



Hidrograf Satuan Sintetis Cara ITB dengan Faktor Debit Puncak (K_p) Berharga Eksak dan Numerik serta Durasi Hujan Satuan (T_r) yang Dinormalkan

Dantje Kardana Natakusumah

Kelompok Keahlian Teknik Sumber Daya Air

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung

^{*}dknpublic@gmail.com

Received: 23 Juni 2023. Revised: 11 Juli 2024 Accepted: 26 Juli 2024

Abstract

The Synthetic Unit Hydrograph (SUH) method is a very important method in water resource planning and flood discharge analysis in river basins. This method is very useful, especially for flood simulations in river basins that experience changes in land use. However, the HSS method generally has shortcomings, including difficulties in explaining the origin of peak discharge formulas and inaccuracies in comparing hydrograph volumes with effective rainfall. Additionally, there are challenges in adapting the method for different rainfall durations, and only a few methods can be calibrated. To overcome these challenges, the ITB SUH method has been developed with several innovative features. This method follows the mass conservation principle and simplifies the process of deriving peak discharge formulas, making it an effective educational tool. The ITB method combines exact and numerical approaches in calculating the Peak Discharge Factor (K_p), improving the accuracy of peak discharge estimation, which is very important in flood management. This method also introduces the Normalized Unit Rainfall Duration (T_n), a dimensionless factor that provides flexibility in adjusting the hydrograph duration, making it easier to convert to shorter durations. In addition, the ITB method includes a calibration mechanism that allows users to adjust the hydrograph with measurement values. The ITB SUH method's innovative features have been successfully demonstrated in various cases, yielding highly positive outcomes.

Keywords: *The ITB SUH, exact and numerical peak rate factor (K_p), computational hydrology*

Abstrak

Metode Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) adalah metode yang sangat penting dalam perencanaan sumber daya air dan analisis debit banjir di daerah aliran sungai (DAS). Metode ini sangat berguna, terutama untuk simulasi banjir di DAS yang mengalami perubahan penggunaan lahan. Metode HSS umumnya memiliki kekurangan, antara lain kesulitan dalam menjelaskan asal usul formula debit puncak dan ketidakakuratan dalam membandingkan volume hidrograf dengan curah hujan efektif. Selain itu, ada tantangan dalam menyesuaikan metode ini untuk durasi hujan yang berbeda-beda, dan hanya beberapa metode yang dapat dikalibrasi. Untuk mengatasi tantangan-tantangan ini, metode SUH ITB telah dikembangkan dengan beberapa fitur inovatif. Metode ini mengikuti prinsip konservasi massa dan menyederhanakan proses penurunan rumus debit puncak, sehingga menjadi alat pendidikan yang efektif. Metode ITB menggabungkan pendekatan eksak dan numerik dalam menghitung Faktor Debit Puncak (K_p), meningkatkan akurasi estimasi debit puncak yang sangat penting dalam manajemen banjir. Metode ini juga memperkenalkan Durasi Hujan Satuan Ternormalisasi (T_n), sebuah faktor tanpa dimensi yang memberikan fleksibilitas dalam menyesuaikan durasi hidrograf, memudahkan konversi ke durasi yang lebih pendek. Selain itu, metode ITB termasuk mekanisme kalibrasi yang memungkinkan pengguna menyesuaikan hidrograf dengan nilai pengukuran. Fitur-fitur inovatif dari metode HSS ITB telah berhasil ditampilkan melalui berbagai kasus dengan hasil yang sangat memuaskan.

Kata kunci: *HSS ITB, faktor debit puncak (K_p) eksak dan numerik, komputasi hidrologi*

Pendahuluan

Estimasi banjir merupakan aspek yang sangat penting dalam perencanaan, desain, dan operasi proyek sumber daya air. Ketika data historis debit banjir yang mencakup periode waktu yang panjang (lebih dari 20 tahun) tersedia, banjir desain dapat dievaluasi melalui analisis statistik. Di banyak wilayah, termasuk Indonesia, data curah hujan dan aliran sering kali tidak memadai untuk menentukan hidrograf satuan di Daerah Aliran Sungai (DAS). Kurangnya stasiun pengukuran di DAS menjadikan sulit untuk mengumpulkan data aliran sungai dan curah hujan yang diperlukan dalam perencanaan dan desain. Ketika data debit yang terukur untuk jangka waktu yang lama tidak tersedia, digunakanlah metode Hidrograf Satuan Sintetis atau disingkat HSS.

Konsep HSS pertama kali diusulkan oleh Sherman pada tahun 1932. Sherman memperkenalkan konsep 'kelebihan hujan' melalui metode grafik satuan. Snyder (1938) juga memberikan kontribusi yang signifikan dalam mengembangkan dan memperbaiki konsep grafik satuan sintetis di tahun-tahun berikutnya. Baik Sherman maupun Snyder memainkan peran penting dalam memajukan pemahaman kita dan penerapan praktis metoda hidrograf satuan sintetis.

Metode hidrograf satuan sintetis yang umum digunakan di Indonesia namun dikembangkan di luar negeri meliputi metode SCS, Alexeyev, dan Nakayasu. Metode perhitungan hidrograf satuan sintetis pertama yang dikembangkan di Indonesia adalah metode HSS Gama-1 yang dikembangkan tahun 1993 oleh Sri Harto di Universitas Gajah Mada. Kemudian tahun 2003, metode HSS $\alpha\beta\gamma$ dikembangkan di ITS oleh Lasidi dkk. Pada tahun 2008 Lily Montarlich Limantara mengembangkan metode HSS Limantara di Universitas Brawijaya.

Pada tahun 2009, penulis mengembangkan metode HSS ITB yang pertama kali diperkenalkan di Seminar Nasional Teknik Sumber Daya Air di Bandung (Natakusumah, 2009). Melalui program Riset Peningkatan Kapasitas ITB pada 2010, penelitian lebih lanjut dilakukan terhadap metode ini dan hasilnya dipublikasikan dalam Jurnal Teknik Sipil ITB (Natakusumah *et al.*, 2011), serta dipresentasikan dalam seminar internasional (Natakusumah *et al.*, 2013).

Pada makalah seminar HATHI ke-31 di Padang, gagasan Faktor Debit Puncak (K_p) dihitung secara eksak dipresentasikan Natakusumah (2014). Pada Seminar Internasional HATHI ke-7 di Surabaya, Natakusumah, *et al.* (2021), mempresentasikan gagasan tentang normalisasi durasi hujan satuan.

Hingga saat ini, belum ada publikasi dalam jurnal nasional maupun internasional yang membahas faktor K_p dan normalisasi durasi hujan satuan.

Beberapa peneliti di Indonesia yang membuat tesis atau disertasi tentang HSS antara lain adalah Abid (2016). Tunas (2017), Sulistyowati & Jayadi (2017), Aini (2020). Peter (2018). Pengembangan model HSS DPMA-IOH dilakukan oleh Ginting, dan Utaminingsih (2020), Beberapa peneliti yang tercatat telah menggunakan metode perhitungan HSS dari ITB antara lain Mashuri, & Kiranaratri, (2019), Saidah *et al.* (2022), Rahman *et al.* (2022).

Fitur inovatif yang merupakan unsur kebaruan (novelty) dari Metode HSS ITB terletak pada pendekatannya yang unik dalam menghitung berbagai komponen dari hidrograf sebagai berikut: (1) Menyederhanakan proses penurunan rumus debit puncak: Derivasi debit puncak untuk metode HSS lainnya sering kali sulit diikuti dan tetap menjadi misteri. Derivasi langsung dari Metode HSS ITB menjadikannya alat pendidikan yang sangat baik untuk mengajarkan cara membuat hidrograf satuan sintetis. Kesederhanaannya memungkinkan para insinyur memahami prinsip dasar, dan aplikasi teori hidrograf satuan sintetis. (2) Faktor K_p eksak dan numerik: Metode HSS ITB mengintegrasikan metode eksak dan numerik untuk menghitung K_p . Ini memungkinkan estimasi debit puncak yang lebih tepat. Metode hidrograf satuan sintetis lainnya biasanya hanya menyediakan debit puncak eksak atau referensi, dan tidak ada debit puncak yang dihitung secara independen untuk perbandingan. (3) Durasi curah hujan satuan ternormalisasi (T_n): Penyertaan durasi curah hujan satuan ternormalisasi $T_n = T_r/T_p$, yang tanpa dimensi, memungkinkan penyesuaian durasi hidrograf yang lebih pendek atau lebih panjang dari 1 jam. Pendekatan ini memungkinkan konversi yang nyaman dari durasi curah hujan satuan menjadi durasi kurang dari 1 jam, seperti $\frac{1}{2}$ jam atau $\frac{1}{4}$ jam. (4) Hasil dapat dikalibrasi: Metode HSS-ITB menyediakan fleksibilitas untuk kalibrasi, memungkinkan pengguna menyesuaikan hidrograf agar sesuai dengan nilai yang diukur, meningkatkan akurasi dan aplikabilitas. Metode hidrograf satuan sintetis lainnya seperti metode Alexeyev dan Nakayasu hasilnya dapat dikalibrasi, tetapi beberapa metode seperti SCS Triangle, SCS Curvilinear, dan SCS Delmarva tidak memiliki fasilitas kalibrasi.

