

Perbandingan Hidrograf Satuan Teoritis Terhadap Hidrograf Satuan Observasi DAS Ciliwung Hulu

Indra Agus

Jurusan Teknik Sipil Politeknik Negeri Padang, Kampus Limau Manis, Padang.

Email: indra_daguchi@yahoo.co.id.

Iwan K. Hadihardaja

Kelompok Keahlian Rekayasa Sumberdaya Air Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan-Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesha No.10 Bandung 40132, Email: Hadihardaja@yahoo.com

Abstrak

Banjir dan kekeringan dalam suatu wilayah (DAS) terjadi akibat fenomena iklim yaitu distribusi curah hujan dengan intensitas tinggi atau periode kemarau yang terjadi lebih panjang. Penyebab banjir berasal dari masukan (hujan) dan sistem DAS. Masukan (hujan) meliputi faktor intensitas hujan, lama hujan dan distribusi hujan. Sedangkan sistem DAS meliputi faktor topografi, jenis tanah, penggunaan lahan dan sistem transfer hujan dalam DAS. Perkiraan debit banjir yang berdasarkan hujan lebat dapat diklasifikasikan dalam tiga cara yaitu, dengan cara rumus empiris, dengan cara statistik (kemungkinan) dan dengan cara hidrograf satuan. Curah hujan dan debit adalah dua hal penting untuk mendapatkan himpunan hidrograf hasil observasi dan teoritis. Curah hujan merupakan nilai yang efektif dan dihitung menggunakan metode indeks. Aliran langsung (limpasan langsung) didapat dari segregasi total limpasan dengan baseflow dan dengan menerapkan metode Straight Line. Ordinasi hidrograf hasil observasi dihasilkan dengan membagi ordinasi aliran langsung (direct overflow) dengan hujan efektif. Hasil dari satuan hidrograf observasi dibandingkan dengan satuan hidrograf teoritis dan dihitung dengan menggunakan metode Least Square, Forward Substitution dan Linear Reservoir Cascade. Perbandingan dilakukan terhadap Time base (T_b), Time peaks (T_s), Q peak.

Kata-kata Kunci: Hidrograf satuan, metode square method, metode substitusi kedepan, and metode linear reservoir cascade.

Abstract

Flood and dryness in a region watershed was caused by a climate phenomenon, that is high intensity rainfall distribution or longer drought period. Flood is the existence of rainfall input and watershed system. Rainfall covers rain factor of stress intensity, rainfall duration and rain distribution. System watershed covers topography factor, soil type, land use and rain system transfer in watershed. Flooding debit approximation based on torrential rains can be classified in three ways such empiric formula, statistic or probability and unit hydrographer. Rainfall and discharge are important things in getting observed and theoretical hydrographer set. Applying Rainfall is the effective precipitation calculated using index method. Whereas direct overflow (direct run off) was earned by total run off segregation with base flow applies Straight Line Method. Observed Hydrographer ordinates is created by dividing direct overflow ordinate with effective rain. Observed unit hydrograph result was compared with theoretic unit hydrograph and calculated by using Least Square Method, Forward Substitution Method and Linear Reservoir Cascade Method. Comparison was done to Time base (T_b), Time peaks (T_s), Q peak.

Keywords: Unit hydrograph, least square method, forward substitution method, distribution percentage method and linear reservoir cascade method.

1. Pendahuluan

Terjadinya perubahan penggunaan lahan dari vegetasi (*vegetated land*) menjadi non vegetasi (*non vegetated land*) pada suatu daerah pengaliran sungai cenderung meningkat intensitasnya menurut ruang dan waktu.

Hal ini merupakan konsekuensi logis dari aktivitas pembangunan dan laju pertumbuhan penduduk yang tinggi.

Adanya peningkatan intensitas perubahan alih fungsi lahan tersebut, tentunya membawa pengaruh negatif terhadap kondisi hidrologis daerah aliran sungai di

antaranya meningkatnya debit puncak, fluktuasi debit antar musim, koefisien aliran permukaan, serta banjir dan kekeringan.

Secara umum penyebab banjir dapat dibedakan menjadi 2 (dua) kelompok yaitu: masukan (hujan) dan sistem DAS. Masukan (hujan) meliputi faktor intensitas hujan, lama hujan dan distribusi hujan, sedangkan sistem DAS meliputi faktor topografi, jenis tanah, penggunaan lahan dan sistem transfer hujan dalam DAS. Tingginya frekuensi hujan dengan jumlah yang besar dalam waktu relatif singkat di musim penghujan yang disertai perubahan penggunaan lahan menuju makin luasnya permukaan kedap (*impermeable*) menyebabkan hanya sebagian kecil curah hujan yang dapat diserap dan ditampung oleh tanah melalui intersepsi maupun infiltrasi sebagai cadangan air di musim kemarau. Dampaknya air hujan yang ditransfer menjadi aliran permukaan meningkat, sehingga terjadi banjir dengan besaran (*magnitude*) yang makin meningkat. Kondisi ini akan diperburuk apabila periode tanah sudah dalam keadaan jenuh akibat hujan sebelumnya. Banjir terjadi saat debit aliran sungai menjadi sangat tinggi, sehingga melampaui kapasitas daya tampung sungai. Akibatnya bagian air yang tidak tertampung melimpas melampaui badan/bibir/tanggul sungai dan pada akhirnya akan menggenangi daerah sekitar aliran yang lebih rendah. Untuk memperkirakan debit banjir dapat menggunakan cara probabilitas (statistik), rumus empiris dan hidrograf satuan. Perkiraan banjir dengan hidrograf satuan merupakan suatu cara untuk memperoleh hidrograf limpasan permukaan dari curah hujan. Hidrograf banjir merupakan penggambaran dari perubahan karakteristik pada suatu daerah pengaliran sungai. Hidrograf satuan dapat digunakan untuk menentukan perubahan aliran disungai (debit) dengan input hujan pada waktu tertentu

2. Maksud dan Tujuan Penelitian

Maksud dari penelitian ini adalah menentukan hidrograf satuan observasi dan hidrograf satuan teoritis pada daerah pengaliran sungai Ciliwung Hulu.

Tujuan dari penulisan ini adalah:

- a. Menghitung hidrograf satuan observasi berdasarkan data debit jam-jam dan data curah hujan jam-jaman.
- b. Menghitung hidrograf satuan teoritis berdasarkan data curah hujan jam-jaman dan debit jam-jaman.
- c. Membandingkan hidrograf satuan observasi dengan hidrograf satuan teoritis

3. Gambaran Wilayah

DAS Ciliwung Hulu dimulai dari Bendung Katulampa sampai kearah selatan Gunung Pongrango yang secara administratif berada di Kabupaten Bogor. DAS Ciliwung Hulu berada dalam kecamatan Ciawi, Cisarua, Megamendung, Sukaraja dan Kota Bogor.

Secara geografis DAS Ciliwung Hulu terletak pada 6° 35' LS s/d 6° 49' LS dan 106° 49' BT s/d 107° 00' BT.

Penentuan batas Wilayah Ciliwung Bagian Hulu didasarkan pada bentang alam dan administrasi seperti di jelaskan pada uraian berikut: Luas DAS Ciliwung Bagian Hulu adalah 14.876 ha terbagi ke dalam 4 (empat) Sub DAS yaitu:

- a. Sub DAS Ciesek seluas 2.452,78 ha
- b. Sub DAS Hulu Ciliwung, 4.593,03 ha
- c. Sub DAS Cibogo Cisarua, 4.110,34 ha
- d. Sub DAS Ciseuseupan Cisukabirus seluas 3.719,85 ha

Berdasarkan data di bawah, diketahui bahwa DAS Ciliwung bagian bulu mempunyai curah hujan rata-rata sebesar 2929 - 4956 mm/tahun. Perbedaan bulan basah dan kering sangat menyolok yaitu 10,9 bulan basah per tahun dan hanya 0,6 bulan kering per tahun.

Tipe iklim DAS Ciliwung Bagian Hulu menurut sistem *klasifikasi* Smith dan Ferguson (1951) yang didasarkan pada besarnya curah hujan, yaitu Bulan Basah (>200 mm) dan Bulan Kering (<100 mm) adalah termasuk kedalam Type A.

