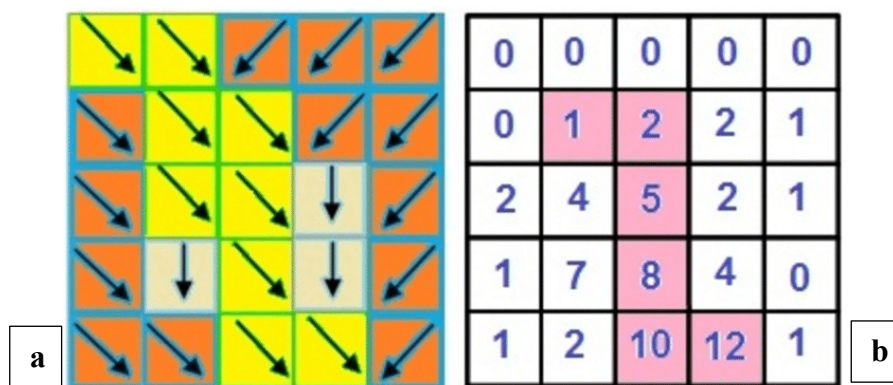
Pendekatan delineasi otomatis dari DEM secara fundamental dibedakan oleh cara algoritma menentukan arah aliran air dari satu sel ke sel lainnya. Secara umum, algoritma ini terbagi menjadi dua keluarga utama. Keluarga pertama adalah *Single Flow Direction* (SFD), di mana aliran dari satu sel hanya diizinkan menuju satu sel tetangga tunggal yang memiliki penurunan paling curam. Algoritma *Deterministic 8* (D8) adalah contoh paling klasik dan dominan dari keluarga ini. Keluarga kedua adalah *Multiple Flow Direction* (MFD), seperti D-infinity (Tarboton, 1997) dan MFD-md (Quinn et al., 1991), yang memungkinkan aliran dari satu sel dapat didistribusikan ke beberapa sel tetangga di hilir.

Keunggulan utama metode D8 terletak pada tiga aspek. Pertama, efisiensi komputasional; logika yang sederhana membuat proses perhitungan menjadi sangat cepat, bahkan untuk dataset DEM beresolusi tinggi dengan cakupan yang luas. Kedua, kesederhanaan dan transparansi; alurnya dapat dilacak sel-per-sel sehingga

mudah dipahami dan diinterpretasikan. Ketiga, dan yang paling penting untuk pemodelan hidrologi, D8 menghasilkan jaringan drainase yang konvergen dan tidak ambigu. Struktur jaringan seperti pohon ini sangat kompatibel dengan model-model hidrologi yang memerlukan konektivitas yang jelas dari satu sub-DAS ke sub-DAS berikutnya (Pan et al., 2022).

Namun, D8 juga memiliki keterbatasan yang perlu dipahami karena dapat memengaruhi hasil delineasi. (1) Grid bias, yaitu kecenderungan arah aliran mengikuti orientasi grid (delapan arah diskrit) sehingga jaringan drainase dapat tampak “bergerigi” dan kurang realistis, khususnya pada topografi landai. (2) Parallel flow issue, yakni ketidakmampuan D8 merepresentasikan divergent flow atau aliran menyebar; seluruh aliran dipaksakan menuju satu sel tetangga dengan kemiringan terbesar sehingga pola aliran yang seharusnya menyebar dapat terdistorsi. (3) Flat/depression handling, yaitu masalah pada area datar (flats) dan cekungan (depressions/sinks) yang tidak memiliki gradien jelas; jika tidak ditangani, area ini dapat menghentikan aliran atau membentuk jaringan drainase yang tidak kontinu. Oleh karena itu, implementasi D8 umumnya memerlukan langkah pra-pemrosesan DEM seperti sink filling, breaching, atau algoritma khusus untuk penanganan area datar agar arah aliran dan akumulasi aliran dapat dihitung secara stabil dan representatif.

