

Pengembangan Model Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) DPMA-IOH dan Penerapannya pada Daerah Aliran Sungai

Segel Ginting^(*)

Pusat Litbang Sumber Daya Air, Bandung, Email: gintingsegel@gmail.com

Widya Utaminingsih

Peneliti Muda, Balai Litbang Irigasi

Pusat Litbang Sumber Daya Air, Email: widya.tm@gmail.com

Abstrak

Desain hidrograf banjir diperlukan untuk merencanakan infrastruktur sumber daya air seperti waduk atau bendungan. Umumnya lokasi rencana infrastruktur sumber daya air belum tersedia data hidrologi untuk mendapatkan hidrograf banjir. Model hidrograf satuan sintetis (HSS) digunakan untuk memperoleh hidrograf banjir pada lokasi yang belum tersedia data hidrologi (ungauged). Model hidrograf satuan sintetis sangat populer digunakan di Indonesia karena keterbatasan data yang tersedia dan penggunaannya yang sederhana yaitu berdasarkan karakteristik DAS. Namun untuk mendapatkan hasil hidrograf banjir yang sesuai dengan data pengamatan memerlukan kalibrasi parameter model hidrograf satuan sintetis. Model HSS DPMA-IOH merupakan salah satu model yang dikembangkan berdasarkan modifikasi metode DPMA-IOH (menghitung rata-rata debit puncak banjir) yang dikembangkan oleh DPMA (Direktorat Penyelidikan Masalah Air) dan IOH (Institute of Hydrology). Metode DPMA-IOH merupakan metode empiris yang dikembangkan di Indonesia khususnya di Pulau Jawa dan Sumatera. Model HSS DPMA-IOH mengembangkan persamaan untuk menghitung debit puncak hidrograf satuan, waktu ke puncak dan waktu dasar berdasarkan karakteristik DAS serta bentuk hidrografnya. Prediksi debit puncak hidrograf satuan ditentukan berdasarkan nilai rata-rata debit banjir tahunan yang dihitung dengan metode DPMA-IOH. Parameter waktu ke puncak dan waktu dasar ditentukan berdasarkan karakteristik DAS. Bentuk kurva hidrograf satuan menggunakan dua pendekatan yaitu pendekatan model distribusi probabilitas gamma dan berdasarkan fungsi persamaan kurva naik dan kurva turun. Model HSS DPMA-IOH yang telah dihasilkan, diterapkan pada beberapa DAS di Indonesia yaitu DAS Ciliwung-Katulampa (Pulau Jawa), DAS Palung-Surodadi (Pulau Lombok), DAS Tukad Bandung-Denpasar (Pulau Bali), DAS Tukad Nyuling-Tyingtali (Pulau Bali), DAS Kendilo (Pulau Kalimantan) dan DAS Singkoyo (Pulau Sulawesi). Hasil uji coba pada beberapa DAS tersebut menunjukkan bahwa model HSS DPMA-IOH memiliki koefisien Nash-Sutcliffe di atas 83 % untuk menghasilkan hidrograf banjir, sehingga dapat membantu para perencana sumber daya air dalam menjalankan tugasnya.

Kata-kata Kunci: Debit puncak banjir, hidrograf satuan sintetis, hidrograf satuan, waktu ke puncak banjir, hidrograf banjir

Abstract

Water resources infrastructure planning such as reservoirs or dams require the design of a flood hydrograph. Hydrological data are generally not available at the location of the water resources infrastructure plan. Flood hydrograph design uses hydrological data. Design of flood hydrographs at locations without hydrological data (ungauged catchment) can use synthetic unit hydrographs. The synthetic unit hydrograph model is a popular application in Indonesia because of the limited data, and its simple use which is based on the characteristics of the watershed. However, to get flood hydrograph results that are in accordance with observational data requires calibration of parameters of synthetic unit hydrograph models. The DPMA-IOH's synthetic unit hydrographs model is one of the models developed based on the modification of the DPMA-IOH method (calculating the mean annual flood discharge) developed by the DPMA (Direktorat Penyelidikan Masalah Air) and the IOH (Institute of Hydrology). This empirical method was developed in Indonesia, especially in Java and Sumatera to calculate the mean annual flood discharge. DPMA-IOH's synthetic unit hydrographs was developed based on mean annual flood discharge and watershed characteristics to predict the unit hydrograph peak flow, time to peak and base time of ungauged catchment. Prediction of unit hydrograph peak flow is determined based on mean annual flood discharge calculated by the DPMA-IOH method. The time to peak and base time parameters are determined based on the characteristics of the watershed. The unit hydrograph shape using two approaches. There are using the gamma probability distribution and a rising and limb recession curve function. The DPMA-IOH's synthetic unit hydrograph model is applied to several watersheds in Indonesia, namely the Ciliwung-Katulampa watershed (Java Island), Palung-Surodadi watershed (Lombok Island), Tukad Bandung-Denpasar watershed (Bali Island), Tukad

*Penulis Korespondensi

Nyuling-Tiyingtali watershed (Bali Island), Kendilo Watershed (Kalimantan Island) and Singkoyo Watershed (Sulawesi Island). The results of application in several watersheds have shown that the DPMA-IOH's synthetic unit hydrographs model has above 83 percent Nash-Sutcliffe coefficient for obtaining flood hydrographs. The DPMA-IOH's synthetic unit hydrograph model can help planners to design flood hydrographs.

Keywords: Peak discharges, synthetic unit hydrograph, time to peak, unit hydrograph, flood hydrographs

1. Pendahuluan

Perencanaan infrastruktur sumber daya air biasanya memerlukan informasi desain hidrograf banjir. Umumnya lokasi perencanaan infrastruktur belum tersedia data yang memadai untuk mendapatkan informasi hidrograf banjir, sehingga memerlukan hidrograf satuan sintetis (HSS) untuk mendesain hidrograf banjir. Hidrograf satuan sintetis (HSS) yang sering digunakan untuk mendesain hidrograf banjir di Indonesia terdiri dari beberapa model yaitu model HSS Nakayasu, HSS Snyder-Alexseyev, HSS *Soil Conservation Service* (SCS), HSS GAMA-1, HSS ITB-1 & ITB-2, HSS Limantara, dan lain sebagainya. Model HSS tersebut umumnya masih perlu penyesuaian parameter karena metode tersebut dikembangkan di luar Indonesia, seperti model HSS Nakayasu, HSS Snyder dan HSS SCS. Model HSS GAMA-1 dan HSS Limantara dikembangkan berdasarkan data karakteristik di Indonesia sementara HSS ITB-1&ITB-2 berdasarkan pendekatan teoritis konseptual.

Metode hidrograf satuan sintetis dalam perkembangannya, menggunakan seperangkat persamaan empiris yang menghubungkan karakteristik fisik DAS terhadap unsur-unsur pembentukan hidrograf seperti debit puncak (q_p), waktu ke puncak (t_p), dan waktu dasar (T_b). Dengan demikian, maka metode HSS tersebut lebih tepat penggunaannya pada daerah lokasi pengembangan metode HSS tersebut dikembangkan. Penggunaan hidrograf satuan (HS) untuk memprediksi limpasan merupakan pendekatan yang dikritik, tetapi sering digunakan dan diterima dalam analisis hidrologi (Singh, 2000). Hidrograf satuan (HS) menjadi pengetahuan yang populer bagi ahli hidrologi sejak Sherman (1932) memperkenalkannya untuk merespon daerah aliran sungai (DAS) yang tidak mempunyai data (*ungauged*) untuk menghasilkan limpasan langsung. Kesederhanaan dan kemudahan perkembangannya, telah mempopulerkan hidrograf satuan sintetis, termasuk kebutuhan data yang lebih sedikit dan memberikan kurva yang halus dan unik sesuai dengan volume limpasan satu satuan.

Bentuk hidrograf satuan konvensional dengan bentuk fungsi distribusi probabilitas memiliki kemiripan, sehingga beberapa upaya telah dilakukan melalui penelitian untuk menurunkan HSS menggunakan fungsi distribusi probabilitas (PDF). Nash (1959) dan Dooge (1959) mengembangkan persamaan umum hidrograf satuan instan/sesaat (IUH) dalam bentuk distribusi Gamma dua-parameter. Selanjutnya, Haktanir dan Sezen (1990) dan Bhunya et al. (2004) menurunkan HSS untuk DAS di Turki dan India dengan menggunakan distribusi Gamma dua parameter (2p) dan distribusi Beta tiga parameter (3p).

Jena dan Tiwari (2006) memodelkan parameter HSS menggunakan parameter geomorfologi (parameter saluran dan DAS) untuk dua DAS di India dan mempresentasikan model nonlinier yang menghubungkan parameter HS dengan parameter geomorfologi yang memiliki tingkat korelasi yang lebih tinggi dengan parameter HS. Rosso (1984) mengadopsi pendekatan parametrik untuk mendefinisikan bentuk hidrograf satuan instan (IUH) dengan menghubungkan parameter model Nash dengan rasio Horton yang digunakan oleh Rodrigues-Iturbe dan Valdes (1979). Bhunya et al. (2008) lebih lanjut memperluas kajian Rosso (1984) dan menggunakan distribusi Weibull dua parameter dalam menggambarkan bentuk hidrograf satuan instan (IUH) dan membuat perbandingan antara distribusi Weibull dua parameter dan distribusi Gamma dua parameter menggunakan data lapangan.

Kebutuhan akan informasi hidrograf satuan pada lokasi DAS yang tidak memiliki data (*ungauged catchment*) di Indonesia menjadi pemicu untuk mengembangkan metode hidrograf satuan sintetis (HSS) yang dapat digunakan secara luas. Dalam hal ini akan dikembangkan model HSS DPMA-IOH. Metode ini sebelumnya merupakan salah satu metode empiris yang dikembangkan oleh DPMA (Direktorat Penyelidikan Masalah Air, sekarang Pusat Litbang Sumber Daya Air) dan IOH (*Institute of Hydrology*) untuk menghitung rata-rata debit puncak banjir tahunan. Metode ini sering disebut sebagai metode DPMA-IOH (BSN, 2016). Metode ini merupakan metode empiris yang dikembangkan khususnya di Pulau Jawa dan Sumatera. Metode empiris DPMA-IOH hanya memberikan informasi rata-rata debit puncak banjir tahunan pada suatu lokasi, sementara yang dibutuhkan dalam perencanaan infrastruktur sumber daya air adalah informasi hidrograf banjir. Oleh karena itu, maka dibutuhkan modifikasi metode DPMA-IOH agar dapat menghasilkan informasi hidrograf banjir dengan mengembangkannya menjadi hidrograf satuan sintetis (HSS) DPMA-IOH. Hidrograf satuan Sintetis DPMA-IOH dikembangkan berdasarkan hasil analisis empiris dari beberapa parameter karakteristik DAS yang ada di Pulau Jawa dan penerapan HSS tersebut pada beberapa DAS di Indonesia. Model hidrograf satuan sintetis (HSS) DPMA-IOH yang telah dikembangkan, diharapkan dapat memberikan solusi bagi perencana di bidang sumber daya air dalam rangka memperoleh informasi hidrograf banjir pada daerah-daerah yang tidak memiliki data hidrologi yang memadai.

2. Hidrograf Satuan Sintetis

Model hidrologi membutuhkan data curah hujan dan debit. Model ini tidak berlaku untuk DAS yang tidak memiliki data (*ungauged*). Dalam konteks model

konseptual, diperlukan data curah hujan dan debit atau karakteristik DAS yang dapat diukur secara fisik untuk menentukan parameter model. Parameter model ditentukan melalui proses optimasi subjektif ke fungsi objektif. Hal ini kemudian digunakan untuk memprediksi debit dari peristiwa curah hujan lain yang tidak digunakan dalam optimasi. Pendekatan lain termasuk yang membangun hubungan linier atau nonlinear antara parameter model dan karakteristik DAS terukur secara fisik. Hubungan-hubungan ini kemudian dianggap baik untuk daerah aliran sungai lain yang memiliki karakteristik hidrologi yang serupa. Jadi, hubungan antara hidrograf limpasan dan karakteristik daerah aliran sungai telah melahirkan gagasan hidrograf satuan sintetis (HSS) yang paling tepat diterapkan pada daerah DAS yang tidak terukur (*ungauged*).

