LAPORAN AKHIR
HIBAH PENELITIAN DOSEN

**ANALISIS HIDROGRAF ALIRAN UNTUK PENENTUAN DERAJAT
KARSTIFIKASI PADA BEBERAPA KONDISI MATAAIR DAN SUNGAI BAWAH
TANAH KARST**

TJAHYO NUGROHO ADJI
LABORATORIUM GEOHIDROLOGI
JURUSAN GEOGRAFI LINGKUNGAN

Dibiayai dari
Dana Penerimaan Negara Bukan Pajak, Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada
Tahun Anggaran 2014

UNIVERSITAS GADJAH MADA
FAKULTAS GEOGRAFI
2014

**LAPORAN AKHIR
PROPOSAL HIBAH PENELITIAN DOSEN FAKULTAS GEOGRAFI
TAHUN ANGGARAN 2014**

1. Judul Penelitian : **Analisis Hidrograf Aliran Untuk Penentuan Derajat Karstifikasi Pada Beberapa Kondisi Mataair dan Sungai Bawah Tanah Karst**

2. Identitas Peneliti/Ketua 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.	Igor Yoga Bahtiar	L	6840/GE	Geografi Lingkungan	Hidrologi
2.	Hendy Fatchurohman	L	6627/GE	Geografi Lingkungan/MPPDAS	Hidrologi

4. Jangka Waktu Penelitian : 6 bulan mulai April 2014 - September 2014
5. Lokasi Penelitian : Kab. Gunungkidul, DIY dan Kab. Tuban, Jatim
6. Biaya Penelitian : Rp 10.000.000,00 (sepuluh juta rupiah)
7. Nama Jurnal/Akreditasi : BUMI LESTARI / 64a/DIKTI/Kep/2010
8. Instansi Penerbit : PPLH Univ. Udayana
9. Target Waktu terbit : 2014/2015

Menyetujui,
Kepala Laboratorium

Yogyakarta, 20 Oktober April 2014

Peneliti

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

Tingkat perkembangan karstifikasi (derajat karstifikasi) suatu akuifer karst mempengaruhi karakteristik imbuhan airtanah, besar sedikitnya kapasitas simpanan dan sistem pelepasan air oleh akuifer. Akuifer karst yang memiliki derajat karstifikasi tinggi akan memiliki kapasitas simpanan air yang rendah dan sistem pelepasan air yang cepat, sebaliknya pada akuifer karst yang memiliki derajat karstifikasi rendah akan didominasi oleh tipe aliran *diffuse*, kapasitas simpanan akuifer tinggi dan sistem pelepasan simpanan airnya yang perlahan. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi secara spasial dan temporal derajat karstifikasi pada suatu akuifer karst berdasarkan karakteristik hidrograf alirannya.

Penelitian ini dilakukan pada dua mataair (Beton dan Petoyan) dan enam sungai bawah tanah (Bribin, Gilap, Ngreneng, Seropan, Toto, dan Ngerong) pada dua kawasan karst yang berbeda yaitu Karst Gunung Sewu, Gunung Kidul, Yogyakarta dan Karst Rengel, Kabupaten Tuban, Jawa Timur. Data utama yang digunakan adalah data perekaman tinggi mukaair secara time series yang kemudian dikonversikan menjadi data debit aliran setelah dibuat *stage discharge rating curve*-nya pada ke delapan lokasi pengukuran. Metode *straight line methods* kemudian dilakukan untuk memisahkan komponen aliran dasar, dan analisis hidrograf berdasarkan rumus Rashed (2012) dilakukan untuk mengukur seluruh komponen hidrograf untuk menentukan derajat karstifikasi akuifer karstnya.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara temporal terdapat perbedaan derajat karstifikasi pada awal musim penghujan berupa *darbian aquifer* ($D_k=1.95-9.27$), meningkat menjadi *partially* dan *karstified aquifer* ($D_k=10.92-35.99$) pada pertengahan musim, dan di akhir musim penghujan derajat karstifikasi menurun kembali menjadi *darbian aquifer*. Secara spasial, terdapat perbedaan derajat karstifikasi antara di bagian hulu sistem SBT Bribin (Gua Gilap dan Mataair Beton) yaitu pada tahap *partially* dan *karstified aquifer* dan di bagian hilir (Gua Bribin, Seropan, dan Toto) pada tahap *darbian aquifer*. Secara umum, perhitungan pada awal dan akhir musim hujan menunjukkan bahwa Karst Gunung Sewu dan Karst Rengel termasuk pada derajat karstifikasi *Darcian aquifer*, yaitu Karst Rengel berada pada *darbian aquifer* tahap 1 (muda), sedangkan Karst Gunung Sewu berada pada *darbian aquifer* tahap 2 (tua). Sementara itu, perhitungan saat banjir pada puncak musim hujan menunjukkan bahwa karstifikasi di Karst Gunung Sewu telah lebih berkembang dibandingkan dengan Karst Rengel.

