

Perbandingan Debit Limpasan Langsung antara Pendekatan Model Numerik dan Konvolusi Hidrograf Satuan Sintetis

Cleon Christopher¹, *Bobby Minola Ginting², Doddi Yudianto², Albert Wicaksono²

¹Pasca Sarjana, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

²Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan

*) bobbyminola.g@unpar.ac.id

Received: 29 Oktober 2021 Revised: 27 Mei 2022 Accepted: 30 Juni 2022

Abstract

This paper compares the results of direct runoff obtained by a numerical model of the shallow water equations (SWE) with the synthetic unit hydrograph (SUH) methods generally used in Indonesia. It is known that such SUH methods are still empirical, thus making it difficult for users to determine a representative method. Meanwhile, the hydrodynamic approach such as the SWE numerical model can achieve more accurate results in predicting the direct runoff compared to the SUH methods, because the model itself is derived mathematically based on the physical processes. The findings indicate that the direct runoff predicted using the SWE numerical model (HEC-RAS 5.0.7) produced more accurate results for the peak discharge with an average error of -0.07%, the peak time with an average error of 19.77%, and the shape of the hydrograph with the smallest Root Mean Square Error (RMSE) from all the cases tested. Therefore, it can be concluded that in the future the use of a hydrodynamic approach is highly recommended for the direct runoff prediction. This paper was also aimed to be used as a reference in the development of new, more accurate SUH method in the future.

Keywords: *Direct runoff, HEC-RAS 5.0.7, hydrodynamic, shallow water model, synthetic unit hydrograph*

Abstrak

Makalah ini membandingkan hasil debit limpasan langsung yang diperoleh menggunakan model numerik aliran dangkal dengan metode hidrograf satuan sintetis (HSS) yang sering digunakan di Indonesia. Secara umum dapat diketahui bahwa metode HSS tersebut masih bersifat empiris, sehingga menyulitkan pengguna dalam penentuan metode yang representatif. Sementara, pendekatan hidrodinamik seperti model numerik aliran dangkal dapat menghasilkan hasil yang lebih akurat dalam memprediksi limpasan langsung dibandingkan dengan HSS karena model tersebut diturunkan secara matematis berdasarkan proses fisik. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa prediksi limpasan langsung dengan model numerik aliran dangkal (HEC-RAS 5.0.7) memberikan hasil yang lebih akurat dalam memprediksi debit puncak dengan rata-rata error -0,07%, waktu puncak dengan rata-rata error 19,77% serta bentuk hidrograf dengan nilai Root Mean Square Error (RMSE) yang paling kecil pada semua kasus yang telah diuji. Oleh sebab itu, dapat disimpulkan bahwa pendekatan hidrodinamik sangat direkomendasikan dalam memprediksi limpasan langsung untuk kedepannya. Makalah ini juga dibuat dengan harapan dapat dijadikan acuan dalam pengembangan HSS baru yang lebih akurat di masa mendatang.

Kata kunci: *HEC-RAS 5.0.7, hidrodinamik, hidrograf satuan sintetis, model numerik aliran dangkal, limpasan langsung*

Pendahuluan

Perhitungan proses hujan-limpasan merupakan salah satu bagian dalam analisis hidrologi yang digunakan untuk desain infrastruktur sumber daya

air khususnya terkait pengendalian banjir. Proses hujan-limpasan merupakan proses perubahan hujan pada suatu daerah tangkapan air (DTA) menjadi aliran permukaan. Proses ini dapat diprediksi secara langsung menggunakan metode hidrograf satuan

(HS) pada DTA yang memiliki data curah hujan dan debit pencatatan yang lengkap dalam jangka waktu yang relatif panjang. Data tersebut kemudian akan diproses menjadi sebuah bentuk hidrograf yang merepresentasikan hubungan antara nilai debit pada sebuah titik keluaran (outlet) yang ditinjau dari curah hujan sebesar 1 mm yang turun secara merata selama satu jam. Perlu dicatat bahwa meskipun terdapat data curah hujan yang cukup lengkap, namun tanpa adanya data pencatatan debit, simulasi proses hujan-limpasan dengan metode HS tidak dapat dilakukan. Kasus seperti ini cukup sering ditemui di Indonesia. Untuk mengatasi hal ini, metode hidrograf satuan sintetis (HSS) diperlukan, sehingga besaran hidrograf banjir pada sebuah DTA yang ditinjau dapat diprediksi.

Dalam Standar Nasional Indonesia (SNI) (Standar Nasional Indonesia, 2016) "Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana", dinyatakan bahwa terdapat tiga metode HSS yang dapat digunakan sebagai standar dalam memprediksi hidrograf banjir pada sebuah DTA. Ketiga metode tersebut adalah Soil Conservation Service (SCS) (SCS, 2002), Snyder (Snyder, 1938) dan Gajah Mada (GAMA)-I (Harto, 1985). Pada dasarnya, ketiga metode ini dikembangkan secara empiris, sehingga belum tentu dapat diaplikasikan secara langsung pada setiap DTA. Menurut studi (Bhunya *et al.*, 2011), metode SCS dan Snyder termasuk ke dalam metode HSS tradisional yang cenderung memberikan hasil yang kurang memuaskan dan sulit untuk digunakan.

Selain ketiga metode yang telah disebutkan sebelumnya, terdapat pula beberapa metode HSS yang telah dikembangkan di Indonesia seperti ITB (Natakusumah *et al.*, 2011) dan Limantara (Limantara, 2012). Namun, metode-metode ini belum dapat digunakan sebagai standar dan masih memerlukan validasi lebih lanjut sebagaimana tertuang dalam (Standar Nasional Indonesia, 2016). Selain metode-metode yang dikembangkan di Indonesia, terdapat pula metode HSS yang dikembangkan di negara lain namun sering digunakan dalam analisis hidrologi, contoh HSS Nakayasu (Jeong *et al.*, 2001; Soemarto, 1987) yang dikembangkan di Jepang. Semua metode HSS (meskipun beberapa telah ditetapkan menjadi metode acuan dalam SNI) dapat dipandang sebagai metode yang masih membutuhkan validasi lebih lanjut karena beberapa alasan. Pertama, setiap HSS yang terdapat pada SNI bersifat empiris, sehingga terdapat satu atau lebih koefisien yang harus ditentukan sendiri oleh pengguna. Dalam banyak kasus, koefisien-koefisien tersebut bukan merupakan nilai awal melainkan nilai yang harus diiterasi dan dikalibrasi berdasarkan karakteristik DTA. Alasan ini menimbulkan ketidaksesuaian antara teori yang telah dirancang untuk HSS

tersebut dengan kasus yang dihadapi di lapangan. Alasan kedua adalah untuk DTA yang sama, setiap metode HSS cenderung memberikan hasil perhitungan hidrograf yang sangat berbeda satu dengan yang lain. Hal ini berakibat pada timbulnya hasil yang bias di antara masing-masing metode HSS, dan oleh sebab itu, menimbulkan keraguan bagi pengguna dalam memilih metode HSS yang sesuai untuk DTA yang ditinjau.

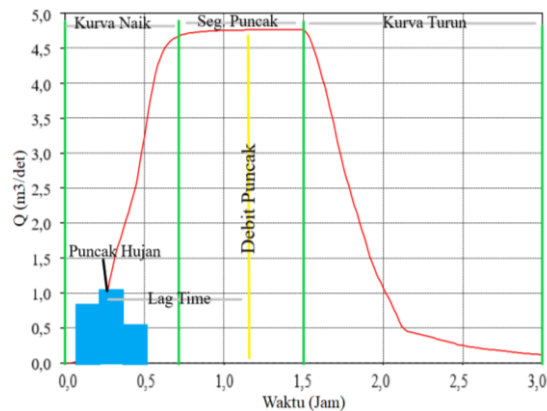
Salah satu pendekatan baru yang dapat dilakukan untuk mengatasi kekurangan metode HSS dalam prediksi limpasan langsung adalah dengan menggunakan simulasi hidrodinamik, sebagai contoh model numerik aliran dangkal 2D. Pada dasarnya, model numerik aliran dangkal dapat digunakan untuk mentransformasi curah hujan menjadi aliran permukaan berdasarkan proses fisik yang diformulasikan secara matematik ke dalam persamaan kontinuitas dan persamaan kekekalan momentum aliran. Persamaan matematik yang diselesaikan secara numerik tersebut mencakup beberapa proses fisik untuk komponen aliran, beberapa di antaranya seperti kedalaman, kecepatan, kekasaran saluran/lahan, kemiringan saluran/lahan, debit, hujan dan infiltrasi. Beberapa model numerik aliran dangkal yang dapat digunakan untuk perhitungan proses hujan-limpasan adalah NUFSAW2D (Ginting *et al.*, 2018; 2019), HEC-RAS (Brunner, 2016; Costabile *et al.*, 2013, 2020; Hall, 2015), FullSWOF2D (Wittmann *et al.*, 2017), dan lain-lain. Dalam studi terbaru yang dilakukan oleh (Costabile *et al.*, 2020), dikemukakan bahwa model HEC-RAS dapat diandalkan untuk proses perhitungan hujan-limpasan.