Dalam perangkat lunak, logika D8 diimplementasikan melalui serangkaian tahapan kunci yang saling bergantung. Tahap pertama adalah penentuan arah aliran (*Flow Direction*), yang merupakan translasi langsung dari prinsip D8 menjadi sebuah produk data spasial. Setelah DEM dipersiapkan, perangkat lunak akan menghasilkan raster baru di mana setiap sel berisi kode numerik yang merepresentasikan arah aliran menuju salah satu dari delapan sel tetangga berdasarkan penurunan paling curam (O’Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988). Tahap kedua adalah kalkulasi akumulasi aliran (*Flow Accumulation*), di mana perangkat lunak secara iteratif menghitung jumlah total sel di hulu yang berkontribusi mengalirkan air ke setiap sel hilir. Untuk mengekstraksi jaringan sungai dari peta ini, perlu ditetapkan sebuah nilai ambang batas (*threshold*) yang secara konseptual merepresentasikan luas drainase minimum yang diperlukan untuk membentuk alur sungai (Horton, 1945).



Gambar 2. Tahapan D8 a) Flow Direction, b) Flow Accumulation

## Alur Kerja Delineasi

Tiga alur kerja paralel dijalankan untuk setiap lokasi studi, dengan metode inti D8 yang sama namun pendekatan pra-pemrosesan yang berbeda :

### 1. Pendekatan 1 : HEC-HMS

Alur kerja ini menggunakan perangkat lunak hidrologi terintegrasi. Prosesnya linier dan terdokumentasi dengan baik. Dimulai dengan memasukkan data DEMNAS ke dalam HEC-HMS. Langkah pertama adalah pra-pemrosesan hidrologis menggunakan tool Preprocess Sinks untuk mengisi cekungan artifisial. Selanjutnya, tool Preprocess Drainage dijalankan untuk membuat raster Arah Aliran (*Flow Direction*) dan Akumulasi Aliran (*Flow Accumulation*) berdasarkan algoritma D8.

### 2. Pendekatan 2 : WMS

Alur kerja delineasi pada Watershed Modeling System (WMS) digunakan untuk mengevaluasi potensi variasi hasil delineasi antar-perangkat lunak dibandingkan dengan pendekatan HEC-HMS. Proses dimulai dengan mengimpor data DEMNAS ke WMS, kemudian dilakukan komputasi flow direction dan flow accumulation sebagai dasar pembentukan jaringan aliran. Pada WMS, tahapan ini umumnya dihitung menggunakan program TOPAZ, yang merupakan modul/mesin analisis topografi untuk ekstraksi jaringan drainase dan delineasi watershed dari raster DEM (Aquaveo, n.d.; Garbrecht & Martz, n.d.).

Dalam penelitian ini, delineasi dilakukan melalui modul TOPAZ karena TOPAZ menghitung arah aliran berbasis pendekatan D8 untuk membentuk jaringan drainase yang konvergen dan menentukan batas DAS/DTA. Selain itu, TOPAZ menyediakan prosedur internal untuk meningkatkan stabilitas delineasi pada kondisi DEM tertentu, termasuk penanganan area datar (flats) dan depresi (sinks/depressions), yang merupakan isu umum dalam analisis hidrologi berbasis raster DEM (Garbrecht & Martz, n.d.).

### 3. Pendekatan 3: Platform ACAP

Pendekatan ini merupakan inti dari inovasi yang diuji melalui platform ACAP. Prosesnya memiliki satu langkah tambahan yang krusial di awal. Pra-pemrosesan Berbasis AI: Sebelum proses hidrologi apapun, DEMNAS dimasukkan ke dalam modul pra-pemrosesan cerdas milik ACAP. Model machine learning yang telah dilatih akan menganalisis dataset. Tujuannya adalah untuk mendeteksi fitur hidrologis dari citra satelit yang tidak terdeteksi atau salah direpresentasikan pada DEM.

## Evaluasi Kinerja

Untuk mengevaluasi dan membandingkan hasil delineasi dari ketiga pendekatan secara objektif, digunakan metrik kuantitatif. Selain perbandingan parameter geometris dasar seperti luas area, metrik utama yang digunakan adalah Jaccard Index (Intersection over Union - IoU) untuk mengukur akurasi spasial.

