

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang Rekayasa Sipil

Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis dengan Cara ITB dan Beberapa Contoh Penerapannya

Dantje K. Natakusumah

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung 40132
E-mail: dkn@si.itb.ac.id

Waluyo Hatmoko

Pusat Penelitian dan Pengembangan Sumber Daya Air, Direktorat Jendral Sumber Daya Air
Kementrian Pekerjaan Umum, Jl. Ir. H. Djuanda 11, Bandung 40132
E-mail: whatmoko@yahoo.com

Dhemi Harlan

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan
Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung 40132
E-mail: dhemi170@yahoo.com

Abstract

Metode hidrograf satuan sintetis adalah metoda yang populer digunakan dan memainkan peranan penting dalam banyak perencanaan di bidang sumber daya air khususnya dalam analisis debit banjir DAS yang tidak terukur. Metode ini sederhana, karena hanya membutuhkan data-data karakteristik DAS seperti luas DAS dan panjang sungai dan dalam beberapa kasus dapat juga mencakup karakteristik lahan digunakan. Oleh karena itu, metode ini merupakan alat berguna untuk mensimulasikan aliran dari DAS tidak terukur dan daerah aliran sungai mengalami perubahan penggunaan lahan. Untuk mengembangkan hidrograf satuan sintetis, beberapa metoda telah tersedia. Beberapa metoda hidrograf satuan sinteteis seperti cara Nakayasu, Snyder-Alexeyev, SCS, dan GAMA-1 sangat populer dan umum digunakan di Indonesia untuk menghitung debit puncak dan bentuk hidrograf banjir. Makalah ini menyajikan suatu pendekatan sederhana untuk menentukan hidrograf satuan tak-berdimensi yang konsisten berdasarkan prinsip konservasi massa. Hidrograf satuan dapat dibuat dengan menggunakan satu fungsi tunggal sederhana (HSS ITB-1) atau menggunakan dua fungsi sederhana (HSS ITB-2) yang dikombinasikan dengan faktor debit puncak yang dapat disesuaikan secara otomatis berdasarkan rasio antara luas DAS dan luas hidrograf satuan yang dihitung secara numerik menggunakan prosedur tabulasi sederhana.

Kata-kata Kunci: Hidrograf Satuan Sintetis (HSS), HSS ITB-1 dan HSS ITB-2, hidrograf banjir, hidrologi.

Abstract

Synthetic unit hydrograph methods are popular and play an important role in many water resources design especially in the analysis of flood discharge of ungagged watersheds. These methods are simple, requiring only watershed characteristics such as area and river length and in some cases it may also include land use characteristics. Therefore, these methods serve as useful tools to simulate runoff from ungagged watersheds and watersheds undergoing land use change. To develop a synthetic unit hydrograph, several techniques are available. Several most popular unit hydrographs methods such as Nakayasu, Snyder-Alexeyev, SCS, and GAMA-1 are popular and commonly used in Indonesia for computing both peak discharge rate and the shape of flood hydrograph. This paper presents a simple approach for determining a consistent dimensionless unit hydrograph based on mass conservation principles. The unit hydrographs are synthesized by using either a simple single function (ITB-1) or using two simple functions (ITB-2) combined with an automatic adjustable peak rate factors based on the ratio between catchment area and area of unit hydrograph computed numerically using a simple tabulation procedure.

Keywords: Synthetic Unit hydrograph (SUH), ITB-1 SUH and ITB-2 SUH, flood hidrograf, hydrology.

1. Pendahuluan

Dalam perencanaan di bidang sumber daya air, seringkali diperlukan data debit banjir rencana yang realistis. Banjir rencana dengan periode ulang tertentu dapat dihitung dan data debit banjir atau data hujan. Apabila data debit banjir tersedia cukup panjang (>20 tahun), debit banjir dapat langsung dihitung dengan metode analisis probabilitas. Sedang apabila data yang tersedia hanya berupa data hujan dan karakteristik DAS, salah satu metoda yang disarankan adalah menghitung debit banjir dari data hujan maksimum harian rencana dengan superposisi hidrograf satuan (Subramanya, 1984; Harto, 1993; Ramirez, 2000).

Konsep hidrograf satuan, yang banyak digunakan untuk melakukan transformasi dari hujan menjadi debit aliran. Konsep ini diperkenalkan pada tahun 1932 oleh Sherman (Subramanya, 1984). Data yang diperlukan untuk menurunkan hidrograf satuan terukur di DAS yang ditinjau adalah data hujan otomatis dan pencatatan debit di titik pengamatan tertentu. Namun jika data hujan yang diperlukan untuk menyusun hidrograf satuan terukur tidak tersedia digunakan analisis hidrograf banjir sintetis.

Metoda hidrograf satuan sintetis yang saat ini umum digunakan di Indonesia antara lain adalah metoda Snyder-SCS, Snyder-Alexeyev, Nakayasu, GAMA-1, HSS- $\alpha\beta\gamma$ dan Limantara. Selain itu Program HEC-HMS (pengembangan dari program HEC-1) juga sangat umum digunakan. Metoda Snyder-SCS, Snyder-Alexeyev, Nakayasu dikembangkan diluar negeri, sedang metoda perhitungan hidrograf satuan sintetis yang pertama dikembangkan di Indonesia adalah metoda HSS Gama-1 yang dikembangkan di Universitas Gajah Mada (Harto, 1993). Selanjutnya dikembangkan metode HSS $\alpha\beta\gamma$ di Institut Teknologi 10 November (Lasidi et.al, 2003) dan HSS Limantara di Universitas Brawijaya (Lily, 2008).

Makalah ini membahas suatu prosedur umum perhitungan hidrograf satuan sintetis (HSS) untuk perhitungan hidrograf banjir. Prosedur yang diusulkan ini bersifat umum karena pada prinsipnya dapat digunakan untuk membentuk berbagai bentuk dasar hidrograf satuan sintetis.

Prosedur umum ini dikembangkan berdasarkan pengalaman penulis utama saat melakukan evaluasi terhadap hidrograf banjir rencana saat pengujian model fisik pelimpah bendungan Citepus dan bendungan Sadawarna dilakukan di Laboratorium Uji Model Fisik Hidrolika, FTSL ITB Tahun 2009 (Natakusumah, 2009) serta pengalamannya ketika mengajar kuliah Hidrologi di Jurusan Teknik Sipil ITB. Rangkuman penting dari pengalaman-pengalaman tersebut adalah sebagai berikut:

1. Akibat adanya kesalahan dalam berbagai tahapan perhitungan menyebabkan hasil perhitungan hidrograf banjir dimana yang tidak memenuhi prinsip konservasi masa, yaitu volume hidrograf banjir yang berbeda dengan volume hujan efektif. Kesalahan seperti ini seringkali tidak terdeteksi karena bentuk hidrograf yang dihasilkan seintas terlihat wajar dan tidak menunjukkan kesalahan dalam volume hidrograf.
2. Hidrograf banjir rencana yang dihasilkan oleh HSS dengan input data dan bentuk dasar HSS yang relatif sederhana, seringkali tidak terlalu berbeda jauh dengan HSS dengan input data dan bentuk dasar HSS yang relatif rumit. HSS dengan input data yang rumit sulit diterapkan pada daerah dengan data terbatas.
3. Dalam kuliah hidrologi selalu diajarkan prinsip konservasi massa yang berakibat volume hujan efektif satu satuan yang jatuh merata diseluruh DAS (V_{DAS}) harus sama volume hidrograf satuan sintetis (V_{HS}) dengan waktu puncak T_p . Namun dalam praktek cukup sulit untuk menunjukkan bagaimana prinsip ini diterapkan dalam berbagai rumus perhitungan hidrograf banjir dengan cara hidrograf satuan sintetis.

Untuk mengatasi permasalahan tersebut di atas, telah dikembangkan suatu prosedur umum penentuan hidrograf satuan sintetis (HSS) dengan input data relatif sederhana dan memenuhi hukum konservasi massa. Konsep awal prosedur umum tersebut pertama kali di publikasikan tahun 2009 dalam Seminar Nasional Teknik Sumber Daya Air di Bandung (Natakusumah, 2009).

Selanjutnya melalui program riset peningkatan kapasitas ITB 2010, prosedur umum tersebut telah diperbaiki dan hasilnya telah dipresentasikan dalam dua seminar nasional dan satu seminar internasional (Natakusumah et.al, 2010) untuk mendapat masukan dari peserta seminar. Makalah ini berisi rangkuman beberapa hasil penting yang telah dipresentasikan dalam seminar-seminar tersebut.

Mengingat makalah ini berisi hasil penelitian yang dibiayai dana riset peningkatan kapasitas ITB 2010, maka untuk memudahkan pembahasan selanjutnya, maka prosedur umum yang diusulkan diberi nama "Prosedur Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis dengan Cara ITB". Salah contoh penerapan prosedur umum yang diusulkan ini adalah dalam pengembangan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) yang selanjutnya diberi nama HSS ITB-1 dan HSS ITB-2.

2. Landasan Teori

Hidrograf aliran menggambarkan suatu distribusi waktu dari aliran (dalam hal ini debit) di sungai dalam suatu DAS pada suatu lokasi tertentu. Hidrograf aliran suatu DAS merupakan bagian penting yang diperlukan dalam berbagai perencanaan bidang Sumber Daya Air. Terdapat hubungan erat antara hidrograf dengan karakteristik suatu DAS, dimana hidrograf banjir dapat menunjukkan respon DAS terhadap masukan hujan tersebut.

2.1 Definisi dan asumsi

Menurut definisi hidrograf satuan sintetis adalah hidrograf limpasan langsung (tanpa aliran dasar) yang tercatat di ujung hilir DAS yang ditimbulkan oleh hujan efektif sebesar satu satuan (1 mm, 1 cm, atau 1 inchi) yang terjadi secara merata di seluruh DAS dengan intensitas tetap dalam suatu satuan waktu (misal 1 jam) tertentu (Subramanya, 1984; Ramirez, 2000, Triatmojo, 2008). Beberapa asumsi dalam penggunaan hidrograf satuan adalah sebagai berikut.

1. Hujan efektif mempunyai intensitas konstan selama durasi hujan efektif. Untuk memenuhi anggapan ini maka hujan deras untuk analisis adalah hujan dengan durasi singkat.
2. Hujan efektif terdistribusi secara merata pada seluruh DAS. Dengan anggapan ini maka hidrograf satuan tidak berlaku untuk DAS yang sangat luas, karena sulit untuk mendapatkan hujan merata di seluruh DAS.

2.2 Konsep hidrograf satuan

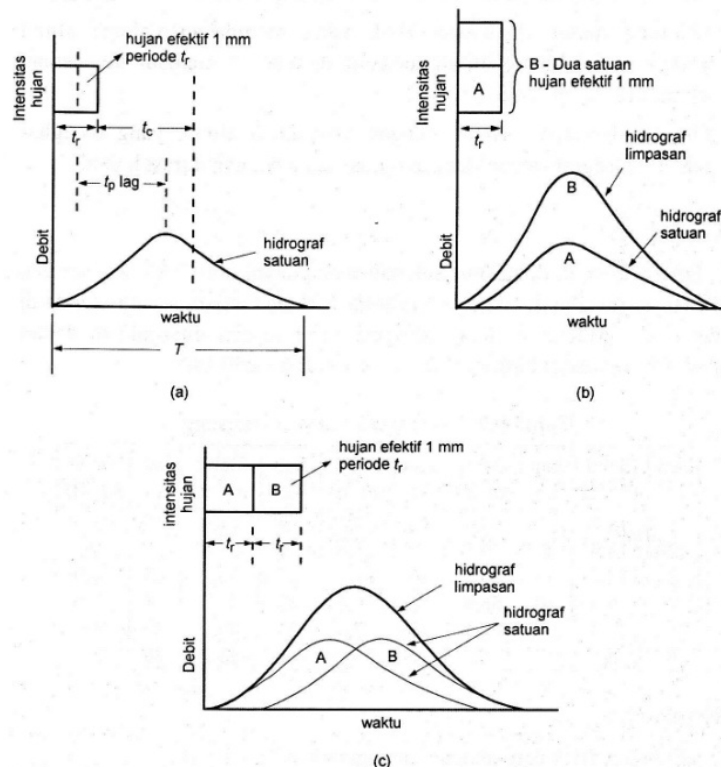
Karakteristik bentuk hidrograf yang merupakan dasar dari konsep hidrograf satuan ditunjukkan pada **Gambar 1**

Prinsip penting dalam penggunaan hidrograf satuan dapat sebagai berikut

- a. Lumped response: Hidrograf menggambarkan semua kombinasi dari karakteristik fisik DAS yang meliputi (bentuk, ukuran, kemiringan, sifat tanah) dan karakteristik hujan.
- b. Time Invariant: Hidrograf yang dihasilkan oleh hujan dengan durasi dan pola yang serupa memberikan bentuk dan waktu dasar yang serupa pula.
- c. Linear Response: Repons limpasan langsung dipermukaan (*direct runoff*) terhadap hujan efektif bersifat linear, sehingga dapat dilakukan superposisi hidrograf.

3. Cara Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis dengan Cara ITB

Untuk menganalisis hidrograf satuan sintetis pada suatu DAS dengan cara ITB perlu diketahui beberapa komponen penting pembentuk hidrograf satuan sintetis berikut 1) Tinggi dan Durasi Hujan Satuan, 2) Time Lag (T_L), Waktu Puncak (T_p) dan Waktu Dasar (T_b), 3) Bentuk Hidrograf Satuan dan 4) Debit Puncak Hidrograf Satuan



Gambar 1. Prinsip hidrograf satuan (Triatmojo, 2008)

3.1 Tinggi dan durasi hujan satuan

Tinggi hujan satuan yang umum digunakan adalah 1 inchi atau 1 mm. Durasi hujan satuan umumnya diambil $T_r = 1$ jam, namun dapat dipilih durasi lain asalkan dinyatakan dalam satuan jam (misal 0.5 jam, 10 menit = 1/6 jam). Jika durasi data hujan semula dinyatakan dalam 1 jam, jika diinginkan melakukan perhitungan dalam interval 0.5 jam, maka tinggi hujan setiap jam harus dibagi 2 dan didistribusikan dalam interval 0.5 jam.

3.2 Waktu puncak (T_p) dan waktu dasar (T_b)

Dari karakteristik fisik DAS dapat dihitung dua elemen-elemen penting yang akan menentukan bentuk dari hidrograf satuan itu yaitu 1) Time Lag (T_L), 2) Waktu puncak (T_p) dan waktu dasar (T_b). Selain parameter fisik terdapat pula parameter non-fisik yang digunakan untuk proses kalibrasi.

Saat ini ada banyak sekali rumus time lag yang telah dikembangkan oleh para peneliti baik di dalam maupun di luar negeri. Beberapa software seperti misalnya Program HEC-HMS (*Hydrology Modeling System*) membebaskan pengguna memilih rumusan time lag yang akan digunakan.

Prosedur umum ini juga direncanakan cukup fleksibel dalam mengadopsi rumusan time lag yang akan digunakan. Fleksibilitas seperti ini perlu diberikan karena sudah banyak hasil penelitian tentang time lag yang masih berjalan bahkan telah dipublikasikan.

Namun sejauh ini hasilnya tidak ada yang menunjukkan bahwa satu rumusan time lag sangat jauh lebih baik (superior) dibanding rumusan time lag yang lainnya. Karena itu semua rumus time lag seharusnya dapat digunakan sesuai dengan batasan yang dibuat oleh penyusunnya. Beberapa rumus time lag yang dapat digunakan antara dapat dilihat pada **Tabel 1**.

3.2.1 Time Lag (T_L)

Rumus standard untuk Time lag yang digunakan adalah penyederhanaan dari rumus Snyder sebagai berikut:

$$T_L = C_t 0.81225 L^{0.6} \tag{1}$$

dimana T_L = time lag (jam); C_t = koefisien waktu (untuk proses kalibrasi); L = panjang sungai (km).

Koefisien C_t diperlukan dalam proses kalibrasi harga T_p . Harga standar koefisien C_t adalah 1.0, jika T_p perhitungan lebih kecil dari T_p pengamatan, harga diambil $C_t > 1.0$ agar harga T_p membesar. Jika T_p perhitungan lebih besar dari T_p pengamatan, harga diambil $C_t < 1.0$ agar harga T_p akan mengecil. Proses ini diulang agar T_p perhitungan mendekati T_p pengamatan.

3.2.2 Waktu Puncak (T_p)

Waktu puncak T_p didefinisikan sebagai berikut

$$T_p = T_L + 0.50 T_r \tag{2}$$

Tabel 1. Berbagai rumusan time lag dan waktu puncak

Metoda	Time Lag	Waktu Puncak (Time to Peak)	Catatan
Kirpich	$T_c = 0.01947 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.835}} \right)$	$T_p = 2/3 T_c$	Untuk Cathment Kecil ($A < 2 \text{ km}^2$) T_c = Waktu Konsentrasi (Jam) L = Panjang Sungai (km) S = Kemiringan Sungai (m/m) T_p = Waktu Puncak (Jam)
Snyder	$T_L = (L L_c)^{0.3}$	$T_e = T_L / 5.5$ $T_p = \begin{cases} T_e \geq T_r \rightarrow T_p = t_p + 0.25 (T_r - T_e) \\ T_e < T_r \rightarrow T_p = t_p + 0.50 T_r \end{cases}$	T_L = time lag (Jam) L = Panjang Sungai (km) L_c = Jarak Titik Berat ke outlet (km) T_e = Durasi Hujan Efektif (Jam) S = Kemiringan Sungai (m/m) T_r = Satuan Durasi Hujan (jam) T_p = Waktu Puncak (Jam)
Nakayasu	$T_L = \begin{cases} 0.21 L^{0.7} & (L < 15 \text{ km}) \\ 0.527 + 0.058 L & (L \geq 15 \text{ km}) \end{cases}$	$T_p = 1.6 T_L$	T_L = time lag (Jam) L = Panjang Sungai (km) T_p = Waktu Puncak (Jam)
USGS	$T_L = 0.38 L^{0.62} S^{-0.31} (13 - BD)^{0.47}$	$T_p = T_L + 0.5 T_r$	T_L = time lag (Jam) L = Panjang Sungai (km) S = Kemiringan Sungai (m/m) T_r = Satuan Durasi Hujan (jam) T_p = Waktu Puncak (Jam) BD = Faktor Pengembangan DAS T_L = time lag (Jam)
SCS	$T_L = L^{0.8} \left(\frac{2540 - 22.86 CN}{14104 CN^{0.7} S^{0.5}} \right)$	$T_p = T_L + 0.5 T_r$	L = Panjang Sungai (km) S = Kemiringan Sungai (m/m) CN = Curve number (50 - 95) T_r = Satuan Durasi Hujan (jam) T_p = Waktu Puncak (Jam)

Rumusan waktu puncak yang lain dapat dilihat pada Tabel 1.

3.2.3 Waktu Dasar (Tb)

Untuk DAS kecil ($A < 2 \text{ km}^2$), menurut SCS harga Tb dihitung dengan

$$T_b = \frac{8}{3} T_p \quad (3)$$

Untuk DAS berukuran sedang dan besar harga secara teoritis Tb dapat berharga tak berhingga (sama dengan cara Nakayasu), namun prakteknya Tb dapat dibatasi sampai lengkung turun mendekati nol, atau dapat juga menggunakan harga berikut

$$T_b = (10 \text{ s/d } 20) * T_p \quad (4)$$

3.3 Bentuk dasar hidrograf satuan

Prosedur umum yang diusulkan dapat mengadopsi berbagai bentuk dasar HSS yang akan digunakan. Beberapa bentuk HSS yang dapat digunakan antara lain adalah SCS Triangular, SCS Cuvilinear, USGS Nationwide SUH, Delmarvara, Fungsi Gamma dan lain-lain.

Selain itu kami telah mengembangkan dua bentuk dasar HSS yang dapat digunakan yaitu bentuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 sebagai berikut :

- a. HSS ITB-1 memiliki persamaan lengkung naik dan lengkung turun seluruhnya yang dinyatakan dengan satu persamaan yang sama yaitu

$$q(t) = \exp\left\{2 - t - \frac{1}{t}\right\}^{\alpha C_p}$$

- b. HSS ITB-2 memiliki persamaan lengkung naik dan lengkung turun yang dinyatakan dengan dua persamaan yang berbeda yaitu

- 1. Lengkung naik ($0 \leq t \leq 1$) :

$$q(t) = t^\alpha \quad (6)$$

- 2. Lengkung turun ($t > 1 \text{ s/d } \infty$) :

$$q(t) = \exp\left\{1 - t^{\beta C_p}\right\} \quad (7)$$

dimana $t = T/T_p$ dan $q = Q/Q_p$ masing-masing adalah waktu dan debit yang telah dinormalkan sehingga $t = T/T_p$ berharga antara 0 dan 1, sedang $q = Q/Q_p$ berharga antara 0 dan ∞ (atau antara 0 dan 10 jika harga $T_b/T_p = 10$).

3.3.1 Koefisien α , β dan C_p

Jika sangat diperlukan harga koefisien α dan β dapat dirubah, namun untuk lebih memudahkan, proses kali-

brasi dapat dilakukan dengan merubah harga koefisien C_p . Harga standar koefisien C_p adalah 1.0, jika harga debit puncak perhitungan lebih kecil dari debit puncak pengamatan, maka harga diambil $C_p > 1.0$ ini akan membuat harga debit puncak membesar, sebaliknya jika debit puncak perhitungan lebih besar dari hasil pengamatan maka harga diambil $C_p < 1.0$ agar harga debit puncak mengecil.

3.4 Debit puncak hidrograf satuan

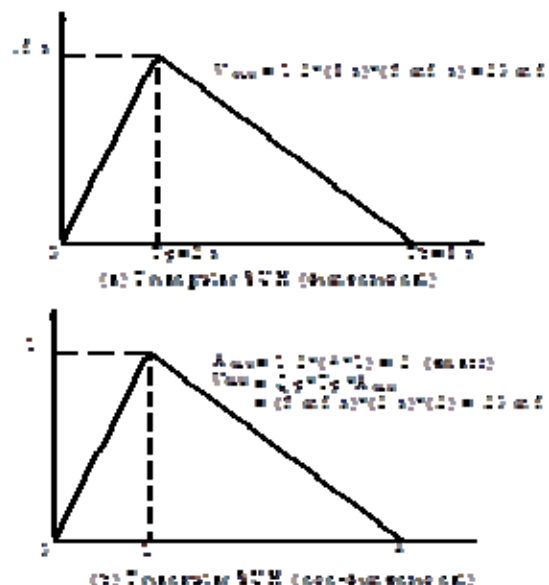
Sebelum membahas debit puncak hidrograf satuan, akan dijelaskan kesetaraan luas HSS dengan HSS yang telah dinormalkan. Hal ini berguna dalam menjelaskan penerapan prinsip konservasi mass dalam penurunan debit puncak hidrograf satuan.

