

ANALISIS KARAKTERISTIK CURAH HUJAN PENYEBAB BANJIR BERDURASI PANJANG (STUDI KASUS: BANJIR TAHUN 2019 DI BALEENDAH, JAWA BARAT)

ANALYSIS OF RAINFALL CHARACTERISTICS CAUSES OF LONG DURATION FLOOD (CASE STUDY: 2019 FLOODS IN BALEENDAH, WEST JAVA)

Yogi Sahat M. Simanjuntak¹⁾ Rusmawan Suwarman^{2)*} Edi Riawan³⁾

¹⁾Program Studi Sains Kebumihan, Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

^{2,3)}Kelompok Keahlian Sains Atmosfer, Institut Teknologi Bandung
Labtek XI Lt. 2, Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat, Indonesia

*Correspondent email: rusmawan@itb.ac.id

Diterima: 19 September 2022; Direvisi: 06 November 2022; Disetujui: 12 Desember 2022

ABSTRACT

In 2019, Baleendah experienced flooding with a duration of ± 30 days, this can be seen from the water level which is above the critical point from February 9th – March 12th, 2019, which identified the occurrence of flooding. Based on the spatio-temporal analysis of rainfall in the upstream Citarum watershed that drains to Baleendah, there were differences in the timing of rainfall between northern, southern, and eastern regions, and a semi-diurnal pattern. This study aims to look at the rainfall pattern that causes long-duration flooding in Baleendah. Based on that point, we conducted hydrological simulations using the Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Model System (HEC-HMS) with the assumption that the volume of rainfall is constant. The rainfall scenarios used were 1) a diurnal scenario where there is a difference in the timing of rainfall between the north, south, and east regions, 2) rainfall scenarios with diurnal and semidiurnal variations, and 3) the semidiurnal scenario is getting closer (the timing between rainfall in the morning and in the night is getting closer) in the north, south, and east regions. The results of this study show that floods are longer in duration and peak discharge is higher when a diurnal pattern occurs. Rainfall is initiated in the eastern and southern regions and a lag in timing rainfall occurred in the northern region.

Keywords: Baleendah, Long duration flood, rainfall time difference, variation of diurnal and semidiurnal, and short semidiurnal

ABSTRAK

Baleendah pada tahun 2019 mengalami banjir dengan durasi ± 30 hari, terlihat bahwa tinggi muka air berada di atas titik kritis mulai tanggal 9 Februari – 12 Maret 2019 yang mengidentifikasi kejadian banjir. Berdasarkan analisis pola spasio-temporal curah hujan di seluruh DAS Citarum Hulu yang bermuara ke Baleendah, terdapat hujan yang terjadi secara bersamaan, hujan beda waktu antara wilayah utara, selatan, dan timur, serta terdapat hujan dengan 2 puncak dalam satu hari. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pola curah hujan yang menyebabkan banjir berdurasi panjang di Baleendah. Berdasarkan hal tersebut dilakukan simulasi hidrologi dengan menggunakan Hidrologic Engineering Center's Hydrologic Model System (HEC-HMS) dengan asumsi volume hujan adalah sama. Adapun skenario yang digunakan adalah 1) skenario diurnal dimana terdapat beda waktu hujan antara wilayah Utara, Selatan dan Timur, 2) skenario hujan dengan variasi semidiurnal dan diurnal, serta 3) skenario semidiurnal mendekat (jarak waktu hujan sore dan pagi semakin dekat) di wilayah utara, selatan dan wilayah timur. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa banjir akan berdurasi lebih lama serta debit puncak akan semakin besar apabila terjadi dengan pola diurnal dimana hujan diinisiasi di wilayah timur dan selatan serta wilayah utara mengalami jeda waktu hujan.

Kata kunci: Baleendah, Banjir berdurasi lama, beda waktu hujan, variasi diurnal dan semidiurnal, semidiurnal mendekat

PENDAHULUAN

Banjir merupakan bencana hidrometeorologi yang memiliki frekuensi paling besar (Yulianto *et al.*, 2015) dan diproyeksikan akan mengalami peningkatan frekuensi (Hirabayashi *et al.*, 2013), peningkatan kedalaman dan luas banjir akibat perubahan iklim (Yamamoto *et al.*, 2021). Baleendah merupakan wilayah di Cekungan Bandung yang selalu mengalami banjir setiap tahunnya (Junnaedhi *et al.*, 2017). Banjir ini dapat disebabkan oleh curah hujan ekstrem (Tabari, 2020), urbanisasi (Harmadianto *et al.*, 2020), serta perubahan tata guna lahan seperti perubahan lahan hutan menjadi lahan pertanian (Rahayu *et al.*, 2022). Berdasarkan kondisi meteorologisnya, Cekungan Bandung memiliki pola diurnal yang kuat akibat pengaruh angin lembah (Oigawa *et al.*, 2017) serta mengalami hujan semidiurnal yang disebabkan oleh aktivitas awan konvektif berulang (Fitriani *et al.*, 2019).

Tercatat beberapa banjir besar pernah terjadi di Baleendah, diantaranya banjir pada tahun 1986, 2005, 2006, 2007, 2010, dan 2019. Pada bulan Februari – Maret tahun 2019, Baleendah mengalami banjir dengan durasi panjang mencapai ± 30 hari, bahkan ketinggian banjir di perumahan warga mencapai 2-2.5 meter. Selain itu, banjir berdurasi panjang juga pernah terjadi pada tahun 1986 dengan durasi 30-45 hari, serta pada tahun 2010 mencapai durasi > 10 hari (Japan International Cooperation Agency, 2010). Namun sampai saat ini, karakteristik penyebab banjir berdurasi panjang masih belum diketahui. Pengetahuan ini sangat penting untuk pengendalian banjir (Try *et al.*, 2022), pembuatan peta bahaya banjir (Sy *et al.*, 2020), dan untuk mitigasi banjir kedepannya. Sehingga penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis karakteristik hujan yang menyebabkan banjir berdurasi panjang dengan mengkaji kejadian banjir di Baleendah pada tahun 2019 (9 Februari - 12 Maret 2019). Kejadian ini dikaji karena memiliki data dengan resolusi temporal yang lebih baik dibandingkan kejadian banjir lainnya.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, banjir berdurasi panjang dapat disebabkan oleh curah hujan dengan pola dua puncak dalam satu hari (Riawan *et al.*, 2018), curah hujan yang berulang setiap harinya (Wu *et al.*, 2007) serta dipengaruhi oleh (1) pola dan intensitas hujan, (2) distribusi area curah hujan, dan (3) durasi hujan (Sherman, 1932)

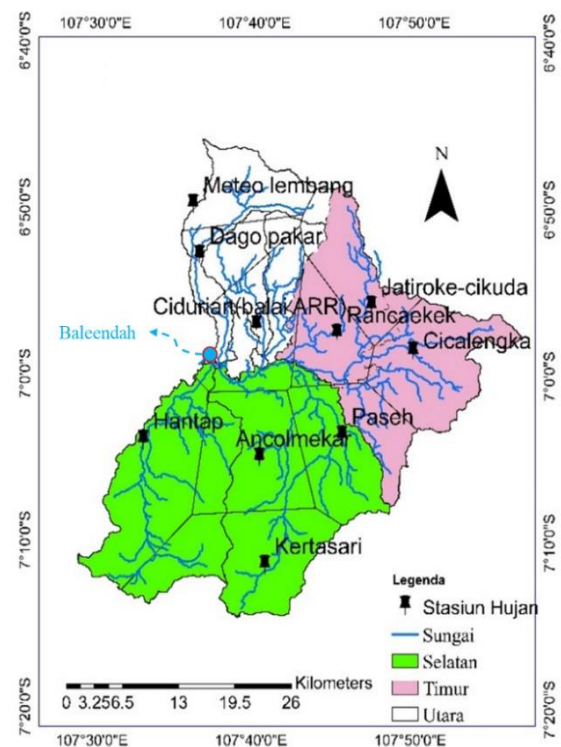
Untuk melihat peran dari fenomena pola curah hujan terhadap kejadian banjir, dibutuhkan simulasi hidrologi menggunakan *Hidrologic Engineering Center's Hidrologic Model System* (HEC-HMS). HEC-HMS adalah model *semi-distributed* yang dapat menggambarkan hubungan antara hujan-aliran di

dalam suatu DAS dan biasa digunakan untuk analisis hidrologi.