Jaccard Index (IoU) adalah metrik yang digunakan secara luas dalam bidang visi komputer dan penginderaan jauh untuk mengukur tingkat kesamaan atau tumpang tindih antara dua bentuk spasial—dalam kasus ini, poligon DAS hasil prediksi (A)

dan poligon DAS ground truth (B) (Stodt et al., 2024). IoU dihitung dengan membagi luas area irisan (intersection) kedua poligon dengan luas area gabungan (union) kedua poligon.
$$\text{IoU}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|} = \frac{\text{Luas Irisan}}{(\text{Luas } A) + (\text{Luas } B) - (\text{Luas Irisan})} \quad (1)$$

Untuk memberikan makna kualitatif pada skor numerik IoU, penelitian ini mengadopsi kerangka kerja interpretasi yang telah mapan dalam penilaian akurasi. Kerangka kerja ini diinspirasi oleh skala standar Koefisien Kappa yang diperkenalkan oleh Landis dan Koch (1977), di mana nilai di atas 0,80 dianggap menunjukkan tingkat kesesuaian yang “Sangat Baik” (almost perfect). Dengan demikian, skala interpretasi berikut digunakan:  $\text{IoU} \geq 0,80$  dikategorikan Sangat Baik;  $0,60 \leq \text{IoU} < 0,80$  dikategorikan Baik;  $0,50 \leq \text{IoU} < 0,60$  dikategorikan Cukup; dan  $\text{IoU} < 0,50$  dikategorikan Buruk.

## Hasil Studi dan Pembahasan

Bab ini menyajikan temuan utama dari analisis komparatif yang telah dijalankan sesuai dengan kerangka metodologi yang diuraikan sebelumnya. Kinerja delineasi dari tiga pendekatan implementasi standar pada HEC-HMS, implementasi alternatif pada WMS, dan pendekatan inovatif melalui platform ACAP, dievaluasi secara sistematis pada tiga lokasi studi yang representatif: DTA Bendungan Napun Gete, Batutege, dan Greneng.

### Perbandingan Luas DTA

Analisis kuantitatif pertama difokuskan pada perbandingan parameter geometris paling fundamental, yaitu total luas DTA yang dihasilkan oleh setiap platform. Data numerik dari hasil delineasi di ketiga lokasi studi disajikan dalam Tabel 1, dengan visualisasinya pada Gambar 3.

Tabel 1. Perbandingan Luas DTA

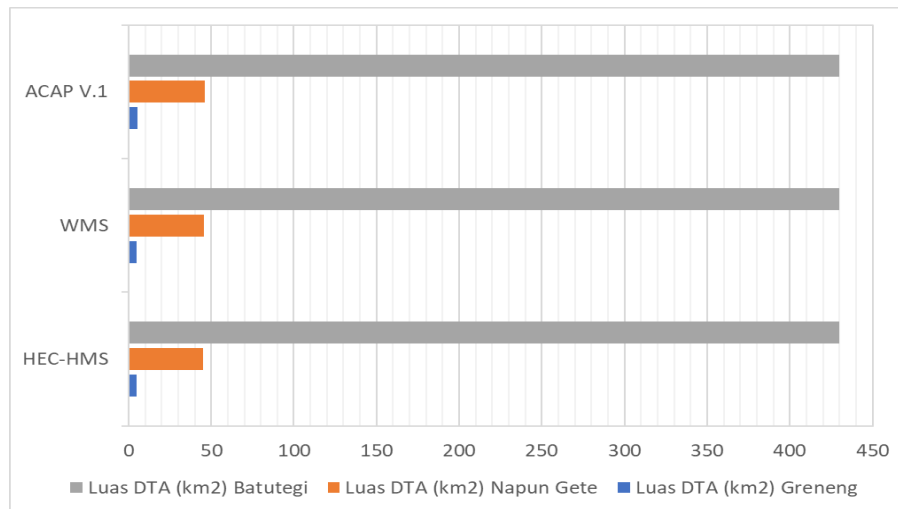
Platform	Luas DTA (km <sup>2</sup> )		
	Greneng	Napun Gete	Batutege
HEC-HMS	4.82	45.33	429.67
WMS	4.77	45.34	429.78
ACAP V.1	5.37	46.20	430.03

