

KAJIAN RESPON DEBIT MATAAIR NGELENG TERHADAP CURAH HUJAN UNTUK KARAKTERISASI AKUIFER KARST

Igor Yoga Bahtiar
igor.bahtiar@gmail.com

Tjahyo Nugroho Adji
adji@geo.ugm.ac.id

Abstract

Karst aquifer system has heterogeneous – anisotropic characteristic. The uniqueness of karst aquifer gives different evaluation process and understanding of karst aquifer characteristic. The aims of this research are: (1) to understand the correlation pattern between recharge from the rainfall and spring discharge temporally; (2) to analyze spring flow components that are related with response of discharge from rainfall to determine the characteristic of Ngeleng Spring karst aquifer. Evaluation processes was carried out using hydrograph recession analysis and discharge – recharge correlation approach is used to understand the character of aquifer system in study. This research used time series data. Discharge – recharge correlation show quick response which rising discharge about 2-hours time lag after rainfall. The quick response shows that there are rapid flow components (conduit and fissure). The recession analysis also shows there are 3 flow components supply the spring flow, that are diffuse, fissure and conduit.

Keywords: Karst Aquifer, Flow Component, Cross Correlation, Rainfall, Discharge

Abstrak

Sistem akuifer karst memiliki sifat heterogen-anisotropis. Keunikan akuifer karst memeberikan perbedaan dalam proses evaluasi dan pemahaman mengenai sifat akuifer karst. Tujuan penelitian ini adalah (1) Mengetahui pola korelasi antara recharge yang berupa curah hujan dengan discharge yang berupa debit pada Mataair Ngeleng secara temporal; (2) Menganalisis komponen aliran mataair yang berkaitan dengan respon debit terhadap curah hujan guna mengetahui karakteristik akuifer karst Mataair Ngeleng. Proses evaluasi dengan analisis resesi hidrograf dan korelasi discharge – recharge menjadi pendekatan untuk mengetahui karakter dari sistem akuifer daerah kajian. Penelitian ini menggunakan data time series. Korelasi discharge – recharge menunjukkan respon cepat dengan waktu jeda kenaikan debit 2 jam setelah hujan. Kondisi tersebut mengindikasikan sudah berkembang sistem aliran cepat (aliran celah dan saluran) pada akuifer mataair. Hasil yang sama juga ditunjukkan dari analisis resesi hidrograf yang menunjukkan terdapat 3 komponen aliran yang menyuplai mataair, yaitu komponen aliran diffuse (rembesan), fissure (celah) dan conduit (saluran).

Kata kunci: Akuifer Karst, Komponen Aliran, Cross Correlation, Hujan, Debit

PENDAHULUAN

Terdapat kurang lebih 12% permukaan bumi yang terbebas dari tutupan es yang ditempati oleh batuan karbonat dan 7-10% darinya merupakan bentukan karst (Ford dan William, 2007). Menurut Balazs (1968) dalam Adji (2009) mengungkapkan bahwa luas kawasan karst di Indonesia mencapai 20% dari total wilayah Indonesia. Kawasan karst yang

cukup luas tersebut memiliki potensi sumberdaya air yang luar biasa. Karst merupakan bentukan permukaan bumi yang berkembang dengan adanya porositas sekunder pada batuan yang mudah larut serta memiliki sistem drainase yang khas (Ford dan Williams, 2007). Suatu kawasan karst akan memiliki sistem drainase bawah permukaan yang berbeda dengan kawasan lainnya. Pada dasarnya sistem akuifer karst memiliki sifat heterogen

anisotropis, yaitu sifat konduktivitas hidrolik yang bervariasi berdasarkan formasi batuan yang berkembang karena porositas sekunder. Kondisi tersebut memberikan perbedaan dalam proses evaluasi dan pemahaman mengenai sifat akuifer karst.

Salah satu teknik identifikasi perilaku atau karakter akuifer karst adalah dengan mengetahui respon akuifer karst terhadap imbuhan air (*Recharge*) yang masuk ke dalam sistem akuifer tersebut. Respon akuifer karst yang dimaksud adalah pelepasan (*discharge*) debit aliran airtanah karst dan *recharge* yang dimaksud adalah curah hujan. Proses evaluasi dengan analisis resesi hidrograf dan korelasi *discharge* – *recharge* menjadi pendekatan untuk mengetahui karakter dari sistem akuifer daerah kajian. Upaya proses evaluasi tersebut menggunakan data *time series*.



Gambar 1. Peta Obyek Kajian Mataair Ngeleng (Sumber: Olah Data Sekunder, 2014)

Penelitian ini mengambil daerah kajian di Kawasan Karst Gunungkidul, tepatnya berada di sisi sebelah barat kawasan ini. Pelepasan airtanah karst diwakili oleh mataair yang dijadikan sebagai obyek kajian. Mataair Ngeleng yang berada di Desa Giritirto, Kecamatan Purwosari, Kabupaten Gunungkidul merupakan mataair yang dijadikan sebagai obyek kajian.

