KARAKTERISASI AKUIFER KARST UNTUK MEWUJUDKAN *SUSTAINABLE WATER RESOURCES* DI SISTEM PINDUL, KABUPATEN GUNUNGKIDUL

Afid Nurkholis¹, Galih Dwi Jayanto², Slamet Suprayogi³, dan Ahmad Cahyadi⁴

¹Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, afidnurkholis@gmail.com

²Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, galihgdj17@gmail.com

³Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, ssuprayogi@ugm.ac.id

⁴Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada, ahmadcahyadi@geo.ugm.ac.id

ABSTRAK

Sistem Karst Goa Pindul yang secara fisiografis terletak di Basin Wonosari memiliki keunikan tersendiri. Sistem ini memiliki zona *conduit* yang ditunjukkan dengan adanya sistem pergoaan dan zona *diffuse* yang dibuktikan dengan dominannya aliran permukaan. Sumberdaya air menjadi penopang utama aktifitas manusia di wilayah ini, yaitu berupa kegiatan pariwisata, permukiman, dan pertanian. Oleh karena itu, suatu cara perlu diterapkan untuk menjaga sumberdaya air tetap lestari. Penelitian ini akan menganalisis cara karakterisasi akuifer karst yang tepat untuk diterapkan di Sistem Karst Pindul. Menurut sumbernya, data di penelitian ini diperoleh dari hasil observasi lapangan dan studi literatur. Analisis data dilakukan secara diskriptif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa analisis spasiotemporal sifat aliran, presentase aliran dasar (PAD), dan waktu menuju banjir merupakan cara yang tepat untuk mewujudkan *sustainable water resources*. Analisis sifat aliran dapat mengetahui sejauh mana Sistem Karst Pindul telah berkembang (dominasi *diffuse*, *fissure*, atau *conduit*). Variasi hidrograf banjir dapat menganalisis seberapa cepat debit besar mencapai Goa Pindul dan Goa Tanding, sehingga *early warning system* dapat dirancang. PAD dapat menunjukkan variasi simpanan airtanah, sehingga regulasi pemanfaatan sumberdaya air untuk aktifitas manusia dapat diperkirakan. Perencanaan pembangunan berkelanjutan di Sistem Karst Pindul tidak dapat dilepaskan dari karakteristik akuifernya

Kata Kunci: *PAD, Sifat Aliran, Sumberdaya Air, Sustainable, Waktu Menuju Banjir*

1. Pendahuluan

Sistem Karst Goa Pindul yang secara fisiografis terletak di Basin Wonosari memiliki keunikan tersendiri. Sistem ini memiliki zona *conduit* yang ditunjukkan dengan adanya sistem pergoaan dan zona *diffuse* yang dibuktikan dengan dominannya aliran permukaan (Agniy, 2016) [1]. Selain itu, aktifitas manusia berupa pariwisata, pertanian, dan permukiman telah intensif memanfaatkan sumberdaya alam di lokasi ini.

Analisis citra *geoeye* tahun 2015 menunjukkan bahwa 60,7% penggunaan lahan Sistem Pindul berupa tegalan/kebun, 31,6% berupa permukiman, dan 7,3% berupa sawah. Menurut Musadad (2014) [2], wisata Goa Pindul mampu menarik 122.423 wisatawan dan menyumbang 50% PAD (Pendapatan Asli Daerah) Kabupaten Gunungkidul sektor pariwisata di tahun 2013. Aktifitas manusia yang intensif memanfaatkan sumberdaya alam dapat menimbulkan suatu dampak negatif (Panizza, 1996) [3]. Oleh karena itu, suatu cara perlu diterapkan guna menjaga sumberdaya air di Sistem Karst Pindul tetap lestari.

Karakterisasi akuifer merupakan salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengenali perilaku hidrologi karst (White, 2002) [4]. Sistem Pindul sebagai suatu bentangalam karst menjadikan teknik-teknik yang biasa digunakan untuk mengkarakterisasi akuifer menjadi tidak berlaku (seperti hukum Darcy, *flownet*, dan uji pompa). Hal tersebut terjadi karena akuifer karst memiliki rongga batuan yang terkadang homogen dan terkadang membentuk sistem perpipaan (Ford & Williams, 2007) [5]. Berdasarkan latar belakang diatas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Menganalisis cara karakterisasi akuifer Sistem Karst Pindul yang tepat.
2. Menciptakan *sustainable water resources* dengan karakterisasi akuifer karst.