METODOLOGI

Lokasi Studi

Baleendah merupakan wilayah yang berada di Daerah aliran sungai (DAS) Citarum Hulu. DAS Citarum - Baleendah memiliki topografi berbentuk cekungan dengan ketinggian 600 m sampai 700 m di atas permukaan laut dan dikelilingi oleh gunung dengan ketinggian 2000 m. DAS Citarum-Baleendah memiliki luas sekitar 1253 km². Penelitian ini membagi DAS Citarum-Baleendah menjadi 3 wilayah, yaitu wilayah utara, selatan, dan timur, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Pembagian ini didasari oleh arah aliran sungai setiap wilayah. Aliran sungai dari utara bergerak ke arah selatan, aliran dari selatan bergerak ke utara, dan aliran dari timur bergerak ke barat (arah aliran radial).



Gambar 1 DAS Citarum dengan outlet Baleendah dibagi menjadi 3 wilayah yaitu wilayah utara (putih), wilayah selatan (hijau), dan wilayah timur (merah muda)

Pembagian wilayah utara, selatan, dan timur juga dilakukan untuk melihat peran spasio-temporal curah hujan terhadap banjir berdurasi panjang. Wilayah utara cenderung memiliki topografi yang curam dan sungai yang lebih pendek. Wilayah selatan juga memiliki topografi yang curam, namun memiliki sungai yang lebih panjang dibandingkan wilayah utara, serta wilayah timur cenderung

memiliki topografi yang lebih landai apabila dibandingkan dengan wilayah utara dan wilayah selatan.

Data Curah Hujan

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data curah hujan 10 stasiun BBWS Citarum dengan resolusi temporal 10 menit, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Lokasi dan stasiun secara detail dapat dilihat pada Tabel 1. Pada saat kejadian banjir, intensitas hujan terbesar terjadi di stasiun Cicalengka dengan besar 51,6 mm/jam, stasiun ini juga mencatat curah hujan harian terbesar mencapai 93,5 mm pada tanggal 6 Maret 2019.

Data curah hujan pada 1 Januari - 31 Maret 2019 digunakan untuk melihat karakteristik curah hujan pada saat kejadian banjir Baleendah 2019. Karakteristik curah hujan meliputi pola, curah hujan ekstrim, durasi hujan, dan waktu terjadinya hujan.

Tabel 1 Stasiun permukaan BBWS Citarum.

No	Nama stasiun	Bujur	Lintang
1	Paseh	107,76	-7,06
2	Kertasari	107,68	-7,19
3	Cicalengka	107,83	-6,97
4	Ancolmekar	107,67	-7,08
5	Meteo lembang	107,59	-7,08
6	Jatiroke-cikuda	107,79	-6,93
7	Rancaekek	107,75	-6,95
8	Dago Pakar	107,61	-6,88
10	Cidurian (Balai ARR)	107,67	-6,95
12	Hantap	107,55	-7,06

Curah Hujan, Durasi, Pola dan Waktu Hujan

Untuk mendapatkan curah hujan dan durasi hujan, dilakukan pemisahan kejadian hujan satu, dengan kejadian hujan lainnya. Pemisahan kejadian ini menggunakan perhitungan *wet (dry) spells*. Jumlah kejadian untuk setiap durasi hujan dapat dihitung menggunakan persamaan (1):

$$\sum_{d=10}^{dmax} n_w d \quad \dots\dots\dots (1)$$

Dimana:

d : durasi hujan (menit)

w_d : kejadian hujan dengan durasi d(menit)

n : jumlah kejadian hujan.

Curah hujan yang digunakan adalah curah hujan ekstrim harian dengan nilai > *percentile* 95. Durasi hujan yang dipilih adalah durasi hujan dengan frekuensi terbesar ketika curah hujannya memiliki nilai > *percentile* 95.

Pola hujan yang terjadi pada saat kejadian banjir Baleendah 2019 adalah hujan diurnal dan hujan semidiurnal. Hujan diurnal hampir terjadi pada semua kejadian banjir, sedangkan hujan semidiurnal terjadi pada tanggal 10 Februari, 15 Februari, dan 6 Maret 2019.

Pemodelan Hidrologi Menggunakan HEC-HMS

HEC HMS merupakan model *semi distributed* yang dirancang untuk mensimulasikan hujan-aliran (*rainfall-runoff*) di atas DAS. HEC-HMS membutuhkan masukan curah hujan, karakteristik DAS dan menghasilkan debit sebagai keluaran model. Karakteristik DAS yang utama dalam pemodelan hidrologi antara lain batas DAS, jaringan sungai, dan parameter infiltrasi/limpasan permukaan (SCS-CN). Data elevasi (DEM), tutupan lahan, dan jenis tanah diolah menggunakan HEC-GeoHMS sebagai data spasial untuk melihat karakteristik DAS ini.

Model Batas DAS dan Jaringan Sungai

Data elevasi (DEM) digunakan untuk membangun model DAS terkait dengan batas dan model jaringan sungai. Deliniasi DAS diolah menggunakan *tools* HEC-GeoHMS, proses ini terdiri atas beberapa tahapan, yaitu: (1) *fill sink*, (2) *flow direction*, (3) *flow accumulation*, (4) *stream definition*, (5) *stream segmentation*, (6) *catchment delineation*, (7) *catchment polygon*, (8) *drainage line*, dan (9) *watershed aggregation*.

Loss Model dan Transform Model

Adapun parameter lain yang dibutuhkan dalam model hidrologi HEC-HMS adalah koefisien infiltrasi dan koefisien limpasan. Besarnya kapasitas infiltrasi bergantung pada jenis tanah. Klasifikasi jenis yang digunakan mengikuti *U.S Soil Conservation Service* (Soil Conservation Service (SCS), 1972) . Jenis tanah dikelompokkan dalam empat klasifikasi, yaitu A, B, C, dan D (Cronshey *et al.*, 1986; Soil Conservation Service (SCS), 1972). Pilgram dan Cordery (1993) serta Symeonakis dan Drake (2010) telah menerjemahkan SCS ini ke dalam tekstur tanah yang dapat disesuaikan dalam peristilahan Geologi, sedangkan Skaggs dan Khaleel (1982) telah mengestimasi laju infiltrasi klasifikasi tanah tersebut (dapat dilihat pada Tabel 2). Sesuai Tabel 2, klasifikasi tanah A, B, C, dan D secara berurutan menunjukkan kuantitas laju infiltrasi yang menurun.

Tabel 2 Klasifikasi tanah berdasarkan SCS (Cronshey *et al.*, 1986), tekstur tanah (Symeonakis & Drake, 2010) dan laju infiltrasi (Skaggs & Khaleel, 1982)

Klasifikasi Tanah	Deskripsi tekstur tanah	Laju infiltrasi (cm/jam)
A	Geluh (<i>loam</i>), pasir (<i>sand</i>), <i>loamy sand</i> , lanau (<i>silt</i>)	0,76 – 1,14
B	Geluh berlempung-pasiran (<i>sandy clay loam</i>), lanau lempung berpasir (<i>silty clay loam</i>), lanau berpasir (<i>sandy loam</i>), dan lanau geluh <i>silt loam</i> .	0,38 – 0,76
C	Lempung pasiran (<i>1zsandy clay</i>), lempung lanauan (<i>silty clay</i>), dan lempung geluhan (<i>clay loam</i>)	0,13 – 0,38
D	Lempung (<i>clay</i>)	0,00 – 0,13

Koefisien limpasan diperoleh dengan pendekatan *Curve Number* (CN). Perhitungan CN, pada dasarnya dibangun oleh estimasi hubungan curah hujan-limpasan dengan menyertakan informasi kondisi tanah, tutupan lahan, dan kondisi hidrologi. Tutupan lahan yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari penelitian (Vitriana *et al.*, 2013). Kedua paramester, SCS dan CN, digunakan dalam pemodelan untuk mendefinisikan besarnya model *loss* (kumulatif besaran infiltrasi, *interception*, evaporasi, dan *storage*) dan juga model *transform* (*direct runoff*, DRO atau limpasan). Metode *loss* SCS-CN dalam model diimplementasikan untuk menghitung kumulatif infiltrasi selama presipitasi berlangsung. Pada akhirnya SCS-CN model menghitung *precipitation excess* (PE) sebagai fungsi dari akumulasi presipitasi, infiltrasi, dan *antecedent moisture content* (AMC, kelembaban tanah sebelum presipitasi) (Chow, 1956). Hubungan dari parameter tersebut dapat dilihat berdasarkan persamaan berikut (Feldman, 2000).

$$Pe = \frac{(P-I_a)}{P-I_a+S} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana:

Pe : *Precipitation excess* (mm),

P : Akumulasi curah hujan pada waktu ke t (mm)

Ia : Abstraksi awal (mm) = 0.2 x S (Chow, 1956)

S : Potensi maksimum tanah untuk menahan air.