Dalam makalah ini, akan disajikan perbandingan hasil perhitungan limpasan langsung antara metode HSS Snyder, SCS, GAMA-I, ITB dan Nakayasu dengan hasil perhitungan menggunakan model HEC-RAS. Studi kasus yang diambil merupakan kasus-kasus yang telah dipublikasikan pada makalah-makalah sebelumnya, dimana kasus tersebut mencakup beberapa DTA berskala kecil yang memiliki data curah hujan dan data pencatatan debit atau hasil debit secara analitis. Hipotesa yang diambil dalam penelitian ini adalah bahwa penggunaan model numerik aliran dangkal dalam proses transformasi hujan-limpasan akan lebih baik daripada penggunaan metode HSS, karena proses perhitungan dalam model numerik dilakukan berdasarkan proses fisik.

Hidrograf banjir

Hidrograf banjir merupakan sebuah grafik yang menunjukkan hubungan antara debit yang terukur pada outlet sebuah DTA. Hidrograf terdiri dari

beberapa komponen utama, yaitu lengkung naik, segmen puncak dan lengkung turun, lihat Gambar 1. Kurva naik merupakan segmen yang dipengaruhi oleh intensitas hujan, durasi hujan dan keadaan daerah sebelum hujan. Segmen puncak merupakan sebuah kurva U terbalik dan biasanya meliputi nilai debit puncak yang tercapai ketika kontribusi aliran pada outlet dari setiap bagian DTA sudah tercapai. Lengkung resesi merupakan lengkung penurunan hidrograf yang dipengaruhi oleh sifat dan keadaan akuifer, dan tidak dipengaruhi oleh intensitas hujan.



Gambar 1. Hidrograf banjir

Komponen-komponen lain juga ditunjukkan pada Gambar 1 yaitu *lag time* yang merupakan waktu antara pertengahan terjadinya hujan sampai dengan terjadinya debit puncak, waktu puncak (T_p) yang merupakan waktu antara mulai terjadinya hujan sampai dengan terjadinya puncak aliran, waktu konsentrasi yang merupakan waktu antara berakhirnya hujan sampai dengan terjadinya puncak debit, dan waktu dasar (T_b) yang merupakan total waktu terjadinya pengaruh hujan terhadap aliran keseluruhan aliran akibat hujan. Terdapat juga aliran dasar yang tidak dipengaruhi secara langsung oleh curah hujan melainkan oleh elevasi muka air tanah. Semua komponen dan besaran yang sudah dikemukakan tersebut akan membentuk kurva hidrograf yang menggambarkan proses terjadinya limpasan akibat hujan yang turun di atas DTA yang ditinjau. Proses tersebut sangat dipengaruhi oleh karakteristik DTA seperti luas DTA, kemiringan lahan, tata guna lahan dan karakteristik hujan seperti durasi hujan yang berlangsung serta distribusi hujan yang terjadi.

Hidrograf satuan sintetis (HSS)

Dalam sub-bab ini, akan dipaparkan lima metode HSS yang umum digunakan di Indonesia berikut pembahasan yang mencakup keakuratan metode-metode tersebut berdasarkan hasil studi-studi terdahulu. Namun, persamaan-persamaan yang

digunakan dalam setiap metode tersebut tidak dibahas dalam sub-bab ini tetapi dapat dilihat pada referensi yang digunakan dalam makalah ini. HSS Snyder dirancang berdasarkan pendekatan empiris yang menggunakan hubungan antara karakteristik DTA seperti luas DTA, panjang sungai utama dan panjang dari outlet DTA sampai ke titik pada sungai utama yang terdekat dengan titik berat dari DTA. HSS Snyder dikembangkan pada tahun 1938 dan sudah digunakan pada banyak studi. Pada studi yang dilakukan oleh (Safarina *et al.*, 2011), ditemukan bahwa HSS Snyder mempunyai rasio ketidakesesuaian debit puncak rata-rata 25% dan ketidakesesuaian bentuk hidrograf rata-rata 23%, namun rasio error tersebut masih dianggap normal. Sebaliknya, pada studi terbaru oleh (Labdul *et al.*, 2021) dilaporkan bahwa hasil HSS Snyder jauh lebih kecil dibandingkan dengan data yang terukur. Dari kedua studi tersebut, dapat dilihat bahwa HSS Snyder perlu dikaji kembali dikarenakan hasil yang tidak konsisten.

HSS SCS dikembangkan dengan menggunakan hasil-hasil observasi dari karakteristik HS alami dari banyak DTA berskala besar maupun kecil di Amerika Serikat. Studi yang dilakukan oleh (Pradipta *et al.*, 2019) untuk DTA Juana menunjukkan bahwa HSS SCS merupakan metode yang representatif untuk daerah tersebut dibandingkan dengan HSS Nakayasu dan HSS GAMA dengan perbedaan error mencapai 3,08% terhadap data debit puncak yang tercatat. Sebaliknya, studi yang dilakukan oleh (Safarina *et al.*, 2011) menunjukkan bahwa hasil HSS SCS pada 32 DTA yang dikaji banyak melampaui nilai debit puncak tercatat dengan rata-rata perbedaan sebesar 182% serta perbedaan bentuk hidrograf sebesar 101%. Dari kajian yang sudah dilakukan tersebut, dapat disimpulkan bahwa HSS SCS masih belum akurat dalam memprediksi bentuk dan debit puncak hidrograf serta hasil yang diperoleh tidak konsisten sehingga perlu dikaji lebih lanjut.

HSS GAMA-1 telah dikembangkan dengan mengobservasi 30 DTA di pulau Jawa, dimana metode ini dikembangkan di Indonesia oleh Prof. Sri Harto pada tahun 1990. Studi yang dilakukan oleh (Limantara *et al.*, 2014) untuk DTA Samiran, di Pulau Madura dengan luas 450 km² menunjukkan perbedaan yang signifikan pada bentuk hidrograf, waktu puncak serta debit puncak terhadap data yang tercatat. Sebaliknya, pada studi untuk DTA Juana di Pulau Jawa dengan luas 1.283,9 km² yang dilakukan oleh (Pradipta *et al.*, 2019), diperoleh perbedaan debit puncak yang kecil sebesar 5,55% terhadap data tercatat. Studi yang dilakukan oleh (Safarina *et al.*, 2011) untuk 32 daerah aliran sungai (DAS) di Pulau Jawa menunjukkan bahwa HSS GAMA-1 memiliki rentang kesalahan selisih debit puncak

dengan kisaran 12%-517% dan kisaran kesalahan bentuk sebesar 4%-149%. Dalam studi tersebut dilaporkan pula bahwa hasil perhitungan dengan HSS GAMA-1 untuk sebagian besar DAS tersebut memiliki volume limpasan langsung yang tidak sama dengan 1 mm, sehingga disimpulkan bahwa klasterisasi HSS GAMA-1 tetap akan dilakukan hingga tersedianya studi untuk memperbaiki volume limpasan langsung. Dari hasil-hasil kajian studi terdahulu tersebut, HSS GAMA-1 cenderung memiliki kinerja yang tidak konsisten.

HSS ITB dikembangkan dengan pendekatan proses *reverse engineering* yang didasarkan pada pengamatan prinsip kerja, struktur, fungsi dan operasi dari berbagai metode serta hasil perhitungan dari berbagai HSS yang umum digunakan dan dikembangkan melalui hasil pengamatan lapangan. Metode ini dirancang untuk memenuhi hukum kekekalan massa. Metode ini dikembangkan oleh Dr. Natakusumah, dimana hasil penelitian menunjukkan bahwa HSS ITB membutuhkan lebih banyak kalibrasi pada berbagai DAS selain DAS Ciliwung. Oleh sebab itu, masih dibutuhkan usaha yang lebih dalam mengkalibrasi parameter-parameter yang digunakan. Studi lainnya yang dilakukan oleh (Kristianto *et al.*, 2019) menemukan bahwa HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 menghasilkan perbedaan yang cukup signifikan antara data yang diamati dan hasil perhitungan, sehingga HSS ITB perlu divalidasi lebih lanjut.