HS adalah hidrograf limpasan permukaan yang dihasilkan dari satu unit curah hujan berlebih (efektif) yang terdistribusi seragam secara spasial dan temporer di daerah aliran sungai (DAS) untuk seluruh periode kelebihan curah hujan yang ditentukan (Chow, 1964). Hidrograf satuan (HS) dan Hidrograf satuan sintetis (HSS) memiliki semua karakteristik fungsi distribusi probabilitas (pdf). Bentuk fungsi distribusi probabilitas mirip dengan hidrograf satuan konvensional. Oleh karena itu, banyak yang telah dilakukan untuk menggunakan fungsi distribusi probabilitas yang berbeda dalam menurunkan hidrograf satuan (Nash, 1959; Dooge, 1959; Gray, 1961; Aron dan White, 1982; Croley II, 1980; Ciepielowski, 1987; Haktanir dan Sezen, 1990). Yue et al. (2002) menguji kemampuan distribusi Gamma dan Beta untuk mendapatkan bentuk hidrograf banjir untuk periode ulang T-tahun. Bhunya et al. (2004) menunjukkan fleksibilitas distribusi Beta tiga-parameter dalam prediksi hidrograf satuan untuk DAS di India dan Turki. Bhattacharjya (2004) menggunakan distribusi probabilitas Gamma dan Log-Normal untuk mewakili hidrograf satuan dengan mengembangkan dua model optimasi nonlinier dan menyelesaikannya menggunakan algoritma genetika berkode biner. Bhunya et al. (2007) mengevaluasi kemampuan empat fungsi distribusi probabilitas, yaitu, distribusi Chi-square satu-parameter, distribusi Gamma dua-parameter, distribusi Weibull dua-parameter dan distribusi Beta tiga-parameter untuk mendapatkan HSS. Hasilnya dapat disimpulkan bahwa distribusi Beta adalah metode yang lebih cocok. Nadarajah (2007) mengeksplorasi penggunaan sebelas distribusi probabilitas paling fleksibel untuk menurunkan hidrograf satuan sintetis. Bhunya et al. (2009) mengevaluasi potensi distribusi Chi-square satu-parameter dan distribusi Fréchet dua-parameter untuk menggambarkan HSS menggunakan parameter geomorfologi DAS dan membandingkannya dengan distribusi Gamma dua-parameter untuk dua DAS di India. Hasilnya menunjukkan potensi yang sama dari kedua fungsi distribusi probabilitas untuk menurunkan HSS. Rai et al. (2010) menggunakan distribusi Nakagami-m untuk menurunkan HS untuk daerah aliran sungai yang berbeda dan membandingkannya dengan delapan distribusi lainnya dengan kesimpulan bahwa distribusi Nakagami-m menghasilkan HS dan hidrograf limpasan langsung secara tepat. Mondal et al. (2012) menerapkan model hidrograf satuan instan (IUH) geomorfologi Gamma untuk prediksi limpasan langsung

dan membandingkannya dengan model jaringan saraf tiruan (ANN). Hasil penelitian menunjukkan bahwa kedua model prediksi memberikan hasil memuaskan.

Perkembangan metode hidrograf satuan sintetis mengalami perubahan seiring dengan perkembangan teknologi dalam menyajikan dan menyediakan data. Banyak metode yang dapat digunakan untuk menghasilkan hidrograf satuan sintetis, sehingga dalam kajian Singh, et.al., (2014) mengenai hidrograf satuan sintetis, dilakukan pengelompokan hidrograf satuan sintetis menjadi empat kategori yaitu (Singh, et.al., 2014):

1. Model HSS Tradisional atau Empiris : Snyder (1938), Taylor and Schwarz (1952) and *Soil Conservation Service* (SCS 1957).
2. Model HSS Konseptual : Clark (1945), Nash (1957), Dooge (1959), Singh (1964), Diskin et al. (1978), Bhunya et al. (2005).
3. Model HSS Probabilistik : Gray (1961), Croley (1980), Aron and White (1982), Singh and Chowdhury (1985), McCuen (1989), Haktanir and Sezen (1990), Singh (2000), Bhunya et al. (2003, 2008, 2009).
4. dan Model HSS Geomorfologi : Bernard (1935), Snyder (1938), Taylor and Schwarz (1952), Gray (1961), Boyd (1979), Boyd et al. (1979), Rodriguez-Iturbe and Valdés (1979), Valdés et al. (1979), Rodriguez-Iturbe et al. (1979) and Gupta et al. (1980).

Merujuk pada pembagian kategori HSS tersebut diatas, maka model HSS DPMA-IOH yang dikembangkan ini termasuk dalam kategori model HSS Tradisional (empiris) dan model HSS Probabilistik.

3. Pengembangan Model Hidrograf Satuan Sintetis DPMA-IOH

Model HSS berkembang karena masih terbatasnya data yang dimiliki pada suatu DAS. Model hidrograf satuan sintetis DPMA-IOH sebagai salah satu alternatif metode yang dapat digunakan di Indonesia pada daerah yang tidak memiliki data. Model HSS DPMA-IOH dikembangkan untuk membantu para perencana di bidang sumber daya air. Model HSS ini diharapkan dapat digunakan secara luas, mengingat metode DPMA-IOH telah digunakan di Indonesia untuk menghitung rata-rata debit banjir tahunan.

3.1 Hidrograf satuan sintetis (HSS) DPMA-IOH

Hidrograf satuan sintetis (HSS) DPMA-IOH merupakan hasil modifikasi dan pengembangan metode perhitungan rata-rata debit banjir tahunan yang umum digunakan di Indonesia dan sudah diadopsi dalam Standard Nasional Indonesia (SNI) untuk perhitungan banjir rencana. Modifikasi debit puncak menjadi bentuk hidrograf menjadi tujuan utama dalam kajian ini. Pengembangan HSS DPMA-IOH memerlukan beberapa unsur yang bertujuan untuk membentuk hidrograf satuan. Elemen-elemen tersebut adalah debit puncak hidrograf satuan (q_p), waktu ke puncak (t_p),

waktu dasar (T_b) dan fungsi kurva naik dan turun (*rising limb dan resesction limb*). Model elemen-elemen tersebut dijelaskan berikut ini:

3.1.1 Debit puncak hidrograf satuan

Debit puncak hidrograf satuan (q_p) diperoleh berdasarkan persamaan empiris. Pembuatan model empiris berdasarkan pada nilai rata-rata debit puncak banjir tahunan (*mean annual flood*). Model empiris yang dikembangkan adalah menghubungkan antara debit puncak hidrograf satuan (q_p) dengan rata-rata debit puncak banjir tahunan ($\bar{Q}$). Debit puncak hidrograf satuan (q_p) diperoleh berdasarkan data pengamatan lapangan yang diturunkan berdasarkan data hidrograf banjir yang tercatat pada beberapa lokasi pos duga air. Adapun persamaan umum debit puncak hidrograf satuan yang dikembangkan adalah sebagai berikut:

$$q_p = c \bar{Q}^d \quad (\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}) \quad (1)$$

Keterangan:

q_p adalah debit puncak hidrograf satuan ($\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$);
 c, d adalah koefisien yang menghubungkan antara debit puncak banjir dengan rata-rata debit banjir tahunan.

Nilai koefisien c dan d pada persamaan di atas diperoleh dari hasil analisis untuk menyesuaikan antara rata-rata debit puncak banjir tahunan ($\bar{Q}$) yang diperoleh berdasarkan persamaan DPMA-IOH, dengan nilai debit puncak hidrograf satuan (q_p , $\text{m}^3/\text{s}/\text{mm}$).

3.1.2 Perhitungan rata-rata debit puncak banjir (*mean annual flood*)

Metode ini merupakan salah satu persamaan empiris yang telah dikembangkan oleh Direktorat Penyelidikan Masalah Air (DPMA) dan IOH berdasarkan data hujan dan karakteristik fisik DAS di Jawa dan Sumatera. Karakteristik fisik DAS yang digunakan adalah (DPMA and IOH, 1983):

1. luas DAS (A) merupakan karakteristik yang penting dalam menentukan besar puncak banjir dan diukur dalam kilometer persegi, pengukuran luas DAS berdasarkan peta topografi atau menggunakan *digital elevation model* (DEM) dengan perangkat lunak sistem informasi geografis.
2. Indeks kemiringan (m/km) diperoleh dari rata-rata nilai kemiringan (*slope*) dari seluruh *grid cell* pada suatu DAS, dinyatakan dalam meter per kilometer.
3. Indeks danau (Lu), yaitu tampungan dari suatu danau atau waduk dapat secara nyata mengurangi tinggi puncak banjir. Besarnya pengurangan banjir tergantung dari letak danau terhadap DAS, Indeks danau dihitung dengan persamaan:

$$\text{indeks danau} = \frac{\text{luas DAS dihilu danau}}{\text{luas DAS}} \quad (2)$$

Harga indeks danau yang digunakan dalam persamaan regresi tidak boleh melebihi 0,25. Apabila luas permukaan danau lebih kecil daripada 1 % maka indeks danau dapat diabaikan.

4. Rata-rata curah hujan terbesar selama 24 jam dalam setahun ($\bar{R}$), yaitu harga rata-rata curah hujan terbesar selama 24 jam dalam setahun ($P_{\max}$) dan dikalikan dengan faktor pengurang (ARF). Selanjutnya faktor pengali (ARF) didapat dari luas DAS seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai *area reduction factor* (ARF) untuk pengurangan nilai hujan (DPMA and IOH, 1983)

No	Luas DAS : A (km^2)	ARF
1	1 – 10	0.99
2	10 – 30	0.97
3	30 – 30000	$1.152 - 0.1233 \log A$

Dari keempat parameter karakteristik DAS di atas, telah diperoleh persamaan regresi untuk menghitung besarnya nilai rata-rata debit puncak banjir (*mean annual flood*) sebagai berikut (DPMA and IOH, 1983):

$$\bar{Q} = 8 \cdot 10^{-6} A^v P^{2.445} S^{0.117} (1 + L)^{-0.85} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (3)$$

dimana, v merupakan fungsi luas DAS dan dihitung dengan persamaan:

$$v = 1.02 - 0.0275 \log A \quad (4)$$

3.1.3 Waktu ke puncak (*time to peak*)

Waktu ke puncak merupakan variabel yang diperlukan dalam mengembangkan hidrograf satuan. Variabel ini diperoleh berdasarkan persamaan empiris dengan menggunakan data karakteristik DAS. Terdapat beberapa parameter karakteristik DAS yang digunakan untuk mengembangkan persamaan waktu ke puncak. Adapun parameter karakteristik DAS yang digunakan untuk mengembangkan persamaan waktu ke puncak adalah panjang sungai (km), keliling DAS (km), jarak dari outlet ke titik berat DAS, luas DAS dan lebar DAS. Persamaan umum yang digunakan untuk menghitung waktu ke puncak memiliki bentuk fungsi sebagai berikut:

$$t_p = f(L, D, P, M, A) \quad (5)$$

dimana:

- t_p : *time to peak* (waktu ke puncak banjir, jam)
 L : *Length of main river* (Panjang sungai utama, km)
 M : Mean basin width = $\left(\frac{L}{A}\right)$, lebar DAS dalam (km)
 P : *Perimeter of watershed* (Keliling DAS, km)
 A : *Area of watershed* (luas DAS, km^2)
 D : *Distance from the outlet to a point on the stream nearest the centroid of the watershed area* (km)

Karakteristik fisik DAS seperti jarak dari titik outlet ke titik berat DAS (D) diidentifikasi berdasarkan persamaan

$$D = 0.5503748 L^{0.96} \quad (6)$$

(Gray, 1962), dimana L merupakan panjang sungai utama dalam kilometer (km).

3.1.4 Waktu dasar (*base time*)

Waktu dasar merupakan waktu yang diperlukan selama aliran mulai naik dan sampai turun kembali ke posisi aliran semula. Waktu dasar merupakan salah satu unsur yang diperlukan dalam membentuk hidrograf satuan suatu DAS. Waktu dasar secara umum dapat diperkirakan dari karakteristik DAS, namun pada beberapa metode hidrograf satuan sintetis, nilai waktu dasar ditetapkan. Untuk hidrograf satuan sintetis DPMA-IOH, ditentukan berdasarkan data pengamatan dari beberapa DAS yang telah dikumpulkan.