Potensi maksimum tanah untuk menahan air (S) merupakan fungsi dari CN, sehingga S dapat ditulis seperti persamaan berikut (Feldman, 2000).

$$S = 25400 - \frac{254 \times CN}{CN} \dots\dots\dots (3)$$

Rentang nilai CN maksimal 100 untuk badan air dan 30 untuk tanah yang *permeable* dengan laju infiltrasi yang tinggi. Model transform merujuk pada “transformasi” PE menjadi limpasan. HEC Geo-HMS menyediakan *tools* untuk menghitung limpasan dengan beberapa pendekatan *unit hydrograph* (UH). Pada penelitian ini, metode yang digunakan adalah UH SCS-CN. Model tersebut merupakan model sintetik yang diajukan oleh SCS, sehingga tidak memerlukan analisis histori observasi dengan rentang yang lama. Metode ini menggunakan *time lag* (Tlag) sebagai inputan. *Time lag* didefinisikan sebagai waktu yang dibutuhkan oleh pusat hujan menuju puncak dari hidrograf. *Time lag* dapat dituliskan sebagai berikut.

$$Tlag = 0.6 \times Tc \dots\dots\dots (4)$$

Waktu konsentrasi (Tc) diestimasi berdasarkan karakteristik DASnya, yaitu panjang sungai dan kemiringan DAS (Kirpich, 1940).

$$Tc = 0.0078 \times \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}} \dots\dots\dots (5)$$

Dimana:

L : Panjang sungai (*feet*)

S : kemiringan (*feet/feet*).

Routing Model

Parameter lainnya yang perlu menjadi input dalam model antara lain *routing*, *baseflow*, dan *precipitation*. Ketika limpasan mulai mengalir melalui saluran sungai, kemudian terakumulasi menjadi puncak hidrograf dengan waktu tertentu (*lag time*). Metode *routing* di dalam HEC-HMS dapat menggambarkan aliran tersebut dengan metode *lag time*, yaitu waktu yang dibutuhkan dari PE sampai puncak hidrograf. Pada studi ini perhitungan *lag time* menggunakan formula Kirpich (Kirpich, 1940) dengan mempertimbangan panjang aliran dan kemiringan dasar sungai.

Baseflow Model

Studi ini tidak akan menggunakan model *baseflow*, karena studi ini hanya ingin melihat pengaruh curah hujan terhadap debit banjir berdurasi lama, tanpa memperhitungkan infiltrasi yang akan berubah menjadi *baseflow*.

Presipitasi

Parameterisasi untuk presipitasi menggunakan metode *gage weight*. Metode *gage weight* menerapkan pembobotan dari stasiun curah hujan, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Nilai

pembobotan ini merupakan hasil pembagian poligon untuk stasiun penakar hujan menggunakan metode Thiessen, sehingga didapatkan rasio setiap stasiun hujan untuk seluruh DAS. Ringkasan dari skema parameterisasi yang digunakan dalam mengkonstruksi model DAS dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 3 Skema parameterisasi HEC-HMS

No	Parameter	Metode
1	Loss	SCS-CN
2	Transform	UH SCS-CN
3	Routing	Lag (Kirpich)
4	Baseflow	none
5	Precipitation	Gage Weight

Kalibrasi dan Validasi Model

Kalibrasi adalah suatu cara untuk mengkaji parameter-parameter yang dipakai dalam model dapat diterapkan pada kondisi lapangan atau kondisi yang direncanakan. Kalibrasi model dilakukan dengan cara mengubah nilai CN, sehingga didapatkan keluaran debit simulasi yang mendekati nilai debit observasi. Adapun parameter kalibrasi yang umumnya digunakan dalam model hidrologi adalah *Nash-Sutcliffe efficiency* (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970). Persamaan NSE dapat dilihat sebagai berikut:

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m^t - Q_o^t)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_o^t - \bar{Q}_o)^2} \dots\dots\dots (6)$$

Dimana:

Q_o : Debit observasi (m³/dt)

Q_m : Debit simulasi (m³/dt)

$\bar{Q}_o$: Debit rata-rata observasi (m³/dt).

NSE memiliki rentang dari $-\infty$ sampai dengan 1. Adapun kriteria NSE dapat dilihat seperti Tabel 4 (Motovilov *et al.*, 1999).

Tabel 4 Kriteria NSE

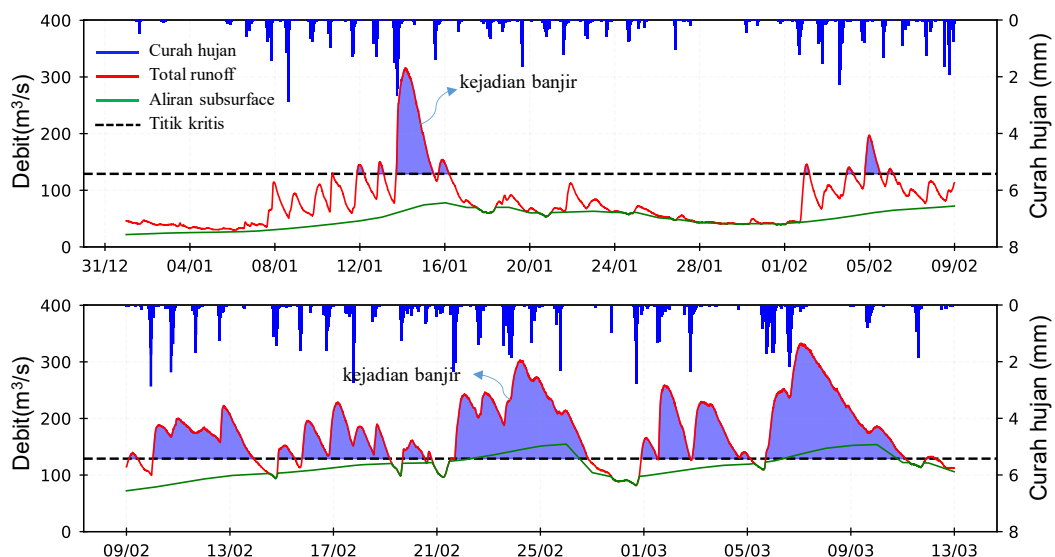
Nilai Nash-sutcliffe efficiency (NSE)	Interpretasi
$NSE > 0.75$	Baik
$0.36 < NSE < 0.75$	Memuaskan
$NSE < 0.36$	Tidak memuaskan

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis dibagi menjadi 2 bagian, yaitu analisis debit dan analisis curah hujan pada saat kejadian banjir Baleendah 2019. Analisis debit dilakukan untuk melihat respon debit terhadap curah hujan yang terjadi, sedangkan analisis curah hujan dilakukan untuk melihat karakteristik hujan seperti volume hujan, pola, durasi hujan, dan waktu terjadinya hujan.

Analisis Debit

Banjir di Baleendah terjadi pada bulan Januari, Februari, dan Maret. Kejadian banjir ini juga didukung oleh laporan dari media sosial dan media massa yang sudah dihimpun sebelumnya. Analisis debit observasi dilakukan dengan memperhatikan curah hujan, limpasan langsung (*direct runoff*), dan durasi banjir. Pada analisis debit observasi, diasumsikan Baleendah akan banjir jika debit berada di atas batas kritis yaitu 129 m³/s, sesuai dengan ambang batas banjir yang ditentukan oleh BBWS Citarum seperti Gambar 2.