HSS Nakayasu dikembangkan oleh Dr. Nakayasu berdasarkan data HS yang berasal dari banyak DTA di Jepang dan biasanya digunakan pada kebanyakan analisis hidrologi untuk DTA di Indonesia. Studi pada DTA Juana yang dilakukan oleh (Pradipta *et al.*, 2019) melaporkan bahwa HSS Nakayasu memiliki prediksi yang kurang akurat untuk debit puncak. Sebaliknya, berdasarkan studi yang dilakukan oleh (Safarina *et al.*, 2011) untuk 32 DAS di Indonesia, ditemukan bahwa hasil perhitungan dengan HSS Nakayasu sebagian besar melampaui hasil debit puncak yang seharusnya dengan rata-rata error mencapai 22% dan ketidaksesuaian bentuk hidrograf dengan rata-rata error mencapai 9%. Namun, hasil ini dikatakan sebagai hasil terbaik dalam penelitian tersebut. Berdasarkan hasil-hasil di atas, dapat dilihat bahwa HSS Nakayasu masih tidak konsisten dalam memprediksi bentuk dan debit puncak hidrograf banjir sehingga diperlukan validasi lebih lanjut yang akan dilakukan dalam penelitian ini.

Model numerik aliran dangkal

Model numerik aliran dangkal yang digunakan pada penelitian ini adalah perangkat lunak HEC-RAS 5.0.7 yang merupakan model yang dapat digunakan

untuk pemodelan hidrodinamika 1D dan 2D. Secara konsep, HEC-RAS dapat diaplikasikan dalam mensimulasikan proses fisik hujan-limpasan pada suatu DTA secara langsung. Pada dasarnya, terdapat dua jenis model yang tersedia dalam HEC-RAS untuk simulasi 2D yaitu model aliran dangkal difusif dan dinamik. Dalam penelitian ini, hanya dibahas model dinamik 2D. Persamaan pengatur yang digunakan dalam model tersebut dapat dijabarkan sebagai berikut (Brunner, 2016):

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = r - i \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{n^2 g |V|}{h^{\frac{4}{3}}} u + \vartheta_t \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + f v \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{n^2 g |V|}{h^{\frac{4}{3}}} v + \vartheta_t \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + f u \quad (3)$$

dimana $H(x, y, t) = z_b(x, y) + h(x, y, t)$ adalah elevasi muka air (m), z_b adalah elevasi dasar saluran dalam koordinat Cartesian x, y (m), h adalah kedalaman aliran (m), hu dan hv secara berurutan adalah debit satuan dalam koordinat x dan y (m^2/det), u dan v secara berurutan adalah kecepatan dalam arah x and y (m/det), r adalah tinggi hujan (m), i adalah tinggi infiltrasi (m), g adalah percepatan gravitasi (m/det^2), n adalah koefisien Manning ($det/m^{1/3}$), ϑ_t koefisien viskositas Eddy dalam arah horizontal, dan f adalah parameter Coriolis ($1/det$).

Persamaan-persamaan di atas dapat ditulis kembali dalam bentuk vektor menjadi

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \nabla \cdot hV = r - i \quad (4)$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V = -g \nabla H - \frac{n^2 g |V|}{h^{\frac{4}{3}}} V + f k \times V + \vartheta_t \nabla^2 \quad (5)$$

dimana $V = (u, v)$ adalah vektor kecepatan dan k adalah vektor unit dalam arah vertikal. Persamaan 4 kemudian diintegrasikan dalam domain horizontal dengan vektor normal batas (n). Lalu, dengan menerapkan teorema divergensi Gauss, persamaan tersebut menjadi

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{\Omega} d\Omega + \iint_S V \cdot n dS = R \quad (6)$$

dimana Ω menyatakan domain 3D yang dibatasi oleh aliran, S menyatakan batas domain dan R menyatakan volume hujan bersih (setelah tinggi hujan dikurangi dengan infiltrasi). Persamaan 6 memenuhi pendekatan batimetri subgrid batimetri yang dikemukakan oleh (Casulli, 2009). Dengan pendekatan batimetri subgrid tersebut, perhitungan dapat dilakukan dengan grid komputasi berkurang

besar menggunakan peta topografi yang detail. Penyelesaian Persamaan 4 dan 5 dapat dilihat pada (Brunner, 2016).

Dalam kurun waktu 5-10 tahun terakhir, model numerik aliran dangkal telah banyak digunakan dalam pemodelan proses fisik hujan-limpasan dan terbukti akurat. Beberapa hasil publikasi terkait dipaparkan sebagai berikut. Dalam studi yang dilakukan oleh (Ginting *et al.*, 2018; 2019), model NUFSAW2D berhasil mensimulasikan transformasi hujan menjadi limpasan untuk beberapa buah DTA dengan topografi yang cukup kompleks. Model FullSWOF2D adalah model aliran dangkal yang digunakan dalam studi (Wittmann *et al.*, 2017) untuk mensimulasikan proses aliran pada lahan akibat hujan untuk DTA dengan luasan yang cukup besar.

Pada studi (Özgen *et al.*, 2016) metode *depth-dependent anisotropic* diterapkan pada model aliran dangkal untuk pemodelan aliran pada lahan dan diperoleh hasil yang cukup akurat. Dalam penelitian yang dilakukan (Liang *et al.*, 2015), proses aliran lahan pada beberapa DTA disimulasikan dengan model numerik aliran dangkal. Dalam studi (Fernández-Pato *et al.*, 2016) model numerik aliran dangkal digabungkan dengan model infiltrasi empiris untuk memodelkan transformasi hujan-limpasan. Model numerik aliran dangkal dirancang dengan teknologi *Graphical Processing Unit* (GPU) oleh (Lacasta *et al.*, 2015) untuk simulasi hujan-limpasan.

Kajian model aliran dangkal untuk pemodelan kasus hujan-limpasan juga dilakukan oleh (Costabile *et al.*, 2013) untuk kasus eksperimental dan kasus nyata, dimana hasil numerik dari studi tersebut menunjukkan performa yang baik dalam memodelkan semua kasus yang dikaji. Dalam studi (Costabile *et al.*, 2020), HEC-RAS 5.0.7 terbukti sebagai model yang handal digunakan untuk perhitungan hidrograf debit dalam simulasi hujan-limpasan. Berdasarkan rekapitulasi studi-studi terdahulu ini, dapat dianggap bahwa model numerik aliran dangkal memiliki potensi yang cukup besar untuk dimanfaatkan sebagai alat perhitungan limpasan langsung. Hal ini juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh (Hall, 2015), dimana dinyatakan bahwa pendekatan secara numerik dengan model aliran dangkal tampak lebih menarik bagi insinyur dan ilmuwan karena secara signifikan dapat mengurangi kebutuhan pemodelan hidrologi untuk estimasi limpasan.

Metode

Penelitian ini dimulai dengan mengidentifikasi masalah yang dihadapi yaitu ketidakakuratan hasil

perhitungan dengan HSS dalam memprediksi limpasan langsung pada suatu DTA dan peluang pemanfaatan model numerik aliran dangkal guna memperoleh hasil perhitungan yang lebih akurat. Langkah selanjutnya adalah studi literatur dan pengumpulan data yang dilakukan secara bersamaan. Studi literatur yang dimaksud adalah penelaahan studi-studi terdahulu dalam kurun waktu 10 tahun terakhir yang menggunakan kelima metode HSS yang ditinjau dalam penelitian ini. Selain itu, studi literatur yang dilakukan juga mencakup studi-studi terdahulu dalam 5-10 tahun terakhir yang menggunakan model numerik aliran dangkal untuk simulasi hujan-limpasan. Rekapitulasi studi literatur ini telah dijabarkan dalam sub-bab sebelumnya.

Tahapan pengumpulan data adalah dengan mengumpulkan kasus-kasus 2D hujan-limpasan yang tersedia dalam berbagai jurnal yang telah dipublikasikan. Data dikumpulkan dengan mencari jurnal kasus hipotetis dan eksperimental 2D terkait proses hujan-limpasan dari dua buah jurnal yang sudah terpublikasi yaitu studi oleh (Gottardi *et al.*, 2008) dan (Yu *et al.*, 2014). Data debit hasil analisis/eksperimen tersebut akan dijadikan sebagai pembandingan untuk hasil perhitungan hidrograf HSS dan model HEC-RAS yaitu bentuk hidrograf, debit puncak dan waktu puncak. Data yang terkumpul akan digunakan pada semua analisis sebagai masukan parameter yang kemudian dapat menghasilkan keluaran berupa hidrograf.

