

ANALISIS BANJIR BERDASARKAN METODE GABUNGAN O'DONNELL-MUSKINGUM CUNGE DAN PEMETAAN BANJIR DI KELURAHAN SUMBER, KOTA SURAKARTA

Elsa Sellyana Putri¹⁾, Rintis Hadiani²⁾, dan Endah Sitaresmi Suryandari³⁾

¹⁾ Mahasiswa Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

²⁾ Pengajar Fakultas Teknik, Prodi Teknik Sipil, Universitas Sebelas Maret

³⁾ Kepala Dinas Pekerjaan Umum Kota Surakarta

Jl. Ir. Sutami 36A, Surakarta 57126; Telp. 0271-634524. Email: elsasellpu19@gmail.com

Abstract

Sumber district is one of the district in Surakarta, which is in a low elevation and has poor outlet channels which cause flooding. The river that causes flooding was Kali Gajah Putih. Flooding in Sumber was analyzed by flood routing based on combination of O'Donnell-Muskingum Cunge method and flood mapping using Geographic Information Systems (GIS). This research using flood discharges due to rain on the return period and 3-days rainfall maximum monthly.

Flood discharge in Kali Gajah Putih watershed was calculated using HSS SCS method. The result of this research are maximum discharge for 5 years return period (Q_5) is $16.780 \text{ m}^3 / \text{second}$, maximum discharge for 10 years return period (Q_{10}) is $19.729 \text{ m}^3 / \text{second}$, maximum discharge for 25 years return period (Q_{25}) is $24,012 \text{ m}^3 / \text{second}$, maximum discharge for 50 years return period (Q_{50}) is $27,627 \text{ m}^3 / \text{second}$, and maximum 3-days rainfall discharge happened in December is $18,838 \text{ m}^3 / \text{second}$. The result of flood discharge are used as input for flood routing.

Based on the result of flood routing using combination of O'Donnell-Muskingum Cunge method at Kali Gajah Putih, it was found that there is no flooding in Sumber due to rain on the return period and 3-days rainfall maximum monthly. Flood routing was analyzed based on river cross section measurement in April 2018. Based on the research, it was found that river normalization carried out by the government of Surakarta city at Kali Gajah Putih can prevent flooding in Sumber due to the overflowing of Kali Gajah Putih.

Keywords: *Sumber, Kali Gajah Putih, HSS SCS, flood routing, combination of O'Donnell-Muskingum Cunge, Geographic Information System.*

Abstrak

Kelurahan Sumber merupakan salah satu kelurahan di Kota Surakarta yang berada pada elevasi rendah dan mempunyai outlet saluran yang kurang baik sehingga menyebabkan terjadi banjir. Sungai yang menjadi penyebab banjir adalah Kali Gajah Putih. Banjir di kelurahan Sumber dianalisis dengan melakukan penelusuran banjir dengan metode gabungan O'Donnell-Muskingum Cunge dan pemetaan banjir dengan Sistem Informasi Geografis. Debit banjir rencana yang diperhitungkan adalah Q_5 , Q_{10} , Q_{25} , Q_{50} , dan $Q_{3\text{-harian}}$.

Debit banjir rencana pada DAS Kali Gajah Putih dihitung dengan menggunakan metode HSS SCS menghasilkan debit banjir periode ulang 5 Tahun (Q_5) adalah $16,780 \text{ m}^3/\text{detik}$, debit banjir periode ulang 10 Tahun (Q_{10}) adalah $19,729 \text{ m}^3/\text{detik}$, debit banjir periode ulang 25 Tahun (Q_{25}) adalah $24,012 \text{ m}^3/\text{detik}$, debit banjir periode ulang 50 Tahun (Q_{50}) adalah $27,627 \text{ m}^3/\text{detik}$, serta debit banjir rencana maksimum akibat hujan 3 harian maksimum bulanan terjadi pada bulan Desember dengan debit rencana sebesar $18,838 \text{ m}^3/\text{detik}$. Hasil perhitungan debit banjir rencana akan digunakan sebagai input penelusuran banjir.

Berdasarkan hasil penelusuran banjir dengan metode gabungan O'Donnell-Muskingum Cunge pada Kali Gajah Putih didapatkan bahwa tidak terjadi banjir di Kelurahan Sumber akibat hujan pada periode ulang dan hujan 3 harian maksimum bulanan. Penelusuran banjir dilakukan berdasarkan data pengukuran penampang melintang sungai pada bulan April tahun 2018. Berdasarkan penelitian ini didapatkan bahwa normalisasi sungai yang dilakukan Pemerintah Kota Surakarta pada Kali Gajah Putih dapat mencegah banjir di Kelurahan Sumber akibat meluapnya Kali Gajah Putih.

Kata kunci: Kelurahan Sumber, Kali Gajah Putih, HSS SCS, Penelusuran Banjir, Metode Gabungan O'Donnell-Muskingum Cunge, Sistem Informasi Geografis.

PENDAHULUAN

Kota Surakarta merupakan dataran rendah yang terletak di cekungan lereng pegunungan Lawu dan pegunungan Merapi. Topografi kota Surakarta bagian selatan relatif datar dengan ketinggian +92 meter di atas permukaan laut dan kemiringan 0%-3%, sedangkan bagian utara relatif berbukit-bukit dengan ketinggian + 135 meter di atas permukaan laut. Penelitian dilakukan di Kelurahan Sumber dengan sungai yang ditelusur adalah Kali Gajah Putih. Banjir adalah peristiwa meluapnya air sungai melebihi palung sungai atau genangan air yang terjadi pada daerah

yang rendah dan tidak bisa terdrainasikan (SNI 2415-2016). Banjir di Kelurahan Sumber terjadi karena elevasi yang rendah dan *outlet* saluran yang tidak baik.