Metode

Untuk menghitung hidrograf satuan di suatu DAS menggunakan metode ITB, beberapa parameter penting perlu diketahui yaitu tinggi dan durasi hujan satuan, waktu puncak (T_p) dan waktu dasar (T_b),

serta faktor laju puncak (K_p) dan debit puncak (Q_p). Setelah hidrograf satuan sintetis diketahui, maka hidrograf total dapat ditemukan dengan prinsip superposisi hidrograf satuan.

Tinggi hujan satuan dan durasi hujan satuan

Tinggi hujan satuan (H_r) yang biasanya digunakan adalah 1 mm, dan durasi hujan satuan (T_r) sering kali satu jam ($T_r=1$ jam). Tinggi dan durasi hujan dapat disesuaikan sesuai kebutuhan. Contohnya, untuk interval waktu 0,5 jam, tinggi hujan per jam bisa dibagi dua dan diaplikasikan pada interval 0,5 jam. Penggunaan satuan lain seperti $H_r=1$ inci atau $T_r=0,5$ jam juga bisa dilakukan.

Time lag, waktu puncak dan waktu dasar

Dari karakteristik fisik DAS dapat dihitung sejumlah elemen penting yang menentukan bentuk hidrograf satuan. Dalam makalah ini terdapat 3 elemen yaitu, *time lag*, waktu puncak dan waktu dasar. *Time lag* untuk HSS ITB-1b digunakan Rumus Snyder ($L_c=1/2L$ dan $n=0,3$) sebagai dalam Persamaan 1. Sedangkan untuk HSS ITB-2b rumusan *time lag* yang digunakan sebagai Persamaan 2.

$$T_L = C_t \cdot 0,81225 \cdot L^{0,6} \quad (1)$$

$$T_L = C_t (0,0394L + 0,201 \cdot L^{0,5}) \quad (2)$$

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

Jika T_r adalah durasi hujan satuan, maka waktu puncak T_p didefinisikan oleh Persamaan 3. Untuk DAS berukuran sedang dan besar harga T_b teoritis berharga tak hingga, namun harga T_b yang direkomendasikan untuk digunakan adalah sebagai Persamaan 4.

$$T_p = T_L + 0,50 T_r \quad (3)$$

$$T_b = 20 \cdot T_p \quad (4)$$

Selain parameter fisik seperti T_L , T_p dan T_b yang didasarkan pada panjang sungai dan dapat diukur secara fisik, terdapat juga parameter non-fisik untuk kalibrasi waktu puncak (C_t) dan kalibrasi debit puncak (C_p) yang penting dalam proses kalibrasi.

Persamaan bentuk dasar hidrograf satuan

Seperti dijelaskan sebelumnya, bentuk dasar kurva HSS dinyatakan dalam bentuk perbandingan antara debit dengan debit puncak $q(t)=Q/Q_p$ dan perbandingan waktu dengan waktu puncak $t=T/T_p$ sehingga didapat HSS tak bersatuan.

Kurva HSS ITB-1b dinyatakan dengan satu persamaan ($0 \leq t < \infty$), sebagai Persamaan 5

$$q(t) = \{t \cdot \exp(1 - t)\}^{\alpha C_p} \quad \alpha=3,7 \quad (5)$$

HSS ITB-2b dinyatakan dengan dua persamaan yaitu Persamaan 6a dan Persamaan 6b.

Lengkung naik ($0 \leq t < 1$)

$$q(t) = t^\alpha \quad \alpha=2,4 \quad (6.a)$$

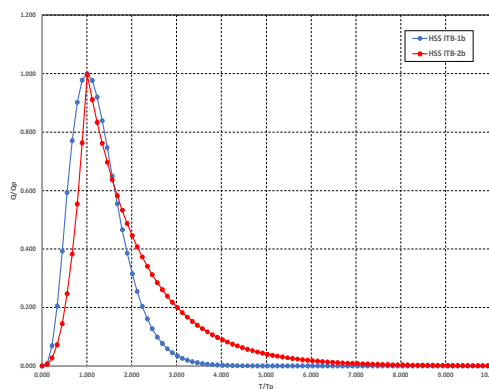
Lengkung turun ($1 \leq t < \infty$) :

$$q(t) = \exp\{(1 - t) \cdot \beta C_p\} \quad \beta=0,86 \quad (6.b)$$

Persamaan 5 dikembangkan dari model yang pertama kali diperkenalkan oleh Nash (1957), yang berdasar pada teori reservoir linear. Karena Integrasi exact persamaan ini pertama kali ditemukan oleh penulis, maka persamaan ini dijadikan sebagai persamaan untuk HSS ITB-1b. Persamaan 6 untuk HSS ITB-2b diusulkan oleh penulis dan dapat diintegrasikan dengan mudah secara manual.

Konstanta α dan β dalam persamaan 5 dan 6 dapat diubah dengan mengubah koefisien kalibrasi debit puncak C_p . Dengan menggabungkan persamaan ini dalam satu gambar, dapat diperoleh kurva HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

Pada gambar tersebut, sumbu horizontal ($t=T/T_p$) dan sumbu vertikal ($q=Q/Q_p$) menunjukkan waktu dan debit yang dinormalisasi. Nilai t berkisar antara 0 hingga 1, sementara q berkisar dari 0 hingga tak terhingga (atau hingga 20 jika $T_b/T_p=20$). Dengan mengalikan nilai-nilai pada sumbu x dan y dari kurva HSS tak bersatuan dengan T_p dan Q_p , kita dapat memperoleh kurva HSS ITB-1b dan ITB-2b yang bersatuan.



Gambar 1. Bentuk kurva HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b tak bersatuan

Catatan tentang HSS ITB-1a dan ITB-2a: Dalam beberapa publikasi sering disebut HSS ITB-1a dan ITB-2a. Perbedaan utama adalah persamaan yang digunakan berbeda dengan ITB-1b dan ITB-2b. Selain itu, ITB-1a hanya bisa diintegrasikan secara

numerik, sedangkan ITB-1b dan ITB-2b bisa diintegrasikan secara eksak dan numerik, sehingga hasilnya bisa dibandingkan.

Debit puncak (Qp) hidrograf satuan sintetis.

Dari definisi hidrograf satuan sintetis dan prinsip konservasi massa, dapat diturunkan rumus umum debit puncak HSS (Natakusumah, 2009).

$$Q_p = \frac{R \cdot A_{DAS}}{3.6 T_p A_{HSS}} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (7)$$

Dengan mendefinisikan faktor debit puncak atau *peak rate factor* sebagai Persamaan 8. Maka Persamaan 7 dapat dituliskan dalam bentuk standard debit puncak HSS yang disebut rumus debit puncak cara ITB (Natakusumah, 2014)

$$K_p = 1/(3.6 \times A_{HSS}) \quad (8)$$

Dan

$$Q_p = \frac{K_p \cdot R \cdot A_{DAS}}{T_p} \text{ (m}^3/\text{s)} \quad (9)$$

Dimana Qp adalah Debit puncak hidrograf satuan (m³/s); Kp adalah Faktor debit puncak (tak berdimensi); R adalah Curah hujan satuan (1 mm); Tp adalah waktu mencapai puncak (jam); ADAS adalah Luas DAS (km²); AHSS adalah Luas HSS tak bersatuan.