Berdasarkan penjelasan di atas maka penelitian ini memiliki tujuan secara umum untuk memahami lebih dalam bagaimana perilaku akuifer karst suatu daerah. Memahami perilaku akuifer karst merupakan cara untuk mengetahui karakteristik akuifer tersebut. Maka secara lebih rinci penelitian ini memiliki dua

tujuan, yaitu: (1) Mengetahui pola korelasi antara recharge yang berupa curah hujan dengan discharge yang berupa debit pada Mataair Ngeleng secara temporal; (2) Menganalisis komponen aliran mataair yang berkaitan dengan respon debit terhadap curah hujan guna mengetahui karakteristik akuifer karst Mataair Ngeleng.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini membutuhkan data secara *time series*. Data tersebut dikumpulkan secara langsung dari lapangan. Sehingga data yang diperoleh dapat merepresentasikan kondisi alami di daerah kajian. Data-data yang dikumpulkan adalah:

- Data TMA Mataair Ngeleng: data didapatkan dengan pengukuran di lapangan menggunakan alat ukur tinggi muka air otomatis (*water level data logger*).
- Data Debit Mataair Ngeleng: data debit mataair didapatkan secara langsung di lapangan dengan pengukuran menggunakan metode pelampung. Pengukuran dilakukan secara berkala, untuk mendapatkan variasi data berdasarkan tinggi muka air.
- Data Curah Hujan: data ini didapatkan dengan memasang alat penangkap hujan otomatis (*automatic rain gauge data logging*).

Periode pengambilan data pada penelitian ini dilakukan selama 9 bulan, dimulai pada pertengahan bulan Agustus 2013 hingga bulan Mei 2014.

1. Teknik Pengolahan Data Tujuan Pertama:

- Lengkung Debit (*Rating Curve*) Mataair
Schulz (1979) menyatakan bahwa tinggi muka air pada suatu aliran dapat memberikan estimasi debit alirannya. Dengan analisis regresi, kurva aliran (*stage-discharge rating curve*) dapat menghasilkan persamaan sebagai berikut:

$$Q = f.TMA \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

- Q : Debit aliran (m³/s)
- f : Fungsi regresi TMA dengan debit aliran
- TMA : Tinggi muka air

- Korelasi Dua Variabel (*Bivariate*)
Analisis korelasi dua variabel dilakukan untuk mengetahui hubungan dua variabel.

Korelasi *bivariate* memiliki persyaratan data, dimana data harus kontinu, homogen dan distribusi data normal serta regresi data linier (Hartono, 2008). Pada penelitian ini korelasi dua variabel digunakan untuk mengkorelasikan data curah hujan dan debit aliran Mataair Ngeleng. Tujuan dari korelasi tersebut adalah untuk mengetahui gambaran awal arah korelasi kedua variabel tersebut. Penentuan korelasi dua variabel pada penelitian ini menggunakan *software* SPSS 16. *Analyze, Correlate, Bivariate*.

c. *Cross correlation*

Metodologi korelasi silang secara luas digunakan untuk menganalisis hubungan linear antara input dan output dalam kajian hidrogeologi. Secara lebih khusus metode ini juga digunakan dalam analisis sistem karst tentang respon hidrograf mataair terhadap curah hujan seperti yang dilakukan oleh Budge dan Sharp, 2009; Fiorillo dan Doglioni, 2010; serta Zhang, Chen, Chen, dan Shi, 2013.

Korelasi silang (*Cross Correlation*) merupakan salah satu metode yang banyak digunakan dalam analisis data secara *time series*. Metode ini dapat digunakan sebagai alat untuk memprediksikan suatu hubungan suatu series data *x* (*input*) dengan data *y* (*output*) pada suatu sistem. Untuk melakukan analisis korelasi silang, kedua seri tersebut harus sampel dalam interval waktu yang sama dan diasumsikan stasioner dalam *mean* dan *varians* (Cowpertwait dan Metcalfe, 2009, Shumway dan Stoffer, 2006, dalam Thomas, 2010). Hubungan kedua variabel tersebut didefinisikan dalam rumus:

$$r_{xy}(k) = \frac{C_{xy}(k)}{\sqrt{C_x^2(0) C_y^2(0)}} \dots\dots\dots (2)$$

Dimana nilai $C_{zy}(k)$ merupakan *cross correlogram*. Puncak dari garfik *cross correlogram* (nilai $r_{xy}(k)$ tertinggi) merupakan estimasi *time lag* (waktu jeda) yang menunjukkan *cross correlation* antara input dan output sistem.

$$C_{xy}(k) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})(y_{t+k} - \bar{y}) \dots\dots\dots (3)$$

$$C_x(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$C_y(0) = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (y_t - \bar{y})^2 \dots\dots\dots (5)$$

Sedangkan $C_x(0)$ dan $C_y(0)$ merupakan rumus standar deviasi untuk masing-masing data series variabel *x* dan variabel *y*.

2. *Teknik Pengolahan Data Tujuan Kedua:*

a. Perhitungan konstanta resesi

Konstanta resesi banjir yang telah dipilih pada berbagai komponen aliran dapat dicari dengan persamaan:

$$Q(t) = Q(t_0) e^{-k(t-t_0)} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

k = konstanta resesi suatu sistem karst

$Q(t)$ = Debit pada waktu ke t

$Q(t_0)$ = Debit pada waktu awal segmen resesi

Kemudian jika pada skala semi-log rumus ini dianggap linier, maka:

$$\ln Q(t) = -k(t-t_0) + \ln Q(t_0) \dots\dots\dots (7)$$

Atau

$$k = -1 / t-t_0 \ln (Q(t)/Q(t_0)) \dots\dots\dots (8)$$

Nilai konstanta resesi tersebut digunakan untuk menentukan karakteristik aliran pada akuifer karst. Variasi nilai konstanta resesi masing-masing komponen aliran menurut Schulz (1976), yaitu 0,2 – 0,5 untuk *Channel flow*/aliran *conduit*; 0,5 – 0,8 untuk *interflow*/aliran *fissure* dan 0,85 – 0,98 untuk *baseflow*/aliran *diffuse*. Sedangkan Nathan and McMahan (1990; dalam Adji, 2006) jangkauan nilai konstanta resesi masing-masing komponen aliran berkisar 0,2 – 0,8 untuk *channel flow*; 0,7 – 0,94 untuk *intermediate flow*; dan 0,93 – 0,995 untuk *baseflow*.