3.4.1 Kesetaraan luas HSS dengan HSS yang telah dinormalkan

Untuk memudahkan penjelasan, tinjau suatu kurva hidrograf berbentuk segitiga yang terjadi akibat hujan efektif $R=1 \text{ mm}$ pada suatu DAS luas A_{DAS} . seperti ditunjukkan pada Gambar 2.a, Integrasi kurva di bawah kurva hidrograf sama dengan volume hidrograf satuan. Misalkan T_p adalah absis dan Q_p adalah ordinat titik puncak P.

Jika seluruh harga pada absis t (waktu) dinormalkan terhadap T_p dan seluruh harga ordinat Q (debit) dinormalkan terhadap Q_p , akan didapat suatu kurva hidrograf tak berdimensi (lihat Gambar 2.b). Luas bidang di bawah kurva yang telah dinormalkan dapat dihitung dari rumus luas segitiga sebagai berikut:

$$A_{HSS} = \frac{1}{2} * (4 * 1) = 2 \quad (\text{tanpa satuan})$$



Gambar 2. Kesetaraan Luas HSS SCS-Segitiga dengan HSS SCS-Segitiga Tak-Berdimensi

Volume hidrograf satuan V_{HSS} (memiliki dimensi m^3) dapat diperoleh dengan cara yang lebih mudah yaitu mengalikan A_{HSS} dengan Q_p dan T_p , atau

$$V_{HSS} = Q_p T_p A_{HSS} = (5 \text{ m}^3/\text{s}) \cdot (2\text{s}) \cdot (2) = 20 \text{ (m}^3)$$

Hasil tersebut dapat digeneralisasi untuk bentuk HSS yang lebih kompleks seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Jika hidrograf banjir dinormalkan dengan faktor Q_p dan T_p , maka volume HSS dapat dihitung dengan rumus

$$V_{HSS} = Q_p T_p A_{HSS} \quad (8)$$

Jika T_p (jam) dikonversi dalam detik, maka:

$$V_{HS} = A_{HSS} Q_p T_p 3600 \quad (\text{m}^3) \quad (9)$$

dimana A_{HSS} adalah luas HSS tak berdimensi yang dapat dihitung secara exact atau secara numerik.

Untuk hujan efektif $R=1$ mm pada suatu DAS luas A_{DAS} (km^2), maka volume hujan efektif satu satuan $R=1$ mm yang jatuh merata di seluruh DAS (V_{DAS}) dapat dinyatakan sebagai berikut

$$V_{DAS} = R \times A_{DAS} = 1000 A_{DAS} \quad (\text{m}^3) \quad (10)$$

3.4.2 Debit puncak hidrograf satuan sintetis

Dari definisi hidrograf satuan sintetis dan prinsip konservasi massa, dapat disimpulkan bahwa volume hujan efektif satu satuan yang jatuh merata di seluruh DAS (V_{DAS}) harus sama volume hidrograf satuan sintetis (V_{HS}) dengan waktu puncak T_p , atau $1000 A_{DAS} = A_{HSS} Q_p T_p 3600$ akibatnya

$$Q_p = \frac{R}{3.6 T_p} \frac{A_{DAS}}{A_{HSS}} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (11)$$

Dimana Q_p = Debit puncak hidrograf satuan (m^3/s), R = Curah hujan satuan (1 mm), T_p = Waktu puncak (jam), A_{DAS} = Luas DAS (km^2) dan A_{HSS} = Luas HSS tak berdimensi yang dapat dihitung secara exact atau secara numerik. Perbandingan rumusan HSS ITB, Snyder-Alexeyev, GAMA-1, Nakayasu, ditunjukkan pada **Tabel 2**. Dari lampiran tersebut terlihat bahwa rumus debit puncak pada cara ITB bentuknya jauh lebih sederhana namun bersifat lebih umum.

Penting untuk dicatat bahwa dengan prosedur perhitungan HSS dengan cara ITB yang kami usulkan, maka jika seandainya bentuk kurva dasar hidrograf yang digunakan adalah kurva Nakayasu atau kurva Snyder, maka debit puncak dan bentuk HSS yang dihasilkan dan juga hidrograf hasil superposisi untuk distribusi hujan tertentu akan sangat mendekati hasil perhitungan yang dilakukan dengan cara Nakayasu atau cara Snyder yang asli. Oleh karena itulah kami

menamakan prosedur perhitungan dengan cara ITB ini sebagai prosedur umum (general procedure), karena rumusannya memang berlaku umum.

4. Beberapa Contoh Penggunaan

Prosedur pembuatan hidrograf satuan sintetis yang dikembangkan dalam penelitian ini, selanjutnya akan digunakan untuk menentukan bentuk hidrograf banjir untuk Lima Kasus berikut

1. DAS Kecil dengan Bentuk HSS Segitiga
2. DAS Kecil dengan HSS ITB-1 dan ITB-2
3. DAS Cibatarua di lokasi Bendung Cibatarua
4. DAS Ciliwung Hulu di Bendung Katulampa
5. DAS Cipunagara di lokasi Waduk Sadawarna

4.1 DAS Kecil dihitung dengan HSS Segitiga

Dalam contoh ini akan ditunjukkan contoh penerapan cara perhitungan hidrograf satuan sintetis dengan cara ITB untuk suatu DAS kecil memiliki Luas DAS = 1.2 km^2 , $L=1575$ m, $S=0.001$ (m/m). Dalam contoh ini bentuk dasar hidrograf satuan yang digunakan adalah kurva hidrograf satuan SCS tak berdimensi yang dikembangkan oleh Soil conservation services di Amerika Serikat seperti ditunjukkan pada **Gambar 4**. Dalam contoh ini akan dihitung debit banjir akibat distribusi hujan efektif sebesar 10 mm, 70 mm dan 30 mm yang jatuh dengan interval waktu $\frac{1}{2}$ jam. Setelah hidrograf satuan sintetis diperoleh dan dilakukan superposisi untuk hujan efektif yang jatuh dan kemudian hidrograf hasil superposisi yang dihasilkan akan digambarkan. Akhirnya sebagai kontrol hasil perhitungan hidrograf hasil superposisi dihitung volumenya dan dibandingkan hasilnya dengan volume hujan efektif total yang jatuh.

Cara perhitungan hidrograf satuan dilakukan dengan cara sebagai berikut

- a) Hitung Time Peak (T_p) dan Time Base (T_b)
 1. Hitung Time Concentration (untuk penjelasan rumus Kirpich, (**Tabel 1**))

$$t_c = 0.01947 \left(\frac{L^{0.77}}{S^{0.835}} \right) = 0.01947 \left(\frac{1575^{0.77}}{0.001^{0.835}} \right)$$

$$= 80.58 \text{ menit} = 1.34 \text{ jam}$$
 2. Time Peak (T_p) dan Time Base (T_b)

$$T_p = \frac{2}{3} t_c = \frac{2}{3} 1.34 = 0.893 \text{ jam}$$

$$T_b = \frac{8}{3} t_p = \frac{8}{3} 0.893 = 2.382 \text{ jam}$$
- b) Perhitungan HSS SCS Segitiga berdimensi
 1. Hitung Luas HSS Tak-berdimensi: Bentuk HSS SCS segitiga dihitung secara exact.

$$A_{HSS} = \frac{1}{2}(q_p t_b)$$

$$= \frac{1}{2}(1 * 8/3) = 4/3 \leftarrow \text{Luas Exact}$$

2. Hitung Debit Puncak HSS (Berdimensi)

$$Q_p = \frac{1}{3.6 T_p} \frac{A_{DAS}}{A_{HSS}}$$

$$= \frac{1}{3.6(0.893)} \frac{1.2}{1.333} = 0.280 \text{ m}^3/\text{s}$$

3. Absis dan Ordinat HSS (berdimensi)

Jika harga absis dan ordinat HSS SCS tak berdimensi pada **Gambar 4**, dikalikan dengan harga T_p dan Q_p didapat HSS SCS berdimensi pada **Gambar 5**.

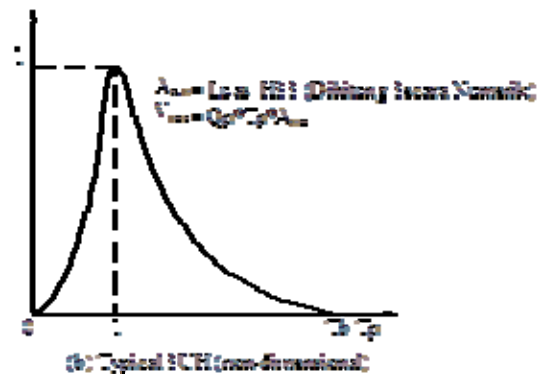
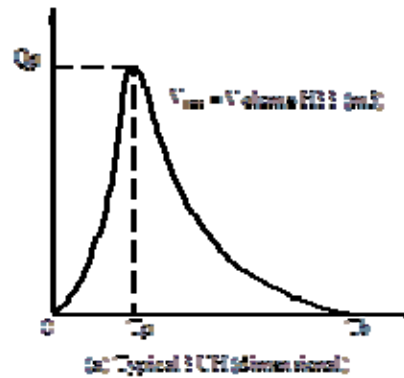
Harga ordinat HSS antara 0 dan T_p dan antara T_p dan T_b diperoleh dengan interpolasi linear, dan hasilnya ditunjukkan **Tabel 3**. Dari tabel tersebut terlihat bahwa volume hidrograf satuan adalah 1200 m^3 yang jika dibagi luas DAS dan dibagi 1000 (konversi m menjadi mm) didapat tinggi limpasan (Direct Run off) yang harganya sama dengan 1 mm (yaitu tinggi hujan efektif 1 satuan)

c) Superposisi HSS SCS Segitiga

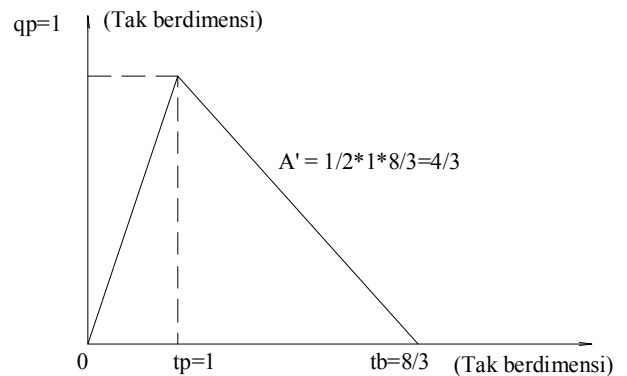
Proses superposisi HSS akibat hujan efektif sebesar 20 mm, 100 mm dan 40 mm (interval $\frac{1}{2}$ jam) ditunjukkan **Tabel 2**. Dalam tabel tersebut Rasio $DRO/R_{Eff} = 98.11\%$, tidak sama dengan 100%. Penyebabnya adalah karena harga T_p umumnya tidak merupakan kelipatan dari T_r , akibatnya debit puncak Q_p tidak diperhitungkan dalam proses superposisi hidrograf.

Tabel 2a. Superposisi HSS SCS Segitiga

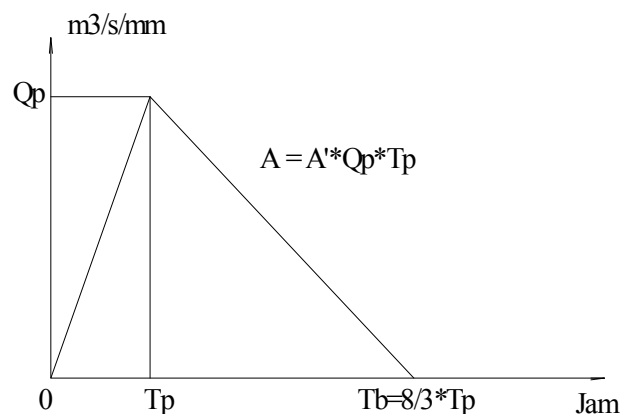
Waktu (Jam)	Q HSS (m^3/s)	Re (interval 1/2 Jam)			Total Hydro graf	Volume (m^3)
		0.5	1.0	1.5		
		10.0	70.0	30.0	110.0	
0.000	0.000	0.000			0.000	0.0
0.500	0.157	1.567	0.000		1.567	1,410.0
1.000	0.260	2.598	10.967	0.000	13.565	13,618.3
1.500	0.166	1.658	18.187	4.700	24.545	34,298.6
2.000	0.072	0.718	11.607	7.794	20.119	40,197.4
2.500	0.000	0.000	5.027	4.974	10.001	27,108.0
3.000			0.000	2.154	2.154	10,939.7
3.500				0.000	0.000	1,938.8
					Total Volum (m^3)	129,511
					Luas DAS (km^2)	1.200
					DRO (mm)	107.93
					DRO/Ref (%)	98.11%



Gambar 3. Kesetaraan volume HSS generik dengan HSS yang telah dinormalkan



Gambar 4. Bentuk dasar HSS SCS segitiga



Gambar 5. SCS Segitiga HSS berdimensi

d) Gambar hidrograf banjir

Jika masing-masing hidrograf banjir penyusun dan hasil akhir superposisi hidrograf banjir pada **Tabel 2** di atas digambarkan, maka didapat hasil seperti pada **Gambar 6**. Dari gambar tersebut terlihat bahwa, meskipun bentuk dasar hidrograf SCS-Segitiga relatif sederhana hidrograf banjir yang dihasilkan cukup baik.

4.2 DAS kecil dihitung dengan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2

Dalam contoh ini akan ditunjukkan contoh penerapan cara perhitungan hidrograf satuan sintetis dengan cara ITB untuk suatu DAS kecil pada contoh sebelumnya namun dengan menggunakan bentuk dasar HSS ITB-1 dan HSS ITB-2, kemudian mengambarkan hidrograf banjir hasil superposisi yang dihasilkan dan dan selanjutnya membandingkan hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dengan hidrograf banjir hasil superposisi HSS SCS Segitiga pada contoh terdahulu.

a. Perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2

Perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dilakukan dengan Spread Sheet dan hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 3** dan **Tabel 4** dengan penjelasan sebagai berikut:

Bagian I, berisi Input data yang diperlukan seperti Luas DAS, Panjang Sungai L dan lain-lain.

Bagian-II, berisi hasil perhitungan T_L , T_p dan T_b (karena ukuran DAS kecil maka digunakan cara Kirpurch)

Bagian-III berisi data-data C_p , Coef α dan β , A_{HSS} (jumlah kolom 4 bagian IV untuk menghitung Q_p), Volume Hujan (V_{DAS}) dan Tinggi Limpasan (DRO)

Bagian-IV terdiri dari kolom 1 sampai dengan kolom 6 untuk menghitung bentuk HSS ITB-1 atau HSS ITB-2, Luas A_{HSS} dan Volum V_{HSS} dengan penjelasan sebagai berikut:

1. Kolom Pertama: berisi waktu perhitungan dengan interval T_r (jam) termasuk di dalamnya waktu puncak T_p .
2. Kolom Kedua: (Kolom-1 dibagi T_p) berisi absis kurva HSS tak berdimensi ($t=T/T_p$), termasuk waktu puncak ($t=1$).
3. Kolom Ketiga merupakan ordinat HSS tak berdimensi didapat dari persamaan bentuk kurva HSS ITB-1 dan HSS ITB-2.
4. Kolom Keempat berisi luas segmen HSS tak berdimensi, termasuk segmen sebelum dan sesudah Q_p , dihitung dengan cara trapezium.

$$A_i = \frac{1}{2}(q_{i+1} + q_i)(t_{i+1} - t_i) \tag{9}$$

5. Jumlah seluruh Kolom Keempat adalah luas kurva HSS tak berdimensi.

$$A_{HSS} = \sum_{i=1}^N A_i \quad (\text{tanpa satuan}) \tag{10}$$

6. Setelah A_{HSS} diketahui, maka debit puncak hidrograf satuan dapat dinyatakan sebagai berikut (dihitung pada Bagian-III) :

$$Q_p = \frac{R}{3.6 T_p} \frac{A_{DAS}}{A_{HSS}} \quad (\text{m}^3/\text{sec}) \tag{11}$$

7. Kolom kelima berisi ordinat HSS berdimensi didapat dengan mengalikan ordinat kurva HSS dengan Q_p (Kolom-3 x Q_p), yaitu

$$Q_i = Q_p q_i \quad (\text{m}^3/\text{sec}) \tag{12}$$

8. Kolom keenam berisi luas segmen HSS berdimensi, termasuk segmen sebelum dan sesudah Q_p , dihitung dengan cara trapezium

$$V_i = \frac{3600}{2}(Q_i + Q_{i+1})(T_{i+1} - T_i) \quad (\text{m}^3) \tag{13}$$

9. Jumlah seluruh Kolom Keenam adalah luas kurva HSS berdimensi.

$$V_{HSS} = \sum_{i=1}^N V_i \quad (\text{m}^3) \tag{14}$$

10. Jika V_{DAS} volume hujan efektif satu satuan yang jatuh di DAS ($V_{DAS} = 1000 R A_{DAS}$), maka berdasarkan prinsip konservasi massa, volume hidrograf satuan harus sama dengan volume hujan efektif DAS ($V_{HSS} = V_{DAS}$).

11. Jika V_{HSS} dibagi Luas DAS ($A_{DAS} * 1000$) di dapat tinggi limpasan langsung H_{DRO} , yang nilainya harus sama dengan 1 mm (tinggi hujan satuan)

$$H_{DRO} = \frac{V_{HSS}}{A_{DAS} * 1000} = 1 \quad (\text{mm}) \tag{16}$$

b. Superposisi hidrograf

Dalam praktek proses superposisi hidrograf dapat dihi-tung dalam bentuk tabel seperti dapat mudah dijumpai dalam berbagai buku referensi. Dalam contoh kasus ini akan digunakan distribusi hujan hujan efektif dengan durasi ½ jam yang berurutan sebesar 20 mm, 100 mm dan 40 mm. Tabel superposisi hidrograf banjir yang disusun dengan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 ditunjukkan pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**. Sebagai indikator ketelitian hasil perhitungan digunakan prinsip konservasi masa,

yaitu volume hujan efektif yang jatuh dalam DAS harus sama dengan volume hidrograf banjir yang dihasilkan. Dalam tabel tersebut Rasio Limpasan/Hujan tidak sama dengan 100%. Penyebabnya adalah karena harga T_p umumnya tidak merupakan kelipatan dari T_r , akibatnya debit puncak Q_p tidak diperhitungkan dalam proses superposisi hidrograf.

c. Gambarkan bentuk hidrograf banjir

Hasil akhir berupa hidrograf banjir untuk $T_r = 0.5$ Jam seperti ditunjukkan pada **Gambar 7** dan sebagai pembandingan pada gambar tersebut ditunjukkan pula hasil superposisi HSS SCS-Segi Tiga. Selanjutnya pada **Gambar 8** ditunjukkan pula bentuk hidrograf hasil superposisi HSS ITB-1, ITB-2 dan SCS-Segi Tiga, untuk interval $T_r=0.125$ Jam. Dari kedua gambar tersebut terlihat bahwa hidrograf hasil superposisi HSS ITB-1, ITB-2 dan SCS-Segi Tiga menunjukkan kesesuaian yang baik dan untuk harga $T_r=0.125$ memberikan hasil yang lebih baik.

4.3 Hidrograf banjir DAS Cibatarua

Prosedur perhitungan HSS yang diusulkan selanjutnya akan digunakan untuk menentukan debit puncak dan bentuk hidrograf banjir DAS Cibatarua seperti ditunjukkan pada **Gambar 9**. Hidrograf banjir yang dihitung dengan cara ITB akan dibandingkan dengan hasil cara Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara dan GAMA-1 dan hasil program HEC-HMS.

a. Perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2

Perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dilakukan dengan Spread Sheet dan hasilnya ditunjukkan pada **Tabel 9** dan **Tabel 10** dengan penjelasan yang sama dengan pada contoh perhitungan DAS Kecil pada contoh terdahulu.

Dengan merujuk hasil pada **Tabel 9** dan **Tabel 10** tersebut, jika kolom kedua digunakan sebagai absis dan kolom ketiga sebagai ordinat didapat bentuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 tak-berdimensi untuk DAS Cibatarua seperti terlihat pada **Gambar 10**.

Jika kolom pertama digunakan sebagai absis dan kolom kelima sebagai ordinat didapat bentuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dan berdimensi untuk DAS Cibatarua seperti ditunjukkan pada **Gambar 11**

Sebagai perbandingan hasil pada **Gambar 12** ditunjukkan bentuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dibandingkan dengan HSS yang dihitung dengan cara Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara dan GAMA-1.

b. Superposisi hidrograf satuan sintetis

Dalam praktek proses superposisi hidrograf satuan menjadi hidrograf banjir dapat dihitung dalam bentuk tabel seperti yang dijumpai dalam berbagai buku referensi tentang hidrologi. Dalam contoh kasus ini akan digunakan distribusi hujan total, infiltrasi dan hujan efektif selama 6 jam seperti ditunjukkan pada **Tabel 8**.