Banjir di Kelurahan Sumber dianalisis dengan cara melakukan penelusuran banjir pada Kali Gajah Putih. Penelusuran banjir akan menghasilkan hidrograf pada suatu titik dengan titik lainnya di sepanjang aliran sungai. Penelusuran banjir sangat penting dalam upaya pengendalian banjir. Pemerintah dan masyarakat dapat melakukan evakuasi dini sehingga memperkecil kemungkinan kerugian jiwa, harta dan benda.

Penelitian ini menggunakan Metode Gabungan *O'Donnell – Muskingum Cunge* untuk melakukan penelusuran banjir. Metode Gabungan *O'Donnell – Muskingum Cunge* memperhitungkan aliran anak sungai yang masuk ke sungai utama serta memasukan parameter kecepatan aliran pada setiap penggal sungai (Sobriyah dan Sudjarwadi, 2000). Metode ini menganalisis hubungan antara debit dengan tinggi muka air (Q-H), debit dengan lebar saluran atas (Q-La), debit dengan luas penampang basah (Q-A) dan debit dengan keliling basah (Q-P) pada penampang melintang sungai. Debit yang digunakan dalam penelitian ini adalah debit periode ulang 5, 10, 25 dan 50 tahun serta debit hujan 3 harian maksimum bulanan. Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) pada tahun 2016 menyatakan bahwa hujan 3 hari berturut-turut (hujan 3 harian) berpotensi menimbulkan bencana banjir.

Pemetaan banjir di Kelurahan Sumber dilakukan dengan menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG). Perangkat lunak *ArcGIS* 10.3 digunakan untuk mengolah data tinggi muka air (H) yang diperoleh dari penelusuran banjir dengan Metode Gabungan *O'Donnell – Muskingum Cunge*. Perangkat lunak *ArcGIS* 10.3 mengolah data secara spasial sehingga didapatkan daerah terdampak banjir di Kelurahan Sumber serta tinggi muka air banjir pada periode ulang 5, 10, 25, dan 50 tahun serta akibat hujan 3 harian maksimum bulanan.

LANDASAN TEORI

Penelusuran banjir bisa ditafsirkan sebagai suatu prosedur untuk menentukan atau memperkirakan besaran banjir di suatu titik berdasarkan data yang diketahui (Siti Ima Fatima, dkk. 2012). Penelusuran banjir merupakan analisis yang digunakan untuk mendapatkan hidrograf banjir di titik yang ditinjau. Hidrograf banjir memberikan informasi mengenai debit banjir. Penelusuran banjir dan pemetaan potensi banjir merupakan cara untuk mengantisipasi dampak yang lebih besar dari banjir (Sigit Jadmiko, 2013). Hidrograf banjir diolah dengan menggunakan metode HSS SCS berdasarkan hujan pada periode ulang 5, 10, 25 dan 50 tahun serta hujan 3 harian maksimum bulanan. Pemetaan potensi banjir menggunakan Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan salah satu cara pengendalian banjir secara non-struktural (Hendi Hamdani, dkk. 2014).

Mengisi Data Hujan yang Hilang

Data hujan yang diperoleh dari stasiun pengamatan terkadang tidak tersedia secara lengkap. Pengisian data hujan hilang pada penelitian ini menggunakan *reciprocal method*. Metode ini memanfaatkan jarak antar stasiun sebagai faktor koreksi (*weighting factor*). Korelasi antar dua stasiun hujan akan menjadi semakin kecil apabila jarak antar stasiun semakin besar. Mengisi data hujan yang hilang dihitung dengan **Persamaan 1**.

$$Px = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Pi}{Li^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{Li^2}} \quad (1)$$

dengan:

- Px = data curah hujan pada stasiun X yang diperkirakan data hilang,
- Pi = data hujan disekitarnya pada periode yang sama, dan
- Li = jarak antar stasiun.

Uji Konsistensi Data

Satu seri data hujan untuk stasiun tertentu dimungkinkan sifatnya tidak pangkah. Data semacam itu tidak dapat langsung digunakan (Sri Harto, 2000). Penelitian ini melakukan uji konsistensi data dengan menggunakan metode kurva massa ganda (*double mass curve*). Uji konsistensi dengan metode kurva massa ganda menggunakan grafik dalam penentuan konsistensinya. Apabila garis yang terbentuk lurus berarti data pada stasiun konsisten. Apabila garis tidak lurus maka perlu dilakukan koreksi dengan cara mengalikan data dengan faktor perubahan kemiringan sebelum atau sesudah grafik patah.

Hujan Wilayah

Data hujan yang diperoleh dari stasiun pengamatan hujan merupakan data hujan yang terjadi disuatu tempat atau titik saja (*point rainfall*). Hujan sangat bervariasi terhadap tempat, maka satu stasiun belum bisa menggambarkan hujan yang terjadi pada suatu wilayah. Metode *Thiessen* merupakan metode yang memperhitungkan bobot dari masing-masing stasiun yang mewakili luasan di sekitarnya. Metode ini menganggap bahwa hujan yang terjadi pada suatu stasiun mempunyai pengaruh yang dibatasi oleh poligon *Thiessen*. Metode *Thiessen* digunakan apabila penyebaran stasiun hujan di wilayah yang ditinjau tidak merata (Bambang Triatmodjo, 2008).