b. Pemisahan Aliran dasar

Schulz (1976) dan Eckhardt (2012) menyebutkan bahwa tujuan dari pemisahan aliran dasar adalah untuk membedakan komponen aliran dasar dengan komponen aliran langsung atau aliran cepat pada suatu sistem hidrologi. Metode yang digunakan dalam memisahkan aliran dasar selama periode penelitian adalah dengan menggunakan cara *automated baseflow separation by digital filtering* (Eckhardt, 2005).

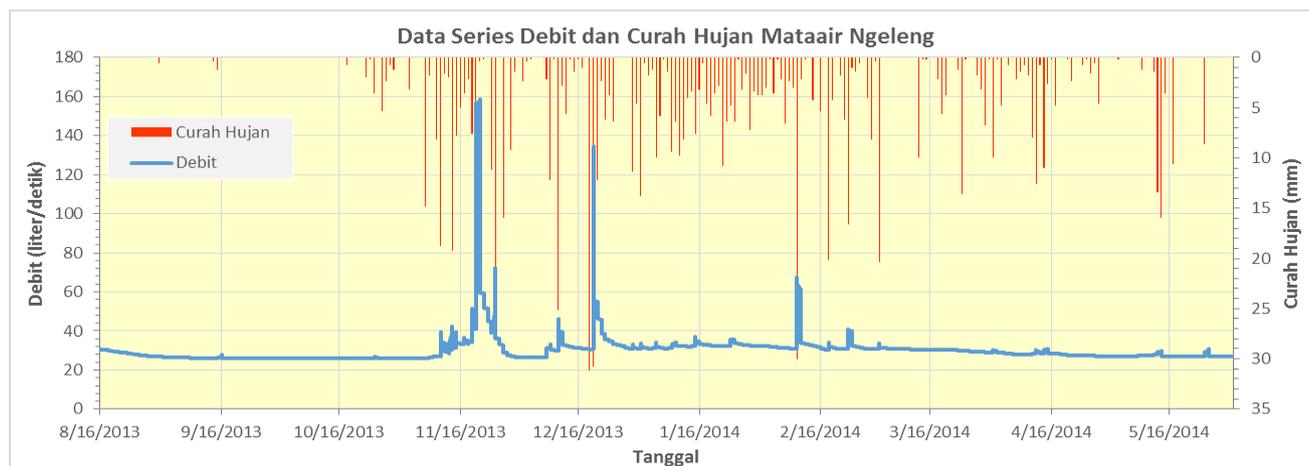
$$Q_b(i) = \frac{(1-BFI_{max})aQ_b(i-1) + (1-a)BFI_{max}Q_i}{1-a BFI_{max}} \dots\dots\dots (9)$$

- $q_b(i)$: Aliran dasar pada waktu i
- $q_b(i-1)$: Aliran dasar pada waktu $i - 1$
- α : Konstanta resesi aliran dasar (K_b)
- BFI_{max} : Indeks aliran dasar maksimum (Media porus dan *perennial* $BFI_{max} = 0,8$)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Selama periode penelitian data yang diperoleh dari perekaman di lapangan menghasilkan kurang lebih 13.860 data tinggi muka air (TMA) yang direkam dalam durasi 30

menit. Data TMA tersebut dikonversi menjadi data series debit menggunakan *rating curve* antara TMA dengan debit yang diukur secara manual. Sedangkan data curah hujan didapatkan dari setiap kejadian hujan. Gambar 1. Merupakan representasi data selama penelitian. Kedua data ini yang digunakan selanjutnya untuk melakukan analisis korelasi Bivariate, *cross correlation*, penentuan resesi hidrograf dan pemisahan aliran dasar.



Gambar 1. Grafik Debit Mataair dan Curah Hujan Mataair Ngeleng Periode Penelitian (Sumber: Pengukuran lapangan, 2013-2014)

Analisis pertama yang dilakukan adalah dengan mengkorelasikan antara curah hujan dengan debit mataair. Curah hujan harian dan rerata debit mataair harian merupakan data yang digunakan untuk mengkorelasikan input dan output pada sisten akuifer karst ini. Korelasi ini bertujuan untuk mengetahui gambaran awal hubungan antara kedua variabel ini dalam kaitannya dengan sistem akuifer. Grafik pada Gambar 2 menunjukkan hasil korelasi kedua series data tersebut.