Tabel 2b. Perbandingan rumusan hidrograf satuan sintetis Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara, GAMA-1 dan Cara ITB

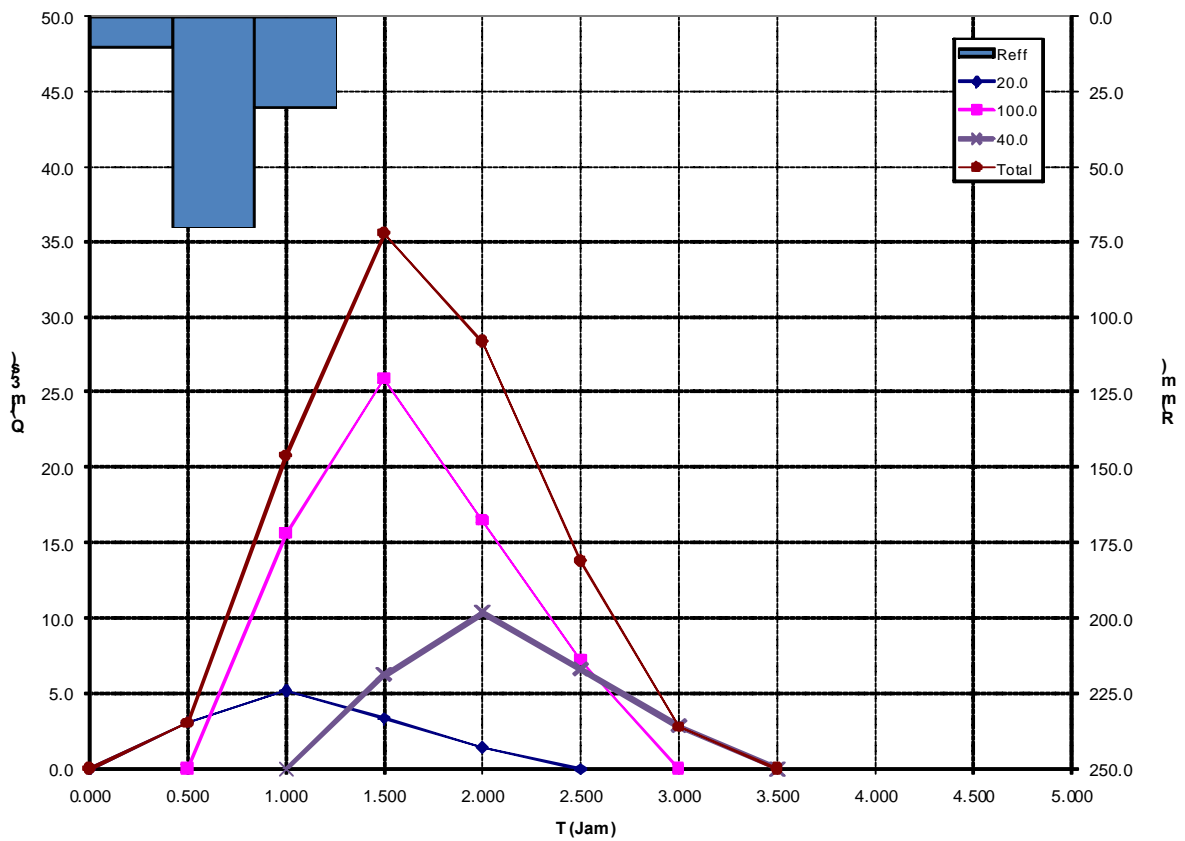
Parameter	Snyder-Alexeyev	Nakayasu	Limantara	GAMA-1	ITB
Input Fisk DAS	A = Luas DAS L = Panjang sungai terpanjang Lc = Panjang sungai ke pusat DAS	A = Luas DAS L = Panjang sungai	A = Luas DAS L = Panjang sungai Lc = Panjang sungai ke pusat DAS S = Kemiringan sungai n = Kekasaran	A = Luas DAS L = Panjang sungai S = Kemiringan sungai J1 = Jumlah sungai tingkat 1 Js = Jumlah sungai semua tingkat L1 = Panjang sungai tingkat 1 Ls = Panjang sungai semua tingkat WL = Lebar DAS pada 0.25 L WU = Lebar DAS pada 0.75 L AU = Luas DAS di hulu titik berat R = Curah Hujan Satuan	A = Luas DAS L = Panjang sungai
Input Non Fisik DAS	R = Curah Hujan Satuan Tr = Durasi hujan standar Cp = Coef Puncak (0.59-0.66) Ct = Coef Waktu (1-1.2)	R = Curah Hujan Satuan Cp = Coef Debit Puncak	R = Curah Hujan Satuan Cp = Coef Debit Puncak	R = Curah Hujan Satuan	R = Curah Hujan Satuan Tr = Durasi hujan standar Ct = Coef Kalibrasi Waktu
Debit Puncak	$Q_p = \frac{0.275 C_p A}{T_p}$ Cp = Coef Debit (Untuk kalibrasi)	$Q_p = \frac{C A R}{3.6(0.3T_p + 0.3)}$ Cp = Coef Debit (Kalibrasi)	$Q_p = 0.042 A^{0.461} L^{0.497} I_c^{0.356} S^{-0.131} n^{0.168}$	$Q_p = 0.1836 A^{0.5886} T_p^{-0.4008} JN^{-0.2381}$	$Q_p = \frac{R A_{DAS}}{3.6 T_p A_{HSS}}$
Time Lag tp	$t_p = Ct(L L_c)^n$ Cp = Coef Waktu (Untuk kalibrasi) n = 0.2-0.3	$T_g = 0.21 L^{0.7} (L < 15 \text{ km})$ $T_g = 0.4 + 0.058 L (L > 15 \text{ km})$	$T_g = 0.21 L^{0.7} (L < 15 \text{ km})$ $T_g = 0.4 + 0.058 L (L > 15 \text{ km})$	$T_p = 0.43 \left(\frac{L}{100F}\right)^3 + 1.0665SIM + 1.2775$	$t_p = Ct 0.81225 L^{0.6}$ Ct = Coef Waktu (Untuk kalibrasi)
Hujan efektif	$t_e = \frac{t_p}{5.5}$	Tidak dirumuskan	Tidak dirumuskan	Tidak dirumuskan	Dapat juga menggunakan rumus time lag yang ada dalam literatur, (lihat Tabel) Tidak dirumuskan, kecuali jika Time Lag dihitung dengan cara Snyder.
Waktu Puncak Tp	$t_e > T_r \rightarrow T_p = t_p + 0.25(T_r - t_e)$ $t_e < T_r \rightarrow T_p = t_p + 0.50 T_r$	$T_r = 0.75 T_g$ $T_{0.8} = 0.8 T_r$ $T_p = T_g + 0.8 T_r$	$T_r = 0.75 T_g$ $T_{0.8} = 0.8 T_r$ $T_p = T_g + 0.8 T_r$	$T_p = 0.43 \left(\frac{L}{100F}\right)^3 + 1.0665SIM + 1.2775$	$T_p = t_p + 0.50 T_r$ Dapat juga menggunakan rumus time to peak yang ada dalam literatur, (lihat Tabel 1)
Time Base	$T_b = 5.0(T_p + \frac{T_r}{2})$	$T_b = \infty$	$T_b = \infty$	$T_b = 27.4132 T_p^{0.1457} S^{-0.09865} N^{0.7344} RUA^{0.2574}$	$T_b = \infty$ Catatan : Prakteknya T_b dibatasi sampai harga dimana lengkung turun mendekati nol. (misal $T_b/T_p=100$)
Sifat Kurva	Kurva tunggal berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva majemuk (4 kurva) berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva ganda berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva ganda berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva tunggal atau kurva ganda yang berubah terhadap karakteristik DAS
Koef Resesi	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS	$K = 0.5617 A^{0.1798} S^{-0.1446} SF^{-1.0897} D^{0.0452}$	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS

Tabel 2c. Perbandingan rumusan hidrograf satuan sintetis Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara, GAMA-1 dan Cara ITB

Parameter	Snyder-Alexeyev	Nakayasu	Limantara	GAMA-1	ITB
Input Fisk DAS	A = Luas DAS L = Panjang sungai terpanjang Lc = Panjang sungai ke pusat DAS	A = Luas DAS L = Panjang sungai	A = Luas DAS L = Panjang sungai Lc = Panjang sungai ke pusat DAS S = Kemiringan sungai n = Kekasaran	A = Luas DAS L = Panjang sungai S = Kemiringan sungai J1 = Jumlah sungai tingkat 1 Js = Jumlah sungai semua tingkat L1 = Panjang sungai tingkat 1 Ls = Panjang sungai semua tingkat WL = Lebar DAS pada 0.25 L WU = Lebar DAS pada 0.75 L AU = Luas DAS di hulu titik berat R = Curah Hujan Satuan	A = Luas DAS L = Panjang sungai
Input Non Fisk DAS	R = Curah Hujan Satuan Tr = Durasi hujan standar Cp = Coef Puncak (0.59-0.66) Ct = Coef Waktu (1-1.2)	R = Curah Hujan Satuan Cp = Coef Debit Puncak	R = Curah Hujan Satuan Cp = Coef Debit Puncak	R = Curah Hujan Satuan	R = Curah Hujan Satuan Tr = Durasi hujan standar Ct = Coef Kalibrasi Waktu
Debit Puncak	$Qp = \frac{0.275 C_p A}{T_p}$ Cp = Coef Debit (Untuk kalibrasi)	$Qp = \frac{CAR}{3.6(0.3T_p + 0.3)}$ Cp = Coef Debit (Kalibrasi)	$Qp = 0.042 \cdot A^{0.451} \cdot L^{0.497} \cdot I_c^{0.356} \cdot S^{0.131} \cdot n^{0.168}$	$Qp = 0.1836 A^{0.5886} T_p^{-0.4008} J_N^{-0.2381}$	$Qp = \frac{R \cdot A_{DAS}}{3.6 T_p A_{HSS}}$
Time Lag tp	$t_p = Ct(Lc)^n$ Cp = Coef Waktu (Untuk kalibrasi) n = 0.2-0.3	$T_g = 0.21 L^{0.7} \quad (L < 15 \text{ km})$ $T_g = 0.4 + 0.058 L \quad (L > 15 \text{ km})$	$T_g = 0.21 L^{0.7} \quad (L < 15 \text{ km})$ $T_g = 0.4 + 0.058 L \quad (L > 15 \text{ km})$	$Tp = 0.43 \left(\frac{L}{100F}\right)^3 + 1.0665 SIM + 1.2775$	$t_p = Ct \cdot 0.81225 L^{0.6}$ Ct = Coef Waktu (Untuk kalibrasi) Dapat juga menggunakan rumus time lag yang ada dalam literatur, (lihat Tabel)
Hujan efektif	$t_e = \frac{t_p}{5.5}$	Tidak dirumuskan	Tidak dirumuskan	Tidak dirumuskan	Tidak dirumuskan, kecuali jika Time Lag dihitung dengan cara Snyder. Tp = tp + 0.50 Tr
Waktu Puncak Tp	$t_e > Tr \rightarrow Tp = t_p + 0.25(Tr - t_e)$ $t_e < Tr \rightarrow Tp = t_p + 0.50 Tr$	Tr = 0.75 Tg T0.8 = 0.8 Tr Tp = Tg + 0.8 Tr	Tr = 0.75 Tg T0.8 = 0.8 Tr Tp = Tg + 0.8 Tr	$Tp = 0.43 \left(\frac{L}{100F}\right)^3 + 1.0665 SIM + 1.2775$	Dapat juga menggunakan rumus time to peak yang ada dalam literatur, (lihat Tabel 1)
Time Base	$Tb = 5.0(Tp + \frac{Tr}{2})$	Tb = ∞	Tb = ∞	$Tb = 27.4132 T_p^{0.1457} S^{-0.0986} n^{0.7344} RUA^{0.2574}$	Tb = ∞ Catatan : Praktiknya Tb dibatasi sampai harga dimana lengkung turun mendekati nol. (misal Tb/Tp = 100)
Sifat Kurva	Kurva tunggal berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva majemuk (4 kurva) berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva ganda berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva ganda berubah terhadap karakteristik DAS	Kurva tunggal atau kurva ganda yang berubah terhadap karakteristik DAS
Koef Resesi	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS	$K = 0.5617 A^{0.1798} S^{-0.1446} SF^{-1.0897} D^{0.0452}$	Tidak dinyatakan secara eksplisit tapi mengikuti bentuk kurva HSS

Tabel 2d. Perbandingan rumusan hidrograf satuan sintetis Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara, GAMA-1 dan Cara ITB (lanjutan)

Parameter	Snyder-Alexeyev	Nakayasu	Limantara	GAMA-1	ITB
Bentuk Kurva	Kurva Tunggal	Kurva Majemuk (4 Kurva)	Kurva Ganda	Kurva Ganda	Kurva Tunggal atau Ganda
	$(0 \leq t \leq T_b)$ $Q = Q_p 10^{-a \left[\frac{(1-t)^2}{t} \right]}$ dimana $\lambda = \frac{(Q_p T_p)}{(hA)}$ $a = 1.32\lambda + 0.15\lambda + 0.045$ Catatan : $t = T/T_p$ (tak berdimensi)	1) $(0 \leq t \leq T_p)$ $Q_a = Q_p \left(\frac{1-t}{T_p} \right)^{2.4}$ 2) $(T_p \leq t \leq T_p + T_{0.3})$ $Q_{0.1} = Q_p \cdot 0.3 \left(\frac{1-t}{T_{0.3}} \right)$ 3) $(T_p + T_{0.3} \leq t \leq T_p + 1.5 T_{0.3})$ $Q_{0.2} = Q_p \cdot 0.3 \left(\frac{1-t+0.5}{1.5 T_{0.3}} \right)$ 4) $(t \geq T_p + 1.5 T_{0.3})$ $Q_{0.3} = Q_p \cdot 0.3 \left(\frac{1-t+1.5 T_{0.3}}{2 T_{0.3}} \right)$ Catatan : T = waktu (jam)	1) Lengkung naik $(0 \leq T \leq T_p)$ $Q = Q_p [(T/T_p)]^{1.107}$ 2) Lengkung Turun $(T_p \leq T \leq T_b)$ $Q = Q_p 10^{0.173(T_p - T)}$ Catatan : t = waktu (jam)	1) Lengkung naik $(0 \leq T \leq T_p)$ $Q = Q_p T$ 2) Lengkung Turun $(T_p \leq T \leq T_b)$ $Q = Q_p e^{-T/K}$ Catatan : t = waktu (jam)	1) Kurva tunggal HSS ITB-1 $q(t) = [2 - t - 1/t]^{0.5 C_p} \quad (t \geq 0)$ 2) Atau kurva ganda HSS ITB-2 $q(t) = t^{-\alpha} \quad (0 \leq t \leq 1)$ $q(t) = \exp(1 - t^{\beta C_p}) \quad (t \geq 1)$ Catatan : 1) $t = T/T_p$ (tak berdimensi) 2) $q = Q/Q_p$ (tak berdimensi) 3) Cp = Coef Kalibrasi Qp (0.3-1.5)



Gambar 6. Hidrograf hasil superposisi HSS

Tabel 3a. HSS SCS Segitiga tak berdimensi dan HSS SCS Berdimensi

T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi		Keterangan
	$t=T/T_p$	$q=Q/Q_p$	A	$Q=q \times Q_p$	$V(m^3)$	
0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	141.000	
0.500	0.560	0.560	0.157	0.157	309.000	
0.893	1.000	1.000	0.343	0.280	103.715	T_p
1.000	1.120	0.928	0.115	0.260	383.057	
1.500	1.679	0.592	0.426	0.166	213.857	
2.000	2.239	0.257	0.238	0.072	49.371	
2.382	2.667	0.000	0.055	0.000	0.000	$T_b = 8/3 T_p$
2.500	2.799	0.000	0.000	0.000	0.000	
		A_{HSS}	1.333	$Vol (m^3)$	1200	

Tabel 3b. Perhitungan HSS ITB-1

I. Karakteristik DAS dan Hujan					
1. Nama Sungai	=				Kecil
2. Luas daerah aliran Sungai (A_{DAS})	=		1.200		Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=		1.570		Km
4. Kemiringan Sungai (S)			0.001		
5. Tinggi Hujan (R)	=		1.000		mm
6. Durasi Hujan (Tr)	=		0.500		Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (Tp) Dan Waktu Dasar (Tb)					
1. Koefisien waktu (C_t)	=		1.00		
2. Time Lag (t_p)					
$T_L = 0.01947*(L*1000)^{0.77}/(S^{0.385})$	=		80.391		Menit
			1.340		Jam
3. Waktu Puncak					
$T_p = 2/3 T_L$	=		0.893		Jam
4. Waktu Dasar					
T_B/T_p	=		2.667		(Ratio T_B/T_p)
T_B	=		2.382		Jam
III. Debit Puncak (QP)					
1. Cp. Koefisien Puncak (C_p)	=		1.000		
2. Alpha	=		1.500		
3. Luas HSS (Bag-IV, Jumlah kolom-4)	=		1.481		
4. $Q_p = 1/(3.6*T_p)*(A_{DAS}/A_{HSS})$	=		0.252		m ³ /s
5. Volume Hujan ($V_{DAS} = R*A_{DAS}*1000$)	=		1,200		m ³
6. V_{HSS} (Bag IV, jumlah kolom-6)	=		1,200		m ³
7. $DRO = V_{HSS}/A_{DAS}/1000$	=		1.000		mm
IV. Perhitungan HSS ITB-1 :					
T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	$t=T/T_p$	$q=Q/Q_p$	A	$Q=q \times Q_p$	V(m ³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.500	0.55976	0.59491	0.16650	0.14987	134.87860
0.893	1.00000	1.00000	0.35107	0.25191	284.38905
1.000	1.11953	0.98104	0.11839	0.24714	95.90541
1.500	1.67929	0.66221	0.45992	0.16682	372.56261
2.000	2.23905	0.35754	0.28541	0.09007	231.20150
2.500	2.79881	0.00000	0.10007	0.00000	81.06283
3.000	3.35858	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3.500	3.91834	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4.000	4.47810	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4.500	5.03786	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5.000	5.59763	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
		Luas H.S	1.4813597	Volume (m ³)	1200.000
				DRO (mm)	1.000

Tabel 4. Perhitungan HSS ITB-2

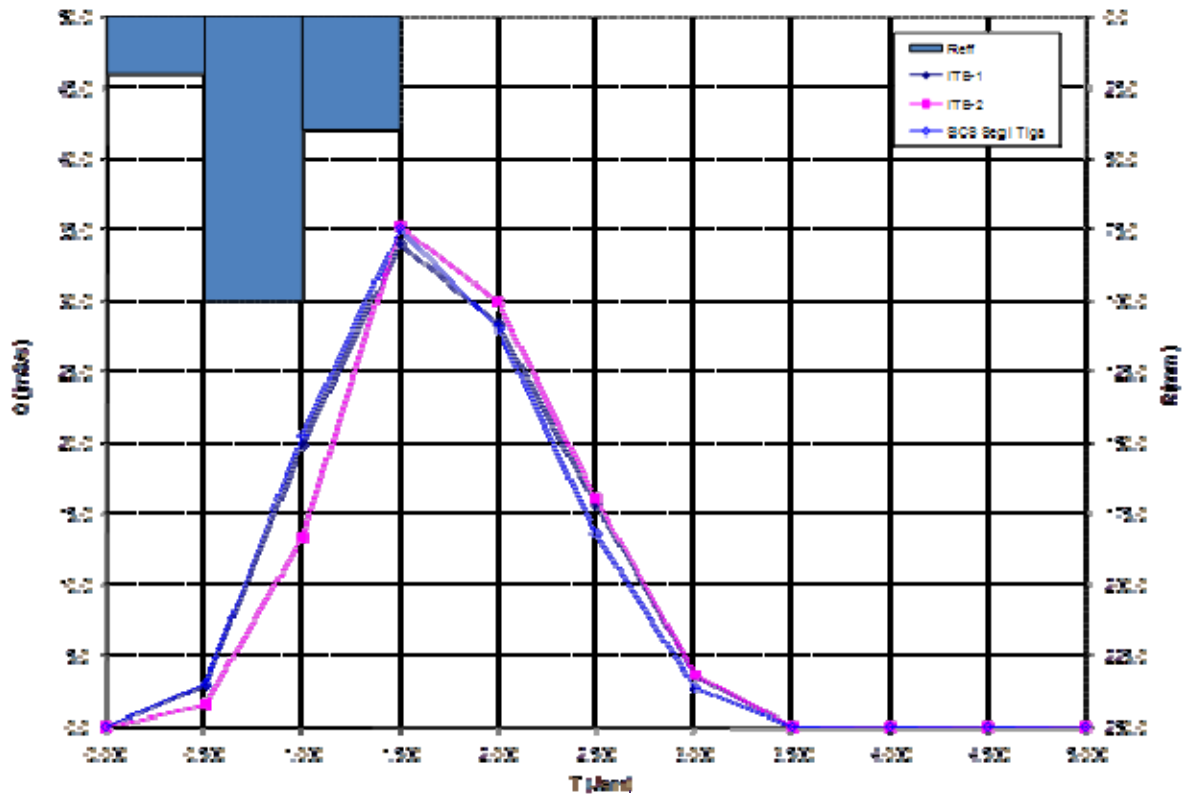
I. Karakteristik DAS dan Hujan					
1. Nama Sungai	=				Kecil
2. Luas daerah aliran Sungai (A_{DAS})	=			1.200	Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=			1.570	Km
4. Kemiringan Sungai (S)	=			0.001	
5. Tinggi Hujan (R)	=			1.000	mm
6. Durasi Hujan (Tr)	=			0.500	Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (Tp) Dan Waktu Dasar (Tb)					
1. Koefisien waktu (C_t)	=			1.00	
2. Time Lag (t_p)					
$T_L = 0.01947 * (L * 1000)^{0.77} / (S^{0.385})$	=			80.391	Menit
				1.340	Jam
3. Waktu Puncak					
$T_p = 2/3 T_L$	=			0.893	Jam
4. Waktu Dasar					
T_B / T_p	=			2.667	(Ratio T_B / T_p)
T_B	=			2.382	Jam
III. Debit Puncak (QP)					
1. Cp. Koefisien Puncak (C_p)	=			1.000	
2. Alpha	=			2.500	
3. Betha	=			1.000	
4. Luas HSS (lihat Bag-IV, Jumlah Kol-4)	=			1.144	
5. $Q_p = 1 / (3.6 * T_p) * (A_{DAS} / A_{HSS})$	=			0.326	m ³ /s
6. Volume Hujan ($V_{DAS} = R * A_{DAS} * 1000$)	=			1,200	m ³
7. V_{HSS} (Bag IV, Jumlah kolom-6)	=			1,200	m ³
8. $DRO = V_{HSS} / A_{DAS} / 1000$	=			1.000	mm
IV. Perhitungan HSS ITB-2 :					
T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	$t = T / T_p$	$q = Q / Q_p$	A	$Q = q * Q_p$	V (m ³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
0.500	0.55976	0.23443	0.06561	0.07644	68.79955
0.893	1.00000	1.00000	0.27172	0.32609	284.92135
1.000	1.11953	0.88734	0.11279	0.28935	118.27196
1.500	1.67929	0.50698	0.39024	0.16532	409.20265
2.000	2.23905	0.28966	0.22296	0.09445	233.79577
2.500	2.79881	0.00000	0.08107	0.00000	85.00871
3.000	3.35858	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3.500	3.91834	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4.000	4.47810	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
4.500	5.03786	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
5.000	5.59763	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
		Luas HSS	1.1444031	Volume (m ³)	1200.000
				DRO (mm)	1.000