Kata kunci : Derajat karstifikasi, analisis hidrograf, akuifer karst

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 derajat 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 derajat 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, 2010; Adji, 2011; Adji, 2005); (2) analisis sistem linier; (3) rasio heterogenitas; (4) analisis resesi hidrograf banjir (Adji, 2010; Adji and Misqi, 2010; Adji et al 2009); 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 derajat 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 derajat 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*).

Dengan pertimbangan tersebut, penelitian ini bermaksud untuk melakukan investigasi secara spasial dan temporal terkait dengan derajat karstifikasi suatu akuifer karst yang didekati dengan karakteristik hidrograf alirannya. 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 dan Adji, 2011, 2012), di Gua Toto, Seropan, dan Beton (Misqi, 2011), di Mataair Petoyan oleh Adji (2014), 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 Rashed (2012), dan dilakukan pada lokasi-lokasi yang telah mempunyai data hidrograf dan hidrogeokimia, sehingga hasil derajat karstifikasi yang dihasilkan dapat dikonfirmasi dengan karakteristik aliran dan hidrogeokimia yang telah dihasilkan pada penelitian-penelitian terdahulu tersebut. Adapun secara khusus, penelitian ini mempunyai beberapa pertanyaan penelitian, yaitu:

1. Apakah ada perbedaan derajat karstifikasi pada beberapa mataair dan sungai bawah tanah karst?
2. Apakah ada perbedaan derajat karstifikasi secara temporal pada beberapa mataair dan sungai bawah tanah karst?
3. Apakah ada hubungan antara derajat karstifikasi dan luas daerah tangkapan hujannya?

Berdasarkan latar belakang dan permasalahan penelitian tersebut, maka penelitian ini diberi judul: “*Analisis Hidrograf Aliran Untuk Penentuan Derajat Karstifikasi Pada Beberapa Kondisi Mataair dan Sungai Bawah Tanah Karst*”.

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 - 10^2 mm; dan (3) *conduit flow*, adalah komponen aliran pengisi sungai bawah tanah dari akuifer yang mengalir melalui retakan-retakan pada batuan gamping yang berukuran 10^2 - 10^4 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:

- 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.
- 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 besarannya 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 meluasi 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:

1. Mengetahui perbedaan derajat karstifikasi (dengan rumus Rashed, 2012) pada beberapa mataair dan sungai bawahtanah karst;
2. Mengetahui adanya perbedaan derajat karstifikasi secara temporal pada beberapa mataair dan sungai bawahtanah
3. Mengetahui adanya hubungan antara derajat karstifikasi dan luas daerah tangkapannya

V. METODE PENELITIAN

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
- Membuat peta dasar dan peta

- Peta Geologi Lembar Yogyakarta dan Rengel skala 1:100.000

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 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:

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

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 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:

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

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

c. Metode 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 Derajat karstifikasi akuifer karst (D_k)

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 3.

Gambar 3. 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 4.

