

PENGARUH KONDISI AWAL KELENGASAN TANAH TERHADAP DEBIT PUNCAK HIDROGRAF SATUAN

Sasmito¹, Bambang Triatmodjo², Joko Sujono², Sri Harto, Br.²

¹ Mahasiswa program doktor, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta, Pengajar Jurusan Teknik Sipil, Unram, Mataram
² Guru Besar, Departemen Teknik Sipil dan Lingkungan, Fakultas Teknik, UGM, Yogyakarta
e-mail: sasmitoshoekarno@yahoo.co.id

Abstract: Unit hydrograph is a popular method for predicting flood caused by rainfall in a catchment. This method has little flexibility to different storm, consequently the unit hydrographs produced differ considerably from storm to storm. This is partially due to the unit hydrograph method ignores the influence of antecedent soil moisture condition (*AMC*) on runoff generating processes. This paper presents the research result on the influence of *AMC* to peak discharge of observed unit hydrograph (q_{p-obs}). In this research the *AMC* is approached by parameter of soil moisture deficit (*SMD*) which has opposite meaning with the *AMC*. The *SMD* was represented by a variable of S_c (*storage capacity*) that is the space volume remaining the soil moisture evaporated. The research was conducted using hydrologic data (rainfall, discharge, and evaporation) assembled from 4 upper basin surrounding Mount Merapi and Mount Rinjani. The research experiments were performed by deriving unit hydrographs using two methods, namely conventional method (Collins) producing observed unit hydrograph (HS_{obs}) and simulation method using tank model of Yue and Hashino producing simulated unit hydrograph (HS_{sim}). The impact of S_c to the q_{p-obs} was analyzed using peak discharge of HS_{obs} and peak discharge of HS_{sim} . The research result are concluded that: (1) the relationship between S_c and peak discharge of unit hydrograph showed that if the S_c increases (*AMC* decreases) then the peak discharge of HS_{obs} decreases, (2) The formula of correction has exponential form of eksponensial $(q_{p-obs})/(q_{p-obs-kor})=1,104 e^{-0,012S_c}$, with $q_{p-obs-kor}$ is peak discharge of corrected observed unit hydrograph (3) The average corrected observed unit hydrograph has the highest peak discharge than the peak discharge of Synthetic Unit Hydrograph of Nakayasu and the peak discharge of Synthetic Unit Hydrograph of Gama1.

Keywords: *AMC*, observed unit hydrograph, tank model, corrected observed unit hydrograph

Abstrak: Hidrograf satuan adalah salah satu cara untuk memperkirakan besarnya banjir di sungai akibat hujan pada suatu DAS. Hidrograf satuan sangat populer dan dipakai secara luas di dunia. Metode ini mempunyai fleksibilitas yang rendah terhadap hujan yang berbeda, sehingga hidrograf yang dihasilkan berbeda-beda pada setiap hujan. Hal ini diduga disebabkan antara lain karena teori hidrograf satuan mengabaikan pengaruh kondisi awal kelengasan tanah (*antecedent soil moisture condition, AMC*) pada proses penurunan hidrograf satuan. Tulisan ini menyajikan hasil penelitian tentang pengaruh *AMC* terhadap debit puncak hidrograf satuan observasi (q_{p-obs}). Dalam penelitian ini variabel *AMC* didekati dengan besaran defisit kelengasan tanah (*soil moisture deficit, SMD*) yang mempunyai makna berlawanan dengan *AMC*. *SMD* direpresentasikan dengan variabel S_c (*storage capacity*) yakni volume udara di dalam pori tanah yang ditinggalkan air karena ter-evapotranspirasi keluar. Penelitian dilaksanakan dengan menggunakan data hidrologi (hujan, debit aliran, dan evaporasi) yang dikumpulkan dari 3 DAS hulu (*upper catchment*) di kawasan Gunung Merapi. Percobaan penelitian dilakukan dengan cara menurunkan hidrograf satuan dengan dua cara, yakni cara konvensional (Collins) menghasilkan hidrograf satuan observasi (HS_{obs}), dan cara simulasi menggunakan model tangki menghasilkan hidrograf satuan simulasi (HS_{sim}). Analisis pengaruh S_c dilakukan terhadap debit puncak HS_{obs} dan debit puncak HS_{sim} . Penelitian menghasilkan temuan yang dapat disimpulkan sebagai berikut: (1) Hubungan S_c dan debit puncak hidrograf satuan, menunjukkan semakin besar S_c (semakin kecil *AMC*) debit puncak HS_{obs} semakin kecil, (2) Formula koreksi yang didapat berbentuk fungsi eksponensial $(q_{p-obs})/(q_{p-obs-kor})=1,104 e^{-0,012S_c}$, dengan $q_{p-obs-kor}$ adalah debit puncak hidrograf satuan observasi terkoreksi, (3) HS observasi terkoreksi rerata mempunyai debit puncak paling tinggi dibanding debit puncak HSS Nakayasu dan debit puncak HSS Gama 1.

Kata kunci: *AMC*, hidrograf satuan observasi, model tangki, debit puncak hidrograf satuan observasi terkoreksi

PENDAHULUAN

Hidrograf satuan (*HS*) adalah suatu metode untuk memperkirakan besarnya debit yang ditimbulkan oleh hujan pada suatu lokasi di sungai pada suatu DAS. Metode *HS* diperkenalkan oleh Sherman pada tahun 1932. Metode *HS* hingga saat ini dipakai secara luas di dunia.

Metode *HS* mempunyai kelemahan yakni *HS* yang dihasilkan tidak pernah sama dari suatu kejadian hujan-banjir ke kejadian hujan-banjir yang lain. Hal ini diduga disebabkan karena anggapan yang berlaku pada teori *HS* (anggapan keseragaman dan linieritas) tidak dapat terpenuhi sempurna (Sujono dan Jayadi, 2012). Anggapan hujan seragam/merata sulit terpenuhi karena hujan seragam/merata sangat jarang terjadi, demikian pula anggapan proses hidrologi adalah linier tidak sesuai dengan kenyataan karena proses hidrologi di alam sebenarnya adalah proses yang tidak linier.

Kenyataan ini tidak bisa dihindari tetapi dapat diminimalisir efeknya. Efek hujan tidak merata dapat diminimalisir dengan memperbanyak stasiun pengukur hujan agar pengukuran hujan dapat menjangkau seluruh wilayah DAS sehingga hujan yang dipakai mempresentasikan hujan yang sebenarnya terjadi.

Anggapan linier yang diadopsi *HS* mempunyai dua arti yakni proporsionalitas dan superposisi. Prinsip ini menyederhanakan proses hidrologi dari yang tidak linier menjadi linier. Formula konvolusi merupakan pendekatan proses tersebut dan telah memuaskan pada banyak kasus di praktek (Chow, 1988).