3.1.5 Fungsi kurva hidrograf satuan

a. Fungsi distribusi probabilitas gamma

Penggunaan fungsi distribusi probabilitas (pdf) dalam menurunkan hidrograf satuan sintetis (SUH) telah menjadi perhatian karena kesamaannya dengan sifat-sifat hidrograf satuan (Ghorbani, et.al., 2013). Nash (1959) dan Dooge (1959) menghasilkan hidrograf satuan sesaat (*instantaneous unit hydrograph*, IUH) berdasarkan konsep linierisasi sejumlah n waduk dengan koefisien penyimpanan (K) yang diistilahkan dengan fungsi gamma sebagai berikut:

$$q(t) = \frac{A}{3.6 K \Gamma(n)} \left(\frac{t}{K}\right)^{(n-1)} e^{-\left(\frac{t}{K}\right)} \quad (7)$$

dimana, n dan K berfungsi untuk menentukan bentuk IUH dan q (l/jam) adalah kedalaman limpasan per satuan waktu per satuan curah hujan efektif. Hubungan antara n dan K ditulis sebagai (Chow, 1964):

$$K = \frac{t_p}{(n-1)} \quad (8)$$

Sebuah parameter yang tidak berdimensi, β didefinisikan dengan mengkalikan parameter q_p dan t_p , sehingga parameter β menjadi sebagai berikut:

$$\beta = q_p t_p \quad (9)$$

$$q_p t_p = \frac{(n-1)^{(n-1)} e^{-(n-1)}}{\Gamma(n-1)} = \beta \quad (10)$$

Untuk memudahkan dalam penggunaannya, maka persamaan diatas diselesaikan dengan menggunakan pendekatan solusi numerik. Persamaan yang dihasilkan berdasarkan solusi numerik tersebut adalah (Bhunya et al., 2003):

$$n = 5.53\beta^{1.75} + 1.04 \quad \text{untuk} \quad 0.01 < \beta < 0.35 \quad (11)$$

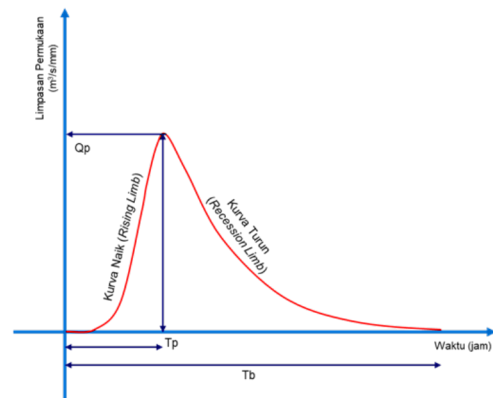
$$n = 6.29\beta^{1.998} + 1.157 \quad \text{untuk} \quad \beta \geq 0.35 \quad (12)$$

Fungsi distribusi probabilitas gamma seperti yang dijelaskan di atas digunakan dalam membentuk hidrograf satuan sintetis DPMA-IOH.

b. Fungsi Kurva Naik dan Turun

Fungsi distribusi gamma digunakan dalam membentuk hidrograf satuan sintetis DPMA-IOH. Selain fungsi

distribusi gamma, digunakan persamaan fungsi kurva naik dan fungsi kurva turun. Adapun rencana pembuatan bentuk kurva hidrograf satuan sintetis DPMA-IOH berdasarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Grafik hidrograf satuan sintetis DPMA-IOH

3.2 Ujicoba hidrograf satuan sintetis (HSS) DPMA-IOH

Model HSS DPMA-IOH di ujicoba untuk mengetahui kinerja model. Ujicoba penerapan dilakukan pada beberapa DAS yang memiliki data pengamatan. Kinerja Model HSS tersebut meliputi komponen debit puncak (q_p), dan kesesuaian bentuk hidrograf yang diukur (dinilai) dengan angka penyimpangan masing-masing komponen. Analisis kesesuaian bentuk hidrograf dievaluasi dengan uji perbandingan antara debit pengukur dengan debit sintetis menggunakan koefisien Nash-Sutcliffe (E). Persamaan untuk menentukan koefisien Nash-Sutcliffe adalah sebagai berikut (Nash dan Sutcliffe, 1970):

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \quad (13)$$

dimana:

Q_m^t : nilai debit perhitungan (m) pada waktu ke- t

Q_o^t : nilai debit pengamatan (o) pada waktu ke- t

$\bar{Q}_o$: nilai rata-rata debit pengamatan (o)

Nilai koefisien Nash-Sutcliffe (NSE) berkisar antara $\infty - 1$. Semakin rendah nilai NSE, maka model yang dihasilkan memiliki kinerja yang rendah dan sebaliknya apabila nilai NSE semakin tinggi mendekati 1 maka kinerja model semakin tinggi.

4. Hasil Analisis dan Diskusi

4.1 Model debit puncak hidrograf satuan

Data debit puncak hidrograf satuan yang telah dikumpulkan, digunakan untuk membuat model prediksi debit puncak hidrograf satuan berdasarkan karakteristik DAS. Data debit puncak hidrograf satuan diperoleh dengan cara menurunkan dari data hidrograf pengamatan pada pos duga air dan dari berbagai sumber literatur (Sulistyowati, et.al.,2018; Selamet, B., 2006;

Safarina, A.B., 2011; Limantara, L.M., 2006) yang menyajikan tentang debit puncak hidrograf satuan. Data debit puncak hidrograf satuan yang terkumpul, selanjutnya dilakukan analisis untuk mendapatkan karakteristik DAS dari masing-masing DAS yang memiliki data hidrograf satuan. Karakteristik DAS yang di analisis meliputi luas DAS, panjang sungai, kemiringan DAS, indeks danau atau waduk dan rata-rata hujan maksimum tahunan pada DAS tersebut. Data karakteristik DAS yang telah diperoleh, lebih lanjut diolah untuk mendapatkan informasi rata-rata debit banjir tahunan (*mean annual flood*) berdasarkan persamaan metode DPMA-IOH. Semua informasi yang dikumpulkan dan hasil analisis di resume seperti terlihat pada **Tabel 2**. Data pada **Tabel 2** digunakan untuk membuat model untuk memprediksi debit puncak hidrograf satuan. Model yang dibentuk dengan membuat hubungan antara debit puncak hidrograf satuan pada sumbu-Y dan rata-rata debit banjir tahunan pada sumbu-X. Hubungan yang dipilih dengan melihat koefisien determinasi (R^2) yang lebih tinggi. Berdasarkan hasil analisis statistik, maka digunakan persamaan eksponensial seperti terlihat pada **Gambar 2**. Persamaan eksponensial yang dihasilkan dari grafik tersebut adalah sebagai berikut:

$$q_p = 0.0083 \bar{Q}^{1.3514} \quad (14)$$

dengan koefisien determinasi sekitar 86.3 %.

Dari persamaan eksponensial yang dihasilkan, selanjutnya diintegrasikan dengan persamaan untuk menghitung rata-rata debit banjir tahunan ($\bar{Q}$), sehingga persamaan di atas menjadi persamaan berikut ini:

$$q_p = 0.0083 [(8 \cdot 10^{-6} A^v P^{2.445} S^{0.117} (1 + L_u)^{-0.85})]^{1.3514} \quad (15)$$

$$q_p = [(6.64 \cdot 10^{-10.1084} A^{1.3514} P^{3.3042} S^{0.15811} (1 + L_u)^{-1.1498})] \quad (16)$$

Persamaan di atas merupakan model yang digunakan untuk memperkirakan besarnya debit puncak hidrograf satuan dalam rangka untuk mengembangkan hidrograf satuan sintetis.

4.2 Waktu ke puncak (*time to peak*)

Waktu ke puncak (t_p) merupakan salah satu unsur yang diperlukan untuk mengembangkan model hidrograf satuan sintetis. Waktu ke puncak diperoleh berdasarkan data hidrograf pengamatan di DAS-DAS yang memiliki data. Terdapat sekitar 30 DAS dan SubDAS di Pulau Jawa yang memiliki data dan digunakan untuk mengembangkan model prediksi waktu ke puncak berdasarkan karakteristik DAS. DAS yang memiliki data *waktu ke puncak* dianalisis untuk mendapatkan informasi karakteristik DASnya. Adapun informasi karakteristik DAS yang digunakan untuk mengembangkan model waktu ke puncak dapat dilihat pada **Tabel 3**.

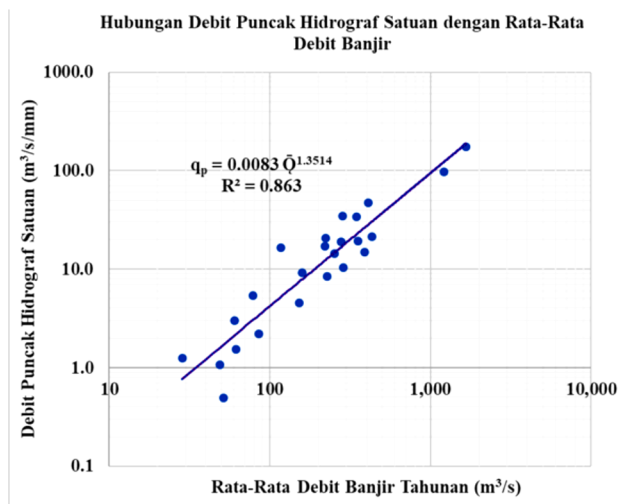
Model yang dikembangkan untuk memprediksi waktu ke puncak (t_p) menggunakan persamaan *multiple variable regression*. Analisis statistik untuk menghasilkan regresi dengan multiple variabel dapat dilakukan dengan perangkat lunak excel melalui menu *data analysis* dan *regression*. Adapun waktu ke puncak digunakan sebagai variabel yang terikat (*dependent*) dan 5 (lima) karakteristik DAS digunakan sebagai variabel bebas (*independent*). Kelima karakteristik DAS yang digunakan untuk menduga nilai waktu ke puncak banjir adalah luas DAS, panjang sungai, lebar DAS, jarak dari outlet ke titik massa DAS dan keliling DAS.

Tabel 2. Data debit rata-rata banjir hasil perhitungan metode DPMA-IOH dan debit puncak hidrograf satuan

No.	Nama Sungai	Pos Duga Air	Karakteristik Fisik DAS						Debit			
			Luas (km ²)	Panjang Sungai (km)	Indeks Danau (-)	Indeks kemiringan (m/km)	$\bar{R}$ (mm)	P_{max} (mm)	ARF (-)	ν (-)	q_{peak} (m ³ /s/mm)	$\bar{Q}$ (m ³ /s)
1	Brantas	Gadang	731.37	35.23	0.00	202.20	74.85	93.69	0.80	0.941	34.79	282.5
2	Lesti	Tw.Renjeni	382.51	40.07	0.00	238.00	102.63	123.12	0.83	0.949	19.23	354.4
3	Brantas	Konto 1	186.00	33.50	0.00	325.70	83.31	95.53	0.87	0.958	16.39	116.5
4	Cimanuk	Leuwidaun	771.75	61.00	0.00	191.74	73.07	91.80	0.80	0.941	19.06 ^c	277.3
5	Winongo	Sinduadi	37.64	14.00	0.00	51.67	118.60	123.84	0.96	0.977	0.49 ^c	51.7
6	Gajahwong	Papringan	20.61	12.00	0.00	47.98	117.53	118.72	0.99	0.984	1.25 ^c	28.5
7	Gajahwong	Wonokromo	72.56	23.00	0.00	35.22	101.20	109.70	0.92	0.969	1.55 ^c	61.6
8	Code	Pogung	35.07	26.00	0.00	86.40	115.98	120.63	0.96	0.978	1.08 ^c	48.7
9	Winongo	Padokan	96.54	31.59	0.00	40.15	103.36	113.93	0.91	0.965	2.20 ^c	85.5
10	Code	Koloran	56.22	33.27	0.00	63.06	107.68	115.01	0.94	0.972	3.01 ^c	60.7
11	Cikereuh	Jatiwangi	104.70	30.00	0.00	143.51	119.77	132.65	0.90	0.964	4.58 ^c	153.2
12	Cisangkuy	Kamasan	190.94	34.00	0.00	223.01	71.49	82.10	0.87	0.957	5.38 ^c	78.5
13	Ciliwung	Sugutamu	253.54	78.00	0.00	187.49	100.25	117.17	0.86	0.954	8.46 ^c	226.4
14	Cilutung	Bantarmarak	451.19	33.00	0.00	128.25	91.52	110.97	0.82	0.947	10.35 ^c	288.0
15	Cilutung	Dam Kamum	630.42	55.17	0.00	180.83	90.29	111.91	0.81	0.943	14.95 ^c	388.0
16	Lengkong	Widas	1297.0	67.00	0.00	105.15	75.22	97.93	0.77	0.934	21.43 ^d	432.6
17	Citarum	Nanjung	1762.6	82.00	0.00	164.06	64.80	86.19	0.75	0.931	47.11 ^c	410.0
18	Brantas	Jeli	5005.9	182.00	0.0034	153.31	71.29	102.44	0.70	0.918	97.94 ^c	1,216.9
19	Brantas	Ploso	9080.5	248.93	0.0019	127.28	67.05	100.99	0.66	0.911	174.1 ^c	1,662.1
20	Progo	Krangan	431.94	36.50	0.00	146.59	83.21	100.61	0.83	0.948	20.63 ^a	223.1
21	Kening		802.11	79.89	0.00	66.20	73.11	92.09	0.79	0.940	14.52	253.5
22	Kali Madiun	Sekayu	1002.6	45.624	0.00	199.96	73.01	93.367	0.78	0.937	33.89	348.1
23	K. Keduang	Ngadipiro	375.57	44.516	0.00	179.02	86.36	103.48	0.83	0.949	17.20	221.2
24	K. Wiroko	Sulingi	178.40	31.46	0.00	243.54	97.24	111.20	0.87	0.958	9.15 ^b	158.3