4. Studi Literatur

4.1 Hidrograf

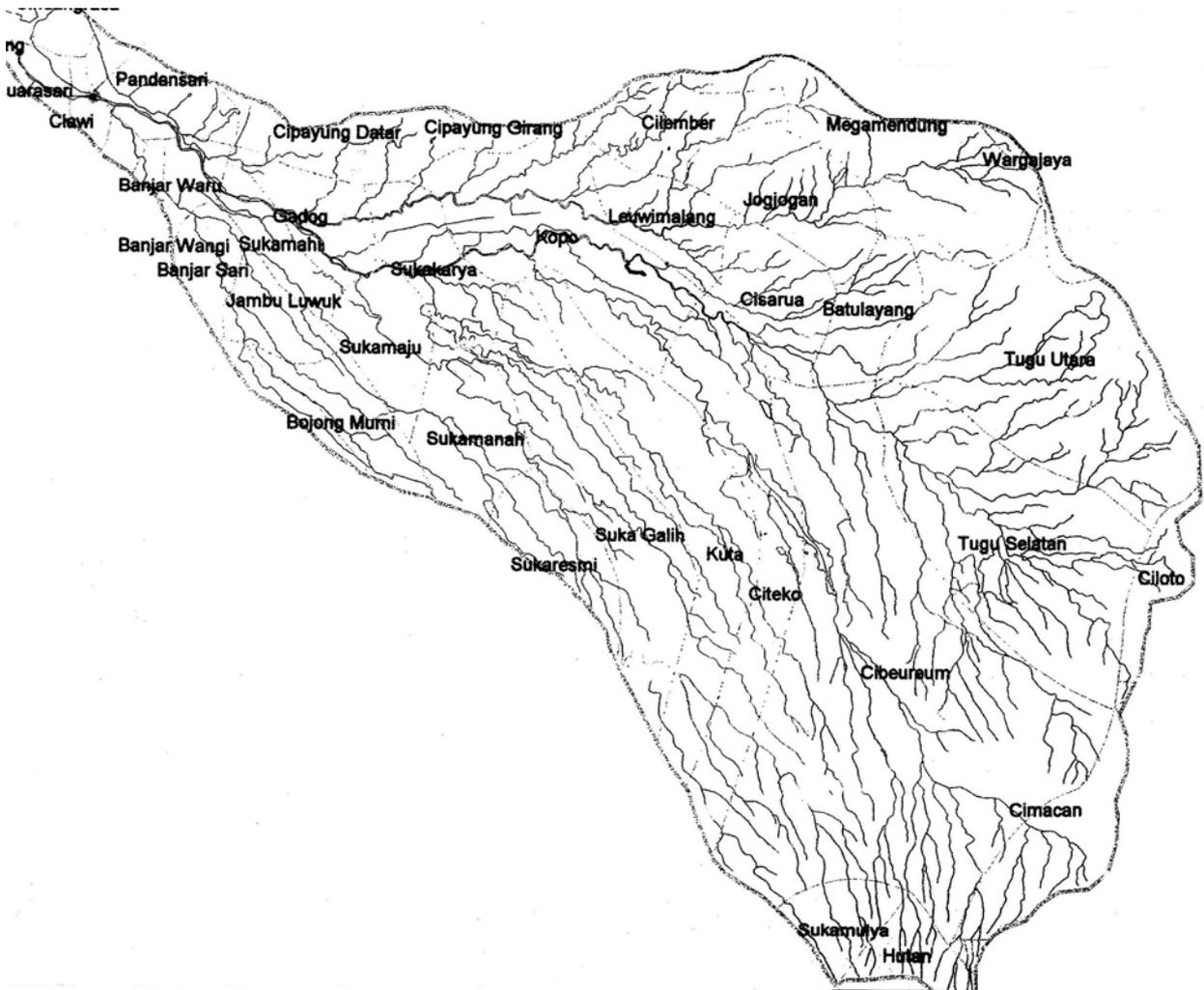
Hidrograf adalah diagram yang menggambarkan variasi debit atau permukaan air menurut waktu. Kurva tersebut memberikan gambaran mengenai berbagai kondisi yang ada didaerah tersebut. Kalau karakteristik daerah aliran itu berubah maka bentuk hidrograf juga akan mengalami perubahan. Kegunaan utama hidrograf satuan adalah untuk menganalisis proyek-proyek pengendalian banjir. Faktor utama untuk menentukan bentuk hidrograf adalah karakteristik DAS dan iklim. Unsur iklim yang perlu diketahui adalah jumlah curah hujan total, intensitas hujan, lama waktu hujan, penyebaran hujan dan suhu.

Teori klasik hidrograf satuan (unit hydrograph) yang pertama kali diperkenalkan oleh L.K Sherman, berasal dari hubungan antara hujan efektif dengan limpasan langsung. Hubungan tersebut merupakan salah satu komponen model watershed yang umum. Teori hidrograf satuan merupakan penerapan pertama teori sitem linear dalam hidrologi. Watershednya dipandang sebagai black box dan sistemnya ditandai oleh tanggapan (response) Q terhadap input tertentu (**Gambar 2**).

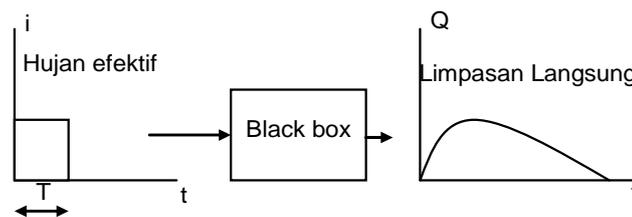
Tabel 1. Sub DAS Ciliwung Hulu

No	Kec/Desa	Ciesek	SUB DAS			Total
			Ciliwung Hulu	Cibogo Cisarua	Ciseuseupan Cisukabirus	
I	Kec.Ciawi	0	0	83,76	1261,02	1344,78
II	Kec.Cisarua	233,8	3739,95	2962,48	0	6936,23
III	Kec.Megamendung	2218,98	835,08	1064,1	1868,52	6004,68
IV	Kec.Sukaraja	0	0	0	221,47	221,47
V	Kec.Kota Bogor	0	0	0	368,84	368,84

Sumber: http://www.pu.go.id/ditjen_ruang/WebSite/Ciliwung/Tataguna_hulu.htm



Gambar 1. Daerah aliran sungai Ciliwung Hulu



Gambar 2. Hubungan hujan efektif dengan Limpasan

Inputnya berupa merata, yaitu hujan dengan intensitas konstan sebesar i dan durasi T yang terbagi rata di atas watershed. Jadi yang dimaksud hidrograf satuan suatu watershed adalah suatu limpasan langsung yang diakibatkan oleh suatu satuan volume hujan efektif, yang terbagi rata dalam waktu dan ruang.

Hidrograf satuan menunjukkan bagaimana hujan efektif tersebut ditransformasikan menjadi limpasan langsung di pelepasan (*outlet watershed*). Transformasi itu disertai anggapan berlakunya proses linear. Hidrograf satuan mempunyai sifat khusus untuk suatu watershed, yang menunjukkan adanya efek terpadu sifat dan bentuk permukaan watershed terhadap penelusuran (*routing*) hujan lewat daerah tangkapannya.

Prinsip hidrograf satuan dapat diterapkan untuk :

1. Memperkirakan banjir perencanaan (*design flood*).
2. Mengisi data banjir yang hilang
3. Memperkirakan banjir jangka pendek yang didasarkan atas curah hujan yang tercatat (*recorded rainfall*).

Tujuan hidrograf satuan adalah mencari hubungan antara limpasan permukaan dan hujan sebagai penyebabnya (walaupun sudah jelas terlihat bahwa kualitas dan intensitas hujan mempunyai pengaruh langsung terhadap hidrograf, maka dengan hidrograf satuan dapat dijelaskan bagaimana hubungannya, berapa besar pengaruh hujan efektif terhadap limpasan permukaan).

