

STUDI KARAKTERISTIK HIDROLOGI SUB DAERAH ALIRAN SUNGAI (DAS) JIRAK MENGUNAKAN *TIME SERIES ANALYSIS*

*(Hydrological Characteristics Study of Jirak Sub Watershed
Using Time Series Analysis)*

Bayu Argadyanto Prabawa¹

¹ Program Studi Perencanaan Wilayah Kota, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas
Teknologi Yogyakarta, Indonesia

*Jl. Ring Road Utara, Jombor Lor, Sendangadi, Kec. Mlati, Kabupaten Sleman, Daerah
Istimewa Yogyakarta 55285*

Email: bayu.prabawa@staff.uty.ac.id

Diterima: 1 November 2019; Direvisi: 26 Maret 2020; Disetujui: 30 Maret 2020

ABSTRACT

Jirak Sub Watershed is one of the resurgence river in Gunungkidul. This river flow into Kalisuci Cave, and becomes an underground river. This underground river is used for tourism activities known as CaveTubing. The main problem of this tourism activities is frequent flood events. This flood comes from input discharge originating from Jirak River as the upstream of Kalisuci Cave. This research aim is to determine the hydrological characteristics of Jirak Sub Watershed in Kalisuci Cave Tourism area with the hope in increasing the understanding of the tourism operators regarding regulation of the flood early warning and evacuation systems. Hydrological characteristics were determined from the discharge rating curve, time lag (Tlag) and effective rainfall (Pe) calculation. The result of this research shows that the time lag between the rain occurrence and early flood occurrence at Jirak Sub Watershed ranged from 2,5 to 3 hours. Fast response of peak discharge indicates that Jirak Sub Watershed has a fast response drainage system to rainfall in rainy season. The effective rainfall percentage was determined from the 17 selected flood hydrograph which the value increased from the early phase until the end of rainy season. This hydrological characteristic of Jirak Sub Watershed can be used by Kalisuci Cave tourism management team as flood early warning and evacuation system.

Keywords: *flood; hydrological characteristic; time lag; effective rainfall*

ABSTRAK

Sub Daerah Aliran Sungai (DAS) Jirak adalah salah satu aliran sungai yang muncul kembali di Gunungkidul. Aliran sungai mengalir ke dalam. Gua Kalisuci, dan menjadi sungai bawah tanah. Sungai bawah tanah ini digunakan untuk kegiatan pariwisata yang dikenal sebagai *Cave Tubing*. Masalah utama dari kegiatan pariwisata ini adalah terjadinya banjir. Banjir ini berasal dari debit yang berasal dari Sungai Jirak sebagai hulu dari Gua Kalisuci. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik hidrologis Sub DAS Jirak di lokasi Wisata Gua Kalisuci dengan harapan akan menambah pemahaman pengelola wisata Gua Kalisuci terkait pengaturan sistem peringatan dini dan sistem evakuasi ketika terjadi banjir. Karakteristik

hidrologi ditentukan dari *rating curve*, jeda waktu (Tlag) dan perhitungan curah hujan efektif (Pe). Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jeda waktu antara kejadian hujan dan kejadian banjir awal di Sub DAS Jirak berkisar antara 2,5 hingga 3 jam. Respon debit puncak yang cepat mengindikasikan bahwa Sub DAS Jirak memiliki sistem drainase yang cepat merespon hujan di musim hujan. Persentase curah hujan efektif ditentukan dari 17 hidrograf banjir terpilih yang nilainya meningkat dari fase awal hingga akhir musim hujan. Karakteristik hidrologi Sub DAS Jirak ini dapat digunakan oleh tim manajemen pariwisata Gua Kalisuci sebagai peringatan dini dan untuk evakuasi ketika banjir terjadi.

Kata kunci: banjir; karakteristik hidrologi; jeda waktu; hujan efektif

I. PENDAHULUAN

Kawasan karst Gunungsewu membentang dari Kabupaten Gunungkidul, Provinsi DIY (Daerah Istimewa Yogyakarta) hingga Kabupaten Pacitan, Provinsi Jawa Timur. Kawasan karst Gunungsewu telah diusulkan kepada UNESCO sebagai salah satu kawasan *geopark* yang tergabung dalam *Global Geopark Network*. Hal ini menjadikan kawasan karst Gunungsewu merupakan kawasan yang harus dilindungi kelestarian alamnya. Salah satu kekayaan kawasan karst Gunungsewu adalah kekayaan gua-gua karstnya yang sangat melimpah. Salah satu potensi yang dapat dikembangkan dari gua-gua karst adalah potensi wisata, baik itu ekowisata maupun wisata minat khusus (Goldscheider, 2012). Eksplorasi gua-gua karst Gunungsewu yang dilakukan oleh Macdonald & Patners (1984) telah menemukan kurang lebih 58 gua dan luweg di kawasan karst Gunungsewu pada Kabupaten Gunungkidul, dan masih banyak lagi gua-gua yang belum terpetakan.

Topografi karst hampir tidak memiliki aliran sungai permukaan. Topografi karst salah satunya dicirikan oleh pola aliran *multi basinal* yang ditunjukkan oleh cekungan-cekungan tertutup (*doline*)

diantara bukit-bukit karst serta adanya *sinking stream* (Bailly-Comte, Martin, Jourde, Sreaton, Pistre, Langston, 2010; Ford & Williams, 2013). Sistem drainase karst dimulai dari pengisian zona-zona rekahan pada batuan karbonat yang akan diteruskan ke zona jenuh air dalam sungai bawah tanah (White, 1988). Drainase karst berdasarkan sumber daerah tangkapannya dibagi menjadi dua tipe, yaitu karst allogenik dan autogenik. Karst allogenik merupakan karst yang memiliki daerah tangkapan yang berasal dari kawasan non-karst, sedangkan karst autogenik memiliki daerah tangkapan yang berasal dari kawasan karst itu sendiri (Ford & Williams, 2013).

Gillieson (2009) menyebutkan sistem drainase pada akuifer karst terbagi menjadi 3 sifat aliran, yaitu aliran *diffuse*, aliran *fissure*, dan aliran konduit. Aliran *diffuse* memiliki respon yang lambat terhadap aliran masukan dan merupakan karakteristik dari rembesan dan tetesan air dari atap gua (Putro, 2012). Sistem aliran *fissure* yaitu aliran yang berupa retakan dengan lebar kurang dari 10 mm, yang dikontrol oleh perlapisan batuan (Gillieson, 2009). Aliran utama dalam sistem hidrologi karst adalah aliran konduit yang memiliki sifat aliran turbulen yang memiliki respon cepat terhadap

masukannya (Dewaide, Banniver, Rochez, & Hallet, 2016; Reh, Liche, Geyer, Nödler, & Sauter, 2013). Aliran kondukt terbentuk pada gabungan antara rekahan atau bidang perlapisan batuan yang melebar karena proses pelarutan yang membentuk lorong-lorong yang memiliki lebar hingga beberapa meter (Hartmann, Goldscheider, Wagmer, Lange, & Weiler, 2015; White, 1988).