Menurut Yue dan Hashino (2000) variasi *HS* dapat disebabkan karena *HS* mengabaikan pengaruh kondisi awal kelengasan tanah (*antecedent soil moisture condition, AMC*) dalam proses penurunan *HS*. Menurut Beven (2002) *AMC* mempunyai peran besar dalam proses pembentukan limpasan. DAS dengan nilai *AMC* besar menghasilkan limpasan yang lebih besar dibanding DAS dengan nilai *AMC* kecil. Fenomena ini mengindikasikan *AMC* juga berpengaruh terhadap *HS*. Besar pengaruh *AMC* terhadap *HS* tidak diketahui karena belum pernah diteliti, oleh karena itu sangat perlu dilaksanakan penelitian untuk mengetahui pengaruh *AMC* terhadap hidrograf satuan.

Tulisan ini menyajikan hasil penelitian tentang pengaruh *AMC* terhadap debit puncak hidrograf satuan.

TINJAUAN PUSTAKA

Teori hidrograf satuan

Teori hidrograf satuan diperkenalkan oleh Sherman (1932). Sherman mendefinisikan *HS* sebagai hidrograf aliran langsung yang ditimbulkan oleh hujan efektif sebesar satu satuan waktu. Istilah satuan sekarang diinterpretasikan sebagai satu satuan kedalaman hujan efektif (Chow, 1988), sehingga definisi *HS* adalah hidrograf aliran langsung yang dihasilkan oleh hujan sebesar satu satuan (mm atau cm) yang berlangsung dengan intensitas tetap dan merata di seluruh wilayah DAS.

Teori *HS* dibangun berdasarkan anggapan bahwa hujan efektif terdistribusi merata di seluruh wilayah DAS. Sistem hidrologi disederhanakan sebagai sistem linier, sehingga berlaku prinsip kesebandingan dan superposisi. Anggapan tersebut melekat pada teori *HS* yang harus ditaati ketika menerapkan teori *HS*. Kompleksitas transformasi hujan aliran pada DAS dapat disederhanakan menjadi hitungan yang dapat dilakukan dengan mudah. Hal inilah yang menjadikan metode *HS* disukai dan banyak dipakai.

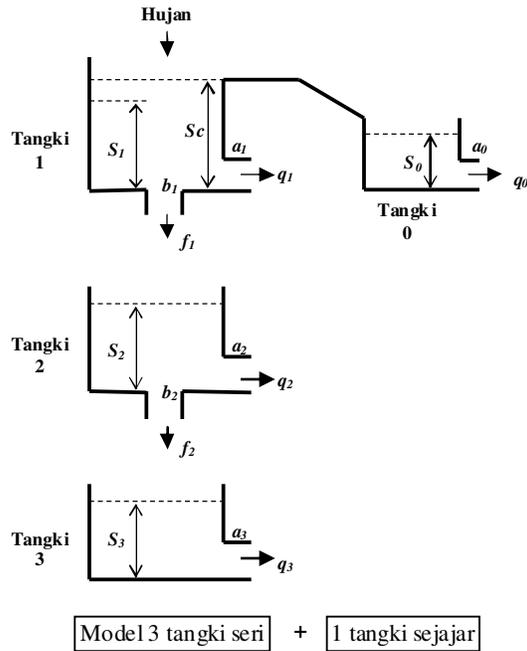
Hidrograf satuan sintetik (*HSS*)

Penurunan *HS* Sherman (cara konvensional) dapat dilakukan dengan bermacam-macam cara antara lain cara polinomial, cara *least square*, dan cara Collins. Cara konvensional hanya dapat dilaksanakan pada DAS yang terukur yakni DAS yang tersedia data pengukuran hujan dan aliran. Penurunan *HS* pada DAS yang tidak terukur dilakukan dengan metode lain yakni dengan metode hidrograf satuan sintetik (*HSS*), seperti *HSS Nakayasu* (Soemarto, C.D., 1999), *HSS Gama 1* (Sri Harto, 2000).

Hidrograf satuan model tangki

Yue dan Hashino (2000) mengandaikan DAS sebagai sebuah tampungan (tangki) yang terhubung (Gambar 1). Tangki 1 dan tangki 2 mempunyai lubang horisontal dan lubang vertikal, tangki yang lain hanya mempunyai

lubang horizontal saja. Lubang horizontal terletak sebidang dengan dasar tangki, hal ini mengindikasikan bahwa pada setiap lapisan tanah dimungkinkan terjadi aliran horizontal. Aliran keluar tangki terjadi jika tinggi tampungan (S_i) lebih besar dari nol, besar alirannya dikontrol oleh dimensi lubang horizontal (a_0, a_1, a_2, a_3), dan dimensi lubang vertikal (b_1, b_2) pada tangki yang berlubang 2. Tangki yang hanya mempunyai 1 lubang horizontal, besar aliran keluar hanya dikontrol oleh lubang horizontal saja.



Gambar 1. Struktur model tangki (Yue dan Hashino, 2000)

Pergerakan air masuk dan keluar tangki dilukiskan dengan fungsi eksponensial. Model ini memperhitungkan kondisi awal kelengasan tanah. Komponen aliran keluar lewat lubang tangki yang berukuran a_0, a_1, a_2, a_3 . Komponen aliran tersebut adalah sebagai berikut ini.

1. q_0 adalah aliran permukaan (aliran cepat, *quick runoff*)
2. q_1, q_2, q_3 adalah aliran bawah permukaan (aliran lambat, *slow runoff*), yakni aliran deras (*rapid subsurface runoff*), aliran tunda (*delayed subsurface runoff*), dan aliran air tanah (*groundwater runoff*)
3. Di bagian bawah tangki 1 dan tangki 2 terdapat lubang berukuran b_1 dan b_2 . Dari

lubang tersebut keluar infiltrasi f_1, f_2 dari tangki 1 ke tangki 2, dan dari tangki 2 ke tangki 3.

4. Tinggi tampungan tangki 1 S_c diinterpretasikan sebagai kehilangan awal air hujan, dan sebagai indeks yang menunjukkan pengaruh kondisi awal kelengasan tanah pada proses pembangkitan aliran.
5. Proses hujan dan aliran pada model tangki adalah seperti berikut ini.
 - a. Mula-mula hujan r mengisi tangki 1, aliran deras q_1 dan infiltrasi f_1 dari tangki 1 ke tangki 2 terjadi jika $S_1 > 0$.
 - b. Aliran tunda q_2 dan infiltrasi f_2 dari tangki 2 ke tangki 3 terjadi jika $S_2 > 0$.
 - c. Aliran q_3 terjadi jika $S_3 > 0$
 - d. Aliran permukaan q_0 dari tangki 0 terjadi jika tangki 1 penuh atau $S_1 > S_c$, sehingga terjadi limpasan dari tangki 1 ke tangki 0.

Komponen aliran lambat aliran lambat q_i ($i = 1, 2, 3$) dan infiltrasi f_i ($i = 1, 2$) merupakan fungsi ketinggian air di tampungan S_i :

$$q_i(t) = a_i S_i(t) \quad (i=1, 2, 3) \quad (\text{mm/jam}) \quad (1)$$

$$f_i(t) = b_i S_i(t) \quad (i=1, 2) \quad (\text{mm/jam}) \quad (2)$$

dengan, q_i ($i=1, 2, 3$) = komponen yang keluar dari masing-masing tangki (1, 2, 3); f_i ($i=1, 2$) = infiltrasi dari tangki (1, 2); a_i = ukuran lubang horizontal; b_i = ukuran lubang vertikal.