Integrasi Kurva HSS ITB-1b dan HSS-ITB-2b

Untuk menentukan debit puncak Qp dan laju puncak Kp sesuai Persamaan (5) dan (6), penting untuk mengetahui luas di bawah kurva hidrograf satuan sintetis ITB-1b dan ITB-2b yang tidak bersatuan. Integrasi dilakukan secara numerik, dan jika integrasi eksak tersedia, hasilnya digunakan untuk memverifikasi keakuratan integrasi numerik.

Integrasi eksak kurva HSS ITB-1b.

Karena bentuk dasar HSS ITB-1b yang digunakan adalah berbentuk $q(t) = \{t \cdot \exp(1 - t)\}^{\alpha C_p}$ dengan $\alpha=3,7$ maka harga eksak AHSS hasil integrasi persamaan tersebut berhasil ditemukan (Natakusumah 2014).

Jika $m=\alpha \cdot C_p$, maka harga eksak integrasi sebagai Persamaan 10.

$$A_{HSS} = \int_0^{\infty} \{t \cdot \exp(1 - t)\}^m dt = \frac{e^m \Gamma(m+1,0)}{m^{m+1}} \quad (10)$$

Dimana fungsi $\Gamma(m + 1,0)$ adalah fungsi Gamma tak lengkap (Incomplete Gamma function of Second Kind) dengan dua input parameter m+1 dan 0, dapat dicari dengan menggunakan fungsi excell sebagai persamaan berikut;

$$\Gamma(m + 1,0) = \text{EXP(GAMMALN(m+1))* (1-GAMMADIST(0,m+1,1,TRUE))}$$

Integrasi eksak kurva HSS ITB-2b

Persamaan bentuk dasar kurva HSS ITB-2b dinyatakan dengan dua Persamaan (6a) dan Persamaan (6b). Harga eksak integrasi persamaan tersebut diketahui.

Jika harga $m=\alpha$, $n=\beta \cdot C_p$ dan batas atas integrasi b, maka harga eksak integrasi persamaan tersebut adalah sebagai Persamaan 11 dan 12.

$$A_{HSS} = \int_0^b q(t) dt = \int_0^1 t^m dt + \int_1^b \exp\{1 - t\} \cdot n dt$$

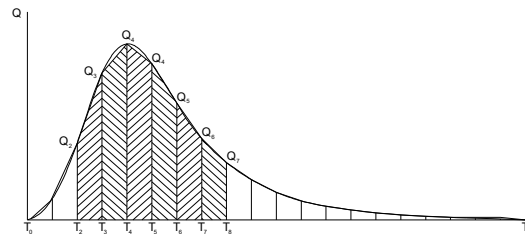
$$A_{HSS} = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{n} - \frac{\exp(-(b-1) \cdot n)}{n} \quad (11)$$

Jika $b = \infty$, harga eksak integrasi adalah

$$A_{HSS} = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{n} \quad (12)$$

Integrasi numerik kurva HSS

Jika persamaan kurva HSS diketahui agar Kp dan Qp dapat dihitung, luas kurva HSS perlu di integrasi secara numerik dengan metoda trapesium banyak pias (piecewise continuous) seperti ditunjukkan pada Gambar 2. Terlihat bahwa kurva lengkung didekati dengan sejumlah segmen lurus yang menerus.



Gambar 2. Integrasi numerik kurva hidrograf dengan metoda trapesium

Integrasi numerik pada kurva pada Gambar 2, dilakukan menggunakan metoda trapesium sebagai Persamaan 13.

$$A_{HSS} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (T_{i+1} - T_i) \times (Q_{i+1} + Q_i) \quad (13)$$

Jika interval sama $\Delta T = (T_{i+1} - T_i)$ maka debit Qp tidak dimasukkan dalam perhitungan karena harga Tp tidak selalu tepat kelipatan dari ΔT maka persamaan AHSS menjadi Persamaan 14.

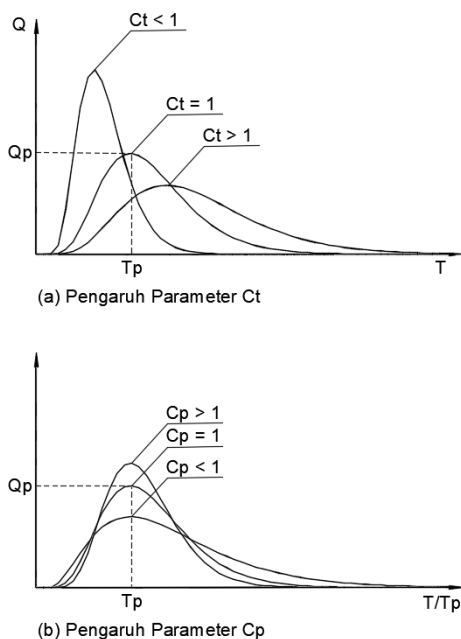
$$A_{HSS} = \Delta T \sum_{i=1}^N Q_i \quad (14)$$

Untuk hidrograf HSS harga Q0 dan QN nilai umumnya sama dengan nol.

Kalibrasi debit pengukuran

Kalibrasi waktu puncak dan debit puncak dilakukan jika terdapat perbedaan antara hidrograf yang terukur dan yang dihitung. Proses ini melibatkan

penyesuaian waktu dan debit puncak, seperti ditunjukkan dalam Gambar 3.



Gambar 3. Kalibrasi waktu dan debit puncak dengan merubah harga Ct dan Cp

Prosedur kalibrasi waktu puncak dan debit puncak dilakukan dengan cara sebagai berikut: Jika waktu puncak (T_p) dari hidrograf yang terukur dan dihitung tidak serupa, koefisien C_t dalam Persamaan (1) disesuaikan untuk menyamakan waktu puncak. Nilai $C_t < 1,0$ mengurangi waktu puncak, sementara $C_t > 1,0$ meningkatkannya. Jika debit puncak (Q_p) dari kedua hidrograf tidak serupa, koefisien C_p dalam Persamaan (5) dan (6) disesuaikan. $C_p < 1,0$ mengurangi debit puncak, sedangkan $C_p > 1,0$ meningkatkannya

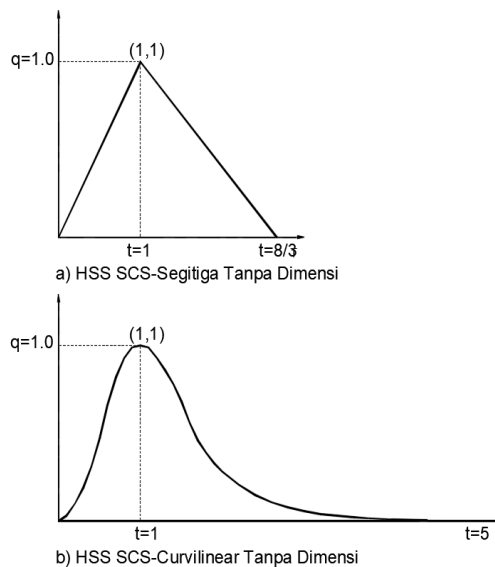
Hasil dan Pembahasan

Dalam bagian ini, akan diberikan berbagai contoh yang menunjukkan kebaruan Metoda HSS-ITB, meliputi: (1) Penurunan rumus debit puncak untuk HSS SCS Segitiga dan SCS Curvilinear. (2) Hidrograf banjir di Bendung Katulampa dengan $T_r = 1,0$ jam. (3) Perhitungan ulang hidrograf banjir di Bendung Katulampa dengan $T_r = 0,5$ jam. (4) Kalibrasi hidrograf banjir dengan hidrograf banjir yang diukur.

Penurunan rumus debit puncak untuk HSS SCS Segitiga dan SCS Curvilinear.