Gambar 2. Grafik Hubungan Curah Hujan Harian dengan Rerata Debit Harian Mataair Ngeleng. (Sumber: Olah data primer, 2014)

Berdasarkan grafik di atas diketahui bahwa hubungan antara curah hujan harian

daerah kajian dengan rerata debit Mataair Ngeleng memiliki nilai korelasi (R) sebesar 0,630. Nilai korelasi tersebut dalam uji statistik menggunakan SPSS memenuhi taraf signifikansi 0,05 (5%), yaitu nilai probabilitas lebih kecil dari 0,05. Sehingga dapat diartikan bahwa nilai korelasi tersebut signifikan dan terdapat korelasi antara curah hujan dan debit mataair. Besar nilai R menunjukkan tingkat korelasi pada klasifikasi hubungan variabel yang kuat. Selain itu nilai R positif memberikan pemahaman bahwa hubungan antara variabel bebas (Curah Hujan) dan variabel terpengaruh (Debit mataair) berbanding lurus. Bertambahnya curah hujan akan diikuti dengan kenaikan debit mataair. Korelasi sederhana dua variabel ini setidaknya memberikan prespektif bahwa curah hujan sebagai *recharge* sistem akuifer memiliki hubungan positif terhadap debit mataair sebagai *discharge* akuifer. Hubungan positif tersebut merupakan hubungan yang berbanding lurus, yaitu ketika terjadi penambahan curah hujan maka akan diikuti dengan bertambahnya debit aliran mataair.

Gambar 3. menunjukkan hasil *cross correlation* dua data series (curah hujan dan

debit aliran Mataair Ngeleng). Korelasi yang perlu diperhatikan adalah korelasi pada *time lag* (waktu jeda) positif. Hal tersebut didasari oleh hasil korelasi Bivariate sebelumnya (Gambar 3.) yang juga menunjukkan korelasi positif. Fungsi korelasi silang curah hujan dan debit mataair karst menunjukkan hubungan k (*time lag*) kearah positif yang menunjukkan bahwa curah hujan mempengaruhi laju aliran debit mataair (Zhang, Chen, Chen dan Shi; 2013). Nilai korelasi ($r_{xy}(k)$) tertinggi berada pada *time lag* jam ke 2 dengan nilai korelasi sebesar 0,281. Sehingga dapat diartikan bahwa akuifer karst Mataair Ngeleng memiliki respon berupa kenaikan aliran debit mataair pada jeda waktu 2 jam dari awal kejadian hujan. Atau dengan kata lain, kenaikan debit mataair dimulai setelah 2 jam dari awal terjadi hujan di daerah tangkapan air. Kenaikan debit mataair yang dimaksud adalah kenaikan debit rata-rata yang bukan merupakan puncak banjir maupun kenaikan secara signifikan berupa banjir.



Gambar 3. Correlogram Cross Correlation Debit Mataair Ngeleng Terhadap Curah Hujan (Sumber: Olah data primer, 2014)

Diketahui bahwa hasil *cross correlation* series data debit dan hujan keseluruhan menghasilkan nilai korelasi respon debit terhadap curah hujan tertinggi adalah pada *time lag* 2,0 jam. Apabila dikomparasikan dengan data faktual waktu jeda kenaikan debit aliran mataair dari awal kejadian hujan beberapa sampel kejadian banjir, maka hasil *cross correlation* tidak jauh berbeda. Nilai rata-rata *time lag* dari keseluruhan kejadian banjir adalah 2,03 jam.

Selain melihat nilai rata-rata *time lag* dari beberapa kenaikan debit aliran, untuk melihat kebenaran hasil perhitungan *cross correlation* juga dapat dilakukan dengan cara lain. Salah satunya adalah dengan melihat sebaran nilai *time lag* yang di hubungkan dengan

jumlah curah hujan disetiap kejadian banjir. Hubungan tersebut tergambar pada *scatter plot* Gambar 4. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa banyak nilai *time lag* dari besar curah hujan yang bervariasi memiliki kecenderungan pada *range* nilai 0,5 – 3 jam. Sehingga dapat dikatakan bahwa hasil perhitungan *cross correlation* tidak menyimpang dari kecenderungan nilai faktual *time lag* respon *discharge*/debit terhadap *recharge*/curah hujan Mataair Ngeleng.



Gambar 4. Scatter Plot Time Lag Debit Mataair Terhadap Curah Hujan (Sumber: Olah data primer, 2014)

Hasil perhitungan menggunakan *cross correlation* menghasilkan nilai korelasi tertinggi respon aliran mataair terhadap curah hujan pada jeda waktu jam ke 2. Kondisi tersebut juga ditunjukkan dengan melihat *time lag* rata-rata keseluruhan sampel kejadian banjir yang terjadi selama periode penelitian sebesar 2,03 jam. Selain itu, *time lag* yang ada untuk berbagai variasi curah hujan untuk keseluruhan kejadian banjir terpusat pada 0,5 – 3 jam. Jeda waktu yang cukup singkat dari awal kejadian hujan hingga adanya kenaikan debit aliran mataair tersebut mengindikasikan bahwa sistem akuifer Mataair Ngeleng memiliki respon cepat. Respon cepat inilah yang menggambarkan sudah berkembangnya sistem rekahan yang cukup besar (*Conduit* ataupun *fissure*) pada sistem akuifer Mataair Ngeleng.

Indikasi terdapatnya sistem rekahan pada akuifer daerah kajian secara lebih lanjut akan dijelaskan dengan menganalisis aliran debit mataair pada sisi resesi hidrograf aliran debit mataair dan pemisahan aliran dasar. Analisis tersebut akan memberikan informasi mengenai jenis komponen aliran yang dikeluarkan oleh sistem akuifer karst, sehingga dapat diketahui perkembangan akuifer karst daerah kajian. Terdapat 17 sampel banjir yang dianalisis dari

27 kejadian banjir yang tercatat pada periode penelitian ini. Penentuan sampel banjir didasari oleh lama waktu resesi dari puncak banjir hingga kembali pada aliran dasar ($t_b = \text{time to}$

baseflow). Oleh karena itu, banjir kecil dan memiliki waktu resesi pendek kurang baik untuk digunakan sebagai sampel dalam perhitungan.

