Adji, T.N., 2015, Sebaran Spasial Tingkat Karstifikasi Area Pada Beberapa Mataair dan Sungai Bawah Tanah Karst Menggunakan Rumus Resesi Hidrograph Malik and Vojtkova, Hibah BOPTN Fak. Geografi UGM, 2015

**SEBARAN SPASIAL TINGKAT KARSTIFIKASI AREA PADA BEBERAPA
MATAAIR DAN SUNGAI BAWAH TANAH KARST MENGGUNAKAN RUMUS
RESESI HIDROGRAPH MALIK VOJTKOVA**

TJAHYO NUGROHO ADJI

LAPORAN PENELITIAN
HIBAH PENELITIAN DOSEN

**SEBARAN SPASIAL TINGKAT KARSTIFIKASI AREA PADA BEBERAPA
MATAAIR DAN SUNGAI BAWAH TANAH KARST MENGGUNAKAN RUMUS
RESESI HIDROGRAPH MALIK VOJTKOVA (2012)**

TJAHYO NUGROHO ADJI
LABORATORIUM GEOHIDROLOGI
JURUSAN GEOGRAFI LINGKUNGAN

Dibiayai dari
Bantuan Operasional Perguruan Tinggi (BPTON), Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada
Tahun Anggaran 2015

UNIVERSITAS GADJAH MADA
FAKULTAS GEOGRAFI
2015

HALAMAN PENGESAHAN
LAPORAN HIBAH PENELITIAN DOSEN FAKULTAS GEOGRAFI TAHUN ANGGARAN 2015

1. Judul Penelitian : Sebaran Spasial Tingkat Karstifikasi Area Pada Beberapa Mataair dan Sungai Bawah Tanah Karst Menggunakan Rumus Resesi Hidrograph Malik and Vojtkova (2012)
2. Identitas PenelitiKetua Peneliti*
 - a. Nama Lengkap : **Dr. Tjahyo Nugroho Adji, MSc.Tech**
 - b. NIP : 197201281998031001
 - c. Gol/Pangkat : IVa/Pembina
 - d. Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
 - e. Bidang Keahlian : Geohidrologi
 - f. Prodi/Jurusan : Geografi dan Ilmu Lingkungan/Geografi Lingkungan
 - g. Bidang Ilmu : Geohidrologi
 - h. Alamat Rumah : Pondok Gemilang A-12, Sendangadi, Mlati,Sleman
 - i. Telepon/Faks : 0274-4362134
 - j. E-mail : adji@geo.ugm.ac.id
 - k. Hand Phone : 08122967492

3. Anggota peneliti

No	Nama	L	NIM	Fakultas/Jurusan	Bidang Ilmu
1.	Hendy Fatchurohman	L	PGE/1150	MPPDAS	Hidrologi
1.	Igor Yoga Bahtiar	L	PGE/1177	MPPDAS	Hidrologi

4. Jangka Waktu Penelitian : 5 bulan mulai 9 Maret 2015 – 9 Agustus 2015
5. Lokasi Penelitian : Kab.Gunungkidul, DIY dan Kab. Tuban, Jatim
6. Biaya Penelitian : Rp 10.500.000,00 (sepuluh juta limaratus ribu rupiah)

Yogyakarta, 30 Agustus 2015

Menyetujui,
Kepala Laboratorium

Peneliti

Prof. Dr. Ig. Setyawan Purnama, MSi.
NIP. 196608311992031001

Dr. Tjahyo N. Adji, MSc.Tech
NIP. 197201281998031001

Mengetahui,
Dekan Fakultas Geografi UGM

Prof. Dr. R. Rijanta, M.Sc
NIP 19620101 198803 1 002

INTISARI

Penelitian ini dilakukan di beberapa mataair dan sungai bawah tanah yang ada di kawasan karst Gunung Sewu, Kabupaten Gunung Kidul, DIY dan kawasan karst Tuban, Kabupaten Tuban, Jawa Timur. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat karstifikasi pada beberapa mataair dan sungai bawah tanah pada dua kawasan karst tersebut dengan memanfaatkan data resesi hidrograf aliran yang tersedia.

Penelitian ini menggunakan metode survei yang bersifat induktif, yaitu dengan memasang alat pencatat tinggi muka air pada dua mataair karst yakni mataair Petoyan dan Mataair Ngerong pada kurun waktu 6 bulan dengan maksud untuk memperoleh data hidrograf banjir pada awal, tengah, dan akhir musim hujan. Selain itu, data sekunder dari beberapa hidrograf sungai bawah tanah dan mataair karst juga digunakan yakni data-data di Gua Toto, Gua Seropan, Mataair Beton, Gua Gilap, Gua Ngreng, dan Gua Bribin. Selanjutnya, perhitungan tingkat karstifikasi dilakukan menggunakan rumus yang dikembangkan oleh Malik and Vojtkova (2012) pada lokasi-lokasi tersebut untuk kemudian ditentukan fase karstifikasi akuifer daerah tangkapannya secara spasial.

Hasil perhitungan derajat karstifikasi dengan menggunakan data resesi kejadian banjir terpilih menunjukkan nilai terendah antara 3,7 di Mataair Petoyan hingga tertinggi 7,7 di Sungai Bawah Bribin. Nilai 3,7 (terendah) mengindikasikan tipe aliran yang merupakan kombinasi dari dua atau lebih subregimes aliran laminar yang hanya ditandai dengan koefisien debit yang berbeda pada masing-masing tipe aliran yang mengimbuhnya, dengan terjadi aliran turbulen dalam jangka pendek saat banjir. Sementara itu, nilai 7,7 mengindikasikan akuifer yang telah terkarstifikasi pada tingkat yang sangat berkembang, didominasi oleh saluran terbuka (*conduit*) yang besar. Selanjutnya peran dari saluran mengengah (*fissure*) dan jaringan saluran kecil (*diffuse network*) sudah sangat minim, sehingga zona freatik sudah hilang atau perannya sudah tidak lagi signifikan. Selanjutnya, secara umum derajat karstifikasi di kawasan karst Gunung Sewu telah berada pada tingkat yang lebih berkembang dibanding di kawasan karst Rengel, kecuali yang dijumpai di Mataair Petoyan yang terletak di bagian barat kawasan karst Gunung Sewu yang mempunyai level karstifikasi awal dengan belum berkembangnya tipe aliran turbulen.

Kata kunci: akuifer karst, derajat karstifikasi, aliran turbulen, aliran laminar

ABSTRACT

This research was conducted in several springs and underground rivers in Gunung Sewu karst areas, Gunung Kidul, Yogyakarta and karst area of Tuban, East Java. The objective of this research is to determine the level of karstification in some springs and underground rivers in the two karst areas by using the available data of hydrograph recession.

This research uses an inductive survey method, namely by installing two water level recording devices within Petoyan and Ngerong Springs during the period of 6 months in order to obtain the flood hydrograph data at the beginning, middle, and end of the rainy season. In addition, secondary hydrograph data from several underground rivers and karst springs were used from Toto Cave, Seropan Cave, Beton Spring, Gilap Cave, Ngreneng Cave, and Bribin Cave. Furthermore, the karstification level calculation was performed by using the formula developed by Malik and Vojtkova (2012) to spatially describe the level of karst aquifer development.

The calculation of karstification degree by using some selected data of flood recession confirms the lowest value of 3.7 (in Petoyan Spring) to the highest value of 7.7 in Bribin River. The value of 3.7 (lowest) indicates the combination of two or more sub-regimes with merely laminar flow characterized by different discharge coefficients, with irregularly developed aquifer of fissure network, with majority of open macro-fissures, also with possible presence of karst conduits in extreme condition. Meanwhile, the value of 7.7 indicates highly developed karstification of the aquifer, formed by large open conduits (karst channels). Substantial role in groundwater discharge is played by sub-regimes with turbulent flow, while sub-regime with laminar flow is less significant. Furthermore, the general degree of karstification in the Gunung Sewu has been at a level which is more developed than in the karst region of Rengel, except those found in Petoyan Spring, which is located in the western part of Gunung Sewu karst region, which has karstification level in the beginning level with undeveloped type of turbulent flow.

Keywords: karst aquifers, karstification degree, turbulent flow, laminar flow

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	.....	i
HALAMAN PENGESAHAN	.....	ii
INTISARI	.....	iii
ABSTRACT	.....	iv
DAFTAR ISI	.....	v
DAFTAR TABEL	.....	vi
I. PENDAHULUAN	.....	1
II. PERUMUSAN MASALAH	.....	2
III. STUDI PUSTAKA	.....	2
IV. TUJUAN PENELITIAN	.....	7
V. METODE PENELITIAN	.....	7
VI. HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	16
VII. KESIMPULAN	.....	42
VIII. DAFTAR PUSTAKA	.....	43
IX. PENGGUNAAN ANGGARAN	.....	46

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Tingkat karstifikasi akuifer karst	13
Tabel 3. Hasil Pengukuran Debit Aliran Mataair Beton	18
Tabel 4. Hasil Pengukuran Debit Aliran Mataair Petoyan	20
Tabel 5. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Gilap	22
Tabel 6. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Ngreneng	25
Tabel 7. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Seropan	28
Tabel 8. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Toto	30
Tabel 9. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Bribin	33
Tabel 10. Karakteristik debit mataair dan sungai bawah tanah daerah penelitian	35
Tabel 11. Hasil analisis <i>stage discharge rating curve</i> di tiap lokasi penelitian	36
Tabel 12. Karakteristik parameter hidrograf dan persentase aliran dasar	38
Tabel 13. Sebaran spasial derajat karstifikasi di daerah penelitian	40

I. PENDAHULUAN

Akuifer karst dikenal sebagai akuifer yang memiliki tingkat heterogenitas yang tinggi, sejalan dengan tingkat perkembangan pembentukan lorong-lorongnya. Semakin berkembangnya pelorongan di sebuah akuifer karst, maka semakin tua pula umur suatu kawasan karst atau dengan kata lain semakin lanjut pula tingkat karstifikasinya. Perkembangan sistem pelorongan ini sangat menentukan sifat akuifer dalam melepaskan simpanan airnya, sehingga mempunyai kedudukan yang sangat penting dalam penyediaan sumberdaya air. Oleh karena itu, kebanyakan topik penelitian di akuifer karst mempunyai tujuan untuk mendeskripsikan sifat akuifer dalam melepaskan simpanan akuifer yang tentu saja dikontrol oleh tingkat karstifikasinya (Haryono dan Adji, 2004, Adji et al, 1999; Adji dan Haryono, 1999; Haryono et al, 2009; Brunsch et al, 2011).

Cara-cara yang sudah pernah dilakukan untuk mengklasifikasi tingkat perkembangan akuifer karst, di antaranya adalah: (1) analisis hidrokemograph, yakni dengan cara memantau variasi kualitas air di sebuah mataair karst (Adji, 2011; Adji, 2010; Adji, 2012); (2) analisis sistem linier; (3) rasio heterogenitas; (4) analisis resesi hidrograf banjir (Adji and Misqi, 2010, Adji, 2013; Adji, 2014) ; dan (5) kecepatan akuifer karst melepaskan air (*aquifer flashiness*). Metode ke-2 dan ke-3 tidak terkait dengan hidrograf banjir, sedangkan metode ke-1, ke-4, dan ke-5 berkaitan dengan hidrograf aliran pada suatu mataair karst.

Rashed (2012) dalam tulisannya mempresentasikan sebuah metode baru untuk mengetahui tingkat karstifikasi dengan menggunakan beberapa data hidrograf banjir tunggal pada mataair karst. Metode ini menggunakan data-data yang diambil dari sebuah hidrograf banjir sejak mulai debit naik hingga debit kembali lagi menjadi aliran dasar (*baseflow*), termasuk data waktu dimulainya banjir, waktu puncak, dan waktu kembali menjadi *baseflow*. Kemudian, Rashed (2012) juga telah membuat klasifikasi akuifer karst berdasarkan nilai tingkat karstifikasi yang diperoleh yakni: (1) akuifer yang sistemnya didominasi aliran *diffuse* (*darciian aquifer*); (2) akuifer yang telah terkarstifikasi sebagian (*partially karstified aquifer*); (3) akuifer yang telah terkarstifikasi (*karstified aquifer*); dan (4) akuifer yang telah terkarstifikasi secara lanjut (*highly karstified aquifer*).