4.2 Hidrograf satuan teoritis

4.2.1 Least square

Deconvolution digunakan untuk menurunkan hidrograf satuan dari beberapa puncak hidrograf yang kompleks, tetapi kemungkinan error atau nonlinier pada data adalah lebih besar dari satu puncak hidrograf. Pemakaian Least Square atau metoda optimasi dapat digunakan meminimalkan error pada hidrograf limpasan langsung yang dihitung. Aplikasi teknik ini dinyatakan melalui persamaan di bawah ini dalam bentuk matrik.

$$\begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ P_2 & P_1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ P_3 & P_2 & P_1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ P_M & P_{M-1} & P_{M-2} & \dots & P_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & P_M & P_{M-1} & \dots & P_2 & P_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & P_M & P_{M-1} \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & P_M & P_M \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ \vdots \\ U_{N-M+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ \vdots \\ Q_M \\ Q_{M+1} \\ \vdots \\ Q_{N-1} \\ Q_N \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$[P] [U] = [Q] \tag{2}$$

Diketahui $[P]$ dan $[Q]$ biasanya tidak ada solusi untuk $[U]$ yang memenuhi semua N Persamaan (1). Diperkirakan sebuah solusi $[U]$ diberikan sehingga menghasilkan sebuah Q dari DRH (*direct runoff hydrograph*) sebagai

$$[P] [U] = [\hat{Q}] \tag{3}$$

atau

$$\hat{Q}_n = P_n U_1 + P_{n-1} U_2 + \dots + P_{n-M+1} U_M \quad n=1, \dots, N \tag{4}$$

Dengan semua persamaan memenuhi. Sebuah solusi yang diobservasi dan yang diperkirakan.

sepertinya meminimalkan error $[Q] - [\hat{Q}]$ antara DRH

Penyelesaian dengan Regresi Linier

Penyelesaian dengan regresi linear menghasilkan *error least-square* antara $[Q]$ dan $[\hat{Q}]$ (Snyder 1955). Untuk menyelesaikan Persamaan (2) guna mencari $[U]$, matrik rectangular $[P]$ dikurangi menjadi matrik kuadrat $[Z]$ dengan cara mengalikan kedua sisi dengan transpose $[P]$, dengan symbol $[P]^T$, yang dibentuk dengan cara merubah baris dan kolom $[P]$. Kemudian kedua sisi dikalikan dengan invers $[Z]^{-1}$ dari matrik $[Z]$. sehingga :

$$[U] = [Z]^{-1} [P]^T [Q] \tag{5}$$

Dimana $[Z] = [P]^T [P]$. Walau bagaimanapun, penyelesaian dengan metode ini tidaklah mudah dikarenakan banyaknya pengulangan dan data yg kosong pada $[P]$ sehingga sukar utk menentukan invers dari $[Z]$

4.2.2 Forward substitution

Dengan cara inverse matrik dapat ditentukan bentuk hidrograf satuan secara langsung dari deret data (time series) hujan netto yang sebenarnya dengan aliran keluar yang bersangkutan. Salah satu penerapan cara hidrograf satuan ini adalah untuk menentukan banjir perencanaan (*design flood*).

Misalkan $P_1, P_2, P_3, \dots, P_n$ adalah tinggi curah hujan dalam waktu yang berurutan, $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ adalah ordinat-ordinat hidrograf satuan dan $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$ merupakan debit aliran keluar pada setiap periode hujan.

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m U_{n-m+1} \tag{6}$$

Beberapa kelemahan cara forward substitution adalah :

1. Persamaan yang diperoleh tidak selalu dapat diselesaikan
2. Terjadi perambatan kesalahan, karena kesalahan yang terjadi dalam hitungan U_1 akan terbawa kehitungan U_2 dan seterusnya.
3. U_0 dapat ditetapkan sama dengan nol, akan tetapi U_n tidak selalu sama dengan nol, sehingga diperlukan pertimbangan tersendiri.

Tabel 2. Ordinat-ordinat hidrograf satuan metoda forwrd substitution

No	CH Efektif (mm)	Hidrograf Satuan (m ³ /s)/mm								LIM PASAN (m ³ /s)
		U1	U2	U3	U4	U5	U6	U7	U8	
1	P ₁	P ₁ U ₁								Q ₁
2	P ₂	P ₂ U ₁	P ₁ U ₂							Q ₂
3	P ₃	P ₃ U ₁	P ₂ U ₂	P ₁ U ₃						Q ₃
4	P ₄	P ₄ U ₁	P ₃ U ₂	P ₂ U ₃	P ₁ U ₄					Q ₄
5	P ₅	P ₅ U ₁	P ₄ U ₂	P ₃ U ₃	P ₂ U ₄	P ₁ U ₅				Q ₅
6			P ₅ U ₂	P ₄ U ₃	P ₃ U ₄	P ₂ U ₅	P ₁ U ₆			Q ₆
7				P ₅ U ₃	P ₄ U ₄	P ₃ U ₅	P ₂ U ₆	P ₁ U ₇		Q ₇
8					P ₅ U ₄	P ₄ U ₅	P ₃ U ₆	P ₂ U ₇	P ₁ U ₈	Q ₈
9						P ₅ U ₅	P ₄ U ₆	P ₃ U ₇	P ₂ U ₈	Q ₉
10							P ₅ U ₆	P ₄ U ₇	P ₃ U ₈	Q ₁₀
11								P ₅ U ₇	P ₄ U ₈	Q ₁₁
12									P ₅ U ₈	Q ₁₂

4.2.3 Linear reservoir cascade

Lintasan yang ditempuh oleh aliran sungai menuju ke pelepasannya, yang diikuti oleh limpsan bawah tanah, melalui berbagai macam tampungan. Akibatnya adanya pengaruh tampungan tersebut, maka hidrografnya dapat dinyatakan sebagai penjumlahan sejumlah tampungan linear. Dalam tampungan linear aliran keluar dari tampungan tersebut sebanding dengan tampungannya, yaitu :

$$S = k Q \tag{7}$$

dengan :

- S = tampungan
- k = konstanta yang tergantung kepada daerah pengaliran
- Q = debit aliran keluar

Prinsip ini dapat dipakai untuk mendapatkan HSK dan HST dari tampungan yang disusun seri. Pertama-tama kita tinjau HSK tampungan linear. HSK ditentukan sebagai reaksi yang berupa lairan keluar terhadap masukan kejut dengan satuan volume S=1 dan t=t=0. Pada t>0 tampungan akan dikosongkan menurut rumus

$$Q(t) = -\frac{dS(t)}{dt} = \frac{1}{k} S(t) \tag{8}$$

maka

$$\frac{dS(t)}{dt} = -\frac{1}{k} S(t) \tag{9}$$

Penyelesaian umum persamaan diferensial tersebut adalah sebagai berikut :

$$\ln S(t) = -\frac{t}{k} + C \tag{10}$$

Dengan kondisi permulaan S(t) = 1 pada t=0, dan karena ln 1 = 0 didapat C=0, sehingga

$$S(t) = e^{-\frac{t}{k}} \tag{11}$$

$$Q(t) = \frac{1}{k} e^{-\frac{t}{k}} \tag{12}$$

Karena masukannya berupa masukan kejut dengan volume satu, maka didapat

$$U(t,0) = Q(t) = \frac{1}{k} e^{-\frac{t}{k}} \tag{13}$$

Persamaan (13) tersebut diatas merupakan permukaan yang berlaku untuk HSK atau aliran keluar dari sebuah tampungan lihat Gambar 3.

Lengkung S untuk tampungan linear merupakan aliran keluar yang diakibatkan oleh satuan langkah masukan. Ini merupakan blok masukan dengan satuan intensitas dan durasi tak terhingga yang dimulai dari t=0.

$$S_t = \int_0^t U(\sigma,0) d\sigma \text{ atau } U(t,0) = \frac{dS_t}{dt} \tag{14}$$

$$S_t = \int_0^t \frac{1}{k} e^{-\frac{\sigma}{k}} d\sigma = e^{-\frac{\sigma}{k}} \Big|_0^t = -e^{-\frac{\sigma}{k}} + 1$$

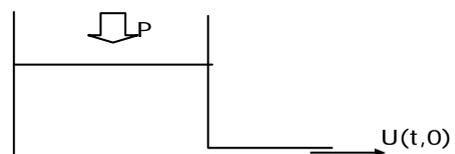
$$S_t = \left(1 - e^{-\frac{t}{k}} \right) \tag{15}$$

Hidrograf satuan T jam U(t,T) atau HST untuk tampungan linear merupakan aliran keluar yang diakibatkan oleh blok masukan dengan durasi T dan intensitas 1/T.

$$U(t,T) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t U(\sigma,0) d\sigma$$

$$= \frac{1}{T} \left(e^{-\frac{t}{k}} + e^{-\frac{t-T}{k}} \right) \tag{16}$$

$$= \frac{1}{T} \left(e^{\frac{T}{k}} - 1 \right) e^{-\frac{t}{k}}$$



Gambar 3. Blok masukan dengan satuan intensitas dan durasi tak terhingga yang dimulai dari t=0