1. Fungsi satuan komponen aliran q_1 dan f_1 pada tangki 1 dihitung dengan rumus $q_1(t) = a_1 S_1(t)$ dan $f_1(t) = b_1 S_1(t)$. $S_1(t)$ dan $f_1(t)$ dihitung dengan Persamaan (3a, 3b, 4a, 4b).

$$S_1(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{(1 - e^{-c_1 t})}{c_1} \quad (0 < t \leq \Delta t) \quad (3a)$$

$$f_1(t) = \frac{r_u b_1}{\Delta t c_1} (1 - e^{-c_1 t}) \quad (0 < t \leq \Delta t) \quad (3b)$$

$$S_1(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{(e^{-c_1 \Delta t} - 1)}{c_1} \quad (t > \Delta t) \quad (4a)$$

$$f_1(t) = \frac{r_u b_1}{\Delta t c_1} (e^{-c_1 \Delta t} - 1) \quad (t > \Delta t) \quad (4b)$$

Dengan $S_1(t)$ = tinggi tampungan di tangki 1; r_u = satuan besaran hujan (1 mm, 10 mm); Δt = satuan durasi hujan (1 jam, 2 jam); $c_1 = a_1 + b_1$

2. Fungsi satuan komponen aliran q_2 dan f_2 pada tangki 2 dihitung dengan rumus $q_2(t) = a_2 S_2(t)$ dan $f_2(t) = b_2 S_2(t)$. $S_2(t)$

dan $f_2(t)$ dihitung dengan Persamaan (5a, 5b, 6a, 6b).

$$S_2(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{b_1}{c_1 c_2} \left[1 + \frac{c_2}{c_1 - c_2} e^{-c_1 t} - \frac{c_1}{c_1 - c_2} e^{-c_2 t} \right] \quad (0 < t \leq \Delta t) \quad (5a)$$

$$f_2(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{b_1 b_2}{c_1 c_2} \left[1 + \frac{c_2}{c_1 - c_2} e^{-c_1 t} - \frac{c_1}{c_1 - c_2} e^{-c_2 t} \right] \quad (0 < t \leq \Delta t) \quad (5b)$$

$$S_2(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{b_1}{c_1 c_2} \left[\frac{-c_2(e^{c_1 \Delta t} - 1)}{c_1 - c_2} e^{-c_1 t} + \frac{c_1(e^{c_2 \Delta t} - 1)}{c_1 - c_2} e^{-c_2 t} \right] \quad t > \Delta t) \quad (6a)$$

$$f_2(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{b_1 b_2}{c_1 c_2} \left[\frac{-c_2(e^{c_1 \Delta t} - 1)}{c_1 - c_2} e^{-c_1 t} + \frac{c_1(e^{c_2 \Delta t} - 1)}{c_1 - c_2} e^{-c_2 t} \right] \quad t > \Delta t) \quad (6b)$$

dengan $S_2(t)$ = tinggi tampungan di tangki 2, $c_2 = a_2 + b_2$

3. Fungsi satuan komponen aliran q_3 pada tangki 3 dihitung dengan rumus $q_3(t) = a_3 S_3(t)$. $S_3(t)$ dihitung dengan Persamaan (7a dan 7b).

$$S_3(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{b_1 b_2}{c_1 c_2 a_3} \left[1 - \frac{c_2 a_3 e^{-c_1 t}}{(c_1 - c_2)(c_1 - a_3)} + \frac{c_1 a_3 e^{-c_2 t}}{(c_1 - c_2)(c_2 - a_3)} - \frac{c_1 c_2 e^{-a_3 t}}{(c_1 - a_3)(c_2 - a_3)} \right] \quad (0 < t \leq \Delta t) \quad (7a)$$

$$S_3(t) = \frac{r_u}{\Delta t} \frac{b_1 b_2}{c_1 c_2 a_3} \left[\frac{c_2 a_3 (e^{-c_1 \Delta t} - 1) e^{-c_1 t}}{(c_1 - c_2)(c_1 - a_3)} - \frac{c_1 a_3 (e^{-c_2 \Delta t} - 1) e^{-c_2 t}}{(c_1 - c_2)(c_2 - a_3)} + \frac{c_1 c_2 (e^{-a_3 \Delta t} - 1) e^{-a_3 t}}{(c_1 - a_3)(c_2 - a_3)} \right] \quad (t > \Delta t) \quad (7b)$$

4. Fungsi satuan aliran lambat merupakan penjumlahan tiga komponen aliran bawah permukaan ($q_1 + q_2 + q_3$), yakni:

$$u_{1-3}(t) = \frac{r_u}{\Delta t} (1 + D_{11} e^{-c_1 t} + D_{12} e^{-c_2 t} + D_{13} e^{-a_3 t}) \quad (0 < t \leq \Delta t) \quad (8a)$$

$$u_{1-3}(t) = \frac{r_u}{\Delta t} (D_{21} e^{-c_1 t} + D_{22} e^{-c_2 t} + D_{23} e^{-a_3 t}) \quad (t > \Delta t) \quad (8b)$$

5. Fungsi satuan komponen aliran cepat

$$u_0(t) = \frac{1 - e^{-a_0 t}}{\Delta t} \quad (0 < t \leq 1) \quad (9a)$$

$$u_0(t) = \frac{1}{\Delta t} (e^{a_0 \Delta t} - 1) e^{-a_0 t} \quad (t > 1) \quad (9b)$$

dengan $u_0(t)$ = fungsi aliran cepat, a_0 = ukuran lubang kanan tangki 0.

Fungsi $u(t)$ total aliran adalah penjumlahan kedua fungsi satuan $u_{1-3}(t)$ dan $u_0(t)$:

$$u(t) = u_{1-3}(t) \quad (S_1 \leq S_c) \quad (10a)$$

$$u(t) = u_{1-3}(t) + u_0(t) \quad (S_1 > S_c) \quad (10b)$$

Kontribusi dari fungsi satuan total aliran dengan durasi Δt mulai pada $(m-1)\Delta t$ ($m=1,2,\dots,M$) terhadap keluaran pada saat $t = n\Delta t$ dihitung dengan Persamaan (11a dan 11b).

$$U_{n-m+1} = U_{1-3}(n-m+1) = u_{1-3}[(n-m+1)\Delta t] \quad (S_1 \leq S_c) \quad (11a)$$

$$U_{n-m+1} = U_{1-3}(n-m+1) + U_0(n-m+1) = u_{1-3}[(n-m+1)\Delta t] + u_0[(n-m+1)\Delta t] \quad (S_1 \geq S_c) \quad (11b)$$

Berdasarkan prinsip hidrograf satuan, jika diketahui hidrograf satuan maka aliran baru bangkitan Q_N (m^3/s) dihitung dengan Persamaan (12a dan 12b).