Gambar 4. Memisahkan baseflow dengan *straight line method*

c. Menghitung Derajat Karstifikasi (D_k - Gambar 5)

Rumus yang digunakan adalah:

$$D_k = \frac{Q_{msx} t_{event}}{Q_{min} t_{peak}} \dots\dots\dots(5)$$

di mana,

t_{event}	$= t_C - t_A$
t_{peak}	$= t_B - t_A$
Q_{max}	$= \text{debit maximum di titik B}$
Q_{min}	$= \text{debit maximum di titik A}$
A	$= \text{debit saat banjir mulai mulai naik}$
B	$= \text{debit puncak}$
C	$= \text{debit banjir mulai kembali ke baseflow}$

Gambar 5. Komponen hidrograf mataair karst yang digunakan untuk menghitung derajat karstifikasi

5. Analisis D_k secara temporal dan spasial

▪ Analisis Grafis dan Tabulasi

Nilai derajat 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 D_k .

VI. HASIL DAN PEMBAHASAN

6.1. Karakteristik Umum 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 5a).

Gambar 5a. Komponen hidrograf mataair karst yang digunakan untuk menghitung derajat karstifikasi

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.

6.2. 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 6).

Gambar 6. 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 1. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 7). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Mataair Beton dinyatakan sebagai:

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

Keterangan:

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

Tabel 1. 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 7. 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 (1) 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 8.

Gambar 8. 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.

6.3. Karakteristik Aliran Mataair Petoyan

Mataair Petoyan secara administratif terletak di Dusun Susukan, Desa Giritirto, Kecamatan Purwosari, Kabupaten Gunungkidul, Provinsi DIY. Mataair Petoyan merupakan mataair *perennial* 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 (*perennial*) 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 9).

Gambar 9. 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 5.

Tabel 2. 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 10). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Mataair Petoyan dinyatakan sebagai:

$$y = 6,13 x - 0.173 \dots\dots(7)$$

Keterangan:

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

Gambar 10. 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 11.

Gambar 11. Variasi Debit Mataair Petoyan 19 April 2013 - 16 Agustus 2013

6.4. 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 12).

Gambar 12. 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 3. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 13). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Gua Gilap dinyatakan sebagai:

$$y = 7,9129e^{2,7173x} \dots\dots\dots (8)$$

Keterangan:

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

Tabel 3. 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 13. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Gua Gilap

Hasil kurva hubungan tinggi muka air di Gua Gilap dengan debit alirannya tidak mempunyai hubungan linier karena sifat aliran sungai bawah tanah yang cenderung turbulen dan bukan laminar seperti halnya yang dijumpai pada sungai permukaan. Selanjutnya, rumus (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 14.

Gambar 14. 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.

6.5. 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 Ngreng 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 15. Hasil pengukuran debit di Gua Ngreng disajikan pada Tabel 4.

Gambar 15. Kondisi Aliran di Gua Ngreng (kiri), dan Instalasi Stasiun Aliran (kanan)

Tabel 4. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Ngreng

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 Ngreng, berupa persamaan :

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

Keterangan:

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

Gambar 16. 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 17.

Gambar 17. 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.

6.6. 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 18).

Gambar 18. 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 5. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 19). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Gua Seropan dinyatakan sebagai:

$$y = 496,41 \ln(x) + 760,01 \dots\dots\dots (10)$$

Keterangan:

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

Tabel 5. 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 19. 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 20.

Gambar 20. Variasi Debit Aliran Gua Gilap 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.

6.7. 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 (*perennial*) 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 (*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 21).

Gambar 21. 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 6. Dari data hasil pengukuran tersebut dibuat kurva regresi (Gambar 22). Hubungan antara tinggi muka air dan debit aliran di Gua Toto dinyatakan sebagai:

$$y = 5500,3x^2 - 3007,9x + 536,37 \dots\dots\dots (11)$$

Keterangan:

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

Tabel 6. 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 22. 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 23.

Gambar 23. 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.

6.8. 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 24.).

Gambar 24. 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 7. dan grafiknya ditunjukkan pada Gambar 25.

Gambar 25. Hubungan Tinggi Muka Air Dan Debit di Gua Bribin

Rumus lengkung aliran di Gua Bribin adalah :

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

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 26.

Tabel 7. Hasil Pengukuran Debit Aliran Gua Bribin

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

Sumber : Suryanta (2001)

Gambar 26. 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.

6.9. 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 danboundstone*, 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 27.