Keberadaan tipe aliran kondukt menunjukkan tingkat perkembangan karst yang telah berkembang lanjut akibat proses solusional yang berkembang, sedangkan tipe aliran *diffuse* menunjukkan bahwa kawasan karst tersebut kurang mengalami perkembangan (Panagopoulos & Lambrakis, 2006). Sistem hidrologi karst pada umumnya tidak hanya terbentuk dari salah satu tipe aliran saja, baik *diffuse* maupun kondukt, namun kebanyakan merupakan campuran dari tipe-tipe aliran tersebut (White, 1988).

Wisata *Cave Tubing* di Gua Kalisuci merupakan salah satu wisata andalan di Kabupaten Gunungkidul. Wisata *Cave Tubing* ini memanfaatkan aliran sungai bawah tanah yang merupakan tipe aliran kondukt yang berasal dari aliran sungai permukaan dari Sub DAS Jirak yang masuk ke dalam sistem sungai bawah tanah Gua Kalisuci. Kawasan wisata karst ini berada di Kecamatan Semanu, Kabupaten Gunungkidul, Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta.

Kegiatan wisata yang dilakukan dalam gua dapat berdampak terhadap perubahan kondisi hidrologi gua tersebut. Oleh karena itu, wisata minat khusus

untuk gua memiliki beberapa persyaratan dalam pengelolaannya, antara lain adanya kajian tingkat kesulitan dan bahaya gua, kemampuan operator wisata gua dan peralatan penelusuran, peta gua, peringatan kepada operator untuk selalu menaati kode etik penelusuran gua, kejelasan sistem perijinan oleh SAR dan instansi terkait, dan pengecekan berkala tingkat kerusakan dan pencemaran gua (Samodra, 2001). Permasalahan dalam pengelolaan wisata Gua Kalisuci adalah kurangnya pemahaman pengelola wisata terhadap sistem hidrologi sungai bawah tanahnya. Permasalahan sistem hidrologi pada aliran Gua Kalisuci adalah kejadian banjir yang sering terjadi pada Sub DAS Jirak yang merupakan hulu sungai bawah tanah Kalisuci. Kejadian banjir di sungai Jirak ini tentu akan mengganggu kegiatan wisata di Gua Kalisuci, karena sungai bawah tanah yang meluap tidak dapat digunakan untuk penelusuran wisata gua. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik hidrologis Sub DAS Jirak di Wisata Gua Kalisuci, dengan harapan akan menambah pemahaman pengelola wisata Gua Kalisuci terkait pengaturan sistem peringatan dini dan sistem evakuasi ketika terjadi banjir.

II. BAHAN DAN METODE

A. Waktu dan Lokasi

Sub DAS Jirak merupakan sistem DAS yang aliran hulunya berasal dari perbukitan karst Gunungsewu serta dataran *fluvio-karst* Ponjong yang berada di sisi timur laut outlet sungai. Selain itu, batas Sub DAS Jirak di sisi utara dibatasi oleh sistem aliran irigasi persawahan di Kecamatan Ponjong. Sungai Jirak yang

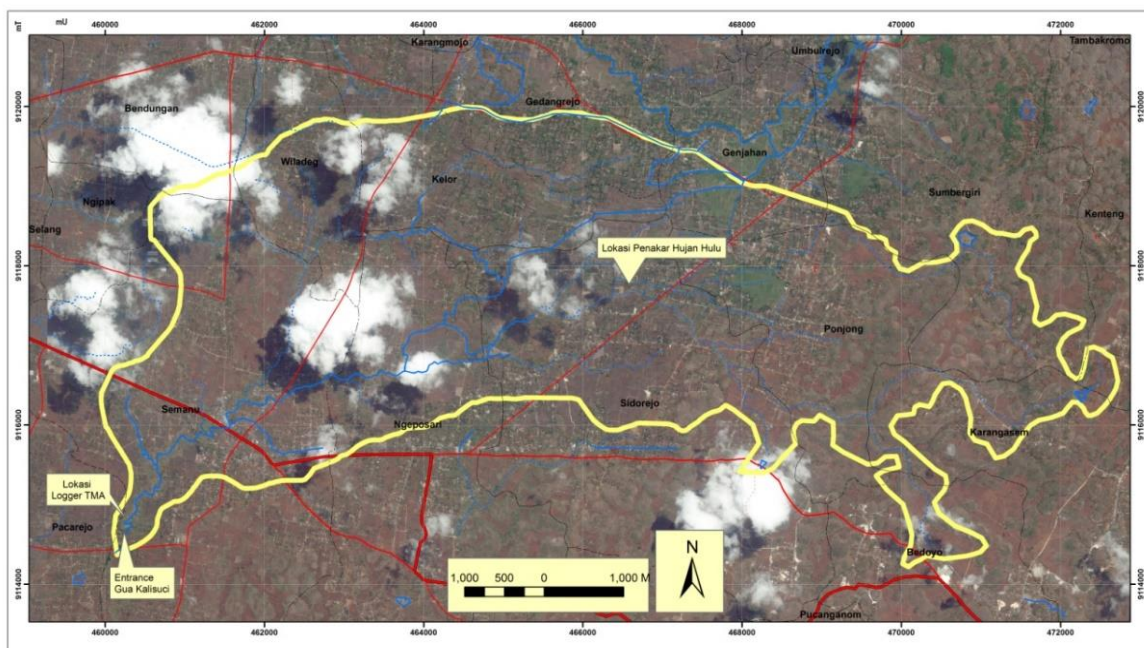
merupakan hulu sungai bawah tanah Kalisuci memiliki aliran air yang cukup turbulen, sehingga memerlukan kecermatan pemilihan lokasi stasiun pencatat tinggi muka air (*water level data logger*). Lokasi yang dipilih tepat pada utara bendungan terakhir di Sungai Jirak yang berjarak ± 100 meter dari tempat masuk Gua Kalisuci. Selain stasiun pencatat tinggi muka air (TMA), dipasang penakar hujan merekam data hujan yang jatuh di hulu dan hilir dari Sub DAS Jirak. Penakar hujan di hulu diletakkan di Desa Sidorejo, Kecamatan Ponjong. Pencatatan data hujan dan TMA sungai dilakukan mulai bulan Juni 2015 sampai dengan Juni 2016. Peta lokasi pemasangan alat

pemantauan hujan dan muka air sungai ditunjukkan dalam Gambar 1.

B. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Peta RBI digital skala 1:25.000 Lembar Karangmojo dan Semanu sheet 1408-312 dan 1408-321) tahun 1998 dan 1999 (BAKOSURTANAL), untuk data dasar pada peta tentatif.
- b. Peta Gua Kalisuci Gunungsewu Cave Survey 1982 (MacDonalds & Patners, 1984), sebagai acuan lokasi pemasangan alat pengamatan.
- b. Pustaka penelitian sebelumnya, sebagai referensi pendukung penelitian.



Gambar (Figure) 1. Peta lokasi pemasangan alat penakar hujan di hulu dan alat pencatat tinggi muka air Sub DAS Jirak (*Map of the location of rainfall gauge in the upstream and water level data logger installed in Jirak Sub Watershed*).

Sumber (Source): Google Earth yang dianalisis (*Analyzed of Google Earth*), 2019

Alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- GPS (*Global Positioning System*), untuk *plotting* lokasi penelitian.
- Penakar hujan otomatis (*data logging rain gauge*) tipe RG3, sebagai pencatat data hujan.
- HOBOWater Level Data Logger, sebagai pencatat TMA sungai bawah tanah gua.
- Seperangkat peralatan fotografi, sebagai alat dokumentasi lapangan.
- Perangkat lunak (*Microsoft Office Word, Microsoft Office Excel, dan ArcGIS 10.2, SPSS 17, Compass, Corel Draw X5, dan HOBOWare PRO*), sebagai alat pendukung pengolahan data lapangan dan penulisan laporan.

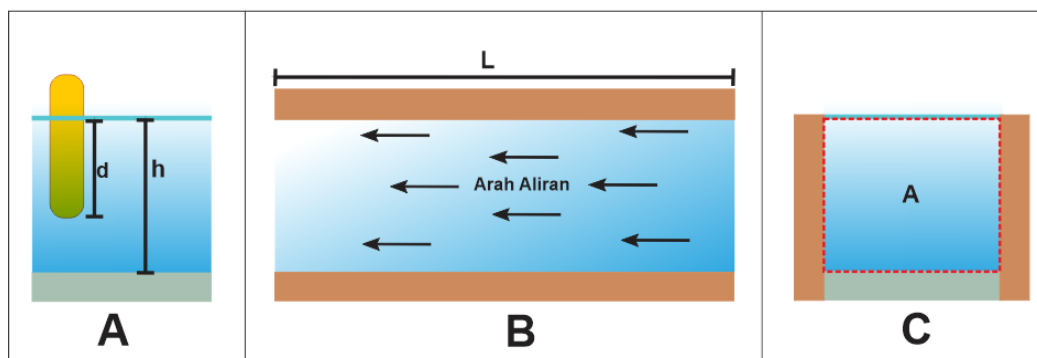
C. Metode Penelitian

Pengukuran debit air sungai bawah tanah dilakukan secara *systematic sampling* pada *outlet* sungai yaitu pada *entrance* Gua Kalisuci bagian hilir Sub DAS Jirak yang digunakan sebagai lokasi awal

jalur penelusuran wisata. Data TMA direkam dengan interval waktu ± 30 menit. Pengukuran debit langsung di lapangan juga dilakukan sebagai acuan untuk melakukan konversi data TMA dari *logger* menjadi data debit air. Pengukuran di lapangan menggunakan metode *velocity area method* dengan media pelampung. Ilustrasi pengukuran metode *velocity area method* ditunjukkan oleh Gambar 2.

Data curah hujan didapatkan melalui pemasangan stasiun penakar hujan otomatis tipe RG3 yang berada di hulu Sub DAS Jirak. Data curah hujan diambil secara temporal selama 1 tahun dengan interval waktu ± 30 menit.

Analisis karakteristik banjir dilakukan untuk mengetahui waktu jeda kenaikan TMA sungai (*Tag*) mencapai bagian hilir DAS dan jumlah kejadian banjir selama penelitian. Perhitungan *Tag* dilakukan de-



Gambar (Figure) 2. Ilustrasi (A) penampang melintang pelampung untuk perhitungan koefisien pelampung, (B) lintasan penampang, dan (C) luas penampang basah (Illustration of (A) cross section of floating object for floating method coefficient calculation, (B) transverse trajectory, and (C) wet perimeter area)

Sumber (Source): Analisis data (*Data Analysis*), 2019

ngan metode statistik analisis deret waktu (*time series analysis*) (Zhang, Chen, Shi, & Chen, 2013; Nurkholis, Adji, & Haryono, 2019). Analisis deret waktu ini dipilih karena dapat digunakan untuk mengetahui lama respon debit sungai terhadap kejadian hujan di hulu DAS. Metode yang digunakan dalam analisis deret waktu ini adalah metode *cross-correlation*.

1. Lengkung Aliran Debit Sungai

Data TMA yang didapatkan dari *logger* pencatat yang terpasang di sungai dikonversi menjadi data debit aliran setelah dilakukan perhitungan lengkung debit aliran (*stage-discharge rating curve*). Persamaan *rating curve* menggunakan persamaan regresi adalah sebagai berikut: **Q = f x TMA.....(1)**

Keterangan:

- Q = debit aliran (m³/s)
- f = fungsi regresi linier TMA dengan debit aliran
- TMA = tinggi muka air sungai

Perhitungan regresi ini perlu memperhatikan nilai koefisien determinasi (R²) untuk mengetahui perbedaan varian dari data pengukuran variabel Y pada garis regresi nilai persamaan variabel X (Soewarno, 1991).

2. Korelasi Dua Variabel (Hujan dan Debit Aliran)

Analisis ini digunakan untuk mengetahui hubungan antara hujan di hulu sungai Kalisuci pada Sub DAS Jirak dan debit aliran rata-rata Sungai Kalisuci, sehingga dapat diketahui gambaran awal arah korelasi kedua variabel tersebut. Korelasi antara dua variabel terjadi apabila nilai probabilitas dari hasil

perhitungan kurang dari 0,05 dan nilai korelasi harus lebih besar dibanding taraf signifikansi 5%.

3. Analisis Deret Waktu dengan *Cross-Correlation*

Analisis deret waktu biasa digunakan untuk mengetahui hubungan linier antara *input* dan *output* dalam kajian hidrologi. Kajian hidrologi karst biasanya menggunakan metode ini untuk mengetahui respon debit mata air terhadap hujan (Zhang et al. 2013). Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah korelasi silang (*cross-correlation*). Persyaratan data dalam melakukan analisis korelasi silang ini adalah seri data harus memiliki interval waktu yang sama dan diasumsikan stasioner dalam nilai *mean* dan *varians* (Cowpewartait dan Metcalfe, 2009 dalam Thomas, 2010).