$$Q_N(n) = \frac{A}{3,6} \left[\sum_{m=1}^n \frac{P_m}{r_u} U_{1-3}(n-m+1) + \sum_{m=1}^n Z_0(m) U_0(n-m+1) \right] \quad (n < M) \quad (12a)$$

$$Q_N(n) = \frac{A}{3,6} \left[\sum_{m=1}^M \frac{P_m}{r_u} U_{1-3}(n-m+1) + \sum_{m=1}^M Z_0(m) U_0(n-m+1) \right] \quad (n \geq M) \quad (12b)$$

Total aliran sungai:

$$Q_T(n) = Q_0 + Q_N(n) \quad (13)$$

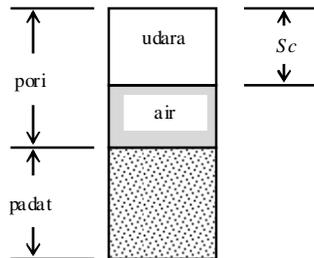
Dengan $Q_N(n)$ = debit aliran pada $t=n\Delta t$; A =luas DAS (km^2); P_m =kedalaman hujan (mm); Z_0 = masukan ke tangki 0 dari tangki 1, jika $S_1 < S_c$ maka $Z_0 = 0$; Jika $S_1 > S_c$, $S_1 = S_c$ maka $Z_0 = S_0 - S_c$; Q_0 =debit aliran sebelum hujan.

LANDASAN TEORI

Kondisi awal kelengasan tanah (AMC)

Kondisi awal kelengasan tanah (*antecedent soil moisture condition, AMC*) adalah besar kelengasan tanah sesaat sebelum terjadi hujan. Besaran *AMC* ditentukan dengan mengukur besarnya kadar air tanah. Penelitian ini

menggunakan data sekunder dan tidak tersedia data *AMC*. Pengukuran besaran *AMC* tidak memungkinkan karena kejadian telah lewat, oleh karena itu besaran *AMC* didekati dengan besaran *Sc* (*storage capacity*) yakni volume pori tanah yang tidak terisi air (Gambar 2).



Gambar 2. Struktur tanah dan besaran *Sc*

Nilai *Sc* ditentukan oleh besarnya kehilangan air karena penguapan yang terjadi dikurangi jumlah pasokan air hujan selama periode tinjauan seperti ditunjukkan Persamaan (14).

$$Sc = \sum_{i=1}^m [ET_{hr}(i) - P_{hr}(i)] \quad (14)$$

Dengan *Sc*=nilai variabel *Sc* (mm); $ET_{hr}(i)$ =evapotranspirasi harian hari ke *i* (mm); $P_{hr}(i)$ =hujan harian pada hari ke *i* (mm).

Evapotranspirasi harian dihitung dengan Persamaan (15) (Asdak, 1995). Evaporasi diperoleh dari stasiun klimatologi terdekat.

$$PET = C_e E_p \quad (15)$$

Dengan *PET*=evapotranspirasi potensial (mm); C_e =koefisien panci (0,5-0,8); E_p =evaporasi panci (mm/hari)

Hidrograf satuan observasi (HS_{obs}) dan hidrograf satuan simulasi (HS_{sim})

HS_{obs} adalah *HS* konvensional yang diturunkan dari data hujan dan data debit jam-jaman dengan menggunakan metode Collins. HS_{sim} adalah *HS* yang didapat dari simulasi aliran menggunakan model tangki. HS_{sim} merupakan gabungan dari *HS* aliran permukaan ($U0$) dan *HS* aliran deras bawah permukaan ($U1$), sehingga diberi symbol $HS_{sim(U0+U1)}$.

Hidrograf satuan pembanding

Hidrograf satuan pembanding adalah *HS* yang dipakai untuk mengevaluasi hidrograf satuan observasi terkoreksi ($HS_{obs-kor}$). Hidrograf satuan yang dipakai sebagai pembanding adalah *HSS* Nakayasu dan *HSS* Gama 1.

Formulasi pengaruh *Sc* terhadap debit puncak *HS*

Formulasi pengaruh *Sc* terhadap debit puncak *HS* dibuat berdasarkan hubungan antara variabel bebas *Sc* dengan variabel tak bebas yang dibentuk sedemikian rupa sehingga berlaku untuk semua DAS yang ditinjau. Variabel tak bebas berupa bilangan tak berdimensi yang berbentuk sebagai berikut.

$$\text{Variabel tak bebas} = \left[\frac{q_{p-obs}}{q_{p-sim(U0+U1)}} \right] \quad (16)$$

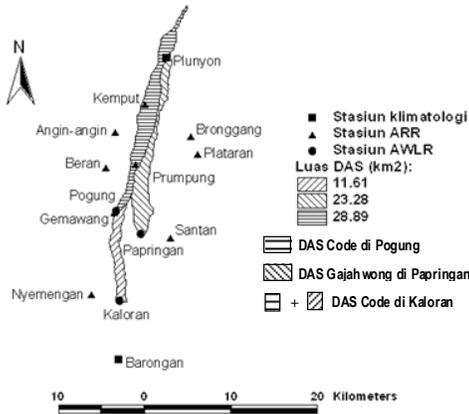
Dengan q_{p-obs} = debit puncak *HS* observasi; $q_{p-sim(U0+U1)}$ = debit puncak *HS* simulasi = debit puncak *HS* observasi terkoreksi ($HS_{obs-kor}$)

Formulasi pengaruh *Sc* ditentukan berdasarkan hubungan antara variabel bebas *Sc* dengan variabel tak bebas, dengan cara membuat analisis regresi sehingga didapat persamaan regresinya.

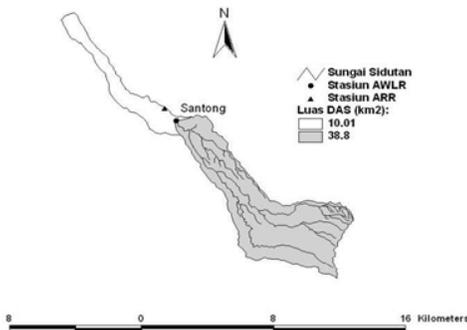
METODOLOGI

Lokasi penelitian

Penelitian dilaksanakan pada empat buah DAS yang terdiri atas tiga terletak di kawasan sekitar Gunung Merapi, Kabupaten Sleman, yakni: (1) DAS Code di Pogung, (2) DAS Code di Kaloran, dan (3) DAS Gajahwong di Papringan. Tiga DAS tersebut ditunjukkan pada Gambar 3. Tiga DAS ini dipakai untuk analisis pengaruh *AMC* terhadap debit puncak *HS*. Satu DAS yang lain terletak di kawasan Gunung Rinjani, Kabupaten Lombok Utara seperti ditunjukkan pada Gambar 4. DAS ini digunakan untuk validasi hasil analisis.