Gambar 27. Variasi Debit Aliran Mataair Ngerong

Selanjutnya, ringkasan karakteristik debit selama periode penelitian di tiap mataair dan sungai bawah tanah ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. 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 Ngereng	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)

6.10. Hidrograf dan Pemisahan Aliran Dasar

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 9), 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 9. 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 28 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 10 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).

Tabel 10. 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.

SBT Seropan

SBT Toto

SBT Bribin

SBT Ngerong

Mataair Beton

Mataair Petoyan

SBT Gilap

SBT Ngrengeng

Gambar 28. Hidrograf aliran banjir terpilih dari tiap lokasi penelitian

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.

6.11. Variasi Temporal Derajat Karstifikasi (D_k)

Hasil analisis derajat karstifikasi berdasarkan metode Rashed (2012) yang diformulasikan dalam Rumus Rashed menghasilkan tingkat karstifikasi yang berbeda pada tiap mataair dan sungai bawah tanah baik pada saat awal, pertengahan dan akhir musim penghujan. Nilai derajat karstifikasi (D_k) hasil perhitungan diklasifikasikan menjadi 5 kategori akuifer sebagaimana yang disajikan pada Tabel 12.

Tabel 2. Klasifikasi tingkat perkembangan akuifer karst

D_k	Klasifikasi
<10	Akuifer yang sistemnya didominasi aliran diffuse (<i>Darcian aquifer</i>)
10 – 20	Akuifer yang telah terkarstifikasi sebagian (<i>Partially karstified aquifer</i>)
20 – 60	Akuifer yang telah terkarstifikasi (<i>Karstified aquifer</i>)
>60	Akuifer yang telah terkarstifikasi secara lanjut (<i>Highly karstified aquifer</i>)

Sumber : Rashed (2012)

Pada saat awal musim penghujan, derajat karstifikasi akuifer paling tinggi berada di Gua Gilap dan Mataair Beton (*karstified aquifer*). Gua Gilap dan Mataair Beton yang mewakili bagian hulu sistem SBT Bribin memiliki beberapa *point recharge* yang berdekatan dengan saluran conduit gua, serta tingginya intensitas perkolasi air hujan pada zona *vadose* yang tidak sebegitu dalam menyebabkan rekahan *fissures* lebih dominan. Mataair Beton memiliki ciri *rising limb* yang ekstrim dan meningkat tajam saat terjadi banjir namun diimbangi dengan lambatnya akuifer dalam melepaskan simpanan air. Mataair Petoyan, Sungai bawah tanah Bribin, Ngreneng, Seropan, Toto dan Ngerong saat awal musim penghujan memiliki derajat karstifikasi didominasi *diffuse* (*Darcian aquifer*) karena saat awal hujan, air yang terinfiltrasi masih memenuhi simpanan air dalam lengas tanah dan *epikarst*, belum sepenuhnya menjadi total aliran dalam sungai bawah tanah.

Pada pertengahan musim penghujan, kapasitas epikarst dalam menyimpan airtanah sebagian besar telah terpenuhi, sehingga saat hujan terjadi dengan intensitas dan kurun waktu tertentu terjadi kelebihan kapasitas simpanan yang mengakibatkan sebagian besar air menjadi aliran permukaan ataupun aliran cepat (*quickflow/aliran conduit*) melalui sungai bawah tanah dan mataair. Hampir seluruh mataair dan sungai bawah tanah di lokasi penelitian pada pertengahan musim penghujan ini mencirikan derajat karstifikasi yang semakin meningkat seperti Mataair Beton (*partially and highly karstified aquifer*); Petoyan, Bribin, Ngreneng, dan Ngerong (*partially karstified aquifer*).

Pada akhir musim penghujan, derajat karstifikasi secara keseluruhan mengalami penurunan secara dominan berupa *darbian aquifer*. Intensitas hujan yang semakin berkurang berpengaruh pada semakin besarnya kapasitas akuifer untuk melepaskan simpanan airnya secara bertahap. Saat hidrograf banjir terjadi pada akhir musim penghujan ini aliran *diffuse* sudah mendominasi sebagian besar dari persentase total aliran. Karakteristik hidrograf di akhir musim hujan mengindikasikan kapasitas mataair dan sungai bawah tanah untuk memenuhi aliran dasar selama musim kemarau hingga tiba musim hujan berikutnya.