Tabel 5. Superposisi HSS ITB-1

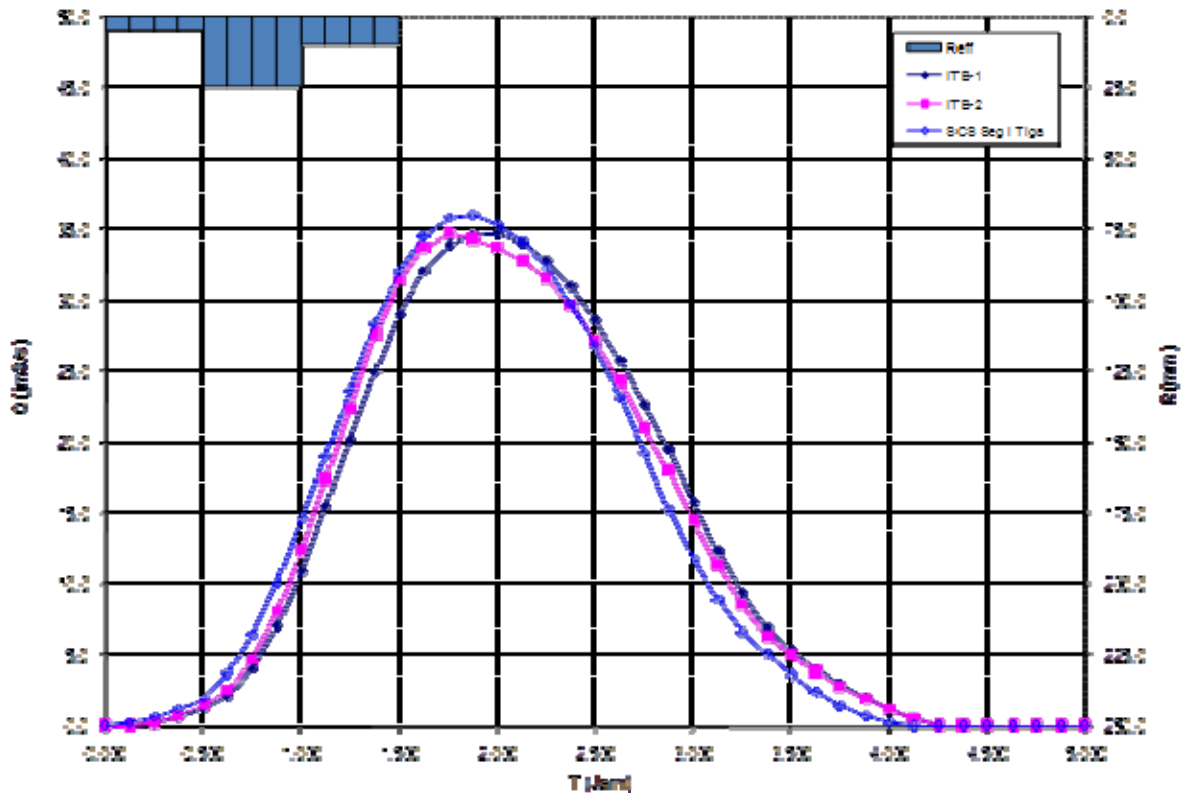
Waktu (jam)	HSS ITB-1	Tinggi Hujan (mm/jam)			Hidrograf total	Volume Limpasan
		0.50 20.000	1.00 100.00	1.50 40.000		
0.000	0.0000	0.000			0.000	0.00
0.500	0.1499	2.997	0.000		2.997	2697.57
1.000	0.2471	4.943	14.987	0.000	19.929	20633.91
1.500	0.1668	3.336	24.714	5.995	34.045	48576.65
2.000	0.0901	1.801	16.682	9.886	28.369	56172.39
2.500	0.0000	0.000	9.007	6.673	15.680	39643.91
3.000	0.0000	0.000	0.000	3.603	3.603	17354.34
3.500	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	3242.51
4.000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
4.500	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
5.000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
		Volum Limpasan			m ³	1.88E+05
		Luas DAS			km ²	1.20
		Limpasan (DRO)			mm	156.93
		Rasio Limpasan/Hujan			%	98.08%

Tabel 6. Superposisi HSS ITB-2

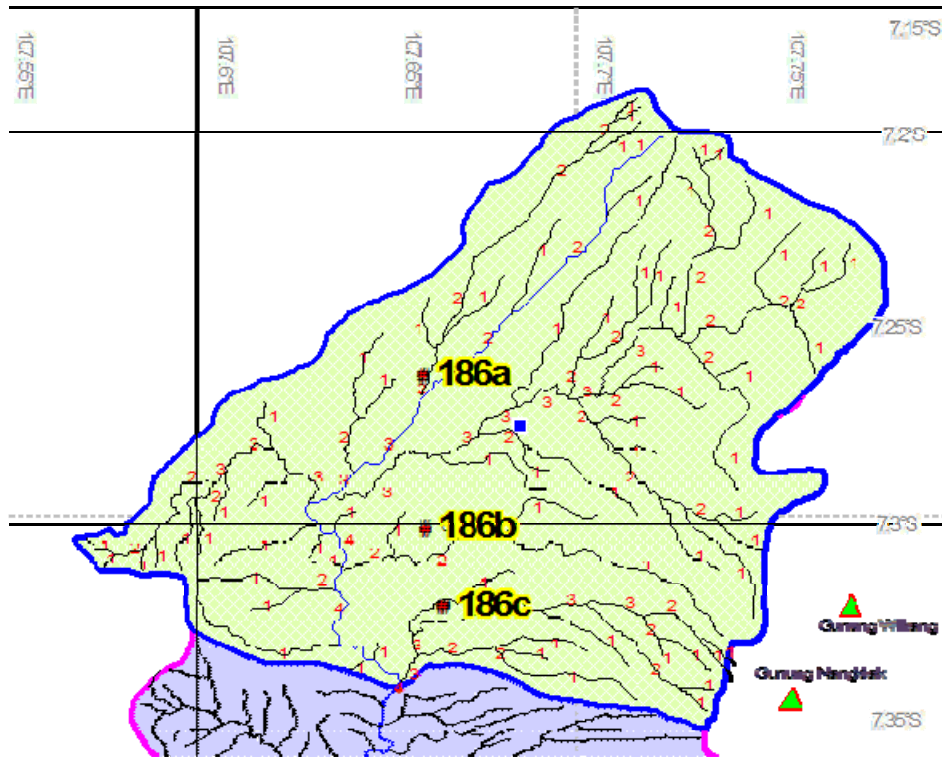
Waktu (jam)	HSS ITB-2	Tinggi Hujan (mm/jam)			Hujan Total	Volume Limpasan
		1.00 20.000	2.00 100.00	3.00 40.000		
0.000	0.0000	0.000			0.000	0.00
0.500	0.0764	1.529	0.000		1.529	1375.99
1.000	0.2894	5.787	7.644	0.000	13.431	13464.26
1.500	0.1653	3.306	28.935	3.058	35.299	43857.55
2.000	0.0945	1.889	16.532	11.574	29.995	58764.79
2.500	0.0000	0.000	9.445	6.613	16.058	41447.86
3.000	0.0000	0.000	0.000	3.778	3.778	17852.70
3.500	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	3400.35
4.000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
4.500	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
5.000	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.00
		Volum Limpasan			m ³	1.80E+05
		Luas DAS			km ²	1.20
		Limpasan (DRO)			mm	150.14
		Rasio Limpasan/Hujan			%	93.84%



Gambar 7. Hasil superposisi HSS SCS-Segitiga HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 ($T_r = 0.5$ jam)



Gambar 8. Hasil superposisi HSS SCS-Segitiga HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 ($T_r = 0.125$ Jam)



Gambar 9. DAS Cibatarua (PT. Aztindo Rekaperdana, 2009)

Tabel 8. Distribusi Hujan Efektif DAS Cibatarua

Time	Reff (mm)	Inf (mm)	Total
1.000	55.400	89.267	178.534
2.000	16.100	23.202	46.405
3.000	11.700	16.276	32.552
4.000	9.200	12.957	25.914
5.000	7.200	10.942	21.884
6.000	5.700	9.564	19.129

Tabel superposisi HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 akibat hujan efektif pada **Tabel 8** ditunjukkan pada **Tabel 9** dan **Tabel 10** Indikator ketelitian hasil dinilai dari rasio tinggi limpasan dan tinggi hujan efektif. Dalam contoh ini rasio untuk hasil HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 masing-masing 99.94% dan 99.03% (lihat resume di ujung bawah kolom 6)

Pada **Gambar 13** ditunjukkan perbandingan hasil hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-1 (*time lag Cara Snyder*) dan hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-2 (*time lag Cara Nakayasu*) dengan hidrograf banjir hasil superposisi HSS Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara, GAMA-1 dan program HEC-HMS.

Dari **Gambar 13** terlihat bahwa hidrograf banjir hasil dengan HSS ITB-1 ternyata sangat mendekati hasil Cara Snyder-Alexeyev (Dalam kasus ini untuk HSS Snyder-Alexeyev harga $C_p = 0.62$), padahal cara Snyder-Alexeyev memiliki persamaan kurva tunggal yang lebih kompleks.

Pada **Gambar 13** terlihat hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-2 sangat mendekati bentuk hidrograf hasil Cara Nakayasu (dalam kasus ini untuk HSS Nakayasu harga $\alpha=1.70$), padahal cara Nakayasu terdiri dari empat kurva lengkung yang digabung menjadi satu (lihat **Tabel 1**) sedang kurva HSS ITB hanya terdiri dari dua kurva.

Hasil ini menunjukkan bahwa hidrograf banjir yang didapat dari metoda dengan bentuk kurva dasar yang relatif kompleks ternyata tidak berbeda jauh dengan hidrograf banjir yang didapat dengan kurva dasar yang jauh lebih sederhana.

Selanjutnya pada **Gambar 14** ditunjukkan hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-1 (*time lag* dihitung dengan cara Nakayasu) dan hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-2 (*time lag Cara Snyder*) dibandingkan dengan hidrograf banjir hasil superposisi dengan cara HSS Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara, GAMA-1 dan hasil program HEC-HMS.

Dari **Gambar 14** terlihat bahwa hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-1 ternyata mendekati bentuk hidrograf hasil Cara Nakayasu sedang hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-2 mendekati bentuk hidrograf hasil Cara Snyder.

Tabel 9. Tabel perhitungan HSS ITB-1 untuk DAS Cibatarua

I. Karakteristik DAS dan Hujan			
1. Nama Sungai	=	Cibatarua	
2. Luas daerah aliran sungai (A_{DAS})	=	56.92	Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=	12.15	Km
4 Tinggi Hujan Satun (R)	=	1.00	mm
5. Durasi Hujan Satuan (Tr)	=	1.00	Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (Tp) dan Waktu Dasar (Tb)			
1. Koefisien waktu (C_t)	=	1.00	
2. Time Lag à Snyder			
$LC = 0.5 * L$	=	6.075	km
$TL = C_t(LxLC)^n$	=	3.634	Jam
$Te = tp/5.5$	=	0.661	Jam
$TP = TL+0.25(Tr-Te) \text{ à } Te > Tr$	=	4.134	Jam
$TP = TL+0.50Tr \text{ à } Te < Tr$	=		
3. Waktu Puncak			
$Tp =$	=	4.134	Jam
4. Waktu Dasar			
T_B/T_P	=	10	(Ratio T_B/T_P)
T_B	=	41.34	Jam
III. Debit Puncak (QP)			
1. Cp. Koefisien Puncak (C_p)	=	1.000	
2. Alpha	=	1.500	
3. Luas A_{HSS} (Bag-IV, Jumlah Kol-4)	=	1.613	
4. $Qp=1/(3.6*Tp)*(A_{DAS}/A_{HSS})$	=	2.370	m ³ /s
5. Volume Hujan ($V_{DAS}=R*A_{DAS}*1000$)	=	56,920	m ³
6. V_{HSS} (Bag IV, Jumlah Kolom-6)	=	56,920	m ³
7. $DRO=V_{HSS}/A_{DAS}/1000$	=	1.000	mm

IV. Perhitungan HSS ITB-1 :

T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	t=T/Tp	q=Q/Qp	A	Q(m ³ /s)	V(m ³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
1.00	0.24187	0.02831	0.00342	0.06711	120.7954
2.00	0.48374	0.43760	0.05635	1.03725	1987.8489
3.00	0.72561	0.85587	0.15643	2.02866	5518.6460
4.00	0.96748	0.99836	0.22424	2.36641	7911.1317
4.13	1.00000	1.00000	0.03249	2.37029	1146.1919
5.00	1.20936	0.94709	0.20382	2.24488	7190.5209
6.00	1.45123	0.81022	0.21252	1.92046	7497.6064
7.00	1.69310	0.65338	0.17700	1.54870	6244.4931
8.00	1.93497	0.50780	0.14043	1.20364	4954.2235
9.00	2.17684	0.38507	0.10798	0.91273	3809.4690
10.00	2.41871	0.28701	0.08128	0.68030	2867.4530
11.00	2.66058	0.21126	0.06026	0.50075	2125.8966
12.00	2.90245	0.15405	0.04418	0.36514	1558.6070
13.00	3.14432	0.11152	0.03212	0.26434	1133.0651
14.00	3.38620	0.08028	0.02320	0.19028	818.3158
15.00	3.62807	0.05752	0.01667	0.13635	587.9357
16.00	3.86994	0.04107	0.01192	0.09734	420.6509
17.00	4.11181	0.02923	0.00850	0.06929	299.9368
18.00	4.35368	0.02075	0.00604	0.04919	213.2601
19.00	4.59555	0.01470	0.00429	0.03485	151.2732
20.00	4.83742	0.01040	0.00304	0.02464	107.0893
21.00	5.07929	0.00734	0.00215	0.01740	75.6814
22.00	5.32116	0.00518	0.00151	0.01227	53.4067
23.00	5.56303	0.00365	0.00107	0.00864	37.6401
24.00	5.80491	0.00257	0.00075	0.00608	26.4988
25.00	6.04678	0.00180	0.00053	0.00427	18.6371
26.00	6.28865	0.00127	0.00037	0.00300	13.0967
27.00	6.53052	0.00089	0.00026	0.00211	9.1963
28.00	6.77239	0.00062	0.00018	0.00148	6.4531
29.00	7.01426	0.00044	0.00013	0.00104	4.5255
30.00	7.25613	0.00031	0.00009	0.00073	3.1720
31.00	7.49800	0.00021	0.00006	0.00051	2.2222
32.00	7.73987	0.00015	0.00004	0.00036	1.5561
33.00	7.98175	0.00011	0.00003	0.00025	1.0892
34.00	8.22362	0.00007	0.00002	0.00017	0.7621
35.00	8.46549	0.00005	0.00002	0.00012	0.5331
36.00	8.70736	0.00004	0.00001	0.00009	0.3728
37.00	8.94923	0.00003	0.00001	0.00006	0.2606
38.00	9.19110	0.00002	0.00001	0.00004	0.1821
39.00	9.43297	0.00001	0.00000	0.00003	0.1273
40.00	9.67484	0.00001	0.00000	0.00002	0.0889
41.00	9.91671	0.00001	0.00000	0.00001	0.0621
42.00	10.15859	0.00000	0.00000	0.00000	0.0255
43.00	10.40046	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
44.00	10.64233	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
45.00	10.88420	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
		Luas HSS	1.6134085	Vol (m ³)	56920.000
				DRO (mm)	1.000

Catatan :

- Kolom-1 : Interval Waktu (Jam) yang diberikan à $T_i = T_{i-1} + Tr$
- Kolom-2 : Absis (waktu tak berdimensi) $t = T/Tp$ à Kolom-1 / Tp
- Kolom-3 : Ordinat debit $q = Q/Qp$ didapat dari kurva HSS (tak berdimensi)
- Kolom-4 : Luas segmen HSS à $A_i = \frac{1}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \times (q_i + q_{i-1})$ (tak berdimensi)
: Jumlah seluruh Kolom-4 = A_{HSS} (Penting untuk menghitung Qp)
- Kolom-5 : Ordinat debit HSS berdimensi à $Q_i = q_i \times Qp$ (Kolom 3 x Qp)
- Kolom-6 : Luas segmen kurva HSS à $A_i = \frac{1}{2} \times 3600 \times (T_i - T_{i-1}) \times (Q_i + Q_{i-1})$
: Jumlah seluruh Kolom-6 (V_{HSS}) jika dibagi ($A_{DAS} / 1000$) harus = 1

Tabel 10. Tabel perhitungan HSS ITB-2 untuk DAS Cibatarua

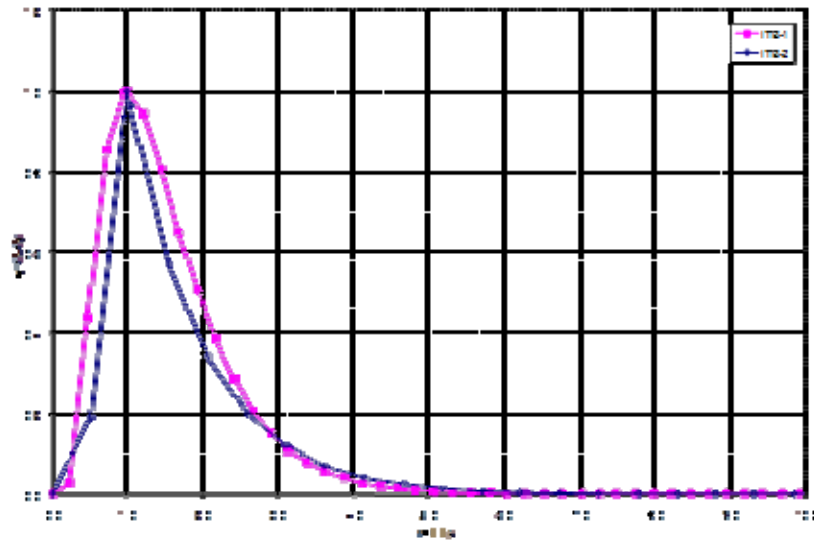
I. Karakteristik DAS dan Hujan		
1. Nama Sungai	=	Cibatarua
2. Luas daerah aliran Sungai (A_{DAS})	=	56.92 Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=	12.15 Km
4 Tinggi Hujan Satun (R)	=	1.00 mm
5. Durasi Hujan Satuan (T_r)	=	1.00 Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (T_p) Dan Waktu Dasar (T_b)		
1. Koefisien waktu (C_t)	=	1.00
2. Time Lag à Nakayasu		
$TL = C_t * 0.21 * L^{0.7}$	< 15 km	1.206 Jam
$= C_t * (0.527 + 0.058 * L)$	≥ 15 km	
$TP = 1.6 TL$	=	1.930 Jam
3. Waktu Puncak		
$T_p =$	=	1.930 Jam
4. Waktu Dasar		
T_B / T_P	=	20 (Ratio T_B / T_P)
T_B	=	38.60 Jam
III. Debit Puncak (Q_p)		
1. Cp. Koefisien Puncak (C_p)	=	1.000
2. Alpha	=	2.500
3. Betha	=	1.000
4. Luas A_{HSS} (lihat Bag-IV, Jumlah Kol-4)	=	1.359
5. $Q_p = 1 / (3.6 * T_p) * (A_{DAS} / A_{HSS})$	=	6.028 m ³ /s
6. Volume Hujan ($V_{DAS} = R * A_{DAS} * 1000$)	=	56,920 m ³
7. V_{HSS} (Bag IV, Jumlah kolom-6)	=	56,920 m ³
8. $DRO = V_{HSS} / A_{DAS} / 1000$	=	1.000 mm

IV. Perhitungan HSS ITB-2 :

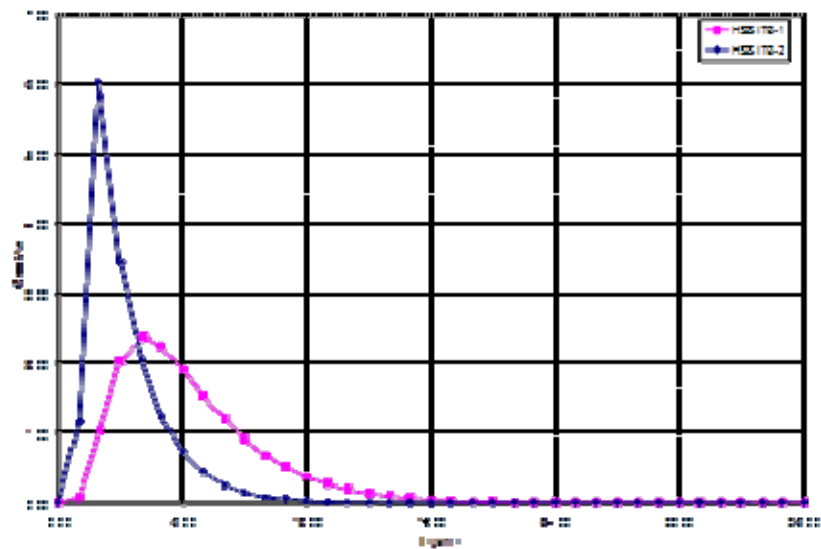
T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	$t=T/Tp$	$q=Q/Qp$	A	Q(m ³ /s)	V(m ³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
1.00	0.51815	0.19326	0.05007	1.16501	2097.0267
1.93	1.00000	1.00000	0.28749	6.02821	12040.6104
2.00	1.03630	0.96435	0.03566	5.81328	1493.4139
3.00	1.55446	0.57438	0.39865	3.46251	16696.4199
4.00	2.07261	0.34211	0.23744	2.06234	9944.7238
5.00	2.59076	0.20377	0.14143	1.22837	5923.2777
6.00	3.10891	0.12137	0.08424	0.73164	3528.0234
7.00	3.62707	0.07229	0.05017	0.43578	2101.3618
8.00	4.14522	0.04306	0.02988	0.25956	1251.6134
9.00	4.66337	0.02565	0.01780	0.15460	745.4861
10.00	5.18152	0.01528	0.01060	0.09208	444.0265
11.00	5.69967	0.00910	0.00631	0.05485	264.4711
12.00	6.21783	0.00542	0.00376	0.03267	157.5243
13.00	6.73598	0.00323	0.00224	0.01946	93.8247
14.00	7.25413	0.00192	0.00133	0.01159	55.8839
15.00	7.77228	0.00115	0.00079	0.00690	33.2856
16.00	8.29043	0.00068	0.00047	0.00411	19.8255
17.00	8.80859	0.00041	0.00028	0.00245	11.8085
18.00	9.32674	0.00024	0.00017	0.00146	7.0334
19.00	9.84489	0.00014	0.00010	0.00087	4.1892
20.00	10.36304	0.00009	0.00006	0.00052	2.4952
21.00	10.88120	0.00005	0.00004	0.00031	1.4862
22.00	11.39935	0.00003	0.00002	0.00018	0.8852
23.00	11.91750	0.00002	0.00001	0.00011	0.5272
24.00	12.43565	0.00001	0.00001	0.00007	0.3140
25.00	12.95380	0.00001	0.00000	0.00004	0.1870
26.00	13.47196	0.00000	0.00000	0.00002	0.1114
27.00	13.99011	0.00000	0.00000	0.00001	0.0664
28.00	14.50826	0.00000	0.00000	0.00001	0.0395
29.00	15.02641	0.00000	0.00000	0.00000	0.0235
30.00	15.54457	0.00000	0.00000	0.00000	0.0140
31.00	16.06272	0.00000	0.00000	0.00000	0.0084
32.00	16.58087	0.00000	0.00000	0.00000	0.0050
33.00	17.09902	0.00000	0.00000	0.00000	0.0030
34.00	17.61717	0.00000	0.00000	0.00000	0.0018
35.00	18.13533	0.00000	0.00000	0.00000	0.0011
36.00	18.65348	0.00000	0.00000	0.00000	0.0006
37.00	19.17163	0.00000	0.00000	0.00000	0.0004
38.00	19.68978	0.00000	0.00000	0.00000	0.0002
39.00	20.20793	0.00000	0.00000	0.00000	0.0001
40.00	20.72609	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
41.00	21.24424	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
42.00	21.76239	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
43.00	22.28054	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
44.00	22.79870	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
45.00	23.31685	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
		Luas HSS	1.3590380	Vol (m ³)	56920.000
				DRO (mm)	1.000

Catatan :