Gambar 3. DAS Code di Pogung, DAS Code di Kaloran, dan DAS Gajahwong di Papringan



Gambar 4. DAS Sidutan di Santong

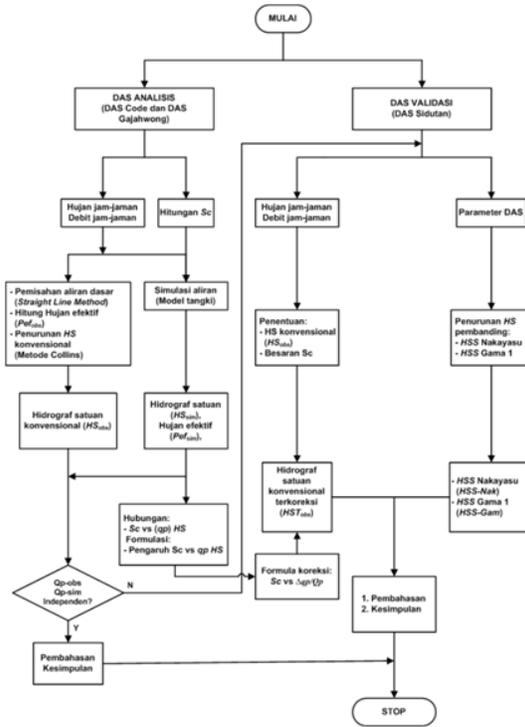
Materi penelitian

Materi penelitian berupa data yang terdiri atas data hidrologi dan data fisik DAS. Data hidrologi meliputi data hujan, data debit aliran, dan data evaporasi. Data fisik DAS tersaji dalam peta rupa bumi dan peta topografi.

Berdasarkan data hidrologi dipilih kejadian hujan-banjir yang dapat dipakai untuk analisis. Kasus/kejadian dipilih berdasarkan adanya keterkaitan antara hujan dan banjir, dan ketersediaan data evaporasi. Jumlah kejadian yang terpilih untuk analisis pada DAS Code di Pogung dan DAS Gajahwong di Papringan masing-masing 6 kejadian. Jumlah kejadian terpilih pada DAS Code di Kaloran sejumlah 5 kejadian

Jalan penelitian

Jalan penelitian dijelaskan secara detail melalui Gambar 5.



Gambar 5. Bagan alir jalan penelitian

Secara ringkas jalan penelitian dijelaskan seperti uraian berikut ini.

- 1) Perhitungan Sc
Besaran Sc dihitung dengan persamaan kesetimbangan air (Yue dan Hashino, 2000) seperti ditunjukkan Persamaan (14) dan Persamaan (15).
- 2) Penurunan HS
 HS yang diturunkan terdiri atas lima macam yakni sebagai berikut ini.
 - a) HS observasi yakni HS konvensional yang diturunkan dengan metode Collins diberi simbol HS_{obs}
 - b) HS simulasi yakni HS yang diturunkan dengan model tangki dan diberi simbol $HS_{sim}(U0+U1)$
 - c) HS observasi terkoreksi ($HS_{obs-kor}$) yakni HS observasi yang telah dikoreksi dengan formula koreksi
 - d) HSS Nakayasu yakni HS yang diturunkan dengan cara Nakayasu
 - e) HSS Gama 1 yakni HS yang diturunkan dengan cara Gama 1

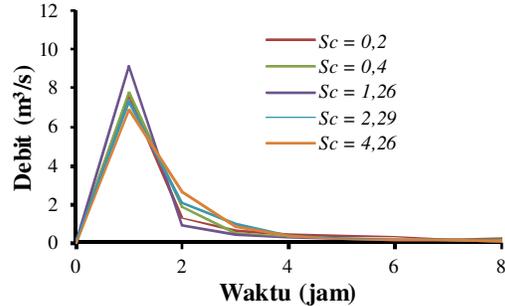
3) Formulasi pengaruh Sc

Formulasi pengaruh Sc terhadap debit puncak HS dilakukan dengan membuat analisis regresi antara variabel bebas Sc dengan variabel tak bebas dengan tahapan sebagai berikut ini.

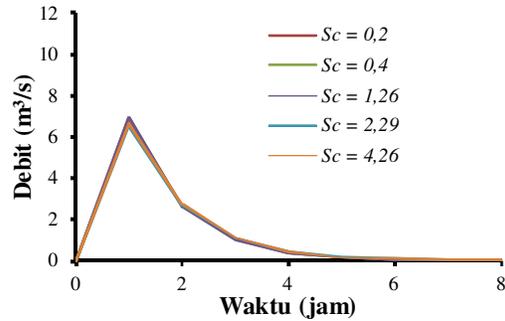
- a) Membuat hubungan antara Sc dengan debit puncak (q_p) HS_{obs} dan debit puncak (q_p) $HS_{sim(U0+U1)}$.
 - b) Membuat variabel tak bebas berupa bilangan tak berdimensi = $(q_{p-obs}/q_{p-sim(U0+U1)})$
 - c) Membuat analisis regresi untuk mendapatkan persamaan regresi yang menunjukkan hubungan Sc dengan variabel tak bebas $(q_{p-obs}/q_{p-sim(U0+U1)})$
- 4) Komparasi $HS_{obs-kor}$ dengan HSS Nakayasu dan HSS Gama 1

2) HS observasi dan HS simulasi

Hasil penurunan HS observasi dan HS simulasi untuk seluruh kejadian disajikan pada Gambar (6a, 6b, 7a, 7b, 8a, dan 8b) untuk DAS Code di Kaloran, DAS Code di Pogung, dan DAS Gajahwong di Papringan.



Gambar 6a. HS_{obs} DAS Code di Kaloran



Gambar 6b. $HS_{sim(U0+U1)}$ DAS Code di Kaloran

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian

1) Nilai Sc

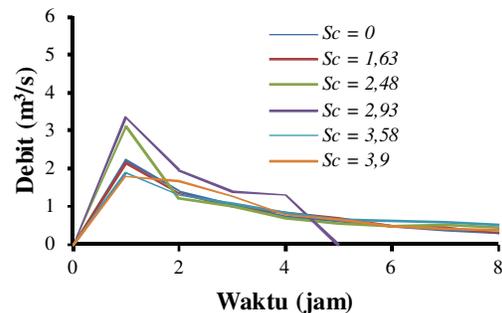
Hasil perhitungan variabel Sc disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai Sc kejadian terpilih

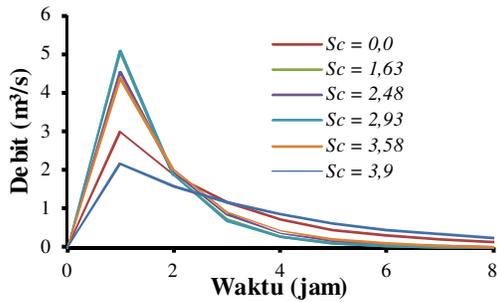
No	Tanggal kejadian	Nilai Sc (mm)
A DAS Code di Kaloran		
1	29-Mar-2013	0,20
2	13-Jun-2013	0,40
3	23-Apr-2013	1,26
4	03-Nop-2012	2,29
5	12-Nop-2012	4,26
B DAS Code di Pogung		
1	20-Feb-2002	0,00
2	17-Mar-2011	1,63
3	02-Feb-2011	2,48
4	03-Nop-2011	2,93
5	10-Nop-2013	3,58
6	15-Jan-2004	3,90
C DAS Gajahwong di Papringan		
1	21-Jan-2005	0,20
2	29-Jan-2001	0,29
3	11-Mei-2003	1,45
4	04-Mei-2006	1,50
5	01-Mei-2003	2,43
6	02-Mar-2007	3,33

Nilai Sc pada Tabel 1 berbeda-beda pada setiap kejadian, beda antara nilai Sc terkecil (0,00 mm) dengan Sc terbesar (4,26) cukup kecil sebesar 4,26 mm.