Perhitungan hujan wilayah dengan metode Poligon *Thiessen* dapat menggunakan **Persamaan 2** berikut.

$$\bar{p} = \frac{A_1 p_1 + A_2 p_2 + \dots + A_n p_n}{A_1 + A_2 + \dots + A_n} \quad (2)$$

dengan:

- p = hujan rerata kawasan,
- p_1, p_2, \dots, p_n = hujan di stasiun 1, 2, 3, ..., n, dan
- A_1, A_2, \dots, A_n = luas daerah yang mewakili stasiun 1, 2, ... n.

Distribusi Sebaran

Perhitungan dengan menggunakan distribusi *Log Pearson III* banyak digunakan dalam analisis data maksimum banjir dan debit minimum dengan nilai ekstrem. Bentuk distribusi *Log Pearson III* merupakan hasil transformasi dari distribusi *Pearson type III* dengan menggantikan variat menjadi nilai logaritmik. Persamaan garis lurus bentuk kumulatif distribusi *Log Pearson III* adalah (Soewarno, 1995) dapat dilihat pada **Persamaan 3**.

$$Y = \bar{Y} - k \cdot S \quad (3)$$

dengan:

- Y = nilai logaritmik dari X ,
- \bar{Y} = nilai rata-rata dari Y ,
- S = deviasi standar dari Y , dan
- K = karakteristik dari distribusi Log Pearson Tipe III.

Kecocokan Sebaran

Uji kecocokan *Smirnov-Kolmogorov* juga disebut juga uji kecocokan non parametrik, karena pengujiannya tidak menggunakan fungsi distribusi tertentu namun dengan memperhatikan kurva dan penggambaran data pada kertas probabilitas. Dari gambar dapat diketahui jarak penyimpangan setiap titik data terhadap kurva. Jarak penyimpangan terbesar merupakan nilai Δ_{maks} dengan kemungkinan didapat nilai lebih kecil dari nilai Δ_{kritik} , maka jenis distribusi yang dipilih dapat digunakan (Bambang Triatmodjo, 2008).

Curve Number

Curve Number adalah fungsi dari karakteristik DAS seperti tipe tanah, tanaman penutup, tata guna lahan, kelembaban, dan cara pengerjaan tanah. Nilai CN bervariasi dari 0 hingga 100.

Hujan Efektif

The Soil Conservation Service (SCS, 1972, dalam Chow, 1988) telah mengembangkan metode untuk menghitung hujan efektif dalam **Persamaan 4** berikut ini (Bambang Triatmodjo, 2008).

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad (4)$$

dengan:

- P_e = kedalaman hujan efektif (mm),
- P = kedalaman hujan (mm), dan
- S = retensi potensial maksimum air oleh tanah, yang sebagian besar karena infiltrasi (mm).

Persamaan 5 adalah persamaan dasar untuk menghitung kedalaman hujan efektif. Retensi potensial maksimum dapat dihitung dengan **Persamaan 5** berikut ini (SCS, 1972, dalam Chow, 1988).

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad (5)$$

dengan:

- S = retensi potensial maksimum air oleh tanah, yang sebagian besar karena infiltrasi (mm), dan
- CN = *Curve Number*.

Waktu Konsentrasi

Waktu konsentrasi adalah waktu yang diperlukan untuk Bergeraknya air dari titik aliran terjauh dari suatu DAS sampai dengan titik pelepasan. Pada penelitian ini, digunakan rumus *Kirpich* seperti ditampilkan pada **Persamaan 6** (Hanif, 2015)

$$t_c = 0,0195 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,385} \quad (6)$$

dengan:

- t_c = waktu konsentrasi (jam),
- L = panjang saluran utama lintasan air (km),
- S = kemiringan rata-rata saluran ($\Delta H/L$), dan

Intensitas Hujan

Intensitas curah hujan adalah ketinggian curah hujan yang terjadi pada suatu kurun waktu di mana air tersebut berkonsentrasi. Penelitian ini menggunakan metode *Mononobe* hasil modifikasi dengan rumus yang disajikan pada **Persamaan 7** (Rosadana Nurir, 2015).

$$I_t = \frac{R_{24}}{t_c} \left[\frac{t_c}{t} \right]^{2/3} \quad (7)$$

dengan:

- I_t = Intensitas curah hujan pada jam ke- t (mm/jam),
- R_{24} = tinggi hujan rancangan dalam 24 jam (mm),
- t_c = waktu konsentrasi (jam), dan
- t = jam ke-1 s.d. jam ke- t_c .

Hidrograf Satuan Sintetis *Soil Conservation Service (HSS SCS)*

HSS Soil Conservation Service (SCS) adalah hidrograf satuan sintetis yang dikembangkan oleh Victor Mockus pada tahun 1950 dengan lokasi penelitian di Amerika Serikat. Hidrograf ini menggunakan fungsi hidrograf tanpa dimensi untuk menyediakan bentuk standar hidrograf satuan. Persamaan yang digunakan dalam perhitungan HSS SCS mengikuti **Persamaan 8** sampai dengan **Persamaan 16** (BSNI, 2016).

$$Q_p = q_p \cdot P_e \cdot 0,028 \quad (8)$$

$$q_p = \frac{A}{T_0 \text{terkoreksi}} \cdot 484 \quad (9)$$

$$T_0 \text{ tkr} = \frac{1,5}{T_r \cdot T_c} \quad (10)$$

$$\frac{T_0}{T_p} = \frac{T_r \cdot T_c}{T_p} \quad (11)$$

$$t_c = 0,0195 \left(\frac{L}{\sqrt{S}} \right)^{0,385} \quad (12)$$

$$T_p = \frac{0,24 \cdot t_c}{2} + t_p \quad (13)$$

$$t_p = 0,51 \cdot L_0,8 \quad (14)$$

$$P_e = \frac{(P - 0,2 S)^2}{P + 0,8 S} \quad (15)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (16)$$

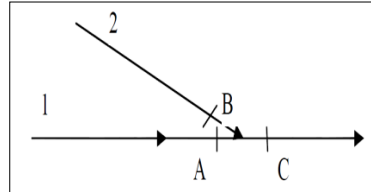
dengan:

- Q_p = debit puncak limpasan (m^3/s),
- q_p = debit puncak (in),
- T_c = waktu konsentrasi (jam),
- T_p = waktu puncak (m^3/s),
- t_p = waktu antara titik berat curah hujan hingga puncak hidrograf (jam),
- t_r = *time ratio*,
- A = luas DAS (in),
- L = panjang sungai utama (km),
- S = kemiringan sungai,
- P_e = kedalaman hujan efektif (in),
- P = kedalaman hujan maksimum (in), dan
- S = infiltrasi maksimum yang terjadi (in),

CN = curve number.

