Sitasi: **Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor**

No. Kontrak	LPPM-UGM/1158/2009 TANGGAL 19 MEI 2009
Bidang Ilmu	MIPA
Klaster	Sains dan teknik

**LAPORAN AKHIR KEGIATAN
HIBAH PENELITIAN UNTUK MAHASISWA PROGRAM DOKTOR
TAHUN ANGGARAN 2009**

**KARAKTERISASI PELEPASAN KOMPONEN ALIRAN PADA AKUIFER BERBATUAN GAMPING
SECARA SPASIAL UNTUK PENENTUAN ALIRAN MANTAP DI KAWASAN SULIT AIR KARST
GUNUNGSEWU, KABUPATEN GUNUNGKIDUL**

Tim Peneliti:

TJAHYO NUGROHO ADJI, S.Si, M.Sc. Tech

**FAKULTAS GEOGRAFI
UNIVERSITAS GADJAH MADA
2009**

Sitasi: **Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor**

**LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN
LAPORAN AKHIR KEGIATAN HIBAH PENELITIAN UNTUK MAHASISWA PROGRAM DOKTOR
TAHUN ANGGARAN 2009
(DANA DIPAA UGM)**

1.	Judul Penelitian	KARAKTERISASI PELEPASAN KOMPONEN ALIRAN PADA AKUIFER BERBATUAN GAMPING SECARA SPASIAL UNTUK PENENTUAN ALIRAN MANTAP DI KAWASAN SULIT AIR KARST GUNUNGSEWU, KABUPATEN GUNUNGKIDUL
2.	Judul Disertasi	KAJIAN VARIASI HIDROGEOKIMIA DAN SIFAT ALIRAN SUNGAI BAWAH TANAH UNTUK KARAKTERISASI PERILAKU SISTEM KARST DINAMIS (SKD) SEPANJANG SUNGAI BRIBIN
3.1	Ketua Peneliti	
	a. Nama Lengkap	Tjahyo Nugroho Adji, S.Si,M.Sc.Tech
	b. Jenis kelamin	Laki-laki
	c. NIP/Golongan	197201281998031001/III D
	d. Strata/Jabatan Fungsional	III D /Lektor Kepala
	e. Fakultas/Jurusan	Geografi/Geografi Lingkungan
	f. Perguruan Tinggi Asal	Universitas Gadjah Mada
	g. Bidang ilmu	Hidrologi Airtanah
	h. Alamat kantor	Fakultas Geografi UGM
	i. Telp/Faks/E-mail	(0274) 589595/ adji@geo.ugm.ac.id
3.2	Pembimbing Utama	Prof. Dr. Sudarmadji, M.Eng.Sc
3.3	Anggota pembimbing 1	Prof. Dr. Suratman, M.Sc
3.4	Anggota pembimbing 2	Dr. Ir. Heru Hendrayana, M.Sc
4	Program Studi S3	Geografi
5	Fakultas/Pasca Sarjana	Geografi
6	Jangka waktu penelitian	6 (enam) bulan
7	Lokasi Penelitian	Kab. Gunung Kidul
8	Jumlah dana Penelitian	47.500.000,- (empat puluh tujuh juta lima ratus ribu rupiah).

Mengetahui :

Dekan Fakultas Geografi UGM

Yogyakarta, November 2009

Ketua Peneliti

Prof. Dr. Suratman, M.Sc
NIP. 195406061982011001

Tjahyo N. Adji, M.Sc.Tech
NIP.197201281998031001

Menyetujui
Ketua Lembaga Penelitian dan
Pengabdian kepada Masyarakat UGM

Prof. Dr-Tech. Ir. Danang Parikesit, M.Sc.
NIP. 196506031990031002

RINGKASAN

Penelitian ini dilakukan pada 3 gua sepanjang Sungai Bawah Tanah Bribin, di wilayah karst Gunung Sewu, Kabupaten Gunung Kidul. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi parameter dari Sungai Bribin untuk mengkarakterisasi sifat akuifer karst. 3 logger pencatat tinggi muka air dipasang, yaitu di Gua Gilap, Bribin, dan Ngreneng. Selanjutnya, pengukuran debit aliran secara temporal pada saat-saat aliran minimum, rata-rata, dan banjir dilakukan untuk membuat kurva hubungan tinggi muka air dan debit, sehingga debit aliran sepanjang tahun dapat dihitung. Kemudian, beberapa banjir terseleksi sepanjang tahun dihitung nilai konstanta resesinya yang meliputi resesi aliran *diffuse* (K_c), resesi aliran *fissure* (K_i), dan resesi aliran *conduit* (K_c). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa Gua Gilap yang terletak pada bagian atas Sungai Bribin mempunyai respon banjir tercepat terhadap hujan. Perhitungan nilai resesi *diffuse* juga menunjukkan nilai yang terkecil ($K_b=0,994$), dibandingkan dengan Bribin (0,998), dan Ngreneng (0,997). Hal ini menunjukkan bahwa akuifer di sekitar Gua Gilap melepaskan simpanan airtanah lebih cepat dibanding 2 gua yang lain. Kebalikannya, Gua Bribin menunjukkan nilai tertinggi pada resesi *diffuse* (0,998) dan fakta ini ditunjukkan dengan nilai minimum debitnya pada puncak musim kemarau yang masih mencapai diatas 1500 liter/detik.

Kata kunci: karts, akuifer, konstanta resesi

ABSTRACT

This research is carried out within three caves along Bribin River, which is located in Gunung Sewu karst area, Gunung Kidul. The objective of this research is to identify some flood hydrograph properties of Bribin River with the intention of karst aquifer characterization. Water level data loggers are installed within three caves represent upper part, lower part, and leakage of Bribin River, which are Gilap, Bribin, and Ngreneng Cave, respectively. In addition, time series discharge measurement in correspond to minimum, average, and maximum flow events is conducted to formulate the Annual Stage Discharge Rating Curve. Thereby, the full year river hydrograph may be defined. Afterwards, by selecting several flood hydrograph events, the recession constant in each cave including diffuse flow recession (K_b), fissure flow (K_i), and conduit flow (K_c), is then calculated and compared in every caves. The result shows that Gilap Cave that represents the upper part of Bribin River confirms the quickest respond towards rainfall events. Also, this point specifies the least number of diffuse recession constant ($K_b=0.994$), compared to Bribin (0.998), and Ngreneng (0.997), means that the aquifer surrounding Gilap Cave release its groundwater storage faster than Bribin and Gilap Cave. On the contrary, Bribin Cave performs the highest value of diffuse recession constant (0.998) and this situation is confirmed by its dry season discharge that still above 1500 lt/second.

Keywords: karst, aquifer, recession constant

PRAKATA

Segala puji bagi Allah *Subhanahu wa ta'ala*, kita memuji-Nya, kita mohon pertolongan-Nya, kita mohon ampunan-Nya, dan kita berlindung kepada-Nya dari keburukan jiwa-jiwa dan amalan-amalan kami. Barang siapa yang diberi pertunjuk oleh Allah, maka tiada seorangpun yang bisa menyesatkannya, dan barang siapa disesatkan oleh Allah, maka tidak ada seorangpun yang bisa menunjukinya. Sebaik-baik perkataan adalah Kitab Allah, untuk itu penulis sangat menyadari bahwa hanya karena hidayah-Nya dan ijin-Nya-lah, penelitian yang mencoba mengurai sekelumit ilmu yang diturunkan melalui proses karstifikasi ini dapat terselesaikan. Semoga ilmu tersebut dapat memberikan manfaat dan kebaikan serta amalan yang baik bagi penulis.

Penelitian ini merupakan upaya penulis untuk mengungkap karakteristik aliran, cara pelepasannya, dan kondisi aliran dasarnya sebagai aliran andalan di musim kemarau sepanjang SBT Bribin. SBT Bribin dipilih atas dasar kedudukannya sebagai salah satu sungai bawah tanah dengan debit yang besar di kawasan karst Gunung Sewu, Kabupaten Gunung Kidul, serta adanya upaya akhir-akhir ini untuk memanfaatkannya secara lebih optimal. Penulis menyadari bahwa selama penyelesaian penelitian ini telah didukung dan dibantu oleh berbagai pihak. Untuk itu penulis juga tidak lupa mengucapkan banyak terima kasih kepada Rektor Universitas Gadjah Mada, Prof. Dr. Suratman, M.Sc selaku Dekan Fak. Geografi, Dr. Junun Sartohadi M.Sc., selaku Ketua Jurusan Geografi Lingkungan yang telah mendorong dan sekaligus memberikan ijin penulis untuk melakukan penelitian ini. Prof. Dr. Sudarmadji, M.Eng. Sc., Prof. Dr. Suratman Woro Suprodjo M.Sc, dan Dr. Heru Hendrayana M.Sc selaku promotor utama dan promotor pendamping yang telah memberikan dukungan, bimbingan, dan semangat selama penelitian ini. Kedua orang tuaku Djamijoen dan Sri Hardiyah yang dengan penuh kasih sayang memelihara saya sejak kecil hingga sekarang, serta Ibunda Satirah yang telah memberi dorongan mental dan fasilitas *basecamp* lapangan pada penulis untuk menyelesaikan penelitian ini. Istriku tercinta Wiwin Rahmanti, S.E.Akt., M.Com., yang selalu mendorong dan memberikan dukungan moral maupun material dalam menempuh dan penyelesaian penelitian ini. Anak-anakku tersayang M. Alif Al Tsaqiif, Zalfa Sabilathifa, dan Laila Az Zahra yang juga telah memberikan semangat melalui keceriaannya. Zaenuri Putro Utomo S.Si., dan Arie Purwanto yang telah membantu menyiapkan data, pengolahan data, dan kerja lapangan. Teman-teman pemerhati kawasan karst Dr. Eko Haryono, M.Si., Dra. Widyastuti M.T., Bagus Yulianto A.Md, Sunu Wijanarko, Cahyo Rahmadi, S.Si. serta teman-teman 'pasukan' dari ASC yang membantu instalasi alat-alat pengukuran sungai bawah tanah yaitu Imam, Dicky, Uji, Anggit, Iyek, Abe Rodhial, dan lain-lain. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada seluruh staf pengajar Fakultas Geografi UGM, laboran terutama dari Laboratorium Geohidrologi, Bapak Lili Ismangil, serta Badi Hariadi dan M. Misqi yang banyak membantu mendesain dan memasang alat ukur di lapangan, pegawai perpustakaan, Mahasiswa Pecinta Alam Fakultas Geografi UGM (GEGAMA), PDAM Gunung Kidul dan segenap pihak yang tidak dapat disebutkan semuanya dalam tulisan ini karena keterbatasan tempat.

Yogyakarta, November 2009

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	.....	ii
RINGKASAN	.....	iii
ABSTRACT	.....	iv
PRAKATA	.....	v
DAFTAR ISI	.....	vi
DAFTAR GAMBAR	.....	vii
DAFTAR TABEL	.....	viii
DAFTAR LAMPIRAN	.....	viii
 BAB I. PENDAHULUAN	.....	1
1.1. Latar Belakang	.....	1
1.2. Tujuan Khusus	.....	2
1.3. Manfaat Penelitian	.....	2
 BAB II. TINJAUAN PUSTAKA	.....	3
2.1. Akuifer Karst	.....	3
2.2. Hidrograf dan konstanta resesi	.....	4
 BAB III. METODE PENELITIAN	.....	8
3.1. Pemilihan lokasi gua yang dipasang alat	.....	8
3.2. Bahan dan alat penelitian	.....	8
3.3. Tahapan penelitian	.....	10
 BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	14
4.1. Variasi temporal aliran di Gua Gilap	.....	14
4.2. Variasi temporal aliran di Gua Bribin	.....	23
4.3.. Variasi temporal aliran di Gua Ngreneng	.....	30
4.4.. Pembahasan variasi spasial dan temporal Karakteristik Aliran SBT Bribin	.....	36
 BAB IV. KESIMPULAN DAN SARAN	.....	14
KESIMPULAN	.....	44
SARAN	.....	45
DAFTAR PUSTAKA	.....	46
LAMPIRAN	.....	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Perbedaan porositas di akuifer isotropik non-karst (kiri), dan anisotropik di akuifer karst ...	3
Gambar 2.2. <i>Diffuse</i> , <i>mixed</i> dan <i>conduit</i> aliran airtanah karst.....	4
Gambar 2.3. Bagian-bagian dari hidrograf banjir.....	5
Gambar 2.4. Pelepasan simpanan air akuifer sebagai komponen aliran.....	6
Gambar 3.1. Lokasi Pemasangan Alat	9
Gambar 3.2. <i>Data Logger</i> TMA	10
Gambar 3.3. Contoh Pengukuran debit aliran dengan current meter di sungai bawah tanah.....	11
Gambar 3.4. Hidrograf mata air karst pada satu kali kejadian hujan	12
Gambar 4.1. Kondisi Aliran Gua Gilap	14
Gambar 4.2. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Gua Gilap	15
Gambar 4.3. Variasi Debit Aliran Gua Gilap Periode 1 Mei 2006-30 April 2007.....	16
Gambar 4.4.a. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Gilap	
Gambar 4.4.b. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Gilap	18
Gambar 4.5. Fluktuasi Aliran Dasar Gua Gilap periode 1 Mei 2006-30 April 2007.....	18
Gambar 4.6. Pemasangan AWLR di Gua Bribin, dan <i>water level data logger</i>	23
Gambar 4.7. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Gua Bribin	24
Gambar 4.8. Variasi Debit Aliran Gua Bribin Periode 1 Mei 2006-30 April 2007	25
Gambar 4.9.a. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Bribin	
Gambar 4.9.b. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Bribin	27
Gambar 4.10. Fluktuasi Aliran Dasar Gua Bribin Periode 1 Mei 2006-30 April 2007	28
Gambar 4.11. Kondisi Aliran di Gua Ngreneng, dan Instalasi Stasiun Aliran	31
Gambar 4.12. Hubungan Tinggi Muka Air dan Debit di Gua Ngreneng	32
Gambar 4.13. Variasi Debit Aliran Gua Ngreneng Periode 1 Mei 2006-30 April 2007	32
Gambar 4.14. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Ngreneng	34
Gambar 4.15. Fluktuasi Aliran Dasar Gua Ngreneng Periode 1 Mei 2006-30 April 2007	35
Gambar 4.16. Rasio Aliran Dasar Bulanan Sepanjang SBT Bribin Mei 2006-April 2007	41
Gambar 4.17. Variasi Spasial dan Temporal Pelepasan Aliran oleh Akuifer Karst di SBT Bribin	43