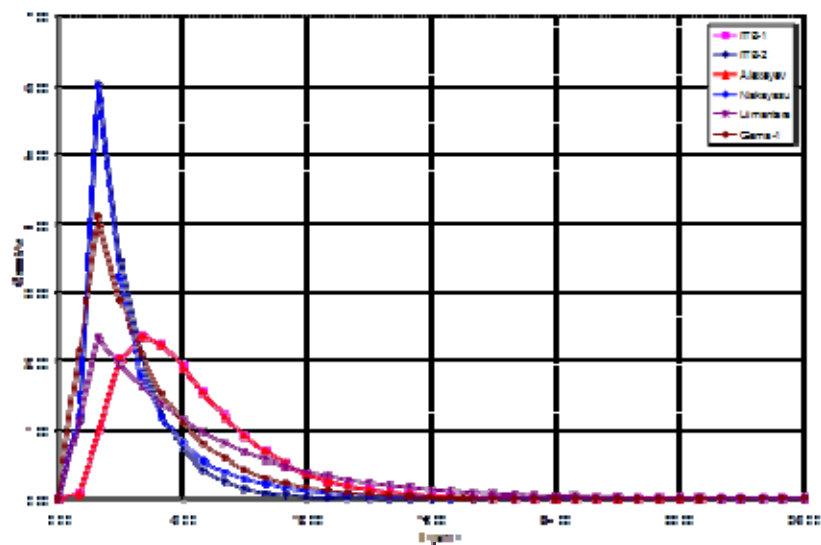
- Kolom-1 : Interval Waktu (Jam) yang diberikan $\rightarrow T_i = T_{i-1} + Tr$
- Kolom-2 : Absis (waktu tak berdimensi) $t=T/Tp \rightarrow$ Kolom-1 /Tp
- Kolom-3 : Ordinat debit $q=Q/Qp$ didapat dari kurva HSS (tak berdimensi)
- Kolom-4 : Luas segmen HSS $\hat{a}A_i = \frac{1}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \times (q_i + q_{i-1})$ (tak berdimensi)
: Jumlah seluruh Kolom-4 = A_{HSS} (Penting untuk menghitung Qp)
- Kolom-5 : Ordinat debit HSS berdimensi $\hat{a} Q_i = q_i \times Qp$ (Kolom 3 x Qp)
- Kolom-6 : Luas segmen kurva HSS $\hat{a} A_i = \frac{1}{2} \times 3600 \times (T_i - T_{i-1}) \times (Q_i + Q_{i-1})$
: Jumlah seluruh Kolom-6 (V_{HSS}) jika dibagi ($A_{DAS} / 1000$) harus = 1



Gambar 10. Bentuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 tak-berdimensi untuk DAS Cibatarua



Gambar 11. Bentuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 berdimensi untuk DAS Cibatarua



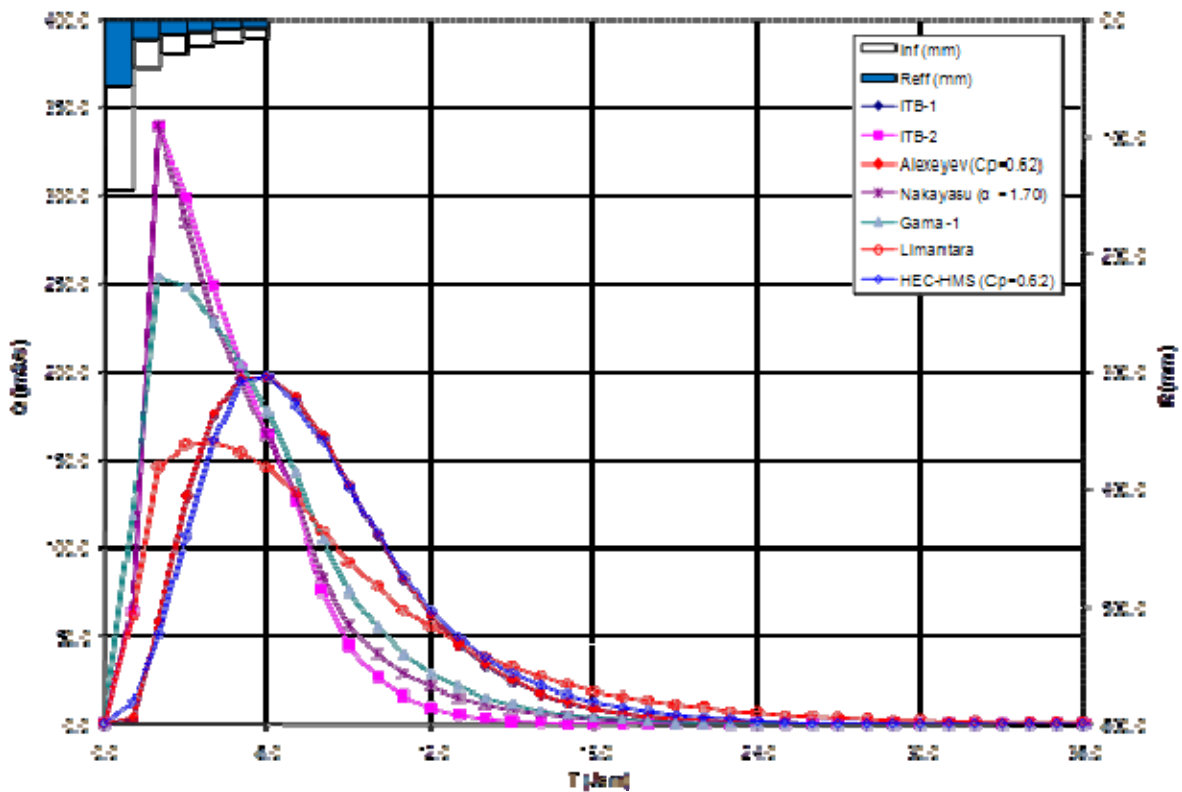
Gambar 12. Perbandingan bentuk HSS berdimensi DAS Cibatarua menurut cara Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Gama-1, Limantara, ITB-1 dan ITB-2

Tabel 11. Tabel Hasil Superposisi HSS ITB-1 untuk DAS Cibatarua

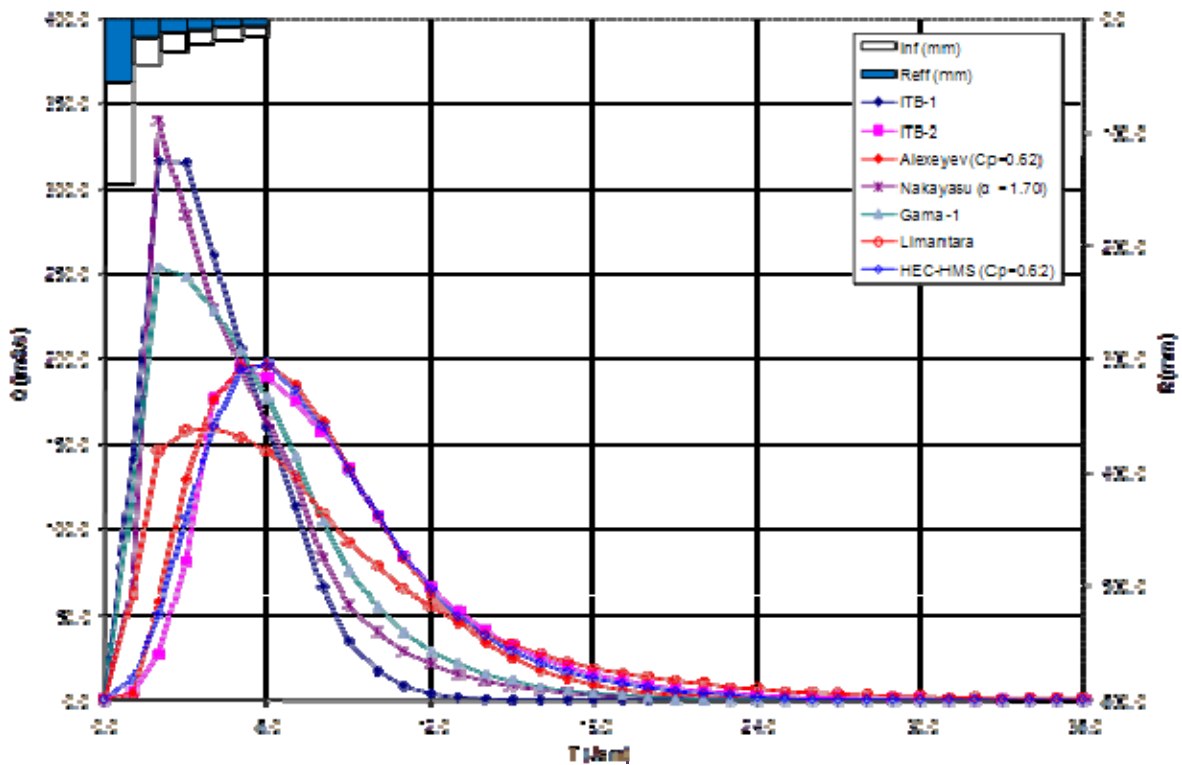
Waktu (jam)	HSS ITB-1	Hidrograf Penyusun						Hydrograf Total	Volume Hidrograf	
		1 55.400	2 16.100	3 11.700	4 9.200	5 7.200	6 5.700			
0.0	0.0000	0.0000					0.0000	0.0000		
1.00	0.0671	3.7178	0.0000				3.7178	6692.0642		
2.00	1.0373	57.4638	1.0804	0.0000			58.5442	112071.6358		
3.00	2.0287	112.3879	16.6998	0.7852	0.0000		129.8728	339150.6639		
4.00	2.3664	131.0991	32.6615	12.1358	0.6174	0.0000	176.5139	551496.0449		
5.00	2.2449	124.3661	38.0992	23.7354	9.5427	0.4832	196.2266	670932.8051		
6.00	1.9205	106.3935	36.1425	27.6870	18.6637	7.4682	0.3825	196.7375	707335.3089	
7.00	1.5487	85.7981	30.9194	26.2650	21.7710	14.6064	5.9123	185.2722	687617.4749	
8.00	1.2036	66.6819	24.9341	22.4694	20.6529	17.0382	11.5634	163.3398	627501.6514	
9.00	0.9127	50.5651	19.3787	18.1198	17.6682	16.1631	13.4885	135.3835	537701.8507	
10.00	0.6803	37.6888	14.6949	14.0826	14.2481	13.8273	12.7958	107.3375	436897.6630	
11.00	0.5008	27.7416	10.9529	10.6789	11.0735	11.1507	10.9466	82.5442	341787.0147	
12.00	0.3651	20.2288	8.0621	7.9595	8.3971	8.6662	8.8276	62.1414	260434.0967	
13.00	0.2643	14.6444	5.8788	5.8588	6.2588	6.5716	6.8608	46.0731	194786.1846	
14.00	0.1903	10.5416	4.2559	4.2722	4.6069	4.8982	5.2025	33.7772	143730.6257	
15.00	0.1364	7.5538	3.0635	3.0928	3.3593	3.6054	3.8777	24.5525	104993.5036	
16.00	0.0973	5.3929	2.1952	2.2263	2.4319	2.6290	2.8543	17.7296	76107.8984	
17.00	0.0693	3.8385	1.5673	1.5953	1.7506	1.9032	2.0813	12.7362	54838.4572	
18.00	0.0492	2.7252	1.1155	1.1389	1.2544	1.3700	1.5067	9.1108	39324.5606	
19.00	0.0348	1.9307	0.7920	0.8107	0.8956	0.9817	1.0846	6.4952	28090.8097	
20.00	0.0246	1.3653	0.5611	0.5755	0.6374	0.7009	0.7772	4.6174	20002.7269	
21.00	0.0174	0.9640	0.3968	0.4077	0.4526	0.4989	0.5549	3.2748	14206.0337	
22.00	0.0123	0.6797	0.2802	0.2883	0.3206	0.3542	0.3949	2.3180	10066.9747	
23.00	0.0086	0.4787	0.1975	0.2036	0.2267	0.2509	0.2804	1.6379	7120.5564	
24.00	0.0061	0.3368	0.1391	0.1436	0.1601	0.1774	0.1986	1.1557	5028.4670	
25.00	0.0043	0.2368	0.0979	0.1011	0.1129	0.1253	0.1405	0.8144	3546.1743	
26.00	0.0030	0.1663	0.0688	0.0711	0.0795	0.0883	0.0992	0.5733	2497.8505	
27.00	0.0021	0.1167	0.0483	0.0500	0.0559	0.0622	0.0699	0.4032	1757.6013	
28.00	0.0015	0.0819	0.0339	0.0351	0.0393	0.0438	0.0493	0.2833	1235.5970	
29.00	0.0010	0.0574	0.0238	0.0247	0.0276	0.0308	0.0347	0.1989	867.9253	
30.00	0.0007	0.0402	0.0167	0.0173	0.0194	0.0216	0.0244	0.1396	609.2230	
31.00	0.0005	0.0282	0.0117	0.0121	0.0136	0.0152	0.0171	0.0979	427.3586	
32.00	0.0004	0.0197	0.0082	0.0085	0.0095	0.0106	0.0120	0.0686	299.6124	
33.00	0.0002	0.0138	0.0057	0.0059	0.0067	0.0075	0.0084	0.0480	209.9440	
34.00	0.0002	0.0097	0.0040	0.0042	0.0047	0.0052	0.0059	0.0336	147.0433	
35.00	0.0001	0.0068	0.0028	0.0029	0.0033	0.0037	0.0041	0.0235	102.9448	
36.00	0.0001	0.0047	0.0020	0.0020	0.0023	0.0026	0.0029	0.0165	72.0439	
37.00	0.0001	0.0033	0.0014	0.0014	0.0016	0.0018	0.0020	0.0115	50.4010	
38.00	0.0000	0.0023	0.0010	0.0010	0.0011	0.0013	0.0014	0.0081	35.2487	
39.00	0.0000	0.0016	0.0007	0.0007	0.0008	0.0009	0.0010	0.0056	24.6445	
40.00	0.0000	0.0011	0.0005	0.0005	0.0005	0.0006	0.0007	0.0039	17.2259	
41.00	0.0000	0.0008	0.0003	0.0003	0.0004	0.0004	0.0005	0.0028	12.0375	
42.00	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003	0.0003	0.0014	7.4222	
43.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0008	3.9100	
44.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0002	0.0004	2.2356	
45.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0002	1.1888	
46.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.5378	
47.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1455	
48.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
49.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
50.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
51.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
52.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
53.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
54.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
55.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
56.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
57.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
58.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
59.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
60.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	
								Volume Limpasan	m ³	5.99E+06
								Luas DAS	km ²	56.92
								Limpasan (DRO)	mm	105.23
								Rasio Limpasan/Hujan	%	99.94%

Tabel 12. Tabel Hasil Superposisi HSS ITB-2 untuk DAS Cibatarua

Waktu (jam)	HSS ITB-2	Hidrograf Penyusun						Hidrograf Total 105.300	Volume Hidrograf
		1 55.400	2 16.100	3 11.700	4 9.200	5 7.200	6 5.700		
0.0	0.0000	0.0000						0.0000	0.0000
1.00	1.1650	64.5418	0.0000					64.5418	116175.2770
2.00	5.8133	322.0558	18.7567	0.0000				340.8125	729637.8262
3.00	3.4625	191.8229	93.5938	13.6307	0.0000			299.0474	1151747.8963
4.00	2.0623	114.2536	55.7464	68.0154	10.7181	0.0000		248.7335	986005.6215
5.00	1.2284	68.0517	33.2037	40.5113	53.4822	8.3881	0.0000	203.6370	814266.9271
6.00	0.7316	40.5330	19.7768	24.1294	31.8551	41.8556	6.6406	164.7904	663169.3716
7.00	0.4358	24.1423	11.7794	14.3719	18.9735	24.9301	33.1357	127.3329	525821.9705
8.00	0.2596	14.3796	7.0161	8.5602	11.3010	14.8488	19.7363	75.8420	365714.9400
9.00	0.1546	8.5648	4.1789	5.0986	6.7311	8.8443	11.7553	45.1731	217827.1807
10.00	0.0921	5.1014	2.4890	3.0369	4.0092	5.2678	7.0017	26.9060	129742.2541
11.00	0.0548	3.0385	1.4825	1.8088	2.3880	3.1376	4.1704	16.0257	77277.0984
12.00	0.0327	1.8098	0.8830	1.0774	1.4223	1.8688	2.4840	9.5453	46027.7956
13.00	0.0195	1.0779	0.5259	0.6417	0.8472	1.1131	1.4795	5.6853	27415.0816
14.00	0.0116	0.6420	0.3133	0.3822	0.5046	0.6630	0.8812	3.3863	16328.9745
15.00	0.0069	0.3824	0.1866	0.2277	0.3005	0.3949	0.5249	2.0170	9725.8660
16.00	0.0041	0.2278	0.1111	0.1356	0.1790	0.2352	0.3126	1.2013	5792.9216
17.00	0.0024	0.1357	0.0662	0.0808	0.1066	0.1401	0.1862	0.7155	3450.3807
18.00	0.0015	0.0808	0.0394	0.0481	0.0635	0.0834	0.1109	0.4262	2055.1162
19.00	0.0009	0.0481	0.0235	0.0287	0.0378	0.0497	0.0661	0.2538	1224.0686
20.00	0.0005	0.0287	0.0140	0.0171	0.0225	0.0296	0.0393	0.1512	729.0799
21.00	0.0003	0.0171	0.0083	0.0102	0.0134	0.0176	0.0234	0.0901	434.2547
22.00	0.0002	0.0102	0.0050	0.0061	0.0080	0.0105	0.0140	0.0536	258.6508
23.00	0.0001	0.0061	0.0030	0.0036	0.0048	0.0063	0.0083	0.0319	154.0576
24.00	0.0001	0.0036	0.0018	0.0021	0.0028	0.0037	0.0050	0.0190	91.7598
25.00	0.0000	0.0021	0.0010	0.0013	0.0017	0.0022	0.0029	0.0113	54.6540
26.00	0.0000	0.0013	0.0006	0.0008	0.0010	0.0013	0.0018	0.0068	32.5530
27.00	0.0000	0.0008	0.0004	0.0005	0.0006	0.0008	0.0010	0.0040	19.3892
28.00	0.0000	0.0005	0.0002	0.0003	0.0004	0.0005	0.0006	0.0024	11.5486
29.00	0.0000	0.0003	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0004	0.0014	6.8786
30.00	0.0000	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0008	4.0970
31.00	0.0000	0.0001	0.0000	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0005	2.4403
32.00	0.0000	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.0001	0.0003	1.4535
33.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0002	0.8657
34.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.5156
35.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0001	0.3071
36.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1829
37.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.1090
38.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0649
39.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0359
40.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0179
41.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0093
42.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0045
43.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0019
44.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0005
45.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
46.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
47.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
48.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
49.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
50.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
51.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
52.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
53.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
54.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
55.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
56.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
57.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
58.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
59.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
59.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
					Volume Limpasan			m ³	5.89E+06
					Luas DAS			km ²	56.92
					Limpasan (DRO)			mm	103.50
					Rasio Limpasan/Hujan			%	98.29%



Gambar 13. Perbandingan hasil HSS ITB-1 (time lag Cara Snyder) dan HSS ITB-2 (time lag Cara Nakayasu) dengan hasil cara Snyder-Alexeyev ($C_p=0.62$), Nakayasu ($\alpha = 1.70$), Limantara, GAMA-1 dan hasil program HEC-HMS



Gambar 14. Perbandingan hasil HSS ITB-1 (time lag Cara Nakayasu) dan HSS ITB-2 (time lag Cara Snyder) dengan hasil cara Snyder-Alexeyev ($C_p=0.62$), Nakayasu ($\alpha = 1.70$), Limantara, GAMA-1 dan hasil program HEC-HMS

4.4 Hidrograf banjir DAS katulampa

Prosedur pembuatan hidrograf satuan sintetis yang dikembangkan dalam penelitian ini, selanjutnya akan digunakan untuk menentukan bentuk hidrograf banjir DAS Ciliwung hulu di bendung Katulampa yang mempunyai luas DAS 149.230 km² dan Panjang sungai diperkirakan 24.460 km, kemiringan alur sungai $S = 107.684 \text{ m/km}$. Lokasi bendung Katulampa memiliki stasiun pencatatan debit berdasarkan pengukuran muka air di AWLR Bendung Katulampa dan pencatatan hujan serentak otomatis di Stasiun Darmaga yang terukur simultan seperti ditunjukkan pada **Tabel 13**.

a. Kalibrasi dengan merubah harga Cp dan Ct

Perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 mula-mula dihitung dengan rumus time lag menurut Snyder untuk $C_t=1$ dan $C_p=1$ dan hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 15**. Untuk Cara Nakayasu perhitungan dilakukan dengan $\alpha=2.0$ sehingga debit puncak diharapkan besar. Dari **Gambar 15** terlihat hidrograf yang dihasilkan berbeda cukup jauh dari hasil pengukuran.

Karena waktu puncak pengukuran lebih kecil dari perhitungan, agar hasil perhitungan mendekati hasil pengukuran, dengan cara mencoba-coba harga sampai waktu puncak perhitungan mendekati pengamatan. Jika harga C_t diturunkan menjadi 0.25 didapat hasil yang cukup dekat. Akibat perubahan ini debit puncak naik sehingga debit puncak harus diturunkan. Dengan cara coba-coba harga C_p dapat diturunkan dari 1.0 menjadi 0.95 dan hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 16**.

Hasil kalibrasi dengan cara sederhana seperti ini memberikan hasil superposisi hidrograf HSS-ITB-1 dan HSS ITB-2 yang lebih mendekati hasil pengukuran. Perubahan harga $C_t=0.25$ menunjukkan bahwa rumus time lag yang digunakan mungkin tidak cocok sehingga harus diganti dengan rumus time lag lain yang lebih sesuai untuk kondisi lokasi bendung

Tabel 13. Data pencatatan simultan hujan dan debit di bendung katulampa

Tanggal	Jam	Hujan (mm)	Debit (m ³ /s)	
			Total	DRO
1/18/02 15:00	1	2.30	10.12	0.00
1/18/02 16:01	2	22.90	18.72	0.00
1/18/02 16:58	3	23.20	343.20	314.01
1/18/02 18:00	4	0.50	525.53	496.33
1/18/02 19:01	5	0.40	525.53	496.33
1/18/02 19:58	6	1.40	244.20	215.01
1/18/02 21:00	7	0.10	244.20	215.01
1/18/02 22:01	8	0.00	244.20	215.01
1/18/02 22:58	9	0.00	106.70	77.50
1/19/02 0:00	10	0.00	106.70	77.50
1/19/02 1:01	11	0.00	106.70	77.50
1/19/02 1:58	12	0.00	106.70	77.50
1/19/02 3:00	13	0.00	29.19	0.00

Sumber : Waluyo Hatmoko, Puslitbang Air, 2010

Katulampa yang berada di daerah curam,

b. Kalibrasi dengan merubah Rumus Time Lag

Untuk memperbaiki hasil, perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dilakukan dengan menggunakan rumus time lag menurut cara USGS (Hydraulic Engineering Circular No. 22, 2009), yang selain memperhitungkan panjang dan kemiringan alur sungai, juga memperhitungkan kondisi pengembangan DAS. Dalam perhitungan ini harga parameter Faktor Pengembangan DAS (FPD=8). Ini berarti kondisi DAS Bendung Katulampa tidak terlalu baik.