Jika diberikan aliran masuk konstan sebesar P_1 dari $t=1$, besarnya aliran keluar akan menjadi

$$Q_1 = P_1 \left(1 - e^{-\frac{t}{k}} \right) \quad (17)$$

Ini merupakan hasil konvolusi P_1 dengan HSK. Bila besarnya aliran masuk konstan dari $t=1$ hingga $t=2$ adalah P_2 , maka konvolusi P_2 dengan HSK menjadi

$$Q'_2 = P_2 \left(1 - e^{-\frac{t}{k}} \right) \quad (18)$$

Tetapi pada $t=2$ masih ada aliran keluar dari periode pertama dengan laju aliran masuk P_1 . Kontribusi Q''_2 terhadap aliran masuk total dapat dihitung dengan **Persamaan 16** dengan $t=2$ dan $T=1$, dan dengan P_1 sebagai pengganti $1/T$

$$\begin{aligned} Q''_2 &= P_1 \left(e^{\frac{1}{k}} - 1 \right) e^{-\frac{2}{k}} \\ &= P_1 \left(1 - e^{-\frac{1}{k}} \right) e^{-\frac{1}{k}} \\ &= Q_1 e^{-\frac{1}{k}} \end{aligned} \quad (19)$$

$$\text{Sehingga: } Q_2 = Q'_2 + Q''_2 = Q_1 e^{-\frac{1}{k}} + P_2 \left(1 - e^{-\frac{1}{k}} \right) \quad (20)$$

Jadi untuk tampungan linear sederhana yang ditandai oleh faktor proporsionalitas k , maka besarnya aliran keluar pada akhir interval dapat diperoleh dari besarnya aliran keluar pada akhir interval terdahulu dan aliran masuk selama interval yang ditinjau. Pada umumnya dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Q_t = Q_{t-1} e^{-\frac{t}{k}} + P_t \left(1 - e^{-\frac{t}{k}} \right) \quad (21)$$

Penundaan waktu (*time lag*) dari HSK pada tampungan linear dapat ditentukan dengan menghitung momen pertama terhadap titik asal (*origin*), yaitu

$$\begin{aligned} \text{lag} &= \frac{\int_0^{\infty} \frac{1}{k} t e^{-\frac{t}{k}} dt - k \int_0^{\infty} \frac{1}{k} t dt \left(e^{-\frac{t}{k}} \right)}{\int_0^{\infty} \frac{1}{k} e^{-\frac{t}{k}} dt} = k \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\frac{t}{k}} dt - \int_0^{\infty} t e^{-\frac{t}{k}} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{k}} dt} \\ &= k \frac{0 - \int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{k}} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\frac{t}{k}} dt} = -k \frac{0-1}{1} = k \end{aligned} \quad (22)$$

Untuk sebuah tampungan linear dapat dibuktikan bahwa jarak antara titik berat luasan distribusi hujan netto dan hidrograf yang dihasilkan harus sama dengan k , yang merupakan faktor proporsionalitas tampungan. Sedangkan penundaan waktu (*lag*) untuk n buah tampungan linear yang disusun secara seri adalah sama dengan $n.k$. Nash (1958) lewat penyelesaian langsungnya yang lebih baik, telah menemukan HSK untuk n buah tampungan yang sama dan disusun secara seri seperti pada **Gambar 4** di bawah.

$$\begin{aligned} U(t, 0) &= \frac{t^{(n-1)}}{k^n} \frac{1}{(n-1)!} e^{-\frac{t}{k}} \\ &= \frac{1}{k \Gamma(n)} e^{-\frac{t}{k}} \left\{ \frac{t}{k} \right\}^{n-1} \end{aligned} \quad (23)$$

5. Metode Penelitian

5.1 Pengumpulan data

Untuk data curah hujan yang dibutuhkan adalah curah hujan jam-jam begitu juga dengan data debit.

Data hidrologi yang perlu dikumpulkan serta kegunaannya adalah sebagai berikut:

1. Data curah hujan

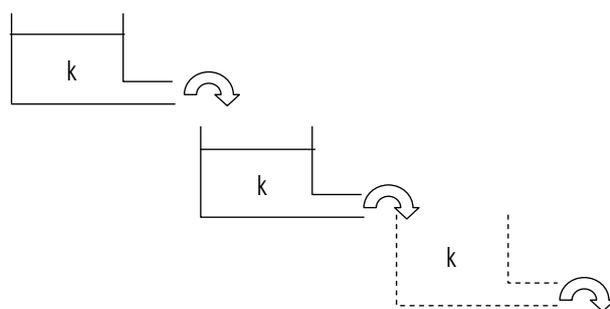
Data curah hujan yang dibutuhkan adalah curah hujan jam-jaman yang nantinya dijadikan ke dalam bentuk curah hujan wilayah.

2. Pengumpulan data debit sungai

Data debit yang dibutuhkan adalah data debit jam-jaman. Data yang didapat di lapangan adalah data tinggi muka air yang yang sudah dijadikan dalam bentuk debit berdasarkan kurva dan persamaan yang didapat.

3. Pengumpulan data tata guna lahan

Pengumpulan data tata, guna lahan diperlukan untuk menentukan karakteristik dari suatu DAS yang diteliti. Adapun data-data yang harus diketahui adalah luas DAS, koefisien pengaliran, panjang sungai, dan lain sebagainya.



Gambar 4. Hidrograf Satuan Kejut untuk n buah tampungan

Tabel 3. Nilai $\Gamma(n)$ merupakan fungsi gamma

N	$\Gamma(n)$	n	$\Gamma(n)$	N	$\Gamma(n)$
1.00	1.000000	1.34	0.892216	1.68	0.905001
1.02	0.988844	1.36	0.890185	1.70	0.908639
1.04	0.978438	1.38	0.888537	1.72	0.912581
1.06	0.968744	1.40	0.887264	1.74	0.916826
1.08	0.959725	1.42	0.886356	1.76	0.921375
1.10	0.951351	1.44	0.885805	1.78	0.926227
1.12	0.943590	1.46	0.885604	1.80	0.931384
1.14	0.936416	1.48	0.885747	1.82	0.936845
1.16	0.929803	1.50	0.886227	1.84	0.942612
1.18	0.923728	1.52	0.887039	1.86	0.948687
1.20	0.918169	1.54	0.888178	1.88	0.955071
1.22	0.913106	1.56	0.889639	1.90	0.961766
1.24	0.908521	1.58	0.891420	1.92	0.968774
1.26	0.904397	1.60	0.893515	1.94	0.976099
1.28	0.900718	1.62	0.895924	1.96	0.983743
1.30	0.897471	1.64	0.895642	1.98	0.991708
1.32	0.894640	1.66	0.901668	2.00	1.000000

5.2 Analisa data awal

Berdasarkan data-data yang berhasil dikumpulkan dalam penelitian ini, selanjutnya dilakukan analisa awal dari data-data tersebut. Analisa data awal ini dari beberapa bagian, yaitu: penentuan besarnya curah hujan wilayah, *runoff* dengan *baseflow*, dan penentuan karakteristik lahan.

Analisa data awal terdiri dari beberapa tahap, yaitu.:

1. Curah hujan wilayah
Untuk mendapatkan curah hujan wilayah, dilakukan analisa data curah dengan menggunakan poligon Thiessen seperti yang dijelaskan pada bagian tinjauan pustaka.
2. Pemisahan Runoff dengan baseflow
Pemisahan *runoff* dengan *baseflow* menggunakan *straight line method*.
3. Infiltrasi dan curah hujan efektif
Curah hujan efektif diperoleh dengan cara menentukan besarnya infiltrasi yang terjadi pada lokasi DAS yang akan diteliti dengan menggunakan metode phi indeks,.

5.3 Analisa data lanjutan

Dari hasil analisa data awal, selanjutnya akan dilakukan analisa data lanjutan untuk menentukan nilai ordinat hidrograf satuan dengan beberapa metode. Hidrograf satuan yang dihitung adalah hidrograf satuan observasi, dan hidrograf satuan teoritis.