Tabel 1. Hasil Perhitungan Konstanta Resesi, T_b dan T_p Mataair Ngeleng

No	Waktu		Debit Puncak (Lt/dt)	Kr Baseflow (Kb)	Kr interflow (Ki)	Kr Channel (Kc)	Tp (Jam)	Tb (Jam)	Persentase Baseflow (%)
	Tanggal	Jam							
1	11/11/2013	22:00	39.61	0.9970	0.7008	0.6016	4.5	13.0	78.22
2	14/11/2013	01:00	42.54	0.9931	0.5793	0.4488	5.0	12.0	76.28
3	15/11/2013	16:00	39.46	0.9968	0.5478	0.3269	7.0	42.5	86.91
4	17/11/2013	17:00	36.45	0.9974	0.4695		2.5	17.0	97.91
5	19/11/2013	07:00	51.67	0.9989	0.8247	0.3858	5.0	10.5	79.88
6	21/11/2013	01:00	158.72	0.9942	0.9573	0.6435	25.0	86.5	42.63
7	25/11/2013	03:30	72.09	0.9961	0.9365		4.5	15.0	54.49
8	11/12/2013	19:30	46.42	0.9966	0.8589	0.4566	4.0	12.0	77.04
9	20/12/2013	12:00	134.37	0.9925	0.6641	0.3807	10.5	69.0	42.00
10	5/1/2014	08:00	34.34	0.9967	0.6768		5.5	8.5	98.69
11	10/1/2014	00:00	34.21	0.9970	0.7701		4.5	9.0	97.04
12	15/1/2014	11:30	36.88	0.9974	0.5432		4.5	15.5	97.48
13	10/2/2014	22:30	67.66	0.9993	0.9165	0.2433	3.5	21.0	50.79
14	18/2/2014	21:30	34.34	0.9995	0.5695	0.4567	3.0	15.0	91.80
15	23/2/2014	21:30	40.73	0.9994	0.8940	0.6165	2.5	29.0	81.02
16	3/3/2014	11:30	33.80	0.9998	0.5056		3.0	13.0	92.81
17	12/4/2014	19:30	30.25	0.9979	0.8514	0.3743	5.0	20.5	97.81
Rerata				0.9970	0.7215	0.4486	5.9	24.1	78.99

Sumber: Hasil olah data primer, 2014

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 1. Mataair Ngeleng secara keseluruhan diketahui memiliki setiap komponen aliran yang menyuplai aliran resesi mataair, yaitu aliran *conduit*, *fissure*, dan *diffuse*. Komponen aliran *conduit* mataair ini memiliki julat konstanta resesi (K_c) 0,2433 – 0,6435 yang terdeteksi pada 11 kejadian banjir dari seluruh sampel banjir yang telah ditentukan. Nilai rata-rata dari variasi konstanta *conduit* sebesar 0,4486. Nilai konstanta tersebut memberikan makna bahwa komponen aliran *conduit* memiliki waktu konsentrasi paling pendek dalam menyuplai keseluruhan aliran mataair daripada komponen aliran lain. Kondisi ini turut dibuktikan dengan rentang waktu T_p (*Time to peak*) kejadian banjir yang bervariasi dari 2,5 – 25 jam dengan rata-rata dari keseluruhan banjir 5,9 jam. Waktu menuju puncak banjir yang cepat menunjukkan keikutsertaan suplai dari komponen aliran *conduit*. Hal tersebut didasari oleh sifat aliran *conduit* yang mempunyai respon yang cepat terhadap imbuhan yang masuk kedalam sistem aliran karst akibat adanya lorong-lorong batuan karbonat berdiameter cukup besar (Atkinson, 1977; Gunn, 1986, dalam Bonnaci, 1993). Selain itu keberadaan komponen aliran *conduit* juga dipengaruhi oleh kondisi fisik Mataair Ngeleng

yang bersifat terbuka (Oktama, 2014). Kejadian banjir yang terjadi dengan aliran mataair yang keruh (Gambar 5.) juga memperkuat indikasi adanya komponen aliran *conduit*.



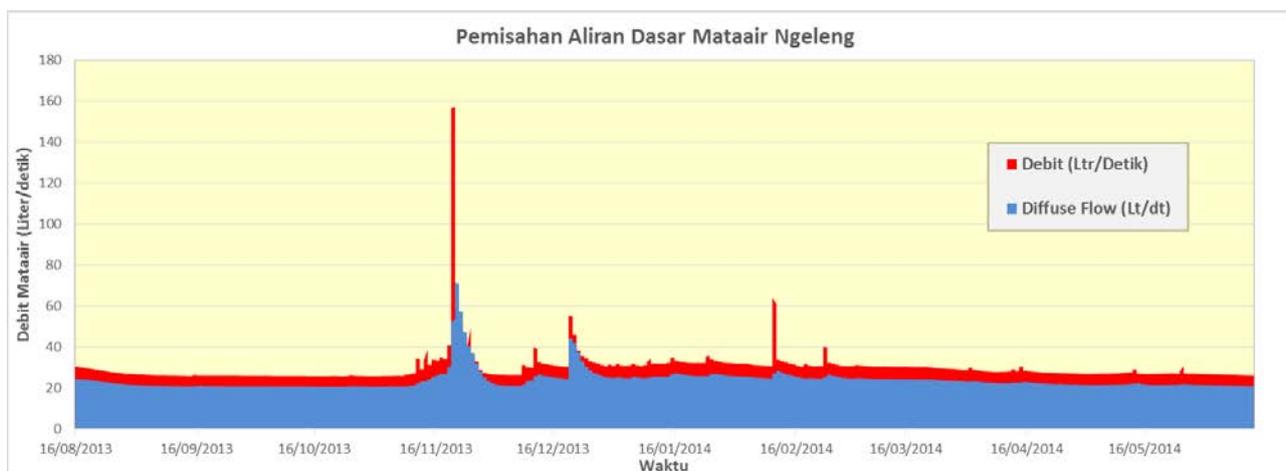
Gambar 5. a. Kondisi normal aliran mataair dan b. Kondisi aliran mataair yang keruh ketika banjir. (Sumber: Dokumentasi Lapangan, 2013-2014)