Selain itu, Malik danVotjkova (2012) juga telah mengemukakan bahwa tingkat perkembangan akuifer karst dapat dilakukan dengan memvalidasi sub regime aliran (laminer atau turbulen) yang terekam pada sebuah kurva resesi banjir pada mataair karst. Perbedaan utama metode ini dengan metode-metode sebelumnya adalah dalam satu kurva resesi bisa memiliki satu atau lebih sub regim aliran.

Dengan pertimbangan tersebut, penelitian ini bermaksud untuk melakukan investigasi secara spasial dan temporal terkait dengan tingkat karstifikasi wilayah atau akuifer karst yang didekati dengan validasi sub regim aliran pada hidrograf aliran mataair dan sungai bawah tanah karst. Hasil dari penelitian ini diharapkan akan sangat bermanfaat terhadap perkembangan ilmu karstologi di Indonesia, khususnya dalam memperkaya metode-metode investigasi perkembangan pelorongan pada akuifer karst.

II. PERUMUSAN MASALAH

Metode yang sering digunakan oleh para peneliti karst di Indonesia untuk mendefinisikan karakteristik akuifer karst di antaranya adalah dengan menghitung konstanta resesi, mendeskripsikan karakteristik hidrogeokimianya, atau menghubungkan konstanta resesi dengan kondisi hidrogeokimia suatu mataair atau sungai bawah tanah karst. Beberapa penelitian tersebut di antaranya adalah yang dilakukan di DTA Bribin ([Adji, 2010](#); [Adji, 2011](#), [Adji et al, 2009](#), [Adji, 2012](#)), di Gua Toto, Seropan, dan Beton ([Misqi, 2011](#)), di Mataair Petoyan oleh [Adji \(2013\)](#), [Oktama \(2014\)](#) dan [Fatchurohman \(2014\)](#). Hasil-hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwasanya terdapat variasi spasial dan temporal terkait sifat akuifer karst dalam melepaskan komponen-komponen alirannya, dan sifat inilah pula yang mempunyai korelasi terhadap kondisi hidrogeokimia yang terekam. Dari penelitian-penelitian tersebut terlihat pula masing-masing lokasi mempunyai dominasi jenis aliran yang tidak sama yang terlihat pula dari perbedaan karakteristik pelorongan dan debit aliran yang dihasilkan. Akan tetapi, penelitian-penelitian tersebut belum menyimpulkan tinggi rendahnya proses karstifikasi yang telah terjadi, sehingga penelitian ini mempunyai maksud secara umum untuk mengaplikasikan formula yang diusulkan oleh [Malik dan Votjkova \(2012\)](#), dan dilakukan pada lokasi-lokasi yang telah mempunyai data hidrograf dan hidrogeokimia, sehingga hasil tingkat karstifikasi yang dihasilkan dapat dikonfirmasi dengan karakteristik aliran dan hidrogeokimia yang telah dihasilkan pada penelitian-penelitian terdahulu tersebut. Adapun secara khusus, penelitian ini mempunyai pertanyaan penelitian, yaitu: "Apakah ada perbedaan tingkat karstifikasi pada beberapa mataair dan sungai bawah tanah karst?"

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan penelitian tersebut, maka penelitian ini diberi judul: "Sebaran Spasial Tingkat Karstifikasi Area Pada Beberapa Mataair dan Sungai Bawah Tanah Karst Menggunakan Rumus Resesi Hidrograph Malik dan Votjkova (2012) "

III. STUDI PUSTAKA

Perkembangan Akuifer Karst

Perkembangan akuifer karst dari muda menuju ke tua dapat dicirikan dengan perkembangan besarnya lorong yang berpengaruh pula terhadap sifat aliran yang dominan pada suatu akuifer karst. Semakin dominan sifat aliran yang dikontrol oleh sistem pelorongan yang ukurannya besar, maka semakin lanjut pula perkembangan akuifer karstnya. Bonacci (1990) menjelaskan bahwa: (1) *diffuse flow* adalah komponen aliran pengisi sungai bawah tanah dari akuifer yang mengalir melalui retakan-retakan pada batuan gamping yang berukuran 10^{-3} -10 mm; (2) *fissure flow* adalah komponen aliran pengisi sungai bawah tanah dari akuifer yang mengalir melalui retakan-retakan pada batuan gamping yang berukuran 10-10² mm; dan (3) *conduit flow*, adalah komponen aliran pengisi sungai bawah tanah dari akuifer yang mengalir melalui retakan-retakan pada batuan gamping yang berukuran 10²-10⁴ mm atau lebih.

Selanjutnya, 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 1. 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 1. *Diffuse*, *mixed* dan *conduit* aliran airtanah karst (Domenico and Schwartz, 1990)

Selanjutnya, [White \(1988\)](#) membagi akuifer karst atas dasar tingkat perkembangannya menjadi 3 model konseptual atas dasar sifat alirannya sebagai berikut:

- a. *Diffuse-flow karst aquifer* atau akuifer dengan sistem aliran dominan *diffuse*. Akuifer ini tidak memiliki aktivitas pelarutan yang baik, sehingga dapat dikategorikan sebagai akuifer homogen dan sistem alirannya mendekati hukum Darcy (Gambar 2). Akuifer ini biasanya terdapat pada akuifer batugamping yang tidak mudah larut, misalnya dolomit. Air bergerak sepanjang rekahan-rekahan kecil yang hanya sedikit terpengaruh oleh aktivitas pelarutan. Jika terdapat gua, biasanya kecil dan tidak berhubungan satu sama lain. Keluaran air biasanya juga hanya memiliki debit dalam jumlah yang kecil sebagai mataair atau rembesan. Ciri yang lain adalah, muka airtanah dapat dengan mudah didefinisikan dan karena sebagian imbuhan melalui *fracture*, maka fluktuasinya tidak terlalu besar dan kedudukan muka airtanahnya (*water table*) dapat sedikit di atas muka airtanah regional.
- b. *Free-flow karst aquifer*. Akuifer ini juga memiliki aliran tipe *diffuse*, tetapi lorong-lorong hasil pelarutan lebih dominan dimana sebagian besar aliran adalah melalui lorong-lorong *conduit* yang ada. Airtanah karst pada akuifer ini sangat terkontrol oleh distribusi dan arah dari lorong-lorong tersebut. Gambar 2 mengilustrasikan bahwa pendekatan hukum aliran yang digunakan pada kondisi ini adalah *pipe flow* karena sebagian besar air terdapat pada lorong-lorong *conduit* yang diibaratkan mempunyai bentuk seperti pipa dengan diameter tertentu. Oleh karena itu, kecepatan aliran diidentikkan dengan kecepatan aliran saluran permukaan (misal: sungai). Sifat alirannya adalah turbulen, bukan laminar. Pada akuifer ini, mataair dapat mempunyai respon yang sangat cepat terhadap hujan dan mempunyai sifat hidrograf aliran yang sama dengan sungai permukaan.
- c. *Confined-flow karst aquifer* atau akuifer karst yang berada di bawah batuan dengan nilai permeabilitas yang sangat kecil. Sistem aliran akuifer ini sangat dikontrol oleh lapisan di atasnya, walaupun memiliki lorong-lorong solusional.

Gambar 2. Sistem Aliran Diffuse (kiri) dan Conduit (White, 1988)

Metode-metode untuk Mengkarakterisasi Akuifer Karst

a. Metode hidrokemograf

Analisis *longterm* dan *storm-scale hydrochemograph* sudah sangat sering digunakan untuk mencari hubungan antar faktor-faktor yang berpengaruh pada suatu akuifer karst, sebagai contoh pada parameter pH, suhu, hujan, P_{CO_2} , kalsium, dan bikarbonat. [Shuster dan White \(1971\)](#) adalah yang pertama kali menggunakan metode ini untuk mengklasifikasikan akuifer karst, baik itu akuifer diffuse (dracian) ataupun akuifer conduit pada sebuah mataair karst. Pada akuifer yang bersifat diffuse, debitnya biasanya kecil dan dikontrol oleh struktur dan stratigrafi asli dari batuan akuifer. Akuifer diffuse ini juga tidak terlalu menunjukkan variasi musiman atau pun setelah kejadian hujan puncak karena debit mataair didominasi oleh cadangan air yang sudah ada di akuifer, sehingga dijumpai hanya sedikit variasi kimianya dari waktu ke waktu. Sebaliknya, pada akuifer yang bertipe conduit, maka daya hantar listrik, debit, dan kandungan ion dalam air sangat bervariasi, bersifat musiman, atau berubah-ubah sesuai kejadian hujan.

Lebih jauh lagi model hidrokemograf yang paling masyhur adalah yang dipublikasikan oleh [Plagnes dan Balakowicz \(2001\)](#), yang menyimpulkan adanya tiga model kemograf pada mataair dan sungai bawah tanah karst, yaitu: (i) komposisi kimia air sepanjang waktu hampir sama pada saat hidrograf mulai naik. Komposisi terlarut kemudian naik sedikit, dan TDS kembali kepada kondisi saat sebelum banjir; (ii) air dengan komposisi mineral lebih banyak muncul pada saat kenaikan hidrograf, kemudian turun sampai di bawah komposisi sebelum banjir, dan pada resesi kemudian kembali ke posisi awal; (iii) bervariasi secara teratur sesuai variasi hidrograf alirannya.

b. Sistem Analisis Linier

Fungsi kernel diperoleh dari respon hujan terhadap mataair yang mewakili distribusi waktu tinggal dari input airtanah pada jaringan conduit. Bentuk dari fungsi kernel dapat dianalisis dengan

menggunakan analisis statistik moment waktu. Saat ini, metode ini banyak digunakan dalam analisis hidrograf mataair karst yang mempunyai data pengukuran *time series* dan telah digunakan pula untuk mempelajari sistem akuifer karst. Dreiss (1989) menerapkan metode ini yang dikombinasikan dengan tracer test untuk menghitung sifat-sifat statistik dari perjalanan atau distribusi waktu tinggal air di akuifer karst. Momen yang dapat dihitung berguna untuk menggambarkan sistem dalam hal waktu tempuh rata-rata, distribusi, pencampuran komponen aliran dalam akuifer. Sebagai contoh, kernel untuk akuifer karst yang telah berkembang biasanya memiliki koefisien variasi yang relatif rendah, karena adanya jumlah aliran yang sangat besar dan cepat pada sistem conduit, sementara itu koefisien variasi lebih besar dijumpai pada akuifer karst yang belum berkembang.

c. Rasio Heterogenitas (H_R)

Karami and Younger (2002) dalam penelitiannya di Newcastle University memperkenalkan metode baru yang memungkinkan terdefinisiannya tingkat heterogenitas akuifer karst dengan melakukan reevaluasi data uji laju konstan pada uji pompa. Metode ini menghasilkan parameter yang dikenal dengan rasio heterogenitas (H_R), yang mencerminkan variasi dalam nilai transmisivitas yang terdeteksi oleh kerucut penurunan muka airtanah karst saat dipompa. Karami dalam studinya menganalisis beberapa data set uji pemompaan dari akuifer batugamping berbeda di Inggris untuk menentukan nilai (H_R). Hasilnya menunjukkan nilai mulai dari 0% di mana akuifer gamping adalah homogen, hingga mencapai nilai sekitar 14% di mana akuifernya adalah heterogen. Namun, akuifer karst umumnya bersifat sangat heterogen, sehingga data kuantitatif yang diperoleh dari titik yang dipilih dalam sistem menggunakan data uji pemompaan cenderung mewakili wilayah di sekitarnya saja dan jarang didapat cara ekstrapolasi untuk mengevaluasi sistem secara keseluruhan (Padilla, et al , 1994).