Analisa data lanjutan terdiri dari beberapa tahap, yaitu:

1. Hidrograf satuan observasi
Hidrograf satuan observasi pada penelitian ini dihitung berdasarkan data-data hasil pengamatan pada DAS yang diteliti, untuk mendapatkan hidrograf satuan dengan berbagai durasi dapat menggunakan metode S-Curve.
2. Hidrograf Satuan Teoritis
Hidrograf satuan teoritis dihitung berdasarkan data hujan jam-jaman dan debit jam-jaman. Adapun metoda yang dipakai ada Metode Least Square, Forward Subtitution, Persentase Distribusi, Linier Reservoir Cascade

6. Pembahasan

6.1 Perhitungan curah hujan wilayah

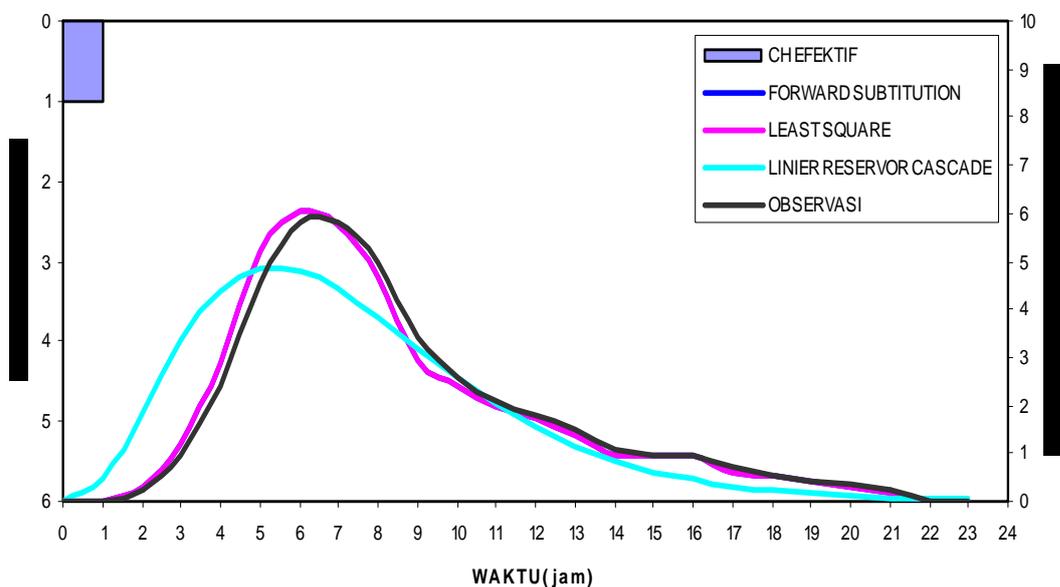
Untuk data Curah hujan jam-jaman data yang ada didapat pada pos pengamatan hujan Gadog, Gunung Mas, Citeko, Cilember dan Tugu Utara (**Gambar 4**)

6.2 Hidrograf satuan observasi

Tabel 9 terlihat data tinggi muka air, data curah hujan wilayah dan debit banjir. Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data tanggal 14 Desember 2006 jam 16.00 sampai tanggal 15 Desember 2006 jam 15.00.

Tabel 4. Hasil perhitungan hidrograf satuan observasi dan hidrograf satuan teoritis

t (jam)	Hidrograf Satuan			
	Observasi	Forward Subtitution	Least Square	Linier Reservoir Cascade
0	0.00	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00	0.48
2	0.22	0.30	0.30	1.86
3	0.94	1.19	1.19	3.34
4	2.40	2.86	2.86	4.39
5	4.57	5.22	5.22	4.85
6	5.83	6.07	6.07	4.80
7	5.83	5.74	5.74	4.40
8	4.97	4.68	4.68	3.82
9	3.42	2.94	2.94	3.18
10	2.56	2.41	2.41	2.56
11	2.08	1.95	1.95	2.01
12	1.78	1.71	1.71	1.54
13	1.49	1.40	1.40	1.16
14	1.08	0.95	0.95	0.86
15	0.94	0.94	0.94	0.63
16	0.94	0.95	0.95	0.45
17	0.69	0.59	0.59	0.32
18	0.57	0.56	0.56	0.23
19	0.45	0.41	0.40	0.16
20	0.33	0.30	0.31	0.11
21	0.22	0.19	0.16	0.08
22	0.00	0.00	0.00	0.05
23	0.00	0.00	0.00	0.04
24	0.00	0.00	0.00	0.02



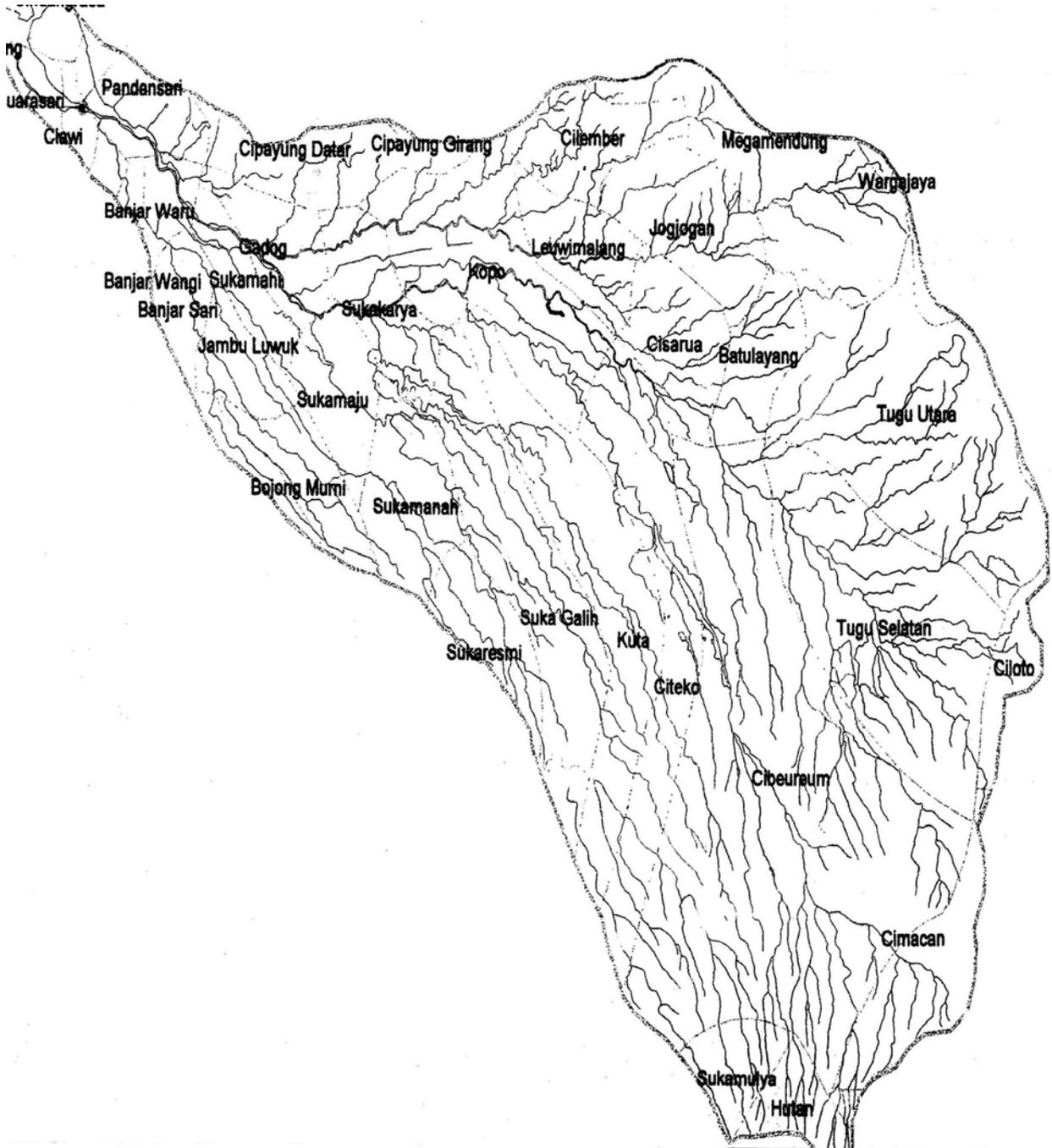
Gambar 5. Hidrograf satuan observasi dan hidrograf satuan teoritis DAS ciliwung hulu

Tabel 5. Perbandingan parameter hidrograf satuan observasi dan teoritis DAS Ciliwung Hulu

No	Hidrograf Satuan	Q peak (m ³ /s)/mm	Tp (jam)	Tb (jam)	Vol. DRO (m ³)	Tinggi DRO (mm)
1	Observasi	5.83	6 & 7	23	380,049.75	2.555
2	Forward Subtitution	5.91	7	23	379,959.29	2.554
3	Least Square	5.91	7	22	380,140.14	2.555
4	Linear Reservoir Cascade	4.85	6	23	376,436.71	2.530

Tabel 6. Koefisien korelasi dan rasio descrapancy hidrograf satuan teoritis DAS Ciliwung Hulu

No	Hidrograf Satuan	Koefisien Korelasi		Rasio Descrapancy			Jumlah	Rata-Rata
		Kurva Naik (%)	Kurva Turun (%)	Qp	Tp	Tb		
1	<i>Forward Subtitution</i>	76	41	0.961	1.000	1.045	3.007	1.002
2	<i>Least Square</i>	76	41	0.961	1.000	1.045	3.007	1.002
3	<i>Linier Reservoir Cascade</i>	1273	549	1.204	1.200	0.9583	3.362	1.121