Fitur inovatif pertama: Derivasi debit puncak untuk metode HSS lain akan ditunjukkan dengan penurunan rumus debit puncak HSS SCS-Segitiga

dan SCS-Curvilinear. Keduanya dikembangkan oleh Soil Conservation Service (SCS). Bentuk kurva tanpa dimensi dari kedua hidrograf satuan sintetis ini digambarkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Bentuk Kurva SCS-Segitiga dan SCS-Curvilinear tanpa dimensi

Faktor laju puncak untuk HSS ITB didefinisikan sebagai;

$$K_p = \frac{1}{3.6 \times A_{SUH}} \quad (\text{tanpa dimensi})$$

Dengan menggunakan rumus tersebut, faktor laju puncak dan debit puncak HSS SCS-Segitiga dan SCS-Curvilinear dihitung sebagai berikut

HSS SCS-Segitiga tanpa dimensi:

Kurva HSS SCS-Segitiga tanpa dimensi, yang digambarkan dalam Gambar 4, dibentuk oleh tiga titik: (0,0), (1,1), dan (8/3,0). Luas di bawah kurva hidrograf SCS-Segitiga tanpa dimensi adalah

$$A_{HSS} = \frac{1}{2} \times \frac{8}{3} \times 1 = \frac{4}{3} = 1,3333333.$$

Dari luas ini, dapat dihitung faktor laju puncak.

$$K_p = \frac{1}{3.6 \times \frac{4}{3}} = 0,20833 \quad (\text{tanpa dimensi})$$

Jadi debit puncak HSS SCS-Segitiga adalah.

$$Q_p = 0,20833333 \frac{R \times A_{CA}}{T_p} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

Rumus untuk faktor laju puncak dan debit puncak yang diperoleh persis sama dengan rumus yang disediakan oleh Soil Conservation Service HSS SCS-Curvilinear tanpa dimensi. Kurva HSS SCS-Curvilinear tanpa dimensi, seperti dalam Gambar 4, yang dicirikan oleh 33 titik sesuai definisi SCS dan dijelaskan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Kurva SCS-Curvilinear tanpa dimensi.

No	(t/tp)	(q/qp)	No	(t/tp)	(q/qp)
1	0,00	0,000	18	1,70	0,460
2	0,01	0,30	19	1,80	0,390
3	0,02	0,100	20	1,90	0,330
4	0,03	0,190	21	2,00	0,280
5	0,04	0,310	22	2,20	0,207
6	0,05	0,470	23	2,40	0,147
7	0,06	0,660	24	2,60	0,107
8	0,07	0,820	25	2,80	0,077
9	0,08	0,930	26	3,00	0,055
10	0,09	0,990	27	3,20	0,040
11	1,00	1,000	28	3,40	0,029
12	1,10	0,990	29	3,60	0,021
13	1,20	0,930	30	3,80	0,015
14	1,30	0,860	31	4,00	0,011
15	1,40	0,780	32	4,50	0,005
16	1,50	0,680	33	5,00	0,000
17	1,60	0,560			

Hidrograf terbentuk dari kurva linier sepotong-sepotong, sehingga luasnya dihitung menggunakan metode trapesium dengan interval tidak seragam.

$$A_{SUH} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (T_{i+1} - T_i) \times (Q_{i+1} + Q_i)$$

Area tepat di bawah kurva hidrograf satuan sintetis SCS-Curvilinear tanpa dimensi adalah

$$A_{SUH} = 1,33595.$$

Faktor laju puncak "Kp" dihitung sebagai

$$K_p = \frac{1}{3.6 \times 1.33595} = 0,20792528 \quad (\text{tanpa dimensi})$$

Perbedaan terletak pada nilai Kp, dimana SCS memberikan nilai Kp=0,2083333, sementara perhitungan rumus Kp cara ITB menghasilkan Kp=0,20792528, dengan selisih $\epsilon = -0,1957\%$. Perbedaan ini terjadi karena pada SCS mengasumsikan nilai Kp yang sama untuk SCS-Curvilinear dan SCS-Segitiga. Ini suatu asumsi yang tidak tepat karena perbedaan bentuk kurva yang mencolok. Maka, nilai Kp untuk SCS-Curvilinear yang dihitung menggunakan metode ITB lebih akurat.

Dengan demikian, debit puncak dihitung sebagai

$$Q_p = 0.20792528 \frac{R \times A_{CA}}{T_p} \quad (m^3/s)$$

Rumus ini sedikit berbeda dari formula SCS namun lebih akurat.

Hidrograf banjir di Bendung Katulampa dengan Tr =1,0 jam

Fitur inovatif kedua. Sampai saat ini tidak ada metoda HSS lain yang melakukan Perhitungan faktor laju puncak (Kp) eksak dan numerik dan

membandingkan hasil keduanya. Dalam contoh kasus ini, akan ditunjukkan dalam penggunaan HSS ITB untuk menentukan bentuk hidrograf banjir DAS Ciliwung hulu di Bendung Katulampa. Sungai Ciliwung di lokasi ini mempunyai luas DAS 149,230 km² dan panjang sungai 24,460 km, kemiringan alur sungai S=112,245 m/km.

Hujan total, infiltrasi dan hujan efektif dihitung dengan cara rasional dengan harga C=0,60. Untuk melihat pengaruh perubahan harga Durasi hujan satuan digunakan harga Tr=1 jam dan Tr=0.5 jam sehingga distribusi hujan total, infiltrasi dan hujan efektif ditunjukkan Tabel 2. Superposisi hidrograf dilakukan dengan memperhitungkan distribusi hujan efektif, sedang infiltrasi digunakan untuk penggambaran Hyteograf (distribusi hujan), Selanjutnya kurva HSS ITB-1b dan HSS ITB-1b dijelaskan pada bagian selanjutnya.

Tabel 2. Hujan total, infiltrasi dan hujan efektif

Jam	R (mm)	Infill (mm)	Reff (mm)
Tr = 1,0 jam			
0	0,000	0,000	0,000
1	10,896	4,358	6,537
2	16,207	6,483	9,724
3	88,890	35,556	53,334
4	23,104	9,242	13,863
5	12,903	5,161	7,742
6	9,524	3,810	5,714
Tr = 0,5 jam			
0,00	0,000	0,000	0,000
0,50	5,448	2,179	3,629
1,00	5,448	2,179	3,629
1,50	8,104	3,241	4,862
2,00	8,104	3,241	4,862
2,50	44,445	17,778	26,667
3,00	44,445	17,778	26,667
3,50	11,552	4,621	6,931
4,00	11,552	4,621	6,931
4,50	6,451	2,581	3,871
5,00	6,451	2,581	3,871
5,50	4,762	1,905	2,857
6,00	4,762	1,905	2,857
6,50	4,762	1,905	2,857

Perhitungan HSS ITB-1b dan ITB-2b

Perhitungan HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b dilakukan dengan mirossoft excell untuk durasi satuan Tr=1.0 jam dan hasilnya ditunjukkan pada Tabel 3 dan 4 dengan penjelasan sebagai berikut: Bagian I, berisi input data yang diperlukan seperti luas DAS, panjang sungai, L dll, sesuai kebutuhan data untuk perhitungan *time lag* yang digunakan. Bagian-II, berisi hasil perhitungan *time lag* (T_L), *time to pek* (T_p) dan *time base* (T_b).

Tabel 3. Perhitungan HSS ITB-1b

I. Karakteristik DAS dan Hujan				
Nama sungai	= Ciliwung			
Stasiun	= Katulampa			
Luas DAS	= 149,230 km ²			
Panjang sungai utama (L)	= 24,460 km			
Tinggi hujan satuan (R)	= 1,000 mm			
Durasi hujan satuan	= 1,000 jam			
II. Perhitungan T_L, T_p, dan T_a				
Koefisien waktu (C _t)	= 1,0000			
Time lag T _L =C _t 0,81225*L ^{0,6}	= 5,5305 jam			
Peak time TP=TL+0,5*T _r	= 6,0305 jam			
Base Time TB/TP	= 10,0000 set			
TB	= 60,3049 jam			
III. Perhitungan A_{HSS}, K_p, dan T_p				
T _n = T _r /T _p	= 0,16582			
Koefisien uncak C _p	= 1,0000			
Alpha	= 3,7000			
Betha	= -			
A _{HSS} eksak	= 1,33275			
A _{HSS} numerik	= 1,33278			
K _p = 1/(3,6*A _{HSS}) eksak	= 0,20843			
K _p = 1/(3,6*A _{HSS}) numerik	= 0,20842			
Q _p = K _p A _{DAS} R/T _p eksak	= 5,15767 m ³ /s			
Q _p = K _p A _{DAS} R/T _p numerik	= 5,15752 m ³ /s Selisih - 0,0029%			
IV. Check konversi				
Volume Hujan = 1000*R*A _{DAS}	= 149,230 m ³			
Volume hidrograf	= 149,230 m ³			
Tinggi limpasan	= 1,0000			
V. Tabel perhitungan HSS ITB-1				
No	HSS tak berdimensi		HSS berdimensi	
	t= T/TP	q=Q/Q _p	T (jam)	Q=qxQ _p
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0	0,000000	0,000000	0,000	0,000000
1	0,165824	0,028387	1,000	0,146408
2	0,331648	0,199744	2,000	1,030186
3	0,497472	0,484787	3,000	2,500301
4	0,663296	0,760963	4,000	3,924685
5	0,829120	0,940740	5,000	4,851890
6	0,994944	0,999953	6,000	5,157280
7	1,160768	0,957683	7,000	4,939272
8	1,326592	0,849828	8,000	4,383008
9	1,492416	0,711434	9,000	3,669237
10	1,658240	0,568822	10,000	2,933713
11	1,824064	0,438196	11,000	2,260006
		dst		
118	19,567233	0,000000	118,000	0,000000
119	19,733057	0,000000	119,000	0,000000
120	19,898881	0,000000	120,000	0,000000

Penjelasan bagian V. Tabel perhitungan HSS ITB-1

Kolom (1) = bilangan integer n dari 0 s/d yang diperlukan.