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Gilap	15
Tabel 4.2. Konstanta Resesi, T_p dan T_b Hidrograf Banjir Terpilih Gua Gilap	20
Tabel 4.3. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Tiap Bulan Gua Gilap	22
Tabel 4.4. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran pada Kejadian Banjir Terpilih Gua Gilap	22
Tabel 4.5. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Bribin	24
Tabel 4.6. Konstanta Resesi, T_p dan T_b Hidrograf Banjir Terpilih Gua Bribin	26
Tabel 4.7. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Tiap Bulan Gua Bribin	29
Tabel 4.8. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran pada Kejadian Banjir Terpilih Gua Bribin	30
Tabel 4.9. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Ngreneng	31
Tabel 4.10. Konstanta Resesi, T_p dan T_b Hidrograf Banjir Terpilih Gua Ngreneng	33
Tabel 4.11. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Tiap Bulan Gua Ngreneng	35
Tabel 4.12. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Kejadian Banjir Terpilih Gua Ngreneng	36
Tabel 4.13. Ringkasan Julat Nilai Konstanta Resesi dan Paramater Banjir SBT Bribin	37
Tabel 4.14. Kondisi Komponen Aliran Akuifer Karst Atas Dasar Perbandingan Angka Paramater Hidrograf Banjir	40
Tabel 4.15. Persentase Aliran Dasar (PAD) Saat Kejadian Banjir	42

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Laporan Eksekutif Summary.....	L-1
Lampiran 2. Draft Poster Ilmiah	L-2

BAB I PENDAHULUAN

1.1. LATAR BELAKANG

Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) memperkirakan persediaan air sekitar 25 % penduduk dunia merupakan sumber air karst (Ko, 1984). Di seluruh wilayah kepulauan Indonesia, luas kawasan karst mencapai hampir 20% dari total luas wilayah (Balazs, 1968). Kondisi hidrologi di daerah karst dikenal unik dan mempunyai karakteristik yang sangat berbeda bila dibandingkan dengan kawasan lain karena dominasi proses pembentukan morfologi bawah permukaan karst oleh proses pelarutan atau karstifikasi (White, 1993). Hal ini mengakibatkan minimnya aliran permukaan dan lebih berkembangnya sistem aliran bawah permukaan berupa lorong-lorong dan sungai bawah tanah. Lorong-lorong dan sungai bawah tanah ini secara hidrogeologis dikenal sebagai porositas sekunder, yang oleh Gillieson (1996) disebut sebagai porositas lorong.

Wilayah selatan propinsi Daerah Istimewa Yogyakarta (DIY) hampir seluruhnya didominasi oleh daerah karst yang berbatuan gamping (Adji, et al, 1999; Adji dan Haryono, 1999; Haryono dan Adji, 2004) yang tercakup dalam dua wilayah administrasi yaitu sebagian besar berada pada wilayah Kabupaten Gunungkidul dan wilayah Kabupaten Bantul dalam presentase yang sangat kecil. Di wilayah ini ketergantungan penduduk akan ketersediaan aliran mantap/aliran dasar pada sungai bawah tanah sangat besar untuk mencukupi kebutuhan air domestik, terutama saat musim kemarau (Fandeli dan Adji, 2005; Adji dan Nurjani, 2009)

Meskipun demikian, sampai saat ini tidak terdapat satupun penelitian yang berkaitan dengan karakteristik akuifer batugamping ini kaitannya dengan pola pelepasan komponen-komponen aliran di akuifer karst. White (1988), Ford and Williams (1992), Smart and Hobbes (1986) serta Gillieson (1996) secara prinsip membagi karakteristik aliran pada akuifer karst menjadi tiga yaitu: (1) aliran lorong (*conduit*); (2) celah (*fissure*), dan (3) rembesan (*diffuse*). Aliran bertipe rembesan ini secara hidrologis disebut juga sebagai aliran dasar atau aliran mantap yang merupakan aliran andalan pada saat musim kemarau. Dengan pertimbangan tersebut, penelitian ini bermaksud untuk melakukan investigasi secara spasial untuk mengkarakterisasi pola pelepasan aliran dari akuifer karst pada beberapa lokasi yang berbeda yang kemudian dapat digunakan untuk melakukan pemisahan aliran dasar (*baseflow*

separation), sehingga diketahui distribusi debit andalan dan model pelepasan komponen aliran karst secara spasial.

1.2. TUJUAN KHUSUS

- Untuk mengetahui karakteristik akuifer karst secara spasial yaitu dari pelepasan komponen-komponen aliran *conduit*, *diffuse*, dan *fissure* melalui perhitungan konstanta resesi
- Menghitung secara spasial aliran mantap untuk keperluan penyediaan air domestik penduduk pada musim kemarau
- Sebagai studi awal dalam rangka menghitung banyaknya karbon yang dapat diserap oleh akuifer karst

1.3. MANFAAT PENELITIAN

Sampai saat ini belum ada penelitian baik yang dilakukan oleh penulis, komunitas penulis, serta ahli hidrologi karst lain di Indonesia yang tertarik dengan kajian bagaimana sebenarnya akuifer berbatuan gamping melepaskan komponen-komponen aliran lain yang dimilikinya. Bahkan, belum ditemukan penelitian yang mampu memisahkan seberapa besar prosentase aliran mantap akuifer karst selama periode waktu yang cukup panjang, meskipun aliran mantap ini senantiasa dijadikan andalan untuk pemenuhan kebutuhan air saat musim kemarau.

Jika karakteristik pelepasan komponen aliran oleh akuifer karst di Gunung Sewu dapat didefinisikan, maka tingkat perubahan atau pelebaran pelorongan karst yang mengontrol banyak sedikitnya aliran andalan saat kemarau akan dapat diprediksi, bahkan seberapa besar tingkat pelarutannya akan dapat dimodelkan, tentu saja dengan didukung data-data kimia air sungai bawah tanah yang sudah ada. Selanjutnya, secara spasial karakteristik akuifer karst yang meliputi sifatnya dalam melepaskan komponen aliran serta tingkat pelarutannya akan dapat digunakan untuk menentukan zona konservasi dan pemanfaatan batuan gamping didekat permukaan (epikarst).

BAB II.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Akuifer Karst

Karakterisasi akuifer karst oleh sebagian besar hidrolog dianggap tidak mudah karena sifatnya yang heterogen dan anisotropis (Ford and Williams, 1992). Oleh Blair (2004) hal ini malah dianggap sebagai suatu keunikan dibanding karakter pada jenis akuifer lain, karena kuatnya kontrol dari struktur geologi. Struktur yang dimaksud disini adalah karena sifat dan efek deformasi dari material batuan dasar. Batuan gamping di dekat permukaan tanah mempunyai kecenderungan terhadap terjadinya retakan, dan karena proses lanjut dari pelarutan air hujan kemudian membentuk retakan-retakan ke berbagai arah (*joint*) yang tidak beraturan atau yang dikenal sebagai *conduit* atau porositas sekunder (Hariadi dan Adji, 2009; Adji et al, 2009; Adji, 2006; Adji, 2005)

. Gambar 2.1 selanjutnya menunjukkan perbedaan antara porositas pada akuifer karst dan akuifer selain karst.

Gambar 2.1. Perbedaan porositas di akuifer isotropik non-karst (kiri), dan anisotropik di akuifer karst

Lebih jauh lagi, White (1988), Ford and Williams (1992), Smart and Hobbes (1986) serta Gillieson (1996) secara prinsip membagi sifat aliran pada akuifer karst menjadi tiga komponen yaitu :aliran saluran/lorong (*conduit*), celah (*fissure*), dan rembesan (*diffuse*). Sementara itu, oleh Domenico and Schwartz (1990), komponen aliran di akuifer karst hanya dibedakan menjadi dua yaitu komponen aliran rembesan (*diffuse*) dan saluran (*conduit*), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.2. Komponen aliran *diffuse* diimbuh oleh air infiltrasi

yang tersimpan pada bukit-bukit karst (Haryono, 2001) dan mengisi sungai bawah tanah karst sebagai tetesan dan rembesan pada ornamen gua. Komponen aliran ini bersifat *laminar* dan karakterisasinya dapat mengikuti hukum Darcy (White, 1993). Sementara itu, komponen aliran *conduit* mendominasi sungai bawah tanah terutama pada saat banjir dan responnya terhadap hujan hampir menyerupai sungai bawah tanah karena diimbuh oleh aliran permukaan yang masuk ke akuifer karst melalui ponor atau *sinkhole*. Sifat aliran ini adalah *turbulent* dan hukum Darcy tidak dapat diterapkan untuk mengkarakterisasinya (Jankowski, 2001).

Gambar 2.2. *Diffuse*, *mixed* dan *conduit* aliran airtanah karst (Domenico and Schwartz, 1990)

Karena keunikan sifat akuifer serta komponen alirannya, maka hampir semua penelitian hidrologi di akuifer karst tidak menggunakan metode penelitian yang bersifat deduktif (menggunakan distribusi sifat permukaan untuk mengkarakterisasi sifat alirannya), tetapi lebih cenderung menggunakan sifat penelitian *Quasi-Experimental Research* (Dane, 1990), dengan metode survei induktif pada sungai bawah tanah. Beberapa penelitian terdahulu yang menggunakan metode induktif diantaranya adalah Anthony *et al.* (1997), Karimi *et al.* (2004), Liu *et al.* (2004 a&b), Raeisi dan Karami (1997), serta Etfimi (2005). Penelitian-penelitian yang disebutkan ini diantaranya menggunakan pendekatan hidrogeokima pada titik-titik tertentu sungai bawah tanah, serta beberapa peneliti lain menggunakan metode hidrograf aliran dan respon aliran terhadap hujan untuk mengkarakterisasi perilaku akuifer karst.

2.2. Hidrograf dan konstanta resesi

Aliran air sebagai outlet dari badan air tertentu yang ada di daerah karst dapat berupa mataair ataupun sungai permukaan yang tidak terlalu panjang. Munculnya mataair disebabkan lapisan batugamping yang kontak dengan lapisan batuan impermeabel di bawahnya, misalnya

batuan breksi vulkanik. Respon yang ditangkap dari outlet tersebut divisualisasikan dalam bentuk hidrograf aliran yang mempunyai komponen *rising limb*, *crest*, dan *recession limb*, disamping itu juga ditandai dengan sifat pokok yaitu *time of rise*, *peak discharge*, dan *time base* (Suryanta, 2001). Hidrograf merupakan grafik yang menunjukkan keragaman limpasan (dapat juga tinggi muka air, kecepatan, beban sedimen, dan lain-lain) dengan waktu. Hidrograf memiliki jenis yang berbeda-beda tergantung dari tujuan penggunaannya dan umumnya hidrograf sendiri merupakan hubungan debit dengan waktu. Hujan yang terjadi ditunjukkan dengan adanya kurva yang mulai naik dan akan berhenti saat puncak yang ditandai hujan sudah mulai berhenti. Bagian yang naik ini disebut dengan *rising limb*, puncak yang disebut dengan *crest* atau *peak* dan bagian yang turun disebut dengan *recession limb*. Respon hidrograf yang ada tergantung dari kondisi fisik seperti tanah, kemiringan lereng, vegetasi dan kondisi iklim seperti intensitas hujan yang jatuh (Gambar 2.3).

Gambar 2.3. Bagian-bagian dari hidrograf banjir (Suyono, 2004)

Dimana:

Q_p : Puncak banjir (*crest*)

T_c : Waktu konsentrasi (*Time of concentration or time lag*)

Tp : Waktu mencapai puncak (*time to peak*)

Tb : Waktu dasar (*time base*)

Jika pada suatu aliran pada sungai bawah tanah dikenal tiga macam komponen aliran yaitu *diffuse*, *fissure*, dan *conduit*, maka hidrograf banjir pada sungai permukaan juga memiliki tiga komponen aliran utama yang identik yaitu aliran dasar (*baseflow*) yang setara dengan *diffuse*, aliran antara (*interflow*-setara *fissure*), dan aliran permukaan (*channel flow*-setara *conduit*) (Adji, 2006). Konsep ini diantaranya dikenalkan oleh Schulz (1976) yang menganggap suatu akuifer sebagai suatu media penyimpan air yang setelah kejadian banjir akan berangsur-angsur melepaskan tiga komponen simpanan airnya seiring fungsi waktu, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4.