Gambar 6. Poligon Thiesen untuk curah hujan wilayah DAS Ciliwung Hulu

Tabel 7. Curah hujan jam-jaman dan debit DAS Ciliwung Hulu

Tanggal	Jam	Pos Gunung Mas	Pos Citeko	Pos Gadog	Pos Cilember	Pos Tugu Utara	Debit (M ³ /S)
14 JANUARI 2006	16.00	1	0	0	0	0	6.15
	17.00	10	0	2	0	0	6.15
	18.00	3	0	2	0	0	6.71
	19.00	1	0	0	0	0	8.56
	20.00	0	0	0	0	0	12.27
	21.00	0	0	0	0	0	17.81
	22.00	0	0	0	0	0	21.05
	23.00	0	0	0	0	0	21.05
24.00	0	0	0	0	0	18.86	
15 JANUARI 2006	1.00	0	0	0	0	0	14.89
	2.00	0	0	0	0	0	12.68
	3.00	0	0	0	0	0	11.46
	4.00	0	0	0	0	0	10.69
	5.00	0	0	0	0	0	9.95
	6.00	0	0	0	0	0	8.90
	7.00	0	0	2	0	0	8.56
	8.00	0	0	0	0	0	8.56
	9.00	0	0	0	0	0	7.91
	10.00	0	0	0	0	0	7.60
	11.00	0	0	0	0	0	7.29
	12.00	0	0	0	0	0	7.00
	13.00	0	0	0	0	0	6.71
	14.00	0	0	0	0	0	6.15
15.00	0	0	0	0	0	6.15	

Tabel 8. Perhitungan curah hujan wilayah menggunakan metoda Thiessen

Jam	Pos Gunung Mas	Pos Citeko	Pos Gadog	Pos Cilember	Pos Tugu Utara	Ch Wilayah
16,00	1	0	0	0	0	0,163
17,00	10	0	2	0	0	2,036
18,00	3	0	2	0	0	0,894
19,00	1	0	0	0	0	0,163
20,00	0	0	0	0	0	0
21,00	0	0	0	0	0	0
22,00	0	0	0	0	0	0
23,00	0	0	0	0	0	0
24,00	0	0	0	0	0	0
1,00	0	0	0	0	0	0
2,00	0	0	0	0	0	0
3,00	0	0	0	0	0	0
4,00	0	0	0	0	0	0
5,00	0	0	0	0	0	0
6,00	0	0	0	0	0	0
7,00	0	0	0	0	0	0
8,00	0	0	0	0	0	0
9,00	0	0	0	0	0	0
10,00	0	0	0	0	0	0
11,00	0	0	0	0	0	0
12,00	0	0	0	0	0	0
13,00	0	0	0	0	0	0
14,00	0	0	0	0	0	0
15,00	0	0	0	0	0	0

Tabel 9. Hubungan tinggi muka air dan debit DAS Ciliwung Hulu

t (jam)	Tinggi Muka Air (m)	Curah Hujan (mm)	Debit (m ³ /s)
0	0.56	0.163	6.15
1	0.56	2.036	6.15
2	0.58	0.894	6.71
3	0.64	0.163	8.56
4	0.74		12.27
5	0.86		17.81
6	0.92		21.05
7	0.92		21.05
8	0.88		18.86
9	0.80		14.89
10	0.75		12.68
11	0.72		11.46
12	0.70		10.69
13	0.68		9.95
14	0.65		8.90
15	0.64		8.56
16	0.64		8.56
17	0.62		7.91
18	0.61		7.60
19	0.60		7.29
20	0.59		7.00
21	0.58		6.71
22	0.56		6.15
23	0.56		6.15

Dari data debit banjir dan curah hujan dijadikan dalam bentuk grafik seperti terlihat pada Gambar 5.

Untuk debit banjir harus dipisahkan dengan aliran dasarnya (*base flow*) yaitu dengan menggunakan metoda *Straight Line*. Base flownya adalah 6.15 m³/s.

Volume limpasan adalah luas yang ada di bawah grafik limpasan Gambar 6, hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 10. Volume limpasannya adalah 380,050 m³ dengan tinggi limpasan (r_d) = 2,55 mm

$$\begin{aligned} \text{Tinggi limpasan} &= \frac{\text{Volume limpasan}}{\text{Luas DPS}} = \frac{380,050 \text{ m}^3}{148,760,000 \text{ m}^2} \\ &= 0.002555 \text{ m} = 2.555 \text{ mm} \end{aligned} \quad (24)$$

Besarnya infiltrasi dihitung menggunakan Φ indek. Persamaannya adalah sebagai berikut:

$$r_d = \sum_{m=1}^M (R_m - \phi \Delta t) \quad (25)$$

$$2.55 = (2.036 + 0.894 - \phi \times 2 \times 1)$$

$$\phi = 0.187 \text{ mm}$$

Dari hasil perhitungan didapat besarnya infiltrasi 0.187 mm, maka hujan efektifnya adalah (2.036-0.187) = 1.849 mm dan (0.894-0.187) = 0.706 mm.

6.3 Hidrograf satuan teoritis least square

Jumlah data curah hujan efektif (m) sebanyak 2 data, sedangkan data DRO (n) adalah 21 data.

1. Curah hujan efektif 2 data, m=2

2. DRO 21 data, n=23

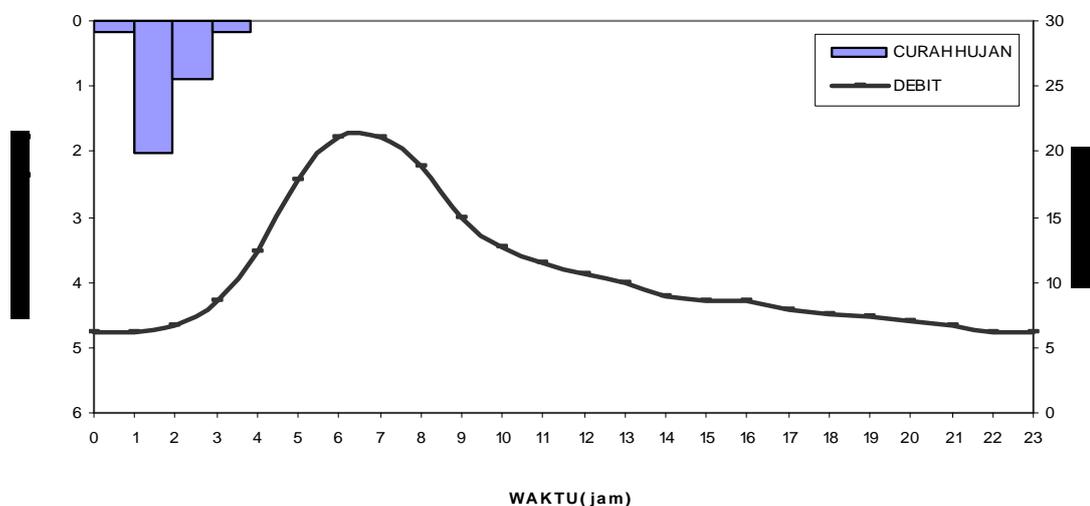
Maka banyaknya hidrograf satuan yang didapat nantinya adalah:

$$U_{n \ m+1} = n \ m+1 = 23 \ 2+1 = 22 \quad (26)$$

Persamaan matrik hidrograf satuan *Least Square* adalah:

$$[P][U] = [Q] \quad (27)$$

$$U = [P^T P]^{-1} P^T Q \quad (28)$$



Gambar 7. Debit dan curah hujan jam-jaman

Tabel 10. Hasil perhitungan volume limpasan (Runoff)

t (jam)	CH Efektif (mm)	Debit (m3/s)	Volume (m ³)	Luas DAS (m ³)
0		0.000	-	
1	1.848	0.000	0	
2	0.706	0.559	1006	
3		2.413	5349	
4		6.123	15365	
5		11.664	32017	
6		14.907	47828	
7		14.907	53665	
8		12.709	49709	
9		8.740	38609	
10		6.538	27501	148,760,000
11		5.317	21339	
12		4.543	17748	
13		3.802	15021	
14		2.749	11791	
15		2.413	9291	
16		2.413	8687	
17		1.765	7520	
18		1.452	5791	
19		1.147	4679	
20		0.849	3593	
21		0.559	2535	
22		0.000	1006	
23		0.000	0	
Volume limpasan (m³)			380,049.75	
Tinggi limpasan (mm)			2.555	