2. Metode

Data yang digunakan berupa kondisi hidrogeologi Sistem Karst Pindul dan teori-teori mengenai karakterisasi akuifer karst. Kondisi hidrogeologi didapatkan melalui observasi lapangan dan studi literatur. Teori-teori mengenai karakterisasi akuifer didapatkan melalui studi literatur. Pengolahan data dilakukan dengan menganalisis karakterisasi akuifer karst yang sesuai dengan kondisi hidrogeologi dan kebutuhan lokasi kajian. Analisis data dilakukan secara diskriptif.

3. Hasil

3.1. Hidrogeologi Sistem Karst Pindul

Sistem Karst Pindul memiliki luas 15,4 km² dengan rincian 1,75 km² berupa sistem *conduit* dan 13,69 km² berupa sistem *diffuse* (Gambar 1) (Agniy, 2016) [1]. Sistem *conduit* berkembang di bagian utara yang dicirikan dengan adanya sistem pergoaan (Kusumayudha, 2005; Agniy, 2016) [6] [1]. Goa-goa tersebut adalah Goa Asri, Goa Greng, Goa Emas, Goa Candi, Goa Suruh, Goa Sioyot, dan Goa Pindul. Sistem *diffuse* berkembang di bagian selatan yang dicirikan dengan dominasi sistem aliran permukaan. Menurut Haryono (2008) [7], tahap awal perkembangan karst tropis dicirikan dengan dominannya lembah fluvial.

Perbedaan perkembangan karst diatas dapat dijelaskan melalui pendekatan karstifikasi. Haryono dan Adji (2004) [8] menyatakan bahwa karstifikasi dipengaruhi oleh adanya faktor pengontrol dan pendorong. Terjadinya proses karstifikasi ditentukan oleh keberadaan faktor pengontrol, sedangkan kecepatan dan hasil bentukan karstifikasi ditentukan oleh keberadaan faktor pendorong (Tabel 1).

Tabel 1. Faktor Pengontrol Dan Pendorong Proses Karstifikasi (Haryono dan Adji, 2004) [8]

Faktor Pengontrol	Faktor Pendorong
Batuan dengan karakteristik mudah larut, kompak, dan tebal.	Temperatur
Curah hujan lebih dari 250 mm/tahun.	Penutup lahan dan aktifitas organisme
Batuan tersingkap pada ketinggian yang memungkinkan perkembangan drainase secara vertikal.

Gambar 1. Peta Sistem Karst Pindul (Agni, 2016) [1]

3.2. Karakterisasi Akuifer Karst

Karst merupakan formasi batuan yang tergolong sebagai akuifer. Definisi akuifer adalah suatu formasi batuan yang mampu meloloskan air dalam jumlah signifikan (Todd, 1980) [9]. Hal tersebut sesuai dengan salah satu karakteristik khas yang dipaparkan oleh White (1988) [10], yaitu karst memiliki sistem pergoaan dan drainase bawah permukaan. Meskipun demikian, akuifer karst memiliki keunikan tersendiri berupa rongga batuan yang terkadang homogen dan terkadang membentuk sistem perpipaan (Ford & Williams, 2007) [5]. Karena keunikan tersebut, terdapat beberapa teori mengenai karakterisasi akuifer karst, yaitu:

a. Menurut White (1969)

White (1969) [11] melakukan klasifikasi akuifer karst menjadi tiga berdasarkan sifat aliran yang dikontrol kondisi hidrogeologi, yaitu:

Diffuse Flow Aquifer

Akuifer ini terbentuk pada formasi batuan yang aktivitas pelarutannya mengalami hambatan oleh jenis batuan yang resisten. Contoh batuan yang sering ditemukan adalah dolomit. Air pada akuifer ini mengalir pada rongga-rongga kecil atau rekahan pada batuan, sehingga sifatnya dapat dikatakan homogen seperti akuifer pada umumnya. Aliran pada akuifer ini akan keluar melalui beberapa mataair atau

rembesan dengan debit kecil.

Free Flow Aquifer

Akuifer ini terbentuk pada formasi batuan yang memiliki tingkat pelarutan dan ketebalan yang membentang dari permukaan tanah hingga lapisan dasar (base level). Oleh karena itu, aktivitas pelarutan menyebabkan terbentuknya rongga-rongga kecil dan rekahan (seperti pada diffuse flow aquifer) serta adanya perpipaan (conduit). Aliran pada akuifer ini akan keluar melalui mataair tunggal dengan debit yang besar.