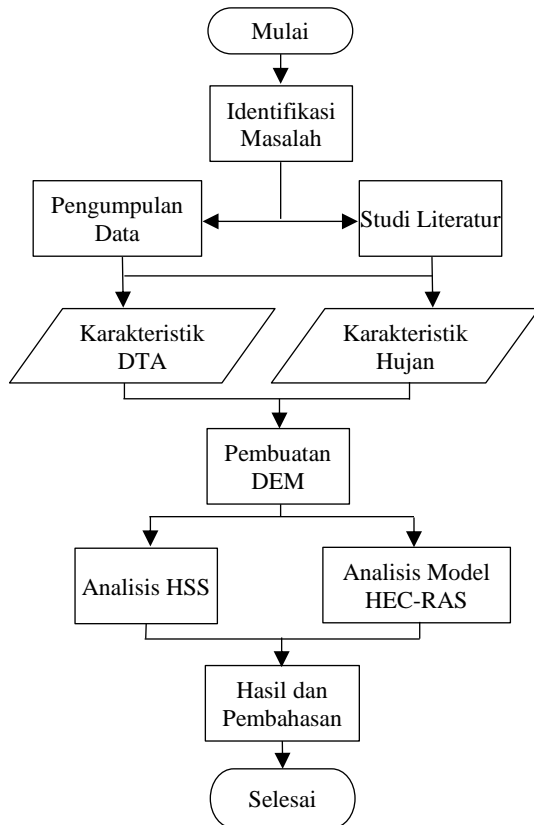
Setelah dilakukannya pengumpulan data serta studi literatur, kemudian dilakukan dan dimulai dari perhitungan HSS untuk semua kasus yang sudah terkumpul. Setelah semua perhitungan HSS selesai dilakukan, peta *Digital Elevation Model* (DEM) dibuat untuk semua kasus yang ditinjau yang kemudian akan digunakan untuk simulasi model numerik aliran dangkal. Simulasi dapat dimulai setelah DEM selesai diproses dan dapat digunakan pada perangkat lunak HEC-RAS 5.0.7. Hasil keluaran yang akan dihasilkan adalah bentuk hidrograf, debit puncak dan waktu puncak untuk setiap analisis yang dilakukan. Ketiga nilai tersebut dibandingkan dengan menggunakan fungsi objektif statistik yaitu *Root Mean Square Error* (RMSE) untuk memeriksa kecocokan bentuk hidrograf dan *Relative Error* (RE) yang digunakan untuk memeriksa penyimpangan nilai debit puncak dan waktu puncak. Perhitungan kedua fungsi objektif ini dijabarkan melalui persamaan sebagai berikut:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (7)$$

$$RE = \left| \frac{x_i - \hat{x}_i}{x_i} \right| \times 100\% \quad (8)$$

dimana x_i adalah data nilai pengamatan, \hat{x}_i adalah hasil model.

Bagian terakhir dari makalah ini adalah penjabaran perbandingan hasil serta penyusunan kesimpulan. Semua proses yang dikerjakan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Hasil dan Pembahasan

Data

Penelitian ini difokuskan pada simulasi hujan-limpasan untuk berbagai DTA dengan bentuk sederhana berskala kecil, baik yang bersifat hipotetis maupun yang dibuat pada laboratorium, sehingga tidak terdapat efek infiltrasi. Dengan kata lain, seluruh curah hujan yang turun pada DTA akan berkontribusi langsung sebagai curah hujan efektif dalam pembentukan limpasan pada outlet yang ditinjau. Alasan utama pemilihan studi kasus seperti ini adalah bahwa perbandingan tingkat keakuratan antara setiap metode HSS dan model HEC-RAS dapat dilakukan secara objektif terhadap hasil analisis atau pengukuran yang telah dilakukan.

Penilaian secara objektif yang dimaksud dalam hal ini adalah penilaian terhadap kemampuan persamaan-persamaan empiris yang terdapat pada masing-masing metode HSS maupun terhadap kemampuan skema numerik yang terdapat pada model HEC-RAS dalam memprediksi limpasan langsung secara akurat. Dengan demikian, faktor

kesalahan yang berasal dari luar (yaitu selain daripada proses perhitungan yang terdapat pada setiap metode HSS maupun model HEC-RAS) dapat dihindarkan.

Sebagai contoh, pemilihan DTA atau DAS nyata sebagai studi kasus memiliki beberapa risiko/keterbatasan seperti (1) kualitas data pencatatan curah hujan dan debit outlet yang kurang baik (pencatatan data historis di Indonesia cenderung bersifat manual), (2) kuantitas data pencatatan curah hujan dan debit outlet yang kurang lengkap (banyak data hilang), (3) data curah hujan yang tercatat meskipun cukup lengkap namun hujan tersebut pada kenyataannya bersifat tidak merata/tidak seragam pada seluruh wilayah DTA atau DAS yang ditinjau (karena data yang terukur merupakan data curah hujan titik) dan (4) terjadinya proses yang alami yang sangat kompleks pada DTA atau DAS tersebut yang tidak dapat dimodelkan secara langsung oleh metode HSS maupun model numerik seperti aliran air tanah yang akan menyebabkan adanya aliran dasar (*base flow*) sehingga mempengaruhi hidrograf banjir yang terbentuk.

Dalam makalah ini, hidrograf satuan tidak akan dibandingkan untuk setiap metode yang ditinjau dengan alasan sebagai berikut. Jika menggunakan parameter hujan 1 mm, simulasi dengan model HEC-RAS cenderung tidak stabil yang mungkin disebabkan oleh tinggi aliran permukaan (*overland flow*) yang cukup kecil akibat tinggi hujan yang hanya bernilai 1 mm. Secara numerik, hal ini berkaitan dengan teknik/perlakuan kering-basah (*wet-dry treatment*) pada model HEC-RAS dan presisi angka komputer pada HEC-RAS yang mungkin masih menerapkan sistem *single-precision* (hal ini terlihat dari pembulatan yang dilakukan pada HEC-RAS secara otomatis setelah 4 desimal). Seharusnya, untuk simulasi hujan-limpasan, model numerik yang digunakan menerapkan sistem *double-precision*, lihat (Ginting *et al.*, 2018; 2019).

Tabel 1 menunjukkan data karakteristik setiap DTA yang digunakan pada makalah ini, Tabel 2 mengilustrasikan bentuk jenis DTA secara 2D dan Tabel 3 menunjukkan karakteristik hujan yang terkorrespondensi dengan setiap kasus yang ditinjau. Perlu dicatat bahwa untuk kasus 1 dan 2 yang ditunjukkan dalam Tabel 1, karakteristik asli DTA yang terdapat pada publikasi terkait bersifat 1D, sehingga dalam analisis yang dilakukan pada penelitian ini, lebar DTA dianggap sebesar 1 m. Data yang ditunjukkan dalam Tabel 3 merupakan curah hujan seragam yang jatuh secara merata pada seluruh wilayah DTA yang ditinjau. Dalam sub-bab selanjutnya, dipaparkan hasil analisis untuk masing-masing kasus.

Tabel 1. Data Karakteristik DTA

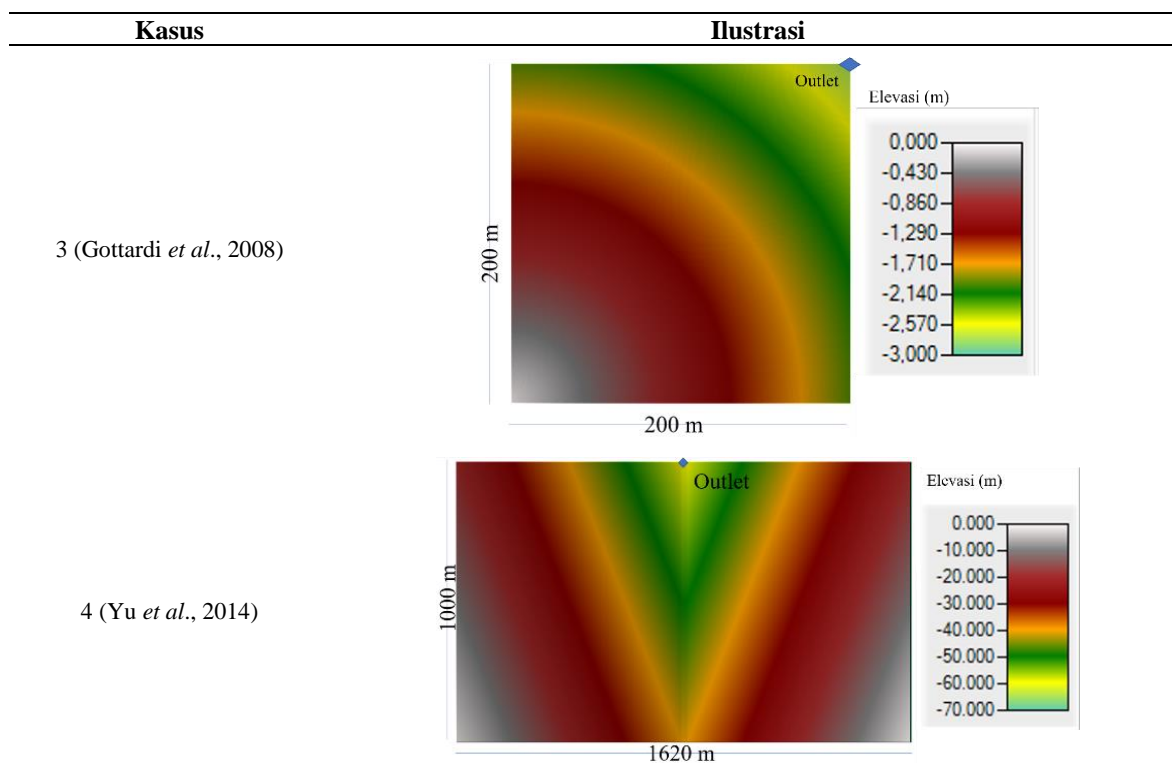
Kasus	Jenis	Luas (m*m)	Slope(m/m)	Kekasaran(det/m ^{1/3})
1 (Gottardi <i>et al.</i> , 2008)	1D	200x1	Sox=0,001	0,03
2 (Gottardi <i>et al.</i> , 2008)	1D	21,945x1	Sox=0,04	0,5
3 (Gottardi <i>et al.</i> , 2008)	2D	200x200	Sox= 0,01 Soy= 0,01	0,04
4 (Yu <i>et al.</i> , 2014)	2D	1.620x1.000	Sox= 0,05 Soy= 0,02	Tengah = 0,15 Sayap = 0,015