Gambar 2.4. Pelepasan simpanan air akuifer sebagai komponen aliran (Schulz, 1976)

Kurva resesi (Gambar 2.4-atas) merupakan bagian dari suatu hidrograf banjir (Gambar 2.4-bawah) pada sungai bawah tanah setelah tidak ada hujan, sehingga debit aliran turun atau akuifer melepaskannya komponen alirannya. Slope atau kemiringan dari kurva resesi semakin menjauhi puncak banjir akan semakin datar karena aliran *conduit* sudah dilepaskan sehingga aliran *diffuse* menjadi dominan. Periode kurva resesi ini terus berlangsung sampai terjadi kejadian banjir lagi. Jika mengacu pada Gambar 2.2, pada periode kurva resesi ini terjadi tiga

kali pelepasan oleh masing-masing komponen aliran yaitu *diffuse*, *fissure*, dan *conduit*, yang jike kemudian kita namakan segmen resesi tentunya mempunyai slope yang berbeda-beda pula. Segmen resesi dapat dipilih dari suatu hidrograf banjir dapat dianalisis secara individu atau bersama-sama untuk memperoleh pemahaman komponen-komponen aliran yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran mantap (*baseflow*). Secara tradisional, analisis dilakukan dengan pendekatan grafikal tetapi pada saat ini lebih cenderung menggunakan model matematis. Masing-masing segmen resesi sering dianggap sebagai penurunan secara eksponensial, seperti halnya yang ada pada fenomena fisika seperti aliran panas, difusi, atau radioaktif, yang diformulasikan sebagai berikut :

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(1)$$

dimana Q_t is adalah debit aliran pada waktu t , Q_0 adalah debit awal pada segmen resesi, dan α adalah suatu konstanta. Selanjutnya, $e^{-\alpha}$ pada rumus (1) dapat diganti dengan k , yang oleh hidrolog dikenal sebagai konstanta resesi (*recession constant* atau *depletion factor*), yang jamak digunakan sebagai indikator keberlangsungan aliran dasar (Nathan and McMahon, 1990). Dari hasil penelitian, mereka membuat julat nilai konstanta resesi harian bervariasi dari 0,2-0,8 untuk *channel flow*; 0,7-0,94 untuk *intermediate flow*; dan 0,93-0,995 untuk *baseflow*. Semakin besar nilai konstanta resesi, maka dominasi aliran dasar (*baseflow*) pada sungai bawah tanah adalah semakin besar. Besarnya nilai konstanta resesi dapat digunakan sebagai indikasi dominasinya aliran dasar (*baseflow*) pada sungai bawah tanah (Smakhtin, 2001).

BAB III. METODE PENELITIAN

Karena sifat akuifer karst yang anisotropis (karakteristik porositas ke segala arah tidak sama) yaitu terkontrol oleh persebaran *conduit* dan tidak terdapatnya korelasi homogen dan gradual antara permukaan dan bawah permukaan, maka hampir semua penelitian hidrologi di akuifer karst tidak menggunakan metode penelitian yang bersifat deduktif (menggunakan distribusi sifat permukaan untuk mengkarakterisasi sifat alirannya), tetapi lebih cenderung menggunakan metode induktif dengan sifat penelitian yang mendekati *Quasi-Experimental Research* (Dane, 1990).

3.1. PEMILIHAN LOKASI GUA YANG DIPASANG ALAT

Karena gua-gua yang memungkinkan untuk dipasang alat pencatat perubahan tinggi muka air sepanjang S. Bribin sudah dilakukan pada penelitian sebelumnya, maka pada penelitian ini harus dipilih lokasi lain diluar S. Bribin, dengan maksud untuk membandingkan karakteristik pelepasan air dari akuifer dengan yang dialami akuifer sepanjang S. Bribin. Pada penelitian ini dipilih Gua Gilap yang mewakili daerah hulu, Gua Ngreneng yang mewakili aliran bocoran, dan Gua Bribin yang mewakili daerah hilir. Secara spasial, lokasi penelitian disajikan pada Gambar 3.1.

3.2. BAHAN DAN ALAT PENELITIAN

Bahan utama penelitian ini Peta Rupa Bumi (RBI) daerah penelitian skala 1:25.000, foto udara hitam putih daerah penelitian, serta peta tematik sungai bawah tanah dan sebaran gua oleh MacDonald and Partners (1984). Sementara itu, peralatan penelitian meliputi:

- stereoskop cermin
- perangkat keras (CPU, komputer, printer, monitor)
- *Hobo Water Level Data Logger* (3 buah)
- kompas Brunton dan Silva (2 buah)
- Single Rope Techniques (SRT) set untuk masuk ke gua
- Global Positioning System (GPS) (1 buah)

Sitasi: **Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor**

- penakar hujan otomatis (2 buah)
- kamera digital (1 buah)
- meteran (2 buah)
- *current meter* untuk menghitung kecepatan aliran (1 buah)

Gambar 3.1. Lokasi pemasangan alat (Gilap, Bribin, Ngreneng)

3.3. TAHAPAN PENELITIAN

1. Kerja pra-lapangan

- a) Identifikasi dan penentuan posisi alat; tahapan identifikasi ini menyangkut pembatasan daerah penelitian dengan maksud untuk menentukan batas geografis yang melingkupi obyek yang akan diteliti, dan kelayakan lokasi pemasangan alat
- b) Penentuan posisi alat pengukur tinggi muka air; tidak semua gua yang dilalui dipasang alat pengukur Tinggi Muka Air (*Hobo water level data logger*). Hal ini disebabkan karena instalasi alat pengukur Tinggi Muka Air (TMA) di sungai bawah tanah tidak sederhana dan membutuhkan ketrampilan khusus mengingat sulitnya medan dan tidak adanya cahaya alami. Penentuan lokasi alat pengukur TMA selanjutnya tergantung dari faktor-faktor kondisi segmen sungai yang memungkinkan, posisi spasial yang dapat mewakili hulu-hilir, keamanan, dan kemudahan akses.
- c) Penentuan posisi alat penakar hujan; mengingat sulitnya menentukan daerah tangkapan hujan yang ideal untuk bentang alam karst, maka posisi penakar hujan akan ditentukan berdasarkan pada luasan daerah penelitian dan keterwakilan terhadap topografi dari hulu ke hilir.

2. Kerja lapangan

- a) Pemasangan alat pencatat curah hujan dan pencatatan data selama 7 bulan.
- b) Pemasangan *water level data logger* atau Automatic Water Level Recorder (AWLR) untuk pencatatan TMA selama 1 tahun (± 3 titik), disajikan pada Gambar 3.2.

Gambar 3.2. Contoh *Data Logger* TMA yang dipasang di sungai bawahan tanah

- c) Pengukuran kecepatan aliran dan penampang basah pada semua lokasi yang dipasang alat pencatat TMA pada saat debit puncak, debit menengah, dan debit minimum untuk keperluan pembuatan *Stage Discharge Rating Curve* (± 3 titik), seperti yang disajikan pada Gambar 3.3.

Gambar 3.3. Contoh Pengukuran debit aliran dengan current meter di sungai bawah tanah

3. Kerja pasca lapangan

- i) Analisis korelasi dan regresi antara data TMA dan debit terukur untuk membuat *Stage Discharge Rating Curve*. Cara yang dipakai adalah cara sederhana berupa regresi linier dengan jumlah sampel kecil (Schulz, 1976).
- ii) Analisis Hidrograf. Analisis hidrograf yang dibuat adalah hidrograf tinggi muka air (*stage hydrograph*), hidrograf aliran (*annual discharge hydrograph*) sepanjang tahun, dan hidrograf banjir (*flood hydrograph*). Hidrograf-hidrograf ini kemudian disajikan secara grafikal sepanjang tahun atau pada saat banjir puncak dengan skala tertentu, kemudian dilakukan analisis data grafik hidrograf aliran per kejadian banjir terpilih yang meliputi *rising limb*, *crest* dan *recession limb*, serta sifat-sifat yang menyertainya seperti *time to rise*, *time of base*, *timelag*, dan *peak discharge* (Gambar 3.4.).
- iii) Menghitung konstanta resesi untuk aliran langsung, aliran antara dan aliran dasar pada beberapa kejadian banjir terpilih dengan formula:

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \dots\dots\dots(2)$$

dimana Q_t is adalah debit aliran pada waktu t , Q_0 adalah debit awal pada segmen resesi, dan α adalah suatu konstanta. Selanjutnya, $e^{-\alpha}$ pada rumus (1) dapat diganti dengan k , yang oleh hidrolog dikenal sebagai konstanta resesi (*recession constant* atau *depletion factor*), yang jamak digunakan sebagai indikator keberlangsungan aliran dasar (Nathan and McMahon, 1990). Kemudian, nilai k dibandingkan dengan klasifikasi resesi sungai bawah tanah karst oleh Worthington (1991, dalam Giliesson, 1996).

iv) Analisis pemisahan aliran dasar (*baseflow separation*) dan perhitungan aliran langsung sepanjang tahun. Metode pemisahan aliran dasar menggunakan *automated base flow separation by digital filtering method* (Eckhardt, 2005), yaitu mencari nilai *digital filtering* atas dasar nilai konstanta resesi pada kejadian hidrograf sepanjang tahun (Gambar 3.5). yang kemudian dihubungkan dengan nilai *base flow indices* (BFI) di akuifer karst, rumus yang digunakan adalah :

$$q_{b(i)} = \frac{(1 - BFI_{\max})aq_{b(i-1)} + (1 - a)BFI_{\max}q_i}{1 - aBFI_{\max}} \dots\dots\dots(3)$$

dimana $q_{b(i)}$ adalah *baseflow* pada saat i , $q_{b(i-1)}$ adalah *baseflow* pada waktu sebelumnya $i-1$, q_i adalah total aliran pada waktu i , a adalah konstanta resesi dan $BFI_{\max}$ adalah *baseflow* maksimum yang dapat diukur atau diketahui.

Gambar 3.4. Hidrograf mata air karst pada satu kali kejadian hujan (White, 1993)

Sitasi: Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor

Gambar 3.5. Pemisahan aliran dasar dengan metode *digital filtering* (Eckhardt, 2005)

BAB IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1. VARIASI TEMPORAL ALIRAN DI GUA GILAP

a. Hubungan tinggi muka air dan debit Gua Gilap

Gua Gilap merupakan pemunculan kedua dari Sungai Bribin setelah Luweng Jomblangan. Gua ini sering disebut sebagai "song" (Jawa-pen), karena bentuk guanya yang horisontal dan berada pada suatu *collapse doline* yang berukuran besar dengan diameter sekitar 200 meter. Beda tinggi antara puncak lembah dan muka air sungai di Gua Gilap mencapai sekitar 100 meter. Gua Gilap selalu berair sepanjang tahun (*perennial*) dan mempunyai morfometri alur sungai yang memungkinkan untuk dipasang alat pencatat tinggi muka air (*water level data logger*), sehingga kondisi aliran sepanjang tahun dapat tercatat (Gambar 4.1).

Gambar 4.1. Kondisi Aliran Gua Gilap (kiri) dan Instalasi Alat Pengukur Tinggi Muka Air

Untuk memperoleh variasi debit tahunan, diperlukan kurva hubungan tinggi muka air dan debit (*stage discharge rating curve*), yang dicari dengan melakukan pengukuran debit aliran pada saat debit kecil, rata-rata, dan besar, dari April 2006 sampai dengan Maret 2007, dan disajikan pada Tabel 4.1. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 4.2). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Gua Gilap dinyatakan sebagai:

$$y = 7,9129e^{2,7173x} \dots\dots\dots (4)$$

Keterangan:

y adalah debit aliran (liter/detik) dan x adalah tinggi muka air (m)

Tabel 4.1. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Gilap

No	Tanggal	TMA (m)	Debit aliran (liter/detik)
1	28/4/06	1,32	294,10
2	23/5/06	0,72	44,52
3	21/6/06	0,57	35,24
4	19/7/06	0,34	25,23
5	24/8/06	0,16	17,26
6	21/9/06	0,09	8,91
7	16/11/06	0,08	6,93
8	21/12/06	0,15	12,99
9	22/3/07	0,99	122,51

Gambar 4.2. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Gua Gilap

Hasil kurva hubungan tinggi muka air di Gua Gilap dengan debit alirannya tidak mempunyai hubungan linier karena sifat aliran sungai bawah tanah yang cenderung turbulen dan bukan laminar seperti halnya yang dijumpai pada sungai permukaan. Selanjutnya, rumus (4) digunakan untuk menghitung debit aliran sepanjang tahun pada alat pencatat tinggi muka air yang dipasang di Gua Gilap. Tinggi muka air yang tercatat di Gua Gilap mempunyai interval pencatatan tiap 30 menit. Hasil penggambaran variasi debit aliran Gua Gilap selama satu tahun (Mei 2006 sampai dengan April 2007) disajikan pada Gambar 4.3.

Gambar 4.3. Variasi Debit Aliran Gua Gilap Periode 1 Mei 2006-30 April 2007

Pada penelitian ini, kondisi debit aliran Gua Gilap diasumsikan mewakili SBT Bribin bagian atas, karena posisinya ada di sebelah hulu daerah tangkapan hujan SBT Bribin. Menurut MacDonald and Partners (1984), sepanjang tahun Gua Gilap selalu dialiri air dan memiliki debit minimum sebesar sekitar 6 liter/detik yang terjadi pada puncak musim kemarau. Hasil pencatatan dari 1 Mei 2006 sampai dengan 30 April 2007 menunjukkan bahwa debit minimum dijumpai pada tanggal 7-8 Desember 2006, sebesar 3 liter/detik. Periode tanpa kejadian hujan yang diindikasikan dengan tidak terdapatnya kenaikan debit aliran terjadi dari tanggal 30 Mei sampai dengan 8 Desember 2006. Pada rentang waktu tersebut, secara teori tidak ada kejadian hujan sehingga komponen pengisi aliran sungai bawah tanah didominasi oleh aliran *diffuse*, terutama pada periode bulan Agustus-Desember 2006.