d. Analisis Resesi dari hidrograf aliran

Bentuk kerucut hidrograf pada aliran mataair karst secara unik akan mencerminkan respon dari akuifer untuk melepaskan komponen-komponen alirannya. Ford dan Williams (1989) telah memberikan ulasan yang rinci tentang permasalahan ini . Analisis hidrograf pada suatu mataair akan mencerminkan sifat dan struktur hidrolika sistem drainase karst. Sebagai contoh, dengan menganalisis kurva resesi dari mataair Ompla di Yugoslavia, Milanovic (1981) menyimpulkan bahwa akuifer mempunyai tiga jenis porositas, yang masing-masingnya mempunyai tiga nilai koefisien resesi yang besarnya berurutan. Milanovic kemudian mempunyai kesimpulan bahwa: (1) Koefisien resesi tertinggi adalah cerminan dari aliran yang keluar dari lorong yang besar, sehingga sifatnya cepat (conduit); (2) Koefisien resesi menengah ditafsirkan sebagai aliran yang keluar dari sistem percelahan

yang sudah meluui terkarstifikasi dengan baik (fissure), dan (3) Koefisien resesi terkecil dianggap sebagai respon terhadap aliran yang bersifat merata/menyebar (diifuse/matriks). Selanjutnya, terlepas dari kenyataan bahwa teknik analisis dengan data dari kurva resesi memberikan informasi yang sangat berguna pada sifat dan jenis penyimpanan dan karakteristik struktural dari sistem akuifer sebuah mataair karst, metode ini belum mampu memberikan perbedaan yang jelas atau mampu mengklasifikasi tingkat karstifikasi atau perkembangan akuifer karstnya, karena metode ini hanya mempertimbangkan sifat aliran ketika dilepas saat resesi setelah kejadian banjir (*recession limb*), dan tidak mempertimbangkan saat naiknya aliran menuju debit puncak (*rising limb*), yang merupakan bagian yang sangat penting pada suatu hidrograf aliran.

e. Flashines dari akuifer

Beberapa peneliti juga menggunakan parameter lain yang disebut dengan flashiness dari akuifer (Q_f) yang merupakan rasio dari debit maksimum (*peak flow*) dengan debit minimum (*baseflow*). Berdasarkan nilai dari akuifer flashiness, Delleur (1999) mengelompokkan hidrograf mataair karst menjadi tiga jenis akuifer, yaitu: (1) Type - I (respon cepat), Type - II (tipe respon campuran cepat dan lambat), dan Tipe - III (respons lambat). Akuifer respon cepat mempunyai nilai akuifer flashiness (Q_f) di kisaran 70-100; (2) akuifer respon campuran di kisaran 5-10; dan (3) akuifer respons yang lambat nilainya berkisara pada 1-2. Kelemahan parameter ini adalah adanya perhitungannya tidak mempertimbangkan waktu antara *rising limb* dan debit puncak, dan waktu saat kembali menuju *baseflow*.

IV. TUJUAN PENELITIAN

Penelitian ini mempunyai tujuan uantuk mengetahui distribusi sepasial perbedaan tingkat karstifikasi (dengan rumus Malik and Vojtkova, 2012) pada beberapa mataair dan sungai bawahtanah karst

V. METODE PENELITIAN

Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3. Lokasi daerah penelitian (Karst Gunung Sewu, DIY dan Karst Rengel, Kab. Tuban, Jawa Timur)

Alat

Alat yang digunakan secara keseluruhan bersifat saling mendukung satu sama lain dalam penelitian terutama dalam kegiatan di lapangan, yaitu:

1. Perangkat <i>Notebook</i>	Pengolahan data dan penyusunan laporan
2. Pencatat tinggi muka air otomatis	Mencatat fluktuasi tinggi muka air dari mataair dalam rentang waktu penelitian
3. <i>GPS</i>	Penentuan posisi absolut di lapangan
4. Kamera Digital	Dokumentasi penelitian
5. <i>Stopwatch</i>	Menghitung satuan waktu di lapangan
6. <i>Current meter</i>	Menghitung debit aliran

Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian secara penuh memiliki peranan dan fungsi tersendiri serta bersifat saling melengkapi, yaitu:

- Peta RBI skala 1:25.000
 - Peta Geologi Lembar Yogyakarta dan Rengel skala 1:100.000
- Membuat peta dasar dan peta tematik penelitian

Data

Data dalam penelitian ini digunakan data hasil pengukuran langsung di lapangan maupun melalui uji di laboratorium dengan detail sebagai berikut.

1. Data primer yaitu data tinggi muka air Mataair Petoyan dan Mataair Ngerong, untuk mengetahui fluktuasi aliran dan bahan pembuatan *rating curve*;
2. Data primer yaitu data debit Mataair Petoyan dan Mataair Ngerong, untuk menentukan karakter akuifer berupa sifat aliran;
3. Data sekunder yaitu data aliran Mataair Beton, sungai bawah tanah di gua-gua Bribin, Gilap, Ngreneng, Seropan, dan Toto
4. Data sekunder berupa data hujan pada lokasi-lokasi tersebut

Metode Pengumpulan Data

1. Data Tinggi Muka Air

Data tinggi muka air di Mataair Petoyan dan Ngerong dikumpulkan dengan alat pencatat tinggi muka air otomatis berupa *logger*. Pengaturan waktu data logger direkam dengan rentang waktu 15 menit.

2. Data Kecepatan aliran untuk perhitungan debit

Data debit Mataair Petoyan dan Ngerong diperoleh dengan mengukur kecepatan aliran dengan pengukuran langsung di lapangan dengan metode *sudden injection*, *pelampung*, dan *current meter*, dengan langkah kerja sebagai berikut.

a. Metode *sudden injection*

- Menentukan lokasi pengukuran, yaitu lokasi injeksi dan lokasi pengukuran konsentrasi air campuran. Aliran antar kedua lokasi berada dalam jarak sekitar 5 meter dan merupakan aliran lurus tanpa adanya intersepsi aliran.
- Menyiapkan larutan injeksi dengan mengukur volume (V) dan konsentrasinya.

- Menuangkan larutan dengan tiba-tiba dan mencatat perubahan nilai DHL dengan interval 10 detik hingga kembali mendekati nilai daya hantar listrik (DHL) awal.
- Melakukan operasi perhitungan dengan rumus:

$$Q = v \cdot c1 / T \cdot c2 \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

Q = debit aliran (m³/detik)

V = volume larutan yang dituang

T = waktu yang ditempuh oleh larutan

C1 = konsentrasi larutan yang dituang

C2 = Nilai rata-rata konsentrasi menuju kondisi awal

b. Metode pengukuran kecepatan aliran dengan pelampung

- Persamaan debit yang digunakan adalah :

$$Q = A \times k \times U \dots\dots\dots(2)$$

Keterangan :

Q = debit aliran (m³/dt) :

A = luas penampang basah (m²)

U = kecepatan pelampung (m/dt)

k = koefisien pelampung

- Nilai k tergantung dari jenis pelampung yang digunakan, nilai tersebut dapat dihitung dengan menggunakan:

$$k = 1 - 0,116 (\sqrt{1 - \alpha} - 0,1) \dots\dots\dots(3)$$

α = kedalaman tangkai (h) per kedalaman air (d)

c. Metode perhitungan kecepatan aliran dengan *current meter*

- Kecepatan aliran dihitung berdasarkan jumlah putaran baling-baling (cup) per waktu putaran (N). Persamaan kecepatan aliran sebagai berikut :

$$V = aN + b \dots\dots\dots(4)$$

keterangan :

- V = kecepatan pelampung (m/dt)
a,b = koefisien alat
N = jumlah putaran per waktu

Metode Pengolahan Data

1. Mengetahui Nilai Tingkat karstifikasi akuifer karst

a. Penentuan debit aliran dengan *stage-discharge rating curve*

Stage-discharge rating curve merupakan kurva yang menunjukkan hubungan antara tinggi muka air dan debit pada suatu aliran. *Stage-discharge rating curve* dibuat berdasarkan data pengukuran aliran yang dilaksanakan pada waktu yang berbeda-beda dengan asumsi bahwa juga terdapat perbedaan tinggi muka air, kemudian data pengukuran aliran tersebut digambarkan pada lembar berskala dimana data tinggi muka air digambarkan pada sumbu vertikal sedangkan data debit pada sumbu horizontal. Setelah rumus rating curve yakni hubungan antara debit aliran dan tinggi muka air dibuat, kemudian hidrograf aliran selama masa pengukuran dapat ditampilkan. Contoh single flood hidrograf adalah sebagaimana yang disajikan pada Gambar 4.

Gambar 4. Hidrograf sungai bawah tanah karst pada satu kali kejadian hujan (White, 1993)

b. Pemisahan aliran dasar (*Baseflow separation*)

Pemisahan aliran dasar dilakukan dengan metode *straight line method*, yakni dengan menggambar hidrograf pada skala logaritma, sebagaimana yang disajikan pada Gambar 5.

Gambar 5. Memisahkan baseflow dengan *straight line method*

d. Menghitung Tingkat Karstifikasi Malik and Votjkova (2012)

Aliran laminar dan turbulent dibedakan dengan metode *Reynolds number*. Berdasarkan metode *Reynolds number*, diketahui bahwa aliran laminar memiliki nilai $N_{Re} < 2000$, sedangkan aliran turbulent memiliki nilai $N_{Re} \geq 2000$ dan nilai maksimum aliran *turbulent* adalah $N_{Re} = 10000$ (Ford and William, 1992). Sub-rezim koefisien aliran *laminar* dihitung menggunakan Rumus Maillet (1905), sedangkan sifat aliran *turbulen t* dihitung dari Rumus Kullman (1983) dalam Malik dan Votjkova (2012) yang diformulasikan pada Rumus,

$$Q_t = Q_0(1 - \beta t) \dots\dots\dots(5)$$

koefisien β pada Rumus 5 dihitung dari Rumus Drogue, 1972 dalam Fiorillo (2014), diformulasikan dalam Rumus 6,

$$\beta = \alpha \left(Q_0^{-\frac{1}{n}} \right) \dots\dots\dots(6)$$

Koefisien α dan β kemudian digunakan untuk menentukan nilai parameter kurva resesi. Berdasarkan nilai linear dan koefisien resesi sub regim aliran, Malik (2007) membuat suatu index yang disebut tingkat karstifikasi. Tingkat karstifikasi berdasarkan rumus kurva resesi dibagi menjadi 10 kelas. Kelas 1 untuk tingkat karstifikasi yang paling rendah, yakni resesi debit hanya berisi komponen aliran *laminar* hingga kelas 10 untuk tingkat karstifikasi yang paling tinggi, yaitu resesi debit hanya berisi komponen aliran *turbulent*. Contoh pemisahan dan penentuan koefisien α dan β dalam satu kurva resesi ditunjukkan pada Gambar 6.

Gambar 6. Contoh kurva resesi dengan 2 aliran laminar dan 2 aliran turbulen (Malik and Votjkova, 2012)

Ringkasan Rumus kurva resesi terangkum pada Tabel 1 dan detailnya disajikan pada Gambar 7.

Tabel 1. Tingkat karstifikasi akuifer karst berdasarkan parameter kurva resesi

Tingkat Karstifikasi	Karakteristik Rumus Kurva Resesi	Parameter Koefisien resesi
0.5 – 2.3	$Q_t = Q_{01} e^{-\alpha_1 t}$	$\alpha_1 < 0.001$ $\alpha_1 = 0.001-0.0025$ $\alpha_1 = 0.0025-0.007$ $\alpha_1 > 0.007$
2.5 – 4.0	$Q_t = Q_{01} e^{-\alpha_1 t} + Q_{02} e^{-\alpha_2 t}$	$\alpha_1 < 0.0024$ dan $\alpha_2 < 0.033$ $\alpha_1 > 0.0043$; dan $\alpha_2 < 0.060$
4.3 – 5.0	$Q_t = Q_{01} e^{-\alpha_1 t} + Q_{04} (1 - \beta_1 t)$	$\alpha_1 > 0.018$ atau $\alpha_2 > 0.16$ $\alpha_1 > 0.018$ dan $\alpha_2 > 0.16$ Nilai β dan α rendah $\alpha_1 > 0$ dan $\alpha_2 > 0$; $\beta_1 > 0$
5.5	$Q_t = Q_{01} e^{-\alpha_1 t} + Q_{02} e^{-\alpha_2 t} + Q_{04} (1 - \beta_1 t)$	
6.0	$Q_t = Q_{01} e^{-\alpha_1 t} + Q_{02} e^{-\alpha_2 t} + Q_{04} (1 - \beta_1 t) + Q_{05} (1 - \beta_2 t)$	Nilai β_2 , β_1 dan α_1 , α_2 tinggi
7.0	$Q_t = Q_{01} e^{-\alpha_1 t} + Q_{04} (1 - \beta_1 t) + Q_{05} (1 - \beta_2 t) + Q_{06} (1 - \beta_3 t)$	Nilai β_3 , β_2 , β_1 dan α tinggi, $\beta_1 > \beta_2$
8.5	$Q_t = Q_{04} (1 - \beta_1 t)$	$\alpha_1, \alpha_2 = 0$ dan $\beta_1 > 0$
9	$Q_t = Q_{04} (1 - \beta_1 t) + Q_{05} (1 - \beta_2 t)$	Nilai β_1 dan β_2 rendah
10.0	$Q_t = Q_{04} (1 - \beta_1 t) + Q_{05} (1 - \beta_2 t) + Q_{06} (1 - \beta_3 t)$	Nilai β_1 , β_2 , dan β_3 tinggi