Keterangan:

Sox = kemiringan lahan dalam arah x dan

Soy = kemiringan lahan dalam arah y.

Tabel 2. Ilustrasi Kasus 2D



Tabel 3. Data Karakteristik Hujan

Kasus	Jenis	Intensitas Hujan	Durasi Hujan (menit)
1 (Gottardi <i>et al.</i> , 2008)	1D	60 mm/jam	60
2 (Gottardi <i>et al.</i> , 2008)	1D	$2,58233 \times 10^{-5}$ m/det	60
3 (Gottardi <i>et al.</i> , 2008)	2D	1 mm/menit	100
4 (Yu <i>et al.</i> , 2014)	2D	10,8 mm/jam	100

Hasil kasus 1

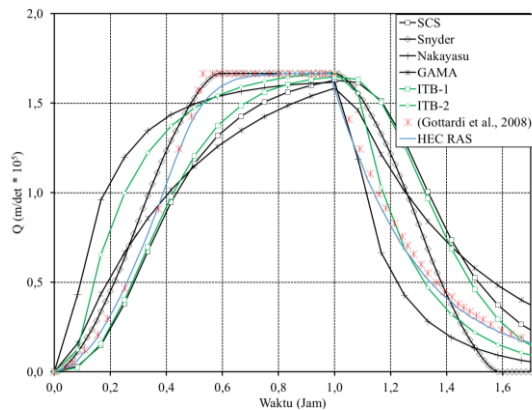
Kasus 1 merupakan kasus sederhana saluran dengan panjang 200 m, lebar 1 m, kemiringan dasar 0,001 dan koefisien Manning 0,03 det/m^{1/3}, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Tabel 2 menunjukkan curah hujan turun secara merata dengan intensitas 60 mm/jam selama 1 jam. Dengan nilai-nilai parameter tersebut, hasil analitis untuk kasus ini adalah waktu konsentrasi sebesar 31,6 menit. Selain itu ketika aliran sudah mencapai kondisi langgeng, hasil analitis memberikan nilai puncak debit satuan

sebesar $1,67 \times 10^{-3}$ m²/det. Simulasi numerik model HEC-RAS dilakukan dengan membuat diskritisasi ruang sebesar 0,05 m dalam arah *x* dan 0,25 m dalam arah *y*. Perbandingan antara hasil metode HSS, hasil model HEC-RAS dan hasil analitis disajikan dalam Gambar 3 dan Tabel 4. Secara visual dapat dilihat dari Gambar 3 bahwa HSS Snyder mampu memberikan hasil kurva naik hidrograf yang mendekati hasil analitis, sedangkan HSS ITB-2 mampu memberikan hasil kurva turun hidrograf yang mendekati hasil analitis, lebih baik daripada hasil metode HSS lainnya.

Tabel 4. Nilai *RMSE* dan *RE* kasus 1

Kasus 1	HEC-RAS	Nakayasu	SCS	ITB-1	ITB-2	GAMA-1	Snyder
Q_p <i>RE</i>	-0,100%	-2,969%	-2,345%	-1,085%	0,319%	-4,946%	0,000%
T_p <i>RE</i>	50,600%	88,250%	88,250%	88,250%	88,250%	88,250%	25,500%
<i>RMSE</i> (m/det x10 ⁵)	0,050	0,264	0,301	0,274	0,156	0,253	0,185

Sementara itu, dapat dilihat pula bahwa model HEC-RAS secara visual mampu memberikan kurva naik dan kurva turun yang cukup mendekati hasil analitis dan lebih baik daripada seluruh metode HSS.



Gambar 3. Hasil kasus 1

Dari Tabel 4 dapat dilihat bahwa HSS Snyder menghasilkan nilai debit puncak yang sama dengan hasil analitis, ditunjukkan dari nilai *RE* untuk Q_p sebesar 0%. Metode HSS lainnya dapat memberikan nilai debit puncak yang cukup representatif terhadap hasil analitis yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk Q_p yang relatif kecil, dimana HSS GAMA-I memberikan hasil yang paling buruk di antara metode HSS lainnya. Sementara itu, model HEC-RAS terbilang cukup akurat dalam memprediksi debit puncak yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk Q_p sebesar -0,1%. HSS Snyder kembali menunjukkan hasil yang lebih akurat daripada metode HSS lainnya dalam memprediksi waktu puncak hidrograf yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk T_p sebesar 25,5%, sedangkan HSS lainnya memberikan nilai *RE* untuk T_p yang serupa yaitu sebesar 88,25%. Di sisi lain dapat dilihat bahwa meskipun lebih buruk daripada HSS Snyder, model HEC-RAS masih terbilang cukup akurat dalam mengestimasi waktu puncak hidrograf dengan menghasilkan nilai *RE* untuk T_p sebesar 50,6%.

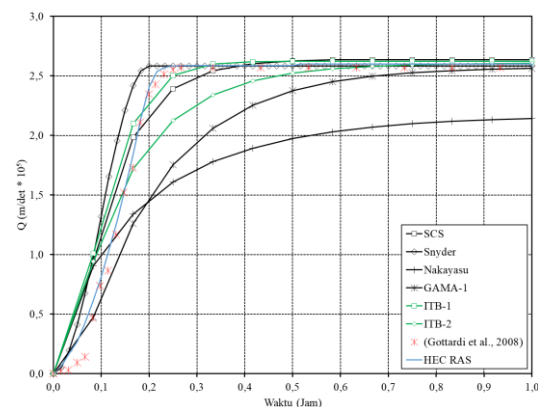
Dari segi kecocokan bentuk hidrograf, HSS ITB-2 mampu memberikan tingkat kesalahan terkecil di antara metode HSS lainnya dengan nilai *RMSE* sebesar 0,156 m/det x10⁵. Sementara itu, HSS SCS memberikan tingkat kesalahan yang terbesar di antara semua metode HSS lainnya dengan nilai

RMSE sebesar 0,301 m/det x10⁵. Di sisi lain dapat dilihat bahwa model HEC-RAS mampu menghasilkan nilai *RMSE* sebesar 0,05 m/det x10⁵ yang secara signifikan jauh lebih kecil daripada metode HSS lainnya. Dengan kata lain, model HEC-RAS mampu menghasilkan bentuk hidrograf yang paling representatif terhadap hasil analitis.

Hasil kasus 2

Kasus 2 juga merupakan kasus sederhana, yaitu saluran 1D dengan panjang 21,945m, lebar 1m, kemiringan dasar 0,04 dan koefisien Manning 0,5 det/m^{1/3}, sebagaimana Tabel 1. Terlihat pada Tabel 3, curah hujan turun secara merata dengan intensitas 2,58233x10⁻⁵ m/det selama 1 jam. Waktu konsentrasi hasil pengamatan untuk kasus ini adalah 0,2667 jam. Ketika aliran sudah mencapai kondisi langgeng, hasil pengamatan memberikan nilai puncak debit satuan sebesar 2,57x10⁻³ m/detx10⁵. Simulasi numerik model HEC-RAS dilakukan dengan diskritisasi ruang sebesar 0,025 m dalam arah x dan 0,025 m dalam arah y.