Penelusuran Banjir berdasarkan Metode Gabungan O'Donnell-Muskingum Cunge

Metode Gabungan O'Donnell – Muskingum Cunge merupakan metode yang menggunakan persamaan-persamaan pada metode Muskingum Cunge dan asumsi dari metode O'Donnell. Metode Muskingum Cunge membutuhkan data cross section sungai untuk menghasilkan hidrograf aliran (Chow, 1998). Metode O'Donnell menganggap aliran anak sungai yang masuk ke sungai utama sebagai aliran lateral. Hidrograf aliran sungai bagian hilir didapatkan dari penjumlahan hidrograf aliran sungai dengan anak sungai pada suatu titik pertemuan (Sobriyah, 2012).



Gambar 1. Aliran lateral masuk sungai

Berdasarkan Gambar 1 diketahui bahwa hidrograf di C merupakan penjumlahan hidrograf aliran A dan hidrograf aliran B. Hidrograf aliran pada titik pertemuan sungai dengan anak sungai dapat diperoleh dengan **Persamaan 17**.

$$I_{Shi} = I_{Shu} + I_{SA} \quad (17)$$

Untuk memperoleh hidrograf aliran di hilir digunakan **Persamaan 18 – Persamaan 22**.

$$O_{j+1} = C_1 I_j + C_2 I_j + C_3 I_j \quad (18)$$

$$C_1 = \frac{-1+Cr+D}{1+Cr+D} \quad (19)$$

$$C_2 = \frac{1+Cr-D}{1+Cr+D} \quad (20)$$

$$C_3 = \frac{1-Cr+D}{1+Cr+D} \quad (21)$$

$$C_1 + C_2 + C_3 = 1 \quad (22)$$

Dengan nilai cr dan D dihitung dengan **Persamaan 23** dan **Persamaan 24**.

$$C_r = v \frac{\Delta t}{\Delta x} \quad (23)$$

$$D = \frac{q}{S v \Delta x} \quad (24)$$

dengan:

q = Q/La = debit aliran per unit lebar saluran,

v = kecepatan (m/s),

S = kemiringan dasar saluran.

Secara umum rumus yang digunakan pada metode ini sama dengan rumus-rumus yang digunakan pada metode Muskingum-Cunge pada suatu penggal sungai yang memasukan parameter kecepatan aliran untuk setiap debit yang ditelusur. Untuk memudahkan perhitungan diberikan **Persamaan 25**.

$$Q = A_b \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

dengan:

Q = debit aliran (m³/detik),

A_b = luas penampang basah (m²),

R = radius hidrolis,

S = kemiringan permukaan tanah (dasar sungai),

N = koefisien Manning.

Analisis Tinggi Muka Air Banjir

Tinggi muka air banjir dihitung dengan menggunakan persamaan antara debit dengan tinggi muka air (Q-H). Persamaan tersebut diperoleh dari hasil trial tinggi muka air setiap 0,5 m hingga ketinggian maksimum penggal

sungai yang ditinjau pada penelusuran banjir dengan Metode Gabungan *O'Donnell – Muskingum Cunge*. Tinggi muka air banjir maksimum dihasilkan dari debit maksimum setiap penggal sungai yang ditelusuri.

METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode deskriptif kuantitatif. Analisis penelusuran banjir menggunakan metode Gabungan *O'Donnell – Muskingum Cunge* kemudian dilakukan pemetaan potensi banjir dengan *ArGIS*. Penelitian dilakukan di Kelurahan Sumber, Kecamatan Banjarsari, Kota Surakarta.

Data yang digunakan adalah:

1. Peta Kota Surakarta skala 1:25000.
2. Peta digital Kota Surakarta dan wilayah sekitarnya skala 1:25000 produksi Badan Informasi Geospasial (BIG) Indonesia tahun 2017.
3. Peta DAS Kali Gajah Putih yang diperoleh dari pengolahan peta digital dengan *ArGIS* 10.3 dengan berpatokan pada peta DAS yang dibuat oleh Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kota Surakarta.
4. Data geometri sungai dan anak-anak sungai pada titik-titik tinjauan.
5. Data koordinat stasiun hujan di wilayah Surakarta dan sekitarnya.
6. Data curah hujan harian di stasiun hujan Pabelan dan Ngemplak pada tahun 1997-2017 yang diperoleh dari Balai Besar Wilayah Sungai (BBWS) Bengawan Solo dan Dinas Pekerjaan Umum Sumber Daya Air dan Penataan Ruang (PUSDATARU) Kota Surakarta.