Dari data tersebut, observasi pertama yang dapat ditarik adalah konsistensi yang sangat tinggi antara *platform* konvensional HEC-HMS dan WMS. Di ketiga lokasi, perbedaan luas yang dihitung oleh kedua platform ini sangat kecil, bahkan pada DTA Batutege yang berskala besar, perbedaannya hanya sekitar 0,1 km<sup>2</sup>. Ini mengindikasikan bahwa implementasi algoritma D8 standar pada kedua perangkat lunak menghasilkan output yang sangat dapat diperbandingkan.

Observasi kedua, dan yang paling signifikan, adalah bahwa platform ACAP V.1 secara konsisten menghasilkan estimasi luas DTA yang lebih besar dibandingkan kedua platform konvensional di semua skenario. Perbedaan paling drastis yang teramati pada DTA Greneng, di mana ACAP V.1 menghitung luas 5.37 km<sup>2</sup>, yang secara signifikan (~12%) lebih besar dari hasil HEC-HMS (4.82 km<sup>2</sup>) dan WMS



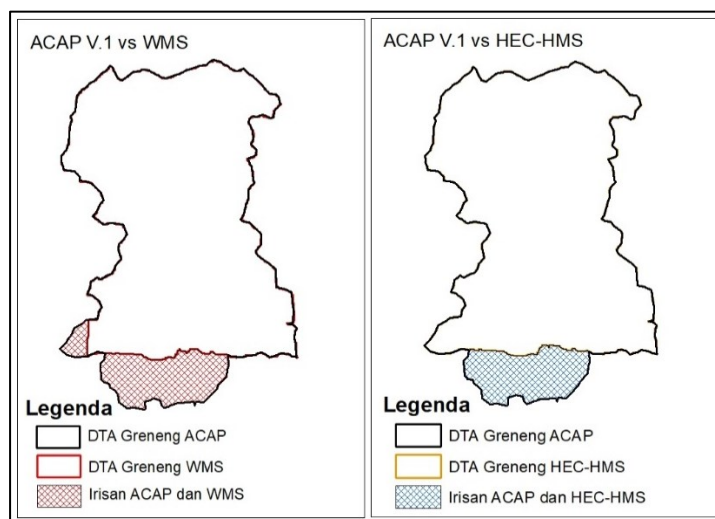
(4.77 km<sup>2</sup>). Peningkatan luas ini juga terlihat pada DTA Napun Gete dan DTA Batutegi.



Gambar 3. Grafik Perbandingan Luas DTA

### Analisis Kinerja Delineasi

Untuk memberikan bukti spasial yang lebih konkret terhadap hasil kuantitatif ini, dilakukan perbandingan visual batas DAS yang dihasilkan. Gambar 4 menampilkan hasil pada DTA Greneng, kasus yang paling menantang. Terlihat dengan jelas bagaimana batas dari HEC-HMS dan WMS gagal memasukkan area persawahan yang luas di bagian hilir karena hanya mengikuti kontur topografi minor. Sebaliknya, batas dari ACAP V.1 secara akurat melingkupi seluruh blok irigasi fungsional, hampir identik dengan batas ground truth. Gambar ini secara definitif menunjukkan kemampuan superior ACAP dalam memahami lanskap antropogenik.