Keberadaan komponen aliran *fissure* yang ikut serta menyuplai aliran mataair terdeteksi disetiap kejadian banjir dari sampel yang ada. Komponen aliran ini memiliki julat koefisien resesi (K_i) 0,4695 – 0,9573 dengan rata-rata nilai K_i sebesar 0,7215. Rentang nilai K_i yang cukup bervariasi menunjukkan bahwa komponen aliran *fissure* pada Mataair Ngeleng memiliki waktu suplai terhadap aliran mataair yang bervariasi. Namun komponen aliran ini

memiliki waktu suplai yang lebih lama daripada komponen aliran *conduit* dan lebih pendek daripada komponen aliran *diffuse*.

Komponen aliran mataair yang terus-menerus mengisi aliran adalah komponen aliran *diffuse*. Aliran *diffuse* yang setara dengan *baseflow* memiliki nilai konstanta (K_b) 0,9925 – 0,9998 dengan rata-rata 0,9970 dari perhitungan keseluruhan sampel banjir. Nilai konstanta yang besar tersebut memberikan indikasi bahwa komponen aliran *diffuse* pada Mataair Ngeleng memiliki berkontribusi paling lama dalam menyuplai aliran mataair. Kondisi ini dibuktikan

dengan selalu adanya aliran mataair sepanjang tahun baik ketika musim hujan maupun ketika musim kemarau. Disisi lain T_b (*time to base*) yaitu waktu aliran dari puncak banjir menuju *baseflow* pada Mataair Ngeleng memiliki variasi waktu dari 8,5 – 86,5 jam dengan rata-rata T_b 24,1 jam. Durasi T_b yang cukup panjang dibandingkan dengan T_p memberikan informasi bahwa suplai aliran mataair tidak hanya didominasi oleh komponen aliran *diffuse/baseflow*. Komponen lain (*conduit* dan *fissure*) juga turut serta dalam memberikan masukan pada aliran Mataair Ngeleng.



Gambar 6. Hasil *Automated Baseflow Separation by Digital Filtering* Mataair Ngeleng. (Sumber: Olah data primer, 2014)

Menurut Eckhardt (2012) tujuan dari pemisahan aliran dasar adalah untuk membedakan komponen aliran dasar/*baseflow* dengan komponen aliran cepat/*quickflow*. *Quickflow* atau aliran cepat yang dimaksud pada kondisi ini adalah komponen aliran *conduit* dan *fissure*. Pemisahan aliran dasar dilakukan dengan metode *Automated Baseflow Separation by Digital Filtering* yang (Eckhardt, 2005 dalam Adji 2009). Eckhardt (2012) juga memberikan pemahaman bahwa dengan kondisi akuifer yang terbentuk dari media porus dan aliran yang mengalir sepanjang tahun, maka nilai BFI_{max} yang digunakan adalah 0,8. Sedangkan konstanta aliran dasar (K_b) Mataair Ngeleng sebesar 0,997 berdasarkan hasil perhitungan konstanta resesi sebelumnya. Pemisahan aliran dasar ini kemudian digunakan untuk mengetahui perbandingan aliran dasar dengan debit aliran mataair keseluruhan guna mengetahui perilaku komponen aliran dalam menyuplai aliran mataair. Hasil pemisahan aliran dasar Mataair

Ngeleng selama periode penelitian dapat diketahui pada Gambar 6.

Tabel 2. Persentase Aliran Dasar Bulanan Mataair Ngeleng

Bulan	Persentase Baseflow (%)	Musim
September	80.11	Kemarau
Oktober	80.03	Kemarau
November	79.79	Hujan
Desember	79.65	Hujan
Januari	79.89	Hujan
Februari	80.13	Hujan
Maret	80.26	Hujan
April	80.26	Hujan
Mei	80.02	Kemarau
Rata-rata	80.01	

Sumber: Olah data primer, 2014

Variasi presentase aliran dasar bulanan Mataair Ngeleng dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan tabel tersebut diketahui bahwa presentase aliran dasar bulanan Mataair Ngeleng memiliki rata-rata presentase aliran dasar 80,01 % selama periode penelitian. Rentang nilai

presentase yang tidak jauh berbeda antara 79,65 - 80,26 % menunjukkan kesetabilan imbuan dari aliran dasar dari akuifer mataair tersebut. Kondisi ini mengindikasikan dominasi dari aliran *diffuse* pada akuifer karst Mataair Ngeleng.