Periode banjir (*flood pulse period*) dimulai sejak tanggal 13 Desember 2006 sampai akhir masa pencatatan (30 April 2007). Pada kurun waktu tersebut tercatat 41 kali kejadian banjir yang merupakan efek dari terjadinya hujan pada daerah tangkapan Gua Gilap. Beberapa banjir yang cukup besar dua diantaranya adalah yang terjadi pada tanggal 31 Desember 2006, dengan debit puncak sebesar 252 liter/detik pada pukul 07.00 WIB, dan banjir pada tanggal 23 Maret 2007, pukul 08.30 dengan debit puncak mencapai 380 liter/detik.

b. Konstanta Resesi Hidrograf Banjir Gua Gilap

Konstanta resesi (*recession constant* atau *depletion factor*) dapat digunakan untuk mengetahui karakteristik akuifer karst dalam melepaskan komponen-komponen aliran sungai bawah tanah. Model yang dipakai adalah model tangki (*tank model*) yang dikenalkan oleh Schulz (1976). Aplikasi model resesi ini dapat digunakan untuk menghitung nilai konstanta

resesi saluran/*conduit* (K_c), konstanta resesi aliran antara/*fissure* (K_i), dan konstanta aliran dasar/*baseflow* (K_b).

Pada gua-gua yang dilewati sungai bawah tanah sistem Bribin termasuk salah satunya adalah Gua Gilap, terjadi puluhan kali banjir pada periode satu musim hujan, sedangkan analisis tidak dilakukan pada semua kejadian banjir. Pemilihan banjir yang dianalisis didasarkan pada keterwakilan nilai waktu dari puncak banjir sampai aliran normal ($T_b = \text{time to baseflow}$) sehingga banjir-banjir yang kecil atau sangat pendek dapat diabaikan karena secara matematis tidak valid jika dipaksakan diukur konstanta resesinya (Schulz, 1976). Konstanta resesi banjir terpilih pada berbagai komponen aliran dicari dengan persamaan:

$$Q(t) = Q(t_o) e^{-k(t-t_o)} \dots\dots\dots(5)$$

k adalah konstanta resesi pada suatu sistem akuifer, t adalah waktu pada debit ke t , dan t_o adalah waktu pada debit awal resesi. Kemudian jika pada skala semi-log rumus ini dianggap linier, maka:

$$\ln Q(t) = -k(t - t_o) + \ln Q(t_o) \dots\dots\dots(6), \text{ atau}$$

$$k = -1/t - t_o \ln (Q/Q_o) \dots\dots\dots(7)$$

Dari 41 kejadian banjir kemudian terpilih 16 kejadian banjir yang debitnya mencukupi dan waktu resesinya cukup panjang sesuai yang disyaratkan oleh Schulz (1976). Selanjutnya, grafik tiap kejadian banjir terpilih yang sudah dipisahkan komponen aliran dasarnya (*baseflow*) pada skala logaritma disajikan pada Gambar 4.4.a. dan 4.4.b.

Dari Gambar 4.4. a. dan 4.4.b. tampak bahwa masing-masing kejadian banjir memiliki karakteristik kurva resesi yang berbeda-beda, terlihat dari bentuk kurva resesi yang dikenali dari debit puncak menuju ke aliran dasar. Perbedaan tersebut terlihat dalam parameter waktu resesi dari debit puncak menuju aliran dasar (*time to baseflow* = T_b), dan waktu dari aliran dasar menuju debit puncak (*time to peak* = T_p). Selain itu, kemiringan kurva resesi juga terlihat berbeda-beda pada tiap kejadian banjir yang diakibatkan faktor perbedaan karakteristik hujan pada daerah tangkapan yang tidak selalu seragam secara spasial dari waktu ke waktu (Schulz, 1976). Akibatnya, hal ini berpengaruh pada hasil perhitungan nilai konstanta resesi banjir K_c , K_i , maupun K_b (Tabel 4.2.).

Sitasi: Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor

Gambar 4.4.a. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Gilap

Lanjutan Gambar 4.4.b. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Gilap

Secara umum, Nathan and McMahon (1990) menjelaskan bahwa julat nilai konstanta resesi untuk saluran (K_c) adalah 0,2-0,8; aliran antara (K_i) adalah 0,7-0,94; dan aliran dasar (K_b) berkisar 0,93-0,995. Dari perhitungan yang sudah disajikan pada Tabel 4.5. diketahui bahwa nilai K_c periode banjir di Gua Gilap mempunyai julat antara 0,14-0,88 dengan nilai rerata sebesar 0,463, sedangkan nilai K_i berjulat 0,39-0,92 dengan rerata 0,767, dan julat konstanta resesi aliran dasar (K_b) menunjukkan variasi antara 0,94-0,99 dengan nilai rata-rata sebesar 0,996. Pembahasan mengenai nilai konstanta resesi banjir akan disajikan pada subbab

berikutnya dan akan dilakukan analisis secara spasial antara ketiga gua yang memiliki stasiun aliran (Gua Gilap, Gua Bribin, dan Gua Ngreneng).

Tabel 4.2. Konstanta Resesi, T_p dan T_b Hidrograf Banjir Terpilih Gua Gilap

No	Waktu		Debit puncak(lt/dt)	Kr Baseflow (K_b)	Kr Interflow (K_i)	Kr channel (K_c)	T_p (jam)	T_b (jam)
	tanggal	jam						
1	13/12/06	19:00	99,5	0,992	0,609	0,374	3,5	12
2	22/12/06	15:30	72,7	0,998	0,838	0,428	1,5	22
3	31/12/06	06:30	254,3	0,978	0,621	0,144	4	186
4	16/2/07	16:30	101,2	0,993	0,733	0,178	1,5	10
5	24/2/07	19:00	208,0	0,998	0,737	0,395	3	14
6	26/2/07	18:00	227,4	0,941	0,749	0,197	3	192
7	6/3/07	21:00	153,4	0,999	0,876	0,256	3	24
8	9/3/07	19:00	96,7	0,999	0,829	0,567	2	20
9	14/3/07	02:00	81,1	0,999	0,619	0,002	2	10
10	19/3/07	00:00	137,3	0,998	0,759	0,326	2	14
11	21/3/07	08:00	100,5	0,999	0,660	0,541	5	7
12	23/3/07	08:00	381,4	0,997	0,889	0,522	4,5	24
13	7/4/07	01:30	182,6	0,999	0,926	0,503	2,5	8
14	10/4/07	18:00	261,6	0,997	0,922	0,327	3,5	7
15	11/4/07	15:00	142,7	0,999	0,725	0,678	2	10
16	16/4/07	23:30	258,4	0,991	0,918	0,781	5,5	15

Perhitungan nilai *time to peak* (T_p) yaitu lama waktu yang dibutuhkan oleh aliran sungai bawah tanah dari debit normal untuk mencapai puncak banjir di Gua Gilap berkisar antara 1,5 sampai dengan 5 jam sejak hujan mulai turun di daerah tangkapan dengan rata-rata waktu adalah sekitar 3 jam untuk mencapai banjir puncak, dengan rerata waktu resesi yang diperlukan dari puncak banjir untuk mencapai aliran dasar (T_b) adalah sekitar 36 jam.

c. Pemisahan Aliran Dasar Gua Gilap

Pemisahan aliran dasar dilakukan untuk mengetahui persentase komponen aliran yang mensuplai aliran SBT tergantung dari kondisi pelepasan komponen air dari akuifer karst. Dua jenis aliran yang dipisahkan adalah (1) aliran langsung dan aliran antara (*conduit-fissure*); dan (2) aliran dasar (*diffuse flow*). Karena panjangnya data debit tiap 30 menit secara *time series* selama periode satu tahun pemasangan alat di Gua Gilap, maka digunakan cara pemisahan aliran dasar secara otomatis yaitu model *automated base flow separation by digital filtering method* yang dikembangkan oleh Eckhardt (2005), seperti yang sudah dijelaskan pada Rumus (3). Data utama yang diperlukan adalah data konstanta resesi aliran dasar Gua Gilap (K_b) atau oleh Eckhardt disebut digital filtering yang nilai reratanya adalah sebesar 0,996. Nilai BFI_{max}

yang digunakan adalah 0,8 karena sifat akuifer karst yang porus dan alirannya menahun (Eckhardt, 2005). Hasil pemisahan aliran dasar Gua Gilap disajikan pada Gambar 4.5. dan persentase bulannya disajikan pada Tabel 4.3.

Gambar 4.5. Fluktuasi Aliran Dasar Gua Gilap periode 1 Mei 2006-30 April 2007

Dari perhitungan rasio total aliran dasar bulanan terhadap total aliran (Tabel 4.6), tampak bahwa secara umum nilai rasionya mendekati angka sekitar 80%. Hal ini disebabkan oleh sifat pelepasan aliran akuifer karst yang didominasi oleh retakan bertipe *diffuse*. Jika dibandingkan antara musim penghujan dan kemarau, terlihat perbedaan mengecilnya dominasi *diffuse flow* yang diakibatkan oleh adanya banjir yang memicu pelepasan komponen aliran *conduit* menuju sungai bawah tanah. Jika dicermati karakteristik temporalnya, nampak bahwa semakin menuju ke puncak musim kemarau, dominasi aliran dasar semakin besar karena berkurangnya aliran *conduit* dan *fissure* yang dilepaskan oleh akuifer karst di sekitar Gua Gilap.

Rasio aliran dasar dan total aliran pada musim penghujan pada bulan-bulan tertentu menunjukkan angka yang lebih kecil dibandingkan pada musim kemarau, dan mempunyai kecenderungan membesar seiring dengan berakhirnya musim hujan (Maret-April 2007). Sebagai contoh rasio pada bulan Februari 2007 menunjukkan angka 77,49 % yang berarti total alirannya terpengaruh kontribusi dari aliran *conduit*. Rasio yang disajikan pada Tabel 4.6 merupakan nilai rata-rata bulanan, sehingga tidak menunjukkan rasio per kejadian hujan. Rasio aliran dasar dan total aliran tiap kejadian banjir terpilih di Gua Gilap disajikan pada Tabel 4.4.

Tabel. 4.3. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Tiap Bulan Gua Gilap

No	Bulan	Rasio (%)	musim
1	Mei 2006	80,41	kemarau
2	Juni 2006	80,47	kemarau
3	Juli 2006	80,93	kemarau
4	Agustus 2006	81,66	kemarau
5	September 2006	81,77	kemarau
6	Oktober 2006	82,09	kemarau
7	November 2006	82,36	kemarau
8	Desember 2007	80,11	hujan
9	Januari 2007	84,86	hujan
10	Februari 2007	77,49	hujan
11	Maret 2007	82,94	hujan
12	April 2007	82,85	hujan

Tabel. 4.4. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran pada Kejadian Banjir Terpilih Gua Gilap

No	Waktu banjir		Debit puncak (liter/detik)	Rasio (%)	Periode hujan
	Tanggal	Jam			
1	13/12/06	19:00	99,5	45,08	Awal
2	22/12/06	15:30	72,7	55,52	Awal
3	31/12/06	06:30	254,3	57,75	Awal
4	16/2/07	16:30	101,2	57,25	Tengah
5	24/2/07	19:00	208,0	51,25	Tengah
6	26/2/07	18:00	227,4	58,55	Tengah
7	6/3/07	21:00	153,4	79,91	Akhir
8	9/3/07	19:00	96,7	78,18	Akhir
9	14/3/07	02:00	81,1	78,92	Akhir
10	19/3/07	00:00	137,3	72,75	Akhir
11	21/3/07	08:00	100,5	77,20	Akhir
12	23/3/07	08:00	381,4	50,88	Akhir
13	7/4/07	01:30	182,6	70,33	Akhir
14	10/4/07	18:00	261,6	62,94	Akhir
15	11/4/07	15:00	142,7	76,30	Akhir
16	16/4/07	23:30	258,4	73,80	Akhir

Sumber : hasil analisis data 2006-2007

Rasio komponen aliran *diffuse* pada saat banjir terhadap total aliran Gua Gilap sangat berbeda dengan rasio bulanannya. Pada awal sampai tengah musim hujan, rasio selalu kurang

dari 60% yaitu berkisar antara 45-58%, bahkan pada kejadian banjir pertama kali (13 Desember 2006), rasio menunjukkan angka yang kecil yaitu 45,08%. Hal ini mengindikasikan bahwa akuifer karst belum menambah pasokan komponen *diffuse flow* menuju sungai, sementara pasokan *conduit flow* dari permukaan karst menjadi dominan saat kejadian banjir. Dari waktu ke waktu kecenderungan rasio *diffuse flow* mengalami peningkatan, kecuali pada kejadian banjir yang sangat besar (23 Maret 2007). Selanjutnya, semakin mendekati akhir musim hujan rasio aliran dasar akan kembali mendekati kisaran 80 %.