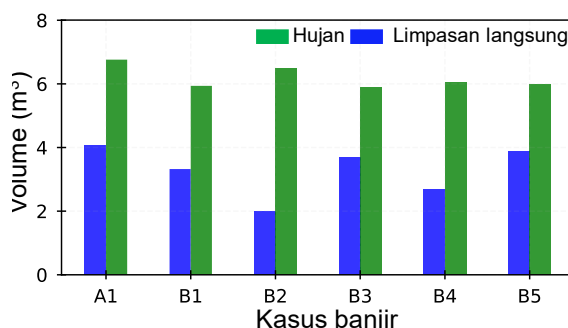


Gambar 2 Plot *total runoff* (garis tegas merah), aliran *subsurface* (garis tegas hijau), curah hujan wilayah (garis tegas biru) serta batas kritis (garis putus-putus biru) pada saat banjir.

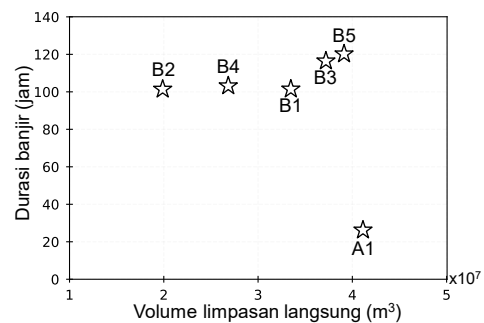
Untuk melakukan analisis debit banjir, kejadian banjir dibagi menjadi 6 kasus. Kasus A1 terjadi pada tanggal 12 - 16 Januari 2019, kasus B1 dari 9 - 13 Februari, kasus B2 dari 14 - 18 Februari, kasus B3 dari 22 - 26 Februari, kasus B4 dari 28 Februari- 4 Maret, dan kasus B5 dari 6 - 10 Maret 2019.

Analisis debit observasi dilakukan dengan membandingkan volume hujan dan volume limpasan pada saat kejadian banjir di Baleendah 2019, seperti yang terlihat pada Gambar 3. Umumnya, volume hujan yang besar akan menyebabkan volume limpasan langsung yang besar seperti kasus A1. Namun pada kasus B4 dan B5 terlihat perbedaan. Volume hujan yang besar tidak selalu memperlihatkan limpasan langsung yang besar. Perbedaan ini menunjukkan bahwa ada mekanisme lain yang menyebabkan besar limpasan langsung suatu kejadian banjir selain faktor volume hujan. Kemudian dilakukan analisis antara volume limpasan langsung dan durasi banjir pada seluruh kasus banjir. Volume limpasan langsung yang besar belum menentukan besarnya durasi banjir yang terjadi seperti ditunjukkan Gambar 4. Dari Gambar 4 terlihat kasus unik, volume limpasan langsung B2 dan B1 yang berbeda menghasilkan durasi banjir yang sama. Selain itu, volume limpasan langsung yang sama antara A1 dan B5 menghasilkan durasi banjir yang sangat berbeda.

Kasus volume yang berbeda tetapi menghasilkan durasi yang sama disebut sebagai kejadian banjir durasi tetap dan kasus volume yang sama tetapi menghasilkan durasi yang berbeda kemudian disebut sebagai kejadian banjir volume tetap. Kasus durasi tetap dan volume tetap akan dianalisis lebih lanjut untuk mendapat gambaran curah hujan yang terjadi pada kasus tersebut.



Gambar 3 Hubungan antara limpasan langsung dan hujan pada saat terjadinya banjir untuk seluruh kasus banjir A1, B1, B2, B3, B4, dan B5



Gambar 4 Hubungan antara durasi banjir dan volume limpasan langsung pada seluruh kasus banjir yaitu kasus A1, B1, B2, B3, B4, dan B5.

Analisis Curah Hujan

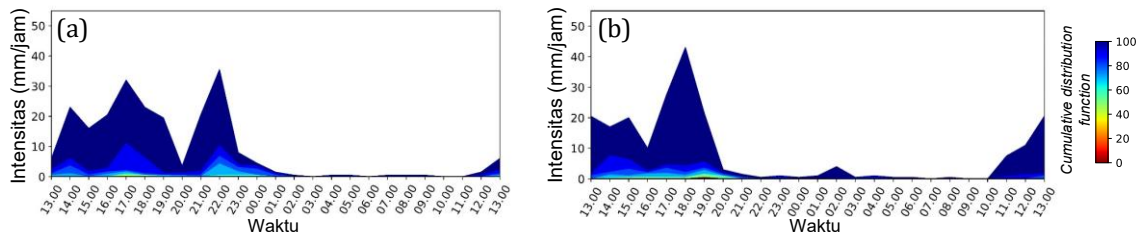
Analisis Kejadian Banjir Durasi Tetap

Analisis curah hujan pada kejadian banjir durasi tetap dilakukan untuk melihat peran pola hujan pada saat kejadian banjir B1 dan B2. Pola hujan ini didapatkan dengan cara melakukan komposit curah hujan setiap waktunya. Curah hujan setiap waktunya akan dihitung probabilitasnya menggunakan *cummulative distribution function* (CDF) untuk melihat probabilitas waktu hujan setiap harinya. Komposit curah hujan kasus B1 menunjukkan beberapa puncak dalam satu hari, hal ini mengidentifikasikan bahwa terdapat perbedaan waktu hujan di stasiun observasi pada saat kejadian banjir.

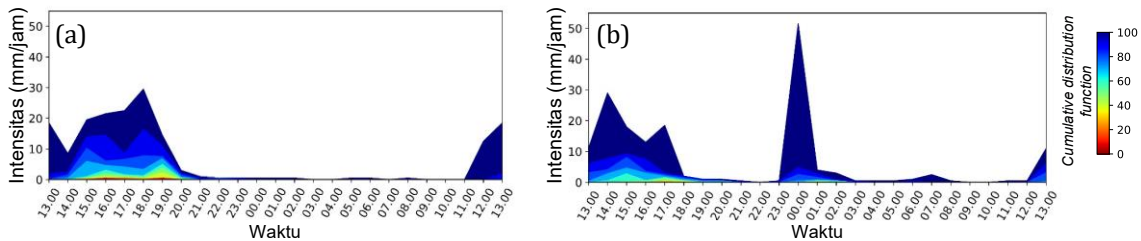
Berdasarkan Gambar 5b, kejadian hujan pada kasus B2 memiliki satu puncak yang terjadi pada pukul 18.00 WIB, hal ini mengidentifikasikan pada kasus B2 terjadi hujan pada waktu yang bersamaan di stasiun observasi. Berdasarkan analisis curah hujan kejadian banjir durasi tetap maka perlu dilakukan simulasi hidrologi yang melibatkan hujan dengan waktu yang berbeda dan hujan dengan waktu yang bersamaan di wilayah Utara, Selatan, dan Timur untuk melihat peran pola hujan tersebut terhadap kejadian banjir berdurasi panjang.

Analisis Kejadian Banjir Volume Tetap

Seperti halnya kejadian banjir durasi tetap, dilakukan analisis pola hujan pada kejadian banjir volume tetap. Kasus banjir A1 memiliki pola diurnal yang memiliki puncak jam 18.00 WIB, sedangkan kasus B5 memiliki pola semidiurnal dengan puncak 14.00 WIB dan 00.00 WIB, seperti yang terlihat pada Gambar 6. Berdasarkan analisis curah hujan kejadian banjir volume tetap, maka perlu dilakukan simulasi hidrologi yang melibatkan hujan dengan pola semidiurnal dan hujan dengan pola diurnal.



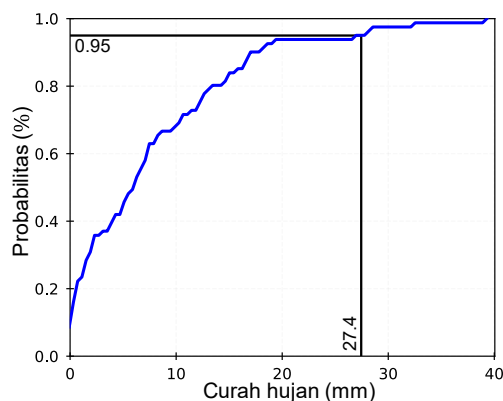
Gambar 5 Data komposit CDF seluruh stasiun selama 5 hari untuk (a) kejadian B1 dan (b) kejadian B2.