Hubungan antara dua variabel dapat didefinisikan dengan rumus:

$$r_{xy}(k) = \frac{c_{xy}(k)}{\sqrt{c_x^2(0) \cdot c_y^2(0)}} \dots\dots\dots(2)$$

C_{xy} adalah *cross correlogram*, sedangkan puncak dari *cross correlogram* (nilai r_{xy} (k) tertinggi) merupakan estimasi waktu tunda (*time lag* (T_{lag})) yang menunjukkan korelasi silang antara variabel *input* dan *output* pada suatu sistem.

Apabila:

$$\begin{aligned}
 c_{xy}(k) &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \\
 c_x(0) &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \\
 c_y(0) &= \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_{t+k} - \bar{y})^2 \dots\dots\dots(3)
 \end{aligned}$$

$C_x(0)$ dan $C_y(0)$ adalah rumus standar deviasi untuk masing-masing seri data variabel x dan variabel y .

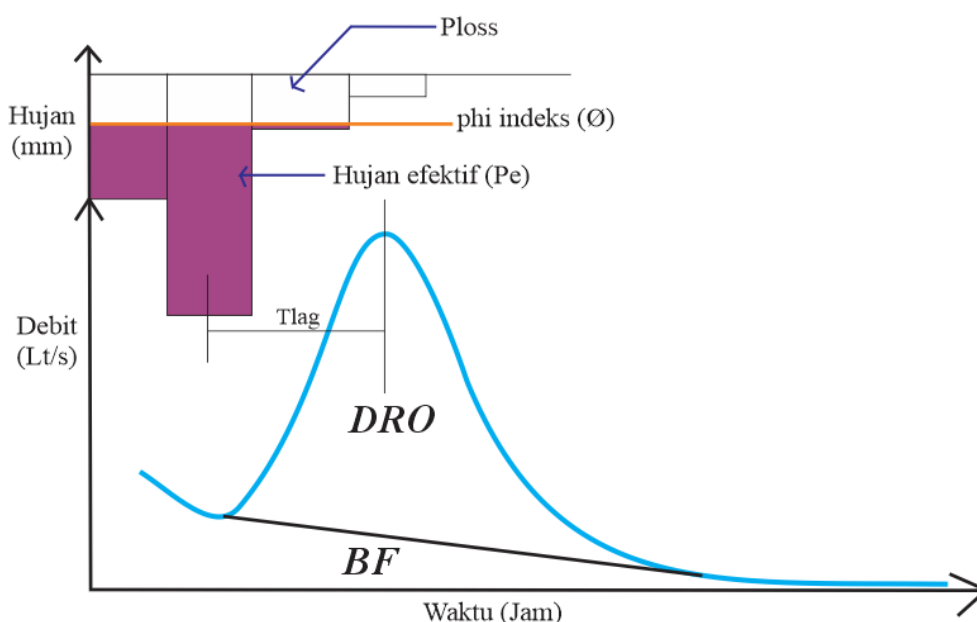
Korelasi silang diturunkan dengan menggunakan bahasa R. Nilai R memiliki besaran nilai mulai dari -1 hingga 1. Nilai R yang mendekati 1 dan -1 menandakan adanya hubungan yang kuat antar variabel, baik positif (1) maupun negatif (-1). Nilai R yang mendekati atau sama dengan 0 menunjukkan hubungan yang lemah atau tidak ada hubungan antara kedua variabel (Fiorillo & Doglioni, 2010). Nilai korelasi positif menunjukkan hubungan linier antara dua variabel, sedangkan nilai korelasi negatif menunjukkan hubungan terbalik antara dua variabel.

4. Analisis Hidrograf Satuan Kejadian Banjir

Curah hujan yang jatuh tersebut menjadi beberapa komponen limpasan, yaitu aliran permukaan langsung, aliran

antara, dan aliran air tanah. Komponen-komponen aliran ini merupakan komponen penyusun hidrograf (Cheng, Cheng, Wen, & Lee, 2013; Sofyan, Saidi, Istijono, & Herdianto, 2017). Analisis hujan efektif dilakukan dengan memisahkan *direct runoff* dengan aliran dasar.

Hidrograf satuan terpilih dianalisis volume *direct runoff* (DRO), *baseflow* (BF), hujan efektif (P_e), dan ϕ indeksnya. Nilai *direct runoff*, *baseflow*, dan ϕ indeks selanjutnya digambarkan dalam hidrograf satuan (*Unit Hydrograph /UH*). Hidrograf satuan ini dapat menggambarkan besarnya waktu tunda (Tlag) yang dilihat dari waktu hujan tertinggi hingga waktu menuju puncak banjir. Selain hujan efektif, juga digunakan analisis statistik korelasi dan regresi untuk menentukan hubungan antara debit puncak dengan beberapa komponen hujan. Ilustrasi hidrograf banjir ditunjukkan oleh Gambar 3.



Gambar (Figure) 3. Ilustrasi hidrograf satuan banjir (*Illustration of flood unit hydrograph*)

Sumber (Source): Modifikasi dari Harto, 1993 (*Modified from Harto, 1993*)

DRO = Q x BF.....(4)

Keterangan :

- DRO = *direct runoff* (m³)
- Q = debit sungai (m³/s)
- BF = *baseflow* (m³/s)

VDRO = Σ (DRO x ΔT).....(5)

Keterangan:

- VDRO = *volume direct runoff* (m³)
- DRO = *direct runoff* (m³/s)
- ΔT = interval perekaman debit (menit)

Pe = $\frac{VDRO}{A}$ (6)

Keterangan :

- Pe = hujan efektif (mm)
- VDRO = *volume direct runoff* (m³)
- A = luas DAS (m²).....(7)

Keterangan:

- ∅ = nilai *phi* indeks (mm/jam)
- P_{tot} = hujan total (mm)
- Pe = hujan efektif (mm)
- ΔT = interval waktu perekaman (jam)