Data di atas kemudian diolah dengan menggunakan beberapa perangkat digital yang terdiri dari:

1. *Miscrosoft Word* untuk menyusun laporan skripsi.
2. *Miscrosoft Excel* untuk pengolahan data hujan dan analisis penelusuran banjir.
3. *Google Earth* untuk mengetahui tata guna lahan di wilayah penelitian dan elevasi.
4. *AutoCAD* untuk mengolah data geometri sungai yang ditinjau.
5. *ArGIS* 10.3 untuk analisis data spasial dan pemetaan peta potensi banjir.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Debit Banjir Rencana DAS Kali Gajah Putih dan Sub DAS Kali Gajah Putih

Debit banjir rencana DAS Kali Gajah Putih akibat hujan pada periode ulang dan akibat hujan 3 harian maksimum bulanan dihitung dengan metode HSS SCS. Debit banjir rencana disajikan pada **Tabel 1**.

Tabel 1 Debit Banjir Rencana akibat Hujan Periode Ulang pada DAS Kali Gajah Putih

Periode Ulang (tahun)	Debit Banjir Rencana (m ³ /detik)
5	16,780
10	19,729
25	24,012
50	27,627

(Sumber : Hasil Analisis)

Debit banjir rencana maksimum akibat hujan 3 harian maksimum bulanan pada DAS Kali Gajah Putih terjadi pada bulan Desember dengan nilai debit sebesar 18,838 m³/detik.

Tabel 2 Debit Banjir Rencana akibat Hujan Periode Ulang pada sub DAS Kali Gajah Putih

Periode Ulang (tahun)	Debit Aliran Sub DAS (m ³ /detik)		
	1	2	3
5	8,354	3,535	4,891
10	9,823	4,156	5,751
25	11,955	5,058	6,999

50	13,755	5,820	8,053
----	--------	-------	-------

(Sumber : Hasil Analisis)

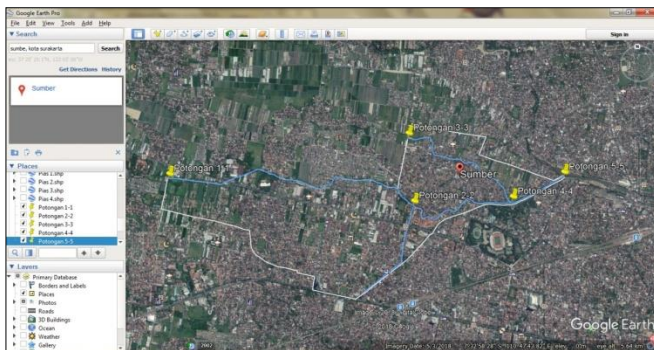
Tabel 3 Debit Banjir Rencana akibat Hujan Periode Ulang pada sub DAS Kali Gajah Putih pada bulan Desember

Bulan	Debit Aliran Sub DAS (m ³ /detik)		
	1	2	3
Desember	9,379	3,968	5,491

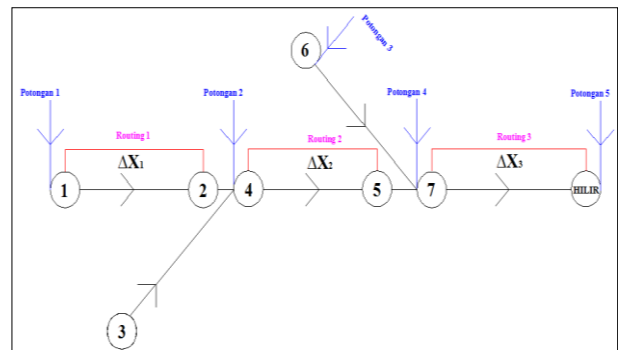
(Sumber : Hasil Analisis)

Penelusuran Banjir dengan Metode Gabungan O'Donnel-Muskingum Cunge

Penelusuran banjir dimulai dari hulu hingga ke hilir, jika terdapat anak sungai yang masuk ke sungai utama maka debit dari anak sungai akan ditambahkan ke sungai utama. Pada penelitian ini dibutuhkan data *cross section* dari sungai yang ditinjau yaitu Kali Gajah Putih. Hasil *plotting* DAS Kali Gajah Putih ke *Google Earth* disajikan pada **Gambar 2**. Skema penelusuran banjir Metode Gabungan O'Donnel – Muskingum Cunge disajikan pada **Gambar 3**.



Gambar 2. Hasil *Plotting* DAS Kali Gajah Putih



Gambar 3. Skema Penelusuran Banjir Metode Gabungan O'Donnel – Muskingum Cunge

Penelusuran banjir dimulai dari *Routing* 1 (penggal 1-2), debit masukan pada titik 1 berasal dari debit sub DAS 1. *Routing* 1 dilakukan sepanjang Δx_1 hingga menghasilkan debit keluaran pada titik 2. Dilanjutkan *Routing* 2 (penggal 4-5), debit masukan pada titik 4 berasal dari debit pada titik 2 dijumlahkan dengan debit masukan anak sungai dari sub DAS 2. *Routing* 2 dilakukan sepanjang Δx_2 hingga menghasilkan debit keluaran pada titik 5. Dilanjutkan *Routing* 3 (penggal 7-HILIR), debit masukan pada titik 7 berasal dari debit pada titik 5 dijumlahkan dengan debit masukan anak sungai dari sub DAS 3. *Routing* 3 dilakukan sepanjang Δx_3 hingga menghasilkan debit keluaran pada titik HILIR. Jarak tiap penggal sungai yang ditelusur serta kemiringan sungai disajikan pada **Tabel 4**.