Sumber : Malik and Votjkova (2012)

Karstification degree	Groundwater flow sub-regimes type	Characteristic recession curve equation	Characteristics of recession-curve parameters	Characteristics of karstification degree
0.5 1.0	Single laminar sub-regime, lower values of α_1	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t}$	$\alpha_1 < 0.001$ $\alpha_1 = 0.001-0.0025$	Usually tectonic faults and shear zones filled with crushed material, with high buffering capability in relation to discharge. Mainly deeper groundwater circulation
2.0 2.3	Single laminar sub-regime, higher values of α_1		$\alpha_1 = 0.0025-0.007$ $\alpha_1 > 0.007$	Tectonic faults filled with crushed material with higher permeability and lower buffering capability in relation to discharge. In some cases deeper groundwater circulation
2.5 2.7 3.0	Combination of two or more sub-regimes with merely laminar flow characterised by different discharge coefficients, lower values of α_1 and α_2	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t}$	$\alpha_1 < 0.0024$ and $\alpha_2 < 0.033$ $\alpha_1 < 0.0024$ or $\alpha_2 < 0.033$ $\alpha_1 = 0.0024-0.0045$; $\alpha_2 = 0.033-0.067$	Aquifer with dense, prevailingly regular fissure network, with majority of micro-fissures and small fissures. Increase of values α_1 and α_2 accompanies increasing permeability and also higher heterogeneity of fissured rock environment
3.5 3.7 4.0	Combination of two or more sub-regimes with merely laminar flow characterised by different discharge coefficients, higher values of α_1 and α_2		$\alpha_1 = 0.0024-0.0043$ and $\alpha_2 = 0.060-0.16$ $\alpha_1 > 0.0043$ and $\alpha_2 < 0.060$ $\alpha_1 = 0.0041-0.018$ and $\alpha_2 = 0.055-0.16$	Aquifer with irregularly developed fissure network, with majority of open macrofissures, also with possible presence of karst conduits of limited extent. In extreme cases, even short-term turbulent flow might occur in this type of rock environment
4.3 4.7 5.0	Discharge hydrogram is composed of a sub-regime with turbulent flow and a sub-regime with laminar flow. Substantial role in groundwater discharge plays the sub-regime with laminar flow	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{04}(1-\beta_1 t)$	$\alpha_1 > 0.018$ or $\alpha_2 > 0.16$ $\alpha_1 > 0.018$ and $\alpha_2 > 0.16$ β and α low values	Aquifer with anticipated existence of crushed water-bearing zone (e.g., fault zone) or by dense network of open small fissures in combination with simple, partly (or occasionally) phreatic conduit system of considerable extent (e.g., with open karstified fault in the vadose zone)
5.5	Complex discharge regime, a combination of one sub-regime with turbulent flow and two sub-regimes with laminar groundwater flow. Discharge sub-regime with turbulent flow is of short-term influence in comparison with overall groundwater discharge	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + Q_{04}(1-\beta_1 t)$	$\alpha_1 > 0$ and $\alpha_2 > 0$ and $\beta_1 > 0$	Extensive disruption and disintegration of rock environment, with majority of open, medium size, both not karstified and karstified fissures in the phreatic zone of the fissure karst aquifer (according to α_1) and with smaller influence of connected conduits (groundwater of large karstic channels, according to β_1)
6.0	Very complex discharge regime, a combination of two sub-regimes with turbulent flow and two sub-regimes with laminar groundwater flow. Discharge sub-regimes with turbulent flow are of short-term influence in comparison with overall groundwater discharge	$Q_t = Q_{01}e^{-\alpha_1 t} + Q_{02}e^{-\alpha_2 t} + Q_{04}(1-\beta_1 t) + Q_{05}(1-\beta_2 t)$	β_2, β_1 and α_1, α_2 high values	Extensive disruption and disintegration of rock environment, with majority of open, medium size, both not karstified and karstified fissures in the phreatic zone of the fissure karst aquifer (according to α_1) and with smaller influence of connected conduits (groundwater of large karstic channels, according to β_1 and β_2)

Gambar 7a. Tingkat karstifikasi akuifer karst berdasarkan parameter kurva resesi Malik and Votjkova (2012)

Karstification degree	Groundwater flow sub-regimes type	Characteristic recession curve equation	Characteristics of recession-curve parameters	Characteristics of karstification degree
7.0	Discharge regime is a combination of one sub-regime with laminar flow with two to three sub-regimes with turbulent flow. Substantial role in groundwater discharge plays the sub-regime with laminar flow	$Q_t = Q_{o1}e^{-\alpha_1 t} + Q_{o4}(1 - \beta_1 t) + Q_{o5}(1 - \beta_2 t) + Q_{o6}(1 - \beta_3 t)$	$\beta_3, \beta_2, \beta_1$ and α high values, $\beta_1 > \beta_2$	Developed karstification of the aquifer, formed by large open tectonic faults and karstic channels, as well as by significant portion of karstified and non-karstified fissures and micro-fissures in rock blocks, generating phreatic zone with karstic groundwater table
8.0	Discharge regime is a combination of a sub-regime with laminar flow with two to three sub-regimes with turbulent flow. Substantial role in groundwater discharge is played by sub-regimes with turbulent flow. Sub-regime with laminar flow is less significant		$\beta_3, \beta_2, \beta_1$ and α high values	Highly developed karstification of the aquifer, formed by large open conduits (karst channels). Presence of open active small fissures and micro-fissures is reduced. Circulation of substantial part of groundwater is mainly via preferred pathways of channel systems. Phreatic zone is missing or its role is insignificant
8.5	Groundwater flow regime is represented merely by turbulent flow, with only one turbulent flow sub-regime present, which represents turbulent circulation in channel systems (conduits) without hydraulic connection to the groundwater in adjacent rock blocks. Groundwater circulation is mostly connected to vadose zone	$Q_t = Q_{o4}(1 - \beta_1 t)$	$\alpha_1; \alpha_2 = 0$ and $\beta_1 > 0$	Karstic aquifer with well-developed conduit system, without any significant connection to open phreatic fissure systems in adjacent rock blocks. Extensively developed conduit system can ensure permanent groundwater replenishment
9.0	Groundwater flow regime is represented merely by turbulent flow, consisting of two turbulent flow sub-regimes. These represent turbulent circulation in channel systems (conduits) without hydraulic connection to the groundwater in adjacent rock blocks. Groundwater circulation is mostly connected to vadose zone	$Q_t = Q_{o4}(1 - \beta_1 t) + Q_{o5}(1 - \beta_2 t)$	β_1, β_2 low values	Karstic aquifer with well-developed conduit systems of karstic groundwater pathways, without any significant connection to open phreatic fissure systems in adjacent rock blocks. Replenishment of groundwater resources can still be ensured by extensively developed conduit system
10.0	Complex turbulent flow regime of groundwater discharge, consisting of three different turbulent flow sub-regimes. Probability of a very complex groundwater circulation by occasional flows in the vadose zone. Documented only in perennial flows	$Q_t = Q_{o4}(1 - \beta_1 t) + Q_{o5}(1 - \beta_2 t) + Q_{o6}(1 - \beta_3 t)$	β_1, β_2 and β_3 high values	Karstic aquifer with extensive conduit system, without any significant connection to open phreatic fissure systems in adjacent rock blocks. In its spatial extent, the conduit system is bound only to the vadose zone, without enabling permanent groundwater replenishment

Gambar 7b. Tingkat karstifikasi akuifer karst berdasarkan parameter kurva resesi Malik and Votjkova (2012)

4. Analisis Hubungan antara tingkat karstifikasi dengan debit aliran

- Analisis *scatter plot*

Analisis *scatter plot* dilakukan untuk mengetahui keberadaan hubungan antara nilai **tingkat karstifikasi** dan luas daerah tangkapan.

5. Analisis tingkat karstifikasi secara temporal dan spasial

- Analisis Grafis dan Tabulasi

Nilai tingkat karstifikasi yang diperoleh dibuat tabel dan grafisnya untuk mendeskripsikan apakah ada perbedaan dari satu tempat ke tempat yang lain dan dari satu waktu ke waktu yang lain.

- Analisis Deskriptif

Analisis deskriptif dilakukan untuk menjelaskan adanya variasi temporal dan spasial dari nilai tingkat karstifikasi.

VI. HASIL DAN PEMBAHASAN

6.1. Karakteristik Umum Mataair di Daerah Penelitian

Penelitian ini diterapkan pada dua kawasan karst yang berkembang pada formasi batuan, umur geologi, dan kenampakan topografi karst yang berbeda, yaitu **(1) Kawasan Karst Gunung Sewu**, Kabupaten Gunung Kidul, Yogyakarta; dan **(2) Kawasan Karst Rengel**, Kabupaten Tuban, Jawa Timur (Gambar 9).

Gambar 9. Lokasi mataair di daerah penelitian

Kawasan Karst Gunung Sewu berada pada Formasi Wonosari yang tersusun dari batugamping berlapis, batugamping masif, dan batugamping terumbu. Ciri khusus pada formasi ini adalah dominasi porositas sekunder berupa rongga-rongga hasil pelarutan. Struktur geologi Kawasan Karst Gunung Sewu secara umum merupakan homoklin yang miring ke selatan dengan sudut lereng 5°-15°. struktur

retakan menunjukkan arah jurus umum barat laut-tenggara dan timur laut-baratdaya (Kusumayudha, 2005). Kenampakan geomorfologi dalam kawasan ini diungkapkan lebih komprehensif oleh Haryono and Day (2004) yang terdiri dari morfologi karst *labirin*; morfologi karst *poligonal* yang mendominasi daerah selatan; dan morfologi karst *tower* yang mendominasi daerah utara hingga tengah.

Karakteristik Aliran Mataair Beton

Mataair Beton terletak di Desa Sumber Giri, Kecamatan Ponjong pada koordinat 49 M 0469977; 9121249. Mataair Beton merupakan salah satu mataair yang mempunyai potensi sumberdaya air karena didalamnya mengalir air yang memiliki luah besar dan sudah digunakan oleh penduduk untuk pengairan dan kegiatan tambak di beberapa desa. Mataair Beton 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 10).

Gambar 10. Kondisi Aliran Mataair Beton (kiri) dan Instalasi Alat Pengukur Tinggi Muka Air

Untuk memperoleh variasi debit bulanan, 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 November 2007 sampai dengan September 2008, dan disajikan pada Tabel 3. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 11). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Mataair Beton dinyatakan sebagai:

$$y = 4449,6x^{2,3324} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

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

Tabel 3. Hasil Pengukuran Debit Aliran Mataair Beton

No	Tanggal	TMA (m)	Debit aliran (liter/detik)
1	13-Nov-07	0,25	100,01
2	5-Jan-08	1,00	4426,80
3	12-Jan-08	0,65	1437,20
4	19-Jan-08	0,54	860,89
5	26-Jan-08	0,40	686,89
6	09-Feb-08	0,62	1392,31
7	16-Feb-08	0,67	1808,56
8	23-Feb-08	0,70	2069,86
9	01-Mar-08	0,59	1133,49
10	08-Mar-08	0,64	1688,71
11	15-Mar-08	1,08	5550,56
12	29-Mar-08	0,60	1533,83
13	12-Apr-08	0,63	1260,23
14	10-Mei-08	0,39	412,28
15	28-Juli-08	0,27	204,97
16	31-Ags-08	0,22	178,88
17	20-Sep-08	0,24	136,71

Sumber : Pengukuran lapangan (2007-2008)

Gambar 11. Hubungan Tinggi Muka Air dan Debit di Mataair Beton

Hasil kurva hubungan tinggi muka air di Mataair Beton dengan debit alirannya tidak mempunyai hubungan linier karena sifat aliran Mataair yang cenderung turbulen dan bukan laminar seperti halnya yang dijumpai pada sungai permukaan. Selanjutnya, rumus (8) digunakan untuk menghitung debit aliran sepanjang bulan pada alat pencatat tinggi muka air yang dipasang di Mataair Beton. Tinggi muka air yang tercatat di Mataair Beton mempunyai interval pencatatan tiap 30 menit. Hasil

penggambaran variasi debit aliran Mataair Beton selama sembilan bulan (Januari 2009 sampai dengan September 2009) disajikan pada Gambar 12.