Kolom (2) = t = Kolom (1)*T_n (T_n = Bagian III butir 1).

Kolom (3) Curva HSS ITB-1b → q(t) = (t*EXP(1 - t))^α(α*C_p).

Kolom (4) = T = Kolom (2)*T_p.

Kolom (5)=Kolom (3)*Q_p Untuk Kolom (5) Q_p yang digunakan Q_p numerik.

Tabel 4. Perhitungan HSS ITB-2b

I. Karakteristik DAS dan Hujan				
Nama sungai	= Ciliwung			
Stasiun	= Katulampa			
Luas DAS	= 149,230 km ²			
Panjang sungai utama (L)	= 24,460 km			
Tinggi hujan satuan (R)	= 1,000 mm			
Durasi hujan satuan	= 1,000 jam			
II. Perhitungan T_L, T_p, dan T_B				
Koefisien waktu (C _t)	= 1,0000			
Time lag T _L =C _t *(0,0394*L+0,201*	= 1,9578 jam			
Peak time TP=TL+0,5*T _r	= 3,1325 jam			
Base Time TB/TP	= 20,0000 set	ditetapkan		
TB	= 62,6499 jam			
III. Perhitungan A_{HSS}, K_P, dan T_P				
Durasi satuan dinormalkan	= 0,3192			
Koefisien ounce C _P	= 1,0000			
Alpha	= 2,4000			
Betha	= 0,8000			
A _{HSS} eksak	= 1,5441			
A _{HSS} numerik	= 1,5521			
K _P = 1/(3,6*A _{HSS}) eksak	= 0,1799			
K _P = 1/(3,6*A _{HSS}) numerik	= 0,1790			
Q _P = K _P A _{DAS} R/T _P eksak	= 8,5700 m ³ /s			
Q _P = K _P A _{DAS} R/T _P numerik	= 8,5261 m ³ /s	Selisih -0,512%		
IV. Check konversi				
Volume Hujan = 1000*R*A _{DAS}	= 149,230 m ³			
Volume hidrograf	= 149,230 m ³			
Tinggi limpasan	= 1,0000			
V. Tabel perhitungan HSS ITB-2				
No	HSS Tak berdimensi		HSS berdimensi	
	t= T/TP	q=Q/Qp	T (jam)	Q=qxQp
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
0	0,000000	0,000000	0,000	0,000000
1	0,319234	0,064545	1,000	0,550318
2	0,638468	0,340670	2,000	2,904596
3	0,957702	0,901474	3,000	7,686079
4	1,276936	0,801276	4,000	6,831780
5	1,596171	0,620682	5,000	5,292009
6	1,915405	0,480790	6,000	4,099277
7	2,234639	0,372428	7,000	3,175367
8	2,553873	0,288489	8,000	2,459692
9	2,873107	0,223468	9,000	1,905318
10	3,192341	0,173102	10,000	1,475890
11	3,511575	0,134088	11,000	1,143249
		dst		
118	37,669627	0,000000	118,000	0,000000
119	37,988861	0,000000	119,000	0,000000
120	38,308095	0,000000	120,000	0,000000

Penjelasan bagian V. Tabel perhitungan HSS ITB-2

Kolom (1) = bilangan integer n dari 0 s/d yang diperlukan.

Kolom (2) = Kolom (1)*T_n (T_n = Bagian III butir 2).

Kolom (3) Curva HSS ITB-1b → q(t) = MIN(t^α, EXP((1-t)*(β*C_p))).

Kolom (4) = T = Kolom (2)*T_p.

Kolom (5) = Q = Kolom (3)*Q_p Untuk Kolom (5) Q_p yang digunakan Q_p numerik.

Bagian-III, besisi data C_p , Coef α dan β , perhitungan A_{HSS} secara exact dan numerik, K_p , Q_p , V_{HSS} dan V_{DAS} dengan perhitungan sbb:

- 1) Durasi satuan yang dinormalkan
 ITB-1b $\rightarrow T_n = T_r/T_p = 1/3.13250 = 0,18080$
 ITB-2b $\rightarrow T_n = T_r/T_p = 1/3.13250 = 0,31923$

- 2) C_p . Koefisien Puncak ($C_p = 1,0$ Default)
 Sebelum Kalibrasi Harga $C_p = 1,0$ untuk HSS
 ITB-1b dan ITB-2b

- 3) Coef α dan β ,
 ITB-1b $\rightarrow (\alpha = 3,70)$
 ITB-2b $\rightarrow (\alpha = 2,4, \beta=0,8)$

- 4) Luas exact HSS ITB-1b :
 Jika $m=\alpha \cdot C_p$, maka $A_{HSS} = \frac{e^{m\Gamma(m+1,0)}}{m^{m+1}}$
 Untuk harga $\alpha=3,7$ dan $C_p=1,0$ harga $m=3,7$ harga
 fungsi Gamma $\Gamma(m+1,0) =$
 $EXP(GAMMALN(m+1)) * (1-GAMMADIST$
 $(0,m+1,1,TRUE)) = 15,43141160004740$
 akibatnya

$$A_{HSS} = \frac{e^{3,7\Gamma(3,7+1,0)}}{3,7^{3,7+1}} = 1,33274522508382$$

- 5) Luas numerik HSS ITB-1b
 $A_{HSS} = T_n \cdot (S \text{ Kolom 3 Bagian V, Tabel 3})$
 $= 1,33278386780887$

- 6) Luas exact HSS ITB-2b :
 Jika $m=\alpha$, dan $n=\beta \cdot C_p$, maka integrasi eksak HSS
 ITB-2b adalah

$$A_{HSS} = \frac{1}{m+1} + \frac{1}{n} - \frac{\exp(-(b-1) \cdot n)}{n}$$

Untuk harga $\alpha=1,6$, $\beta=0,8$ serta $C_p=1,0$, maka
 $n=0,80$ dan batas atas integrasi $b=20$ maka

$$A_{HSS} = \frac{1}{1,6+1} + \frac{1}{0,8} - \frac{\exp(-(19) \cdot 0,8)}{0,8}$$

$$A_{HSS} = 1,54411764705872$$

- 7) Luas numerik HSS ITB-2b :
 $A_{HSS} = T_n \cdot (S \text{ Kolom 3, Bagian V, Tabel 4})$
 $= 1,55207038631921$

- 8) Faktor debit puncak (K_p)
 Harga K_p untuk HSS ITB-1b adalah
 $K_p = \frac{1}{3,6 \cdot A_{HSS}} = \frac{1}{3,6(1,3327)} = 0,208425$ (exak)

$$K_p = \frac{1}{3,6(1,332783867808)} = 0,208419$$
 (numerik)

- Harga K_p HSS ITB-2b adalah
 $K_p = \frac{1}{3,6(1,5441176470)} = 0,1798941$ (exak)

$$K_p = \frac{1}{3,6(1,5520703863)} = 0,1789724$$
 (numerik)

- 9) Debit puncak (Q_p)
 $Q_p = \frac{K_p \cdot R \cdot A_{DAS}}{T_p} = \frac{0,208425 \cdot 1,0 \cdot 149,230}{6,0305}$
 $= 5,1576743$ (exak)

$$Q_p = \frac{0,208419 \cdot 149,230}{6,0305} = 5,157524$$
 (numerik)