Tabel 11. Hidrograf satuan observasi

t (jam)	CH Efektif (mm)	UH Observasi (m3/s)/mm	t (jam)	CH Efektif (mm)	UH Observasi (m3/s)/mm
0	1.00	0.00	12	0.00	1.78
1	0.00	0.00	13	0.00	1.49
2	0.00	0.22	14	0.00	1.08
3	0.00	0.94	15	0.00	0.94
4	0.00	2.40	16	0.00	0.94
5	0.00	4.57	17	0.00	0.69
6	0.00	5.83	18	0.00	0.57
7	0.00	5.83	19	0.00	0.45
8	0.00	4.97	20	0.00	0.33
9	0.00	3.42	21	0.00	0.22
10	0.00	2.56	22	0.00	0.00
11	0.00	2.08	23	0.00	0.00

6.4 Hidrograf satuan teoritis forward substitution

Pendekatan persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Q_n = \sum_{m=1}^n P_m U_{n-m+1} \tag{29}$$

$$U_1 = \frac{Q_1}{P_1} ; U_2 = \frac{Q_2 - P_2 U_1}{P_1} ; U_3 = \frac{Q_3 - P_3 U_1 - P_2 U_2}{P_1} \tag{30}$$

$$U_m = \frac{Q_m - P_m U_1 - P_{m-1} U_{m-1} - \dots - P_2 U_{m-1}}{P_1} \text{ dan seterusnya} \tag{31}$$

6.5. Hidrograf satuan teoritis linear reservoir cascade

Persamaan yang digunakan untuk menghitung M_{I1} dan M_{I2}

$$MI_1 = \frac{\sum \text{incremental area} \times \text{moment arm}}{\sum \text{area}} \tag{32}$$

$$MI_2 = \frac{\sum \text{incremental area} \times (\text{moment arm})^2 + \sum \text{sec ond moment ebouto each increment}}{\sum \text{area}} \tag{33}$$

Persamaan yang digunakan untuk menghitung M_{Q1} dan M_{Q2}

$$MQ_1 = \frac{\sum \text{incremental area} \times \text{moment arm}}{\sum \text{area}} \tag{34}$$

$$MQ_2 = \frac{\sum \text{incremental area} \times (\text{moment arm})^2 + \sum \text{sec ond moment ebouto each increment}}{\sum \text{area}} \tag{35}$$

Menghitung nilai n dan k

$$nk = M_{Q1} - M_{I1}$$

$$nk = 8.649 - 0.776 = 7.872$$

$$MQ_2 - MI_2 = n(n+1)k^2 + 2nkMI_1$$

$$MQ_2 - MI_2 = n^2k^2 + nk.k + 2nkMI_1$$

$$90.905 - 0.886 = n^2k^2 + nk.k + 2nk(1.276) \quad (36)$$

didapat nilai k = 1.907 dan n = 4.129

Hidrograf satuan kejut dihitung dengan persamaan di bawah ini

$$HSK \quad U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-t/k} \Gamma(n) = (n-1)! = 6 \quad (37)$$

Untuk menjadikan ke hidrograf satuan :

$$U(t) = \frac{1}{k\Gamma(n)} \left(\frac{t}{k}\right)^{n-1} e^{-t/k} \times 0.278 \times A \quad (38)$$

7. Kesimpulan

1. Dari tiga metode dalam menghitung hidrograf satuan teoritis, yang mendekati hasil hidrograf satuan observasi adalah metode *Least Square* dan metode *Forward Substitution*, sedangkan yang tidak mendekati hasil hidrograf satuan observasi adalah metode *Linear Reservoir Cascade*. Hal ini bisa dilihat dari rasio korelasi untuk sisi kurva naik 1273%, sedangkan untuk sisi kurva turun adalah 549%, sedangkan untuk koefisien descrepancy Qp (1,204%), Tp (1,200%) dan Tb (0,958%)
2. Untuk mendapatkan hasil akurat, sebaiknya penelitian dilakukan pada sub DAS, dimana tiap-tiap sub DAS harus terdapat pos pengamat tinggi muka air jam-jaman dan beberapa pos pengamat hujan hujan otomatis.
3. Dari data hujan jam-jam yang ada, pada waktu yang bersamaan ada pos hujan yang tidak terjadi hujan sementara pos hujan yang lainnya terjadi hujan. Hal ini akan mempengaruhi hasil penelitian, dimana pos hujan yang ada hujan akan disebarkan pada daerah pengaliran sungai yang tidak ada terjadi hujan. Apalagi luas daerah pengaliran sungai terlalu besar, dimana hasil yang didapat tidak seakurat untuk luas daerah pengaliran yang kecil.

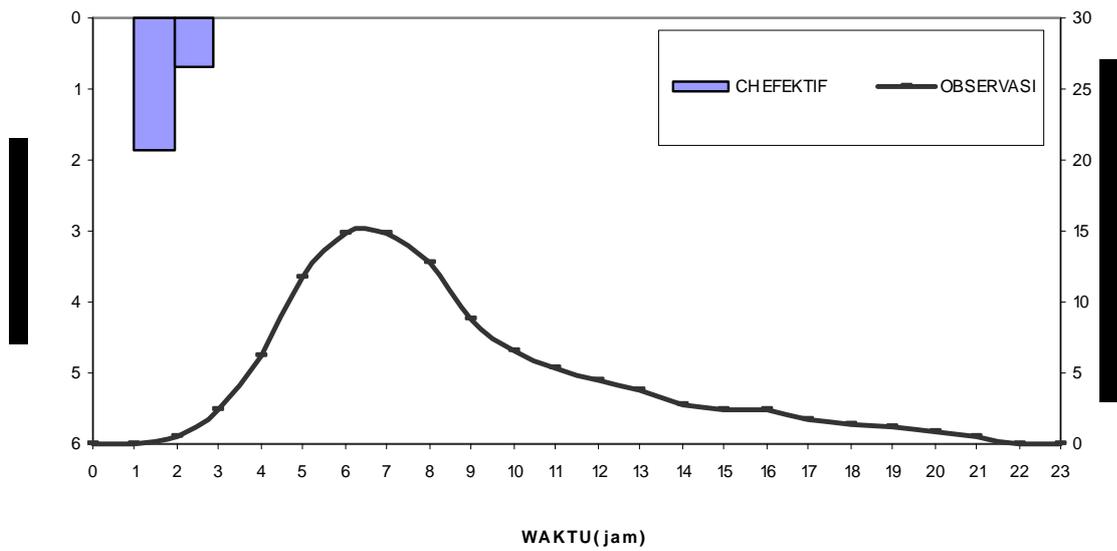
Tabel 12. Hasil perhitungan MI₁ dan MI₂ DAS Ciliwung Hulu

Waktu (1 jam)	Hujan Efektif (m3/s)	MI ₁	MI ₂
0	0.00	0.00	0.00
1	76.38	38.19	25.46
2	29.19	43.78	68.10
3	0.00	0.00	0.00
4	0.00	0.00	0.00
5	0.00	0.00	0.00
6	0.00	0.00	0.00
7	0.00	0	0.00
8	0.00	0	0.00
9	0.00	0	0.00
10	0.00	0	0.00
11	0.00	0	0.00
12	0.00	0	0.00
14	0	0	0.00
TOTAL	105.57	81.971 (0.776)	93.563 (0.886)

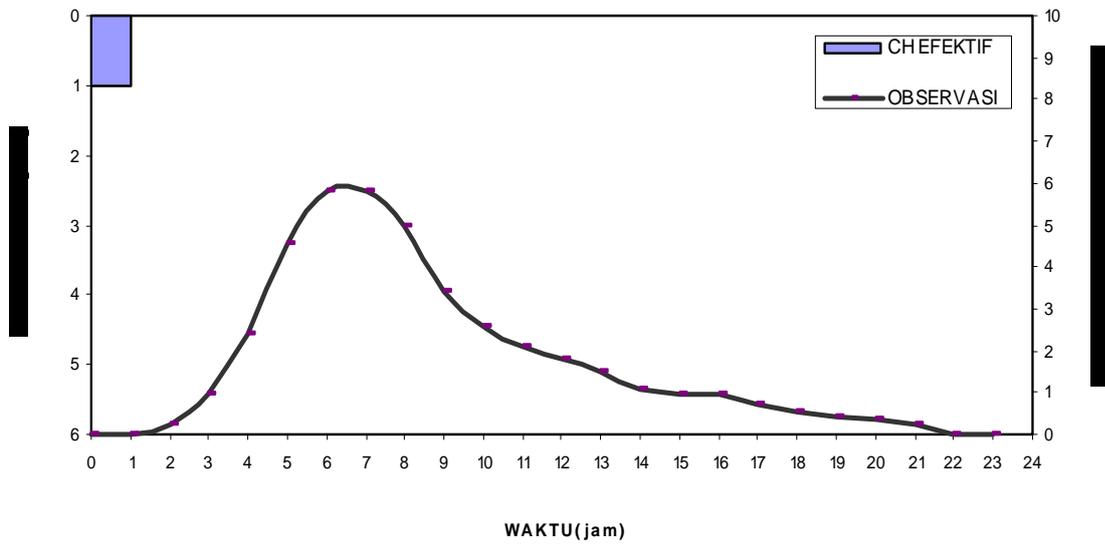
Tabel 13. Hasil perhitungan MQ₁ dan MQ₂ DAS Ciliwung Hulu