Tabel 4 Jarak dan *slope* penelusuran banjir

<i>Routing</i> ke-	Penggal Sungai	Jarak/ Δx (km)	Slope
1	1-2	3,309	0,003
2	4-5	1,457	0,003
3	7-HILIR	0,753	0,002

(Sumber : Hasil Analisis)

Perhitungan nilai C_1 , C_2 dan C_3 harus dilakukan sebelum melakukan penelusuran banjir. Nilai C_1 , C_2 dan C_3 dipengaruhi oleh bentuk dan ukuran penampang titik sungai yang ditinjau. Parameter yang dibutuhkan pada perhitungan ini adalah lebar atas saluran, luas penampang basah dan keliling basah. Pada perhitungan ini dilakukan *trial* ketinggian muka air dengan penambahan ketinggian tiap 0,5 meter sampai dengan ketinggian maksimum saluran. *Trial* tersebut akan menghasilkan 4 (empat) persamaan yaitu persamaan antara tinggi muka air–debit ($H-Q$), lebar atas saluran–debit ($La-Q$), keliling basah–debit ($P-Q$) dan luas penampang basah–debit ($A-Q$) yang mewakili tiap potongan sungai. Tinggi muka air (H), lebar atas saluran (La), keliling basah (P) dan

luas penampang basah (A) didapatkan dengan bantuan *software AutoCAD*, debit dihitung menggunakan rumus *Manning* dengan nilai koefisien *manning* saluran material beton sebesar 0,02. Rekapitulasi persamaan hubungan H–Q, La–Q, P–Q dan A–Q pada semua potongan disajikan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Rekapitulasi Persamaan H-Q, La-Q, A-Q dan P-Q

Potongan	H	La	A	P
1	0,300.(Q ^{0,555})	4,531.(Q ^{0,191})	1,282.(Q ^{0,688})	9,182.(Q ^{0,221})
2	0,229.(Q ^{0,602})	6,595.(Q ^{0,08})	1,551.(Q ^{0,645})	13,10.(Q ^{0,114})
3	0,258.(Q ^{0,589})	6,433.(Q ^{0,026})	1,667.(Q ^{0,603})	12,82.(Q ^{0,082})
4	0,237.(Q ^{0,546})	9,457.(Q ^{0,132})	2,020.(Q ^{0,657})	18,27.(Q ^{0,143})
5	0,237.(Q ^{0,546})	9,457.(Q ^{0,132})	2,020.(Q ^{0,657})	18,27.(Q ^{0,143})

Hasil Penelusuran banjir disajikan pada **Tabel 6** dan **Tabel 7**.

Tabel 6 Rekapitulasi Debit Maksimum Periode Ulang Hasil Penelusuran Banjir Metode Gabungan *O'Donnell – Muskingum Cunge*

Debit Maksimum (m ³ /detik)	Periode Ulang			
	5	10	25	50
Q _{T-1}	8,354	9,823	11,955	13,755
Q _{T-2}	8,131	9,580	11,687	13,467
Q _{T-3}	3,535	4,156	5,058	5,820
Q _{T-4}	11,666	13,736	16,745	19,286
Q _{T-5}	11,543	13,603	16,599	19,130
Q _{T-6}	4,891	5,751	6,999	8,053
Q _{T-7}	16,434	19,354	23,598	27,183
Q _{T-HILIR}	16,386	19,301	23,540	27,121

(Sumber : Hasil Analisis)

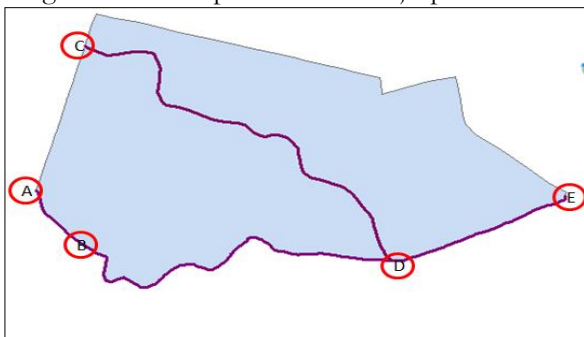
Tabel 7 Rekapitulasi Debit Maksimum akibat Hujan 3 Harian Maksimum Bulanan pada bulan Desember Hasil Penelusuran Banjir Metode Gabungan *O'Donnell – Muskingum Cunge*

Debit Maksimum (m ³ /detik)	Desember
Q _{3harian-1}	9,379
Q _{3harian-2}	9,143
Q _{3harian-3}	3,968
Q _{3harian-4}	13,111
Q _{3harian-5}	12,982
Q _{3harian-6}	5,491
Q _{3harian-7}	18,473
Q _{3harian-HILIR}	18,422

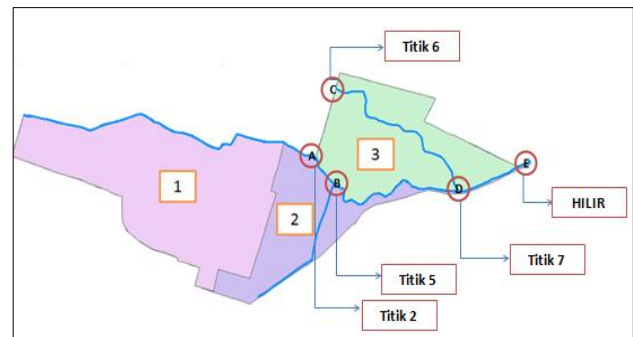
(Sumber : Hasil Analisis)

Analisis Tinggi Muka Air Banjir

Terdapat 5 tinjauan di Kelurahan Sumber yaitu titik A sampai dengan E. Debit pada titik tinjauan A sama dengan debit hasil penelusuran banjir pada titik 2, debit pada titik tinjauan B sama dengan debit hasil penelusuran banjir pada titik 5, debit pada titik tinjauan C sama dengan debit hasil penelusuran banjir pada titik 6, debit pada titik tinjauan D sama dengan debit hasil penelusuran banjir pada titik 7 dan debit pada titik tinjauan E sama dengan debit hasil penelusuran banjir pada titik HILIR.