HSS ITB-2b harga Q_p exact dan numerik

$$Q_p = \frac{0,1798941 \cdot 149,230}{6,0305} = 8,57003431$$
 (exak)

$$Q_p = \frac{0,1789724 \cdot 149,230}{6,0305} = 8,52612$$
 (numerik)

Bagian-IV, adalah bagian untuk memeriksa hukum konservasi yaitu

HSS ITB-1b (Tabel 3)

$$V_{DAS} = 1000 \cdot R \cdot A_{DAS} = 1000 \cdot 1 \cdot 149,23$$

$$= 149,230 \text{ m}^3$$

$$V_{HSS} = T_r \cdot 3600 \cdot S \text{ kolom 5 (Bagian V)}$$

$$= 149,230 \text{ m}^3$$

$$R = \frac{V_{HSS}}{A_{DAS}} = 0,001 \text{ m} = 1,0 \text{ mm}$$

HSS ITB-2b (Tabel 4)

$$V_{DAS} = 1000 \cdot R \cdot A_{DAS} = 1000 \cdot 1 \cdot 149,23$$

$$= 149,230 \text{ m}^3$$

$$V_{HSS} = T_r \cdot 3600 \cdot S \text{ Kolom 5 (Bagian V)}$$

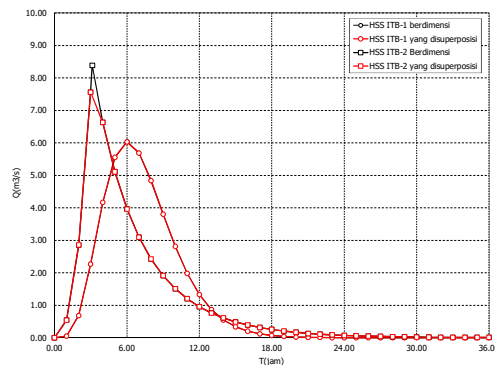
$$= 149,230 \text{ m}^3$$

$$R = \frac{V_{HSS}}{A_{DAS}} = 0,001 \text{ m} = 1,0 \text{ mm}$$

Bagian-V, membangun hidrograf satuan sintesis ITB-1b dan ITB-2b. Bagian ini menyajikan data absis dan ordinat untuk kurva HSS ITB-1b, lengkap dengan versi tanpa dimensi dan bersatuan.

Penggambaran kurva HSS ITB-1b dan ITB-2b berdimensi

HSS bersatuan dapat dilihat pada Gambar 5. HSS bersatuan memiliki kurva HSS-numerik yang tidak melewati puncak HSS-eksak (warna hitam). Karena itu, dalam praktek debit puncak eksak tidak mungkin dimasukkan dalam proses superposisi karena waktu puncak tidak selalu menjadi kelipatan dari durasi hujan satuan. Dari gambar tersebut terlihat bahwa karena harga T_p umumnya tidak merupakan kelipatan dari T_r , maka debit puncak Q_p tidak diperhitungkan dalam proses superposisi.



Gambar 5. HSS ITB-1b dan ITB-2b bersatuan

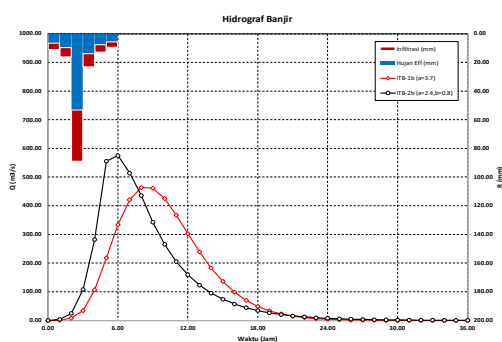
Superposisi hidrograf

Setelah HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b selesai dihitung dalam Tabel 3 dan Tabel 4, langkah selanjutnya adalah melakukan superposisi HSS dengan menggunakan durasi hujan satuan $T_r=1,0$ jam, dengan distribusi hujan total, infiltrasi, dan

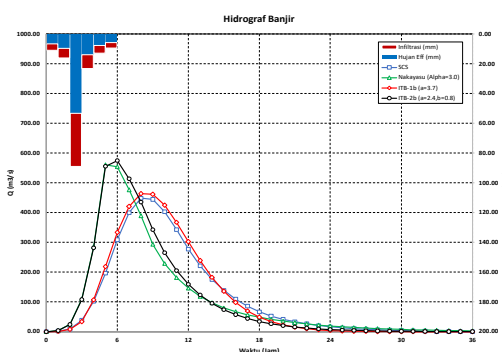
hujan efektif yang sesuai seperti yang tercantum dalam Tabel 2 proses superposisi dilakukan dengan menggabungkan beberapa hidrograf berdasarkan interval hujan yang berbeda. Proses ini melibatkan penjumlahan aliran dari setiap hidrograf pada setiap interval waktu, menghasilkan hidrograf gabungan yang menggambarkan hidrograf total di daerah aliran sungai. Untuk informasi lebih detail, dapat merujuk pada literatur hidrologi yang tersedia.

Penggambaran hidrograf total

Jika hasil superposisi hydrograph banjir dari HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b akibat distribusi hujan efektif yang sesuai seperti yang tercantum dalam Tabel 2 ($Tr=1,0$) digambarkan dalam satu gambar, akan terlihat kurva hidrograf banjir seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6. Perbandingan kurva hidrograf banjir hasil perhitungan dengan HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b dengan metoda lain ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 6. Hidrograf banjir hasil superposisi HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b untuk $Tr=1,0$ jam



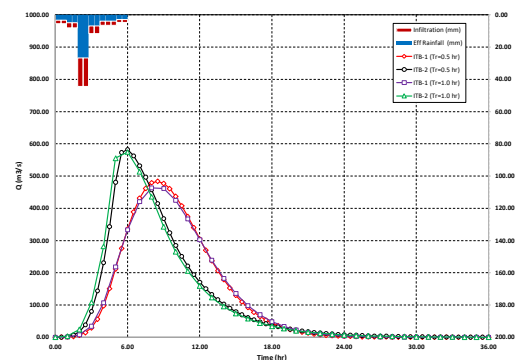
Gambar 7. Perbandingan hidrograf hasil cara HSS ITB-1b, ITB-2b, SCS-Snyder dan Nakayasu

Gambar 7 tersebut juga memperlihatkan hasil dari metode lain seperti Nakayasu dan HSS Snyder SCS. Gambar dengan jelas menunjukkan bahwa, berdasarkan input hujan yang diberikan, hidrograf banjir yang dihasilkan oleh metode ITB-1b sangat mirip dengan metode Snyder SCS, sementara hasil

yang diperoleh dari metode ITB-2b sangat sesuai dengan metode Nakayasu.

Perhitungan ulang hidrograf banjir di Bendung Katulampa dengan $Tr = 0,5$ jam.

Fitur inovatif ketiga: Untuk melihat pengaruh durasi hujan satuan yang dinormalkan ($T_n=Tr/T_p$) terhadap hasil, harga Tr diubah dari $Tr=1,0$ jam menjadi $Tr=1/2$. Akibat perubahan tersebut, distribusi hujan total, infiltrasi, dan hujan efektif di Tabel 2. Setelah dilakukan perhitungan ulang HSS ITB-1b dan ITB-2b, serta superposisi HSS untuk $Tr=0,5$ jam, hasilnya dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Hidrograf banjir HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b untuk $Tr=0,5$ jam dan $Tr=1,0$ jam

Dari Gambar 8 tersebut, terlihat bahwa kurva hidrograf banjir yang dihitung dengan durasi hujan satuan $Tr=1/2$ jam memiliki kurva yang lebih halus dibandingkan dengan kurva yang menggunakan $Tr=1,0$ (seperti yang terlihat pada Gambar 6).