Gambar 12. Variasi Debit Aliran Mataair Beton Periode 2 Januari 2009-09 September 2009

Mataair Beton bersifat Perennial, yaitu mengalir sepanjang tahun. Hasil pencatatan dari 2 Januari 2009 sampai dengan 09 September 2009 menunjukkan bahwa debit minimum dijumpai pada tanggal 18 Mei 2009, sebesar 505,9 liter/detik. Periode tanpa kejadian hujan yang diindikasikan dengan tidak terdapatnya kenaikan debit aliran terjadi dari tanggal 14 Juli sampai dengan 9 September 2009. Pada rentang waktu tersebut, secara teori tidak ada kejadian hujan sehingga komponen pengisi aliran sungai bawah tanah didominasi oleh aliran *diffuse*. Periode banjir (*flood pulse period*) dimulai sejak tanggal 2 Januari 2009 sampai akhir masa pencatatan (14 Juli 2009). Pada kurun waktu tersebut tercatat 23 kali kejadian banjir yang merupakan efek dari terjadinya hujan pada daerah tangkapan Mataair Beton. Beberapa banjir yang cukup besar dua diantaranya adalah yang terjadi pada tanggal 20 April 2009, dengan debit puncak sebesar 11111,7 liter/detik pada pukul 14.30 WIB, dan banjir pada tanggal 18 Mei 2009, pukul 15.30 dengan debit puncak mencapai 8234,5 liter/detik.

Karakteristik Aliran Mataair Petoyan

Mataair Petoyan secara administratif terletak di Dusun Susukan, Desa Giritirto, Kecamatan Purwosari, Kabupaten Gunungkidul, Provinsi DIY. Mataair Petoyan merupakan mataair *perenial* atau mengalir sepanjang tahun dan tidak kering pada musim kemarau. Pada periode tahun 2012-2013 mataair ini memiliki debit rata-rata 7,6 liter/detik dengan debit minimum 1,9 liter/detik dan maksimum 48,4 liter/detik. Mataair tipe *Perennial* ini telah dimanfaatkan untuk kebutuhan domestik. Mataair Petoyan selalu berair sepanjang tahun (*perenial*) dan mempunyai morfometri alur output mataair yang

memungkinkan untuk dipasang alat pencatat tinggi muka air (*water level data logger*), sehingga kondisi aliran sepanjang tahun dapat tercatat (Gambar 13).

Gambar 13. Kondisi aliran Mataair Petoyan (kiri) dan *automatic water level logger* (kanan)

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 pada periode antara 19 April 2013 sampai dengan 16 Agustus 2013, yang kemudian disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Hasil Pengukuran Debit Aliran Mataair Petoyan

No	Tanggal	TMA (m)	Debit aliran (liter/detik)
1	13 Oktober 2012	0,145	0,27
2	21 Oktober 2012	0,071	0,42
3	28 Oktober 2012	0,090	0,29
4	10 Nopember 2012	0,028	0,24
5	21 Nopember 2012	0,045	0,29
6	23 Februari 2013	0,465	2,71
7	3 Maret 2013	0,448	2,60
8	09 Maret 2013	0,489	2,85
9	17 Juni 2013	0,454	2,80

Sumber : Pengukuran lapangan (2013)

Selanjutnya, dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 14). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Mataair Petoyan dinyatakan sebagai:

$$y = 6,13 x - 0,173 \quad \dots\dots\dots(9)$$

Keterangan:

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

Gambar 14. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Mataair Petoyan

Hasil kurva hubungan tinggi muka air di Mataair Petoyan dengan debit alirannya mempunyai hubungan linier karena sifat alirannya yang cenderung laminar seperti halnya yang dijumpai pada sungai permukaan. Selanjutnya, rumus *rating curve* di atas digunakan untuk menghitung debit aliran sepanjang tahun pada alat pencatat tinggi muka air yang dipasang di Mataair Petoyan. Tinggi muka air yang tercatat di Mataair Petoyan mempunyai interval pencatatan tiap 30 menit. Hasil penggambaran variasi debit aliran Mataair Petoyan (April –Agustus 2013) disajikan pada Gambar 15.

Gambar 15. Variasi Debit Mataair Petoyan 19 April 2013 - 16 Agustus 2013

Karakteristik Aliran Sungai Bawah Tanah Gilap

Sungai bawah tanah Gua Gilap (49 M 472076; 9119137) terletak di Kecamatan Paliyan dengan panjang gua 1090 meter, berada di bagian hulu daerah tangkapan SBT Bribin dan diasumsikan mewakili SBT Bribin bagian atas, [MacDonald and Partners \(1984\)](#) menyebutkan bahwa Gua Gilap selalu dialiri air sepanjang tahun dan memiliki debit minimum sebesar sekitar 6 liter/detik yang terjadi

pada puncak musim kemarau. 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 16).

Gambar 16. 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 5. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 17). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Gua Gilap dinyatakan sebagai:

$$y = 7,9129e^{2,7173x} \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

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

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 (8) 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 18

Tabel 5. 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 17. Hubungan Tinggi Muka Air dan Debit di Gua Gilap

Gambar 18. 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.

Karakteristik Aliran Sungai Bawah Tanah Ngreneng

Sungai bawah tanah Gua Ngreneng (49 M 463590; 9112961), berdasarkan hasil *tracer test* oleh MacDonald and Partners (1984), diketahui bahwa SBT Gua Ngreneng merupakan 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. SBT tipe *perennial* ini 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.

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 19. Hasil pengukuran debit di Gua Ngreneng disajikan pada Tabel 6.

Gambar 19. Kondisi Aliran di Gua Ngreneng (kiri), dan Instalasi Stasiun Aliran (kanan)

Tabel 6. 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 16) hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di gua Ngreneng, berupa persamaan :

$$y = 49,164e^{1,343x} \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

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

Gambar 20. 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 21.

Gambar 21. 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.

Karakteristik Aliran Sungai Bawah Tanah Seropan

Gua Seropan terletak di Dusun Semuluh Lor, Desa Ngepohsari, Kecamatan Semanu pada koordinat 49 L 0465025; 9113946, dan berketinggian sekitar 203 m diatas permukaan laut. Sistem perguaan aktif dan merupakan salah satu gua yang mempunyai potensi sumberdaya air karena didalamnya mengalir sungai bawah tanah yang memiliki luah besar dan sudah digunakan oleh penduduk di beberapa desa. Gua Seropan 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 22).

Gambar 22. Kondisi Aliran Gua Seropan (kiri) dan Instalasi Alat Pengukur Tinggi Muka Air

Untuk memperoleh variasi debit bulanan, 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 Februari 2009 sampai dengan Agustus 2009, dan disajikan pada Tabel 7. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 19). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Gua Seropan dinyatakan sebagai:

$$y = 496,41\ln(x) + 760,01 \dots\dots\dots (12)$$

Keterangan:

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

Tabel 7. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Seropan

No	Tanggal	TMA (m)	Debit aliran (liter/detik)
1	24-Jan-09	1,190	810
2	02-Feb-09	1,210	825
3	26-Feb-09	1,250	880
4	21-Apr-09	1,269	890
5	26-Mei-09	1,270	890
6	30-Mei-09	1,254	870
7	20-Jun-09	1,300	940
8	09-Jul-09	1,868	1090
9	05-Agust-09	1,843	1030

Sumber : Pengukuran lapangan (2009)

Gambar 23. Hubungan Tinggi Muka Air dan Debit di Gua Seropan

Hasil kurva hubungan tinggi muka air di Gua Seropan 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 (10) digunakan untuk menghitung debit aliran sepanjang bulan pada alat pencatat tinggi muka air yang dipasang di Gua Seropan. Tinggi muka air yang tercatat di Gua Seropan mempunyai interval pencatatan tiap 30 menit. Hasil penggambaran variasi debit aliran Gua Seropan selama tujuh bulan (Februari 2009 sampai dengan Agustus 2009) disajikan pada Gambar 24.

Gambar 24. Variasi Debit Aliran Gua Seropan Periode 2 Februari 2009-30 Agustus 2009

Gua Seropan selalu bersifat Perenial, yaitu mengalir sepanjang tahun. Hasil pencatatan dari 2 Februari 2009 sampai dengan 30 Agustus 2009 menunjukkan bahwa debit minimum dijumpai pada tanggal 2 Februari 2009, sebesar 849,3 liter/detik. Periode tanpa kejadian hujan yang diindikasikan dengan tidak terdapatnya kenaikan debit aliran terjadi dari tanggal 3 April sampai dengan 30 Agustus 2009. 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 Mei-Agustus 2009.

Periode banjir (*flood pulse period*) dimulai sejak tanggal 2 Februari 2009 sampai akhir masa pencatatan (2 April 2009). Pada kurun waktu tersebut tercatat 7 kali kejadian banjir yang merupakan efek dari terjadinya hujan pada daerah tangkapan Gua Seropan. Beberapa banjir yang cukup besar dua diantaranya adalah yang terjadi pada tanggal 12 Februari 2009, dengan debit puncak sebesar 949,9 liter/detik pada pukul 08.00 WIB, dan banjir pada tanggal 2 April 2009, pukul 18.00 dengan debit puncak mencapai 979,5 liter/detik.

Karakteristik Aliran Sungai Bawah Tanah Toto

Sungai bawah tanah Gua Toto (49 M 0462421; 9113408) terletak di Dusun Wediutah, Desa Ngepohsari, Kecamatan Semanu, berada pada ketinggian 164 mdpal. Gua Toto selalu berair sepanjang tahun (*perenial*) dengan debit rata-rata 153,5 liter/detik, debit minimum 124,5 liter/detik dan maksimum 943,5 liter/detik, sayangnya potensi sumberdayaair di dalamnya hingga saat ini masih belum dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar;

Gua Toto selalu berair sepanjang tahun (*perenial*) 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 25).

Gambar 25. Kondisi Aliran Gua Toto dan Instalasi Alat Pengukur Tinggi Muka Air

Untuk memperoleh variasi debit bulanan, 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 November 2008 sampai dengan September 2009, dan disajikan pada Tabel 8. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 26). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Gua Toto dinyatakan sebagai:

$$y = 5500,3x^2 - 3007,9x + 536,37 \quad \dots\dots\dots (13)$$

Keterangan:

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

Tabel 8. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Toto

No	Tanggal	TMA (m)	Debit aliran (liter/detik)
1	01-Nop-08	0,294	129
2	25-Nop-08	0,500	409
3	24-Jan-09	0,274	110
4	26-Feb-09	0,312	143
5	21-Apr-09	0,344	148
6	26-Mei-09	0,358	153
7	20-Jun-09	0,339	147
8	09-Jul-09	0,32	131
9	05-Agust-09	0,31	159

Sumber : Pengukuran lapangan (2009)

Gambar 26. Hubungan Tinggi Muka Air dan Debit di Gua Seropan

Hasil kurva hubungan tinggi muka air di Gua Toto 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 (1) digunakan untuk menghitung debit aliran sepanjang bulan pada alat pencatat tinggi muka air yang dipasang di Gua Toto. Tinggi muka air yang tercatat di Gua Toto mempunyai interval pencatatan tiap 30 menit. Hasil penggambaran variasi debit aliran Gua Toto selama sebelas bulan (November 2008 sampai dengan September 2009) disajikan pada Gambar 27.

Gambar 27. Variasi Debit Aliran Gua Toto Periode 25 November 2008-9 September 2009

Gua Toto bersifat Perennial, yaitu mengalir sepanjang tahun. Hasil pencatatan dari 25 November 2008 sampai dengan 9 September 2009 menunjukkan bahwa debit minimum yang terjadi sebesar 124,5 liter/detik. Periode tanpa kejadian hujan yang diindikasikan dengan tidak terdapatnya

kenaikan debit aliran terjadi dari tanggal 3 April sampai dengan 9 September 2009. 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 Mei-September 2009.

Periode banjir (*flood pulse period*) dimulai sejak tanggal 25 November 2008 sampai akhir masa pencatatan (3 April 2009). Pada kurun waktu tersebut tercatat 7 kali kejadian banjir yang merupakan efek dari terjadinya hujan pada daerah tangkapan Gua Toto. Beberapa banjir yang cukup besar dua diantaranya adalah yang terjadi pada tanggal 12 Februari 2009, dengan debit puncak sebesar 943,5 liter/detik pada pukul 09.30 WIB, dan banjir pada tanggal 3 April 2009, pukul 09.00 dengan debit puncak mencapai 814,0 liter/detik.