Waktu (1 jam)	Debit Limpasan Langsung (m3/s)	MQ ₁	MQ ₂
0	0.00	0.00	0.00
1	0.00	0.00	0.00
2	0.56	0.84	1.30
3	2.41	6.03	15.28
4	6.12	21.43	75.52
5	11.66	52.49	237.18
6	14.91	81.99	452.18
7	14.91	96.90	631.06
8	12.71	95.32	715.96
9	8.74	74.29	632.19
10	6.54	62.11	590.61
11	5.32	55.83	586.62
12	4.54	52.25	601.23
13	3.80	47.52	594.34
14	2.75	37.11	501.16
15	2.41	34.99	507.54
16	2.41	37.40	579.94
17	1.76	29.12	480.65
18	1.45	25.41	444.87
19	1.15	21.22	392.67
20	0.85	16.56	323.01
21	0.56	11.46	234.92
22	0.00	0.00	0.00
23	0.00	0.00	0.00
TOTAL	105.57	860.26 (8.149)	8598.23 (81.446)

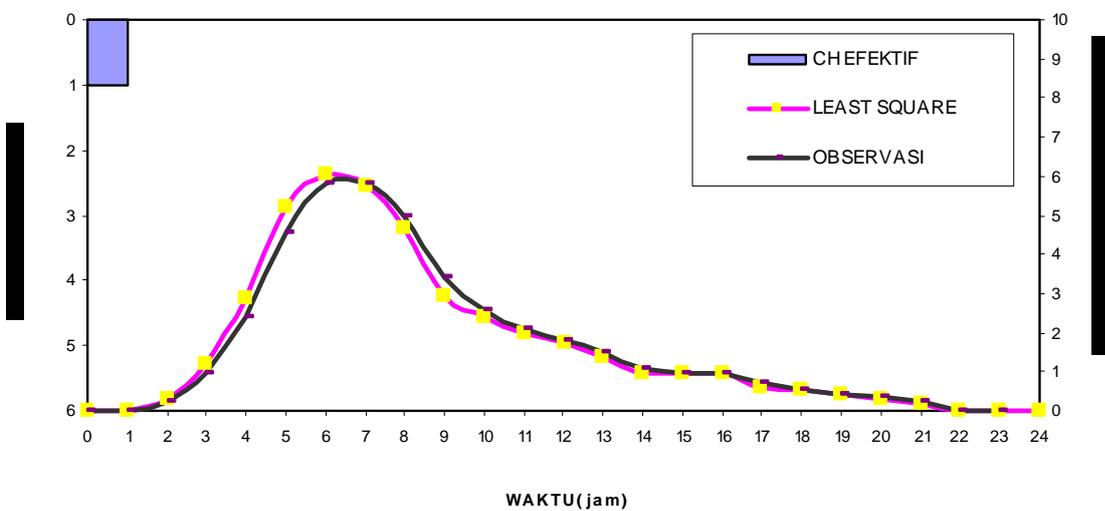
Perbandingan Hidrograf Satuan Teoritis Terhadap Hidrograf Satuan Observasi...



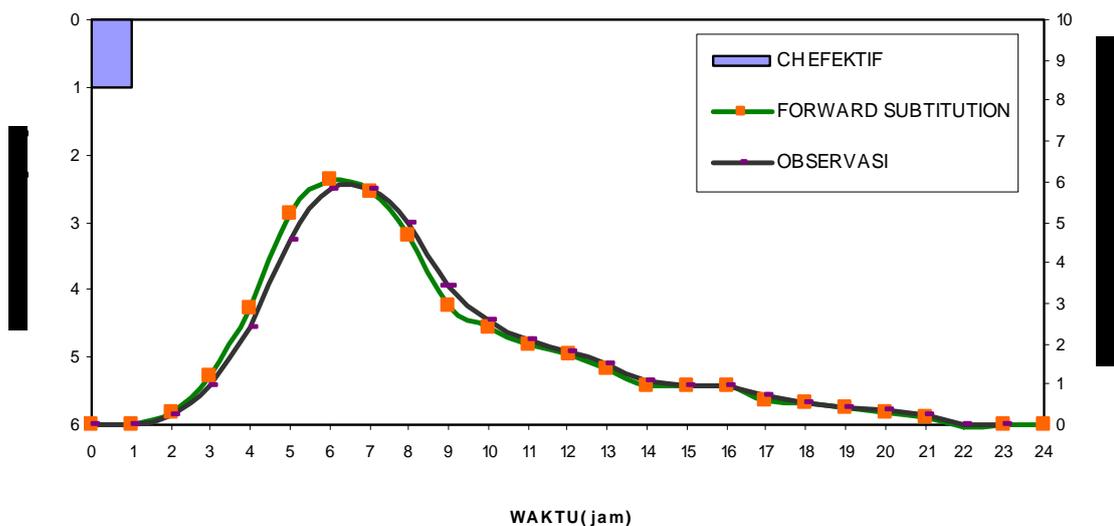
Gambar 8. Curah hujan efektif dan limpasan aliran langsung



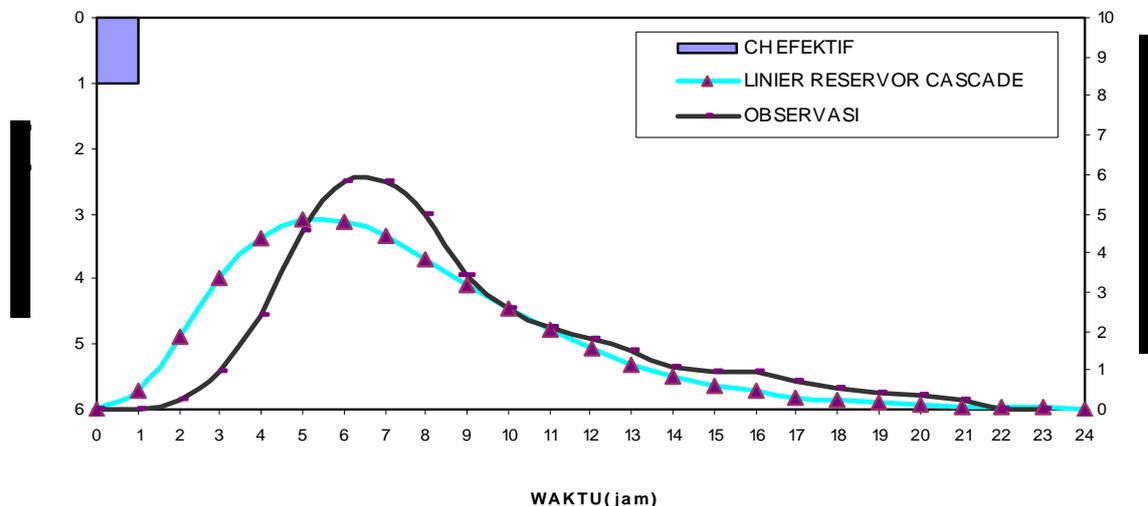
Gambar 9. Hidrograf satuan observasi



Gambar 10. Hidrograf satuan observasi dan hidrograf satuan least square DAS Ciliwung Hulu



Gambar 11. Hidrograf satuan observasi dan hidrograf satuan forward substitution DAS Ciliwung Hulu



Gambar 12. Hidrograf satuan observasi dan hidrograf satuan linear reservoir cascade DAS Ciliwung Hulu

Daftar Pustaka

Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., 1998, *Applied Hydrology*, McGraw-Hill

Nash, 1958, *Hidrologi Teknik*, Dalam: Soemanto, C.D., 1995, Erlangga.

Smith dan Ferguson, 1951, *Hidrologi*, Dalam Wangsadipura, M., Diktat Kuliah SI 252 Hidrologi, Bandung: Penerbit ITB

www.pu.go.id/ditjen_ruang/WebSiteCiliwung/Tataguna_hulu.htm