4.2. Variasi temporal aliran di Gua Bribin

a. Hubungan tinggi muka air dan debit di Gua Bribin

Gua Bribin pada penelitian ini dianggap sebagai pemunculan terakhir Sungai Bribin sebelum akhirnya muncul sebagai *resurgence* di Pantai Baron. Pada gua ini, lorong gua bertemu dengan Sungai Bribin akan dijumpai bendung untuk pengambilan air, sehingga di tempat ini relatif mudah untuk memasang alat pencatat tinggi muka air (Gambar 4.6.).

Gambar 4.6. Pemasangan AWLR di Gua Bribin (kiri), dan *water level data logger* (kanan)

Analisis kurva hubungan tinggi muka air dan debit dilakukan dengan menggunakan kurva yang sudah dipublikasikan oleh Suryanta (2001), yang data pengukurannya disajikan pada Tabel 4.5. dan grafiknya ditunjukkan pada Gambar 4.7.

Tabel 4.5. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Bribin

No	Tanggal pengukuran	Tinggi muka air (m)	Debit aliran (liter/detik)
1	18/1/00	0,98	1297,19
2	28/1/00	1,06	1277,65
3	5/2/00	1,61	1939,94
4	20/2/00	1,37	1605,24
5	23/2/00	1,27	1480,61
6	4/3/00	1,10	1346,78
7	8/3/00	0,80	1001,15
8	13/3/00	1,33	1571,08
9	18/3/00	0,80	923,67
10	22/3/00	0,97	1176,54
11	27/3/00	1,36	1732,06
12	1/4/00	0,86	1027,89
13	10/4/00	0,87	979,63
14	25/4/00	1,44	1743,91
15	30/4/00	0,94	1123,09

Sumber : Suryanta (2001)

Gambar 4.7. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Gua Bribin

Rumus lengkung aliran di Gua Bribin adalah :

$$y = 1204,5 x^{1,0103} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

y adalah debit aliran (liter/detik) dan x adalah tinggi muka air (m).

Rumus tersebut digunakan untuk menghitung debit aliran sepanjang tahun pada alat pencatat tinggi muka air yang dipasang di Gua Bribin, dengan tinggi muka airnya dicatat tiap interval waktu 30 menit. Hasil penggambaran variasi debit aliran Gua Bribin selama satu tahun disajikan pada Gambar 4.8.

Gambar 4.8. Variasi Debit Aliran Gua Bribin Periode 1 Mei 2006-30 April 2007

Pencatatan debit pada periode 1 Mei 2006 sampai dengan 30 April 2007 menunjukkan bahwa debit minimum terjadi pada 4 Desember 2006 yaitu sekitar 1630 liter/detik, sedangkan puncak banjir terbesar tercatat pada 23 Maret 2007 sebesar 2520 liter/detik. Periode aliran dasar terjadi antara Juni dan Desember 2006, sedangkan periode banjir dimulai sejak 4 Desember 2006 sampai akhir masa pencatatan (30 April 2007), dan masih menunjukkan kecenderungan berlanjut. Pada kurun waktu tersebut tercatat sekitar 58 kali kejadian banjir yang merupakan efek dari terjadinya hujan pada daerah tangkapan. Beberapa banjir yang cukup besar diantaranya terjadi pada tanggal 30 Desember 2006, dengan debit puncak sebesar 2443 liter/detik pada pukul 17.00 WIB, kejadian banjir pada tanggal 22 Maret 2007, pukul 21.00 dengan debit puncak mencapai 2440 liter/detik, serta banjir pada 23 Maret 2007, pukul 12.30 sebesar 2520 liter/detik.

b. Konstanta resesi hidrograf banjir di Gua Bribin

Sungai bawah tanah di Gua Bribin mengalami total 58 kali kejadian banjir, selama periode Mei 2007 sampai dengan April 2008 yang kemudian dipilih 12 kejadian banjir yang mempunyai debit besar dan waktu resesi yang cukup untuk dibuat model perhitungan konstanta resesinya. Grafik tiap kejadian banjir terpilih yang sudah dipisahkan komponen aliran dasarnya (*baseflow*) disajikan pada Gambar 4.9. Pada grafik tersebut disajikan skala normal mengingat rata-rata debit banjir yang berkisar antara 1600 sampai dengan 2300

liter/detik, akan tidak terlihat jika disajikan pada skala logaritmik. Sementara itu, perhitungan nilai konstanta resesi banjir K_c , K_i , maupun K_b sungai bawah tanah di Gua Bribin disajikan pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6. Konstanta Resesi, T_p dan T_b Hidrograf Banjir Terpilih Gua Bribin

No	Waktu		Debit puncak (liter/detik)	Kr <i>Baseflow</i> (K_b)	Kr <i>Interflow</i> (K_i)	Kr <i>channel</i> (K_c)	T_p (jam)	T_b (jam)
	Tanggal	jam						
1	6/12/06	22:30	1667,8	0.999	0.767	0.646	4.5	11
2	7/12/06	23:00	1660,5	0.998	0.668	0.018	6.5	124
3	13/12/06	19:30	2120,5	0.995	0.667	0.445	5.5	13
4	29/12/06	00:30	2273,2	0.999	0.929	0.502	9.5	5
5	30/12/06	17:00	2445,6	0.998	0.698	0.304	7.5	168
6	16/2/07	18:00	1884,9	0.997	0.950	0.001	4.5	13
7	22/2/07	21:00	2440,7	0.996	0.869	0.273	6.5	17
8	23/2/07	20:00	2272,0	0.999	0.897	0.435	6	18
9	28/2/07	01:30	2113,2	0.999	0.908	0.300	2	24
10	7/3/07	05:00	1805,6	0.999	0.779	0.292	4	9
11	7/4/07	22:00	1936,1	0.999	0.912	0.242	4	16
12	27/4/07	20:00	1819,0	0.999	0.850	0.519	5	14

Sumber : Pengukuran lapangan dan analisis data tahun 2006-2007

Dari perhitungan yang disajikan pada Tabel 4.6. diketahui bahwa nilai K_c priode banjir di Gua Bribin mempunyai julat antara 0,002–0,519 dengan rerata sebesar 0,332. Nilai K_i berjulat 0,002–0,95 dengan rerata 0,825, sedangkan julat konstanta resesi aliran dasar (K_b) tidak begitu menunjukkan variasi dengan nilai rata-rata sebesar 0,998. Selanjutnya, perhitungan nilai *time to peak* (T_p) yaitu lama waktu yang dibutuhkan oleh aliran sungai bawah tanah pada debit normal untuk mencapai puncak banjir di Gua Bribin berkisar antara 2 sampai dengan 9,5 jam sejak hujan mulai turun di daerah tangkapan dengan rata-rata waktu adalah 5,5 jam, sedangkan rerata waktu resesi yang diperlukan dari puncak banjir mencapai aliran dasar (T_b) sekitar 36 jam.

Sitasi: **Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor**

Gambar 4.9. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Bribin

Sitasi: Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor

Lanjutan Gambar 4.9. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Bribin

c. Pemisahan aliran dasar Gua Bribin

Data utama untuk pemisahan aliran dasar diperoleh dari perhitungan konstanta resesi aliran dasar Gua Bribin (K_b) yang nilai reratanya adalah sebesar 0,998. Sementara itu, nilai BFI_{max} yang dipergunakan adalah sama dengan nilai di Gua Gilap yaitu sebesar 0,8. Selanjutnya, hasil pemisahan aliran dasar Gua Bribin disajikan pada Gambar 4.10. dan rincian persentase bulanannya disajikan pada Tabel 4.7.

Gambar 4.10. Fluktuasi Aliran Dasar Gua Bribin Periode 1 Mei 2006-30 April 2007

Persentase bulanan rasio aliran dasar dan aliran total di Gua Bribin menunjukkan angka yang tinggi yaitu pada kisaran 97-99%, artinya terdapat dominasi aliran dasar sebagai komponen aliran pengisi sungai bawah tanah. Pada musim kemarau, rasio aliran menunjukkan

kecenderungan yang semakin meningkat dari bulan Mei sampai dengan November 2006, dan mencapai rasio terbesar pada November 2006 yaitu sebesar 99,40%. Dimulainya musim hujan pada Desember 2006 menyebabkan turunnya persentase aliran dasar menjadi dari sekitar 99% menjadi dibawah 97% yang kemudian berfluktuasi selama bulan-bulan musim penghujan (Januari-April 2007), dengan kisaran yang selalu lebih kecil dari kisaran pada bulan-bulan di musim kemarau. Rasio aliran dasar dan total aliran tiap kejadian banjir terpilih di Gua Bribin disajikan pada Tabel 4.8.

Tabel. 4.7. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Tiap Bulan Gua Bribin

No	Bulan	Rasio (%)	Musim
1	Mei 2006	97,03	kemarau
2	Juni 2006	98,40	kemarau
3	Juli 2006	98,53	kemarau
4	Agustus 2006	98,64	kemarau
5	September 2006	98,70	kemarau
6	Oktober 2006	99,14	kemarau
7	November 2006	99,40	kemarau
8	Desember 2007	97,44	hujan
9	Januari 2007	98,87	hujan
10	Februari 2007	97,22	hujan
11	Maret 2007	97,07	hujan
12	April 2007	98,26	hujan

Sumber : hasil analisis data 2006-2007

Dari 12 kali kejadian banjir terpilih di Gua Bribin, rata-rata rasio komponen aliran dasar dan total aliran sekitar 90,36%, lebih kecil dari rata-rata rasio bulanannya, yang disebabkan oleh kontribusi aliran *conduit* pada waktu kejadian banjir. Persentase aliran dasar terkecil saat banjir dijumpai pada banjir berdebit puncak besar, diantaranya banjir pada 22 Februari 2007 dengan debit puncak sebesar 2440,7 liter/detik yang mempunyai persentase aliran dasar sebesar 81,81% dan banjir pada 29 Desember 2006 (debit puncak = 2273,2 liter/dt) dengan persentase aliran dasar sebesar 77,72%. Selain itu, persentase aliran dasar relatif bertambah besar pada kejadian banjir saat akhir musim hujan karena mengecilnya debit aliran langsung dari permukaan karst.

Tabel. 4.8. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran pada Kejadian Banjir Terpilih Gua Bribin

No	Waktu banjir		Debit puncak (liter/detik)	Rasio (%)	Periode hujan
	Tanggal	Jam			
1	6/12/06	22:30	1667,8	98,38	Awal
2	7/12/06	23:00	1660,5	99,02	Awal
3	13/12/06	19:30	2120,5	86,16	Awal
4	29/12/06	00:30	2273,2	77,72	Awal
5	30/12/06	17:00	2445,6	82,69	Awal
6	16/2/07	18:00	1884,9	92,29	Tengah
7	22/2/07	21:00	2440,7	81,81	Tengah
8	23/2/07	20:00	2272,0	84,51	Tengah
9	28/2/07	01:30	2113,2	89,91	Tengah
10	7/3/07	05:00	1805,6	99,05	Akhir
11	7/4/07	22:00	1936,1	95,50	Akhir
12	27/4/07	20:00	1819,0	97,25	Akhir

Sumber : hasil analisis data 2006-2007

4.3. VARIASI TEMPORAL ALIRAN DI GUA NGRENENG

a. Hubungan tinggi muka air dan debit Gua Ngreneng

Dari hasil *tracer test* oleh MacDonald and Partners (1984), diketahui bahwa Gua Ngreneng adalah pemunculan sungai bawah tanah yang diyakini sebagai bocoran dari sungai utama Bribin. Gua ini terletak pada suatu cekungan bekas doline yang mempunyai beda tinggi sekitar 50 meter antara dasar sungai dan permukaan lembahnya. Sungai di Gua Ngreneng ini selalu berair sepanjang tahun dan pada saat musim hujan debit sungai dapat menjadi sangat tinggi karena pintu masuk gua ini juga berfungsi sebagai *sinkhole* aliran permukaan di sekitar cekungan gua ini yang mengakibatkan tingginya pasokan aliran permukaan. Di gua ini dipasang alat pencatat tinggi muka air sungai seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.11. Hasil pengukuran debit di Gua Ngreneng disajikan pada Tabel 4.9.

Gambar 4.11. Kondisi Aliran di Gua Ngreneng (kiri), dan Instalasi Stasiun Aliran (kanan)

Tabel 4.9. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Ngreneng

No	Tanggal pengukuran	Tinggi muka air (m)	Debit aliran (liter/detik)
1	20/4/06	1,80	545,96
2	26/4/06	1,61	488,33
3	22/5/06	1,21	283,11
4	22/6/06	1,17	263,61
5	19/7/06	0,97	219,00
6	23/8/06	0,71	140,71
7	20/9/06	0,62	123,57
8	15/11/06	0,38	75,73
9	20/12/06	0,43	100,61

Sumber : Pengukuran lapangan 2006-2007

Selanjutnya, dari data tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 4.12) hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di gua Ngreneng, berupa persamaan :

$$y = 49,164e^{1.343x} \dots\dots\dots (9)$$

Keterangan:

y adalah debit aliran (liter/detik) dan x adalah tinggi muka air (m)

Gambar 4.12. Hubungan Tinggi Muka Air dan Debit di Gua Ngreneng

Rumus yang diperoleh tersebut digunakan untuk menghitung debit aliran sepanjang tahun berdasarkan pada tinggi muka air yang tercatat pada alat dengan interval waktu 30 menit. Hasil penggambaran variasi debit aliran Gua Ngreneng selama satu tahun pencatatan disajikan pada Gambar 4.13.