Perbandingan antara hasil metode HSS, hasil model HEC-RAS dan hasil pengamatan disajikan dalam Gambar 4 dan Tabel 5. Secara visual dapat dilihat pada Gambar 4 bahwa HEC-RAS, HSS ITB-1 dan HSS Snyder memberikan hasil yang cukup mendekati hasil pengamatan, sedangkan HSS lainnya, khususnya Nakayasu menunjukkan penyimpangan yang jauh. Selain itu, semua HSS kecuali Nakayasu, juga mampu memprediksi nilai debit puncak dengan baik. Model HEC-RAS secara visual mampu memberikan kurva naik yang cukup mendekati hasil pengamatan dan lebih baik daripada seluruh metode HSS.



Gambar 4. Hasil kasus 2

Tabel 5. Nilai *RMSE* dan *RE* kasus 2

Kasus 2	HEC-RAS	Nakayasu	SCS	ITB-1	ITB-2	GAMA-1	Snyder
Q_p <i>RE</i>	1,066%	-16,624%	2,493%	2,026%	1,401%	-0,266%	0,479%
T_p <i>RE</i>	50,00%	275,00%	118,75%	275,00%	275,00%	275,00%	-6,25%
<i>RMSE</i> (m/detx10 ⁵)	0,105	0,584	0,262	0,290	0,306	0,446	0,344

Dari Tabel 5 dapat dilihat bahwa HSS GAMA-1 menghasilkan nilai debit puncak yang paling mendekati hasil pengamatan, ditunjukkan dari nilai *RE* untuk Q_p sebesar -0,266%. Metode HSS lainnya dapat memberikan nilai debit puncak yang cukup representatif terhadap hasil pengamatan yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk Q_p yang relatif kecil kecuali HSS Nakayasu yang memberikan hasil yang paling buruk di antara metode HSS lainnya.

Model HEC-RAS terbilang cukup akurat dalam memprediksi debit puncak yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk Q_p sebesar 1,066%. HSS Snyder kembali menunjukkan hasil yang lebih akurat daripada metode HSS lainnya dalam memprediksi waktu puncak hidrograf yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk T_p sebesar -6,25%, sedangkan HSS lainnya memberikan nilai *RE* untuk T_p yang serupa yaitu sebesar 275,00%. Di sisi lain dapat dilihat bahwa meskipun lebih buruk daripada HSS Snyder, model HEC-RAS masih terbilang cukup akurat dalam mengestimasi waktu puncak hidrograf dengan menghasilkan nilai *RE* untuk T_p sebesar 50,0%.

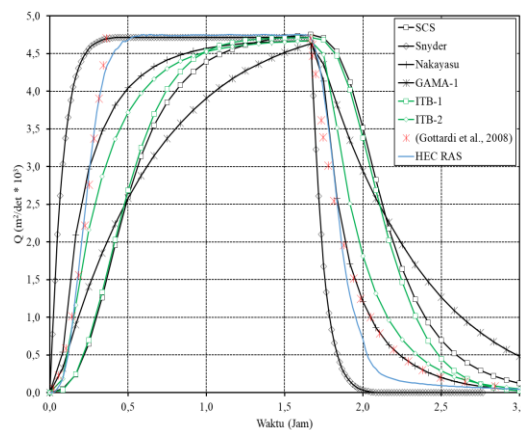
Dari segi kecocokan bentuk hidrograf, HSS SCS mampu memberikan tingkat kesalahan terkecil di antara metode HSS lainnya dengan nilai *RMSE* sebesar 0,262 m/detx10⁵. Sementara itu, HSS Nakayasu memberikan tingkat kesalahan yang terbesar di antara semua metode HSS lainnya dengan nilai *RMSE* sebesar 0,584 m/detx10⁵. Di sisi lain dapat dilihat bahwa model HEC-RAS menghasilkan nilai *RMSE* sebesar 0,105 m/detx10⁵ yang secara signifikan jauh lebih kecil daripada metode HSS lainnya. Dengan kata lain, model HEC-RAS mampu menghasilkan bentuk hidrograf yang paling representatif terhadap hasil pengamatan.

Hasil kasus 3

Kasus 3 merupakan kasus 2D dengan panjang 200 m, lebar 200 m, kemiringan dasar 0,01 dalam arah x serta arah y dan koefisien Manning 0,04 det/m^{1/3}, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Terlihat pada Tabel 3, curah hujan turun secara merata dengan intensitas 1 mm/menit selama 100 menit. Waktu konsentrasi hasil analitis untuk kasus ini adalah sebesar 0,36 jam. Selain itu, ketika aliran sudah mencapai kondisi langgeng, hasil analitis memberikan nilai puncak debit satuan sebesar

4,7x10⁻³ m²/detx10⁵. Simulasi numerik model HEC-RAS dilakukan dengan diskritisasi ruang sebesar 1 m dalam arah x dan 1 m dalam arah y .

Perbandingan antara hasil metode HSS, hasil model HEC-RAS dan hasil analitis disajikan dalam Gambar 5 dan Tabel 6. Secara visual dapat dilihat pada Gambar 5 bahwa hanya HEC-RAS yang memberikan hasil yang cukup mendekati hasil analitis, sedangkan HSS lainnya menunjukkan penyimpangan yang jauh khususnya pada HSS GAMA-1, namun semua HSS masih mampu memprediksi nilai debit puncak relatif akurat. Terlihat bahwa model HEC-RAS secara visual mampu memberikan kurva naik dan turun yang cukup mendekati hasil analitis dan lebih baik daripada seluruh metode HSS.



Gambar 5. Hasil kasus 3

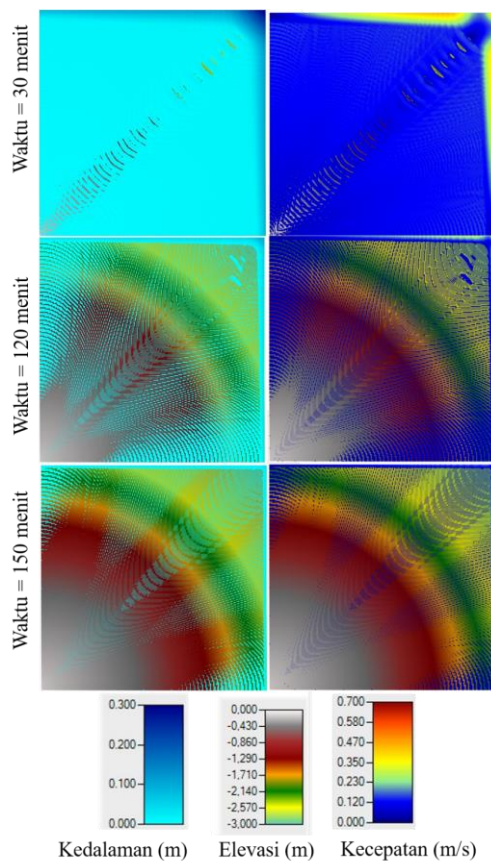
Dari Tabel 6 dapat dilihat bahwa HSS Nakayasu menghasilkan nilai debit puncak yang paling mendekati hasil analitis, ditunjukkan dari nilai *RE* untuk Q_p sebesar -0,652%. Metode HSS lainnya dapat memberikan nilai debit puncak yang cukup representatif terhadap hasil analitis yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk Q_p yang relatif kecil, kecuali HSS GAMA-1 yang memberikan hasil yang paling buruk di antara metode HSS lainnya. Sementara itu, model HEC-RAS terbilang cukup akurat dalam memprediksi debit puncak yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk Q_p sebesar 1,127%. HSS Snyder kembali menunjukkan hasil yang lebih akurat daripada metode HSS lainnya dalam memprediksi waktu puncak hidrograf yang ditunjukkan dengan nilai *RE* untuk T_p sebesar 15,346%, sedangkan HSS lainnya memberikan nilai *RE* untuk T_p yang serupa yaitu sebesar 361,384%.

Tabel 6. Nilai RMSE dan RE kasus 3

Kasus 3	HEC-RAS	Nakayasu	SCS	ITB-1	ITB-2	GAMA-1	Snyder
Q_p RE	1,127%	-0,652%	1,061%	0,247%	-0,716%	-1,487%	0,299%
T_p RE	61,587%	361,384%	361,384%	361,384%	361,384%	361,384%	15,346%
RMSE(m ² /detx10 ³)	0,328	0,370	1,402	1,40	0,615	1,213	1,078

Pada sisi lain dapat dilihat bahwa model HEC-RAS masih terbilang cukup akurat dalam mengestimasi waktu puncak hidrograf dengan menghasilkan nilai RE untuk T_p sebesar 50,0%.