Gambar 6 Data komposit CDF seluruh stasiun selama 5 hari untuk (a) kejadian A1 dan (b) kejadian B5

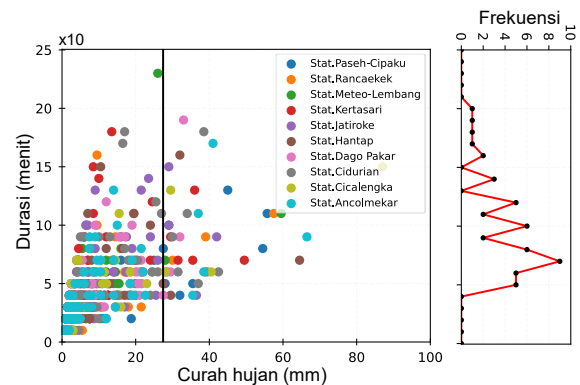
Analisis Curah Hujan Harian dan Kasus Semidiurnal

Pada penjelasan sebelumnya didapatkan hujan diurnal dan hujan semidiurnal. Untuk melakukan simplifikasi dalam penelitian ini, maka dianggap hujan yang terjadi pada saat pola diurnal dan semidiurnal adalah sama. Nilai curah hujan yang digunakan sebagai data masukan dalam model hidrologi HEC-HMS adalah curah hujan ekstrem harian pada tanggal 1 Januari - 31 Maret 2019. Curah hujan ekstrem yang digunakan adalah curah hujan dengan probabilitas > 95%. Berdasarkan Gambar 7, curah hujan untuk probabilitas > 95% adalah 27,4 mm sehingga data masukan curah hujan harian yang akan digunakan dalam model hidrologi untuk pola diurnal adalah 27,4 mm. Untuk kasus semidiurnal, masing-masing hujan pagi dan sore akan bernilai 13,7 mm.



Gambar 7 Plot CDF curah hujan wilayah di wilayah DAS Citarum Hulu selama 1 Januari - 31 Maret 2019

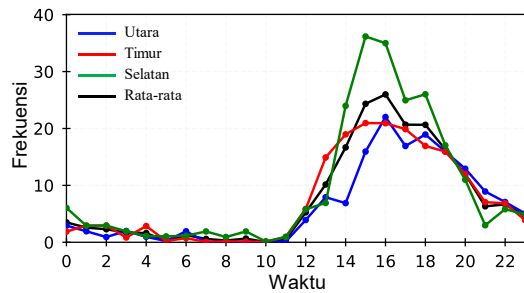
Pada pemodelan hidrologi, dibutuhkan data masukan berupa durasi hujan. Durasi hujan didapatkan dengan melihat frekuensi durasi terbesar pada saat hujan > 27,4 mm. Berdasarkan *scatter plot* durasi hujan dan curah hujan, didapatkan frekuensi terbesar durasi hujan adalah 60 menit, seperti yang terlihat pada Gambar 8. Berdasarkan penjelasan tersebut, maka untuk pola diurnal, curah hujan 27,4 mm akan terjadi dengan durasi 1 jam. Sedangkan untuk pola semidiurnal masing-masing curah hujan 13,7 mm akan terjadi dengan durasi 1 jam.



Gambar 8 (a) Hubungan antara curah hujan (mm) dengan durasi hujan (menit) untuk seluruh kejadian hujan di seluruh stasiun selama 1 Januari- 31 Maret 2019, garis hitam merupakan nilai *percentile* 95 dari curah hujan harian, (b) frekuensi durasi hujan untuk curah hujan diatas *percentile* 95.

Setelah didapatkan curah hujan ekstrem dan durasi hujan, maka selanjutnya perlu dilakukan analisis waktu hujan. Analisis waktu hujan digunakan dengan cara menghitung frekuensi

kejadian hujan diatas 0.1 mm/jam. Berdasarkan Gambar 9, pada umumnya hujan di wilayah Utara, Selatan, dan Timur terjadi pada sore hari.

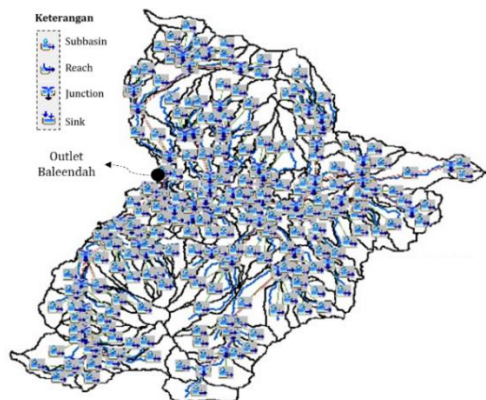


Gambar 9 Waktu terjadinya hujan di seluruh wilayah DAS Citarum Hulu yang bermuara ke Baleendah selama 1 Januari-31 Maret 2019

Kejadian hujan maksimum di wilayah Selatan dan Timur terjadi pada pukul 15.00 WIB, sedangkan wilayah Utara pada pukul 16.00 WIB. Frekuensi rata-rata kejadian hujan untuk ketiga wilayah maksimum pada pukul 16.00 WIB, sedangkan untuk kejadian hujan pagi hari, ketiga wilayah memiliki frekuensi rata-rata yang maksimum pada pukul 00.00 WIB.

Kalibrasi dan Validasi Parameter Model Hidrologi

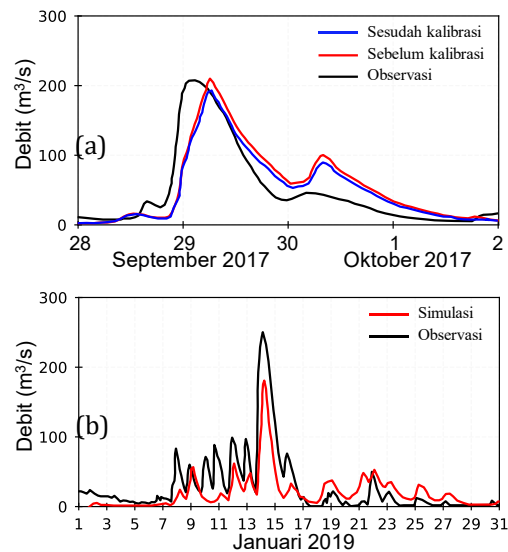
Skematik model HEC-HMS dapat dilihat pada Gambar 10. Sebelum dilakukan simulasi hidrologi menggunakan HEC-HMS, maka model hidrologi perlu dilakukan kalibrasi dan validasi, seperti yang terlihat pada Gambar 11. Kalibrasi model hidrologi dilakukan menggunakan fitur kalibrasi otomatis (*auto calibration*) dengan HEC-HMS. Kalibrasi dilakukan pada tanggal 28 September – 2 Oktober 2017. Nilai debit simulasi menunjukkan pola yang berkesesuaian dengan debit observasi. Namun, terdapat perbedaan pada waktu mencapai puncak debit. Debit simulasi cenderung menunjukkan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan debit observasi.



Gambar 10 Skematik model HEC-HMS DAS Citarum-Baleendah.

Debit simulasi sebelum dan sesudah kalibrasi menunjukkan nilai yang tidak jauh berbeda. Sebelum dilakukan kalibrasi, parameter NSE = 0,71 (memuaskan). Kemudian dilakukan kalibrasi yang menghasilkan *optimized value* 0.853 untuk faktor skala CN. Nilai NSE setelah kalibrasi adalah 0,74 (memuaskan).

Untuk melihat kemampuan parameter hidrologi yang didapatkan, maka dilakukan validasi. Validasi model dilakukan pada tanggal 1 - 31 Januari 2019. Secara umum, pola debit simulasi sudah mendekati debit observasi. Namun, terlihat bahwa debit simulasi memiliki puncak yang lebih rendah dibandingkan dengan debit observasinya. Evaluasi statistik menggunakan parameter NSE menunjukkan nilai 0.573 (memuaskan). Dari hasil kalibrasi dan validasi diatas, maka disimpulkan bahwa parameter model hidrologi sudah dapat digunakan.