Gambar 4.13. Variasi Debit Aliran Gua Ngreneng Periode 1 Mei 2006-30 April 2007

Pencatatan dari 1 Mei 2006 sampai dengan 30 April 2007 menunjukkan bahwa periode tanpa banjir dimulai pada 18 Mei 2006 sampai dengan 6 Desember 2006, dengan debit aliran minimum sekitar 60 liter/detik. Banjir pertama kali terjadi pada 6 Desember 2006 dengan debit puncak sebesar 143,24 liter/detik. Selanjutnya, periode banjir-banjir yang cukup besar dimulai pada 13 Desember 2006 dan sampai akhir masa pencatatan terjadi sekitar 62 kali kejadian banjir. Beberapa banjir besar diantaranya terjadi pada 20 Februari 2007, pukul 20.00

dengan debit puncak sebesar 1788,86 liter/detik dan banjir pada 23 Maret 2007 pukul 09.30 dengan debit puncak sebesar 1905,3 liter/detik.

b. Konstanta Resesi Hidrograf Banjir Gua Ngreneng

Dari 62 kali kejadian banjir, terpilih 8 kejadian banjir yang mempunyai debit besar dan waktu resesi yang cukup panjang untuk dibuat model perhitungan konstanta resesinya. Hasil perhitungan nilai konstanta resesi banjir K_c , K_i , maupun K_b sungai bawah tanah di Gua Ngreneng disajikan pada Tabel 4.13. Sementara itu, grafik pada skala logaritma tiap kejadian banjir terpilih yang sudah dipisahkan komponen aliran dasarnya (*baseflow*) disajikan pada Gambar 4.14.

Tabel 4.10. Konstanta Resesi, T_p dan T_b Hidrograf Banjir Terpilih Gua Ngreneng

No	Waktu		Debit puncak(lt/dt)	Kr Baseflow (K_b)	Kr Interflow (K_i)	Kr channel (K_c)	T_p (jam)	T_b (jam)
	Tanggal	Jam						
1	13/12/06	19:30	1005,2	0,9991	0,9247	0,2792	6	9
2	15/12/06	18:30	882,1	0,9881	0,8595	0,2442	7	14
3	18/12/06	13:30	454,6	0,9933	0,9643	0,2786	2,5	20
4	20/12/06	18:30	947,5	0,9900	0,8769	0,1882	3,5	16
5	22/12/06	20:30	514,2	0,9985	0,9712	0,2674	7,5	62
6	5/2/07	17:00	1373,0	0,9910	0,7362	0,4048	4	240
7	19/2/07	20:30	890,2	0,9779	0,7762	0,2510	5	19
8	20/2/07	20:00	1788,9	0,9968	0,9034	0,7480	4	43

Sumber : Pengukuran lapangan dan analisis data tahun 2006-2007

Dari perhitungan yang disajikan pada Tabel 4.10. diketahui bahwa nilai K_c periode banjir di Gua Ngreneng mempunyai julat antara 0,188–0,748 dengan nilai rerata sebesar 0,333, nilai K_i berjulat 0,732–0,971 dengan rerata 0,877, dan, julat konstanta resesi aliran dasar (K_b) menunjukkan variasi antara 0,978 sampai dengan 0,999 dengan nilai rata-rata sebesar 0,992. Perhitungan nilai *time to peak* (T_p) yaitu lama waktu yang dibutuhkan oleh aliran sungai bawah tanah pada debit normal untuk mencapai puncak banjir di Gua Ngreneng berkisar antara 2,5 sampai dengan 7,5 jam dengan rerata 4,5 jam. Sementara itu, rerata waktu resesi yang diperlukan dari puncak banjir untuk mencapai aliran dasar (T_b) adalah sekitar 16 jam.

Gambar 4.14. Kejadian Resesi Banjir-Banjir Terpilih Gua Ngreng

c. Pemisahan Aliran Dasar Gua Ngreng

Data untuk pemisahan aliran dasar diperoleh dari perhitungan konstanta resesi aliran dasar Gua Ngreng (K_b) yang nilai reratanya adalah sebesar 0,992, dengan nilai BFI_{max} yang digunakan adalah sama seperti nilai di Gua Gilap dan Bribin, yaitu sebesar 0,8. Hasil pemisahan aliran dasar Gua Ngreng disajikan pada Gambar 4.23. dan rincian persentase bulanannya disajikan pada Tabel 4.11.

Gambar 4.15.Fluktuasi Aliran Dasar Gua Ngreneng Periode 1 Mei 2006-30 April 2007

Tabel. 4.11. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Tiap Bulan Gua Ngreneng

No	Bulan	Rasio (%)	Musim
1	Mei 2006	80,35	kemarau
2	Juni 2006	80,36	kemarau
3	Juli 2006	80,37	kemarau
4	Agustus 2006	80,38	kemarau
5	September 2006	80,38	kemarau
6	Oktober 2006	80,38	kemarau
7	November 2006	80,38	kemarau
8	Desember 2006	81,78	hujan
9	Januari 2007	82,93	hujan
10	Februari 2007	83,48	hujan
11	Maret 2007	82,41	hujan
12	April 2007	81,78	hujan

Sumber : Hasil analisis data 2006-2007

Persentase bulanan rasio aliran dasar dan aliran total di Gua Ngreneng menunjukkan angka sekitar 80%, dan semakin meningkat pada periode banjir menjadi 81-83 %. Dimulainya musim hujan pada Desember 2006 tidak menyebabkan persentase aliran dasar menjadi berkurang, seperti yang terjadi pada gua Gilap dan Bribin, tetapi malah menunjukkan peningkatan, walaupun tidak signifikan (sekitar 1-2 %). Rasio aliran dasar dan total aliran tiap kejadian banjir terpilih di Gua Ngreneng disajikan pada Tabel 4.12.

Tabel. 4.12. Rasio Aliran Dasar dan Total Aliran Kejadian Banjir Terpilih Gua Ngreneng

No	Waktu		Debit puncak (liter/detik)	Rasio (%)	Periode hujan
	Tanggal	Jam			
1	13/12/06	19:30	1005,2	41,43	Awal
2	15/12/06	18:30	882,1	44,68	Awal
3	18/12/06	13:30	454,6	50,85	Awal
4	20/12/06	18:30	947,5	43,88	Awal
5	22/12/06	20:30	514,2	44,68	Awal
6	5/2/07	17:00	1373,0	45,68	Tengah
7	19/2/07	20:30	890,2	40,79	Tengah
8	20/2/07	20:00	1788,9	59,77	Tengah

Rasio komponen aliran *diffuse* pada saat banjir terhadap total aliran Gua Ngreneng sangat berbeda dengan rasio bulannya. Pada awal musim hujan, julat rasio selalu berada dibawah angka 50 % yaitu berkisar antara 41-50 %, bahkan pada kejadian banjir pertama kali (13 Desember 2006), rasio menunjukkan angka yang kecil yaitu 41,43 %. Hal ini mengindikasikan bahwa akuifer karst belum menambah pasokan komponen *diffuse flow* menuju sungai, sementara pasokan *conduit flow* dari permukaan karst menjadi dominan saat kejadian banjir. Dari waktu ke waktu kecenderungan rasio *diffuse flow* saat banjir di Gua Ngreneng menunjukkan peningkatan, dengan angka maksimum sebesar 59,77 % pada kejadian banjir tanggal 20 Februari 2007.

4.4. PEMBAHASAN VARIASI SPASIAL DAN TEMPORAL KARAKTERISTIK ALIRAN SBT BRIBIN

Pembahasan kondisi karakteristik aliran di SBT Bribin akan difokuskan pada kemunculan SBT Bribin di Gua Gilap, Gua Bribin, dan Gua Ngreneng, karena hanya tiga lokasi tersebut yang memungkinkan untuk dipasang stasiun pencatat karakteristik aliran. Kondisi aliran di *Inlet* Sungai Pentung dan Luweng Jomblangan sudah secara ringkas dideskripsikan pada subbab sebelumnya dan tidak mungkin dibahas secara rinci karena tidak tersedianya data aliran secara *time series*, seperti yang diperoleh di Gua Gilap, Bribin, dan Ngreneng. Pembahasan karakteristik aliran akan dibagi menjadi 2 topik yaitu (a) konstanta resesi aliran-paramater hidrograf banjir dan (b) komposisi komponen aliran yang mengisi sungai bawah tanah.

a. Konstanta Resesi (K), waktu menuju puncak banjir (T_p), dan waktu menuju aliran dasar (T_b)

Konstanta resesi yang dibahas pada sub bab ini dibagi menjadi 3 (tiga) yaitu (i) konstanta resesi untuk komponen aliran saluran-*conduit* (K_c); (ii) komponen aliran antara-*fissure* (K_i); dan (iii) komponen aliran dasar-*diffuse* (K_b). Selanjutnya, perbandingan nilai konstanta resesi antar tiga gua dapat memberikan gambaran mengenai karakteristik akuifer karst untuk melepaskan ketiga komponen air yang dimilikinya. Sementara itu, parameter hidrograf aliran yang juga dibahas adalah waktu menuju puncak banjir (T_p) yang mampu memberikan gambaran terhadap seberapa cepat respon akuifer karst untuk mengimbuhi sungai bawah tanah. Parameter ini tentu saja terkait dengan konstanta resesi masing-masing komponen aliran. Demikian juga dengan parameter waktu menuju aliran dasar (T_b) yang mempunyai korelasi erat terutama dengan konstanta resesi aliran dasar (K_b). Nilai parameter-parameter tersebut pada tiga gua sepanjang aliran SBT Bribin disajikan pada Tabel 4.13.

Tabel 4.13. Ringkasan Julat Nilai Konstanta Resesi Dan Paramater Banjir SBT Bribin

Nama gua	K_c	K_i	K_b	T_p (jam)	T_b (jam)
Gua Gilap	0,14 – 0,88 (predominan=0,463)	0,39 – 0,92 (predominan=0,767)	0,94 - 0,99 (predominan=0,996)	1,5 – 5 (predominan=3,03)	7 – 192 (predominan=36,7)
Gua Bribin	0,02 – 0,519 (predominan=0,332)	0,002 – 0,95 (predominan=0,825)	0,98 - 0,99 (predominan=0,998)	2 – 9,5 (predominan=5,5)	5 – 192 (predominan=36,3)
Gua Ngreneng	0,188 – 0,748 (predominan=0,333)	0,732 – 0,971 (predominan=0,877)	0,978 - 0,999 (predominan=0,992)	2,5 – 7,5 (predominan=4,5)	9 – 240 (predominan=16,8)

* K_c =konstanta resesi *conduit*; K_i =konstanta resesi *fissure*; K_b =konstanta resesi *diffuse*

* T_p = *time to peak*; T_b = *time to baseflow*

Dari ringkasan data yang disajikan pada Tabel 4.13, terlihat bahwa variasi nilai konstanta resesi untuk komponen aliran *diffuse*, *fissure*, dan *conduit* pada tiga gua di SBT Bribin sangat tinggi. Rata-rata nilai konstanta resesi aliran *diffuse* (K_b) tertinggi adalah di Gua Bribin (0,998) dengan variasi nilai K_b kecil yang mengindikasikan bahwa dominasi *diffuse flow* pasca banjir pada skala waktu yang pendek maupun panjang masih bagus. Hal ini terbukti dengan tidak pernah keringnya Gua Bribin pada puncak musim kemarau dengan debit minimum masih diatas 1600 liter/detik. Gua Gilap mempunyai rerata konstanta resesi *diffuse* yang lebih kecil dibanding yang ditemukan di Gua Bribin, dengan variasi nilai sepanjang musim banjir cukup besar (0,94-0,99), dengan rerata sebesar 0,996. Konstanta resesi *diffuse* di Gua Ngreneng menunjukkan angka rerata terkecil, yaitu sebesar 0,992. Melihat angka-angka tersebut, dapat diindikasikan bahwa Gua Ngreneng melepaskan aliran dasar (*diffuse*) lebih cepat dibanding kedua gua yang lain. Fakta ini didukung pula dengan nilai waktu menuju

aliran dasar (T_b) di Gua Ngreneng yang lebih singkat yaitu sekitar 16,8 jam dibandingkan dengan Gua Gilap dan Bribin yaitu masing-masing 36,7 dan 36,3 jam pasca banjir puncak.

Selanjutnya, nilai konstanta resesi untuk komponen aliran saluran atau *conduit* (K_c) menunjukkan bahwa Gua Ngreneng, Gilap, dan Bribin mempunyai resesi yang curam dengan nilai rata-rata selama periode banjir dibawah 0,5. Menurut Schulz (1976), nilai resesi saluran yang kecil mempunyai karakteristik pelepasan komponen aliran conduit yang lebih cepat dibanding jika nilai K_c nya lebih besar. Gua Ngreneng mempunyai nilai rata-rata K_c yang kecil (0,333) karena pada saat-saat hujan puncak memperoleh aliran permukaan setempat (lokasi gua ini yang berada pada suatu cekungan). Selain itu, sebagai aliran bocoran dari SBT Bribin, nilai K_c di Gua Ngreneng juga terpengaruh oleh aliran Gua Bribin. Apabila melihat nilai waktu menuju puncak banjir (T_p), Gua Ngreneng yang terletak di daerah tangkapan bagian hilir dan merupakan bocoran dari SBT Bribin, seharusnya mempunyai waktu menuju puncak banjir yang relatif sama dengan yang dimiliki oleh Gua Bribin. Tetapi, gua ini mempunyai T_p yang 1 jam lebih cepat dari yang dimiliki oleh Gua Bribin. Hal ini berkaitan erat dengan morfologi Gua Ngreneng yang merupakan *point recharge* dari sungai bawah tanah. Sementara itu, Gua Gilap yang berlokasi di bagian hulu daerah tangkapan mempunyai nilai K_c dan T_p yang relatif lebih cepat dibanding yang dijumpai di Gua Ngreneng dan Gua Bribin.