Dari segi kecocokan bentuk hidrograf, HSS Nakayasu mampu memberikan tingkat kesalahan terkecil di antara metode HSS lainnya dengan nilai RMSE sebesar 0,370 m/detx10⁵. Sementara itu, HSS SCS memberikan tingkat kesalahan yang terbesar di antara semua metode HSS lainnya dengan nilai RMSE sebesar 1,402 m/detx10⁵. Di sisi lain dapat dilihat bahwa model HEC-RAS menghasilkan nilai RMSE sebesar 0,362 m/detx10⁵ yang relatif jauh lebih kecil daripada metode HSS lainnya. Dengan kata lain, model HEC-RAS mampu menghasilkan bentuk hidrograf yang paling representatif terhadap hasil analitis. Pada Gambar 6 ditunjukkan visualisasi aliran 2D (dari segi kedalaman dan kecepatan) yang dihasilkan oleh model HEC-RAS.

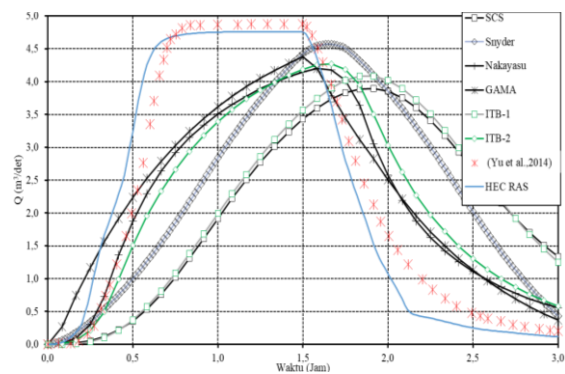


Gambar 6. Visualisasi Aliran 2D Kasus 3

Hasil Kasus 4

Kasus 4 merupakan kasus 2D dengan panjang 1.000 m, lebar 1.620 m, kemiringan 0,05 pada arah x dan 0,02 pada arah y serta koefisien Manning 0,15 det/m^{1/3} untuk bagian sayap dan 0,015 det/m^{1/3} pada bagian tengah, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1. Terlihat pada Tabel 3, curah hujan turun secara merata dengan intensitas 10,8 mm/jam selama 100 menit. Waktu konsentrasi hasil persamaan gelombang difusi untuk kasus ini sebesar 0,89 jam. Selain itu, ketika aliran sudah mencapai kondisi langgeng, hasil analitis memberikan nilai puncak debit satuan sebesar 4,85x10⁻³ m³/det. Simulasi numerik model HEC-RAS dilakukan dengan diskritisasi ruang sebesar 10 m dalam arah x dan 10 m dalam arah y.

Perbandingan antara hasil metode HSS, hasil model HEC-RAS dan hasil analitis disajikan dalam Gambar 7 dan Tabel 7. Dapat dilihat pada Gambar 7 bahwa hanya HEC-RAS yang memberikan hasil yang cukup mendekati hasil analitis, sedangkan HSS lainnya menunjukkan penyimpangan yang jauh. Teridentifikasi bahwa model HEC-RAS secara visual mampu memberikan kurva naik dan yang sangat mendekati hasil analitis dan lebih baik daripada seluruh metode HSS.



Gambar 7. Hasil kasus 4

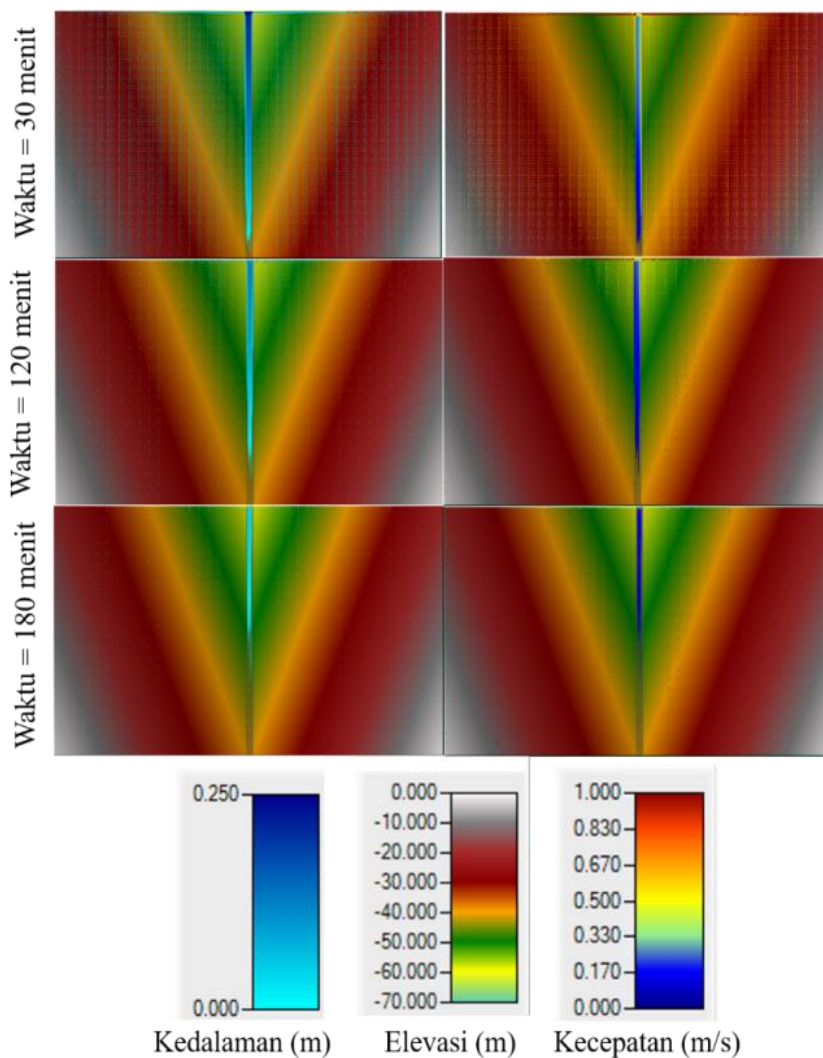
Dari Tabel 7 dapat dilihat bahwa HSS Snyder menghasilkan nilai debit puncak yang paling mendekati dengan hasil analitis, ditunjukkan dari nilai RE untuk Q_p sebesar -6,4% dibandingkan dengan metode HSS lainnya. Pada kasus ini, semua HSS tidak mampu memberikan nilai debit puncak yang cukup representatif terhadap hasil persamaan difusi gelombang yang ditunjukkan dengan nilai rata-rata RE untuk Q_p yang lebih dari 10%.

Tabel 7. Nilai RMSE dan RE Kasus 4

Kasus 4	HEC-RAS	Nakayasu	SCS	ITB-1	ITB-2	GAMA-1	Snyder
Q_p RE	-2,41%	-13,94%	-20,15%	-16,35%	-12,48%	-10,27%	-6,40%
T_p RE	1,33%	100,54%	142,76%	142,76%	111,10%	89,99%	111,10%
RMSE (m ³ /s)	0,489	0,883	2,060	2,058	1,072	0,843	1,612

Tabel 8. Rekapitulasi hasil pemodelan

	Q_p		T_p		Bentuk	
	Terbaik	Terburuk	Terbaik	Terburuk	Terbaik	Terburuk
Kasus 1	(1) Snyder (2) HEC-RAS	GAMA-1	(1) Snyder (2) HEC-RAS	SCS/GAMA-1/ ITB-1/ITB-2/ Nakayasu	(1)HEC-RAS (2) ITB-2	ITB-1
Kasus 2	(1) GAMA-1 (2) HEC-RAS	ITB-1	(1) Snyder (2) HEC-RAS	GAMA-1/ ITB-1/ITB-2/ Nakayasu	(1)HEC-RAS (2) SCS	Nakayasu
Kasus 3	(1) ITB-1 (2) HEC-RAS	GAMA-1	(1) Snyder (2) HEC-RAS	SCS/GAMA-1/ ITB-1/ITB-2/ Nakayasu	(1)HEC-RAS (2) Nakaysu	SCS
Kasus 4	(1) HEC-RAS (2) Snyder	SCS	(1) HEC-RAS (2) GAMA-1	SCS/ITB-1	(1)HEC-RAS (2) GAMA-1	SCS



Gambar 8. Visualisasi aliran 2D kasus 4

Sementara itu, model HEC-RAS terbilang cukup akurat dalam memprediksi debit puncak yang ditunjukkan dengan nilai RE untuk Q_p sebesar -2,41%. HSS Snyder pada kasus ini menunjukkan hasil yang kurang akurat daripada kasus-kasus sebelumnya, sedangkan dari sisi lain dapat dilihat bahwa model HEC-RAS memberikan hasil yang paling akurat dalam mengestimasi waktu puncak hidrograf dengan nilai RE untuk T_p sebesar 1,33%.