Kalibrasi HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b

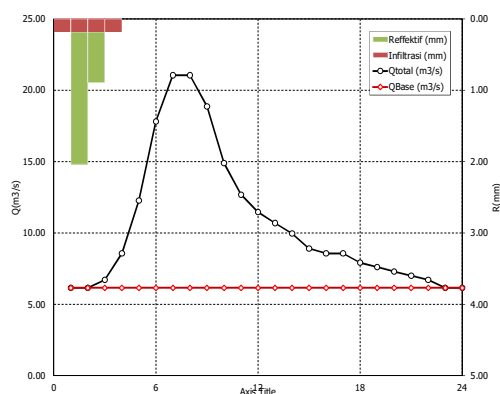
Fitur inovatif keempat : Kalibrasi awal pada HSS ITB-1b dan ITB-2b telah dilakukan oleh penulis, bertujuan untuk mendapatkan nilai konstanta model seperti α pada HSS ITB-1b dan α serta β pada HSS ITB-2b. Kalibrasi ini penting, khususnya jika di suatu DAS terdapat stasiun hujan dan pencatat muka air yang mengukur data hujan dan debit secara serentak. Data ini dapat digunakan untuk kalibrasi debit banjir yang terukur dengan menyesuaikan nilai C_t dan C_p .

Data curah hujan berasal stasiun hujan Gadog, Gunung Mas, Citeko, Cilember dan Tugu Utara. Data debit banjir didapat dari stasiun Katulampa. Hubungan antara hujan efektif, infiltrasi dan limpasan langsung (DRO) seperti ditunjukkan pada Tabel 5 (Agus & Hadihardaja, 2011), yang juga menunjukkan volume limpasan (380.050 m³), tinggi limpasan (2,55 mm), dan infiltrasi (0,187 mm dengan metode Φ indeks). Hidrograf yang

menggambarkan curah hujan dan debit ditunjukkan pada Gambar 9. Metode garis lurus menghasilkan aliran dasar (base flow) sebesar 6,15 m³/detik

Tabel 5. Hujan efektif, infiltrasi dan limpasan langsung (DRO)

Jam	Rtotal (mm)	Infiltrasi (mm)	Reffektif (mm)	Qtota (m ³ /s)	Qbase (m ³ /s)	QDRO (m ³ /s)
1	0,163	0,187	0,000	6,150	6,150	0,000
2	2,036	0,187	1,849	6,150	6,150	0,000
3	0,894	0,187	0,707	6,710	6,150	0,560
4	0,163	0,187	0,000	8,560	6,150	2,410
5				12,270	6,150	6,120
6				17,810	6,150	11,660
7				21,050	6,150	14,900
8				21,050	6,150	14,900
9				18,860	6,150	12,710
10				14,890	6,150	8,740
11				12,680	6,150	6,530
12				11,460	6,150	5,310
13				10,690	6,150	4,540
14				9,950	6,150	3,800
15				8,900	6,150	2,750
16				8,560	6,150	2,410
17				8,560	6,150	2,410
18				7,910	6,150	1,760
19				7,600	6,150	1,450
20				7,290	6,150	1,140
21				7,000	6,150	0,850
22				6,710	6,150	0,560
23				6,150	6,150	0,000
24				6,150	6,150	0,000



Gambar 9. Hujan efektif, infiltrasi dan debit total dan aliran dasar

Parameter awal

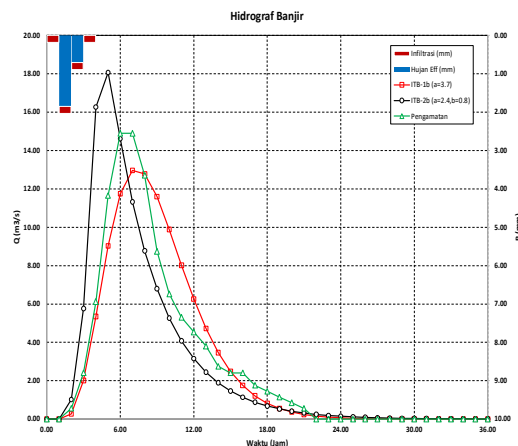
Kalibrasi berikutnya untuk HSS ITB-1b dan ITB-2b dijalankan secara manual dengan data mengenai DAS serta data hujan efektif dari Tabel3, hidrograf banjir dikalkulasi menggunakan kedua metode tanpa proses kalibrasi awal. Selanjutnya, proses kalibrasi untuk hasil dari HSS ITB-1b dan ITB-2b

dilaksanakan dengan menggunakan nilai parameter awal yang tercantum dalam Tabel 6. Dengan harga parameter sebelum kalibrasi tersebut didapat hidrograf hasil superposisi HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b seperti ditunjukkan pada Gambar 10.

Tabel 6. Harga parameter sebelum kalibrasi

HSS	α	β	C_t	C_p
ITB-1b	3,700	-	1,000	1,000
ITB-2b	2,400	0,800	1,000	1,000

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa debit banjir yang diperhitungkan sudah mendekati hasil yang diharapkan, namun masih dapat ditingkatkan melalui proses kalibrasi lebih lanjut. Oleh karena itu, kemampuan suatu metode perhitungan HSS untuk melakukan kalibrasi sangat penting dalam meningkatkan akurasi dan keandalan hasil.



Gambar 10. Hidrograf hasil superposisi HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b sebelum dilakukan kalibrasi terhadap hidrograf hasil pengukuran.

Proses kalibrasi

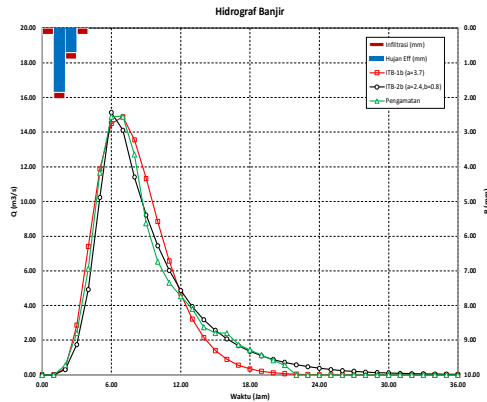
Proses kalibrasi melibatkan dua langkah coba-coba, seperti ditunjukkan dalam Gambar 10. Pertama, koefisien C_t disesuaikan untuk menyelaraskan waktu puncak yang dihitung dengan yang diamati. Jika waktu puncak terhitung lebih lambat, C_t diatur di atas 1,0; jika lebih cepat, C_t diatur di bawah 1,0. Selanjutnya, C_p disesuaikan untuk menyelaraskan debit puncak yang dihitung dengan yang diamati, dengan C_p lebih tinggi meningkatkan dan lebih rendah menurunkan debit puncak terhitung. Tabel 7, menunjukkan proses kalibrasi ini, di mana C_t dan C_p diubah, sementara α dan β tetap

Tabel 7. Nilai koefisien HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b sesudah kalibrasi

HSS	α	β	C_t	C_p
ITB-1b	3,700	-	0,880	1,050
ITB-2b	2,400	0,800	1,500	1,250

Hasil proses kalibrasi

Dengan menggunakan harga parameter sesudah kalibrasi seperti ditunjukkan pada Tabel 7 akan didapat hasil superposisi HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b seperti ditunjukkan pada Gambar 11.



Gambar 11. Hidrograf hasil superposisi HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b setelah dilakukan kalibrasi terhadap hidrograf hasil pengukuran.

Kesimpulan

Rekonstruksi model HSS terkait SCS mengkonfirmasi kesesuaiannya yang tinggi dengan nilai-nilai SCS yang sudah ada, bahkan melampaui akurasi SCS pada kasus penggunaan lahan kurvilinear. Hal ini disebabkan oleh penentuan faktor laju puncak (K_p) yang lebih tepat, yang memungkinkan prediksi yang lebih akurat dalam menghitung puncak debit. Reproduksi nilai K_p dan Q_p untuk bentuk SCS Segitiga dan SCS Kurvilinear menggunakan formula ITB (Persamaan 8 dan 9) semakin mendukung fleksibilitas metode ITB UH. Ini menunjukkan potensi penggunaan metode ini yang lebih universal, di mana dapat diaplikasikan pada berbagai jenis hidrograf satuan sintetis (HSS) dengan distribusi debit satuan yang ditentukan berdasarkan karakteristik daerah aliran sungai yang dianalisis. Pendekatan ini memberi keleluasaan dalam mengadaptasi parameter untuk berbagai skenario hidrologis, yang dapat meningkatkan akurasi hasil model dalam memprediksi aliran permukaan. Aplikasi praktis dari metode HSS-ITB menunjukkan adaptabilitas yang luar biasa dalam berbagai skenario, baik untuk analisis skala besar maupun skala kecil.