Nilai konstanta resesi *fissure* atau aliran antara (K_i) pada tiga gua di daerah penelitian tidak menunjukkan perbedaan yang cukup berarti dengan julat yang hampir seimbang (0,767-0,877), berarti pola *fissure* (retakan berukuran menengah) pada akuifer karst daerah tangkapan SBT Bribin hampir identik. Gua Gilap mempunyai rerata nilai (K_i) yang paling rendah (0,767), sementara Gua Bribin memiliki angka yang identik dengan yang dijumpai di Gua Ngreneng (bocoran SBT Bribin) yaitu 0,825 di Gua Bribin dan 0,877 di Gua Ngreneng.

Melihat angka-angka terkait konstanta resesi pada berbagai komponen aliran dan parameter hidrograf banjir lainnya (T_p dan T_b), tampak bahwa Gua Gilap yang terletak pada SBT Bribin bagian hulu mempunyai respon yang paling cepat terhadap hujan ($T_p=3$ jam), karena letaknya berada di bagian hulu daerah tangkapan, meskipun mempunyai rerata nilai K_b yang cukup tinggi (0,996) jika dibandingkan yang dijumpai di Gua Ngreneng, sehingga masih tergolong baik dalam melepaskan air dari akuifer karst. Sementara itu, Gua Ngreneng yang memiliki nilai K_b terkecil (0,992), ternyata memiliki nilai waktu menuju puncak banjir (T_p) yang relatif lama, tetapi mempunyai nilai T_b yang cepat (16,8 jam) yang mengindikasikan bahwa Gua Ngreneng mempunyai sifat akuifer yang lebih cepat melepaskan komponen aliran dasar (*diffuse*) dan terpengaruh oleh fungsi Gua Ngreneng sebagai pengatur aliran permukaan langsung (*point recharge*) dari cekungan-cekungan di sekitarnya. Dari fakta ini terlihat bahwa kontrol morfologi permukaan berupa *sinkhole* berperan dalam mempengaruhi karakteristik

parameter hidrograf banjir di Gua Ngreneng. Ringkasan kondisi parameter hidrograf banjir dan konstanta resesi di daerah penelitian disajikan pada Tabel 4.14.

Dari data dan karakteristik yang disajikan pada Tabel 4.14. dapat disimpulkan bahwa sungai di Gua Bribin mempunyai simpanan aliran dasar (aliran mantap) yang paling besar dan simpanan tersebut dilepaskan paling perlahan-lahan dibanding yang ditemukan di Gua Ngreneng dan Gua Gilap. Daerah hulu tangkapan hujan SBT Bribin yang diwakili oleh Gua Gilap juga menunjukkan tingkat pelepasan aliran dasar (*baseflow*) yang lambat, sehingga berkontribusi positif bagi kelangsungan debit SBT Bribin pada musim kemarau. Hanya saja, karena letaknya di bagian hulu, maka respon terhadap banjir termasuk yang paling cepat, dan debit aliran mantap pada musim kemarau tergolong kecil. Sementara itu, Gua Ngreneng yang secara teori letaknya berdekatan dan merupakan bocoran dari SBT Bribin, mempunyai sifat pelepasan akuifer yang berbeda dengan yang ditemukan di Gua Bribin. Selain itu, karakteristik banjirnya sangat dipengaruhi oleh morfologinya sebagai suatu *point recharge* cekungan-cekungan karst di sekitarnya.

b. Persentase aliran dasar-PAD (*diffuse flow*)

Persentase atau perbandingan antara debit aliran dasar yang dipisahkan dari hidrograf banjir dibagi dengan debit total aliran dapat digunakan untuk mengkarakterisasikan simpanan atau potensi akuifer untuk mengimbuhi sungai bawah tanah sepanjang tahun. Selanjutnya, ilustrasi perubahan persentase aliran dasar bulanan gua-gua di sepanjang aliran SBT Bribin disajikan pada Gambar 4.16.

Secara umum, rasio aliran dasar bulanan pada ketiga gua menunjukkan pola yang hampir sama, yaitu meningkat secara perlahan-lahan ketika menuju puncak musim kemarau, kemudian berfluktuasi pada saat musim hujan dengan kecenderungan rasio yang lebih kecil dibanding pada saat musim hujan karena pengaruh meningkatnya kontribusi aliran *conduit* saat hujan. Gambar 4.16. menunjukkan bahwa secara spasial, semakin ke arah hilir, kecenderungan rasio aliran dasar terhadap aliran total (PAD) adalah meningkat (Gilap < Bribin). Selain itu, Gua Bribin mempunyai komposisi rasio yang paling tinggi (>95%) jika dibandingkan dengan Gua Ngreneng dan Gua Gilap yaitu hanya pada kisaran 80%. Fakta lain yang menarik adalah kenyataan bahwa pola kecenderungan rasio aliran dasar bulanan di Gua Ngreneng pada saat musim hujan menunjukkan kecenderungan meningkat, sementara di Gua Gilap dan Bribin memiliki pola kecenderungan menurun. Adanya anomali penurunan aliran dasar pada Bulan Februari 2007 di Gua Gilap disebabkan bulan ini merupakan bulan puncak di daerah hulu (daerah lain puncak hujan bukan pada bulan ini), yang mengakibatkan dominasi aliran *conduit* di Gua Gilap lebih besar dibanding bulan-bulan yang lain.

Tabel 4.14. Kondisi Komponen Aliran Akuifer Karst Atas Dasar Perbandingan Angka Paramater Hidrograf Banjir

Paramater hidrograf	Sungai bawah tanah	Perbandingan	Karakteristik
$K_b = 0,996$	Gilap	$> \text{Ngreneng}$ $< \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• akuifer melepaskan aliran <i>diffuse</i> lebih cepat daripada GUA Bribin tapi lebih lambat daripada GUA Ngreneng• fungsi retakan kecil (<i>diffuse</i>) masih lebih baik dari GUA Ngreneng
$K_i = 0,767$		$< \text{Ngreneng}$ $< \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• simpanan air pada retakan berukuran menengah (<i>fissure</i>) paling cepat dilepaskan dibanding di GUA Bribin dan Ngreneng
$K_c = 0,463$		$> \text{Ngreneng}$ $> \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• simpanan air pada retakan berukuran besar (<i>conduit</i>) paling lama dilepas oleh akuifer• luasan daerah tangkapannya paling kecil dibanding GUA Bribin dan Ngreneng
$T_p = 3,03 \text{ jam}$		$< \text{Ngreneng}$ $< \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• jarak tangkapan hujan paling dekat karena berada di bagian hulu
$T_b = 36,7 \text{ jam}$		$> \text{Ngreneng}$ $> \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• simpanan <i>diffuse</i> lama dilepas oleh akuifer• retakan <i>conduit</i> belum berkembang sebaik GUA Bribin dan Ngreneng
$K_b = 0,998$	Bribin	$> \text{Ngreneng}$ $> \text{Gilap}$	<ul style="list-style-type: none">• potensi simpanan <i>diffuse</i> paling baik karena paling lama dilepas oleh akuifer• debit masih besar di musim kemarau
$K_i = 0,825$		$< \text{Ngreneng}$ $> \text{Gilap}$	<ul style="list-style-type: none">• simpanan pada retakan <i>fissure</i> relatif paling baik (hampir sama dengan di Ngreneng)
$K_c = 0,332$		$< \text{Ngreneng}$ $< \text{Gilap}$	<ul style="list-style-type: none">• adanya <i>point recharge</i> saat hujan yang mengimbuh langsung ke sungai, sehingga konstanta resesi saluran besar
$T_p = 5,5 \text{ jam}$		$> \text{Ngreneng}$ $> \text{Gilap}$	<ul style="list-style-type: none">• luas tangkapan hujan paling besar
$T_b = 36,3 \text{ jam}$		$> \text{Ngreneng}$ $< \text{Gilap}$	<ul style="list-style-type: none">• komponen aliran <i>conduit</i> dan <i>diffuse</i> sama-sama dominan pada saat banjir• simpanan <i>diffuse</i> lama dilepas oleh akuifer
$K_b = 0,992$	Ngreneng	$< \text{Gilap}$ $< \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• akuifer melepaskan komponen aliran <i>diffuse</i> paling cepat dibanding GUA Gilap dan Bribin
$K_i = 0,877$		$> \text{Gilap}$ $> \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• simpanan pada retakan <i>fissure</i> paling lama dilepas oleh akuifer
$K_c = 0,333$		$< \text{Gilap}$ $> \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• mulut gua merupakan <i>point recharge</i> aliran permukaan saat hujan• merupakan bocoran dari S. Bribin sehingga nilainya hampir identik
$T_p = 4,5 \text{ jam}$		$> \text{Gilap}$ $< \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• seharusnya nilainya identik dengan di Bribin, tetapi terpengaruh aliran langsung ke mulut gua pada saat kejadian hujan
$T_b = 16,8 \text{ jam}$		$< \text{Gilap}$ $< \text{Bribin}$	<ul style="list-style-type: none">• simpanan aliran dasar paling cepat dilepas oleh akuifer• retakan <i>conduit</i> kemungkinan sudah dominan

* K_c =konstanta resesi *conduit*; K_i =konstanta resesi *fissure*; K_b =konstanta resesi *diffuse*

* T_p = *time to peak*; T_b = *time to baseflow*

Gambar 4.16. Rasio Aliran Dasar Bulanan Sepanjang SBT Bribin Mei 2006 - April 2007

Fakta ini memperkuat argumentasi sebelumnya bahwa karena morfologi mulut Gua Ngreneng merupakan *sinkhole* dari cekungan karst, maka dominasi aliran *conduit* hanya sesaat (K_c dan T_b kecil), sehingga jika dirata-rata dalam sebulan terlihat bahwa peran aliran *conduit* di gua ini kecil yang menyebabkan rasio aliran dasarnya justru meningkat. Tetapi, jika analisis rasio aliran dasar ini dilakukan pada saat kejadian banjir saja, maka persentase aliran dasar pada semua gua menunjukkan cenderung menurun yang menunjukkan adanya penambahan kontribusi komponen aliran *conduit* yang besar (Tabel 4.14).

Secara rerata Gua Ngreneng memiliki komposisi aliran dasar yang paling sedikit, yaitu berkisar pada angka 46,5%. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan aliran dasar (*diffuse*) pada saat kejadian banjir jauh lebih sedikit dibawah penambahan aliran langsung (*conduit*), sebagai akibat morfologi mulut Gua Ngreneng yang berfungsi sebagai sebuah *sinkhole*.

Tabel. 4.14. Persentase Aliran Dasar (PAD) Saat Kejadian banjir

No	Gua Gilap			Gua Bribin			Gua Ngreneng		
	Waktu		PAD (%)	Waktu		PAD (%)	Waktu		PAD (%)
	Tanggal	jam		Tanggal	jam		Tanggal	jam	
1	13/12/06	19:00	45,08	6/12/06	22:30	98,38	13/12/06	19:30	41,43
2	22/12/06	15:30	55,52	7/12/06	23:00	99,02	15/12/06	18:30	44,68
3	31/12/06	06:30	57,75	13/12/06	19:30	86,16	18/12/06	13:30	50,85
4	16/2/07	16:30	57,25	29/12/06	00:30	77,72	20/12/06	18:30	43,88
5	24/2/07	19:00	51,25	30/12/06	17:00	82,69	22/12/06	20:30	44,68
6	26/2/07	18:00	58,55	16/2/07	18:00	92,29	5/2/07	17:00	45,68
7	6/3/07	21:00	79,91	22/2/07	21:00	81,81	19/2/07	20:30	40,79
8	9/3/07	19:00	78,18	23/2/07	20:00	84,51	20/2/07	20:00	59,77
9	14/3/07	02:00	78,92	28/2/07	01:30	89,91			
10	19/3/07	00:00	72,75	7/3/07	05:00	99,05			
11	21/3/07	08:00	77,20	7/4/07	22:00	95,50			
12	23/3/07	08:00	50,88	27/4/07	20:00	97,25			
13	7/4/07	01:30	70,33						
14	10/4/07	18:00	62,94						
15	11/4/07	15:00	76,30						
16	16/4/07	23:30	73,80						
Rerata PAD			65,41	90,36			46,47		

Sumber : hasil analisis data 2006-2007

Gua Bribin ternyata memiliki rerata jumlah aliran dasar yang tidak berbeda jauh jika dibandingkan dengan persentase bulanannya. Hal ini mengindikasikan dominasi aliran dasar di Gua Bribin lebih baik dibanding dua gua lainnya, sehingga sesuai dengan hipotesis pertama. Sementara itu, rasio saat banjir di Gua Gilap memiliki rerata nilai sebesar 65,41%, lebih sedikit dibanding rasio bulanannya tetapi lebih signifikan dengan yang ditemukan di Gua Ngreneng. Hal ini menunjukkan bahwa pola retakan *conduit* di Gua Gilap belum begitu berkembang dibandingkan dengan yang dijumpai di Gua Ngreneng. Secara konseptual, variasi spasial dan temporal pelepasan komponen aliran sepanjang SBT Bribin disajikan pada Gambar 4.17.

Gambar 4.17. Variasi Spasial dan Temporal Pelepasan Aliran Akuifer Karst di SBT Bribin

BAB V.