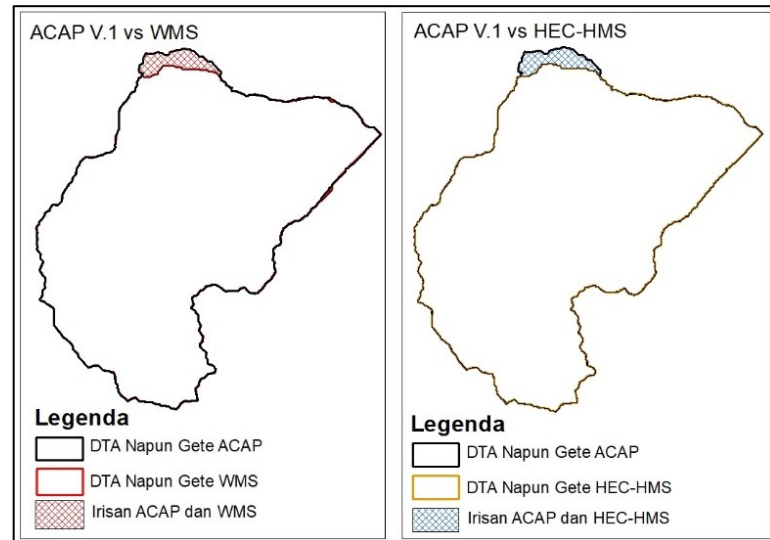


Gambar 4. Perbandingan DTA Greneng

Sebagai perbandingan, Gambar 5 menyajikan hasil pada DTA Napun Gete. Pada lokasi dengan topografi ideal ini, semua garis batas baik dari HEC-HMS, WMS,

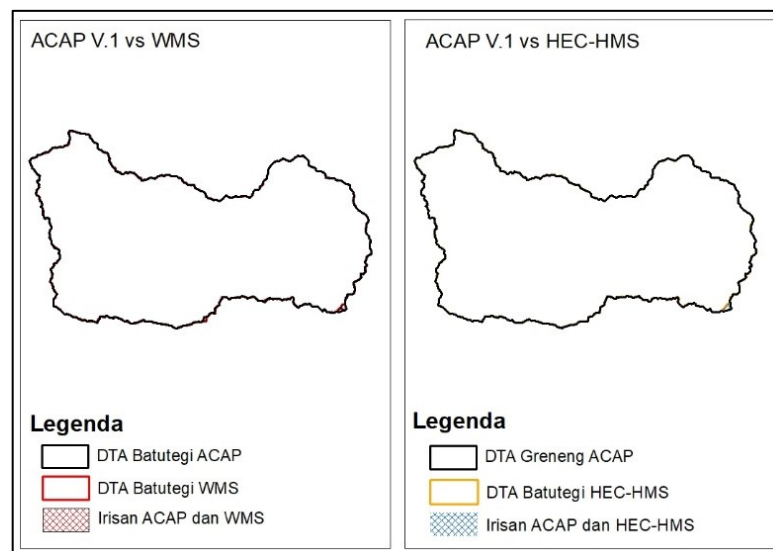


maupun ACAP V.1 hampir saling berhimpitan secara sempurna dengan batas ground truth. Ini secara visual mengonfirmasi bahwa pada kondisi DAS alami yang jelas, semua metode yang diuji sangat andal.



Gambar 5. Perbandingan DTA Napun Gete

Terakhir, Gambar 6 menampilkan hasil untuk DTA Batutegi. Peta ini menunjukkan kondisi di antara kedua ekstrem sebelumnya. Meskipun secara umum ketiga batas DAS menunjukkan kesesuaian yang baik, terlihat adanya beberapa segmen di mana batas HEC-HMS dan WMS sedikit bergeser dari ground truth, terutama di area dengan tutupan lahan yang rapat. Pergeseran-pergeseran inilah yang secara kumulatif menyebabkan skor IoU platform konvensional sedikit lebih rendah dibandingkan ACAP V.1.