Dari segi kecocokan bentuk hidrograf, HSS Nakayasu mampu memberikan tingkat kesalahan terkecil di antara metode HSS lainnya dengan nilai $RMSE$ sebesar 0,843 m³/det. Sementara itu, HSS SCS memberikan tingkat kesalahan yang terbesar di antara semua metode HSS lainnya dengan nilai $RMSE$ sebesar 2,06 m³/det. Dapat dilihat pula bahwa model HEC-RAS menghasilkan nilai $RMSE$ sebesar 0,489 m³/det yang rata-rata jauh lebih kecil daripada metode HSS lainnya. Dengan kata lain, model HEC-RAS mampu menghasilkan bentuk hidrograf yang paling representatif terhadap hasil analitis. Pada Gambar 8 ditunjukkan visualisasi aliran 2D (dari segi kedalaman dan kecepatan) yang dihasilkan oleh model HEC-RAS.

Kesimpulan

Dalam penelitian ini telah dipaparkan perbandingan antara hasil perhitungan limpasan langsung dengan lima metode HSS yaitu Snyder, SCS, GAMA-I, ITB dan Nakayasu, dan hasil perhitungan dengan model HEC-RAS. Tiga karakteristik utama hasil perhitungan telah dibandingkan yaitu debit puncak, waktu puncak dan bentuk hidrograf. Empat buah kasus hujan-limpasan untuk DTA sederhana yang telah dipublikasikan dalam jurnal-jurnal sebelumnya dipilih sebagai studi kasus karena kasus-kasus tersebut telah teruji berdasarkan curah hujan seragam yang jatuh secara merata pada seluruh wilayah DTA yang ditinjau dan karena kasus-kasus tersebut memiliki hasil analitis dan/atau pengamatan, sehingga lebih objektif dijadikan sebagai acuan.

Dari keempat kasus tersebut dapat dibuat rekapitulasi untuk seluruh hasil, baik untuk setiap metode HSS maupun model HEC-RAS, dari yang paling akurat hingga yang terburuk sebagaimana yang ditunjukkan dalam Tabel 8. Perlu dicatat bahwa pada kolom terbaik terdapat dua metode, dimana hal ini ditujukan untuk membedakan metode HSS dan model numerik, namun dengan nilai error yang relatif sama. Sementara itu, jika pada kolom terburuk terdapat lebih dari satu metode, maka hal ini menandakan metode-metode tersebut memiliki nilai error yang sama dan jauh lebih besar dibandingkan nilai error yang diberikan oleh metode/model pada kolom terbaik.

Dari Tabel 8 dapat dilihat bahwa tidak ada satupun metode HSS yang konsisten dalam memberikan hasil perhitungan Q_p dan bentuk hidrograf yang representatif. Untuk hasil perhitungan T_p , metode HSS Snyder konsisten dalam memberikan nilai yang representatif untuk tiga kasus pertama, sementara tidak untuk kasus yang terakhir.

Sementara, model HEC-RAS secara konsisten dapat memberikan hasil perhitungan Q_p dan T_p serta bentuk hidrograf yang representatif. Dari hal ini dapat disimpulkan bahwa model HEC-RAS (dan/atau model numerik sejenis lainnya) dapat dipertimbangkan untuk digunakan (menjadi sebuah standar) dalam perhitungan limpasan langsung untuk sebuah DTA, khususnya untuk lokasi-lokasi dimana data pencatatan debit terukur kurang memadai. Untuk kedepannya, pengujian keakuratan model HEC-RAS dalam mensimulasikan proses hujan-limpasan untuk kasus-kasus DTA atau DAS nyata (yang memiliki data pencatatan curah hujan dan debit yang lengkap) akan menjadi topik yang menarik untuk ditelaah.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih ditujukan secara khusus kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat, Universitas Katolik Parahyangan atas hibah dana penelitian skema Penelitian Tugas Akhir Mahasiswa Magister dengan kontrak Nomor: III/LPPM/2021-08/159-P.

Daftar Pustaka

- Bhunya, P. K., Panda, S. N., & Goel, M. K. (2011). Synthetic unit hydrograph methods: a critical review. *The Open Hydrology Journal*, 5(1).
- Brunner, G. W. (2016). *HEC-RAS River Analysis System. Hydraulic Reference Manual. Version 5.0*. Hydrologic Engineering Center Davis CA.
- Casulli, V. (2009). A high-resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 60(4), 391–408.
- Costabile, P., Costanzo, C., & Macchione, F. (2013). A storm event watershed model for surface runoff based on 2D fully dynamic wave equations. *Hydrological Processes*, 27(4), 554–569.
- Costabile, P., Costanzo, C., Ferraro, D., Macchione, F., & Petaccia, G. (2020). Performances of the new HEC RAS version 5 for 2-D hydrodynamic-based rainfall-runoff simulations at basin scale : Comparison with a state-of-the art model. *Water*, 12(9), 2326.

- Fernández-Pato, J., Caviedes-Voullième, D., & García-Navarro, P. (2016). Rainfall/runoff simulation with 2D full shallow water equations: Sensitivity analysis and calibration of infiltration parameters. *Journal of Hydrology*, 536, 496–513.
- Ginting, B. M., Mundani, R.-P., & Rank, E. (2018). Parallel simulations of shallow water solvers for modelling overland flows. *EPiC Series in Engineering*, 3, 788–799.
- Ginting, B. M., & Mundani, R.-P. (2019). Parallel flood simulations for wet–dry problems using dynamic load balancing concept. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 33(3), 04019013.
- Gottardi, G., & Venutelli, M. (2008). An accurate time integration method for simplified overland flow models. *Advances in Water Resources*, 31(1), 173–180.
- Hall, J. (2015). Direct rainfall flood modelling: The good, the bad and the ugly. *Australasian Journal of Water Resources*, 19(1), 74–85.
- Jeong, S. W., & Mun, J. W. (2001). The comparison of existing synthetic unit hydrograph method in Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, 34(6), 659–672.
- Kristianto, A., Norken, I., Sila Dharma, I., & Yekti, M. (2019). Komparasi model hidrograf satuan terukur dengan hidrograf satuan sintetis (studi kasus DAS Tukad Pakerisan). *Jurnal Spektran*, 7(1).
- Labdul, B., & Alitu, A. (2021). Comparison of snyder synthetic unit hydrograph with measured unit hydrograph on Bionga Kayubulan. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1098(2), 022067.
- Lacasta, A., Morales-Hernández, M., Murillo, J., & García-Navarro, P. (2015). GPU implementation of the 2D shallow water equations for the simulation of rainfall/runoff events. *Environmental Earth Sciences*, 74(11), 7295–7305
- Liang, D., Özgen, I., Hinkelmann, R., Xiao, Y., & Chen, J. M. (2015). Shallow water simulation of overland flows in idealised catchments. *Environmental Earth Sciences*, 74(11), 7307–7318.
- Limantara, L. M. (2012). Hidrograf Satuan Sintetik (Studi Kasus di Sebagian DAS di Indonesia). *Rekayasa Sipil*, 3(3), 209–226.
- Limantara, L. M., Suhartanto, E., & Priombodo, A. (2014). Representative Synthetic Unit Hydrograph Due to the Rainfall Station Network. *International Journal of Applied Engineering Research*, 9(22), 12447–12465.
- Natakusumah, D. K., Hatmoko, W., & Harlan, D. (2011). Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis dengan Cara ITB dan Beberapa Contoh Penerapannya. *Jurnal Teknik Sipil ITB*, 18(3), 251–291.
- Özgen, I., Zhao, J., Liang, D., & Hinkelmann, R. (2016). Urban flood modeling using shallow water equations with depth-dependent anisotropic porosity. *Journal of Hydrology*, 541, 1165–1184.
- Pradipta, A. G., & Nurhady, S. (2019, November). The representative synthetic unit hydrograph in Juana watershed. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 355(1), p. 012023. IOP Publishing.
- Safarina, A. B., Salim, H. T., Hadihardaja, I. K., & Syahril, M. (2011). Clusterization of synthetic unit hydrograph methods based on watershed characteristics. *The International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 11(6), 76–85.
- SCS. (2002). *Soil Conservation Service. Design of hydrograph*. Washington DC: US Department of agriculture.
- Snyder, F. F. (1938). Synthetic unit-graphs. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 19(1), 447–454.
- Soemarto, C. D. (1987). Hidrologi Teknik, usaha nasional. *Surabaya hal*, 13-15.
- Standar Nasional Indonesia. (2016). *Tata cara perhitungan debit banjir rencana*.
- Wittmann, R., Bungartz, H.-J., & Neumann, P. (2017). High performance shallow water kernels for parallel overland flow simulations based on FullSWOF2D. *Computers & Mathematics with Applications*, 74(1), 110–125.
- Yu, C., & Duan, J. (2014). Two-dimensional hydrodynamic model for surface-flow routing. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(9), 04014045.