6.12. Variasi Spasial Derajat Karstifikasi (D_k)

Derajat karstifikasi 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.

Didasari pada konsep awal, Konsep zona hidrologi di akuifer karst dapat dibedakan antara zona tidak jenuh (*unsaturated zone*) dan zona jenuh (*saturated zone*), namun istilah "*unsaturated*" dan "*saturated*" ini jarang dipakai dalam istilah karst karena memiliki istilah yang sama dengan tingkat kejenuhan kimiawi, sehingga secara umum dipakai istilah Zona *Vadose* yaitu zona diatas muka air tanah dan Zona *Phreatik* yaitu zona dibawah muka air tanah (Ford and Williams, 2007). Air di zona vadose mengalami infiltrasi dan perkolasi ke bawah oleh daya gravitasi, saat proses ini akan banyak terjadi proses pelarutan secara vertikal dan lambat laun terjadi rekahan hingga menjadi conduit (*ponor dan shaft*). Ketika air telah mencapai muka air tanah, aliran dikontrol oleh ketinggian dan tekanan, air di zona *phreatic* ini mengalir mengikuti gradient hidraulik menuju outlet yang berada di lembah terdekat (Audra and Palmer, 2013). Secara lebih luas, konsep pelarutan secara vertikal akan banyak terjadi di daerah tangkapan (*recharge area*) dengan indikasi banyak ditemukan ponor (*sinking stream*), doline, dan cekungan-cekungan lainnya. Pelarutan secara horizontal searah dengan gradient hidraulik akan banyak terjadi pada daerah hilir dengan indikasi rekahan-rekahan conduit lateral ataupun lorong-lorong gua memiliki dimensi ukuran yang lebih besar seiring dengan semakin besarnya aliran sungai bawah tanah.

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 Ngreneng 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.

Derajat karstifikasi di bagian hulu yang dalam penelitian ini diwakili oleh Gua Gilap dan Mataair Beton memiliki derajat karstifikasi paling tinggi (*Karstified aquifer* hingga *highly karstified aquifer*) saat awal dan pertengahan musim penghujan. Hal ini dipengaruhi oleh banyaknya aliran air permukaan setelah kejadian hujan yang masuk ke dalam sistem jaringan sungai bawah tanah melalui ponor (*swallet hole*) dari cekungan-cekungan di sekitarnya. Namun hal ini juga diimbangi dengan tingginya kapasitas simpanan akuifer dan sistem melepaskan air yang sifatnya lambat dan perlahan.

Bagian hilir yang diwakili oleh SBT Bribin, Seropan dan Toto memiliki derajat karstifikasi yang rendah (*Darcian aquifer*) dengan tipe imbuhan dominan diffuse. Hal ini karena sedikitnya aliran permukaan yang masuk melalui proses *internal runoff* dan sebagian besar aliran bawah tanah berasal dari pasokan sistem SBT Bribin bagian tengah dan hulu. Kapasitas simpanan akuifer sangat tinggi dengan sistem pelepasan airnya yang bersifat sangat lambat.

Mataair Petoyan 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.

Bagian hilir Karst Rengel yang diwakili oleh SBT Ngerong memiliki derajat karstifikasi yang didominasi oleh aliran diffuse (*Darcian aquifer*). Tipe imbuhan saat musim hujan banyak dipengaruhi oleh tipe internal runoff dimana air permukaan yang berada di doline masuk melalui ponor dan gua yang secara tidak langsung memiliki hubungan dengan sistem jaringan sungai bawah tanah Ngerong. Kapasitas simpanan akuifernya tinggi dengan sistem pelepasan airnya yang bersifat perlahan.