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

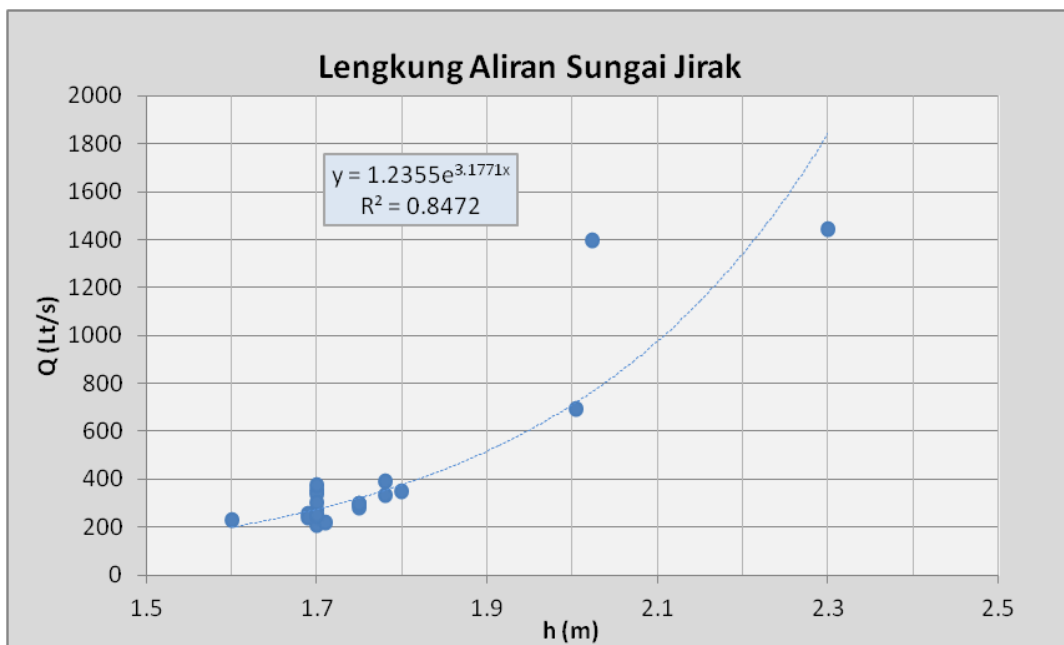
Nilai tinggi muka air (TMA) berdasarkan pencatatan alat dengan interval perekaman 30 menit selama 1 tahun mulai tanggal 20 Juni 2015 sampai dengan 20 Juni 2016. Gambar 4 menunjukkan grafik lengkung aliran dengan persamaan regresi linier antara TMA dan debit Sungai Jirak. Persamaan regresi dari lengkung aliran yang menunjukkan hubungan TMA dan debit sungai Jirak adalah:

Q = 1.2355e^{3.1771(h)}(8)

Keterangan :

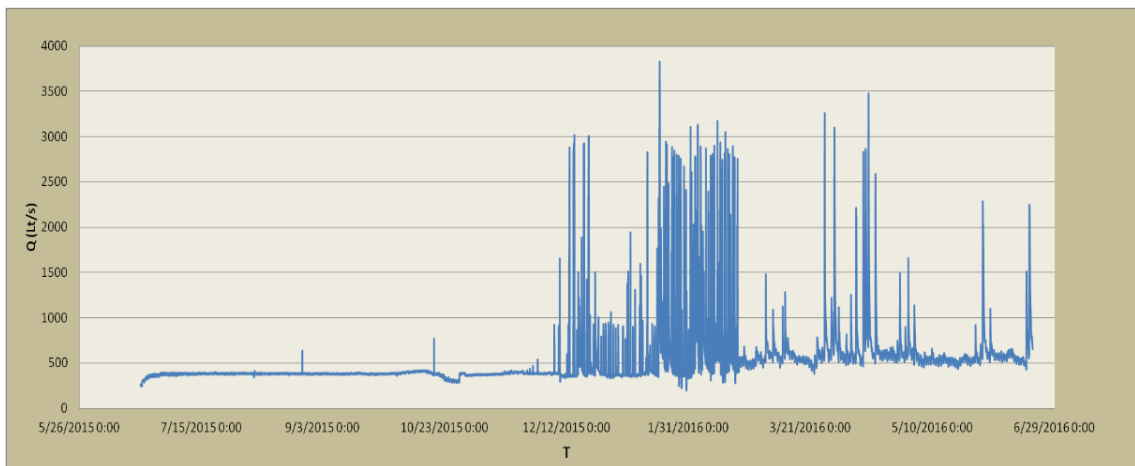
- Q = debit aliran (m³/s)
- h = tinggi muka air sungai (m)
- e = nilai eksponensial

Nilai lengkung aliran ini digunakan untuk menentukan debit sub DAS Jirak selama masa pengukuran. Hidrograf aliran Sub DAS Jirak ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar (Figure) 4. Grafik dan persamaan lengkung aliran sungai Jirak (*Jirak river's rating curve equation and graph*)

Sumber (Source): Analisis data (*Data analysis*), 2019

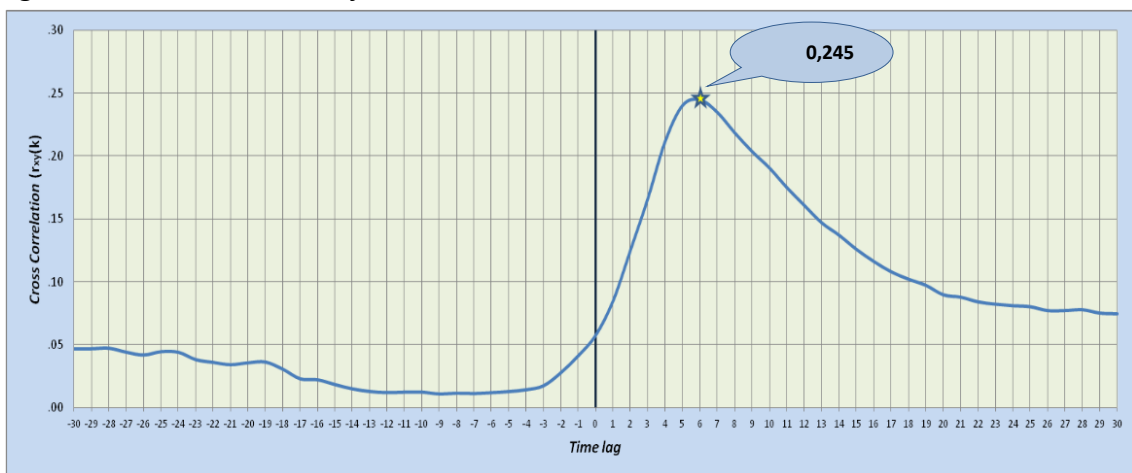


Gambar (Figure) 5. Hidrograf aliran Sub DAS Jirak perekaman 1 tahun (Hydrograph of one-year recorded discharge data in Jirak Sub Watershed)

Sumber (Source): Analisis data primer (Primary data analysis), 2019

Perhitungan korelasi silang ini menggunakan nilai *time lag* hingga 15 jam (nilai waktu tunda 30). Hasil pengolahan data ini menghasilkan grafik yang menghubungkan nilai ksorelasi dengan waktu tunda antara kenaikan debit dan kejadian hujan. Fungsi korelasi silang antara hujan dan debit aliran menunjukkan nilai *k* (waktu tunda) positif yang menandakan bahwa hujan di daerah

hulu mempengaruhi kenaikan debit di hilir sub DAS Jirak. Nilai korelasi ($r_{xy}(k)$) tertinggi sebesar 0,245 berada pada angka waktu tunda ke-6. Data dengan interval 30 menit menunjukkan bahwa nilai waktu tunda adalah selama 3 jam. Grafik analisis korelasi silang debit Sub DAS Jirak terhadap kejadian hujan ditunjukkan oleh Gambar 6.