(a) Titik Tinjauan di Kelurahan Sumber



(b) Titik Tinjauan di DAS Kali Gajah Putih

Gambar 4. Titik Tinjauan Analisis Tinggi Muka Air Banjir

Terdapat 5 titik tinjauan di kelurahan Sumber, yaitu titik A yang berada disekitar jalan Pakel dekat daerah Kerten, titik B disekitar jalan Pajajaran daerah SD Muhammadiyah 15 Surakarta, titik C disekitar jalan Pakel dekat daerah Baturan, kecamatan Colomadu, kabupaten Karanganyar, titik D disekitar belakang Taman Balekambang Surakarta dan titik E berada dipertemuan antara Kali Gajah Putih dengan Kali Pepe Hulu.

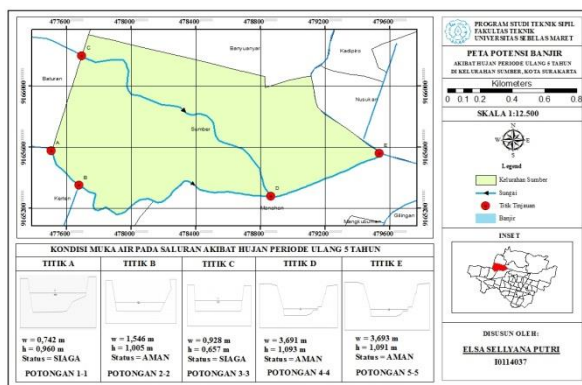
Debit hasil penelusuran banjir Kali Gajah Putih dimasukkan ke persamaan antara tinggi muka air (H) dengan debit (Q) sehingga menghasilkan tinggi muka air pada saluran di titik tinjauan.

Hasil dari penelusuran banjir pada Kali Gajah Putih adalah sebagai berikut:

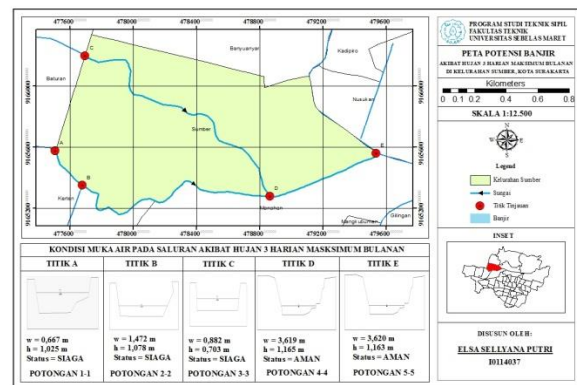
- Tinggi saluran maksimum pada titik tinjauan A adalah 1,702 meter, $Q_5=8,131 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=0,960 \text{ m}$, $Q_{10}=9,580 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,051 \text{ m}$, $Q_{25}=11,687 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,174 \text{ m}$, $Q_{50}=13,467 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,270 \text{ m}$ dan $Q_{3\text{-harian}}=9,143 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,025 \text{ m}$.
- Tinggi saluran maksimum pada titik tinjauan B adalah 2,551 meter, $Q_5=11,666 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,005 \text{ m}$, $Q_{10}=13,736 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,109 \text{ m}$, $Q_{25}=16,745 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,249 \text{ m}$, $Q_{50}=19,286 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,360 \text{ m}$ dan $Q_{3\text{-harian}}=13,111 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,078 \text{ m}$.
- Tinggi saluran maksimum pada titik tinjauan C adalah 1,585 meter, $Q_5=4,891 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=0,657 \text{ m}$, $Q_{10}=5,751 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=0,723 \text{ m}$, $Q_{25}=6,999 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=0,812 \text{ m}$, $Q_{50}=8,053 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=0,881 \text{ m}$ dan $Q_{3\text{-harian}}=5,491 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=0,703 \text{ m}$.
- Tinggi saluran maksimum pada titik tinjauan D adalah 4,784 meter, $Q_5=16,434 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,093 \text{ m}$, $Q_{10}=19,354 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,195 \text{ m}$, $Q_{25}=23,598 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,331 \text{ m}$, $Q_{50}=27,183 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,438 \text{ m}$ dan $Q_{3\text{-harian}}=18,473 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,165 \text{ m}$.
- Tinggi saluran maksimum pada titik tinjauan E adalah 4,784 meter, $Q_5=16,386 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,091 \text{ m}$, $Q_{10}=19,301 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,193 \text{ m}$, $Q_{25}=23,540 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,330 \text{ m}$, $Q_{50}=27,121 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,437 \text{ m}$ dan $Q_{3\text{-harian}}=18,422 \text{ m}^3/\text{detik}$ menghasilkan $h=1,163 \text{ m}$.

Berdasarkan hasil penelusuran banjir dengan metode gabungan *O'Donnell-Muskingum Cunge* pada Kali Gajah Putih didapatkan bahwa tidak terjadi banjir akibat meluapnya Kali Gajah Putih pada 5 titik tinjauan yang berada di kelurahan Sumber, kecamatan Banjarsari, kota Surakarta. Oleh karena itu, dibuat level peringatan banjir sederhana berdasarkan perbedaan tinggi maksimum saluran dengan tinggi saluran hasil penelusuran banjir pada setiap titik tinjauan. Dengan syarat maksimum jagaan banjir 1,5 meter maka didapatkan level peringatan adalah sebagai berikut:

- Level peringatan banjir pada titik A adalah siaga banjir akibat dari hujan pada periode ulang dan hujan 3 harian maksimum bulanan pada Desember.
- Level peringatan pada titik B adalah aman pada periode ulang 5 tahun dan siaga banjir pada periode ulang 10, 25, 50 tahun dan akibat hujan 3 harian maksimum bulanan pada bulan Desember.
- Level peringatan pada titik C adalah siaga banjir akibat dari hujan pada periode ulang dan hujan 3 harian maksimum bulanan pada Desember.
- Level peringatan pada titik D adalah aman akibat dari hujan pada periode ulang dan hujan 3 harian maksimum bulanan pada Desember.
- Level peringatan pada titik E adalah aman akibat dari hujan pada periode ulang dan hujan 3 harian maksimum bulanan pada Desember.