Karakteristik Aliran Sungai Bawah Tanah Bribin

Sungai bawah tanah Gua Bribin (49 M 464666;9111646) terletak di Kecamatan Semanu, mengalir sepanjang tahun (perennial) dengan debit rata-rata 800-900 liter/detik. Memiliki lorong gua sepanjang 3.900 meter, berada di bagian hilir dan dianggap sebagai pemunculan terakhir Sungai Bribin sebelum akhirnya muncul sebagai *resurgence* di Pantai Baron.

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 28.).

Gambar 28. Pemasangan AWLR di Gua Bribin (kiri), dan *water level data logger*

Analisis kurva hubungan tinggi muka air dan debit dilakukan dengan menggunakan kurva yang sudah dipublikasikan oleh Suryanta (2001), yang data pengukurannya disajikan pada Tabel 9. dan grafiknya ditunjukkan pada Gambar 29.

Gambar 29. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Gua Bribin

Tabel 9. 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 \(2001\)](#)

Rumus lengkung aliran di Gua Bribin adalah :

$$y = 1204,5 x^{1,0103} \dots\dots\dots (12)$$

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 30.

Gambar 30. 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.

Karakteristik Aliran Mataair Ngerong

Mataair yang berada di Kawasan Karst Rengel dalam penelitian ini adalah Mataair Ngerong (49 M 611269; 9219516), terletak di Desa Rengel, Kecamatan Rengel, sekitar 30 km arah selatan Kota Tuban. Secara geologi Karst Rengel berada pada Formasi Paciran dengan litologi batugamping terumbu, terbentuk pada awal hingga pertengahan Miosen dan mulai tersingkap sejak akhir Pleistosen (Bemmelen, 1949). Sebaran Fasies batuan karbonat penyusun Formasi Paciran yang terdapat di Karst Rengel terdiri dari *wackestone* dan *boundstone*, Karst Rengel dan sekitarnya merupakan antiklinal yang terkikis dengan arah jurus ke timur-barat dengan kemiringan semu sebesar 15° (Haryono, dkk., 2001, 2008). Secara geomorfologi mataair ini berada di lereng kaki perbukitan Karst Rengel bagian selatan yang berbatasan dengan dataran alluvial Sungai Bengawan Solo. Mataair tipe *perennial* ini berada pada ketinggian 45 mdpal dan pada daerah imbuhan mataair dengan elevasi tertinggi mencapai 335 mdpal. Haryono (2008) mengungkapkan bahwa kenampakan eksokarst baik

mayor maupun minor di Karst Rengel tidak berkembang dengan baik, kemiringan lereng berkisar antara 28% hingga 33%, sedangkan *doline* tidak berkembang dengan baik di wilayah ini. Hidrograf aliran mataair Ngerong disajikan pada Gambar 31.

Gambar 31. Variasi Debit Aliran Mataair Ngerong

Selanjutnya, ringkasan karakteristik debit selama periode penelitian di tiap mataair dan sungai bawah tanah ditunjukkan pada Tabel 10.

Tabel 10. Karakteristik debit mataair dan sungai bawah tanah daerah penelitian

Mataair dan Sungai Bawah Tanah	Periode	Debit (Q) liter/detik		
		Q min	Q max	Q mean
Mataair Beton	Januari – September 2009	505,90	11111,70	1555,70
Mataair Petoyan	Oktober 2012-Agustus 2013	1,95	48,49	7,62
SBT Gilap	Mei 2006 – April 2007	3,00	380,00	47,31
SBT Ngreneng	Mei 2006 – April 2007	60,00	1905,30	180,04
SBT Seropan	Februari – Agustus 2009	812,40	1184,50	875,70
SBT Toto	November 2008-September 2009	124,50	943,50	153,50
SBT Bribin	Mei 2006 – April 2007	1630,00	2520,00	1771,11
SBT Ngerong	Januari – Juli 2014	580,20	6407,90	968,50

Sumber : Hasil analisis data primer dan sekunder (2014)

Hidrograf dan Pemisahan Aliran Dasar Mataair

Pengukuran debit mataair dan sungai bawah tanah dilakukan pada beberapa variasi tinggi muka air rendah, sedang, hingga tinggi untuk mendapatkan konstanta dasar dalam menentukan debit aliran berdasarkan variasi tinggi muka airnya. Debit dan tinggi mukaair yang terukur dianalisis dengan *stage discharge rating curve* sehingga didapatkan konstanta pada tiap mataair dan sungai bawah tanah (Tabel 11), dimana y adalah debit aliran (liter/detik) dan x adalah tinggi permukaan air (meter). Tinggi muka air yang telah terekam dalam satu periode penelitian dikonversi menjadi debit aliran menggunakan konstanta dari rating curve tersebut.

Tabel 11. Hasil analisis *stage discharge rating curve* di tiap lokasi penelitian

Mataair dan SBT	Pengukuran debit	Rumus dari <i>Rating Curve</i>
Mataair Beton	17 kali	$y = 4449,6x^{2,3324}$
Mataair Petoyan	12 kali	$y = 94.591(x) + 0.6292$
SBT Gilap	9 kali	$y = 7,9129e^{2,7173x}$
SBT Ngreneng	9 kali	$y = 49,164e^{1,343x}$
SBT Seropan	7 kali	$y = 1418,9\ln(x) + 557,22$
SBT Toto	9 kali	$y = 5500,3x^2 - 3007,9x + 536,37$
SBT Bribin	15 kali	$y = 1204,5 x^{1,0103}$
SBT Ngerong	20 kali	$y = 5.0196(x) - 2.0501$

Sumber : Hasil analisis data primer dan sekunder (2014)

Debit yang terekam akan dapat menggambarkan seluruh hidrograf banjir dalam satu periode pencatatan data. Tidak semua hidrograf banjir dapat dianalisis, sehingga dalam setiap periode awal, tengah, dan akhir musim hujan dipilih beberapa hidrograf banjir yang memenuhi kriteria untuk dianalisis lebih lanjut. Bentuk hidrograf banjir terpilih tiap mataair dan sungai bawah tanah dapat dilihat pada Gambar 33 yang diselingi dengan metode pemisahan aliran dasar menggunakan *straight line methods*. Hidrograf yang dipilih mewakili banjir pada awal musim penghujan (kode banjir A), pertengahan musim penghujan (kode banjir B), dan akhir musim penghujan (kode banjir C). Pemisahan aliran dasar menggunakan *straight line methods* pada tiap hidrograf menghasilkan titik pada kurva resesi yang memisahkan resesi *quickflow* dari resesi *baseflow* (*separation point*), titik ini sebagai batas dalam menghitung waktu dari debit puncak menuju aliran dasar (*time to baseflow*= T_b) dan waktu seluruh kejadian hidrograf (*time event*). Waktu menuju puncak banjir (*Time to Peak*= T_p), *time to baseflow*, dan *time event* merupakan parameter hidrograf yang paling mudah dikenali selain bentuk kurva hidrografnya. Rata-rata T_p dan T_b dari beberapa kejadian banjir di tiap mataair yang dijabarkan pada Tabel 12 menunjukkan kondisi hidrograf yang berbeda, Hal ini memang menunjukkan bahwa struktur rekahan akuifer yang mencirikan porositas *diffuse*, *fissures* dan *conduit* dalam akuifer karst bersifat heterogen dan anisotropis, sehingga dalam satu kawasan karst yang sama memiliki karakteristik yang berbeda dalam merespon *input*, menyimpan dan melepaskan simpanan akuifernya. Waktu tunda akuifer dalam merespon kejadian hujan dilihat dari parameter *time to peak* dan bentuk resesi hidrograf dilihat dari parameter *time to baseflow* merupakan indikator pertama dalam melihat kapasitas daerah imbuhan mataair dan transmisivitas akuifer (Kresic and Bonacci, 2010).

SBT Seropan

SBT Toto

SBT Bribin

SBT Ngerong

Mataair Beton

Mataair Petoyan

SBT Gilap

SBT Ngrengeng

Gambar 33. Hidrograf aliran banjir terpilih dari tiap lokasi penelitian

Tabel 12. Karakteristik parameter hidrograf dan persentase aliran dasar

Mataair dan SBT	Hidrograf Banjir yang diukur	Rerata Waktu (Jam)			% Baseflow Musim Hujan		
		T _p	T _b	T _{event}	Awal	Tengah	Akhir
Mataair Beton	23 Banjir	12,9	193,4	154	48,22	51,77	46,94
Mataair Petoyan	10 Banjir	3,6	9,3	12,9	40,36	22,67	39,56
SBT Gilap	16 Banjir	3	36	37,56	52,78	55,68	72,12
SBT Ngreneng	8 Banjir	4,5	16,8	56,12	45,10	48,75	-
SBT Seropan	7 Banjir	83,6	619,2	702,85	-	70,47	67,09
SBT Toto	7 Banjir	14,4	910	924,28	73,09	66,64	72,65
SBT Bribin	12 Banjir	5,5	36	41,45	88,79	87,13	97,27
SBT Ngerong	13 Banjir	10,25	20,54	30,77	50,46	57,26	48,14

Sumber : Hasil analisis data primer dan sekunder (2014)

Berdasarkan parameter waktu debit menuju puncak banjir (T_p) dan Waktu dari debit puncak menuju aliran dasar (T_b) pada Tabel 10, 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. Diikuti oleh Mataair Petoyan (T_p=3.6 jam) dengan rentang debit yang signifikan (7-44 liter/detik). Meskipun respon terhadap input cepat, Gua Gilap memiliki kapasitas melepaskan air yang lebih lama dibanding Gua Ngreneng (T_b=16.8 jam), hal ini mengindikasikan bahwa Gua Ngreneng mempunyai sifat akuifer yang lebih cepat melepaskan komponen aliran dasar (*diffuse*) dan fungsi Gua Ngreneng sebagai pengatus aliran permukaan langsung (*point recharge*) dari cekungan-cekungan di sekitarnya.

Gua Bribin memiliki lorong gua paling panjang diantara yang lain sekitar 3.900 meter, berpengaruh pada cepatnya konsentrasi aliran (*point recharge* dan *shaft flow*) yang masuk dari daerah tangkapan sekitarnya sehingga memiliki respon yang cepat terhadap hujan (T_p=5.5 jam), namun demikian kapasitas akuifer dalam melepaskan aliran dasar sama dengan Gua Gilap yang berada di bagian hulu (T_b=36 jam) dan lebih baik daripada Gua Ngerong.

Gua Ngerong merupakan kenampakan endokarst paling menonjol di Karst Rengel. memiliki respon terhadap kejadian hujan dan kapasitas akuifer dalam melepaskan air yang tergolong cepat (T_p=10.25 jam; T_b=20.54 jam). Fakta ini dikontrol oleh morfologi permukaan berupa *point recharge doline* dan *sinkhole* di daerah tangkapan Gua Ngerong yang berkontribusi besar dalam menambah aliran *conduit* saat banjir, model imbuhan airtanahnya pada saat musim hujan didominasi oleh *internal runoff* yaitu aliran permukaan dari air hujan tertampung di cekungan (*doline*) dan masuk ke akuifer karst melalui ponor Hal ini berbeda dengan karakteristik akuifer di Gua Seropan, Toto dan Mataair Beton yang memiliki respon terhadap hujan cukup lama (T_p=83.6 jam; 14.4 jam; dan 12.9 jam), tipe imbuhan airtanah khususnya di Seropan lebih didominasi dengan *diffuse infiltration* yaitu air hujan yang jatuh di permukaan karst terinfiltrasi melalui pori-pori tanah melalui *fracture* dan *matrix*. kapasitas akuifer dalam melepaskan simpanan air pada Seropan, Toto dan Beton ini didominasi oleh aliran

diffuse yang lambat sehingga memiliki kontribusi besar dalam penyediaan debit SBT Bribin saat musim kemarau.