Gambar 6a. menunjukkan HS_{obs} lebih bervariasi debit puncaknya dibandingkan dengan $HS_{sim(U0+U1)}$. $HS_{sim(U0+U1)}$ mempunyai debit puncak lebih kecil daripada debit puncak HS_{obs} . $HS_{sim(U0+U1)}$ lebih konsisten untuk semua kejadian.

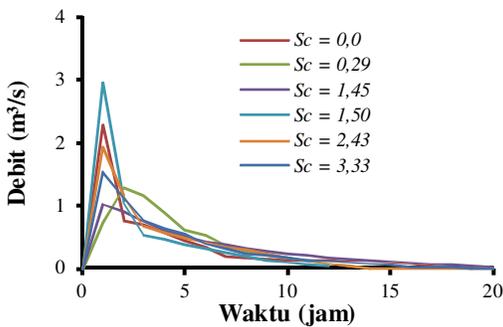


Gambar 7a. HS_{obs} DAS Code di Pogung

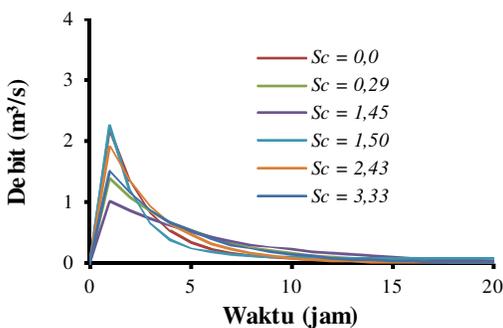


Gambar 7b. $HS_{sim(U0+U1)}$ DAS Code di Pogung

HS_{obs} DAS Code di Pogung sangat bervariasi baik debit puncak maupun bentuk kurva nya, hal ini diduga data hidrologi yang dipakai tidak akurat. HS DAS Code di Pogung tidak dipakai untuk analisis selanjutnya.



Gambar 8a. HS_{obs} DAS Gajahwong di Papringan



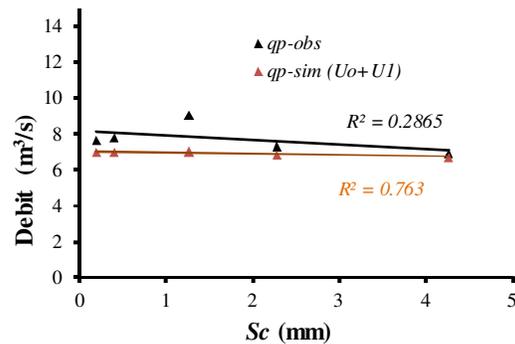
Gambar 8b. $HS_{sim(U0+U1)}$ DAS Gajahwong di Papringan

$HS_{sim(U0+U1)}$ lebih konsisten dibandingkan dengan HS_{obs} . Debit puncak $HS_{sim(U0+U1)}$ lebih rendah dari pada debit puncak HS_{obs} .

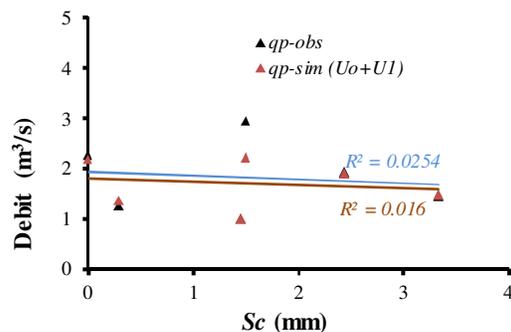
3) Pengaruh Sc terhadap debit puncak HS

DAS yang dipakai analisis sebanyak dua DAS yakni DAS Code di Kaloran dan DAS Gajahwong di Papringan. DAS Code di Pogung tidak dijadikan DAS penelitian karena hasil hitungan memperlihatkan HS_{obs} tidak stabil (Gambar 7a), hal ini diduga disebabkan karena data yang dipakai tidak akurat sehingga menghasilkan hidrograf satuan yang bentuknya tidak lazim dan terjadi oskilasi.

Hubungan antara variabel Sc dengan debit puncak HS ditunjukkan pada Gambar 9 dan Gambar 10 untuk DAS Code di Kaloran dan DAS Gajahwong di Papringan berturut-turut.



Gambar 9. Hubungan Sc dengan debit puncak HS pada DAS Code di Kaloran



Gambar 10. Hubungan antara Sc dengan debit puncak HS pada DAS Gajahwong di Papringan

Gambar 9 dan Gambar 10 menunjukkan bahwa semakin besar nilai Sc (semakin kecil nilai AMC) berarti DAS semakin kering maka debit puncak HS semakin mengecil.

Pembahasan

Formulasi pengaruh Sc terhadap debit puncak HS

1) Uji-t terhadap q_{p-obs} dan $q_{p-sim(U0+U1)}$

Tabel 2. Hitungan uji-t

No	HS_{sim}		HS_{obs} q_{p-obs}
	Sc	$q_{p-sim(U0+U1)}$	
1	0,20	6,8874	7,6587
2	0,40	6,9691	7,7920
3	1,26	6,9596	9,0988
4	2,29	6,5526	7,3336
5	4,26	6,6810	6,8984
6	0,00	2,1931	2,2964
7	0,29	1,3810	1,2897
8	1,45	1,0210	1,0150
9	1,50	2,2353	2,9636
10	2,43	1,9156	1,9340
11	3,33	1,4985	1,4660

$$p = \frac{(q_{p-obs}) - (q_{p-sim(U0+U1)})}{q_{p-obs}} ; \bar{d} = \frac{\sum P}{N} ;$$

$$S = \left(\frac{\sum(P-\bar{d})^2}{N-1} \right)^{0,5} ; SE = \frac{S}{\sqrt{N}} ; t = \frac{\bar{d}}{SE}$$

$$S = \left(\frac{0,1015}{11-1} \right)^{0,5} = 0,1008 ; SE = \frac{0,1008}{\sqrt{11}} =$$

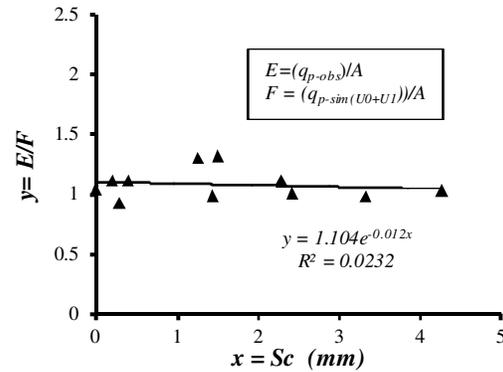
$$0,0304 ; t = \frac{0,0710}{0,0304} = 2,3367 ; t_{0,025;10} = 2,228$$

$t > t_c$ maka H_0 ditolak
 q_{p-obs} berbeda nyata dengan $q_{p-sim(U0+U1)}$

Hasil uji-t pada dua DAS tersebut menunjukkan bahwa secara statistik dua data tersebut berbeda. HS_{obs} perlu dikoreksi agar mempunyai sifat statistik yang sama dengan $HS_{sim(U0+U1)}$.