Dalam analisis banjir standar di Bendung Katulampa, metode ini terbukti sangat efektif dalam menganalisis hidrograf dengan interval waktu 1 jam, yang merupakan interval standar dalam banyak analisis hidrologi. Penyesuaian interval waktu menjadi 0,5 jam dalam beberapa kasus

menunjukkan fleksibilitas metode ini dalam menangani interval waktu yang lebih pendek tanpa mengurangi akurasi hasil model. Hal ini sangat penting ketika menghadapi kondisi cuaca ekstrem yang mengharuskan respon cepat terhadap perubahan aliran sungai. Selain itu, kalibrasi terhadap data pengamatan di Bendung Katulampa memberikan gambaran tentang kemampuan metode HSS-ITB dalam melakukan penyetelan yang mendetail, yang memungkinkan kesesuaian yang sangat akurat antara hidrograf banjir yang dimodelkan dan yang diukur di lapangan. Proses kalibrasi ini menunjukkan bagaimana metode ini dapat disesuaikan dengan kondisi lokal untuk meningkatkan ketepatan hasil perhitungan, serta memberikan keandalan dalam prediksi banjir yang lebih baik. Contoh-contoh aplikasi ini mengkonfirmasi kegunaan luas dan adaptabilitas metode HSS-ITB, serta menunjukkan potensi metode ini untuk digunakan dalam berbagai konteks analisis hidrologis, termasuk untuk prediksi banjir yang akurat di berbagai wilayah dengan karakteristik DAS yang berbeda.

Saran perlunya Hidrograf Satuan yang Ditentukan Pengguna (HSDP)

Saran terkait perlunya Hidrograf Satuan yang Ditentukan Pengguna (HSDP) adalah untuk meningkatkan fleksibilitas dan akurasi dalam perhitungan hidrograf satuan yang lebih spesifik sesuai dengan kebutuhan dan karakteristik setiap daerah aliran sungai (DAS). Dalam banyak kasus, hidrograf satuan standar yang telah ada, seperti metode SCS atau ITB-1b, mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan kondisi lokal, seperti pola curah hujan, penggunaan lahan, atau perubahan kondisi alam yang terjadi di suatu wilayah. Oleh karena itu, HSDP yang disesuaikan dengan kondisi spesifik setiap DAS sangat diperlukan untuk menghasilkan prediksi banjir yang lebih akurat dan relevan.

Metoda HSS ITB dapat digunakan untuk tujuan tersebut karena kemampuannya dalam menyesuaikan berbagai parameter, seperti faktor laju puncak (K_p) dan debit puncak (Q_p), yang dapat disesuaikan berdasarkan karakteristik hidrologis dan morfologis wilayah yang dianalisis. Dengan menggunakan HSS ITB, pengguna dapat menentukan distribusi debit satuan yang lebih sesuai dengan kondisi setempat, serta melakukan kalibrasi lebih lanjut terhadap data pengamatan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat. Fleksibilitas ini memungkinkan penggunaan metode HSS ITB dalam berbagai kondisi, baik untuk perencanaan infrastruktur, mitigasi bencana banjir, maupun analisis risiko banjir di daerah-daerah dengan kondisi hidrologis yang beragam.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Lembaga Penelitian ITB untuk dukungan dana dari Program Riset Peningkatan Kapasitas ITB 2010, yang mendanai penelitian tentang "Prosedur Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) untuk Perhitungan Hidrograf Banjir Rencana. Studi Kasus Pengembangan HSS ITB-1 Dan HSS ITB-2". Dukungan ini berkontribusi pada riset mandiri lanjutan dan berbagai publikasi terkait HSS ITB. Ucapan terima kasih juga diberikan kepada Prof. Drs Waluyo Hatmoko, Dr. Dhemi Harlan, Gde A. Wicaksana ST, MT, dan Bagas Nathaniel ST atas kontribusi mereka dalam penulisan makalah terkait.

Daftar Pustaka

- Sherman, L.K. (1932). Streamflow from rainfall by the unit-graph method, *Engineering News-Record*, 108(26), 501-505.
- Snyder, F. F. (1938). Flood-frequency and drainage-basin characteristics. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 103(1), 877-924.
- Nash, J. E. (1957). The form of the instantaneous unit hydrograph. *International Association of Scientific Hydrology, Bulletin*, 3(1), 5-20.
- Natakusumah, D. K. (2009, August). Prosedure Umum Penentuan Hidrograf Satuan Sintetis Untuk Perhitungan Hydrograph Banjir Rencana. In *Seminar Nasional Teknik Sumber Daya Air, Peran Masyarakat, Pemerintah dan Swasta sebagai Jejaring, dalam Mitigasi Bahaya Banjir, Bandung* (Vol. 11).
- Natakusumah, D. K., Harlan, D., & Hatmoko, W. (2013). A new synthetic unit hydrograph computation method based on the mass conservation principle. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 172, 27-38. <https://doi.org/10.2495/RBM130031>
- Natakusumah D.K. (2014). Penggunaan Hidrograf Satuan Sintetis ITB-1b Dan ITB-2b Dengan Faktor Debit Puncak (Kp) Dihitung Secara Eksak. *PIT HATHI 31*, Padang, 15 Maret 2014.
- Natakusumah, D. K., Wicaksana, G. A., & Nathaniel, B. (2021). Towards Standardization Of Design Flood Calculation Using Synthetic Unit Hydrograph Methods. *The 7th International Seminar of HATHI Surabaya*, October 30, 2021.
- Agus, I., & Hadihardaja, I.K. (2011). Perbandingan Hidrograf Satuan Teoritis Terhadap Hidrograf Satuan Observasi DAS Ciliwung Hulu. *Journal Teknik Sipil ITB*, Vol. 18 No. 1, April 2011.
- Natakusumah, D.K., Hatmoko, W., & Harlan, D. (2011). Prosedure Umum Perhitungan Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) dan Contoh Penerapannya Dalam Pengembangan HSS ITB-1b dan HSS ITB-2b. *Journal Teknik Sipil ITB*, 18(3).
- Mashuri, & Kiranaratri, A. H. (2019). "Study of Modelling Synthetic Unit Hydrograph Using ITB-1b Method (Case Study: Upstream Siak Watershed)." *Kajian Teknik Sipil*, 04(2), 99-108. ISSN: 2502-8456.
- Ginting, S., & Utaminingsih, W. (2020). Pengembangan Model Hidrograf Satuan Sintetis (HSS) DPMA-IOH dan Penerapannya pada Daerah Aliran Sungai. *Journal Teknik Sipil ITB*, 27(1).
- Saidah, H., Setiawan, A., Hanifah, L., Suroso, A., Supriyadi, A. (2022). Unjuk Kerja Hidrograf Satuan Sintetik Nakayasu, ITB 2, dan Limantara untuk Daerah Aliran Sungai Berbentuk Memanjang. Paduraksa: *Jurnal Teknik Sipil Universitas Warmadewa*, 11(2), 157-165.
- Rahman, E., Labdul, B.Y., & Husnan, R. (2022). Optimasi Koefisien Parameter Hidrograf Satuan Sintetik ITB-1b dan ITB-2b di Sub DAS Bionga Kayubulan. *Composite Journal*, 2(1), 21-27.
- Abid G., D., B. (2016). Analisis Hidrograf Satuan Sintetis dengan Metode HSS Gama I dan HSS ITB-2b untuk Sub DAS Pam. *Tugas Akhir*. Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Sriwijaya.
- Tunas, I. G. (2017). *Pengembangan Model Hidrograf Satuan Sintetik Berdasarkan Karakteristik Fraktal Daerah Aliran Sungai* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Sulistyowati, A., & Jayadi, R. (2017). Pemodelan Hidrograf Satuan dengan Metode Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph (GIUH). *Tesis S2*, Program Studi Teknik Sipil, Universitas Gajah Mada.
- Aini Y. (2020). Perbandingan Debit Puncak Banjir Rancangan dengan Metode HSS ITB-2b, HSS SCS, Melchior, dan Haspers pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Reak. *Thesis-S1*, Universitas Mataram, Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil.
- Peter, A. D. (2018). *Perbandingan Beberapa Hidrograf Satuan Sintetik (Gama 1, Nakayasu, ITB 1-2, SCS, dan Limantara) dengan Hidrograf Satuan Terukur* (Doctoral dissertation, Universitas Gajah Mada)