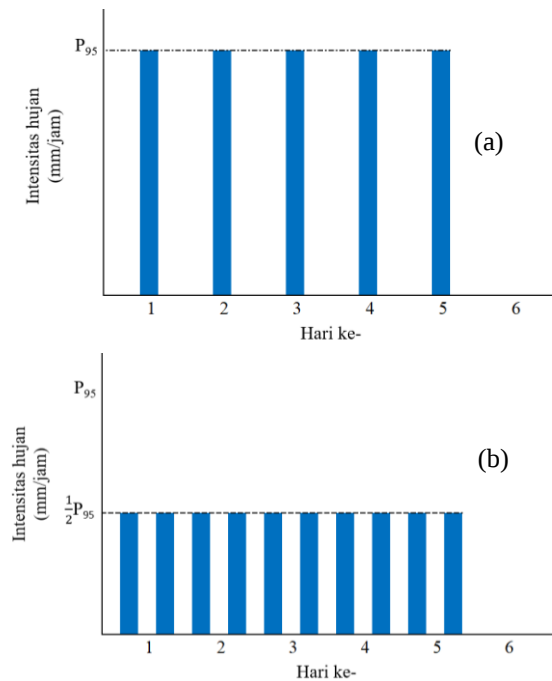
Gambar 11 Kalibrasi dan validasi model hidrologi, (a) kalibrasi model hidrologi untuk kejadian tanggal 28 September-1 Oktober 2017, serta (b) Validasi model hidrologi untuk kejadian tanggal 1 Januari – 31 Januari 2019

Skenario simulasi Hidrologi

Berdasarkan analisis curah hujan untuk kasus banjir durasi tetap dan volume tetap, didapatkan hujan yang terjadi bersamaan, beda waktu, diurnal, dan semidiurnal. Berdasarkan hasil yang didapatkan dari skenario tersebut, kemudian dilakukan analisis debit puncak dan durasi banjir untuk seluruh skenario simulasi.

Berdasarkan 6 kasus banjir Baleendah 2019, Banjir biasanya terjadi dengan durasi 5 hari sehingga simulasi dilakukan dengan membuat skenario hujan yang terjadi selama 5 hari berturut-turut sedangkan hari ke-6 tidak terjadi hujan

sehingga *hidrograph* mengalami penurunan. Adapun ilustrasi skenario simulasi yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 12.



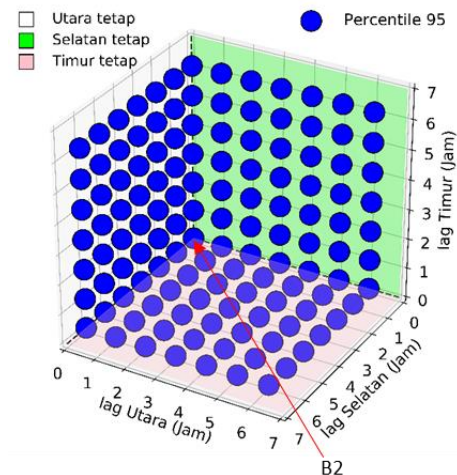
Gambar 12 Ilustrasi waktu hujan (a) skenario diurnal, (b) skenario semidiurnal.

Pola Diurnal Hujan bersamaan dan Hujan Beda Waktu

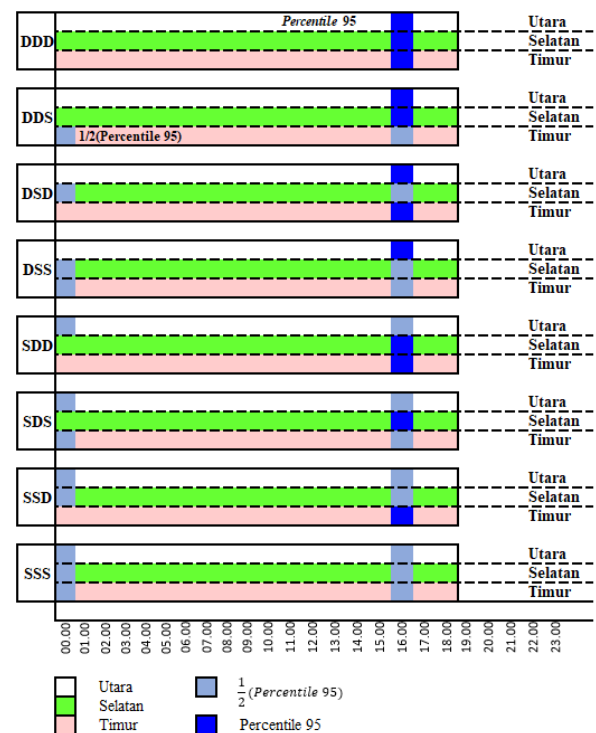
Pola diurnal hujan bersamaan dan hujan beda waktu adalah skenario simulasi yang bertujuan untuk melihat peran spasio-temporal hujan terhadap debit di daerah Baleendah. Simulasi dilakukan dengan cara membuat hujan diurnal yang terjadi bersamaan dan hujan diurnal yang terjadi dengan waktu yang berbeda di wilayah Utara, Selatan, dan Timur. Skenario diurnal hujan bersamaan dan hujan beda waktu dapat dilihat pada Gambar 13.

Pola Variasi Hujan Diurnal dan Semidiurnal

Variasi hujan diurnal dan semidiurnal adalah variasi curah hujan yang mengkombinasikan pola diurnal - diurnal, diurnal - semidiurnal, dan semidiurnal - semidiurnal di wilayah utara, selatan, dan timur DAS Citarum Hulu. Hujan yang digunakan untuk pola diurnal adalah 27,4 mm dengan durasi 1 jam yang terjadi pada pukul 16.00 WIB sedangkan untuk hujan dengan pola semidiurnal, hujan yang digunakan adalah $\frac{1}{2}$ percentile 95 yang bernilai 13,7 mm dengan durasi 1 jam yang terjadi pada pukul 00.00 WIB dan 16.00 WIB, seperti yang terlihat pada Gambar 14.



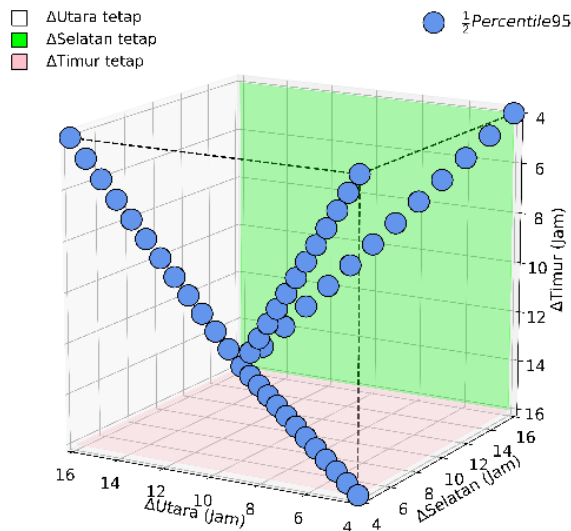
Gambar 13 Simulasi hujan diurnal beda waktu hujan, B2 merupakan hujan bersamaan.



Gambar 14 Simulasi variasi hujan diurnal dan semidiurnal.

Pola Hujan Semidiurnal Mendekat

Pola hujan semidiurnal mendekat adalah skenario yang mensimulasikan hujan dengan pola semidiurnal di seluruh wilayah. Hujan pagi dan sore hari di skenariokan mendekat, sehingga akan diketahui jarak waktu antara hujan pagi dan sore yang menyebabkan banjir berdurasi lebih lama di Baleendah, seperti yang terlihat pada Gambar 15.



Gambar 15 Simulasi hujan dengan skenario semidiurnal mendekat.

Dimana:

Δ utara : Jarak hujan sore dan pagi di wilayah Utara.

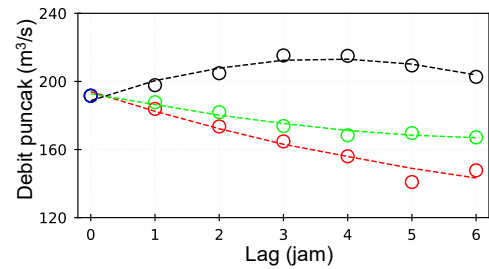
Δ selatan : Jarak hujan sore dan pagi di wilayah Selatan.

Δ timur : Jarak hujan sore dan pagi di wilayah Timur.