2) Formulasi pengaruh Sc terhadap q_{p-obs}

Formulasi pengaruh Sc terhadap q_{p-obs} dilakukan dengan membuat hubungan antara Sc dengan debit puncak spesifik HS_{obs} dan Sc dengan debit puncak spesifik $HS_{sim(U0+U1)}$ sehingga diperoleh hubungan seperti ditunjukkan Gambar 11.



Gambar 11. Hubungan Sc dengan variabel tak bebas (E/F)

Analisis regresi variabel bebas Sc dengan variabel tak bebas (E/F) menghasilkan persamaan regresi berbentuk Persamaan(5.2).

$$y = 1,104 e^{-0,012x} \tag{17}$$

$$R^2 = 0,0232$$

Dengan x = variabel bebas Sc (mm); R^2 = koefisien determinasi

Persamaan (17) dapat ditulis dalam bentuk lain seperti berikut ini.

$$\left[\frac{q_{p-obs}/A}{q_{p-sim(U0+u1)}/A} \right] = 1,104e^{-0,012Sc} \tag{18}$$

Besaran A dapat dihilangkan, sehingga Persamaan (18) menjadi Persamaan (19).

$$\left[\frac{q_{p-obs}}{q_{p-sim(U0+u1)}} \right] = 1,104e^{-0,012Sc} \tag{19}$$

Dengan q_{p-obs} = debit puncak HS_{obs} (m^3/s); $q_{p-sim(U0+U1)}$ = debit puncak $HS_{sim(U0+U1)}$ (m^3/s) = debit puncak HS observasi terkoreksi ($q_{p-obs-kor}$).

Persamaan (19) adalah formula pengaruh Sc terhadap debit puncak HS_{obs} . Koefisien determinasi (R^2) sangat kecil dikarenakan jumlah data yang dipakai terlalu sedikit. Persamaan regresi berbentuk eksponensial tersebut adalah yang terbaik dibandingkan bentuk fungsi yang lain (linier dan polynomial).

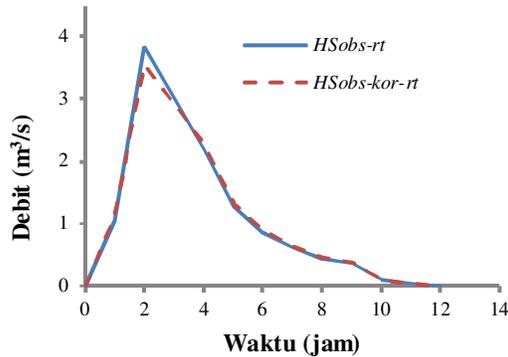
Persamaan (19) menunjukkan bahwa ruas kiri cenderung mengecil jika Sc membesar. Hal ini berarti HS observasi terkoreksi ($HS_{obs-kor}$) cenderung membesar jika Sc membesar.

Komparasi $HS_{obs-kor}$ dengan HSS Nakayasu dan HSS Gama 1

Komparasi $HS_{obs-kor}$ dengan HSS Nakayasu dan HSS Gama 1 dilakukan dengan menggunakan data pada DAS Sidutan.

1) Penurunan HS_{obs} DAS Sidutan di Santong dan perhitungan Sc masing-masing kejadian

Penurunan HS_{obs} dan perhitungan Sc dilakukan menggunakan tiga kejadian yang terpilih, sehingga didapat tiga HS_{obs} dan tiga nilai Sc . Setiap HS_{obs} dikoreksi dengan Sc masing-masing, kemudian dibuat rerata HS_{obs} dan rerata $HS_{obs-kor}$ sehingga dtiperoleh HS_{obs-rt} dan $HS_{obs-kor-rt}$ seperti ditunjukkan Gambar 12.

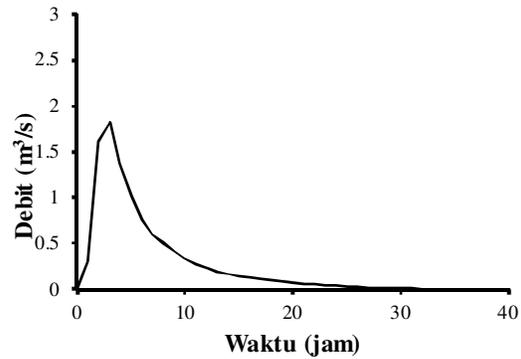


Gambar 12. HS_{obs-rt} dan $HS_{obs-kor-rt}$ DAS Sidutan di Santong

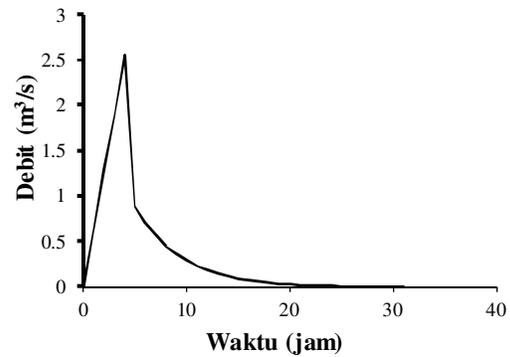
Gambar 12 menunjukkan $HS_{obs-kor-rt}$ mempunyai puncak yang lebih rendah dari pada HS_{obs-rt} .

2) Penurunan HSS Nakayasu dan HSS Gama 1 pada DAS Sidutan di Santong

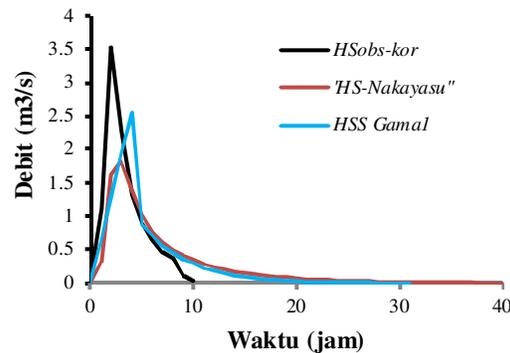
Hasil penurunan HSS Nakayasu dan HSS Gama 1 pada DAS Sidutan di Santong dilukiskan pada Gambar 13 dan Gambar 14.