a : Slamet, B., (2006); b : Sulistyowati, et.al., (2018); c : Safarina, A.B., (2011); d : Limantara, L.M., (2006)

Berdasarkan analisis yang dilakukan, maka diperoleh hasil seperti pada **Tabel 4**. Hasil analisis tersebut menunjukkan bahwa persamaan empiris yang dihasilkan memiliki koefisien korelasi $R = 97,99 \%$, $R^2 = 96,03 \%$, dan kesalahan standar perkiraan untuk waktu ke puncak (*logaritmik natural*, $\ln t_p$) sekitar 0,318 atau setara dengan 1.37 jam. Pada model ini semua variabel mempunyai angka signifikan di bawah 0,05, sehingga semua variabel dalam model tersebut cukup signifikan mempengaruhi besarnya waktu ke puncak untuk $\alpha = 5 \%$.



Gambar 2. Hubungan debit puncak hidrograf satuan dengan rata-rata debit banjir tahunan

Berdasarkan analisis pada **Tabel 4**, maka diperoleh model terbaik adalah model yang memiliki nilai koefisien determinasi yang terbesar. Dari hasil analisis tersebut diperoleh model terbaik untuk menghitung waktu ke puncak (t_p) dengan menggunakan empat variabel karakteristik DAS sebagai berikut:

$$t_p = D^{-0.1692} P^{0.1811} M^{-0.3317} A^{0.30477} \quad (17)$$

Dimana:

t_p : *time to peak* (waktu ke puncak, jam)

D : *distance from the outlet to a point on the stream nearest the centroid of the watershed area* (km)

M : *mean basin width* (lebar DAS $= \frac{A}{L}$, km)

P : *perimeter of watershed* (Keliling DAS, km)

A : *area of watershed* (luas DAS, km²)

4.3 Waktu dasar (*time base*)

Waktu dasar merupakan salah satu unsur dalam menentukan bentuk hidrograf satuan pada suatu DAS. Waktu dasar merupakan waktu yang diperlukan mulai dari naiknya aliran sungai sampai dengan turun kembali. Waktu dasar sangat tergantung dari pada bentuk DAS. Data waktu dasar diperoleh berdasarkan data hidrograf pengamatan dari masing-masing DAS di Pulau Jawa. Adapun data waktu dasar yang telah dikumpulkan dari sekitar 35 DAS dan Sub DAS dapat dilihat pada **Tabel 5**.

Tabel 3. Waktu ke puncak banjir (t_p) dan karakteristik fisik DAS

No.	DAS	Sungai	Outlet	t_p	Karakteristik Fisik DAS				
					A	L	M	D	P
1	Brantas	Brantas	Gadang	5.67	731.37	35.23	20.76	16.815	213.408
2	Brantas	Lesti	Tw. Renjeni	4.94	382.51	40.07	9.55	19.027	118.820
3	Brantas	Brantas	Konto 1	3.00	186.00	33.50	5.55	16.021	59.040
4	Ciliwung	Ciliwung	Cibogo	1.91	89.07	18.03	4.94	8.839	60.48
5	Bekasi	Cikeas	Nagrak	2.78	94.27	67.88	1.39	31.560	129.22
6	Brantas	Brangkal	Dinoyo	3.33	236.52	19.22	12.31	9.396	88.99
7	Brantas	Brangkal	Japan	4.92	281.95	30.81	9.15	14.784	122.86
8	Brantas	Widas	Lengkong	8.83	1257.98	64.74	19.43	30.158	145.40
9	B. Solo	K Madiun	Sekayu	5.42	1002.60	45.62	21.98	21.552	238.23
10	Cisadane	Cisadane	Genteng	2.90	182.55	25.22	7.24	12.200	83.45
11	Cisadane	Cisadane	Batubelah	3.22	852.69	50.25	16.97	23.646	162.51
12	Cisadane	Cisadane	Serpong	5.83	1184.77	92.61	12.79	42.527	307.46
13	B. Solo	K. Dengkeng	Jarum	6.40	567.11	62.07	9.14	28.964	143.27
14	Ciliwung	Ciliwung	Sugutamu	5.19	253.54	72.14	3.51	33.459	185.71
15	B. Solo	K. Keduang	Ngadipiro	5.29	375.57	44.52	8.44	21.049	93.94
16	Cipinang	K Cipinang	Kebon Pala	5.46	41.01	27.88	1.47	13.432	79.34
17	Cipinang	K Cipinang	Kelapa Dua	4.00	19.36	15.35	1.26	7.573	45.03
18	Garang	Garang	Simongan	4.00	206.82	45.19	4.58	21.356	92.57
19	Garang	Garang	Patemon	3.38	73.50	34.26	2.15	16.372	56.49
20	Serayu	Serayu	Banjarnegara	4.31	717.26	48.40	14.82	22.811	175.90
21	Progo	Progo	Kranggan	2.00	431.94	36.50	11.83	17.396	137.26
22	Progo	Progo	Badran	4.50	613.64	47.67	12.87	22.479	161.88
23	Progo	Progo	Borobudur	4.10	1002.59	76.12	13.17	35.231	241.45
24	Grindulu	Grindulu	Pacitan	4.24	736.38	73.15	10.07	33.907	215.00
25	Citarum	Cikapundung	Maribaya	3.50	73.92	12.85	5.75	6.385	56.54
26	Citanduy	Cijolang	Bebedahan	4.40	435.28	72.80	5.98	33.751	200.70
27	Citanduy	Citanduy	Cirahong	6.00	645.60	57.00	11.33	26.687	182.69
28	Brantas	K Sadar	Sadar Hulu	5.00	38.91	24.87	1.56	12.037	66.00
29	Kali Angke	Angke	Pamulang	5.64	49.92	48.21	1.04	22.722	114.34
30	B. Solo	Kali Samin	Peren	4.50	204.06	65.00	3.14	30.273	129.83

Ket: A: Luas DAS (km²); L: Panjang Sungai (km); M: Lebar DAS (km); D: Jarak dari outlet ke titik berat DAS (km); P: Keliling Batas DAS (km)

Tabel 4. Hasil analisis statistik untuk waktu ke puncak dengan *multiple viriabel regression*

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0.97993174							
R Square	0.960266215							
Adjusted R Square	0.87875847							
Standard Error	0.318399795							
Observations	30							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	5	63.70164079	12.74032816	157.0887441	1.61E-17			
Residual	26	2.635839172	0.10137843					
Total	31	66.33747996						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Luas (km2)	0.304766077	1.120507193	0.271989398	0.78777841	-1.998469445	2.608001598	-1.998469445	2.608001598
Panjang Sungai (km)	0	0	65535	#NUM!	0	0	0	0
Mean Basin Width	-0.331730417	1.072130299	-0.309412407	#NUM!	-2.535525808	1.872064974	-2.535525808	1.872064974
Distance	-0.169200153	1.080475144	-0.156597914	0.876771404	-2.390148619	2.051748313	-2.390148619	2.051748313
Perimeter	0.181096258	0.270471573	0.669557452	0.509042841	-0.374866024	0.737058539	-0.374866024	0.737058539

Berdasarkan data yang telah dikumpulkan untuk 35 DAS di Pulau Jawa dapat dinyatakan bahwa nilai waktu dasar (T_b) diperkirakan berkisar antara 2.5 s/d 11 kali waktu ke puncak (t_p) atau dengan rata-rata 6 kali waktu ke puncak (t_p). Nilai tersebut diperoleh berdasarkan perbandingan antara waktu dasar (T_b) dengan waktu ke puncak (t_p). Untuk memprediksi secara lebih detail waktu dasar (T_b) pada suatu DAS dapat digunakan berdasarkan persamaan empiris yang dikembangkan. Persamaan empiris dihasilkan berdasarkan analisis multiple variabel regresi seperti pada Tabel 6.

Hasil analisis regresi, diperoleh sekitar 5 (lima) dari 7 (tujuh) parameter karakteristik fisik DAS yang digunakan untuk memprediksi nilai waktu dasar (T_b). Ke-lima parameter karakteristik fisik DAS tersebut adalah waktu ke puncak (t_p), luas DAS (A), Perimeter DAS (P), Faktor bentuk DAS (SF) dan Jarak titik outlet ke titik berat DAS (D). Persamaan regresi yang dihasilkan untuk memprediksi nilai waktu dasar berdasarkan ke-lima karakteristik fisik DAS tersebut sebagai berikut:

$$T_b = t_p^{0.5469} A^{1.604} SF^{1.6275} P^{0.0445} D^{-3.2824} \quad (18)$$

Persamaan regresi yang dihasilkan memiliki tingkat akurasi yang tinggi dimana dihasilkan nilai multiple R^2 sekitar 0.9977.