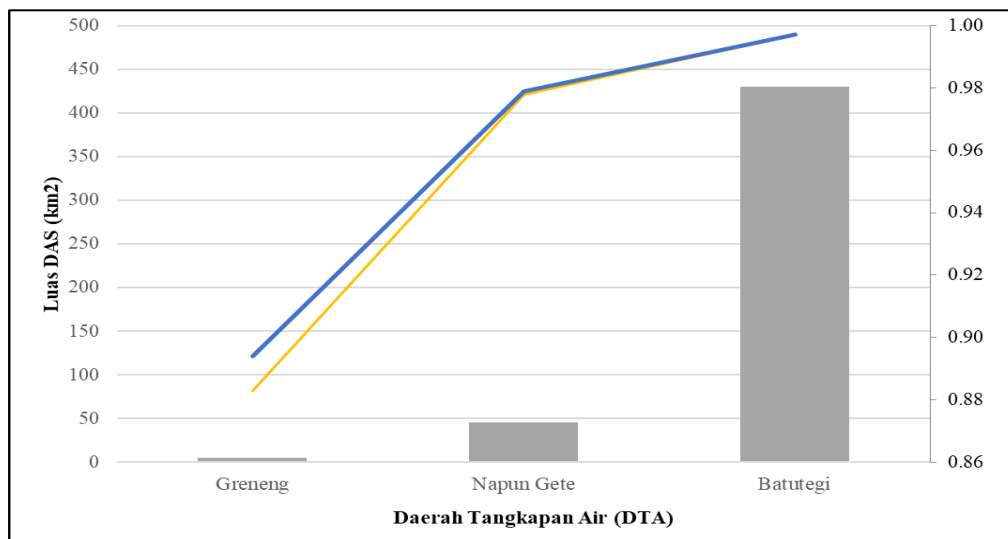
Gambar 6. Perbandingan DTA Batutegi

### Analisis Kinerja Delineasi

Untuk evaluasi yang lebih mendalam, akurasi spasial dianalisis menggunakan Jaccard Index (IoU). Hasil analisis menunjukkan bahwa pada DTA Napun Gete dan Batutegi, semua platform mencapai skor IoU yang sangat tinggi ( $>0,93$ ), menandakan hasil delineasi yang sangat baik. Namun, pada DTA Greneng, skor IoU untuk platform konvensional (HEC-HMS dan WMS) menurun signifikan ke kisaran 0,84-0,85. Penurunan ini secara kuantitatif membuktikan adanya perbedaan spasial yang signifikan. Sebaliknya, ACAP V.1 mampu mempertahankan skor IoU yang sangat tinggi (0,98), yang menunjukkan keberhasilannya dalam memetakan DAS fungsional secara akurat. Untuk lebih lengkap, dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 7.

Tabel 2 Hasil Skor IoU

Perbandingan	DTA Greneng	DTA Napun Gete	DTA Batutegi
IoU (ACAP vs WMS)	0,88	0,98	1,00
IoU (ACAP vs HEC-HMS)	0,89	0,98	1,00



Gambar 7 Hubungan Luas DAS dan Skor IoU

Jika dikaitkan dengan grafik hubungan antara luas DAS dan skor IoU pada Gambar 7, terlihat adanya kecenderungan bahwa skor IoU meningkat seiring bertambahnya luas DAS. Namun, hubungan ini perlu dipahami secara hati-hati karena kemungkinan besar tidak dipengaruhi oleh luas semata, melainkan oleh tingkat kompleksitas medan dan intensitas modifikasi antropogenik pada masing-masing DTA. Untuk memperkuat interpretasi ini, kompleksitas sebaiknya tidak hanya dijelaskan secara naratif, tetapi juga diukur menggunakan parameter kuantitatif. Kompleksitas topografi dapat direpresentasikan melalui indeks seperti terrain roughness index, variasi kemiringan (slope variability), atau topographic position index, sedangkan kompleksitas antropogenik dapat ditunjukkan melalui indikator spasial seperti persentase lahan terbangun, proporsi sawah/pertanian intensif, tingkat fragmentasi tutupan lahan, serta kepadatan jaringan irigasi/drainase.

Dengan pendekatan ini, perbedaan performa antar-metode dapat dikaitkan secara lebih jelas dengan karakteristik lanskap yang terukur.

Dalam konteks hasil penelitian ini, DTA Greneng meskipun memiliki luas terkecil menunjukkan kompleksitas antropogenik yang tinggi akibat dominasi lahan pertanian dan permukiman serta keberadaan jaringan irigasi, sehingga delineasi berbasis D8 konvensional menghasilkan skor IoU yang lebih rendah. Sebaliknya, Napun Gete dan Batutege yang lebih luas memiliki struktur topografi alami yang lebih tegas serta pola aliran yang cenderung lebih konvergen, sehingga seluruh metode, terutama platform konvensional mencapai skor IoU yang lebih tinggi. Meskipun demikian, karena analisis ini masih didasarkan pada tiga lokasi studi, pola hubungan antara IoU, luas, dan kompleksitas ini belum dapat digeneralisasi secara kuat. Pengujian pada lebih banyak DTA dengan rentang karakteristik yang beragam, disertai pengukuran indeks kompleksitas yang konsisten, akan membantu memperjelas apakah tren ini benar terjadi secara umum atau hanya muncul pada kasus-kasus tertentu.