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Sepanjang SBT Bribin dari hulu ke hilir, dijumpai pola-pola yang menunjukkan perbedaan karakteristik aliran sungai bawah tanah. Perbedaan karakteristik aliran sungai bawah tanah tergantung dari letaknya sepanjang SBT Bribin, yang berarti dijumpai adanya variasi spasial, serta adanya variasi temporal karena karakteristiknya tergantung pada musim (kemarau dan hujan). Secara spasial, dari tiga lokasi yang diamati, yaitu (i) Gua Gilap yang terletak di daerah hulu; (ii) Gua Bribin yang terletak di bagian hilir; dan (iii) Gua Ngreneng yang merupakan bocoran utama dari SBT Bribin, terdapat perbedaan sifat aliran yang dilepaskan oleh akuifer karst yang didekati dengan parameter konstanta resesi yang meliputi konstanta-konstanta resesi aliran langsung-*conduit* (K_c), antara-*fissure* (K_i), dasar-*diffuse*, paramater hidrograf banjir berupa waktu menuju puncak banjir (T_p) dan waktu menuju aliran dasar (T_b), serta persentase aliran dasar (PAD)

Sifat aliran di Gua Gilap dikontrol oleh karakteristik akuifer karst yang lebih cepat melepaskan simpanan aliran dasar (*diffuse*) dibanding Gua Bribin, atau fungsi retakan kecil di Gua Gilap sudah lebih berkembang ke arah retakan yang lebih besar (*fissure*). Hal ini ditandai dengan nilai K_i yang terkecil dibanding Gua Bribin dan Ngreneng atau berarti paling cepat melepaskan aliran antara (*fissure*). Sebaliknya, nilai konstanta aliran langsung (K_c) di Gua Gilap mempunyai nilai yang terbesar, sehingga menunjukkan bahwa jenis retakan yang dominan di Gua Gilap adalah retakan menengah (*fissure*). Selain itu, analisis terhadap paramater T_p dan T_b juga menunjukkan bahwa retakan bertipe *conduit* belum begitu berkembang di Gua Gilap (T_b lama), meskipun nilai T_p -nya adalah yang paling cepat dan lebih disebabkan oleh luasan daerah tangkapannya yang paling kecil (daerah hulu). Jika dilihat dari paramater PAD, pada musim kemarau Gua Gilap mempunyai kisaran rata-rata PAD bulanan sekitar 80% dan sedikit menurun saat musim hujan. Saat kejadian banjir, nilai PAD di Gua Gilap menurun drastis menjadi sekitar 45-70% yang menunjukkan penambahan komponen aliran *fissure* atau *conduit* yang lebih besar dari penambahan aliran dasar.

Di Gua Bribin (bagian hilir), konstanta resesi aliran dasar (K_b) menunjukkan nilai terbesar, artinya pelepasan aliran *diffuse*-nya paling lambat jika dibandingkan dengan gua-gua yang lain. Hal ini dibuktikan dengan fluktuasi debit aliran yang kecil antara musim hujan dan musim kemarau. Hal yang identik dijumpai pada pola retakan menengah yang ditunjukkan dengan nilai K_i yang mempunyai tingkat pelepasan aliran *fissure* lambat. Sebaliknya, sifat pelepasan aliran *conduit* (nilai K_c) di Gua Bribin adalah yang paling cepat, menunjukkan bahwa retakan atau pelorongan yang berukuran besar sudah sangat berkembang di bagian

hilir. Nilai T_p yang paling lambat di Gua Bribin menunjukkan bahwa luas daerah tangkapan hujan di gua ini paling luas, dan nilai T_b yang lama menunjukkan bahwa pelepasan aliran *diffuse* berlangsung dalam waktu yang relatif lama. Dari beberapa temuan tersebut, Gua Bribin menunjukkan perkembangan pola retakan pada akuifer yang menyebabkan pola alirannya bersifat campuran (*mixed*) antara komponen aliran *diffuse* dan *conduit* (Domenico and Schwartz, 1990). Hal tersebut selanjutnya menyebabkan stabilnya angka PAD di Gua Bribin, bahkan jika dibandingkan antara rerata bulanan saat kemarau ($PAD=97\%$) dan saat kejadian banjir ($PAD=90\%$).

Di Gua Ngreneng yang oleh MacDonald and Partners (1984) dijelaskan sebagai bocoran utama SBT Bribin ternyata mempunyai karakteristik pelepasan aliran dasar (K_b) yang berbeda dibandingkan dengan yang ditemukan di Gua Bribin. Akuifer yang mengontrol sifat aliran di Gua Ngreneng bersifat cepat melepaskan aliran dasar (*diffuse*), tetapi lambat ketika melepaskan komponen aliran *fissure*, sementara sifat aliran langsungnya (K_c) mirip dengan yang dijumpai di Gua Bribin (adanya koneksi dengan SBT Bribin). Hal ini menunjukkan bahwa tipe retakan yang dominan di Gua Ngreneng adalah tipe retakan berukuran menengah (*fissure*), sehingga debit aliran di Gua Ngreneng berkurang banyak saat puncak musim kemarau. Kondisi lain yang berpengaruh terhadap karakteristik aliran di Gua Ngreneng adalah morfologi gua yang terletak pada dasar suatu *sinkhole* (banyak menerima aliran langsung saat hujan) menyebabkan T_p menjadi sangat singkat, serta faktor minimnya retakan bertipe *diffuse* yang berpengaruh terhadap singkatnya nilai T_b . Faktor-faktor tersebut berpengaruh terhadap fluktuasi PAD yang sangat besar antara musim kemarau dan saat kejadian banjir, yaitu 80% berbanding 45%.

5.2. SARAN

Untuk mencari tipologi pelepasan komponen aliran akuifer karst secara lebih akurat, termasuk perilaku SKD karst yang lebih rinci, perlu dipertimbangkan:

1. Waktu penelitian yang lebih panjang, minimal dua kali musim hujan dan dua kali musim kemarau dengan jumlah sampel yang lebih detail
2. Penggunaan alat ukur yang otomatis, sehingga tidak terkendala ketika mengambil sampel air pada saat kejadian banjir
3. Perlu terintegrasi dengan riset pada lapisan *epikarst*, karena perubahan kandungan gas karbondioksida terjadi secara dinamis pada lapisan ini

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T. N., 2006. Perhitungan Konstanta Resesi Akuifer Karst, *Gunung Sewu-Indonesian Cave and Karst Journal*, Vol. 2 No. 2, HIKESPI, Indonesia
- Adji, T.N. dan Haryono, E., 1999. Konflik Antara Pemanfaatan Batugamping dan Konservasi Sumberdaya Air Das Bribin di Wilayah Karst Gunung Sewu, Makalah Lokakarya Nasional Menuju Pengelolaan Sumberdaya Wilayah Berbasis Ekosistem Untuk Mereduksi Konflik Antar Daerah, Yogyakarta, , Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, September 1999
- Adji, T.N., 2006. Kontribusi Hidrologi Karst Dalam Monitoring Keberlangsungan Ekosistem Karst, *Proceeding Seminar Nasional Biospeleologi dan Ekosistem Karst I, Yogyakarta, 5-6 Desember 2006*
- Adji, T.N., 2006. Peranan Geomorfologi Dalam Kajian Kerentanan Air Bawah Tanah Karst Gunung Sewu, *Indonesian Cave and Karst Journal*, Vol 2, No 1, April 2006
- Adji, T.N., Haryono, E., Woro, S, 1999, Kawasan Karst dan Prospek Pengembangannya di Indonesia, Seminar PIT IGI di Universitas Indonesia, 26-27 Oktober 1999
- Adji, T.N., Hendrayana, H., Sudarmadji, Suratman, Diffuse Flow Separation Within Karst Underground River at Ngreneng Cave, Yogyakarta, Indonesia, *International Conference Earth Science and Technology*, 6-7 Aug 2009, Yogyakarta
- Adji, T.N., Nurjani, E., 1999, *Optimasi airtanah karst sebagai pemasok air domestik pada kawasan kritis air di Gunung Kidul*, Laporan Penelitian, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Adji. T.N., 2005, Agresivitas Airtanah Karst Sungai Bawah Tanah Bribin , *Gunung Sewu-Indonesian Cave and Karst Journal*, Vol 1. No.1 ,April 2005
- Anthony, D.M., Groves, C., Meiman, J., 1997. Preliminary investigations of seasonal changes in the geochemical evolution of Logdson River, Mammoth Cave, Kentucky, *Proceedings of the 4th Mammoth Cave Science Conf., Mammoth Cave, KY*, 15-23.
- Balazs, D., 1968, *Karst Regions in Indonesia: Karszt-Es Barlangkutatas*, Volume V. Budapest, Globus nyomda, 61 p.
- Blair, R.W., 2008. Karst Landforms and Lakes, National Aeronautics and Space Administration, http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/geomorphology/GEO_7
- Dane, F.C. 1990. *Research Methods*, Brooks/Cole Publishing Company, Pacific Grove, California
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2nd Ed. John Wiley & Sons
- Eckhardt K, 2005. How to construct recursive digital filters for baseflow separation. *Hydrological Processes* 19, 507-515.
- Etfimi, R., 2005. Use of hydrochemical studies to identify the recharge sources of karst Spring; example of Poceme springs in Albania, *Geophysical Research Abstracts*, Vol.7, 04063
- Fandeli, C., Adji, T.N. 2005. Analisis Daya Dukung Gua Untuk Pengembangan Ekowisata (Studi Kasus: Gua Gong dan Gua Tabuhan, Kabupaten Pacitan. *Jurnal Masyarakat Kebudayaan dan Politik Tahun XVIII, No. 4, Oktober 2005*
- Ford, D. and Williams, P. 1992. *Karst Geomorphology and Hydrology*, Chapman and Hall, London
- Gillieson, D., 1996, *Caves: Processes, Development, and Management*, Blackwell, Oxford

Sitasi: **Adji, T.N., 2009, Karakterisasi Pelepasan Komponen Aliran Pada Akuifer Berbatuan Gamping Secara Spasial Untuk Penentuan Aliran Mantap di Kawasan Sulit Air Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, 2009, Hibah Doktor**

- Hariadi, B., Adji, T.N., 2009, Variasi Temporal Hidrogeokimia Tetesan dari Ornamen Drapery di Dalam Gua Gilap di Kawasan Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul, DIY, *Gunung Sewu-Indonesian Cave and Karst Journal*, Vol 5 No 1, April 2009
- Haryono, E. dan Adji, T.N. 2004. Geomorfologi dan Hidrologi Karst. Yogyakarta: Kelompok Studi Karst, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada
- Haryono, E., 2001. *Nilai Hidrologis Bukit Karst*, Makalah pada seminar Nasional, Eko-Hidrolik, 28-29 Maret 2001, Jurusan Teknik Sipil, UGM
- Jankowski, J., 2001. Groundwater Environment, *Short Course Note*, School of Geology, University Of New South Wales, Sydney, Australia
- Karimi, H., Raeisi, E., Zare, M. 2003. Hydrodynamic behavior of the Gilan karst spring, west of Zagros, Iran. *BCRA Cave and Karst Science*. Vol 30 (1) pp 15 – 22
- Ko, R.K.T., MD.DV., 1984. *Peranan Ilmu Speleologi Dalam Penyelidikan Fenomena Karstik dan Sumberdaya Tanah dan Air – Sebuah Informasi Soal Speleologi*, Ceramah Pada Pusat Penelitian Tanah –Bogor, Bogor.
- Liu, Z., Groves, C., Yuan, D., Meiman, J., 2004(a). South China Karst Aquifer Storm-Scale Hydrochemistry, *Ground Water*. 42, Jul/Agt 2004
- Liu, Z., Groves, C., Yuan, D., Meiman, J., Jiang, D., He, S., Li, Q., 2004(b). Hydrochemical variation during flood pulses in the south-west peak cluster karst : impacts of $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$ interactions, *Hydrological Processes*. 18, 2423-2437
- MacDonalds and Partners. 1984. *Greater Yogyakarta – Groundwater Resources Study*. Vol 3C: Cave Survey. Yogyakarta, Directorate General of Water Resources Development Project (P2AT)
- Nathan RJ, McMahon TA, 1990. Evaluation of automated techniques for baseflow and recession analysis. *Water Resources Research*. 26(7):1465-1473.
- Raeisi, R., Karami, G., 1997. Hydrochemographs of Berghan karst spring as indicators of aquifer characteristics, *Journal of Cave and Karst Studies* 59(3), 112-118
- Schulz, E.F., 1976. *Problems in Applied Hydrology*. Water Resources Publication, Colorado
- Smakhtin, V.Y., 2001. Low flow hydrology: a review. *Journal of Hydrology*, 240:147-86.
- Smart, P.L. and Hobbes, S.L., 1986. Characteristics of Carbonate Aquifers: A conceptual basis. *In Proceedings, Environmental Problem in Karst Terrains and Their Solution*. Bowling Green, KY: National Well Water Association, 1-4
- Suryanta, G., 2001, Kajian Karakteristik Hidrograf Satuan Daerah Karst Gunung Kidul (Studi Kasus: Daerah Tangkapan Air Sungai Bawahtanah Bribin, Kabupaten Gunung Kidul, Propinsi DIY), *Skripsi Sarjana*, Fakultas Geografi, UGM, Yogyakarta
- White, W.B., 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrain*. Oxford University Press, New York
- White, W.B., 1993. *Analysis of Karst Aquifer*. In: Alley, W.M. (editor), regional groundwater Quality. Van Nostrand Reinhold, New York