4.4 Kurva hidrograf satuan dengan fungsi gamma

Penggunaan fungsi distribusi probabilitas (pdf) dalam menurunkan hidrograf satuan sintetik (SUH) telah menjadi perhatian karena kesamaannya dengan sifat-sifat unit hidrograf (Ghorbani, et.al., 2013). Nash (1959) dan Dooge (1959) menghasilkan hidrograf satuan sesaat (*instantaneous unit hydrograph*, IUH) berdasarkan konsep linierisasi sejumlah n waduk dengan koefisien penyimpanan (K) yang diistilahkan dengan fungsi Gamma sebagai berikut:

$$q(t) = \frac{A}{3.6 K \Gamma(n)} \left(\frac{t}{K}\right)^{(n-1)} e^{\left(-\frac{t}{K}\right)} \quad (19)$$

di mana, n dan K berfungsi untuk menentukan bentuk IUH dan q (1/jam) adalah kedalaman limpasan per

satuan waktu per satuan curah hujan efektif. Hubungan antara n dan K ditulis sebagai (Chow, 1964):

$$K = \frac{t_p}{(n-1)} \quad (20)$$

Sebuah parameter yang tidak berdimensi, β didefinisikan dengan mengkalikan parameter q_p dan t_p , sehingga parameter β menjadi sebagai berikut:

$$\beta = q_p t_p \quad (21)$$

Untuk memudahkan dalam penggunaannya, maka persamaan diatas diselesaikan dengan menggunakan pendekatan solusi numerik. Persamaan yang dihasilkan berdasarkan solusi numerik tersebut adalah (Bhunya et al., 2003):

$$n = 5.53\beta^{1.75} + 1.04 \quad \text{untuk} \quad 0.01 < \beta < 0.35 \quad (22)$$

$$n = 6.29\beta^{1.998} + 1.157 \quad \text{untuk} \quad \beta \geq 0.35 \quad (23)$$

4.5 Mengembangkan fungsi kurva hidrograf satuan sintesis

4.5.1 Fungsi kurva naik dan turun

Kurva hidrograf satuan sintesis dapat dibentuk dari beberapa fungsi persamaan. Secara umum terdiri dari dua kurva yaitu kurva naik (*rising limb*) dan kurva turun (*ressecion limb*). Dari masing-masing kurva biasanya dibentuk dari beberapa fungsi persamaan untuk menghasilkan kurva yang sesuai dengan bentuk hidrograf satuan. Fungsi persamaan yang dibuat biasanya menggunakan variabel yang berhubungan dengan waktu ke puncak (t_p) dan waktu dasar (T_b). Persamaan fungsi hidrograf satuan tersebut akan dibedakan menjadi dua bagian yaitu fungsi naik dan fungsi turun. Grafik yang akan dikembangkan adalah hubungan antara sisi Y yang diwakili oleh debit aliran

($m^3/s/mm$) dan sisi-X ($X = \frac{t}{t_p}$). Adapun penjelasan dari setiap ordinate dan absis adalah sebagai berikut:

$$Y = q_r, X = \frac{t}{t_p} \quad (24)$$

sedangkan nilai untuk waktu dasarnya adalah sebagai berikut:

$$T_b = \left(2.5 \frac{s}{d} 11\right) t_p \quad (25)$$

Tabel 5. Data waktu dasar (Tb) dan karakteristik fisik DAS dari beberapa DAS

No	DAS	Sungai	Outlet	Karakteristik Hidrograf Satuan		Karakteristik Fisik DAS					
				TB	TP	A	L	M	SF	D	P
1	Brantas	Brantas	Gadang	23.3	5.7	731.4	35.2	20.8	1.7	16.8	213.4
2	Brantas	Lesti	Tawangrenjeni	25.4	4.9	382.5	40.1	9.5	4.2	19.0	118.8
3	Brantas	Brantas	Konto 1	12.7	3.0	186.0	33.5	5.6	6.0	16.0	59.0
4	Ciliwung	Ciliwung	Cibogo	11.3	1.9	89.1	18.0	4.9	3.6	8.8	60.5
5	Bekasi	Cikeas	Nagrak	18.6	2.8	94.3	67.9	1.4	48.9	31.6	129.2
6	Brantas	Brangkal	Dinoyo	24.9	3.3	236.5	19.2	12.3	1.6	9.4	89.0
7	Brantas	Brangkal	Japan	31.6	4.9	282.0	30.8	9.2	3.4	14.8	122.9
8	Brantas	Widas	Lengkong	39.7	8.8	1258.0	64.7	19.4	3.3	30.2	145.4
9	B.Solo	K Madiun	Sekayu	30.1	5.4	1002.6	45.6	22.0	2.1	21.6	238.2
10	Pesangrahan	Pesangrahan	Sawangan	31.0	6.0	73.0	29.8	2.4	12.2	14.3	89.5
11	Pesangrahan	Pesangrahan	Kebun Jeruk	87.5	26.0	115.6	70.9	1.6	43.4	32.9	166.5
12	Pesangrahan	Pesangrahan	Tanah Kusir	40.7	9.3	98.1	60.6	1.6	37.5	28.3	145.8
13	Cisadane	Cisadane	Genteng	27.2	2.9	182.6	25.2	7.2	3.5	12.2	83.4
14	Cisadane	Cisadane	Batubelah	24.6	3.2	852.7	50.3	17.0	3.0	23.6	162.5
15	Cisadane	Cisadane	Serpong	29.2	5.8	1184.8	92.6	12.8	7.2	42.5	307.5
16	B. Solo	K. Dengkeng	Jarum	48.3	6.4	567.1	62.1	9.1	6.8	29.0	143.3
17	Ciliwung	Ciliwung	Sugutamu	28.8	5.2	253.5	72.1	3.5	20.5	33.5	185.7
18	B.Solo	K. Keduang	Ngadipiro	25.9	5.3	375.6	44.5	8.4	5.3	21.0	93.9
19	Cipinang	K Cipinang	Cipinang Hilir	24.7	5.5	41.0	27.9	1.5	19.0	13.4	79.3
20	Cipinang	K Cipinang	Cipinang Hulu	40.5	4.0	19.4	15.3	1.3	12.2	7.6	45.0
21	Garang	Garang	Simongan	26.4	4.0	206.8	45.2	4.6	9.9	21.4	92.6
22	Garang	Garang	Patemon	25.8	3.4	73.5	34.3	2.1	16.0	16.4	56.5
23	Serayu	Serayu	Banjarnegara	24.1	4.3	717.3	48.4	14.8	3.3	22.8	175.9
24	Progo	Progo	Kranggan	21.0	2.0	431.9	36.5	11.8	3.1	17.4	137.3
25	Progo	Progo	Badran	27.9	4.5	613.6	47.7	12.9	3.7	22.5	161.9
26	Progo	Progo	Borobudur	27.3	4.1	1002.6	76.1	13.2	5.8	35.2	241.5
27	Grindulu	Grindulu	Pacitan	26.8	4.2	736.4	73.1	10.1	7.3	33.9	215.0
28	Citarum	Cikapundung	Maribaya	11.0	3.5	73.9	12.8	5.8	2.2	6.4	56.5
29	Citanduy	Cijolang	Bebedahan	26.5	4.4	435.3	72.8	6.0	12.2	33.8	200.7
30	Citanduy	Citanduy	Cirahong	30.0	6.0	645.6	57.0	11.3	5.0	26.7	182.7
31	Brantas	K Sadar	Sadar Hulu	21.8	5.0	38.9	24.9	1.6	15.9	12.0	66.0
32	Kali Angke	Angke	Pamulang	27.6	5.6	49.9	48.2	1.0	46.6	22.7	114.3
33	B. Solo	Kali Samin	Peren	25.7	4.5	204.1	65.0	3.1	20.7	30.3	129.8
34	B.Solo	Kali Kening	-	40.9	14.6	802.1	79.9	10.0	8.0	36.9	218.5
35	B.Solo	Kali Wiroko	Sulingi	22.0	3.0	178.4	31.5	5.7	5.5	15.1	105.7

Ket: A: Luas DAS (km²); L: Panjang Sungai (km); M: Lebar DAS (km); D: Jarak dari outlet ke titik berat DAS (km); P: Keliling Batas DAS (km); SF: Shape Factor; TB: Time Base (jam); TP: Time to peak (jam)

4.5.2 Fungsi kurva naik (*rising limb*)

Fungsi kurva naik yang digunakan untuk hidrograf satuan mengikuti fungsi kudratik. Persamaan kuadrat yang digunakan untuk kurva naik hidrograf satuan sampai pada titik puncak, dengan kriteria $0 \leq t < t_p$, mengikuti fungsi persamaan berikut ini:

$$q_t = q_p \left(\frac{t}{t_p} \right)^{2.954} \quad (26)$$

4.5.3 Fungsi kurva turun (*recession limb*)

Fungsi kurva turun terdiri menggunakan fungsi eksponensial. Fungsi eksponensial dimulai pada awal turun dari puncak (*crest level*) sampai dengan ke posisi awal. Adapun fungsi eksponensial yang digunakan mulai dari $t_p \leq t \leq T_b$ mengikuti persamaan eksponensial sebagai berikut:

$$q_t = q_p e^{-\varphi \left(\frac{t-t_p}{t_p} \right)} \quad (27)$$

Tabel 6. Hasil analisis statistik untuk waktu dasar dengan *multiple viriabel regression*

SUMMARY OUTPUT								
Regression Statistics								
Multiple R	0.99772281							
R Square	0.995450805							
Adjusted R Square	0.961510912							
Standard Error	0.241137579							
Observations	35							
ANOVA								
	df	SS	MS	F	Significance F			
Regression	5	381.7124189	76.34248377	1312.91465	3.14037E-33			
Residual	30	1.744419954	0.058147332					
Total	35	383.4568388						
	Coefficients	Standard Error	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%	Lower 95.0%	Upper 95.0%
Intercept	0	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Time to Peak	0.546925352	0.099180629	5.514437198	5.4521E-06	0.344371484	0.749479219	0.344371484	0.749479219
Luas (km ²)	1.604257482	0.429361528	3.736379196	0.000783684	0.727384259	2.481130704	0.727384259	2.481130704
Shape Factor	1.627549917	0.394770414	4.122775825	0.000272203	0.821321175	2.43377866	0.821321175	2.43377866
Lca	-3.28242525	0.791320257	-4.148036422	0.00025383	-4.898516816	-1.666333684	-4.898516816	-1.666333684
Perimeter	0.044467336	0.202740019	0.219331816	0.827877069	-0.369583019	0.458517692	-0.369583019	0.458517692

Agar ordinate hidrograf satuan berakhir pada waktu dasar (T_b), maka ditambahkan sebuah koefisien φ pada persamaan di atas. Besarnya nilai koefisien φ ditentukan dari persamaan di atas dengan membuat $q_t = 0$ pada waktu $t = T_b$. Namun persamaan tersebut tidak memungkinkan memiliki nilai $q_t = 0$, sehingga nilainya mendekati nol ($q_t \rightarrow 0$). Jika diasumsikan nilai $q_t = 0.1$, maka koefisien φ dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\varphi = \frac{(\ln(q_p) + 2.3 * 1) t_p}{[(T_b - t_p)]} \quad (28)$$

Apabila nilai $q_t = 0.01$, maka koefisien φ dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\varphi = \frac{(\ln(q_p) + 2.3 * 2) t_p}{[(T_b - t_p)]} \quad (29)$$

Sehingga bentuk umum persamaan untuk koefisien φ dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\varphi = \frac{(\ln(q_p) + 2.3n) t_p}{[(T_b - t_p)]} \quad (30)$$

Dimana n adalah bilangan positif dan digunakan juga untuk menyesuaikan volume hidrograf satuan yang dihasilkan.

4.6 Penerapan HSS DPMA-IOH di daerah aliran sungai

4.6.1 DAS Ciliwung - Katulampa

Model HSS DPMA-IOH telah siap untuk diterapkan pada daerah aliran sungai dan menguji kinerja model tersebut. Penerapan HSS DPMA-IOH tersebut dilakukan pada DAS Ciliwung Hulu. Pengujian model tersebut dilakukan terhadap data hidrograf satuan pengamatan di Katulampa yang telah dilakukan kajian oleh Slamet, B., (2006). Berdasarkan hasil kajian Slamet, B., (2006) telah dihasilkan hidrograf satuan di Katulampa yang telah dirata-rata untuk masing-masing tahun 2003, 2004 dan 2005. Sebelum melakukan pengujian kinerja model HSS DPMA-IOH, maka terlebih dahulu harus mendapatkan karakteristik DAS

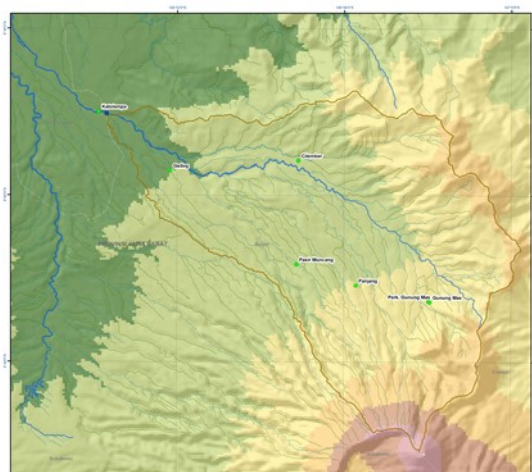
Ciliwung-Katulampa, agar model tersebut dapat menghasilkan hidrograf satuan sintetis. Berdasarkan analisis topografi, maka diperoleh karakteristik DAS-Katulampa sebagai berikut:

Luas DAS : 149.23 km²
 Panjang sungai utama : 24.46 km
 Kemiringan DAS : 27,22 %
 Keliling DAS : 62.83 km