Gambar 13. HSS Nakayasu pada DAS Sidutan di Santong



Gambar 14. HSS Gama 1 pada DAS Sidutan di Santong



Gambar 15. Komparasi $HS_{obs-kor-rt}$ dengan HSS Nakayasu dan HSS Gama 1

Gambar 15 menunjukkan tiga hidrograf satuan berbeda baik debit puncak maupun waktu puncak. Debit puncak hidrograf satuan observasi terkoreksi ($q_{p-obs-kor-rt}$) merupakan debit puncak yang paling besar dibanding dengan debit puncak HSS Nakayasu dan HSS Gama 1. Waktu puncak ketiga hidrograf satuan tersebut juga berbeda-beda. Waktu puncak

hidrograf satuan observasi terkoreksi merupakan yang tercepat, yang paling lambat adalah waktu puncak HSS Gama 1.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pengaruh Sc terhadap debit puncak hidrograf satuan observasi (HS_{obs}) dan pengaruh Sc terhadap hidrograf satuan simulasi ($HS_{sim(U0+U1)}$) bersifat non-linier dan tidak teratur. Perbedaan debit puncak kedua HS umumnya kecil. Analisis kurva kecenderungan (*trendline*) linier menunjukkan bahwa terdapat pengaruh Sc terhadap debit puncak hidrograf satuan observasi, yakni semakin besar Sc (semakin kecil AMC) berarti DAS semakin kering maka debit puncak hidrograf satuan juga mengecil.

Analisis uji-t atas data berpasangan antara debit puncak HS_{obs} (q_{p-obs}) dan debit puncak $HS_{sim(U0+U1)}$ ($q_{p-sim(U0+U1)}$) menghasilkan nilai t -hitung lebih kecil dari t -kritis (t_c) pada DAS Gajahwong di Papringan. Nilai t -hitung DAS Code di Kaloran lebih besar dari t -kritis (t_c), sehingga dikatakan pasangan data q_{p-obs} dan $q_{p-sim(U0+U1)}$ secara statistik dinyatakan berbeda nyata. Berdasarkan hasil uji-t tersebut disimpulkan bahwa secara statistik dua data tersebut berbeda, sehingga tidak bisa disamakan antara hidrograf satuan observasi (HS_{obs}) dengan hidrograf satuan simulasi ($HS_{sim(U0+U1)}$). Hidrograf satuan observasi perlu dikoreksi agar mempunyai sifat statistik sama dengan hidrograf satuan simulasi.

Formula koreksi yang didapat merupakan fungsi eksponensial yang dinyatakan sebagai berikut ini.

$$\left[\frac{q_{p-obs}}{q_{p-sim(U0+U1)}} \right] = 1,104 e^{-0,012Sc}$$

dengan Sc = variabel bebas Sc (mm); q_{p-obs} = debit puncak hidrograf satuan observasi (m^3/s); $q_{p-sim(U0+U1)}$ = debit puncak hidrograf satuan simulasi (m^3/s) = debit puncak hidrograf satuan observasi terkoreksi (m^3/s)

Hidrograf satuan observasi terkoreksi mempunyai puncak yang paling tinggi dibandingkan dengan debit puncak hidrograf satuan pembanding, dan mempunyai waktu

puncak yang lebih cepat daripada dua HSS Nakayasu dan HSS Gama 1.

Saran

Penelitian ini dilakukan berdasarkan data hidrologi pada DAS Code dan DAS Gajahwong. Pencatatan data hujan, data banjir, dan data evaporasi cukup baik pada 2 DAS tersebut. Data hidrologi yang terkumpul pada cukup panjang dari tahun 2001 sampai 2008, dan 2011 sampai 2013. Selama periode tersebut kejadian dan banjir yang dapat dipakai analisis sejumlah 11 kejadian, sisanya tak bisa dipakai karena tidak memenuhi kriteria penelitian. Keterbatasan jumlah data tentu mengurangi keakuratan hasil analisis, oleh karena itu agar hasil lebih teliti dengan rentang nilai Sc yang lebih besar maka disarankan memakai data yang lebih banyak.

Validasi hasil perlu dilanjutkan dengan cara membandingkan debit banjir rancangan yang dihasilkan hidrograf satuan terkoreksi, HSS Nakayasu dan HSS Gamal dengan debit banjir rancangan hasil analisis frekuensi.

DAFTAR PUSTAKA

- Asdak, C., (1995), *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Beeven, K.J., (2002), *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*, John Wiley & Sons, Chichester.
- Cheng, C., Cheng, S., Wen, J. and Lee, J.H., (2013), "Time of Flow Characteristics of Component Hydrographs Related to Rainfall-Streamflow Observation", *J. Hydrol. Eng.*, 18, pp. 675-688.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W., (1988), *Applied Hydrology*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Dooge, J.C.I., (1959), "A general Theory of the unit hydrograph", *J. Geophys. Res.*, 64(1), pp. 241-256.
- Hadisusanto, N., (2010), *Aplikasi HIDROLOGI*, Jogja Mediautama, Yogyakarta
- Li, Y., Cheng, S., Pao, T.L. and Bi, Y., (2012), "Relating hydrograph components to rainfall and streamflow: a case study from northern Taiwan", *Hydrological Sciences Journal*, 57(5).

- Linsley, L.K., Kohler, M.A. and Paulhus, J.L.H., (1982), *Hydrology for Engineer*, McGraw-Hill Book Company, New York.
- McCuen, R.H., (1988), *Hydrologic Analysis and Design*, Prentice Hal.
- Nash, J.E., (1957), "The Form of Instantaneous Unit Hydrograph", *IAHS Publications*, 45, pp. 112=121.
- Sasmito, Triatmodjo, B., Sujono, J. dan Sri Harto, Br., (2015), *Pemisahan Aliran Dasar Menggunakan Model Tangki*, Prosiding Seminar Nasional Teknik Sipil 1, Sanur-Bali.
- Shaw, E.M., (1994), *Hydrology in Practise*, Chapman & Hall, London.
- Sri Harto, (1993), *Analisis Hidrologi*, PT. Gramedia Utama, Jakarta, 1993.
- Sri Harto, Br., (2000), *Hidrologi-Teori-Masalah-Penyelesaian*, Nafiri Offset, Yogyakarta.
- Sri Harto, Br., Yudiyaniti, I.T. dan Coenraad, R., (2012), "Performance of Representative Unit Hydrograph Derive From Different Number of Cases", *Civil Engineering Forum, Volume XXI*, pp. 1243-1248.
- Sujono, J., Jayadi, R., (2007), *Hidrograf Satuan: Permasalahan dan Alternatif Penyelesaian*, Forum Teknik Sipil, No. XVII, pp 551-665.
- Soemarto, C.D., (1999), *Hidrologi Teknik*, Penerbit Erlangga, Jakarta
- Triatmodjo, B., (2008), *Hidrologi Terapan*, Beta offset, Yogyakarta.
- Yue, S., Hashino, M., (2000), "Unit Hydrographs to Model Quick and Slow Runoff Components of Streamflow", *Journal of Hydrology* 227, pp. 195-2006.
- Zhang, Y., Wei, H., Nearing, M.A., (2011), "Effects of antecedent soil moisture on runoff modelling in small semiarid watershed of shouthern Arizona", *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 15, pp. 3171-3179.