Hasil Simulasi Hidrologi

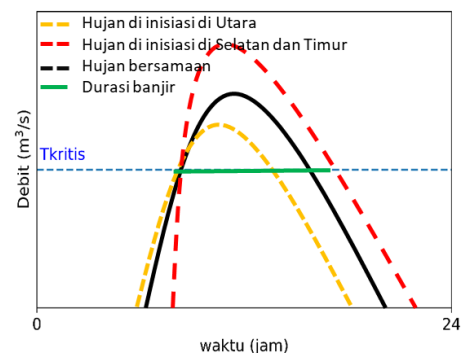
Hasil Debit Simulasi dengan Skenario Hujan bersamaan dan Hujan Beda Waktu

Pada simulasi diurnal hujan bersamaan dan hujan beda waktu dilakukan analisis debit puncak. Jika hujan terjadi bersamaan, debit puncak bernilai 191,30 m³/s. Ketika hujan diawali dan terjadi bersamaan di wilayah selatan dan timur kemudian terjadi jeda kejadian hujan di wilayah utara (lingkaran warna hitam), maka debit puncak yang dihasilkan semakin besar, hal ini dapat menyebabkan durasi banjir semakin lama. Ketika hujan diawali dan terjadi bersamaan di wilayah timur dan utara sedangkan terjadi jeda kejadian hujan di wilayah selatan (lingkaran warna hijau) maka debit puncak yang dihasilkan semakin kecil. Ketika hujan diawali dan terjadi bersamaan di wilayah utara dan selatan sedangkan terjadi jeda kejadian hujan di wilayah timur (warna merah) maka debit puncaknya akan semakin kecil dan menghasilkan perubahan debit puncak yang lebih besar bila dibandingkan dengan simulasi hujan yang diawali dan terjadi bersamaan di utara dan timur, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 16.



Gambar 16 Debit simulasi untuk skenario wilayah Utara berubah (lingkaran hitam), wilayah Selatan berubah (lingkaran hijau), wilayah Timur berubah (lingkaran merah), serta simulasi kontrol (lingkaran biru).

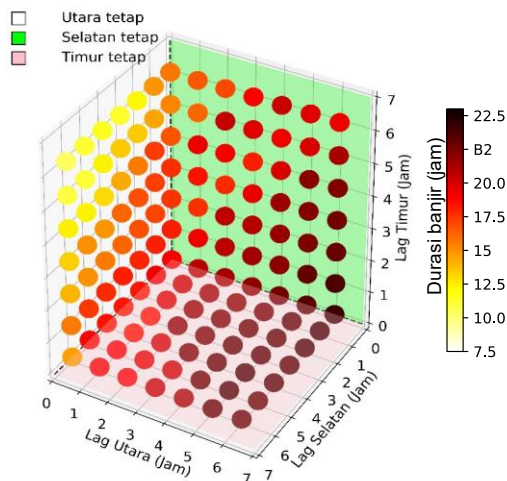
Berdasarkan penjelasan tersebut, maka perubahan debit puncak dapat diilustrasikan seperti Gambar 17.



Gambar 17 Ilustrasi hubungan antara inisiasi hujan dan beda waktu hujan terhadap debit puncak dan durasi banjir.

Berdasarkan ilustrasi Gambar 17, hujan yang diawali dan terjadi bersamaan di wilayah selatan dan timur sedangkan terjadi jeda waktu kejadian hujan di utara akan menghasilkan debit puncak yang paling maksimum bila dibandingkan skenario hujan lainnya. Sedangkan akan menghasilkan debit puncak yang paling minimum ketika hujan diawali dan terjadi bersamaan di wilayah utara dan selatan sedangkan terdapat jeda kejadian hujan di wilayah timur semakin besar.

Skenario hujan yang berbeda akan menghasilkan debit puncak yang berbeda, akibatnya durasi banjir yang dihasilkan juga berbeda. Durasi banjir (ditunjukkan oleh perbedaan gradasi warna pada Gambar 18) akan minimum jika hujan diawali di wilayah utara sedangkan jeda hujan di wilayah selatan dan timur semakin besar (6 jam). Sementara itu, durasi banjir maksimum apabila hujan diinisiasi di wilayah selatan dan timur sedangkan jeda waktu kejadian hujan wilayah utara semakin besar (6 jam).



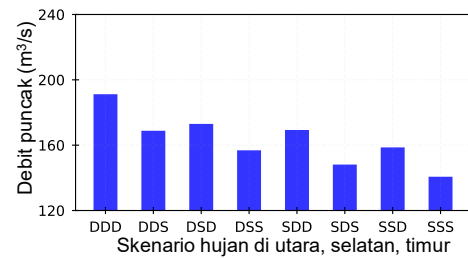
Gambar 18 Durasi banjir simulasi untuk skenario hujan beda waktu. B1, B4 serta A1 merupakan kasus yang terjadi pada banjir Baleendah 2019, serta B2 merupakan simulasi kontrol

Hal ini mungkin disebabkan oleh kemiringan di wilayah timur yang lebih landai bila dibandingkan dengan wilayah utara serta sungai di wilayah selatan yang lebih panjang dibandingkan wilayah utara. Hal menyebabkan waktu konsentrasi dan waktu puncak debit di wilayah timur dan selatan cenderung lebih lama dibandingkan wilayah utara, sehingga superposisi debit yang dihasilkan ketika hujan terjadi bersamaan di wilayah selatan dan timur sedangkan jeda kejadian hujan di wilayah utara semakin besar bila dibandingkan dengan skenario lainnya.

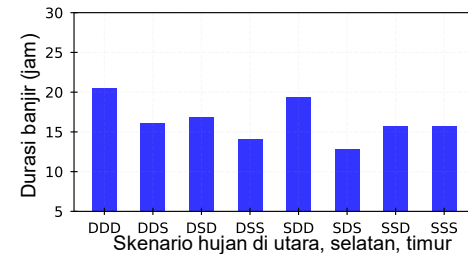
Hasil Debit Simulasi dengan Skenario Hujan Diurnal dan Semidiurnal

Variasi hujan diurnal dan semidiurnal di wilayah utara, selatan, dan timur menghasilkan debit puncak yang berbeda. Debit puncak bernilai maksimum jika seluruh wilayah utara, selatan dan timur mengalami hujan dengan pola diurnal (DDD), dan mencapai minimum jika wilayah utara, selatan dan timur mengalami hujan dengan pola semidiurnal (SSS), seperti yang terlihat pada Gambar 19.

Debit puncak yang bervariasi menyebabkan durasi banjirnya juga bervariasi. Durasi banjir akan semakin lama bila disebabkan oleh pola diurnal di wilayah utara, selatan, dan timur (DDD). Banjir berdurasi pendek disebabkan oleh hujan dengan pola semidiurnal di utara, diurnal di wilayah selatan, dan semidiurnal di wilayah timur (SDS), seperti yang terlihat pada Gambar 20.



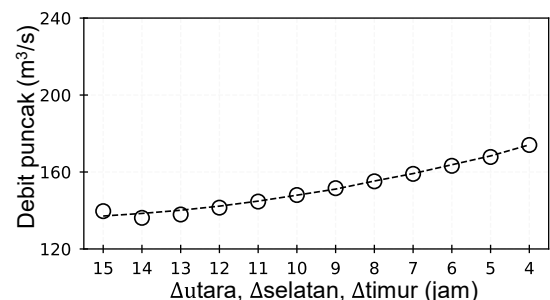
Gambar 19 Debit puncak untuk skenario hujan dengan variasi diurnal dan semidiurnal.



Gambar 20 Durasi banjir simulasi untuk skenario hujan dengan variasi diurnal dan semidiurnal.

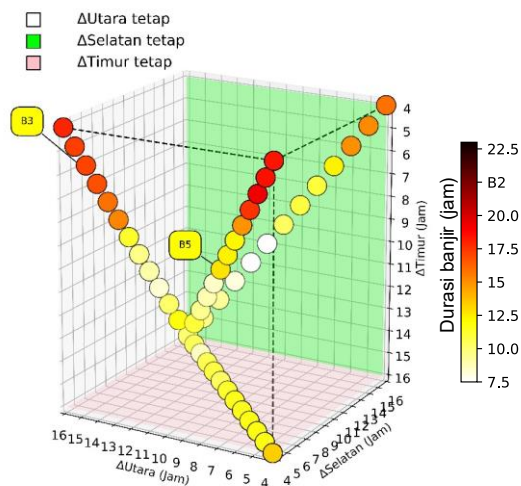
Hasil Debit Simulasi dengan Skenario Semidiurnal Mendekat

Variasi jarak antara hujan pagi dan hujan sore pada pola semidiurnal akan menghasilkan debit puncak yang berbeda. Simulasi dilakukan dengan cara mendekatkan waktu kejadian hujan pagi dan hujan pada sore hari. Jarak antara hujan pagi dan hujan sore yang semakin dekat pada umumnya akan menghasilkan debit puncak yang semakin besar, seperti Gambar 21.