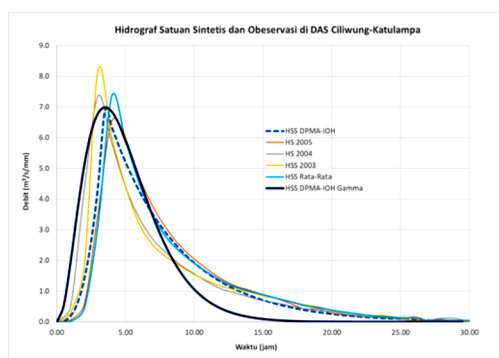
Adapun batas DAS Ciliwung – Katulampa dapat dilihat pada **Gambar 3**. Nilai rata rata hujan maksimum tahunan di DAS Ciliwung – Katulampa diperoleh sekitar 113 mm/ hari (Ginting, 2015). Berdasarkan data informasi yang telah dihasilkan di atas, selanjutnya dilakukan perhitungan hidrograf satuan sintetis dengan model HSS DPMA-IOH, seperti terlihat pada **Tabel 7**. Berdasarkan hasil perhitungan di atas, maka telah diperoleh hidrograf satuan sintetis dengan model DPMA-IOH. Hasil perhitungan diperoleh nilai debit puncak hidrograf satuan sekitar 6,98 m³/s/mm dan waktu ke puncak (*time to peak*) sekitar 3.52 jam serta waktu dasar (*time base*) sekitar 21.04 jam. Terdapat dua bentuk kurva yang dihasilkan dengan HSS DPMA-IOH yaitu berdasarkan fungsi Gamma dan fungsi kurva naik dan kurva turun. Kurva hidrograf satuan sintetis DPMA-IOH yang telah dihitung dan dibandingkan dengan hidrograf satuan pengamatan di Katulampa dapat dilihat pada **Gambar 4**. Berdasarkan analisis kinerja model maka telah diperoleh nilai koefisien Nash–Sutcliffe (E) untuk tahun 2003 sekitar 89%, tahun 2004 sekitar 88% dan tahun 2005 sekitar 98 %. Merujuk pada nilai koefisien Nash–Sutcliffe yang telah dihasilkan dapat disimpulkan bahwa kinerja model HSS DPMA-IOH pada DAS Ciliwung-Katulampa berkinerja baik.

4.6.2 DAS Palung-Surodadi

Penerapan model HSS DPMA-IOH dilakukan juga pada DAS Palung yang berada di Pulau Lombok, Nusa Tenggara Barat. Lokasi pengamatan debit hidrograf berada di Surodadi, sehingga untuk selanjutnya disebut sebagai DAS Palung-Surodadi,. Luas DAS Palung-Surodadi sekitar 47.8 km², dengan panjang sungai



Gambar 3. Batas DAS Ciliung - Katulampa



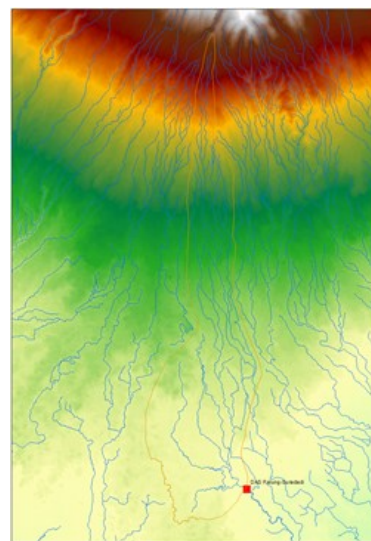
Gambar 4. Grafik hasil HSS DPMA-IOH dan HS pengamatan

utama sekitar 22.83 km. DAS Palung-Surodadi memiliki kemiringan DAS sekitar 67.85 m/km dengan keliling batas DAS sekitar 48.68 km. Adapun batasan DAS Palung-Surodadi dapat dilihat pada **Gambar 5**. Data kondisi hujan di DAS Palung-Surodadi memiliki karakteristik seperti rata-rata hujan maksimum tahunan sekitar 108 mm/hari. Berdasarkan informasi tersebut di atas, maka dapat dihitung hidrograf satuan sintetis untuk DAS tersebut. Berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan HSS DPMA-IOH maka diperoleh hidrograf satuan sintetis seperti pada **Gambar 6**. Debit puncak hidrograf satuan sintetis yang diperoleh dari model sekitar 1,47 m³/s/mm. Hasil perhitungan hidrograf sintetis tersebut selanjutnya dibandingkan dengan hidrograf satuan pengamatan yang terdapat pada lokasi studi. Hidrograf pengamatan diperoleh dari hasil studi Limantara, L.M., (2006). Data hidrograf pengamatan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan. Terdapat kejadian hidrograf banjir pada tanggal 6 Desember 1992 yang akan dibandingkan dengan hidrograf sintetis. Berdasarkan hasil perbandingan tersebut, maka dapat dianalisis kinerja model HSS DPMA-IOH. Kinerja yang dilihat adalah kedekatan hasil hidrograf satuan sintetis yang dihasilkan dengan hidrograf satuan pengamatan pada tanggal 6 Desember 1992. Berdasarkan hasil analisis maka diperoleh nilai koefisien Nash-Sutcliffe sekitar 98 %. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model HSS DPMA-IOH tersebut memiliki kinerja yang baik untuk diterapkan pada DAS Palung-Surodadi.

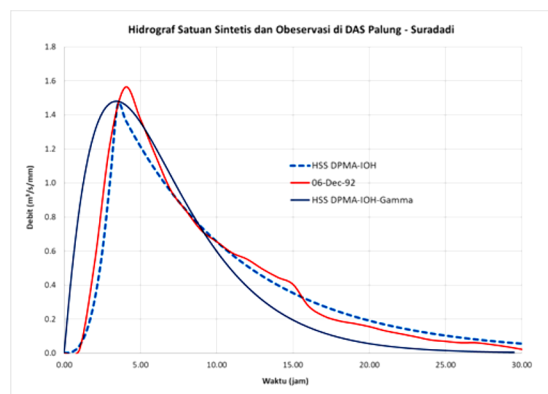
Tabel 7. Perhitungan HSS DPMA-IOH

A. Karakteristik DAS dan Hujan		
Karakteristik DAS :		Ciliung-Katulampa
Luas DAS	149.23	km ²
Panjang Sungai	24.46	km
Perimeter (P)	62.83	km
Indeks Kemiringan	272.2	m/km
Indeks Luas Danau	0	-
Jarak ke titik berat (D)	11.846	km
Mean basin width	6.10	km
Shape Factor (Bentuk DAS)	4.01	-
Rata2 Hujan Maksimum Tahunan	113	mm
Area Reduction Factor (ARF)	0.884	-
Koefisien ν	0.960	-
Hujan Maksimum DAS	99.89	mm
B. Parameter hidrograf satuan sintetis :		
Rata-Rata Debit Banjir	145.93	m ³ /s
Debit Puncak Hidrograf Satuan	6.98	m ³ /s/mm
Time to Peak (t_p)	3.52	jam
Time Base (T_b)	21.04	Jam
Koefisien ϕ	0.699	-
Variabel n	0.670	-
C. Check Volume dan Tinggi Limpasan		
Ordinates time steps	0.5	Jam
Volume HSS	149710.4	m ³
Tinggi Limpasan	1.00	mm

Sumber: Ginting, S., 2019. Hidrograf satuan sintetis (HSS) DPMA-IOH dan aplikasinya. prosiding pertemuan ilmiah tahunan (PIT) HATHI ke 36 di Kupang



Gambar 5. Batas DAS Palung-Surodadi



Gambar 6. Hidrograf satuan sintetis dan hidrograf satuan pengamatan di DAS Palung-Surodadi

4.6.3 DAS tukad Badung-Denpasar

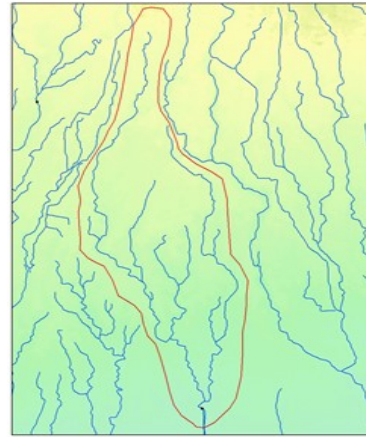
Ujicoba model HSS DPMA-IOH dilakukan di DAS Tukad Badung-Denpasar. DAS Tukad Badung berada di dua wilayah administratif yaitu bagian hulu Kabupaten Badung dan bagian hilir Kota Denpasar. Sungai Tukad Badung dengan panjang alur utama 25.17 km mempunyai anak-anak sungai yaitu Sungai Tag-tag dan Sungai Medih. DAS Tukad Badung dengan titik outlet pada lokasi pos duga air Denpasar memiliki luas sekitar 24.9962 km², dengan panjang sungai utama mulai dari titik outlet ke hulu sekitar 14.239 km. DAS Tukad Badung-Denpasar memiliki kemiringan DAS sekitar 38.35 m/km dengan keliling batas DAS sekitar 27.24 km, seperti terlihat pada **Gambar 7**. Kondisi hujan ekstrim yang terjadi di DAS Tukad Badung dianalisis berdasarkan data hujan maksimum tahunan yang tercatat di Pos Hujan Tampak Siring (440c). Rata-rata hujan maksimum tahunan yang tercatat di pos hujan tersebut adalah sekitar 128.58 mm/hari.

Informasi tersebut di atas digunakan untuk menghitung hidrograf satuan sintesis di DAS tersebut. Hasil perhitungan dengan menggunakan model HSS DPMA-IOH, diperoleh hidrograf satuan sintesis seperti pada **Gambar 8**. Hasil perhitungan hidrograf sintesis tersebut selanjutnya dibandingkan dengan hidrograf satuan pengamatan yang terdapat pada lokasi studi. Hidrograf debit pengamatan diperoleh dari hasil studi Limantara, L.M., (2006). Data hidrograf debit pengamatan tersebut, selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan. Terdapat tiga kejadian hidrograf banjir yang dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan yaitu tanggal 24 Jan 1994, 9 Jan 1997 dan 11 Oktober 1999. Ketiga hidrograf satuan pengamatan tersebut dirata-ratakan dan digunakan untuk menilai kinerja model HSS DPMA-IOH. Kinerja model HSS DPMA-IOH dianalisis menggunakan metode Nash-Sutcliffe. Perbedaan debit puncak hidrograf satuan sintesis dengan rata-rata debit puncak pengamatan adalah sekitar 1 %. Analisis menggunakan metode Nash-Sutcliffe, menunjukkan hasil koefisien sekitar 0,920 atau sekitar 92 %. Berdasarkan hasil tersebut, maka dapat dikatakan bahwa kinerja dari model HSS DPMA-IOH sangat baik.

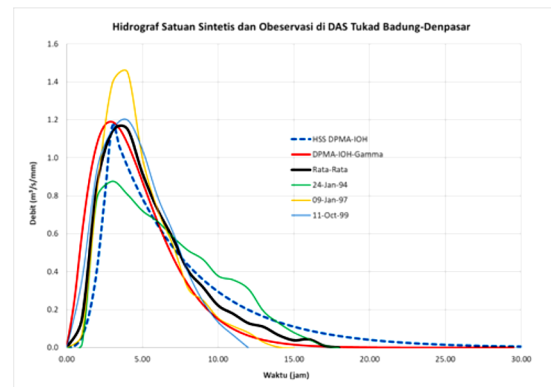
4.6.4 DAS tukad Nyuling-Tiatingtali

Ujicoba model HSS DPMA-IOH dilakukan di DAS Tukad Nyuling.Tiatingtali. DAS Tukad Nyuling-Tiatingtali memiliki panjang alur utama 13.869 km. DAS Tukad Nyuling dengan titik outlet pada lokasi pos duga air Tiatingtali memiliki luas sekitar 23.8497 km². DAS Tukad Nyuling.Tiatingtali memiliki kemiringan DAS sekitar 253.5 m/km dengan keliling batas DAS sekitar 33.47 km, seperti terlihat pada **Gambar 9**. Karakteristik hujan ekstrem yang menjadi dasar dalam perhitungan ini menggunakan data pos hujan Amlapura (Karangasem), dengan rata-rata hujan maksimum tahunan sekitar 139 mm/hari.