Secara umum, Derajat karstifikasi antara di Kawasan Karst Gunung Sewu dan Karst Rengel sama-sama berada pada tahap *Darcian Aquifer* yang dominan alirannya bersifat *diffused* dengan kapasitas simpanan akuifer yang tinggi dan sistem pelepasan airnya yang lambat, namun jika dapat diistilahkan disini, Karst Rengel merupakan *Darcian aquifer* tahap 1 (muda) sedangkan Karst Gunung Sewu masuk dalam *Darcian aquifer* tahap 2 (tua) karena dilihat dari kenampakan eksokarst dan endokarstnya Karst Gunung Sewu memiliki keragaman yang lebih kompleks. Karst Rengel di bagian hilir hanya memiliki Gua Ngerong sebagai satu-satunya jaringan sungai bawah tanah yang sudah berkembang, sedangkan di Karst Gunung Sewu bagian hilir telah banyak ditemukan Gua dan jaringan sungai bawah tanah lainnya yang mencirikan kompleksnya kenampakan endokarst di kawasan ini. Karakteristik imbuhan, kapasitas simpanan akuifer dan persentase aliran dasar dari tiap lokasi penelitian telah dirangkum pada Tabel 13.

VIII. Kesimpulan

Hidrograf aliran dari mataair dan sungai bawah yang terdapat dalam suatu kawasan karst dapat menjadi parameter dalam menentukan derajat karstifikasi

akuifer. Parameter hidrograf yang digunakan antara lain debit mataair, bentuk hidrograf, waktu kejadian hidrograf (T_{event}), waktu dari debit dasar menuju debit puncak (*time to peak*), waktu dari debit puncak menuju aliran dasar (*time to baseflow*). Berdasarkan karakteristik hidrografnya akan dapat dilakukan analisis awal terkait tipe imbuhan airtanah, besar sedikitnya kapasitas simpanan dan sifat pelepasan air oleh akuifer karst.

Analisis hidrograf yang dikemukakan oleh Rashed (2012) telah dicoba untuk diterapkan di Karst Gunung Sewu dan Karst Rengel, Tuban pada periode musim penghujan, sehingga dapat diidentifikasi secara spasial dan temporal perbedaan derajat karstifikasi yang terjadi pada kedua kawasan karst tersebut. Secara temporal terdapat perbedaan derajat karstifikasi antara saat awal, pertengahan, dan akhir musim penghujan. Pada awal musim penghujan bertipe *darbian aquifer* dan meningkat menjadi *partially* hingga *karstified aquifer* saat pertengahan musim penghujan, dan menurun kembali menjadi *darbian aquifer* saat akhir musim penghujan. Hal ini terkait dengan pemenuhan kapasitas simpanan air pada zona vadose terlebih dulu saat awal musim penghujan, kapasitas simpanan telah mencapai titik jenuh pada pertengahan musim dan mulai melepaskan simpanan air saat musim kemarau.

Secara spasial terdapat perbedaan derajat karstifikasi antara di bagian hulu dan di bagian hilir dari satu sistem jaringan sungai bawah tanah. Bagian hulu yang diwakili oleh Mataair Beton dan Gua Gilap memiliki derajat karstifikasi yang lebih tinggi (*Partially* dan *Karstified aquifer*) karena banyaknya rekahan dan ponor yang berhubungan langsung dengan jaringan sungai bawah tanah, sedangkan bagian hilir yang diwakili oleh Gua Bribin, Seropan, Toto, dan Ngerong memiliki derajat karstifikasi yang lebih rendah (*Darbian aquifer*). Karst Gunung Sewu dan Karst Rengel keduanya memiliki derajat karstifikasi tipe *Darbian aquifer* yang dominan sifat alirannya diffuse, namun Karst Rengel berada pada *darbian aquifer* tahap 1 (muda) sedangkan Karst Gunung Sewu berada pada *darbian aquifer* tahap 2 (tua). Sementara itu, perhitungan derajat karstifikasi pada saat banjir pada puncak musim hujan menunjukkan bahwa karstifikasi di Karst Gunung Sewu telah lebih berkembang pada tahap lanjut dibanding dengan Karst Rengel. Hal ini terlihat pula pada kenampakan morfologi endokarst dan eksokarst Karst Gunung Sewu yang lebih kompleks dibandingkan dengan Karst Rengel.