Gambar 5. Peta Potensi Banjir Kelurahan Sumber pada Periode Ulang



Gambar 6. Peta Potensi Banjir Kelurahan Sumber Akibat Hujan 3 Hari Maksimum Bulanan

SIMPULAN

Dari hasil analisis dan pembahasan, maka diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Debit banjir rencana akibat hujan periode ulang (Q_T) pada DAS Kali Gajah Putih adalah $Q_5=16,780$ m³/detik, $Q_{10}=19,729$ m³/detik, $Q_{25}=24,012$ m³/detik dan $Q_{50}=27,627$ m³/detik.
2. Debit banjir rencana akibat hujan 3 harian maksimum bulanan terjadi pada bulan Desember dengan debit banjir rencana sebesar 18,838 m³/detik.
3. Tidak terjadi banjir di Kelurahan Sumber akibat hujan pada periode ulang dan hujan 3 harian maksimum bulanan berdasarkan penelusuran banjir dengan metode gabungan *O'Donnel-Muskingum Cunge*.
4. Pada peta potensi banjir disajikan tinggi muka air pada saluran di setiap titik tinjauan berdasarkan penelusuran banjir dengan metode gabungan *O'Donnel-Muskingum Cunge* dan level peringatan banjir akibat hujan pada periode ulang serta hujan 3 harian maksimum bulanan.

REKOMENDASI

1. Data curah hujan kurang lengkap seperti data kosong maka sebaiknya pemantauan curah hujan dilaksanakan secara rutin setiap hari agar perencanaan banjir lebih aktual.
2. Perlu dilakukan penelitian dengan metode yang sama dengan lokasi yang berbeda.
3. Diperlukan adanya kajian lanjut mengenai banjir akibat sistem drainase.

UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih pertama ditujukan kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan nikmatnya. Selanjutnya kepada Dr. Ir. Rr. Rintis Hadiani, M.T. dan Ir. Endah Sitaresmi Suryandariselaku dosen pembimbing yang telah memberi arahan dan masukan dalam penelitian ini.

REFERENSI

- Asdak, Chay. 1995. *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Badan Standarisasi Nasional (BSN). 2016. SNI 2415-2016 : *Tata Cara Perhitungan Debit Banjir Rencana*
- Chow, V.T., Maidment, D.R., and Mays, L.W. 1988. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill. Singapore.
- Dinas Pekerjaan Umum dan Penataan Ruang Kota Surakarta. 2018. Surakarta.
- Fatiama, Siti Ima. 2012. *Analisis Hidrograf Aliran dengan Metode Muskingum dan Muskingum Cunge pada sub DAS Ta'deang di Kabupaten Maros*. Universitas Hasanuddin. Makassar.
- Hamdani, Hendi dkk. 2014. *Analisa Daerah Rawan Banjir Menggunakan Aplikasi Sistem Informasi Geografis (Studi Kasus Pulau Bangka)*. Jurnal Konstruksi. Vol. 12 No. 1.
- Harto, Sri. 2000. *Analisis Hidrologi*. PT.Gramedia Utama. Jakarta.
- Jadmiko, Sigit, dan Hadiani, Rintis. 2013. *Banjir Tahunan Sub Daerah Aliran Sungai Bengawan Solo Hulu 3 dengan Sistem Informasi Geografis*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Naulita, Maria Anisa. 2015. *Metode Penelusuran Banjir pada Sungai Dengkeng dengan Metode Gabungan O'Donnel dan Muskingu-Cunge dan Metode Muskingum Extended*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Nurir, Rosadana. 2015. *Transformasi Hujan Harian ke Hujan Jam-Jaman menggunakan Metode Mononobe dan Pengalibragaman Hujan Aliran*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Pediano, Dicky. 2014. *Penelusuran Banjir di DAS Temon dengan Metode Muskingum-Cunge Menggunakan HYDROCAD*. Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Schwab, G.O., Fangmeir, D.D., Elliot, W.J., and Frevert, R.K. 1992. *Soil and Water Conservation Engineering*. Four Edition, John Wiley & Sons. Inc, New York.
- Susanto, R.H. dan Purnomo, R.H (penterjemah). 1997. *Teknik Konservasi Tanah dan Air*. CFWMS Sriwijaya University. Palembang.
- SNI 2415:2016. *Tata Cara Penghitungan Debit Banjir Rencana*.
- Sobriyah. 2012. *Model Hidrologi*. UPT Penerbitan dan Percetakan UNS (UNS Press). Surakarta.
- Sobriyah dan Sudjarwadi. 2000. *Penggabungan Metode O'Donnel dan Muskingum Cunge untuk Penelusuran Banjir pada Jaringan Sungai*. Jurnal. Media TEKNIK No.04. Yogyakarta.
- Soewarno. 1995. *Hidroloi Aplikasi Metode Statistik untuk Analisis Data Jilid 1*. Nova. Bandung.
- Suripin. 2004. *Sistem Drainase Perkotaan yang Berkelanjutan*. ANDI Offset. Yogyakarta.
- Triatmojo, Bambang. *Hidrologi Terapan*. 2008. Beta Offset. Yogyakarta.