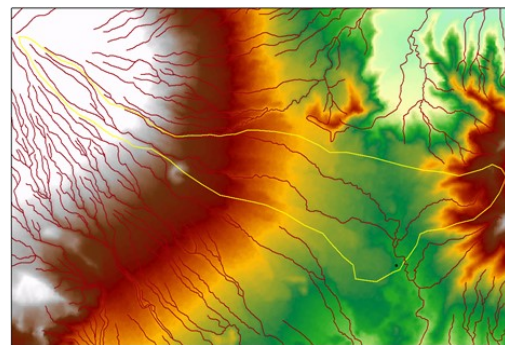
Informasi tersebut di atas digunakan untuk menghitung hidrograf satuan sintesis di DAS tersebut. Hasil



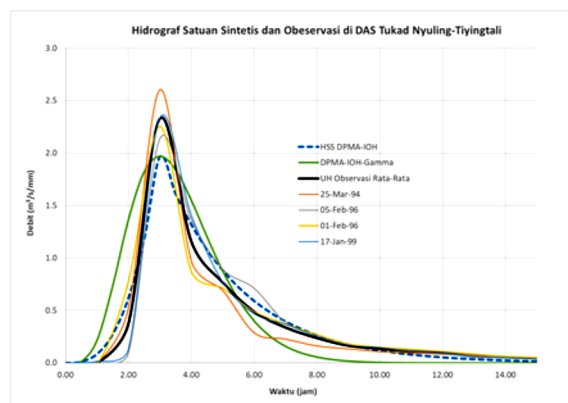
Gambar 7. Batas DAS Tukad Badung-Denpasar



Gambar 8. Hidrograf satuan sintesis dan pengamatan di DAS Tukad Badung-Denpasar



Gambar 9. Batas lokasi DAS tukad Nyuling-Tiatingtali



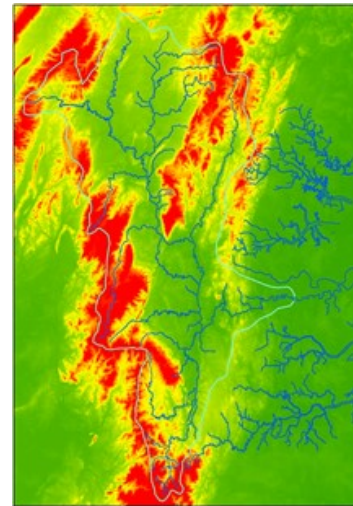
Gambar 10. Hidrograf satuan sintesis dan pengamatan di DAS Tukda Nyuling-Tiatingtali

perhitungan dengan menggunakan model HSS DPMA-IOH, diperoleh hidrograf satuan sintetis seperti pada **Gambar 10**. Hasil perhitungan hidrograf satuan sintetis tersebut selanjutnya dibandingkan dengan hidrograf satuan pengamatan yang terdapat pada lokasi studi. Hidrograf debit pengamatan diperoleh dari hasil studi Limantara, L.M., (2006). Data hidrograf debit pengamatan tersebut, selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan. Terdapat empat kejadian hidrograf banjir yang dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan yaitu tanggal 25 Mar 1994, 1 Feb 1996, 5 Feb 1996, dan 17 Jan 1999. Keempat hidrograf satuan pengamatan tersebut kemudian dirata-rata untuk digunakan dalam menilai kinerja model HSS DPMA-IOH. Hasil debit puncak hidrograf satuan pengamatan diperoleh sekitar $2,33 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$, sementara berdasarkan hasil perhitungan dengan menggunakan HSS DPMA-IOH diperoleh hasil sekitar $1,97 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$. Perbedaan antara hasil perhitungan debit puncak dengan data pengamatan terjadi sekitar 18 %. Penilaian kecocokan grafik hidrograf satuan yang dihasilkan dilakukan dengan menggunakan metode Nash-Sutcliffe. Hasil analisis menghasilkan koefisien Nash-Sutcliffe sekitar 95.9 %, sehingga dapat dikatakan bahwa kinerja dari model HSS DPMA-IOH sangat baik.

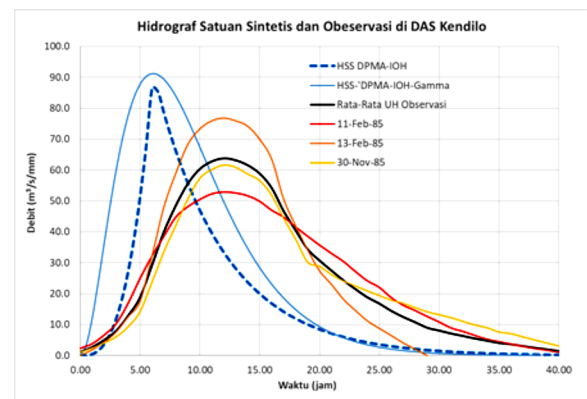
4.6.5 DAS Kendilo

Ujicoba model HSS DPMA-IOH dilakukan di DAS Kendilo, di Pulau Kalimantan. DAS Kendilo memiliki panjang alur utama 159.48 km. DAS Kendilo memiliki luas sekitar 3613.77 km^2 . DAS Kendilo memiliki kemiringan DAS sekitar 195.8 m/km dengan keliling batas DAS sekitar 369.778 km, seperti terlihat pada **Gambar 11**. Karakteristik hujan ekstrim yang terjadi DAS Kendilo dianalisis dari data pengamatan di pos hujan Tanah Grogot dengan rata-rata hujan maksimum tahunan sekitar 100.6 mm/hari.

Karakteristik DAS dan hujan ekstrim yang diperoleh di atas digunakan untuk menghitung hidrograf satuan sintetis di DAS tersebut. Hasil perhitungan dengan menggunakan model HSS DPMA-IOH, diperoleh debit puncak hidrograf satuan sintetis sekitar $91.11 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$ sedangkan debit puncak hidrograf satuan pengamatan sekitar $63,80 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$. dari hasil tersebut diperoleh perbedaan debit puncak lebih tinggi sekitar 42,7 %. Hasil perhitungan hidrograf sintetis tersebut selanjutnya dibandingkan dengan hidrograf satuan pengamatan yang terdapat pada lokasi studi. Hidrograf debit pengamatan diperoleh dari hasil studi Limantara, L.M., (2006). Data hidrograf debit pengamatan tersebut, selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan, seperti terlihat pada **Gambar 12**. Terdapat tiga kejadian hidrograf banjir yang dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan pengamatan yaitu tanggal 11 Feb 1985, 13 Feb 1985, dan 30 Nov 1985. Ketiga hidrograf satuan pengamatan tersebut dirata-rata untuk digunakan dalam menilai kinerja model HSS DPMA-IOH. Kecocokan grafik hidrograf satuan sintetis dengan hidrograf satuan pengamatan dianalisis menggunakan metode Nash-Sutcliffe. Hasil analisis tersebut menghasilkan koefisien Nash-Sutcliffe sekitar 64,97 %. Nilai koefisien yang diperoleh cukup kecil sehingga dapat dikatakan bahwa hasil bentuk hidrograf dari model HSS DPMA-IOH pada DAS Kendilo tidak sesuai dengan



Gambar 11. Batas lokasi DAS Kendilo



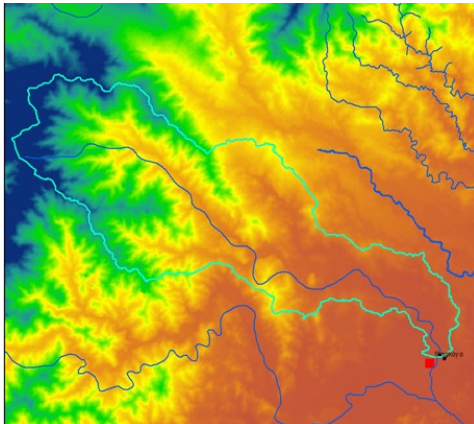
Gambar 12. Hidrograf satuan sintetis dan pengamatan di DAS Kendilo

kenyataan. Rendahnya nilai koefisien Nash-Sutcliffe pada DAS Kendilo dapat disebabkan oleh karena bentuk DAS Kendilo menyerupai bentuk radial, sehingga parameter untuk lebar DAS (*mean basin width*) cukup besar.

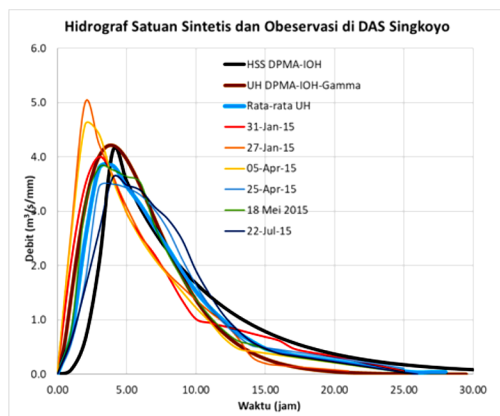
4.6.6 DAS Singkoyo

DAS Singkoyo berada di Pulau Sulawesi Provinsi Sulawesi Tengah. Luas DAS Singkoyo sekitar 115.92 km^2 , dengan panjang sungai utama sekitar 28.946 km. DAS Singkoyo memiliki kemiringan DAS sekitar 361.27 m/km dengan keliling batas DAS sekitar 28.946 km. Karakteristik hujan maksimum di DAS Singkoyo diperoleh dari pos hujan Sausu di Parigi Moutong dengan rata-rata hujan maksimum tahunan sekitar 103,44 mm/hari. Adapun batas DAS Singkoyo dapat dilihat pada **Gambar 13**. Berdasarkan informasi di atas, maka dapat dihitung hidrograf satuan sintetis untuk DAS tersebut. Hasil perhitungan dengan menggunakan HSS DPMA-IOH, diperoleh hidrograf satuan sintetis seperti pada **Gambar 14**. Hasil perhitungan hidrograf sintetis tersebut dibandingkan dengan hidrograf satuan pengamatan yang terdapat pada lokasi studi. Hidrograf pengamatan diperoleh dari hasil studi Tunas, I.G., (2017). Data hidrograf pengamatan tersebut selanjutnya dianalisis untuk mendapatkan hidrograf satuan

pengamatan. Terdapat beberapa kejadian hidrograf banjir yang akan dibandingkan dengan hidrograf sintetis seperti pada kejadian banjir tanggal 27 Jan 2015, 31 Jan 2015, 5 April 2015, 25 April 2015, 18 Mei 2015 dan 22 Juli 2015. Debit puncak hidrograf satuan pengamatan dari beberapa kejadian tersebut menghasilkan rata sekitar $3,83 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$, sedangkan berdasarkan hasil perhitungan dengan HSS DPMA-IOH diperoleh sekitar $4,21 \text{ m}^3/\text{s}/\text{mm}$. Terdapat perbedaan sekitar 9,8 % untuk debit puncak hidrograf satuan. Kinerja untuk bentuk hidrograf satuan dilakukan dengan membandingkan antara rata-rata



Gambar 13. Batas lokasi DAS Singkoyo



Gambar 14. Hidrograf satuan sintetis dan pengamatan di DAS Singkoyo

hidrograf satuan pengamatan dengan hidrograf satuan sintetis menggunakan metode Nash-Sutcliffe. Hasil koefisien Nash-Sutcliffe diperoleh sekitar 83,04 % yang mengindikasikan bahwa hidrograf satuan sintetis dengan hidrograf satuan pengamatan memiliki kecocokan bentuk yang baik.

5. Kesimpulan

- Model hidrograf satuan sintetis banyak digunakan dalam perencanaan sumber daya air di Indonesia. Hidrograf satuan sintetis hanya memerlukan karakteristik DAS untuk dapat memperkirakan hidrograf satuan dalam rangka membuat informasi hidrograf banjir. Metode DPMA-IOH saat ini hanya dapat menghitung rata-rata debit banjir

tahunan, sementara dalam perencanaan infrastruktur sumber daya air, umumnya memerlukan informasi hidrograf banjir. Untuk mengantisipasi hal tersebut, maka dilakukan pengembangan metode DPMA-IOH menjadi model hidrograf satuan sintetis. Model tersebut dinyatakan dengan HSS DPMA-IOH.