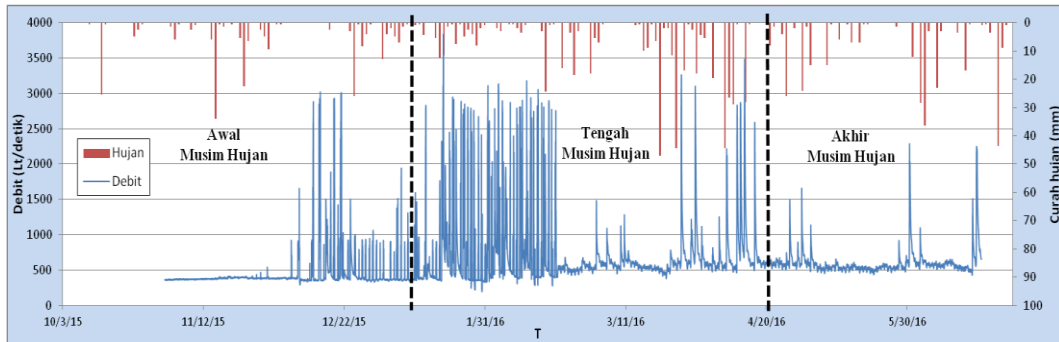
Gambar (Figure) 6. Grafik cross correlation debit sub DAS Jirak terhadap kejadian hujan (Cross-correlation graph between Jirak Sub Watershed discharge and rainfall occurrence)

Sumber (Source): Analisis data primer (Primary data analysis), 2019

Analisis deret waktu (*time series analysis*) di kawasan karst umumnya digunakan untuk membagi tipe akuifer karst berdasarkan karakteristik hidrologinya, terutama dilakukan pada sistem mata air dan sungai bawah tanah (Nurkholis, Adji, & Haryono, 2019). Penelitian ini menggunakan analisis deret waktu untuk mengetahui karakteristik sungai permukaan yang masuk ke sistem sungai bawah tanah karst. Perhitungan korelasi silang dalam analisis deret waktu juga dilakukan dengan membagi musim penghujan menjadi tiga fase, yaitu fase awal musim hujan, fase pertengahan musim hujan, dan fase akhir musim hujan. Pembagian fase hujan ditunjukkan oleh Gambar 7. Perhitungan analisis silang pada fase awal hujan menunjukkan nilai korelasi ($r_{xy}(k)$) tertinggi pada nilai positif. Nilai korelasi ($r_{xy}(k)$) tertinggi sebesar 0,109 berada pada angka waktu tunda ke-166, atau nilai waktu tunda adalah selama 83 jam atau 3 hari lebih 11 jam. Hal ini dimungkinkan saat fase awal hujan, curah hujan yang jatuh ke permukaan tanah tidak langsung menjadi aliran permukaan, namun mengisi rongga-rongga tanah hingga jenuh atau masuk ke dalam sistem epikarst terlebih dahulu. Perhitungan waktu tunda pada fase tengah hujan menunjukkan nilai korelasi ($r_{xy}(k)$) ($r_{xy}(k)$)

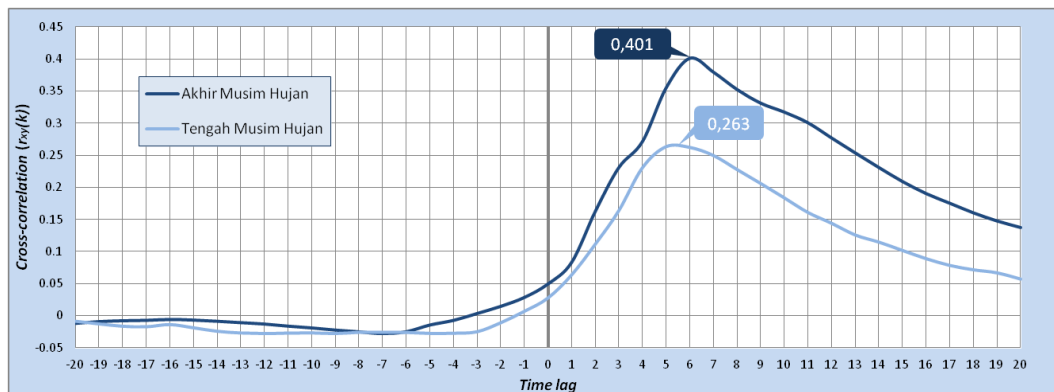
tertinggi sebesar 0,263 berada pada angka time lag ke-5, atau nilai waktu tunda adalah selama 2,5 jam. Perhitungan waktu tunda pada fase akhir hujan menunjukkan nilai korelasi ($r_{xy}(k)$) tertinggi sebesar 0,401 berada pada angka time lag ke-6, atau nilai waktu tunda adalah selama 3 jam. Respon debit yang bertambah cepat di tiap fase hujan ini disebabkan karena kondisi permukaan tanah yang telah jenuh air, sehingga curah hujan yang turun langsung menjadi aliran permukaan. Grafik analisis korelasi silang debit pada tengah dan akhir musim hujan ditunjukkan oleh Gambar 8.

Pemilihan kejadian banjir dengan satu puncak tunggal (*single peak discharge*) pada data perekaman debit aliran Sub DAS Jirak selama 1 tahun menemukan sebanyak 17 hidrograf kejadian banjir. Fase awal musim hujan memiliki persentase hujan efektif dari tebal hujan yang terjadi pada satu kejadian hujan yang lebih kecil dibandingkan curah hujan yang hilang (tidak menjadi limpasan). Pemilihan kejadian banjir pada fase ini mendapatkan persentase hujan efektif sebesar 30-36% saja. Persentase hujan efektif pada fase tengah musim hujan sebesar 18-96,9% dengan rata-rata sebesar 55% yang menjadi hujan efektif.