Tabel 2. di atas memberikan informasi terdapat pola pada komposisi dari persentase aliran dasar bulanan. Pada bulan November – Januari mengalami penurunan persentase aliran dasar dibawah nilai 80%. Perlu diketahui pada bulan-bulan tersebut merupakan bulan dengan curah hujan yang tinggi sehingga banyak dijumpai kejadian banjir. Hal tersebut tentu saja menguatkan bahwa pada bulan-bulan tersebut komponen aliran *conduit* dan *fissure* memiliki kesempatan yang lebih banyak dalam suplai aliran mataair dibandingkan dengan bulan-bulan lainnya. Menurunnya persentase aliran dasar pada bulan-bulan tersebut menunjukkan bahwa meningkatnya komponen aliran lain (komponen aliran *conduit dan fissure*) dalam suplai aliran mataair. Adji (2011) menjelaskan bahwa pada musim hujan presentase aliran dasar cenderung

menurun dan akan kembali naik seiring dengan berakhirnya musim hujan.

Nilai presentase aliran dasar (PAD) yang turun pada periode musim hujan mengindikasikan bahwa pasokan aliran lorong ataupun celah (*conduit dan fissure*) lebih mendominasi. Aliran cepat tersebut tentu saja merupakan respon dari adanya *recharge* pada periode musim hujan. Sehingga dengan dominasi aliran lorong dan celah tersebut, pasokan aliran dasar (*diffuse*) terhadap debit aliran mataair menjadi menurun. Secara umum dari periode musim hujan awal, tengah dan akhir dapat diketahui bahwa perilaku aliran dasar dan debit aliran mataair yang digambarkan dengan PAD memiliki perilaku yang berbeda dengan PAD bulanan. Perbedaan ini didasari oleh PAD keseluruhan sampel saat puncak banjir pada musim penghujan ini yang memiliki nilai dibawah 75 % dengan kisaran 28,23 – 74,90 %. Tabel 3. menunjukkan rasio antara beberapa sampel debit puncak banjir dan aliran dasar selama periode penelitian.

Tabel 3. Rasio Aliran Dasar dengan Debit Puncak Banjir Terpilih Mataair Ngeleng.

Periode Musim Hujan	No	Waktu		Debit Puncak Banjir (ltr/dtk)	Baseflow (ltr/dtk)	Persentase (%)	Rerata Persentase Aliran Dasar (%)
		Tanggal	Jam				
Periode Awal	1	11/11/2013	22:00	39.61	22.09	55.77	60.36
	2	14/11/2013	01:00	42.54	23.75	55.83	
	3	15/11/2013	16:00	39.46	25.17	63.80	
	4	17/11/2013	17:00	36.45	26.57	72.91	
	5	19/11/2013	07:00	51.67	27.65	53.52	
Periode Tengah	6	11/12/2013	19:30	46.42	24.70	53.22	62.16
	7	20/12/2013	12:00	134.37	37.93	28.23	
	8	1/1/2014	12:00	33.80	25.00	73.97	
	9	5/1/2014	08:00	34.34	25.05	72.93	
	10	10/1/2014	00:00	34.21	25.21	73.71	
Periode Akhir	11	15/1/2014	11:30	36.88	26.14	70.87	64.04
	12	10/2/2014	22:30	67.66	26.23	38.77	
	13	18/2/2014	21:30	34.34	24.72	71.98	
	14	23/2/2014	21:30	40.73	24.94	61.24	
	15	3/3/2014	11:30	33.80	24.79	73.33	
	16	12/4/2014	19:30	30.25	22.66	74.90	

Sumber: Olah data primer, 2014

Pola aliran dasar tidak mengikuti pola debit aliran mataair. Kenaikan aliran dasar pada seluruh kejadian banjir Mataair Ngeleng terjadi sesaat setelah debit aliran mataair mengalami penurunan dari puncak banjir. Meskipun demikian, hubungan PAD dengan debit aliran selama periode awal, tengah dan akhir musim hujan ini menunjukkan hubungan yang kuat.

Hubungan kuat tersebut didasari dari korelasi antara PAD dengan debit aliran ketika mengalami kenaikan debit (*rising limb*) dan ketika mengalami penurunan debit (*recession limb*) menunjukkan nilai determinasi (R^2) 0,88 – 0,99. Namun hubungan kedua variabel ini menunjukkan hubungan yang berbanding terbalik. Kenaikan PAD diimbangi dengan penurunan

debit aliran dan penurunan PAD merupakan konsekuensi dari kenaikan debit aliran.

KESIMPULAN

Berdasarkan temuan dan hasil pembahasan pada penelitian ini, maka dengan pertimbangan tujuan awal penelitian. Kesimpulan yang dapat diambil pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pola korelasi *recharge* berupa curah hujan dengan *discharge* berupa debit aliran mataair menunjukkan hubungan positif. Hubungan tersebut didasari dari korelasi sederhana antara dua variabel yang memiliki nilai korelasi (R) sebesar 0,630. Hasil sejalan juga ditunjukkan oleh metode *cross correlation*, dimana korelasi tertinggi antara *recharge* dan *discharge* berada pada jeda waktu (*time lag*) jam ke-2 dengan nilai korelasi ($r_{xy}(k)$) sebesar 0,281. Hasil metode tersebut dikuatkan oleh data faktual variasi temporal periode musim hujan dengan kenaikan awal debit mataair yang terjadi pada interval waktu 0,5 – 3 jam dari berbagai variasi besar curah hujan. Nilai rata-rata *time lag* dari kejadian banjir selama periode penelitian juga menunjukkan waktu jeda kenaikan debit selama 2,02 jam dari awal kejadian hujan. Oleh karena itu, dapat diartikan bahwa akuifer karst Mataair Ngeleng memiliki respon berupa kenaikan aliran debit mataair pada jeda waktu ± 2 jam dari awal kejadian hujan. Respon cepat tersebut mengindikasikan bahwa sistem akuifer karst Mataair Ngeleng memiliki komponen aliran cepat (*conduit* dan *fissure*) yang merupakan hasil dari perkembangan rekahan yang telah menjadi celah ataupun saluran yang lebih besar. Indikasi tersebut dikuatkan oleh hasil analisis komponen aliran pada hidrograf banjir selama periode penelitian.