## **Kesimpulan dan Saran**

### **Kesimpulan**

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan delineasi berbasis DEM dengan algoritma D8 pada HEC-HMS dan WMS umumnya menghasilkan batas DAS/DTA yang baik pada wilayah dengan topografi alami yang jelas. Namun, pada wilayah yang memiliki kompleksitas antropogenik tinggi—seperti keberadaan jaringan irigasi, drainase buatan, serta dominasi lahan pertanian dan permukiman—hasil delineasi berbasis D8 konvensional cenderung mengalami penurunan akurasi. Dalam konteks tersebut, platform ACAP yang mengintegrasikan komponen AI untuk mendukung pra-pemrosesan dan penyempurnaan data elevasi menunjukkan kinerja yang lebih baik, ditunjukkan oleh skor IoU yang lebih tinggi pada DTA Greneng dibandingkan HEC-HMS dan WMS. Temuan ini mengindikasikan bahwa peningkatan kualitas data input berbantuan AI dapat menjadi strategi yang menjanjikan untuk memperkecil perbedaan antara batas DAS topografis dan kondisi hidrologis fungsional, khususnya pada lanskap yang telah banyak mengalami modifikasi manusia.

Meskipun demikian, ruang lingkup penelitian ini masih terbatas karena pengujian dilakukan pada tiga lokasi studi dengan karakteristik tertentu, sehingga hasil yang diperoleh belum dapat digunakan untuk menyimpulkan keunggulan ACAP secara umum pada seluruh tipe DAS/DTA. Oleh karena itu, penelitian lanjutan perlu dilakukan pada jumlah lokasi yang lebih banyak dengan rentang kompleksitas topografi dan antropogenik yang lebih beragam, disertai pengukuran parameter kompleksitas yang terukur. Selain itu, evaluasi lebih mendalam juga diperlukan untuk menilai validitas model AI yang digunakan di dalam ACAP, termasuk sensitivitasnya terhadap kualitas data input (DEM, citra satelit, resolusi spasial, serta ketersediaan ground truth). Penguatan aspek tersebut akan membantu memastikan bahwa peningkatan akurasi yang diperoleh tidak hanya berlaku pada kasus tertentu, tetapi dapat direplikasi secara lebih luas dan konsisten.

## Saran

Saran untuk pengembangan di masa depan difokuskan pada perluasan kapabilitas platform ACAP agar tidak hanya unggul dalam delineasi, tetapi juga menjadi alat bantu pra-pemrosesan yang komprehensif. Untuk mencapai hal ini, langkah fundamental yang disarankan adalah integrasi ACAP dengan basis data nasional yang relevan, seperti DEMNAS untuk data elevasi dan citra satelit dari Badan Informasi Geospasial (BIG). Integrasi ini akan menjadi fondasi bagi pengembangan fungsionalitas yang lebih canggih.

Setelah integrasi data tercapai, disarankan untuk mengembangkan modul berbasis AI yang mampu melakukan estimasi parameter hidrologi secara otomatis. Dengan memanfaatkan data tutupan lahan dari citra satelit nasional yang sama, ACAP dapat dilatih untuk mengestimasi nilai koefisien limpasan (misalnya, *Curve Number*) untuk setiap sub-DAS yang telah didelineasi. Selain itu, untuk mendukung analisis hidraulika, kapabilitas ACAP dapat diperluas untuk ekstraksi geometri sungai secara otomatis. Model AI dapat dikembangkan lebih lanjut untuk mengidentifikasi tidak hanya garis tengah sungai, tetapi juga lebar dan posisi tebing dari kombinasi data DEMNAS dan citra resolusi tinggi, yang hasilnya dapat digunakan untuk menghasilkan draf penampang melintang (*cross-section*) awal untuk perangkat lunak pemodelan seperti HEC-RAS.