Proses perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dengan time lag menggunakan rumus USGS ditunjukkan pada **Tabel 9** dan **Tabel 10**, dan hidrograf akhir setelah superposisi akhir HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 ditunjukkan pada **Gambar 17**. Dari gambar tersebut terlihat bahwa, untuk kasus ini rumus time lag menurut USGS memberikan hasil yang lebih mendekati hasil pengukuran.

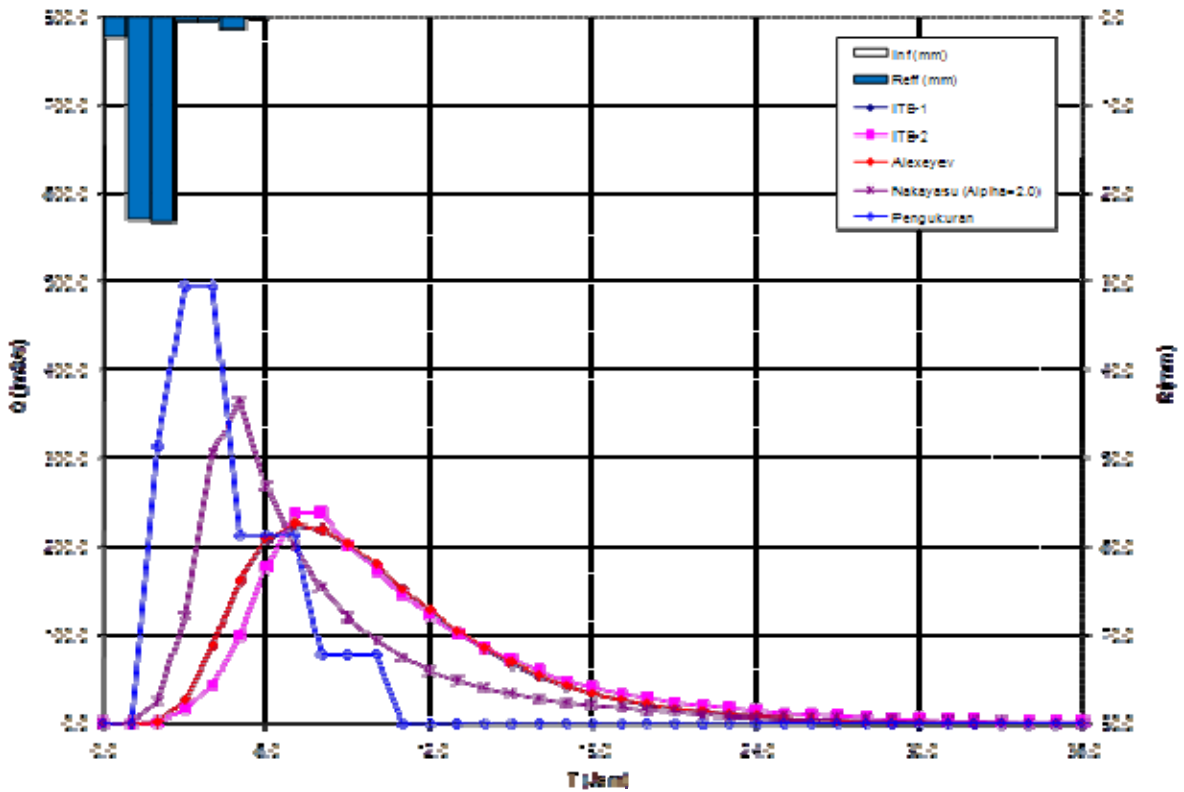
c. Perubahan kondisi pengembangan DAS

Rumus time lag menurut USGS berisi parameter yang merepresentasikan Faktor Pengembangan DAS (Basin Development Factor). DAS yang belum berkembang ditandai dengan aliran yang terhambat, resapan besar, debit puncak yang kecil dan waktu puncak yang lambat. DAS yang telah berkembang ditandai dengan aliran yang lancar, resapan kecil debit puncak yang besar dan waktu puncak yang kecil.

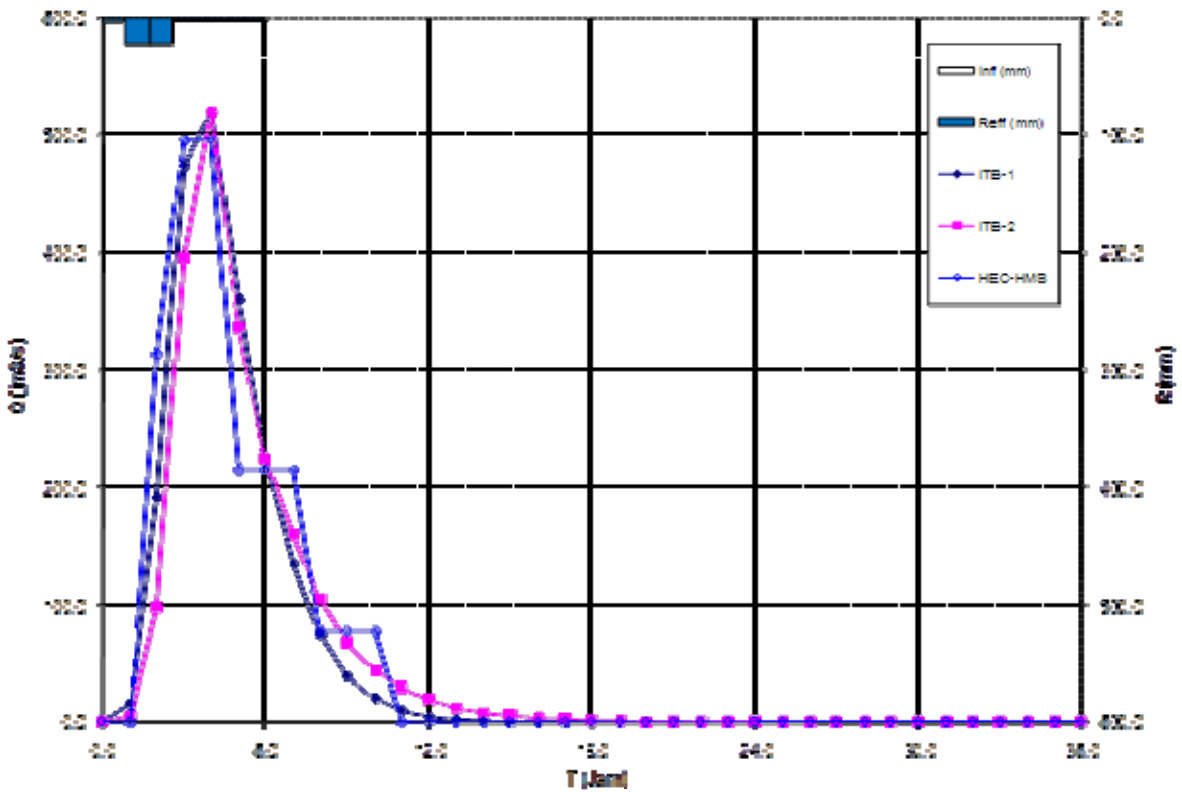
Dalam perhitungan sebekumnya harga FPD = 8 menunjukkan kondisi pengembangan DAS existing. Untuk mengetahui bagaimana pengaruh Faktor pengembangan DAS ini terhadap debit yang terjadi, dilakukan perhitungan dengan harga FPD = 0 (Belum berkembang) dan FPD = 12 (berkembang penuh) dan hasilnya ditunjukkan pada **Gambar 18**.

Seperti terlihat pada **Gambar 18** untuk FPD = 0 debit puncak yang relatif kecil dan waktu puncak yang lambat, sebaliknya untuk FPD = 12, debit puncak besar dan waktu puncak yang singkat. Ini menunjukkan bahwa rumus USGS secara kualitatif mampu mensimulasikan perubahan kondisi DAS. Untuk hasil yang lebih akurat, rumus time lag menurut SCS yang didalamnya berisi curve number akan lebih baik.

Untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat tentang harga-harga FPD yang digunakan, perlu dilakukan penelitian lanjut untuk menentukan harga-harga FPD untuk berbagai kondisi DAS. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan model *overland flow* (aliran permukaan) dua dimensi yang bekerja berdasarkan persamaan Saint Venant atau Persamaan Gelombang Diffusi (*Diffusion Wave*) yang diselesaikan secara numerik dengan metoda selisih hingga, metoda elemen hingga atau metoda volume hingga.



Gambar 15. Perbandingan hasil HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 (time lag Cara Snyder) dengan hasil cara Snyder-Alexeyev, Nakayasu, Limantara, GAMA-1 dan hasil program HEC-HMS



Gambar 16. Hasil HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 (time lag Cara Snyder) harga standar $C_t = 1.0$ dirubah menjadi $C_t = 0.25$ dan C_p dirubah dari $C_p = 1.0$ menjadi $C_p = 0.95$.

Tabel 14. Tabel perhitungan HSS ITB-1 untuk DAS Katulampa

I. Karakteristik DAS dan Hujan			
1. Nama Sungai	=	Ciliwung-Katulampa	
2. Luas daerah aliran Sungai (A_{DAS})	=	149.23	Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=	24.46	Km
4. Kemiringan Sungai Utama	=	107.68	m/km
5. Kondisi DAS	=	6.00	(Rusak)
6. Tinggi Hujan Satun (R)	=	1.00	mm
7. Durasi Hujan Satuan (Tr)	=	1.00	Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (Tp) Dan Waktu Dasar (Tb)			
1. Koefisien waktu (C_t)	=	1.00	
2. Time Lag \hat{a}		USGS	
$TL = C_t * 0.38 * L^{0.62} * S^{-0.31} * (13 - FPD)^{0.47}$		1.614	Jam
$TP = TL + 0.5 Tr$		2.114	
3. Waktu Puncak			
$T_p =$	=	2.114	Jam
4. Waktu Dasar			
T_B/T_p	=	15	(Ratio T_B/T_p)
T_B	=	31.71	Jam
III. Debit Puncak (QP)			
1. C_p . Koefisien Puncak (C_p)	=	1.000	
2. Alpha	=	1.500	
3. Luas HSS (A_{HSS} = Jumlah Kolom-4 Bag IV)	=	1.628	
4. $Q_p = 1/(3.6T_p) * (A_{DAS}/A_{HSS})$	=	12.044	m ³ /s
5. Vol Hujan ($=R * A_{DAS} * 1000$)	=	149,230	m ³
6. Vol HSS (V_{HSS})	=	149,230	m ³
7. Tinggi Limpasan	=	1.000	mm

IV. Perhitungan HSS ITB-1 :

T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	t=T/Tp	q=Q/Qp	A	Q(m3/s)	V(m3)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
1.00	0.47308	0.41464	0.09808	4.99390	8989.0219
2.00	0.94615	0.99541	0.33353	11.98876	30568.7809
2.11	1.00000	1.00000	0.05372	12.04399	4923.8332
3.00	1.41923	0.83048	0.38370	10.00225	35166.3902
4.00	1.89231	0.53198	0.32227	6.40720	29537.0057
5.00	2.36538	0.30660	0.19836	3.69265	18179.7309
6.00	2.83846	0.16760	0.11217	2.01863	10280.3076
7.00	3.31154	0.08890	0.06067	1.07069	5560.7723
8.00	3.78461	0.04627	0.03197	0.55728	2930.3294
9.00	4.25769	0.02378	0.01657	0.28643	1518.6637
10.00	4.73077	0.01212	0.00849	0.14593	778.2343
11.00	5.20384	0.00613	0.00432	0.07387	395.6325
12.00	5.67692	0.00309	0.00218	0.03722	199.9532
13.00	6.15000	0.00155	0.00110	0.01868	100.6101
14.00	6.62307	0.00078	0.00055	0.00935	50.4505
15.00	7.09615	0.00039	0.00028	0.00467	25.2298
16.00	7.56923	0.00019	0.00014	0.00233	12.5897
17.00	8.04230	0.00010	0.00007	0.00116	6.2712
18.00	8.51538	0.00005	0.00003	0.00058	3.1192
19.00	8.98846	0.00002	0.00002	0.00029	1.5495
20.00	9.46153	0.00001	0.00001	0.00014	0.7690
21.00	9.93461	0.00001	0.00000	0.00007	0.3813
22.00	10.40769	0.00000	0.00000	0.00003	0.1889
23.00	10.88076	0.00000	0.00000	0.00002	0.0935
24.00	11.35384	0.00000	0.00000	0.00001	0.0463
25.00	11.82692	0.00000	0.00000	0.00000	0.0229
26.00	12.29999	0.00000	0.00000	0.00000	0.0113
27.00	12.77307	0.00000	0.00000	0.00000	0.0056
28.00	13.24615	0.00000	0.00000	0.00000	0.0028
29.00	13.71922	0.00000	0.00000	0.00000	0.0014
30.00	14.19230	0.00000	0.00000	0.00000	0.0007
31.00	14.66538	0.00000	0.00000	0.00000	0.0003
32.00	15.13845	0.00000	0.00000	0.00000	0.0001
33.00	15.61153	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
34.00	16.08461	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
35.00	16.55768	0.00000	0.00000	0.00000	0.0000
		Luas H.S	1.6282262	Volume (m ³)	149230.00
				DRO (mm)	1.000
				DRO (mm)	1.000

Catatan :

- Kolom-1 : Interval Waktu (Jam) yang diberikan $\rightarrow T_i = T_{i-1} + Tr$
- Kolom-2 : Absis (waktu tak berdimensi) $t=T/Tp \rightarrow$ Kolom-1 /Tp
- Kolom-3 : Ordinat debit $q=Q/Qp$ didapat dari kurva HSS (tak berdimensi)
- Kolom-4 : Luas segmen HSS $\Delta A_i = \frac{1}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \times (q_i + q_{i-1})$ (tak berdimensi)
: Jumlah seluruh Kolom-4 = A_{HSS} (Penting untuk menghitung Qp)
- Kolom-5 : Ordinat debit HSS berdimensi $\Delta Q_i = q_i \times Qp$ (Kolom 3 x Qp)
- Kolom-6 : Luas segmen kurva HSS $\Delta A_i = \frac{1}{2} \times 3600 \times (T_i - T_{i-1}) \times (Q_i + Q_{i-1})$
: Jumlah seluruh Kolom-6 (V_{HSS}) jika dibagi ($A_{DAS} / 1000$) harus = 1

Tabel 15. Tabel perhitungan HSS ITB-2 untuk DAS Katulampa

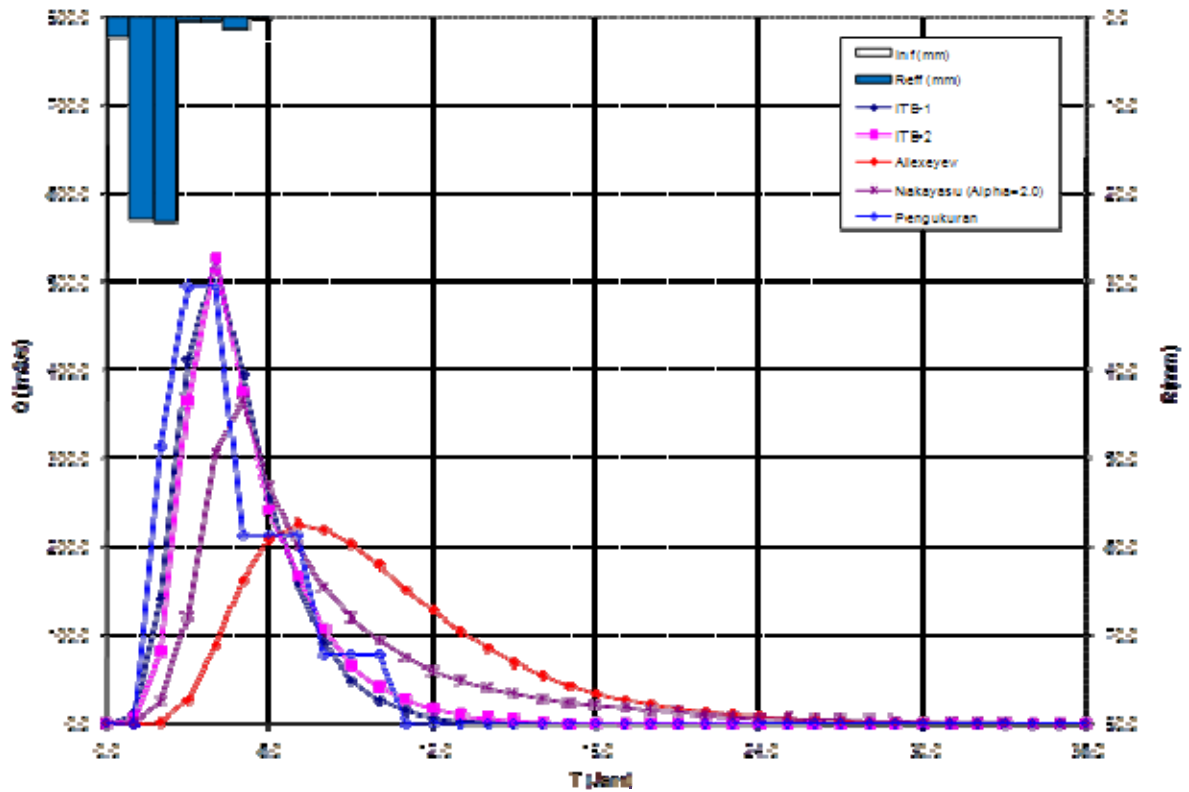
I. Karakteristik DAS dan Hujan		
1. Nama Sungai	=	Ciliwung-Katulampa
2. Luas daerah aliran Sungai (A_{DAS})	=	149.23 Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=	24.46 Km
4. Kemiringan Sungai Utama	=	107.68 m/km
5. Kondisi DAS	=	6.00 (Rusak)
6 Tinggi Hujan Satun (R)	=	1.00 mm
7. Durasi Hujan Satuan (Tr)	=	1.00 Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (Tp) Dan Waktu Dasar (Tb)		
1. Koefisien waktu (C_t)	=	1.00
2. Time Lag à	USGS	
$TL = C_t * 0.38 * L^{0.62} * S^{-0.31} * (13 - FPD)^{0.47}$		1.614 Jam
$TP = TL + 0.5 Tr$		2.114
3. Waktu Puncak		
$T_p =$	=	2.114 Jam
4. Waktu Dasar		
T_B / T_p	=	120 (Ratio T_B / T_p)
T_B	=	253.66 Jam
III. Debit Puncak (QP)		
1. C_p . Koefisien Puncak (C_p)	=	1.000
2. Alpha	=	2.500
3. Betha	=	1.000
4. Luas A_{HSS} (lihat Bag-IV, Jumlah Kol-4)	=	1.346
5. $Q_p = 1 / (3.6 * T_p) * (A_{DAS} / A_{HSS})$	=	14.565 m ³ /s
6. Volume Hujan ($V_{DAS} = R * A_{DAS} * 1000$)	=	149,230 m ³
7. V_{HSS} (Bag IV, Jumlah kolom-6)	=	149,230 m ³
8. $DRO = V_{HSS} / A_{DAS} / 1000$	=	1.000 mm

IV. Perhitungan HSS ITB-2 :

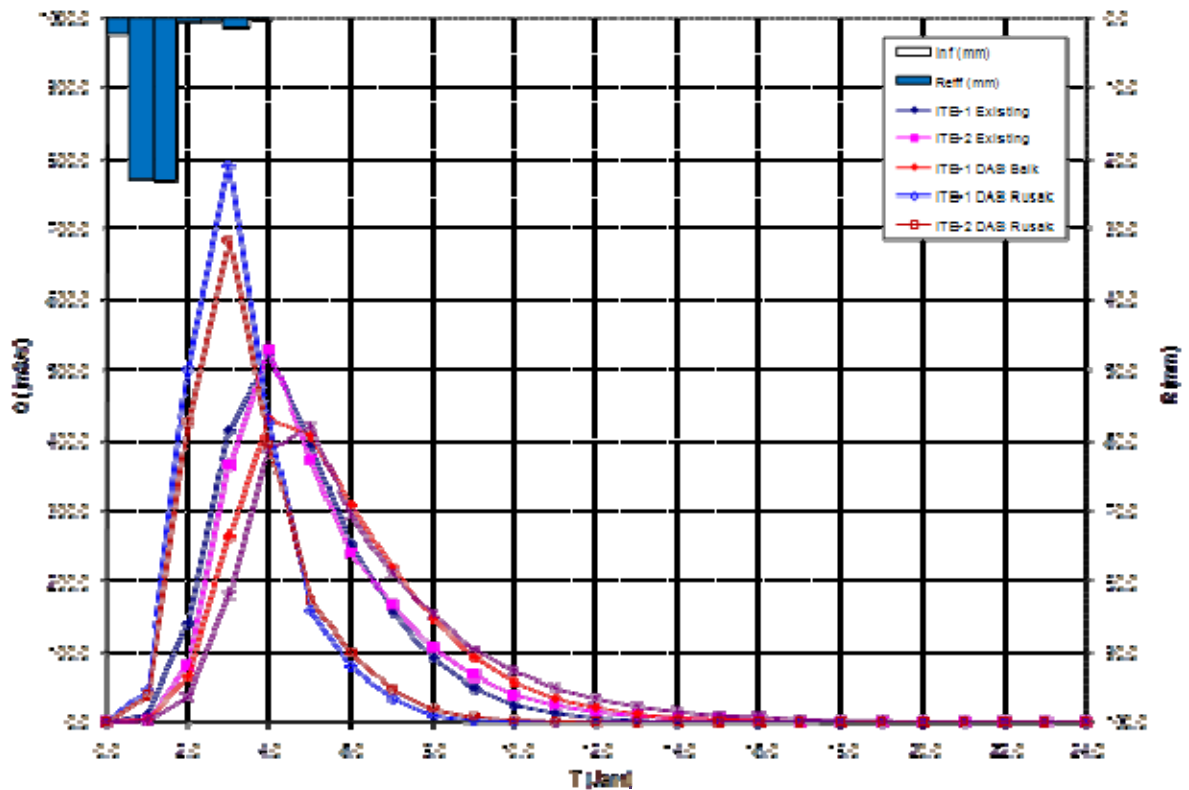
T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	t=T/Tp	q=Q/Qp	A	Q(m ³ /s)	V(m ³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.000
1.00	0.47308	0.15393	0.03641	2.24206	4035.704
2.00	0.94615	0.87077	0.24238	12.68299	26865.093
2.11	1.00000	1.00000	0.05037	14.56525	5582.625
3.00	1.41923	0.65755	0.34745	9.57742	38510.461
4.00	1.89231	0.40971	0.25245	5.96752	27980.906
5.00	2.36538	0.25528	0.15730	3.71826	17434.407
6.00	2.83846	0.15906	0.09801	2.31678	10863.071
7.00	3.31154	0.09911	0.06107	1.44355	6768.587
8.00	3.78461	0.06175	0.03805	0.89945	4217.387
9.00	4.25769	0.03848	0.02371	0.56043	2627.779
10.00	4.73077	0.02397	0.01477	0.34919	1637.323
11.00	5.20384	0.01494	0.00920	0.21758	1020.187
12.00	5.67692	0.00931	0.00574	0.13557	635.660
13.00	6.15000	0.00580	0.00357	0.08447	396.069
14.00	6.62307	0.00361	0.00223	0.05263	246.783
15.00	7.09615	0.00225	0.00139	0.03279	153.766
16.00	7.56923	0.00140	0.00086	0.02043	95.809
17.00	8.04230	0.00087	0.00054	0.01273	59.697
18.00	8.51538	0.00054	0.00034	0.00793	37.196
19.00	8.98846	0.00034	0.00021	0.00494	23.176
20.00	9.46153	0.00021	0.00013	0.00308	14.441
21.00	9.93461	0.00013	0.00008	0.00192	8.998
22.00	10.40769	0.00008	0.00005	0.00120	5.606
23.00	10.88076	0.00005	0.00003	0.00075	3.493
24.00	11.35384	0.00003	0.00002	0.00046	2.177
25.00	11.82692	0.00002	0.00001	0.00029	1.356
26.00	12.29999	0.00001	0.00001	0.00018	0.845
27.00	12.77307	0.00001	0.00000	0.00011	0.527
28.00	13.24615	0.00000	0.00000	0.00007	0.328
29.00	13.71922	0.00000	0.00000	0.00004	0.204
30.00	14.19230	0.00000	0.00000	0.00003	0.127
31.00	14.66538	0.00000	0.00000	0.00002	0.079
32.00	15.13845	0.00000	0.00000	0.00001	0.049
33.00	15.61153	0.00000	0.00000	0.00001	0.031
34.00	16.08461	0.00000	0.00000	0.00000	0.019
35.00	16.55768	0.00000	0.00000	0.00000	0.012
Luas HSS			1.3463785	Volume (m ³)	149230.00
				DRO (mm)	1.000