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. 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, Laporan Penelitian, Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta
- 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., Gunung Sewu, Daerah Istimewa Yogyakarta dan Karst Rengel, Tuban, Jawa Fatchurohman, H., Bahtiar, I.Y., 2014, Analisis Tingkat Perkembangan Akuifer Karst di Kawasan Karst 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
- 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
- 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, 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
- 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.
- 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, 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
- 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

Tabel 12. Perhitungan Derajat Karstifikasi pada awal, tengah, dan akhir musim penghujan di lokasi penelitian

Mataair dan Sungai Bawah Tanah	Hidrograf Banjir	Awal						Tengah						Akhir					
		Qmax	Qmin	T peak	T event	Dk	Klasifikasi	Qmax	Qmin	T peak	T event	Dk	Klasifikasi	Qmax	Qmin	T peak	T event	Dk	Klasifikasi
Beton	1	7216.54	2322.26	8	87	33.79	Karstified aquifer	6478.12	1700.87	7.5	21.5	10.92	Partially Karstified aquifer	2433.12	989.29	2	7	8.61	Darcian aquifer
	2	7315.67	2234.66	4	58.5	47.88	Karstified aquifer	11111.68	1818.73	2.5	46	112.42	Highly Karstified aquifer	2207.30	580.97	4.5	14	11.82	Partially Karstified aquifer
Petoyan	1	21.16	7.16	2	7	10.34	Darcian aquifer	15.48	5.86	14	77	14.54	Partially Karstified aquifer	2.48	2.09	5	23.5	5.57	Darcian aquifer
	2	18.03	7.63	4	11	6.50	Darcian aquifer	12.07	5.45	6	15	5.54	Darcian aquifer	2.99	2.20	6	13	2.95	Darcian aquifer
Bribin	1	1673.90	1611.75	7	46	6.82	Darcian aquifer	2113.17	1892.20	2	25.5	14.24	Partially karstified aquifer	1936.13	1851.93	4	17.5	4.57	Darcian aquifer
	2	2445.62	1782.41	8	35	6.00	Darcian aquifer	1973.97	1756.80	3.5	11.5	3.69	Darcian aquifer	1930.03	1834.95	3.5	10.5	3.16	Darcian aquifer
Gilap	1	72.70	5.34	2.5	14.5	78.91	Highly karstified aquifer	98.70	32.44	3	6	6.09	Darcian aquifer	182.64	89.44	3	7.5	5.11	Darcian aquifer
	2	197.92	46.13	3.5	20.5	25.13	Karstified aquifer	153.45	70.41	3	9	6.54	Darcian aquifer	261.61	82.82	4	11.5	9.08	Darcian aquifer
Ngreneng	1	170.93	83.81	3	6	4.08	Darcian aquifer	163.05	101.87	2	3.5	2.80	Darcian aquifer	856.09	186.83	4.5	13	13.24	Partially karstified aquifer
	2	tidak tersedia data						385.01	176.45	3.5	17	10.60	Partially karstified aquifer	424.33	201.94	2	26.5	27.84	Karstified aquifer
Seropan	1	927.30	834.42	6	10	1.85	Darcian aquifer	1044.74	880.63	6.5	23	4.20	Darcian aquifer	1184.54	845.17	3	45.5	21.26	Karstified aquifer
	2	1100.00	890.76	5.5	13.5	3.03	Darcian aquifer	tidak tersedia data						tidak tersedia data					
Toto	1	150.51	124.49	6	10	2.02	Darcian aquifer	569.66	149.77	6.5	61.5	35.99	Karstified aquifer	814.02	133.26	17	41.5	14.91	Partially karstified aquifer
	2	223.85	125.03	6.5	17	4.68	Darcian aquifer	338.00	127.36	10	27	7.17	Darcian aquifer	tidak tersedia data					
Ngerong	1	1860.17	689.60	9.75	33.5	9.27	Darcian aquifer	5735.30	1041.97	4.75	17.75	20.57	Karstified aquifer	1639.31	1252.80	2.25	12.25	7.12	Darcian aquifer
	2	3792.71	981.74	8.5	26.75	12.16	Partially karstified aquifer	5148.01	1117.27	8	24	13.82	Partially karstified aquifer	1749.44	1039.75	8.75	27.75	5.34	Darcian aquifer

Tabel 13. Karakteristik Derajat Karstifikasi akuifer karst berdasarkan parameter hidrograf banjir terpilih di lokasi penelitian