Agar pengembangan fungsionalitas tersebut dapat divalidasi dan terjamin keandalannya, ACAP sebaiknya diuji lebih lanjut pada Daerah Aliran Sungai (DAS) dengan skala dan kondisi hidrologi yang lebih beragam. Implementasi serangkaian saran ini akan mentransformasi ACAP menjadi platform persiapan data end-to-end yang secara signifikan mengakselerasi dan meningkatkan akurasi tahap pra-pemrosesan model hidrologi dan hidraulika.

## Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak penyandang dana yang telah mendukung penelitian ini, serta berbagai instansi yang telah menyediakan data geospasial. Terima kasih juga kepada semua pihak yang telah memberikan masukan berharga dan dukungan moril hingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik.

## Daftar Referensi

- Asdak, C. (2018). Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai. Gadjah Mada University Press.
- Aquaveo (n.d.) WMS User Manual (v10.1). Aquaveo, LLC.
- Aquaveo (n.d.) DEM Delineation (WMS Tutorial / Hydrologic Modeling Wizard). Aquaveo, LLC.
- Garbrecht, J., & Martz, L. W. (1997). The TOPAZ model for Digital Landscape Analysis. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grazinglands Research Laboratory.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of*

- America Bulletin*, Volume 56, Issue 3, pp. 275-370, [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2).
- Jenson, S. K., & Domingue, J. O. (1988). Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Volume 54, Issue 11, pp. 1593-1600.
- Maidment, D. R. (Ed.). (1993). *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill.
- Nugroho, U. C. (2012). Validasi delineation daerah aliran sungai DAS Ciliwung Hulu segmen Depok dengan metode Arc-Hydro dan metode manual [Skripsi Sarjana]. Universitas Indonesia.
- O'Callaghan, J. F., & Mark, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, Volume 28, Issue 3, pp. 323-344. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(84\)90011-0](https://doi.org/10.1016/0734-189X(84)90011-0),
- Pan, F., et al. (2022). A review of digital elevation model (DEM)-based methods for watershed delineation. *Water*, Volume 14, Issue 20, 3298. <https://doi.org/10.3390/w14203298>.
- Pratama, A. R., et al. (2022). Application of Artificial Intelligence in Disaster Management in Indonesia: A Systematic Literature Review. 2022 IEEE International Conference on Cybernetics and Computational Intelligence (ICCI), Bandung, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ICCI55223.2022.9843288>.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., & Planchon, O. (1991). The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, Volume 5, Issue 1, pp. 59-79. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>.
- Setiyowati, Y. A., Harisuseno, D., & Sajali, M. A. (2025). Evaluation of Catchment area delineation Methods: Comparison of TOPAZ on WMS with HEC-HMS 4.12. *Geosfera Indonesia*, Volume 10, Issue 2, pp. 125-145. <https://doi.org/10.19184/geosi.v10i2.53253>.
- Shen, C. (2018). A transdisciplinary review of deep learning research and its relevance for water resources scientists. *Water Resources Research*, Volume 54, Issue 11, pp. 8558-8593. <https://doi.org/10.1029/2018WR023361>.
- Stodt, J., Reich, C., & Clarke, N. (2024). Unified Intersection Over Union for Explainable Artificial Intelligence. In: Arai, K. (Ed.), *Intelligent Systems and Applications. Proceedings of the 2023 Intelligent Systems Conference (IntelliSys). Lecture Notes in Networks and Systems*, Volume 823. Springer, Cham. pp. 758-770, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-55552-0\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-031-55552-0_51).
- Tarboton, D. G. (1997). A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, Volume 33, Issue 2, pp. 309-319. <https://doi.org/10.1029/96WR03137>.
- U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center (USACE-HEC). (2023). *HEC-HMS User's Manual Version 4.11*. Davis, CA.

[Halaman ini sengaja dibiarkan kosong/*This page is intentionally left blank*]