Kapasitas simpanan aliran dasar paling besar adalah Gua Bribin. Hal ini ditunjukkan dengan persentase *baseflow* pada saat musim penghujan berkisar antara 87-97%, saat awal musim penghujan air yang terinfiltrasi pada zone epikarst terlebih dulu memenuhi kapasitas lengas tanah, sehingga aliran dasar berkontribusi sebesar 88% terhadap total aliran, sedangkan pada akhir musim penghujan akuifer memiliki kapasitas simpanan air dalam jumlah yang cukup besar, diikuti tipe imbuhan melalui ponor dan cekungan (*internal runoff*) tidak memiliki kontribusi yang cukup signifikan karena sedikitnya intensitas hujan yang terjadi, sehingga saat banjir terjadi, tipe aliran didominasi oleh persentase aliran dasar sebesar 97%. Selain faktor tersebut, *infiltrasi diffuse* melalui zone *vadose* dari daerah tangkapan bagian hulu dan tengah terkonsentrasi secara lateral ke daerah tangkapan Gua Bribin yang berada di bagian hilir sistem SBT Bribin-Baron menambah pasokan aliran dasar yang sangat besar untuk kebutuhan di musim kemarau.

6.3. Variasi Spasial Derajat Karstifikasi

Hasil analisis derajat karstifikasi berdasarkan metode analisis kurva resesi yang dikembangkan oleh Kullman (2000) dan Malik (2007), menghasilkan tingkat karstifikasi yang berbeda pada tiap mataair dan sungai bawah tanah secara lokal. dalam satu kawasan karst dari hasil penelitian ini dapat dibedakan antara perkembangan karstifikasi di bagian hulu dan di bagian hilir. Istilah hulu dan hilir dalam penelitian ini untuk memudahkan pemahaman variasi spasial dalam satu sistem sungai bawah tanah di akuifer karst. Ruang lingkup yang lebih luas, nantinya akan dapat dibedakan derajat karstifikasi antara di Karst Gunung Sewu di bagian selatan Pulau Jawa dengan Karst Rengel di bagian selatan Jawa. Ringkasan derajat karstifikasi pada masing-masing lokasi disajikan pada Tabel 13.

Daerah hulu dari sistem SBT Bribin di Karst Gunung Sewu dalam penelitian ini diwakili oleh Gua Gilap dan Mataair Beton, dan daerah hilir diwakili oleh Gua Seropan, Toto, dan Bribin, sedangkan Gua Ngrengeng meskipun dianggap sebagai bocoran dari sistem SBT Bribin, kita asumsikan sebagai daerah bagian tengah. Mataair Petoyan memiliki sistem yang berbeda dengan SBT Bribin, diindikasikan memiliki daerah imbuhan yang lebih sempit dan terbatas. Karst Rengel hanya dapat diwakili oleh Gua Ngerong sebagai daerah hilir dan menjadi salah satu outlet sistem sungai bawah tanah di Karst Rengel.

Tabel 13. Sebaran spasial derajat karstifikasi di daerah penelitian

Mataair dan SBT	Jumlah banjir yang dianalisis	Derajat karstifikasi	Rumus kurva resesi	Deskripsi
Mataair Beton	3	6,6	$Q_t = 2.384 - 0.009t + 3.304(1 - 0.005t) + 7.216(1 - 0.0005t)$	Akuifer karst yang telah terkarstifikasi pada tingkat dewasa karena pengaruh patahan dan saluran karst terbuka, dengan saluran conduit dan non-karst yang telah berkembang dan menuju pada perkembangan muka airtanah freatik secara wilayah
Mataair Petoyan	3	3,7	$Q_t = + 0.0340.0703t - 0.0350.0159t + 0.0680.0555t$	Akuifer karst dengan perkembangan jaringan fissure yang belum seragam, mayoritasnya adalah makrofissure terbuka dan minim adanya saluran karst (conduit). Saat periode banjir ada kemungkinan (langka) terjadi aliran turbulen dalam jangka pendek
SBT Gilap	3	5,8	$Q_t = 0.103^{0.0256t} + 0.183(1 - 0.145t)$	Mulai adanya karstifikasi dan pelarutan batuan karbonat, dengan pelorongan yang terbentuk mulai bersifat terbuka, berukuran sedang (fissure), baik dialami oleh batuan yang mudah atau sulit larut di zone freatik. Sifat aliran sedikit dipengaruhi oleh saluran terbuka (conduit) yang saling berhubungan
SBT Ngreneng	3	6,0	$Q_t = 0.191^{0.0019t} + 0.260(1 - 0.851t) + 0.385(1 - 0.099t)$	Mulai adanya karstifikasi dan pelarutan batuan karbonat, dengan pelorongan yang terbentuk mulai bersifat terbuka, berukuran sedang (fissure), baik dialami oleh batuan yang mudah atau sulit larut di zone freatik. Sifat aliran sedikit dipengaruhi oleh saluran terbuka (conduit) yang saling berhubungan
SBT Seropan	3	5,2	$Q_t = 0.218^{0.0045t} + 0.244^{0.0186t} + 0.424(1 - 0.0365t)$	Akuifer dengan adanya masukan air dari zona sesar di daerah hulu (misal), dengan perkembangan jaringan saluran kecil (diffuse-fissure) yang cukup intensif, sebagiannya bersifat terbuka dan sudah mempunyai sistem air freatik yang bersifat terbuka
SBT Toto	3	5,0	$Q_t = 1.447^{0.009t} + 1.639(1 - 0.000019t)$	Akuifer dengan adanya masukan air dari zona sesar di daerah hulu (misal), dengan perkembangan jaringan saluran kecil (diffuse-fissure) yang cukup intensif, sebagiannya bersifat terbuka dan sudah mempunyai sistem air freatik yang bersifat terbuka
SBT Bribin	3	7,7	$Q_t = 1.847^{0.0007t} + 1.911(1 - 0.007t) + 1.936(1 - 0.0028t)$	Akuifer terkarstifikasi pada tingkat yang sangat berkembang, yang didominasi oleh saluran terbuka (conduit) yang besar. Peran dari saluran menengah (fissure) dan jaringan saluran kecil (diffuse network) sudah sangat minim. Zona freatik sudah hilang atau perannya sudah tidak lagi signifikan. Hampir seluruh siklus airtanah telah bergabung pada sistem saluran terbuka.
SBT Ngerong	3	4,8	$Q_t = 1.447^{0.009t} + 1.639(1 - 0.000019t)$	Akuifer dengan adanya masukan air dari zona sesar di daerah hulu (misal), dengan perkembangan jaringan saluran kecil (diffuse-fissure) yang cukup intensif, sebagiannya bersifat terbuka dan sudah mempunyai sistem air freatik yang bersifat terbuka

Sumber : Hasil analisis data primer dan sekunder (2015)

Derajat karstifikasi di bagian hulu yang dalam penelitian ini diwakili oleh Gua Gilap dan Mataair Beton memiliki derajat karstifikasi pada kisaran 6-7, dengan makna pada akuifer telah terjadi proses karstifikasi yang membentuk pelorongan yang bersifat terbuka, berupa saluran *conduit*, khususnya di Mataair Beton yang selalu banjir dan sangat keruh saat debit puncak. Adapun perkembangan lorong di akuifer Gua Gilap relatif lebih belum memiliki perkembangan retakan berukuran saluran (*conduit*)

secara signifikan. Dari sisi tipe aliran, Mataair Beton pun telah memiliki kombinasi tipe aliran antara laminar dan lebih dari satu tipe aliran conduit, meskipun secara regional simpanan airtanah masih dikontrol oleh tipe aliran laminar. Sementara itu Gua Gilap, yang letaknya paling atas (hulu) masih memiliki kombinasi aliran laminar yang kompleks dari retakan *fissure* dan *conduit*, dengan dominasi conduit dijumpai pada waktu yang tidak terlalu lama saat kejadian banjir.

Di bagian hilir yakni di Gua Bribin, akuifernya mempunyai derajat karstifikasi yang paling tinggi (7,7) yaitu akuifer telah terkarstifikasi pada tingkat yang sangat berkembang, yang didominasi oleh saluran terbuka (*conduit*) yang besar. Peran dari saluran mengengah (*fissure*) dan jaringan saluran kecil (*diffuse network*) sudah sangat minim. Zona freatik sudah hilang atau perannya sudah tidak lagi signifikan. Hampir seluruh siklus airtanah telah bergabung pada sistem saluran terbuka. Di lapangan, hal ini mudah dikenali dengan lorong sungai bawah tanah yang sudah berukuran besar dengan debit banjir yang besar (>2000 liter/detik). Telah lanjutnya proses karstifikasi di akuifer Gua Bribin ini semakna dengan yang disampaikan oleh [Adji \(2010\)](#) yang menyatakan bahwa mayoritasnya sifat pelorongan di akuifer daerah tangkapan SBT Bribin bersifat terbuka yang memungkinkan aliran *conduit* (turbulen) masuk dengan cepat ketika terjadi hujan. Dari sisi tipe resesi alirannya, dapat dikatakan bahwa peran aliran *diffuse* saat kejadian banjir telah minim, sementara aliran yang bersifat turbulen lebih mendominasi saat kejadian banjir.

Selanjutnya, bagian tengah yang diwakili oleh SBT Ngreneng, Seropan dan Toto yang diperkirakan merupakan cabang (*tributary*) SBT Bribin, memiliki derajat karstifikasi yang rendah berturut-turut sebesar 6,0; 5,2, dan 5. Nilai ini termasuk pada level karstifikasi awal menuju ke tahap dewasa. Level karstifikasi di akuifer daerah tangkapan Gua Ngreneng masih bersifat melarutkan batuan karbonat, dengan perkembangan pelorongan yang terbentuk mulai bersifat terbuka, berukuran sedang (*fissure*), baik dialami oleh batuan yang mudah atau sulit larut di zone freatik. Sifat aliran sedikit dipengaruhi oleh saluran terbuka (*conduit*) yang saling berhubungan. Sementara itu, sifat aliran resesinya memiliki masukan sangat kompleks, yaitu kombinasi dari dua tipe aliran turbulen dan dua tipe aliran laminar (*diffuse flow*). Di sini, sifat aliran turbulen saat banjir hanya mengimbuh dalam jangka waktu yang sangat pendek.

Di SBT Seropan dan Toto, tingkat karstifikasi yang terhitung lebih kecil dibanding yang terhitung di Gua Ngreneng. Sifat aliran yang mengimbuh SBT saat kejadian banjir adalah terdiri dari sub-rezim dengan aliran turbulen dan sub-rezim dengan aliran laminar, dengan peran aliran *diffuse* (laminar) mendominasi dibanding aliran turbulen. Dari derajat karstifikasinya yang mempunyai nilai 5,0 – 5,2, diketahui bahwa akuifer kemungkinan juga diimbuh dengan adanya masukan air dari zona sesar di

daerah hulu (misal), dengan perkembangan jaringan saluran kecil (diffuse-fissure) yang masih cukup intensif, sebagiannya mulai bersifat terbuka dan sudah mempunyai sistem air freatik yang bersifat terbuka.

Mataair Petoyan yang terletak di sisi bagian besar karst Gunung Sewu mewakili sistem sungai bawah tanah yang berbeda, tingkat karstifikasinya didominasi oleh aliran Diffuse namun saat musim penghujan banyak mendapatkan imbuhan dari ponor dan rekahan di sekitarnya. Kapasitas simpanan akuifer dan persentase aliran dasar paling rendah diantara yang lain mengindikasikan bahwa daerah imbuhan mataair ini tidak terlalu luas, sebagaimana yang disampaikan oleh Ramdhani (2014). Di mataair ini, derajat karstifikasi yang terhitung ada pada level 3,7 yang mengindikasikan akuifer karst dengan perkembangan jaringan fissure yang masih belum seragam, mayoritasnya adalah makrofissure terbuka dan minim adanya saluran karst (*conduit*). Saat periode banjir ada kemungkinan (meskipun langka) terjadi aliran turbulen dalam jangka pendek. Kemudian level ini juga tercermin pada tipe aliran yang mengimbuh mataair, yaitu kombinasi dari dua atau lebih subregimes aliran laminar yang hanya ditandai dengan koefisien debit yang berbeda pada masing-masing tipe aliran yang mengimbuhnya.

Bagian hilir Karst Rengel yang diwakili oleh SBT Ngerong memiliki derajat karstifikasi pada level 4,8 yang berarti akuifernya mempunyai masukan air dari zona sesar di daerah hulu, dengan perkembangan jaringan saluran kecil (diffuse-fissure) yang sudah cukup intensif, sebagiannya bersifat terbuka dan sudah mempunyai sistem air freatik yang bersifat terbuka. Sementara itu, jenis aliran yang mengimbuh SBT ini merupakan kombinasi dari sub-rezim aliran turbulen dan sub-rezim aliran laminar dengan peran yang jauh lebih besar masih didominasi oleh aliran bertipe laminar.