Gambar (Figure) 7. Pembagian fase musim hujan pada data hujan (The division of the rainy season phase on the rain data)

Sumber (Source): Analisis data primer (Primary data analysis), 2019



Gambar (Figure) 8. Grafik cross correlation debit Sub DAS Jirak pada fase tengah dan akhir hujan (Cross-correlation graph of Jirak Sub Watershed discharge in the mid-phase and the end-phase of rainy season)

Sumber (Source): Analisis data primer (Primary data analysis), 2019

Beberapa variabel hujan yang diuji statistik adalah variabel durasi hujan, tebal hujan, puncak hujan, dan hujan efektif. Hasil perhitungan statistik antara debit puncak aliran dengan komponen-komponen hujan di hulu Sub DAS Jirak menunjukkan hubungan yang positif antara variabel-variabel bebas (durasi hujan, tebal hujan, hujan efektif, dan puncak hujan) dengan variabel terikat (debit puncak Sub DAS Jirak). Variabel tebal hujan dan curah hujan efektif memiliki nilai korelasi dan regresi yang cukup kuat terhadap kejadian debit

puncak banjir di hilir Sub DAS Jirak. Kedua variabel tersebut dapat dijadikan patokan/referensi bagi pengelola wisata Cave Tubing Kalisuci untuk memprediksi kejadian banjir di Sungai Kalisuci berdasarkan tebal hujan dan hujan efektif yang terjadi. Nilai hujan efektif minimal sebesar 5 mm dengan tebal hujan sebesar minimal sebesar 14,5 mm bahkan sudah menyebabkan banjir di hilir Sub DAS Jirak. Hasil analisis korelasi dan regresi variabel komponen hujan terhadap debit puncak di Sub DAS Jirak ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel (Table) 1. Penentuan komponen hujan pada seluruh kejadian banjir terpilih selama periode penelitian (*Determination of rain componenst in all selected flood events during the research period*)

Fase Musim Hujan	Waktu Awal Hujan	Waktu Banjir (Debit Puncak)	Tebal Hujan (mm)	Puncak Hujan (mm)	Durasi Hujan (jam)	Debit Puncak (Lt/detik)	Time lag (jam)	Hujan Efektif (mm)	Hujan Efektif (%)	Ploss (mm)	Ø indeks
Awal Musim Hujan	12/16/2015 16:30	12/16/2015 18:30	42,5	6,5	5,5	1503,2192	1,0	15,5	36,5	27,0	2,5
	12/21/2015 14:00	12/21/2015 16:30	14,5	9,5	2,0	1015,1888	2,0	5,5	37,7	9,0	2,3
	1/11/2016 13:00	1/11/2016 14:30	48	26	4,0	1464,0944	1,0	14,7	30,6	33,3	4,9
Tengah Musim Hujan	1/22/2016 16:30	1/22/2016 20:00	23,5	7	3,5	2485,4576	2,5	22,8	96,9	0,7	0,1
	2/1/2016 19:00	2/1/2016 20:00	16,5	12,5	3,5	1826,5136	1,0	9,7	58,8	6,8	1,0
	2/5/2016 14:00	2/5/2016 22:30	35	7,5	8,0	1958,3024	5,0	19,0	54,4	16,0	1,0
	3/26/2016 18:00	3/26/2016 21:30	106,5	47	2,0	3261,776	3,5	49,9	46,9	56,6	14,8
	3/30/2016 16:30	3/30/2016 20:30	66	44,5	5,5	3103,22	2,5	31,5	47,7	34,5	3,1
	4/1/2016 13:30	4/1/2016 17:00	27,5	17	1,5	1114,03	3,0	5,0	18,1	22,5	5,5
	4/6/2016 12:00	4/6/2016 16:00	16	17,5	2,5	1239,6416	3,0	8,6	53,6	7,4	3,5
Akhir Musim Hujan	4/8/2016 16:00	4/8/2016 19:00	37,5	19,5	2,5	2201,29	2,5	23,9	63,6	13,6	2,7
	4/11/2016 16:00	4/11/2016 18:30	83	44,5	3,5	2833,46	2,5	64,7	78,0	18,3	2,6
	4/12/2016 14:30	4/12/2016 17:30	83,5	26,5	3,5	2870,53	3,0	59,2	70,9	24,3	3,5
	4/13/2016 17:00	4/13/2016 22:00	91,5	29	6,0	3482,11	4,5	77,1	84,3	14,4	1,2
	4/16/2016 17:00	4/16/2016 18:30	33,5	28	3,5	2586,3584	1,5	31,0	92,5	2,5	0,4
	4/26/2016 15:00	4/26/2016 18:00	44	24	2,0	1494,9824	3,0	30,4	69,1	13,6	6,3
	4/30/2016 0:00	4/30/2016 3:30	47,5	5,5	2,5	1647,3632	4,0	16,1	33,9	31,4	1,5

Sumber (Source): Analisis data primer (*Primary data analysis*), 2019

Tabel (Table) 2 Nilai korelasi dan regresi komponen hujan terhadap debit puncak Sub DAS Jirak
 (Correlation and regression value between rainfall components and peak discharge of
 Jirak Sub Watershed)

Data 30 menitan	Tebal Hujan	Puncak Hujan	Durasi Hujan	Hujan Efektif	
Debit Puncak	r	0,784	0,678	0,328	0,855
	R ²	0,6806	0,5207	0,1564	0,7803

Sumber (Source): Analisis data primer (Primary data analysis), 2019

Hasil perhitungan dengan analisis deret waktu tidak menyimpang jauh dari hasil perhitungan menggunakan hidrograf satuan banjir terpilih. Hasil perhitungan dengan analisa deret waktu, korelasi silang menghasilkan waktu tunda selama 2,5 hingga 3 jam, sedangkan hasil hidrograf banjir menunjukkan waktu tunda rata-rata selama 2,7 jam. Respon cepat ini menandakan sistem drainase dari Sub DAS Jirak yang cepat. Selain dipengaruhi oleh faktor hujan, sistem pengatusan ini terkait oleh penggunaan lahan, material permukaan, kemiringan lereng, topografi DAS, bentuk dan ukuran DAS (Dharmananta, Suyarto, & Trigunasih, 2019). Nilai waktu tunda ini dapat dijadikan sebagai referensi waktu bagi pengelola wisata di Kalisuci dalam melakukan kegiatan evakuasi bilamana terjadi banjir, sehingga pengelola dapat mengantisipasi kejadian banjir akan terjadi pada 2,5 – 3 jam setelah kejadian hujan di hulu sungai.

Hasil korelasi dan regresi yang menunjukkan hubungan dan pengaruh kuat dari komponen tebal hujan dan curah hujan efektif ini perlu diperhatikan pengelola, di mana hujan dengan nilai tersebut sudah menyebabkan banjir. Hal

ini dapat dijadikan referensi bagi pengelola apabila akan memasang sistem peringatan dini (*Early Warning System*) banjir dengan menggunakan patokan nilai hujan tersebut sebagai upaya untuk kesiapsiagaan terhadap kejadian bencana banjir di Sub DAS Jirak.