Gambar 21 Hubungan antara debit puncak dengan simulasi semidiurnal mendekat

Debit puncak yang berbeda akan menghasilkan durasi banjir yang berbeda pula. Durasi banjir akan semakin besar ketika jeda waktu antara hujan pagi dan hujan sore semakin kecil. Berdasarkan hasil simulasi, durasi banjir terpendek sekitar 7,5 jam sedangkan durasi banjir terpanjang sekitar 25 jam, seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 22.



Gambar 22 Durasi banjir simulasi untuk skenario semidiurnal mendekat. B3 dan B5 merupakan kasus yang terjadi pada banjir Baleendah 2019.

KESIMPULAN

Pola spasio-temporal curah hujan sangat mempengaruhi durasi banjir di wilayah Baleendah. Pola hujan yang terjadi pada saat kejadian banjir adalah pola diurnal, pola semidiurnal, dan pola diurnal-semidiurnal. Pola curah hujan ini dapat terjadi secara bersamaan maupun terjadi pada waktu yang berbeda di seluruh wilayah. Variasi dari hujan ini akan menghasilkan durasi banjir yang berbeda pula. Berdasarkan hasil dari simulasi hidrologi dengan memvariasikan pola spasio-temporal curah hujan, dapat disimpulkan bahwa durasi banjir akan semakin panjang apabila terjadi hujan diurnal yang diinisiasi di wilayah selatan dan timur serta terjadi jeda kejadian hujan di wilayah utara. Kemudian, hujan diurnal menghasilkan durasi banjir yang lebih lama dibandingkan hujan semidiurnal maupun kombinasinya (diurnal - semidiurnal). Apabila menggunakan skenario hujan semidiurnal untuk seluruh wilayah, durasi banjir akan semakin panjang apabila selang waktu hujan pagi dan hujan sore semakin kecil.

Investigasi lebih lanjut dibutuhkan untuk melihat pengaruh pola spasio-temporal curah hujan dengan kedalaman dan luasan banjir di Baleendah.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada program PPMI ITB tahun 2021 yang telah memberikan dana penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- Chow, W. (1956). Hydrologic Studies of Floods in the United State. *International Association of Scientific Hydrology*, 42, 137–170.
- Cronshey, R. G., Roberts, R. T., & Miller, N. (1986). *Urban Hydrology for Small Watersheds*.
- Dewa Gede A Junnaedhi, I., Riawan, E., Suwarman, R., Wahyu Hadi, T., Lubis, A., Joko Trilaksono, N., Rahayu, R., Kombara, P., Waskito, R., Ekalaya Oktora, H., Supriatna, R., Anugrah, A., Haq Mudzakkir, A., and Setiawan, W. (2017). Majalaya Flood Early Warning System: A Community Based Approach. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 71(1), 012013. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/71/1/012013>
- Feldman, A. (2000). *Hydrologic Modelling System HEC-HMS. Hydrologic Modelling System HEC-HMS Technical Reference Manual*.
- Fitriani, R., Trilaksono, N. J., and Hadi, T. W. (2019). Investigation of the regeneration of precipitating convective cloud in basin topography area. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 303(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/303/1/012015>
- Harmadianto, C. B. T., Suwarman, R., Riawan, E., Nugraha, P., and Simanjuntak, Y. S. M. (2020). Study of regional regulation on “Kawasan Bandung Utara” impact on flood discharges from the perspective of spatial variations of extreme precipitation in Bandung basin. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 592(1), 012016. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/592/1/012016>
- Hirabayashi, Y., Mahendran, R., Koirala, S., Konoshima, L., Yamazaki, D., Watanabe, S., Kim, H., and Kanae, S. (2013). Global flood risk under climate change. *Nature Climate Change*, 3(9), 816–821. <https://doi.org/10.1038/nclimate1911>
- Japan International Cooperation Agency. (2010). *The Preparatory Survey for Upper Citarum Basin Tributaries Flood Management Project in Indonesia Final Report Summary*.
- Kirpich, Z. P. (1940). Time of contraction of small agricultural watershed. *Civil Engineering*, 10, 362–368.
- Motovilov, Y. G., Gottschalk, L., Engeland, K., and Rodhe, A. (1999). *Validation of a distributed hydrological model against spatial observations*.

- Nash, J. E., and Sutcliffe, J. v. (1970). River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I-A Discussion of Principles*. In *Journal of Hydrology* (Vol. 10). © North-Holland Publishing Co.
- Oigawa, M., Matsuda, T., Tsuda, T., and Noersomadi. (2017). Coordinated observation and numerical study on a diurnal cycle of tropical convection over a complex topography in West Java, Indonesia. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, 95(4), 261–281. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-015>
- Pilgram, D., and Cordery, I. (1993). *Chapter 9: Flood runoff in D.R Maidment (Ed.) Handbook of hydrology*. McGraw-Hill.
- Rahayu, R., Mathias, S. A., Reaney, S., Vesuviano, G., Suwarman, R., and Ramdhan, A. M. (2022). Impact of land cover, rainfall and topography on flood risk in West Java. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05737-6>
- Riawan, E., Hadi, T. W., Kardhana, H., Mihardja, D. K., and Sapiie, B. (2018). The Diurnal and Semidiurnal Patterns of Rainfall and its Correlation to the Stream Flow Characteristic in the Ciliwung Watershed, West Java, Indonesia. *MATEC Web of Conferences*, 147. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814703013>
- Sherman, L. K. (1932). Streamflow from Rainfall by Unit-Graph Method. *Engineering News-Recod*, 108, 501–505.
- Skaggs, R. W., and Khaleel, R. (1982). Infiltration, hydrology modelling of small watershed. *American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI*.
- Soil Conservation Service (SCS). (1972). *National Engineering Handnook, Section 4: Hydrology: Vol. 762 p*. Departemen of Agriculture, Washington DC.
- Sy, B., Frischknecht, C., Dao, H., Consuegra, D., and Giuliani, G. (2020). Reconstituting past flood events: the contribution of citizen science. *Hydrology and Earth System Sciences*, 24(1), 61–74. <https://doi.org/10.5194/hess-24-61-2020>
- Symeonakis, E., and Drake, N. (2010). 10-Daily soil erosion modelling over sub-Saharan Africa. *Environmental Monitoring and Assessment*, 161(1–4), 369–387. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0754-7>
- Tabari, H. (2020). Climate change impact on flood and extreme precipitation increases with water availability. *Scientific Reports*, 10(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-70816-2>
- Try, S., Sayama, T., Oeurng, C., Sok, T., Ly, S., and Uk, S. (2022). Identification of the spatio-temporal and fluvial-pluvial sources of flood inundation in the Lower Mekong Basin. *Geoscience Letters*, 9(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40562-022-00215-0>
- Vitriana, R., Deliar, A., and Taufik, M. (2013). Model of Land Cover Change Prediction Using Combination of Binary Logistic Regression (BLR) and Cellular AutomataMarkov Chain (CA-MC) Based on Accessibility (Case Study: West Java). *34th Asian Conference on Remote Sensing 2013, ARCS 2013*, 2, 1820–1827.
- Wu, P., Hara, M., Fudeyasu, H., Yamanaka, M. D., Matsumoto, J., Syamsudin, F., Sulistyowati, R., and Djajadihardja, Y. S. (2007). The impact of trans-equatorial monsoon flow on the formation of repeated torrential rains over java Island. *Scientific Online Letters on the Atmosphere*, 3, 93–96. <https://doi.org/10.2151/sola.2007-024>
- Yamamoto, K., Sayama, T., and Apip. (2021). Impact of climate change on flood inundation in a tropical river basin in Indonesia. *Progress in Earth and Planetary Science*, 8(1), 5. <https://doi.org/10.1186/s40645-020-00386-4>
- Yulianto, F., Sofan, P., Zubaidah, A., Sukowati, K. A. D., Pasaribu, J. M., and Khomarudin, M. R. (2015). Detecting areas affected by flood using multi-temporal ALOS PALSAR remotely sensed data in Karawang, West Java, Indonesia. *Natural Hazards*, 77(2), 959–985. <https://doi.org/10.1007/s11069-015-1633-x>