Secara umum, derajat karstifikasi di kawasan karst Gunung Sewu telah berada pada tingkat yang lebih berkembang dibanding di kawasan karst Rengel, kecuali yang dijumpai di Mataair Petoyan yang terletak di bagian barat kawasan karst Gunung Sewu yang mempunyai level karstifikasi awal dengan belum berkembangnya tipe aliran turbulen.

VII. KESIMPULAN

Hasil perhitungan derajat karstifikasi dengan menggunakan data resesi kejadian banjir terpilih menunjukkan nilai terendah antara 3,7 di Mataair Petoyan hingga tertinggi 7,7 di Sungai Bawah Bribin. Nilai 3,7 (terendah) mengindikasikan tipe aliran yang merupakan kombinasi dari dua atau lebih subregimes aliran laminar yang hanya ditandai dengan koefisien debit yang berbeda pada masing-

masing tipe aliran yang mengimbuhnya, dengan terjadi aliran turbulen dalam jangka pendek saat banjir. Sementara itu, nilai 7,7 mengindikasikan akuifer yang telah terkarstifikasi pada tingkat yang sangat berkembang, didominasi oleh saluran terbuka (*conduit*) yang besar. Selanjutnya peran dari saluran mengengah (*fissure*) dan jaringan saluran kecil (*diffuse network*) sudah sangat minim, sehingga zona freatik sudah hilang atau perannya sudah tidak lagi signifikan. Selanjutnya, secara umum derajat karstifikasi di kawasan karst Gunung Sewu telah berada pada tingkat yang lebih berkembang dibanding di kawasan karst Rengel, kecuali yang dijumpai di Mataair Petoyan yang terletak di bagian barat kawasan karst Gunung Sewu yang mempunyai level karstifikasi awal dengan belum berkembangnya tipe aliran turbulen.

VIII. DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T. N., 2010. Spatial and Temporal Variation of Hydrogeochemistry and Karst Flow Properties to Characterize Karst Dynamic System in Bribin Underground River, Gunung Kidul Regency, DIY Province Java, Indonesia. Summary, *Dissertation in Geography Study Program*. Graduate School of Geography, Gadjah Mada University, Yogyakarta
- Adji, T.N. 2012, Wet Season Hydrochemistry of Bribin River in Gunung Sewu Karst, Indonesia, *Environmental Earth Sciences* , Vol. 67:1563–1572 pp
- Adji, T.N. 2012, Wet Season Hydrochemistry of Bribin River in Gunung Sewu Karst, Indonesia, *Environmental Earth Sciences Journal*, Springer, Volum. 76, Issue 6, pp. 1563-1572
- 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., 2005, Agresivitas Airtanah Karst Sungai Bawah Tanah Bribin, Gunung Sewu, Indonesian Cave and Karst Journal, Vol. 1 No1, HIKESPI
- Adji, T.N., 2010. Variasi Spasial-Temporal Hidrogeokimia dan Sifat Aliran Untuk Karakterisasi Sistem Karst Dinamis di Sungai Bawah Tanah Bribin, Kabupaten Gunung Kidul, DIY, Disertasi, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta
- Adji, T.N., 2011, Upper catchment of Bribin underground river hydrogeochemistry (Gunung Sewu Karst, Gunung Kidul, Java, Indonesia) Proceeding of Asian Trans-Disciplinary Karst Conference, Yogyakarta
- Adji, T.N., 2011. Pemisahan aliran dasar bagian hulu Sungai Bribin pada aliran Gua Gilap, di Karst Gunung Sewu, Gunung Kidul, Yogyakarta, Jurnal Geologi Indonesia, Vol. 6 No. 3 September 2011
- Adji, T.N., 2013, Hubungan Karakter Aliran dan Sifat Kimia Mataair Petoyan Untuk Karakterisasi Akuifer Karst, Hibah Dana Masyarakat Fak. Geografi UGM
- Adji, T.N., 2013, Hubungan Karakter Aliran dan Sifat Kimia Mataair Petoyan Untuk Karakterisasi Akuifer Karst, Laporan Penelitian, Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta
- Adji, T.N., 2014, Analisis Hidrograf Aliran Untuk Penentuan Derajat Karstifikasi Pada Beberapa

- Kondisi Mataair dan Sungai Bawah Tanah Karst, Hibah Dana Masyarakat Fak. Geografi UGM
- 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, E., Woro, S., 2009, Diffuse Flow Separation Within Karst Underground River at Ngreneng Cave, Proceeding of International Conference Earth Science and Technology, 6-7 Aug 2009, Yogyakarta
- Adji, T.N., Misqi, M., 2010, The Distribution of Flood Hydrograph Recession Constant for Characterization of Karst Spring and Underground River Flow Components Releasing Within Gunung Sewu Karst Region, Indonesian Journal of Geography, XLII(1)
- Adji, T.N., Mujib, M.A., Fatchurohman, H., Bahtiar, I.Y., 2014, Analisis Tingkat Perkembangan Akuifer Karst di Kawasan Karst Gunung Sewu, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Karst Rengel, Tuban, Jawa Timur Berdasarkan Analisis Hidrograf, *Prosiding PIT IGI ke-17*, UNY, Jogjakarta, 15 Nov 2014
- Bonacci, O., 1990, Regionalization in karst regions, *Proceedings of the Ljubljana Symposium*, April 1990, IAHS Publ. no. 191, 1990
- Brunsch A, Adji, TN, Stoffel D, Ikhwan M, Oberle P, Nestmann F (2011) Hydrological assessment of a karst area in Southern Java with respect to climate phenomena, Proceeding of Asian Trans-Disciplinary Karst Conference, Yogyakarta
- Delleur, J. ,1999. Handbook of Groundwater Engineering.CRC Press LLC, Boca Raton.
- Domenico, P.A. and Schwartz, F.W., 1990, *Physical and Chemical Hydrogeology*. 2nd Ed. John Wiley & Sons
- Dreiss, S. J.,1989, Regional scale transport in a karst aquifer: 2. Linear systems and time moment analysis. *Water Resour. Res.*, 25(1), 126-134
- Fatchurohman, H., 2014, Kajian Acid Neutralizing Capacity Pada Mataair Karst Ngeleng, Purwosari, Gunungkidul, *Skripsi*, Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta
- Fiorillo, F., 2014. The recession of spring Hydrograph, focused on karst aquifer. *Journal of Water Management* : Volume 28, Issue 7, pp 1781–1805
- Ford, D. and Williams, P. 1992, *Karst Geomorphology and Hydrology*, Chapman and Hall, London
- Gillieson, D., 1996, *Caves: Processes, Development, and Management*, Blackwell, Oxford
- Haryono, E. and Day, M., 2004, Landform differentiation within the Gunung Kidul kegel karst, Java, Indonesia, *Journal of Cave and Karst Studies*: 66
- Haryono, E, Adji, T.N., Widyastuti, W., 2009, Environmental Problems of *Telaga* (Doline Pond) in Gunungsewu Karst, Java Indonesia, , Proceeding 15th International Congress of Speleology, Volume II, UIS, Texas, pp 1112-1116
- 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, Yogyakarta
- Jankowski, J., 2001, Groundwater Environment, *Short Course Note*, School of Geology, University Of New South Wales, Sydney, Australia
- Karami, G. H. and Younger, P. L.,2002, Assessing karst aquifer heterogeneity using test-pumping data. *Conference on what's new in Groundwater*, London, The Geological Society.

- Kresic N, Bonacci O (2010) Spring discharge hydrograph. In *Groundwater Hydrology of Springs: Engineering, Theory, Management, and Sustainability*. Elsevier ch 4, pp 129–163
- Kullman, E., 1983, Regime podzemných vôd s turbulentným prúdením v puklinovo-krasovom horninovom prostredí. [Groundwater regime with turbulent flow in fissure-karst rock environment (in Slovak)]. *Geologický ústav Dionýza Štúra*, Bratislava, *Geologické práce* 79:237–262
- Kusumayudha, S.B., 2005, Hidrogeologi karst dan geometri fraktal di daerah Gunung Sewu. Adicita Karya Nusa, Jogjakarta, 194 p. (in Indonesian)
- Maillet, E., 1905, *Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale*. Hermann, Paris
- Malik, P. and Vojtkova, S., 2012, Use of recession-curve analysis for estimation of karstification degree and its application in assessing overflow/underflow conditions in closely spaced karstic springs, *Environmental Earth Sciences Journal*, Springer, April 2012, Volume 65, Issue 8, pp 2245-2257.
- Malik, P., 2007, Assessment of regional karstification degree and groundwater sensitivity to pollution using hydrograph analysis in the Velka Fatra Mts., Slovakia. *Water Resources and Environmental Problems in Karst*. *Environ Geol* 2007(51):707–711.
- Milanovic, P., 1981), *Karst Hydrogeology*. Water Resources Publications, Littleton, Colorado, USA.
- Misqi, M., 2011, Perhitungan Konstanta Resesi Akuifer Karst (Studi Kasus : Sungai Bawah Tanah Toto, Sungai Bawah Tanah Seropan, Dan Mataair Beton Kabupaten Gunungkidul Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, *Skripsi*, Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta
- Oktama, R., 2014, Characterization of the Ngeleng springs karst aquifer using temporal variation of flow properties and hydrochemistry. Undergraduate thesis, Faculty of Geography, Gadjah Mada University, Jogjakarta, 141 p. (in Indonesian with English abstract)
- Oktama, R., 2014, Karakterisasi Akuifer Karst Mataair Ngeleng dengan Pendekatan Variasi Temporal Sifat Aliran dan Hidrogeokimia, *Skripsi*, Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta
- Padilla, A., Pulido-Bosch, A and Mangin, A., 1994, Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring. *Groundwater*, 32(2), 267-277.
- Plagnes, V. and Bakalowicz, M., 2001, May it propose a unique interpretation for karstic spring chemographs? In: J. Mudry and F. Zwahlen (Editors), *7th Conference on Limestone Hydrology and Fissured Media*. Franche-Comté University, Besançon, pp. 293-298
- Ramdhani, A., 2014, Water balance studies to determine the catchment area of Ngeleng Springs. Undergraduate thesis, Faculty of Geography, Gadjah Mada University, Jogjakarta, 117 p. (in Indonesian with English abstract)
- Rashed, K.A., 2012, Assessing Degree of Karstification: A New Method Of Classifying Karst Aquifers, *Sixteenth International Water Technology Conference, IWTC 16 2012*, Istanbul, Turkey
- Shuster, E.T., White, W.B., 1971. Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: A possible means for characterizing carbonate aquifers. *Journal of Hydrology* 14: 93-128.
- 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
- 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

IX. PENGGUNAAN ANGGARAN HIBAH PENELITIAN DANA BPTON FGE UGM 2015

1. Gaji dan Upah

No	Pelaksanaan kegiatan	Orang	Jumlah (jam/mg)	Jumlah (mg)	Honor/waktu	Biaya (Rp)
1	Peneliti	1	5	20	30000	3000000
2	Anggota 1	1	7	20	15000	2100000
3	Anggota 2	1	5	20	15000	1500000
					Sub jumlah	6.600.000,-

2. Bahan Habis Pakai

No	Bahan	Volume	Biaya Satuan (Rp)	Biaya (Rp)
1	Kertas HVS A4	1 rim	35000	35000
2	Refill Tinta	1 paket	100000	200000
3	Tinta Printer	1 buah	210000	210000
			Sub jumlah	445.000,-

3. Peralatan

No	Jenis	Volume	Biaya Satuan (Rp)	Biaya (Rp)
1	Ganti sewa water level data logger	1 set	1750000	1750000
2	Ganti sewa HOBO Pendant data logger hujan	1 set	1250000	1250000
			Sub jumlah	3.000.000,-

No	Uraian Kegiatan	Volume	Biaya Satuan (Rp)	Biaya (Rp)
1	Penggandaan proposal	2 eksemplar	25000	50000
2	Penggandaan Laporan Akhir	2 eksemplar	25000	50000
3	Seminar dan reviewer			355000
	Jumlah		Sub jumlah	455.000,-
			JUMLAH TOTAL	10.500.000,-

Yogyakarta, 30 Agustus 2015
Ketua Peneliti

Dr. Tjahyo N. Adji, MSc.Tech
NIP. 197201281998031001