Catatan :

- Kolom-1 : Interval Waktu (Jam) yang diberikan $\rightarrow T_i = T_{i-1} + Tr$
- Kolom-2 : Absis (waktu tak berdimensi) $t = T/Tp \rightarrow$ Kolom-1 /Tp
- Kolom-3 : Ordinat debit $q = Q/Qp$ didapat dari kurva HSS (tak berdimensi)
- Kolom-4 : Luas segmen HSS $\hat{A}_i = \frac{1}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \times (q_i + q_{i-1})$ (tak berdimensi)
: Jumlah seluruh Kolom-4 = A_{HSS} (Penting untuk menghitung Qp)
- Kolom-5 : Ordinat debit HSS berdimensi $\hat{Q}_i = q_i \times Qp$ (Kolom 3 x Qp)
- Kolom-6 : Luas segmen kurva HSS $\hat{A}_i = \frac{1}{2} \times 3600 \times (T_i - T_{i-1}) \times (Q_i + Q_{i-1})$
: Jumlah seluruh Kolom-6 (V_{HSS}) jika dibagi ($A_{DAS} / 1000$) harus = 1



Gambar 17. Perbandingan hasil HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 (time lag Cara USGS) dengan hidrograh hasil pengukuran



Gambar 18. Pengaruh perubahan Faktor Pengembangan DAS penuh terhadap hidrograf hasil HSS ITB-1 dan HSS ITB-2, mulai dari kondisi DAS masih baik (FPD = 0), kondisi telah berkembang (FPD = 6), dan DAS telah rusak (FPD = 12)

4.5 Hidrograf banjir DAS Cipunagara di lokasi rencana Waduk Sadawarna

Dalam kasus ini akan ditunjukkan perbedaan antara hidrograf banjir DAS Cipunagara di lokasi rencana Waduk Sadawarna yang dibagi menjadi beberapa sub-DAS (*semi distributed model*) yang dihitung dengan HEC-HMS dengan hasil perhitungan DAS Waduk Sadawarna (*lumped model*) yang dihitung dengan cara ITB.

Data karakteristik DAS ditunjukkan pada **Tabel 16** sedang gambar skematik DAS ditunjukkan **Gambar 19**. Harga Time lag untuk tiap-tiap Sub-DAS dihitung dengan cara Snyder ($C_t=1.2, C_p=0.59$). Harga Luas DAS dan Time lag tersebut selanjutnya dimasukkan kedalam program HEC-HMS.

Penelusuran banjir dari tiap-tiap Sub-DAS melalui sungai (*River Routing*) pada program HEC-HMS dilakukan dengan cara Muskingum-Cunge Standar untuk bentuk sungai prismatic, kemiringan talud sungai H:V=2:1, kekasaran Manning 0.033 sedang data-data sungai lainnya ditunjukkan pada **Tabel 17**.

Distribusi hujan efektif yang digunakan ditunjukkan pada **Tabel 18**, dimana terlihat bahwa distribusi hujan pada **Tabel 18** dimulai pada jam ke 6.

Hidrograf banjir PMF hasil perhitungan HEC-HMS untuk sub-DAS Cipunagara hulu ditunjukkan pada **Gambar 20**. Pada **Gambar 21** ditunjukkan debit banjir dititik J3 yaitu pertemuan antara sungai Cipunagara dan Cikarontang. Akhirnya debit banjir di lokasi titik J1, yaitu lokasi Rencana Waduk Sadawarna ditunjukkan pada **Gambar 22**. Pembaca dapat memeriksa hasil-hasil perhitungan tersebut dengan data-data yang diberikan pada **Tabel 17** sampai dengan **Tabel 18**.

Tabel 16. Karakteristik DAS Waduk Sadawarna

Sub-DAS	Area (km ²)	L (km)	Lg	T _L
Cipunagara-1	110.451	24.264	12.132	6.605
Cipunagara-2	65.582	17.354	8.677	5.401
Cikaramas	111.457	11.229	5.614	4.160
Cikarruntang	43.569	14.202	7.101	4.789
DAS Sadawarna	331.058	41.618	20.809	9.129

Tabel 17. Karakteristik ruas sungai

Ruas Sungai	Panjang Ruas Sungai (m)	Kemiringan Dasar Sungai	Lebar Dasar Sungai (m)	Kemiringan Talud (H : V)	Kekasaran Manning	Bentuk Penampang
C1	3000.000	0.001	40	2	0.033	PRISM
C2	6000.000	0.001	40	2	0.033	PRISM
C3	6566.398	0.001	40	2	0.033	PRISM
C4	4787.652	0.001	20	2	0.033	PRISM
C5	12132.000	0.002	20	2	0.033	PRISM
C6	5614.000	0.002	20	2	0.033	PRISM
C7	7101.000	0.002	20	2	0.033	PRISM

Perhitungan dengan cara ITB dilakukan dengan data DAS Waduk Sadawarna dianggap hanya terdiri dari satu DAS tunggal dengan luas 331.058 km² dan panjang sungai 41.618 km. Perbandingan hasil perhitungan program HEC-HMS (semi distributed model) dan Cara ITB (lumped model) ditunjukkan pada **Gambar 23**.

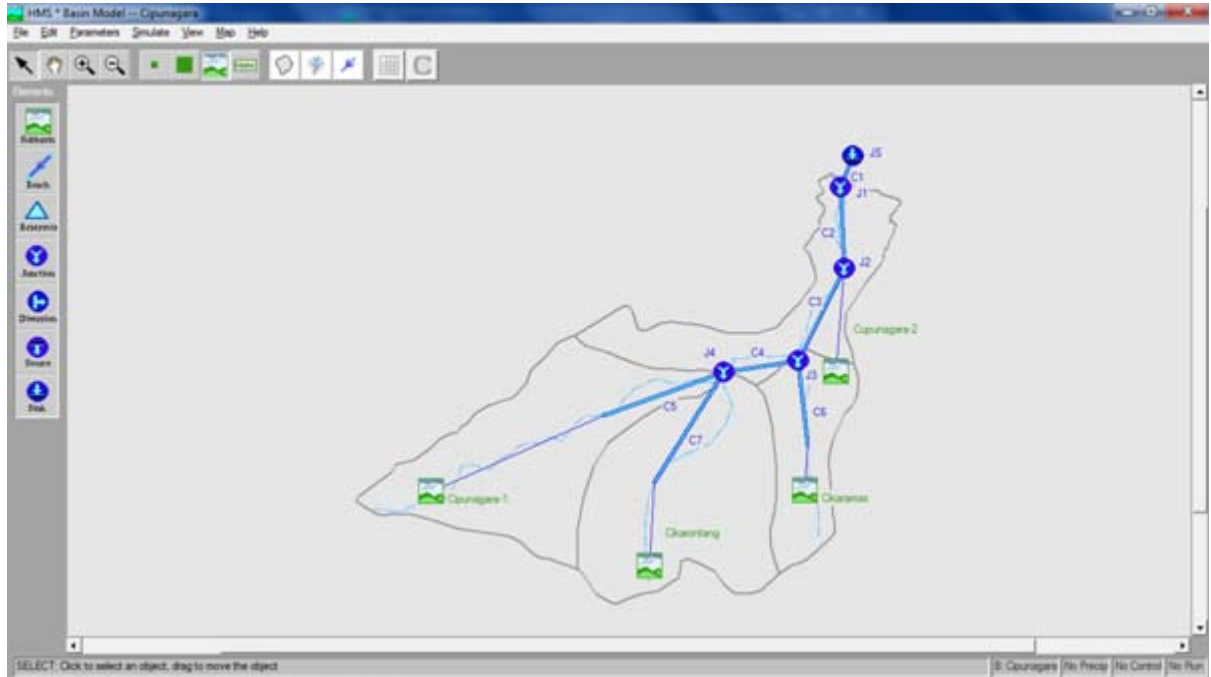
Dari **Gambar 23** terlihat bahwa perhitungan banjir terdistribusi dengan Software HEC-HMS, ternyata memberikan waktu puncak banjir yang lebih awal dan debit puncak banjir yang lebih tinggi dibanding hasil perhitungan banjir DAS tunggal (lumped) dengan cara ITB. Hasil ini wajar karena karena Sub-DAS Cikaramas dan Sub-DAS Cipunagara Hilir memiliki pusat Sub-DAS yang berjarak lebih dekat ke lokasi rencana waduk Sadawarna, maka puncak banjir dari kedua Sub-DAS tersebut akan datang lebih awal dibanding banjir yang datang dari Sub-DAS Cikarontang dan Cipunagara Hulu.

Untuk melihat pengaruh perubahan harga Koefisien Ct, misalkan harga Ct dirubah menjadi 0.83. Tabel perhitungan untuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 untuk harga Ct=1.00 dan Ct=0.83, ditunjukkan pada **Tabel 19** dan **Tabel 20**. Hasil superposisi hidrograf untuk distribusi hujan pada **Tabel 18** ditunjukkan pada **Gambar 23** dan **Gambar 24**. Dari hasil pada **Gambar 23** dan **Gambar 24** terlihat bahwa dengan merubah harga Ct dari 1.0 menjadi 0.83 mengakibatkan waktu puncak banjir terjadi lebih awal. Akibatnya pada **Gambar 24** terlihat bahwa kurva hidrograf banjir hasil perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 menjadi lebih mendekati hasil perhitungan dengan software HEC-HMS.

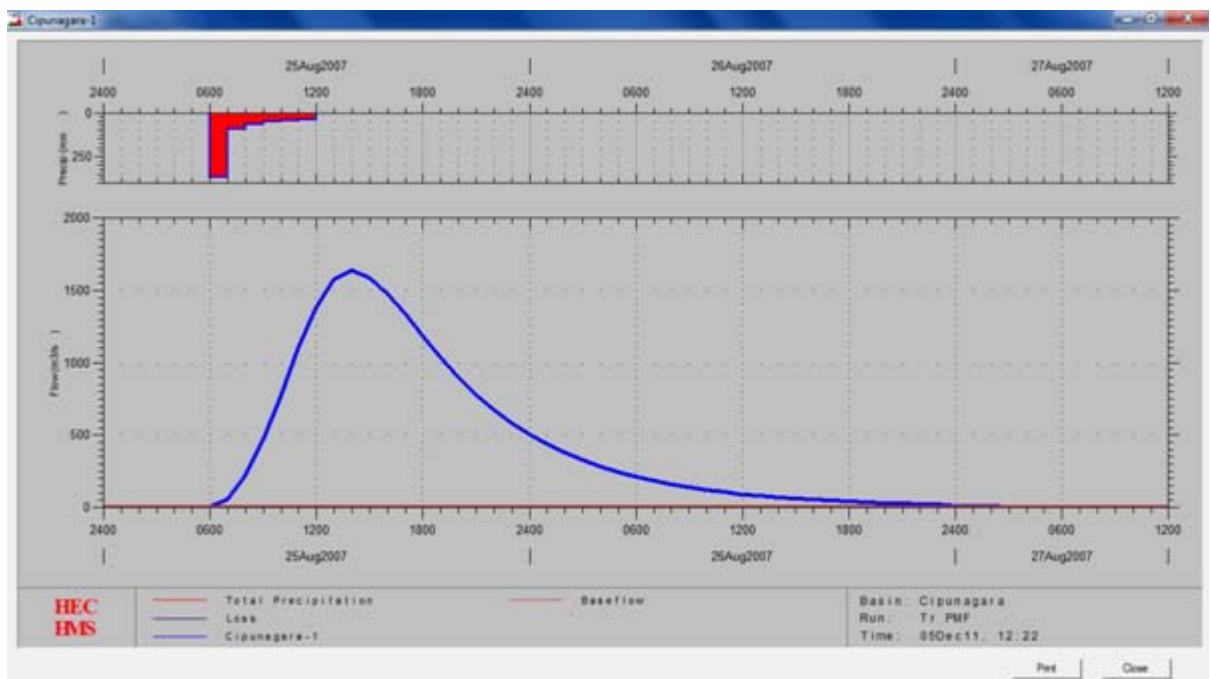
Jika kurva hidrograf hasil superposisi HSS ITB-1, HSS ITB-2 dan HEC-HMS pada **Gambar 24** diintegrasikan secara numerik terhadap waktu, akan didapat volume hidrograf banjir untuk masing-masing hidrograf. Jika masing-masing volume hidrograf tersebut dibagi dengan luas DAS, maka akan didapat tinggi limpasan (Direct Runoff) yang jika dihitung rasionya terhadap Tinggi Total Hujan efektif maka hasilnya harus mendekati 100% dimana rasio hasil

Tabel 18. Distribusi hujan rencana

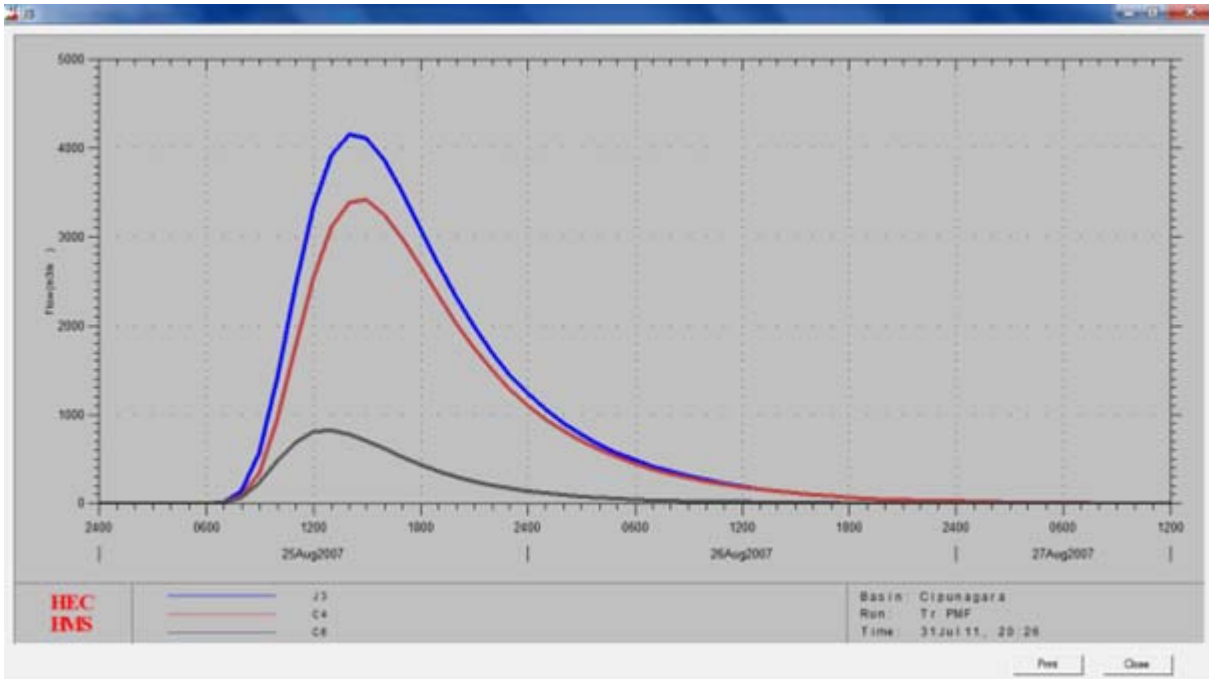
Jam	6	7	8	9	10	11
Reff (mm)	370.60	92.85	65.66	52.34	44.01	38.20
Inf (mm)	14.63	7.28	4.57	3.58	3.21	3.08



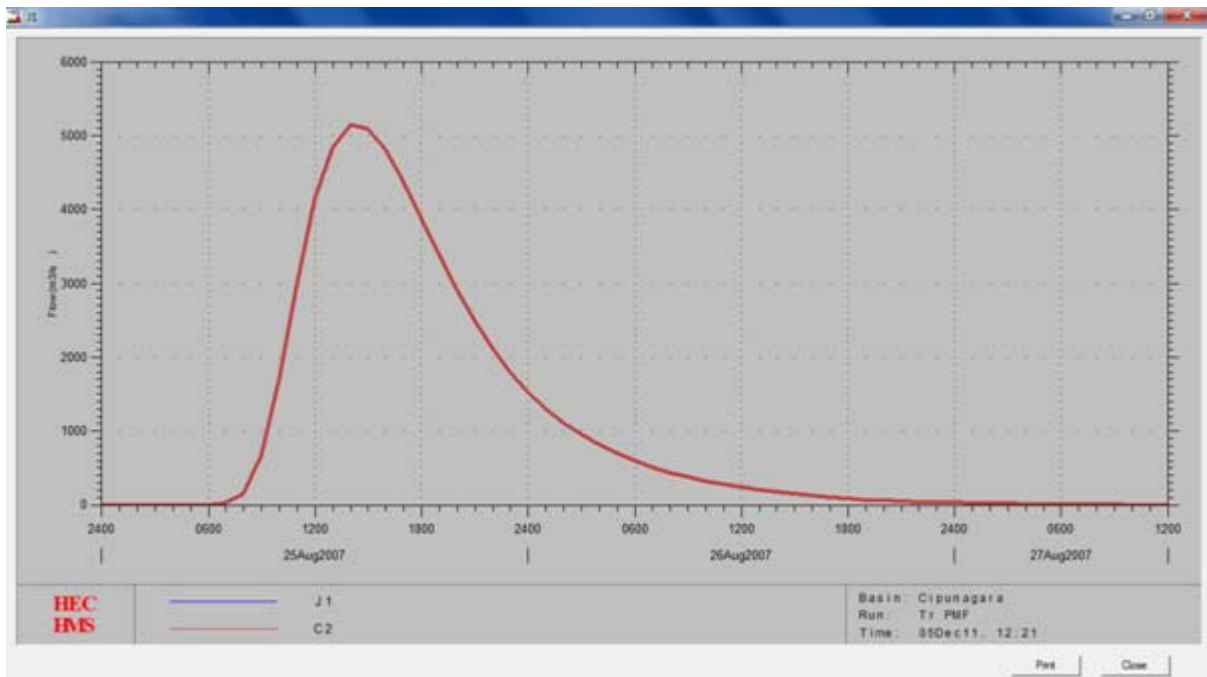
Gambar 19. Model HEC-HMS DAS Cipunagara di lokasi Bendungan Sadawarna



Gambar 20. Hidrograf Sub-DAS Cipunagara Hulu (PMF)



Gambar 21. Hidrograf di pertemuan Cipunagara dan Cikarontang (PMF)



Gambar 22. Hidrograf di lokasi Rencana Bendungan Sadawarna (PMF)

Tabel 19. Tabel perhitungan HSS ITB-1 untuk DAS Cipunagara

I. Karakteristik DAS dan Hujan			
1. Nama Sungai	=	Cipunegara-Sadawarna	
2. Luas daerah aliran Sungai (A)	=	331.58	Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=	41.62	Km
4. Kemiringan Sungai Utama	=	111.00	m/km
5. Kondisi DAS	=	3.00	
6. Tinggi Hujan Satun (R)	=	1.00	mm
7. Durasi Hujan Satuan (Tr)	=	1.00	Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (Tp) Dan Waktu Dasar (Tb)			
1. Koefisien waktu (C _t)	=	0.82	
2. Time Lag --> Standar		-	
a) Standar			
TL = $C_t * 0.81225 * L^{0.6}$		6.238	Jam
TP = TL + 0.5 Tr		6.738	Jam
3. Waktu Puncak			
Tp	=	6.738	Jam
4. Waktu Dasar			
T _B /T _P	=	10	(Ratio T _B /T _P)
T _B	=	67.38	Jam
III. Debit Puncak (QP)			
1. Cp. Koefisien Puncak (C _p)	=	1.000	
2. Alpha	=	1.500	
3. Luas HSS (Jumlah Kolom-4 Bag IV)	=	1.614	
4. Q _p = $1/(3.6T_p) * (A_{DAS}/A_{HSS})$	=	8.471	m ³ /s
5. Vol Hujan (=R*A _{DAS} *1000)	=	331,580	m ³
6. Vol HSS (V _{HSS})	=	331,580	m ³
7. Tinggi Limpasan	=	1.000	mm