- Model HSS DPMA-IOH memiliki fungsi persamaan untuk menghitung debit puncak hidrograf satuan (q_p), fungsi persamaan waktu ke puncak (t_p), fungsi persamaan untuk waktu dasar (TB), dan fungsi persamaan untuk membuat grafik kurva naik dan turun (*rising and recession limb*). Selain fungsi persamaan kurva naik dan turun, diterapkan juga fungsi distribusi probabilitas seperti distribusi gamma untuk membentuk grafik hidrograf, sehingga model HSS DPMA-IOH memiliki dua pilihan dalam membentuk grafik hidrografnya.
- Model HSS DPMA-IOH yang telah dihasilkan, lebih lanjut dilakukan ujicoba pada beberapa DAS di Indonesia. Lokasi DAS yang dilakukan ujicoba adalah DAS Ciliwung-Katulampa (Pulau Jawa), DAS Palung-Surodadi (Pulau Lombok), DAS Tukad Badung-Denpasar (Pulau Bali), DAS Tukad Nyuling-Tiyngtali (Pulau Bali), DAS Kendilo (Pulau Kalimantan) dan DAS Singkoyo (Pulau Sulawesi). Hasil ujicoba yang dilakukan pada beberapa DAS tersebut, diperoleh hasil kinerja model HSS DPMA-IOH berdasarkan koefisien Nash-Sutcliffe diatas 80 %, namun terdapat satu lokasi DAS yang memberikan kinerja model dengan koefisien Nash-Sutcliffe dibawah 80 % yaitu pada DAS Kendilo. Hal ini disebabkan kesalahan dalam memprediksi waktu ke puncak (t_p) yang cukup besar karena bentuk DAS Kendilo berbentuk radial sehingga lebar DASnya besar.

6. Daftar Pustaka

- Aron, G. and White, E.L., 1982. Fitting a gamma-distribution over a synthetic unit-hydrograph. *Water Resources Bulletin* 18, 95–98.
- Badan Standar Nasional, 2016. *Tata cara perhitungan debit banjir*. Standar Nasional Indonesia No 2415. Badan Standar Nasional.
- Bernard, M., 1935. An approach to determinate stream flow. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 100, 347–362.
- Bhattacharjya, R.K., 2004. Optimal design of unit hydrographs using probability distribution and genetic algorithms. *Sadhana*, 29(5), 499-508.
- Bhunya, P.K., Mishra, S.K. and Berndtsson, R., 2003. Simplified two parameter gamma distribution for derivation of synthetic unit hydrograph. *Journal of Hydrological Engineering*, 8(4), 226-230.
- Bhunya, P. K., Mishra, S. K., Ojha, C. S. P. and Berndtsson, R., 2004. Parameter estimation of

- Betadistribution for unit hydrograph derivation. *J. Hydrol. Eng. ASCE* 9 (4), 325–332.
- Bhunya, P.K., et al., 2005. Hybrid model for derivation of synthetic unit hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, 10 (6), 458–467. doi:10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:6(458).
- Bhunya, P.K., et al., 2007. Suitability of gamma, chi-square, Weibull and beta distributions as synthetic unit hydrographs. *Journal of Hydrology*, 334, 28–38. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.022
- Bhunya, P.K., et al., 2008. Comparison between Weibull and gamma distributions to derive synthetic unit hydrograph using Horton ratios. *Water Resources Research*, 44, W0442. doi:10.1029/2007WR006031.
- Bhunya, P.K., Singh, P.K., and Mishra, S.K., 2009. Fréchet and chisquare parametric expressions combined with Horton ratios to derive a synthetic unit hydrograph. *Hydrological Sciences Journal*, 54 (2), 274–286. doi:10.1623/hysj.54.2.274
- Boyd, M.J., 1979. A storage-routing model relating drainage basin hydrology and geomorphology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43–69.
- Ciepielowski, A., 1987. *Statistical methods of determining typical winter and summer hydrographs of ungauged catchments*. In: Singh, v.P. (ed.), riedel, dordrecht, the netherlands. Flood Hydrology.
- Clark, C. O., 1945. Storage and unit hydrograph. *Trans. Am. Soc. Civil Engrs* 110, 1419–1446.
- Croley II., T.E., 1980. Gamma synthetic hydrographs. *Journal of Hydrology*, 47, 41–52. doi:10.1016/0022-1694(80)90046-3.
- Chow, V. T., 1964. *Handbook of Applied Hydrology*. Mc Graw-Hill Book Co. Inc., New York
- Diskin, M.H., Ince, M., and Kwabena, O.N., 1978. Parallel cascades model for urban watersheds. *Journal of Hydraulics Division, Proceedings ASCE*, 104 (2), 261–276
- Direktorat Penyelidikan Masalah Air dan Institute of Hydrology, 1983. *Flood Design Manual for Java and Sumatera*. Government of The Republic of Indonesia, Ministry of Public Works, Directorate General of Water Resources Development.
- Dooge, J. C. I., 1959. A general theory of the unit hydrograph. *J. Geophys. Res.* 64(2), 241–256.
- Edson, C. G., 1951. Parameters for relating unit hydrograph to watershed characteristics. *Trans. Am. Geophys. Union* 32(4), 591–596.
- Espey, W. H. and Altman, D. G., 1978. *Nomograph for 10-minute unit hydrographs for small watersheds. Addendum 3 of Urban Runoff Control Planning*, Report EPA-600/9-78-035, Environmental Protection Agency, Washington DC, USA.
- Espey, W. H., Jr, Altman, D. G. and Graves, C. B., Jr., 1977. *Nomograph for 10 minutes unit hydrographs for urban watersheds*. Tech. Memo. 32, Am. Soc. Civil Engrs, New York, USA.
- Ginting, S., 2015. Kajian dan Efektivitas Pengendalian Banjir di DKI Jakarta. *Tesis Magister Pengelolaan Sumber Daya Air*, Institut Teknologi Bandung, Bandung (tidak dipublikasikan)
- Ginting, S., 2019. Hidrograf satuan sintetis (HSS) DPMA-IOH dan Aplikasinya. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan (PIT) HATHI ke 36 di Kupang*
- Ghorbani, M. A., Kashani, M. H., and Saba Zeynali, 2013. Development of Synthetic Unit Hydrograph Using Probability Models. *Research in Civil and Environmental Engineering 2013 1 (01)* 54-66.
- Gray, D. M., 1961. Synthetic unit hydrograph for small drainage areas. *J. Hydraul. Div. ASCE* 87(4), 33–54.
- Gray, D.M., 1962. Derivation of Hydrographs for Small Watersheds From Measurable Physical Characteristics. *Research Bulletin 506*. Agricultural and Home Economic Experiment Station Iowa State University of Science and Technology
- Gupta, V.K., Waymire, E., and Wang, C.T., 1980. A representation of an instantaneous unit hydrograph from geomorphology. *Water Resources Research*, 16 (5), 855–862. doi:10.1029/WR016i005p00855.
- Haktanir, T., and Sezen, N., 1990. Suitability of two-parameter gamma distribution and three-parameter beta distribution as synthetic hydrographs in Anatolia. *Hydrol. Sci. J.*, 35 2, 167–184.
- Jena, S.K. and Tiwari, K.N., 2006. Modeling synthetic unit hydrograph parameters with geomorphologic parameters of watersheds. *J. Hydrol.*, 319:01
- Limantara, L.M., 2006. Model Hidrograf Satuan Sintetis untuk DAS-DAS di Sebagian Indonesia. Disertasi Doktor, Universitas Brawijaya.
- McCuen, R.H., 1989. *Hydrologic analysis and design*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Mondal, S.K., Jana, S., M., M. and Roy, D., 2012. A comparative study for prediction of direct runoff for a river basin using geomorphological approach and artificial neural networks. *Applied Water Science*, 2(1), 1-13

- Nadarajah, S., 2007. Probability models for unit hydrograph derivation. *Journal of Hydrology*, 344, 185–189. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.07.004.
- Nash, J. E., 1958. Determining runoff from rainfall. *Proc. Instn Civil Engrs London* 10, 163–184.
- Nash, J. E., 1959. Systematic determination of unit hydrograph parameters. *J. Geophys. Res.* 64(1), 111–115.
- Nash, J. E., 1960. A unit hydrograph study with particular reference to British catchments. *Proc. Instn Civil Engrs London* 17, 249–282.
- Nash, J.E., 1959. Synthetic determination of unit hydrograph parameters. *Journal of Geophysical Research*, 64(1), 111–115.
- Nash, J. E. and Sutcliffe, J. V., 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles, *J. Hydrol.*, 10(3), 282–290, doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6, 1970.
- Rai, R.K., Sarkar, S., Upadhyay, A. and Singh, V.P., 2010. Efficacy of nakagami-m distribution function for deriving unit hydrograph. *Water Resources Management*, 24(3), 563–575.
- Rodríguez-Iturbe, I. and Valdés, J., 1979. The geomorphologic structure of hydrologic response. *Water Resources Research*, 15 (6), 1409–1420. doi:10.1029/WR015i006p01409.
- Rodríguez-Iturbe, I., Devoto, G., and Valdés, J.B., 1979. Discharge response analysis and hydrologic similarity: the interrelation between the geomorphologic IUH and the storm characteristics. *Water Resources Research*, 15 (6), 1435–1444. doi:10.1029/WR015i006p01435.
- Rosso, 1984. Nash model relation to Horton order ratios. *Water Resour Res* 1984; 20(7): 914–20.
- Soil Conservation Service, 1957. *Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application*. V. Mockus., US Department Of Agriculture, Soil Conservation Service, Washington, DC.
- Sulistiyowati, A., Jayadi, R. dan Rahardjo, A.P., .2018. Unit Hydrograph Modeling using Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH) Method. *Journal of the Civil Engineering Forum Vol. 4 No. 3 (September 2018)*
- Slamet, B., 2006. Model Hidrograf Satuan Sintetik Menggunakan Parameter Morfometri (Studi Kasus DAS Ciliwung Hulu), *Tesis Program Magister IPB*, Bogor
- Safarina, A.B., 2011. Reliability of Nakayasu Synthetic Unit Hydrograph in Various Watershed Area. *Proceedings International Seminar on Water Related Risk Management*, Jakarta, 15-17 July 2011, pp. 123-130.
- Sherman, 1932. Streamflow from rainfall by the unit hydrograph method. *Engrg News Rec* 1932; 108: 501-5.
- Singh, S. K., 2000. Transmuting synthetic unit hydrographs into gamma distribution. *J. Hydrologic Eng.*, 5(4), 380–385.
- Singh, V.P. and Chowdhury, P., 1985. On fitting gamma distribution to synthetic runoff hydrographs. *Nordic Hydrology*, 16, 177–192.
- Singh, S.K., 2005. Clark's and espey's unit hydrographs vs the gamma unit hydrograph. *Hydrological sciences journal*, 50(6), 1053–1067.
- Singh, S. K., 2004. Simplified use of gamma-distribution/Nash model for runoff modelling. *J. Hydrol. Engng ASCE* 9(3), 240–243.
- Singh, S. K., 2000. Transmuting synthetic unit hydrograph into a gamma distribution. *J. Hydrol. Engng ASCE* 5(4), 380–385.
- Singh, P.K., Mishra S.K. and Jain, M.K., 2014. A review of the synthetic unit hydrograph: from the empirical UH to advanced geomorphological methods, *Hydrological Sciences Journal*, 59:2, 239-261, DOI: 10.1080/02626667.2013.870664.
- Snyder, F.F., 1938. Synthetic unit hydrographs. *Transactions American Geophysical Union*, 19, 447-454.
- Taylor, A. B., and Schwarz, H. E., 1952. Unit hydrograph lag and peak flow related to basin characteristics. *Trans. Am. Geophys. Union*, 33 (2), 235–246.
- Tunas, I.G., 2017. Pengembangan Model Hidrograf Satuan Sintetik Berdasarkan Karakteristik Fraktal Daerah Aliran Sungai. Disertasi Program Doktor, Institut Teknologi Sepuluh November, Surabaya.
- Valdés, J.B., Fiallo, Y., and Rodríguez-Iturbe, I., 1979. A rainfall runoff analysis of the geomorphologic IUH. *Water Resources Research*, 15 (6), 1421–1434. doi:10.1029/WR015i006 p01421.
- Weibull, W., 1939. *The phenomenon of ruptures in solids*. Stockholm:General stabena Litografiska Anstalts Forlag, 153.
- Yue, S., Taha, B.M.J., Bobee, B., Legendre, P. and Bruneau, P., 2002. Approach for describing statistical properties of flood hydrograph. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(2), 147–153.