2. Hasil analisis komponen aliran mataair Ngeleng menunjukkan bahwa mataair tersebut memiliki dominasi aliran *diffuse* (rembesan) dan sudah berkembangnya aliran *fissure* (celah) maupun *conduit* (saluran). Kondisi tersebut terlihat berdasarkan nilai konstanta resesi Mataair Ngeleng 0,9970 untuk rata-rata nilai konstanta resesi komponen aliran *diffuse* (Kb); 0,7215 untuk rata-rata nilai konstanta resesi komponen aliran *fissure* (Ki); dan 0,4486 untuk rata-rata nilai konstanta resesi komponen aliran *conduit* (Kc). Dominasi aliran *diffuse* pada mataair terlihat dari presentase aliran dasar (PAD) bulanan yang cenderung stabil pada angka 79,79 – 80,26 % selama periode penelitian. Keberadaan komponen aliran *fissure* dan *conduit* dibuktikan dengan besar

nilai PAD puncak banjir untuk keseluruhan kejadian banjir periode awal, tengah dan akhir musim hujan yang berada pada nilai < 75 % dengan nilai PAD terkecil 28,23 % dan tertinggi 74,90 %. Hubungan yang berbanding terbalik antara PAD dan debit aliran juga memberikan indikasi bahwa pada saat kenaikan debit mataair aliran dasar cenderung tertekan oleh adanya aliran cepat (*conduit* dan *fissure*). Indikasi ini memperkuat kesimpulan sebelumnya, sehingga dapat dikatakan bahwa sistem akuifer karst Mataair Ngeleng memiliki karakter respon debit yang cepat terhadap curah hujan yang disebabkan oleh sudah berkembangnya sistem akuifer pada batuan karbonat dengan indikasi adanya rekahan kecil (*diffuse*), celah (*fissure*) dan rekahan besar berupa saluran (*conduit*).

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T. N., *et al.* 2006. The Distribution Of Flood Hydrograph Recession Constant Of Bribin River For Gunung Sewu Karst Aquifer Characterization. *Dipublikasi ulang dari Gunung Sewu-Indonesian Cave and Karst Journal (Vol. 2. No.2)*
- Adji, T. N., 2009. Variasi Spasial-Temporal Hidrogeokimia dan Sifat Aliran Untuk Karakterisasi Sistem Karst Dinamis Di Sungai Bawah Tanah Bribin, Kabupaten Gunungkidul, DIY. *Desertasi*. Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.
- Adji, T.N., Hendrayana, H., Sudarmadji, dan Suratman, W., 2009. Diffuse Flow Separation Within Karst Underground River At Ngreneng Cave. *Proceeding of International Conference Earth Science and Technology, 6-7 Aug, Yogyakarta.*
- Adji, T. N. 2011. Pemisahan Aliran Dasar Bagian Hulu Sungai Bribin pada Aliran Gua Gilap, di Kars Gunung Sewu, Gunung Kidul, Yogyakarta. *Jurnal Geologi Indonesia*, Vol 6 No. 3, Hal. 165-175.
- Bonacci, O. 1993. Karst Springs Hydrographs as Indicators of Karst Aquifer. *Hydrological Science Journal des Sciences Hydrologiques*, 38, p51-62.
- Budge, T. J., 2009. Modeling the Usefulness of Spatial Correlation Analysis on Karst

Systems. *Ground Water Journal Wiley-Blackwell Vol: 47, no. 3 (Pages 427-437)*.

- Eckhardt K, 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* 19, 507-515.
- Eckhardt, K. 2012. Technical Note: Analytical Sensitivity Analysis Of A Two Parameter Recursive Digital Baseflow Separation Filter. *Hydrology Earth System. Sci.*, 16, 451–455, 2012 Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union.
- Fiorillo, F. dan Doglioni, A., 2010. The Relation Between Karst Spring Discharge and Rainfall By Cross-Correlation Analysis (Campania, southern Italy). *Hydrogeology Journal (2010) 18: 1881–1895, Springer-Verlag*.
- Hartono, 2008. *SPSS 16.0 Analisis Data Statistika dan Penelitian*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar.
- Oktama, R., 2014. Karakterisasi Akuifer Karst Mataair Ngeleng Dengan Pendekatan Variasi Temporal Sifat Aliran dan Hidrogeokimia. *Skripsi*. Fakultas Geografi, UGM
- Schulz, E.F. 1976. *Problems in Applied Hydrology*. Water Resources Publication, Colorado.
- Thomas, B.C., 2010. Comparison Of Two Physically-Based Spatially Distributed Hydrology Models In Contrasting Geo-Climatic Settings. *Thesis*. Faculty of Geo-information Science and Earth Observation (ITC).
- Zhang, Z., Chen, Xi, Chen X., dan Shi, P., 2013. Quantifying Time Lag of Epikarst-Spring Hydrograph Response to Rainfall Using Correlation and Spectral Analyses. *Hydrogeology Journal (2013) 21: 1619-1631 Springer-Verlag Berlin Heidelberg*.