Mataair & Sungai Bawah Tanah	Bentuk Hidrograf	Karakteristik imbuhan	Kapasitas simpanan akuifer	Persentase aliran dasar	Derajat karstifikasi
Mataair Beton	<i>Rising limb</i> meningkat tajam, <i>recession limb</i> saat awal dan akhir musim penghujan menurun secara lambat, namun saat pertengahan hujan menurun secara cepat	Dominan <i>internal runoff</i> dari ponor dan aliran permukaan di cekungan (doline).	Kapasitas simpanan pada awal dan akhir musim hujan Tinggi, namun saat pertengahan musim hujan rendah karena kapasitas simpanan penuh dan seluruhnya menjadi aliran conduit	Rasio bulanan tinggi (80%), rasio pemenuhan kapasitas akuifer oleh aliran dasar paling tinggi pada pertengahan musim hujan (51.77%)	Karstified aquifer
Mataair Petoyan	<i>Rising limb</i> meningkat tajam, <i>recession limb</i> menurun secara lambat	Dominan <i>diffuse infiltration</i> , diikuti dengan <i>shaft flow</i> dari rekahan dan ponor	Kapasitas simpanan akuifer paling rendah diantara yang lain. daerah imbuhan tidak terlalu luas.	Rasio bulanan tinggi. Persentase aliran dasar paling tinggi saat awal dan akhir musim penghujan.	Darcian aquifer
SBT Gilap	<i>Rising limb</i> meningkat cepat, <i>recession limb</i> menurun secara bertahap dan lambat	Dominan <i>internal runoff</i> melalui ponor dan rekahan <i>fissures</i>	Kapasitas simpanan tinggi, lebih bagus daripada Ngreneng	Rasio bulanan tinggi (80%), akhir musim penghujan paling tinggi (72%)	Karstified aquifer
SBT Ngreneng	<i>Rising limb</i> meningkat tajam, <i>recession limb</i> menurun secara cepat.	Dominan <i>internal runoff</i> dari doline sekitarnya	Kapasitas simpanan sedang, lebih rendah dari Gilap	Rasio bulanan tinggi (80%), % baseflow paling tinggi saat pertengahan musim hujan (48%)	Partially Karstified aquifer
SBT Seropan	<i>Rising limb</i> saat awal dan pertengahan musim hujan meningkat dengan sangat lambat, namun <i>rising limb</i> di akhir musim penghujan meningkat tajam. <i>Recession limb</i> menurun dengan sangat lambat.	Dominan <i>Diffuse Infiltration</i>	Kapasitas simpanan sangat tinggi, namun saat akhir musim penghujan rendah karena kapasitas simpanan sudah penuh	Rasio bulanan tinggi (80%), % baseflow paling tinggi saat pertengahan musim penghujan (70.4%)	Darcian aquifer
SBT Toto	<i>Rising limb</i> meningkat secara perlahan, <i>Recession limb</i> menurun dengan sangat lambat	Dominan <i>Diffuse Infiltration</i>	Kapasitas simpanan akuifer sangat tinggi	Rasio bulanan tinggi (80%), % baseflow paling tinggi dicapai saat awal dan akhir musim penghujan	Darcian aquifer
SBT Bribin	<i>Rising limb</i> meningkat cepat, <i>recession limb</i> menurun secara bertahap dan lambat, sama dengan Gilap	Dominan <i>internal runoff</i> dan pasokan dari sistem SBT Bribin hulu dan tengah	Kapasitas simpanan akuifer sangat tinggi	Rasio bulanan sangat tinggi (97-99%), % baseflow pada akhir musim penghujan paling tinggi hingga mencapai 97%	Darcian aquifer
SBT Ngerong	<i>Rising limb</i> meningkat cepat, namun lebih lambat dari Bribin, Gilap, dan Ngreneng. <i>Recession limb</i> menurun secara bertahap (< Ngreneng)	Dominan <i>internal runoff</i> dari ponor dan aliran permukaan di cekungan (doline).	Kapasitas simpanan tinggi	Rasio bulanan tinggi. % baseflow paling tinggi terjadi pada pertengahan musim hujan (57%)	Darcian aquifer