IV. KESIMPULAN

Banjir Sub DAS Jirak menunjukkan bahwa waktu tunda antara kejadian hujan dan awal kejadian banjir di sub DAS Jirak berkisar 2,5 hingga 3 jam dengan nilai korelasi yang meningkat hingga fase akhir hujan. Persentase hujan efektif yang jatuh di Sub DAS Jirak menjadi *total run off* yang semakin meningkat pada fase akhir hujan. Seluruh parameter hujan di Sub DAS Jirak memiliki korelasi positif dengan kejadian debit puncak. Parameter yang paling mempengaruhi kejadian banjir di Sub DAS Jirak adalah tebal hujan dan curah hujan efektif. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa Sub DAS Jirak cepat merespon terjadinya hujan di hulu sungai menjadi debit aliran. Pengelola wisata di Gua Kalisuci yang memanfaatkan aliran Sub DAS Jirak dapat menggunakan patokan waktu tunda untuk memperkirakan kejadian banjir yaitu 2,5 - 3 jam setelah

kejadian hujan di hulu. Tebal hujan dan hujan efektif dapat digunakan sebagai variabel acuan dalam pembangunan sistem peringatan dini banjir di Sub DAS Jirak. Untuk yang akan datang masih diperlukan penelitian yang berkaitan pengembangan sistem peringatan dini yang mudah diterapkan untuk masyarakat setempat berdasarkan hasil temuan ilmiah penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Bailly-Comte, V., Martin, J.B., Jourde, H., Sreaton, E.J., Pistre, S., & Langston, A. (2010). Water exchange and pressure transfer between conduits and matrix and their influence on hydrodynamics of two karst aquifers with sinking streams. *Journal of Hydrology* 386, 55–66. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.03.005>
- Dewaide, L., Bonniver, I., Rochez, G., & Hallet, V. (2016). Solute transport in heterogeneous karst system: Dimensioning and of the transport parameters vi multi-sampling tracer-test modelling using OTIS (One-dimensional Transport with Inflow and Storage) Program. *Journal of Hydrology* 534, 567-578. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.01.049>
- Dharmananta, I. D. P. G. A., Suyarto, R., & Trigunasih, N. M. (2019). Pengaruh morfometri DAS terhadap debit dan sedimentasi DAS Yeh Ho. *Agroekoteknologi Tropika* 8(1), 32–42
- Fiorillo, F., & Doglioni, A. (2010). The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis (Campania, Southern Italy). *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0666-1>
- Ford, D., & Williams, P. (2013). Karst Hydrogeology and Geomorphology. In *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Gillieson, D. (2009). Caves: Processes, Development and Management. In *Caves: Processes, Development and Management*. <https://doi.org/10.1002/9781444313680>
- Gill, L.W., Babechuck, M.G., Kamber, B.S., McCormeck, T., & Murphy, C. (2018). Use of trace and rare earth elements to quantify autogenic allogenic inputs within a lowland karst network. *Applied Geochemistry* 90, 101-114. <http://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.01.001>
- Goldscheider, N. (2012). A holistic approach to groundwater protection and ecosystem services in karst terrains. *AQUA mundi-am06046*, 117-124. <https://doi.org/10.1007/s13146-019-00492-5>
- Harmann, A., Goldscheider, N., Wagener, T., Lange, J., Weiler, M. (2014). Karst water resources in a changing world: Review of hydrological modeling approaches. *Reviews of Geophysics* 52, 218-242, <https://doi.org/10.1002/2013RG000443>
- Harto, S.B. (1993). *Analisis hidrologi*. Jakarta: Gramedia
- Kusumayudha, S. B. (2005). *Hidrogeologi Karst dan Geometri Fraktal di Daerah Gunungsewu*. Yogyakarta: Adicita.
- Macdonald, S.M.& Patners. (1984). Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study (Volume 3C: Cave

- Survey). In *Greater Yogyakarta Groundwater Resources Study*. Yogyakarta: P2AT, Ministry of Public Works
- Nurkholis, A., Adji, T. N., & Haryono, E. (2019). Time series analysis application for karst aquifer characterisation in Pindul Cave Karst System, Indonesia. *Acta Carsologica* 48 (1), 69-84. <https://doi.org/10.3986/ac.v48i1.6745>
- Panagopoulos, G., & Lambrakis, N. (2006). The contribution of time series analysis to the study of the hydrodynamic characteristics of the karst systems: Application on two typical karst aquifers of Greece (Trifilia, Almyros Crete). *Journal of Hydrology*. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.023>
- Putro, S. T. (2012). *Analysis of Organic Carbon Flux in the Gilap Cave, Ponjong Sub-District, Gunungkidul District, Yogyakarta, Indonesia*. Tesis S2, Fak. Geografi. Universitas Gadjah Mada
- Reh, R., Liche, T., Geyer, T., Nödler, K., & Sauter, M. (2013). Occurrence and spatial distribution of organic micro-pollutants in a complex hydrogeological karst system during low flow and high flow periods, results of a two-year study. *Science of the Total Environment* 443, 438–445. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.005>
- Samodra, H. (2001). *Nilai Strategis Kawasan Karst di Indonesia : Pengelolaan dan Perlindungan*. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Soewarno. (1991). *Hidrologi : Pengukuran dan Pengolahan Data Aliran Sungai (Hidrometri)*. Bandung: Penerbit Nova
- Sofyan, E.R., Saidi, A., Istiyono, B., & Herdianto, R. 2017. Model hidrograf akibat perubahan tataguna lahan DAS Batang Kuranji (Studi kasus Sub DAS Danau Limau Manis). *Poli Rekayasa* 13 (1), 1-10
- Thomas, B. C. (2010). *Comparison of two physically-based spatially distributed hydrology models in contrasting geoclimatic settings*. Thesis S2, ITC The Netherlands
- White, W. B. (1988). Geomorphology and hydrology of karst terrains. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. <https://doi.org/10.1002/jqs.3390040211>
- You, Z., Chen, W., & Song, L. (2011). Evaluating ecological tourism under sustainable development in karst area. *Journal of Sustainable Development*. <https://doi.org/10.5539/jsd.v4n2p234>
- Zhang, Z., Chen, X., Shi, P., & Chen, X. (2013). Quantifying time lag of epikarst-spring hydrograph response to rainfall using correlation and spectral analyses. *Hydrogeology Journal*. <https://doi.org/10.1007/s10040-013-1041-9>

Halaman ini sengaja dibiarkan kosong