IV. Perhitungan HSS ITB-1 :

T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	$t=T/T_p$	$q=Q/Q_p$	A	$Q(m^3/s)$	$V(m^3)$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.000
1.00	0.14840	0.00066	0.00005	0.00555	9.993
2.00	0.29681	0.08216	0.00615	0.69598	1262.752
3.00	0.44521	0.35451	0.03240	3.00286	6657.908
4.00	0.59361	0.65881	0.07519	5.58043	15449.919
5.00	0.74201	0.87411	0.11374	7.40417	23372.282
6.00	0.89042	0.97997	0.13758	8.30088	28269.097
6.74	1.00000	1.00000	0.10849	8.47052	22292.106
7.00	1.03882	0.99783	0.03878	8.45211	7967.614
8.00	1.18722	0.95668	0.14503	8.10358	29800.239
9.00	1.33562	0.88117	0.13637	7.46396	28021.570
10.00	1.48403	0.78915	0.12394	6.68449	25467.203
11.00	1.63243	0.69245	0.10994	5.86542	22589.824
12.00	1.78083	0.59837	0.09578	5.06849	19681.027
13.00	1.92923	0.51101	0.08232	4.32854	16914.660
14.00	2.07764	0.43239	0.07000	3.66257	14384.001
15.00	2.22604	0.36316	0.05903	3.07619	12129.763
16.00	2.37444	0.30319	0.04944	2.56820	10159.895
17.00	2.52284	0.25187	0.04119	2.13349	8463.037
18.00	2.67125	0.20838	0.03415	1.76507	7017.404
19.00	2.81965	0.17180	0.02821	1.45519	5796.465
20.00	2.96805	0.14122	0.02323	1.19618	4772.473
21.00	3.11645	0.11579	0.01907	0.98078	3918.535
22.00	3.26486	0.09473	0.01562	0.80241	3209.756
23.00	3.41326	0.07736	0.01277	0.65524	2623.773
24.00	3.56166	0.06306	0.01042	0.53416	2140.923
25.00	3.71006	0.05133	0.00849	0.43483	1744.184
26.00	3.85847	0.04173	0.00691	0.35350	1418.993
27.00	4.00687	0.03389	0.00561	0.28706	1153.012
28.00	4.15527	0.02749	0.00455	0.23286	935.861
29.00	4.30367	0.02228	0.00369	0.18873	758.862
30.00	4.45208	0.01804	0.00299	0.15283	614.797
31.00	4.60048	0.01460	0.00242	0.12367	497.687
32.00	4.74888	0.01181	0.00196	0.10000	402.596
33.00	4.89728	0.00954	0.00158	0.08081	325.461
34.00	5.04569	0.00771	0.00128	0.06527	262.949
35.00	5.19409	0.00622	0.00103	0.05269	212.328
36.00	5.34249	0.00502	0.00083	0.04251	171.368
37.00	5.49089	0.00405	0.00067	0.03429	138.246
38.00	5.63930	0.00326	0.00054	0.02764	111.480
39.00	5.78770	0.00263	0.00044	0.02228	89.861
40.00	5.93610	0.00212	0.00035	0.01795	72.409
Luas H.S			1.6136788	Volume H.S	331580
				Limpasan	1.000

Catatan :

- Kolom-1 : Interval Waktu (Jam) yang diberikan $\rightarrow T_i = T_{i-1} + T_r$
- Kolom-2 : Absis (waktu tak berdimensi) $t=T/T_p \rightarrow$ Kolom-1 / T_p
- Kolom-3 : Ordinat debit $q=Q/Q_p$ didapat dari kurva HSS (tak berdimensi)
- Kolom-4 : Luas segmen HSS $\hat{A}_i = \frac{1}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \times (q_i + q_{i-1})$ (tak berdimensi)
: Jumlah seluruh Kolom-4 = A_{HSS} (Penting untuk menghitung Q_p)
- Kolom-5 : Ordinat debit HSS berdimensi $\hat{Q}_i = q_i \times Q_p$ (Kolom 3 x Q_p)
- Kolom-6 : Luas segmen kurva HSS $\hat{A}_i = \frac{1}{2} \times 3600 \times (T_i - T_{i-1}) \times (Q_i + Q_{i-1})$
: Jumlah seluruh Kolom-6 (V_{HSS}) jika dibagi ($A_{DAS} / 1000$) harus = 1

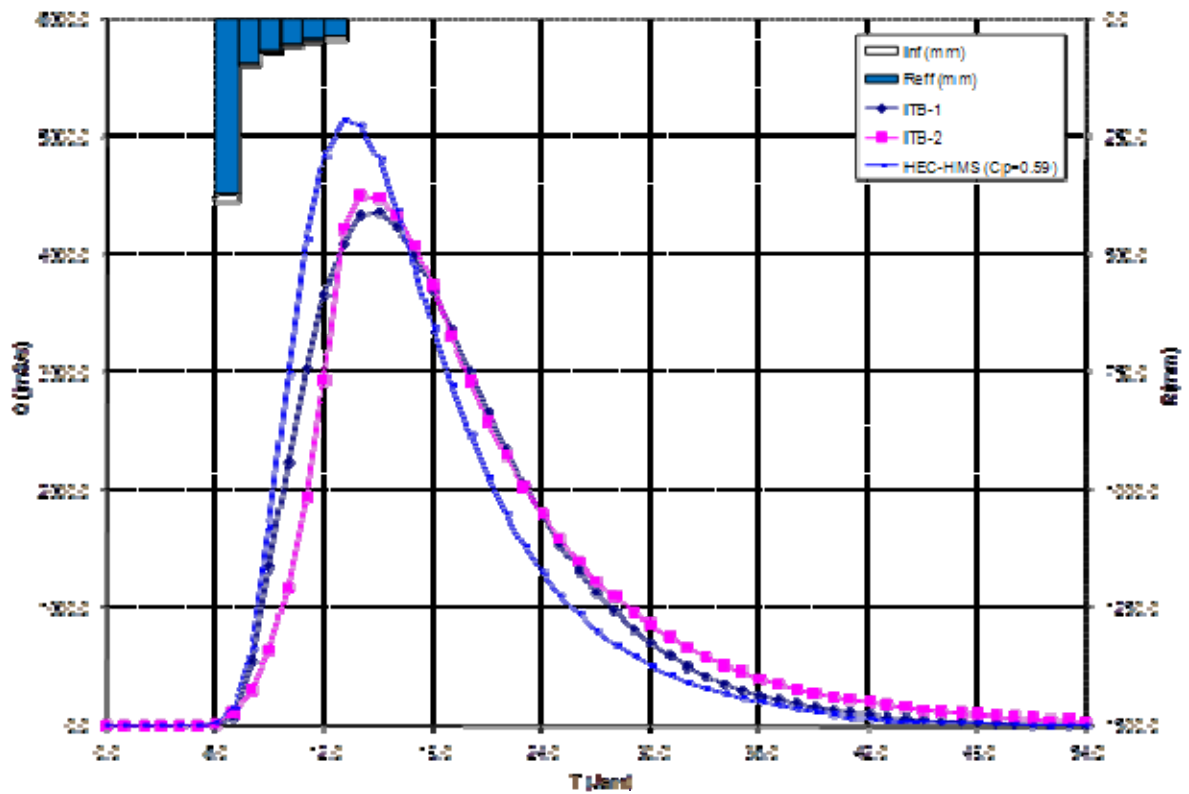
Tabel 20. Tabel perhitungan HSS ITB-2 untuk DAS Cipunagara

I. Karakteristik DAS dan Hujan			
1. Nama Sungai	=	Cipunegara-Sadawarna	
2. Luas daerah aliran Sungai (A)	=	331.58	Km ²
3. Panjang Sungai Utama (L)	=	41.62	Km
4. Kemiringan Sungai Utama	=	111.00	m/km
5. Kondisi DAS	=	3.00	
6. Tinggi Hujan Satun (R)	=	1.00	mm
7. Durasi Hujan Satuan (Tr)	=	1.00	Jam
II. Perhitungan Waktu Puncak (Tp) Dan Waktu Dasar (Tb)			
1. Koefisien waktu (C _t)	=	0.82	
2. Time Lag -->	Standar		-
a) Standar			
TL = $C_t * 0.81225 * L^{0.6}$		6.238	Jam
TP = TL + 0.5 Tr		6.738	Jam
3. Waktu Puncak			
Tp	=	6.738	Jam
4. Waktu Dasar			
T _B /T _P	=	10	(Ratio T _B /T _P)
T _B	=	67.38	Jam
III. Debit Puncak (QP)			
1. Cp. Koefisien Puncak (C _p)	=	1.000	
2. Alpha	=	2.500	
3. Betha	=	1.000	
4. Luas HSS (Numerik)	=	1.292	
5. Qp = $1/(3.6T_p) * (A_{DAS}/A_{HSS})$	=	10.583	m ³ /s
6. Vol Hujan pada DAS (V _{DAS})	=	331,580	m ³
7. Vol Unit Hidrograph	=	331,580	m ³
8. Tinggi Limpasan	=	1.000	mm

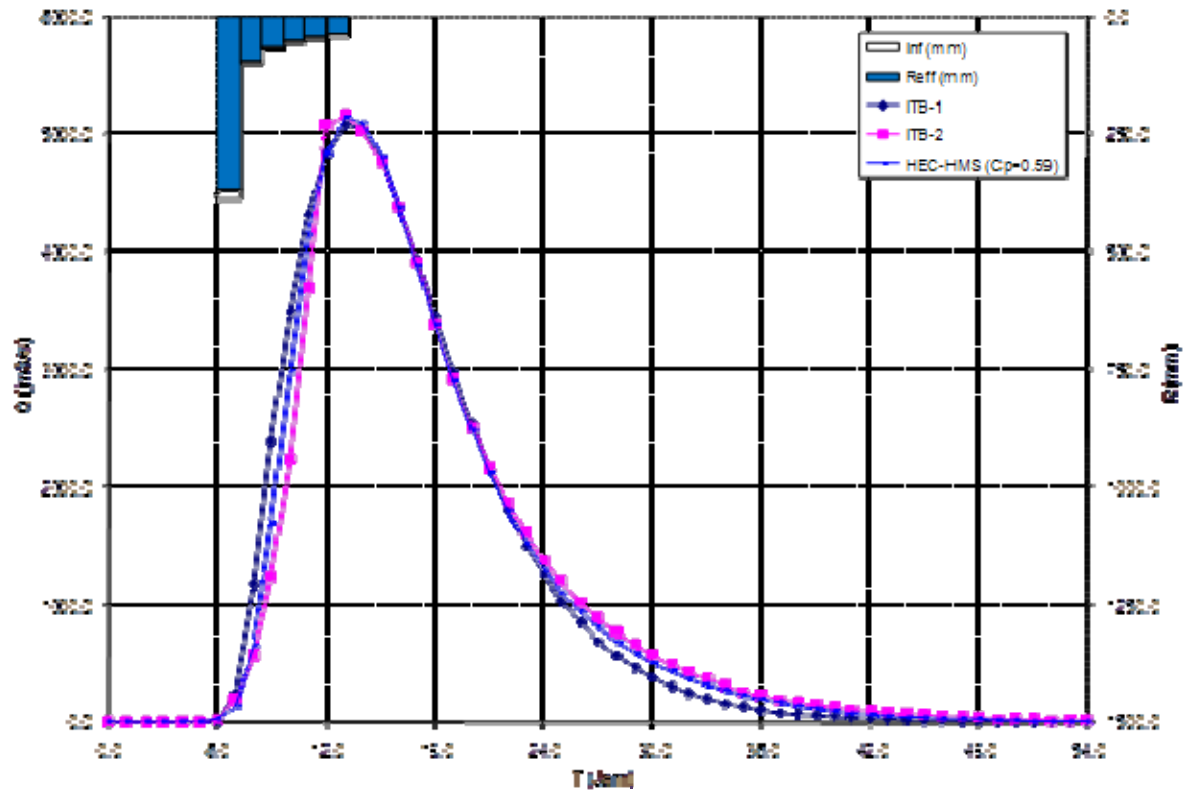
IV. Perhitungan HSS ITB-2 :

T (jam)	HSS Tak berdimensi			HSS berdimensi	
	t=T/Tp	q=Q/Qp	A	Q(m ³ /s)	V(m ³)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
0.00	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.000
1.00	0.14840	0.00848	0.00063	0.08978	161.609
2.00	0.29681	0.04799	0.00419	0.50789	1075.808
3.00	0.44521	0.13225	0.01337	1.39958	3433.435
4.00	0.59361	0.27149	0.02996	2.87305	7690.727
5.00	0.74201	0.47427	0.05534	5.01901	14205.713
6.00	0.89042	0.74814	0.09070	7.91720	23285.174
6.74	1.00000	1.00000	0.09578	10.58254	24589.370
7.00	1.03882	0.96193	0.03808	10.17962	9775.370
8.00	1.18722	0.82926	0.13291	8.77569	34119.569
9.00	1.33562	0.71489	0.11458	7.56538	29413.936
10.00	1.48403	0.61630	0.09878	6.52200	25357.284
11.00	1.63243	0.53130	0.08515	5.62251	21860.110
12.00	1.78083	0.45803	0.07341	4.84708	18845.252
13.00	1.92923	0.39486	0.06328	4.17859	16246.191
14.00	2.07764	0.34040	0.05456	3.60229	14005.582
15.00	2.22604	0.29345	0.04703	3.10548	12073.989
16.00	2.37444	0.25298	0.04055	2.67718	10408.793
17.00	2.52284	0.21809	0.03495	2.30796	8973.254
18.00	2.67125	0.18801	0.03013	1.98965	7735.699
19.00	2.81965	0.16208	0.02598	1.71525	6668.823
20.00	2.96805	0.13973	0.02239	1.47869	5749.086
21.00	3.11645	0.12046	0.01931	1.27475	4956.195
22.00	3.26486	0.10385	0.01664	1.09894	4272.657
23.00	3.41326	0.08952	0.01435	0.94738	3683.389
24.00	3.56166	0.07718	0.01237	0.81672	3175.391
25.00	3.71006	0.06653	0.01066	0.70408	2737.454
26.00	3.85847	0.05736	0.00919	0.60698	2359.915
27.00	4.00687	0.04945	0.00792	0.52327	2034.445
28.00	4.15527	0.04263	0.00683	0.45110	1753.863
29.00	4.30367	0.03675	0.00589	0.38889	1511.977
30.00	4.45208	0.03168	0.00508	0.33525	1303.451
31.00	4.60048	0.02731	0.00438	0.28902	1123.685
32.00	4.74888	0.02354	0.00377	0.24916	968.711
33.00	4.89728	0.02030	0.00325	0.21479	835.110
34.00	5.04569	0.01750	0.00280	0.18517	719.935
35.00	5.19409	0.01508	0.00242	0.15963	620.644
36.00	5.34249	0.01300	0.00208	0.13762	535.048
37.00	5.49089	0.01121	0.00180	0.11864	461.256
38.00	5.63930	0.00966	0.00155	0.10227	397.641
39.00	5.78770	0.00833	0.00134	0.08817	342.800
40.00	5.93610	0.00718	0.00115	0.07601	295.523
		Luas HSS	1.2916268	Volume	331580
				Tinggi Limpasan	1.000

- Catatan :
- Kolom-1 : Interval Waktu (Jam) yang diberikan $\rightarrow T_i = T_{i-1} + Tr$
 - Kolom-2 : Absis (waktu tak berdimensi) $t = T/Tp \rightarrow$ Kolom-1 /Tp
 - Kolom-3 : Ordinat debit $q = Q/Qp$ didapat dari kurva HSS (tak berdimensi)
 - Kolom-4 : Luas segmen HSS $\hat{A}_i = \frac{1}{2} \times (t_i - t_{i-1}) \times (q_i + q_{i-1})$ (tak berdimensi)
 - : Jumlah seluruh Kolom-4 = A_{HSS} (Penting untuk menghitung Qp)
 - Kolom-5 : Ordinat debit HSS berdimensi $\hat{Q}_i = q_i \times Qp$ (Kolom 3 x Qp)
 - Kolom-6 : Luas segmen kurva HSS $\hat{A}_i = \frac{1}{2} \times 3600 \times (T_i - T_{i-1}) \times (Q_i + Q_{i-1})$
 - : Jumlah seluruh Kolom-6 (V_{HSS}) jika dibagi ($A_{DAS} / 1000$) harus = 1



Gambar 23. Perbandingan hasil HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 (Lumped, time lag Cara Standard C = 1.00, Cp = 1.00) dengan hidrograf hasil program HEC-HMS (semi-distributed, Snyder, Cp = 0.59)



Gambar 24. Perbandingan hasil HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 (Lumped, time lag Cara Standard, Ct = 0.82, Cp = 1.0) dengan hidrograf hasil program HEC-HMS (semi-distributed, Snyder, Cp = 0.59)

HSS ITB-1 = 99.98%, rasio untuk HSS ITB-2 = 99.59% dan rasio untuk hasil HEC-HMS = 99.35%.

Dari **Gambar 23** terlihat bahwa perhitungan banjir terdistribusi dengan Software HEC-HMS, ternyata memberikan waktu puncak banjir yang lebih awal dan debit puncak banjir yang lebih tinggi dibanding hasil perhitungan banjir DAS tunggal (lumped) dengan cara ITB. Hasil ini wajar karena karena Sub-DAS Cikaramas dan Sub-DAS Cipunagara Hilir memiliki pusat Sub-DAS yang berjarak lebih dekat ke lokasi rencana waduk Sadawarna, maka puncak banjir dari kedua Sub-DAS tersebut akan datang lebih awal dibanding banjir yang datang dari Sub-DAS Cikarontang dan Cipunagara Hulu.

Untuk melihat pengaruh perubahan harga Koefisien Ct, misalkan harga Ct dirubah menjadi 0.83. Tabel perhitungan untuk HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 untuk harga Ct=1.00 dan Ct=0.83, ditunjukkan pada **Tabel 19** dan **Tabel 20**. Hasil superposisi hidrograf untuk distribusi hujan pada **Tabel 18** ditunjukkan pada **Gambar 23** dan **Gambar 24**. Dari hasil pada **Gambar 23** dan **Gambar 24** terlihat bahwa dengan merubah harga Ct dari 1.0 menjadi 0.83 mengakibatkan waktu puncak banjir terjadi lebih awal. Akibatnya pada **Gambar 24** terlihat bahwa kurva hidrograf banjir hasil perhitungan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 menjadi lebih mendekati hasil perhitungan dengan software HEC-HMS.

Jika kurva hidrograf hasil superposisi HSS ITB-1, HSS ITB-2 dan HEC-HMS pada **Gambar 24** dintegrasikan secara numerik terhadap waktu, akan didapat volume hidrograf banjir untuk masing-masing hidrograf. Jika masing-masing volume hidrograf tersebut dibagi dengan luas DAS, maka akan didapat tinggi limpasan (Direct Runoff) yang jika dihitung rasionya terhadap Tinggi Total Hujan efektif maka hasilnya harus mendekati 100% dimana rasio hasil HSS ITB-1 = 99.98%, rasio untuk HSS ITB-2 = 99.59% dan rasio untuk hasil HEC-HMS = 99.35%.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil-hasil yang telah diuraikan pada bagian sebelumnya, terdapat beberapa kesimpulan dan saran sebagai berikut :

1. Perhitungan banjir dengan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 memerlukan data DAS minimal dan bentuk kurva hidrograf satuan yang relatif sederhana, namun hasilnya cukup akurat yang tercermin dari rasio tinggi limpasan terhadap tinggi hujan mendekati 100 persen.
2. Prosedure perhitungan telah dilengkapi dengan koefisien Ct dan Cp yang diperlukan untuk proses kalibrasi terhadap hasil hidrograf lain hasil pengukuran atau hasil perhitungan dengan cara

lain. Ct dimaksudkan untuk merubah harga Tp dan Cp dimasukkan untuk merubah harga Qp

3. Untuk selanjutnya prosedur perhitungan ini perlu dituangkan dalam bentuk program komputer (FORTRAN, Pascal, C++, Delphi dan lain-lain), agar dapat digunakan untuk menghitung hidrograf banjir dengan input hujan dalam bentuk time series yang sangat panjang yang proses super posisinya sangat sulit, jika dilakukan dengan menggunakan program Spread Sheet (Microsoft Excell).
4. HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 diharapkan dapat melengkapi hidrograf satuan sintetis (HSS) yang sudah ada dan dapat digunakan untuk menghitung debit banjir rencana yang diperlukan berbagai kegiatan perencanaan sumber daya air di Indonesia.

6. Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Penelitian, Institut Teknologi Bandung atas dukungan dana untuk penelitian "Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) untuk Perhitungan Hidrograf Banjir Rencana. Studi Kasus Pengembangan HSS ITB-1 Dan HSS ITB-2". yang diberikan melalui Program Riset Peningkatan Kapasitas ITB 2010.

Daftar Pustaka

- Harto, S., 1993, *Analisis Hidrologi*, Jakarta: P.T.Gramedia Pustaka Utama.
- Hydraulic Engineering Circular No. 22, Third Edition, 2009, *Urban Drainage Design Manual*, U.S. Department of Transportation.
- Lasidi, Edijatno and Anwar, N., 2003, Hidrograf Satuan Sintetik αβγ (HSS-ABG), *Prosiding Seminar PIT XX HATHI*, 20-21 Oktober.
- Lily M.L, 2008, *Studi Pengelolaan Banjir Kali Sampean dengan Peningkatan Kapasitas Sungai pada Ruas Bendung Sampean Lama – Muara*.
- Natakusumah, D.K., 2009, *Prosedur Umum Penentuan Hidrograf Satuan Sintetis untuk Perhitungan Hidrograf Banjir Rencana*, Bandung: *Seminar Nasional Teknik Sumber Daya Air, Peran Masyarakat, Pemerintah dan Swasta sebagai Jejaring, dalam Mitigasi Bahaya Banjir*, 11 Agustus.
- Natakusumah, D.K., Hatmoko, W., Harlan, D., 2010, *Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) untuk Perhitungan Hidrograf Banjir Rencana. Studi Kasus Pengembangan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2*. Bandung: *Seminar Nasional Teknik Sumber Daya Air*, 10 November.

- Natakusumah, D.K., Hatmoko, W., Harlan, D., 2010, Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) untuk Perhitungan Banjir Rencana. Studi Kasus Penerapan HSS ITB-1 dan HSS ITB-2 dalam Penentuan Debit Banjir untuk Perencanaan Pelimpah Bendungan Besar. Bali: *Seminar Nasional Bendungan Besar*.
- Natakusumah, D.K., Hatmoko, W., Harlan, D., 2011, A General Procedure for Development Of ITB-1 and ITB-2 Synthetic Unit Hydrograph Based on Mass Concervation Principle, Jakarta: *International Seminar on Water Related Risk Management*, July.
- Ramírez, J.A., 2000, *Prediction and Modeling of Flood Hydrology and Hydraulics*. Ellen Wohl: Cambridge University Press, Chapter 11 of *Inland Flood Hazards: Human, Riparian and Aquatic Communities* Eds.
- Review Design Bendung Cibatarua di Kabupaten Garut, 2009, Konsep Laporan Akhir, PT. Aztindo Rekaperdana.
- Subramanya, K., 1984, *Engineering Hydrology*, New Delhi: McGraw-Hill.
- Soemarto, C.D., 1995, *Hidrologi Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Triatmodjo, B., 2008, *Hidrologi Terapan*, Yogyakarta: Penerbit Beta Offset.
- Wanielista and Martin, P., 1997, *Hidrologi Water Quantity and Quality Control*, Canada: John Wiley & Sons. Inc,