Confined Flow Aquifer

Akuifer ini terbentuk sebagai akibat adanya formasi batuan kedap air atau dengan permeabilitas rendah yang berada diatas akuifer karst. Akuifer karst akan memiliki sifat artesis atau akuifer tertekan biasa (sandwich aquifer).

b. Menurut Shuster & White (1971)

Shuster & White (1971) [12] membuat klasifikasi akuifer karst berdasarkan tipe permeabilitas. Klasifikasi tersebut terdiri dari seperti berikut:

Diffuse

Permeabilitas akuifer ini cenderung homogen, sehingga karakteristiknya dapat disamakan dengan airtanah pada umumnya.

Conduit

Akuifer ini membentuk sistem perpipaan yang berdiameter lebih dari 1 cm. Oleh karena itu, permeabilitasnya cenderung heterogen. Karakteristik akuifer ini dapat disamakan dengan aliran permukaan.

c. Menurut Smart & Hobbs (1986)

Smart & Hobbs (1986) [13] memberikan pandangan berbeda mengenai karakteristik akuifer. Tiga parameter digunakan untuk melakukan klasifikasi akuifer karst, yaitu imbuhan, simpanan, dan sifat aliran. Parameter imbuhan digolongkan lagi menjadi imbuhan menyebar dan

terkonsentrasi. Parameter simpanan dibedakan menjadi simpanan tinggi dan rendah. Parameter sifat aliran mengacu pada Shuster dan White (1971) [12] yang terdiri dari conduit dan diffuse. Smart dan Hobbs (1986) [13] sebenarnya telah menyinggung adanya sifat aliran yang memiliki karakteristik diantara conduit dan diffuse yang kemudian oleh Gilleson (1996) [14] diklasifikasikan sebagai aliran fissure. Karakteristik sifat aliran oleh Smart dan Hobbs (1986) [13] dapat dilihat pada Tabel 2. Hubungan antara imbuhan, simpanan, dan sifat aliran dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 2. Karakteristik Sifat Aliran (Smart dan Hobbs, 1986) [13]

Sifat Aliran	Karakteristik Sifat Aliran	Karakteristik Imbuhan	Karakteristik Simpanan
<i>Diffuse</i>	- mengalir melalui rongga (<i>intergranular</i>) dan percelahan (<i>fracture</i>) - respon lambat terhadap hujan	- menyebar (<i>dispersed</i>) - formasi batuan <i>intergranular</i> dan <i>fracture</i>	- simpanan besar dan sepanjang tahun - laju resesi rendah - porositas tinggi
<i>Fissure</i>	- mengalir melalui percelahan (<i>fracture</i>) - respon sedang terhadap hujan	- diantara menyebar dan terkonsentrasi - formasi batuan didominasi <i>fracture</i> dan <i>joint</i>	- simpanan sedang musiman - laju resesi sedang - porositas sedang
<i>Conduit</i>	- mengalir melalui perpipaan - respon terhadap hujan tinggi	- terkonsentrasi (<i>concentrated</i>) - banyak ponor dan <i>sinkhole</i>	- simpanan rendah dan hanya ada saat musim hujan - laju resesi tinggi

Gambar 2. Hubungan Imbuhan, Simpanan, dan Sifat Aliran (Smart dan Hobbs, 1986) [13]

d. Menurut White (2002)

Publikasi White di tahun 2002 [4] mengungkapkan bahwa pemahaman mengenai identitas akuifer karst tidak cukup hanya dengan mendefinisikan sifat alirannya (*diffuse*, *fissure*, *conduit*). Konseptual model akuifer karst menurut White (2002) [4] terdiri dari komponen imbuhan, permeabilitas, dan debit keluaran (Gambar 3).

Imbuhan

Komponen imbuhan terdiri dari 4 komponen yang dapat dijelaskan seperti berikut:

- *Allogenic recharge* merupakan aliran permukaan yang mengimbuhi akuifer melalui sinkhole atau ponor.
- *Internal runoff* merupakan air hujan yang jatuh pada kawasan karst yang langsung mengimbuhi sistem pelorongan *conduit* melalui *sinkhole* atau ponor.
- *Diffuse Infiltration* merupakan air hujan yang jatuh di tanah kemudian tersimpan dalam waktu cukup lama pada lapisan *epikarst*.

- Imbuhan akuifer bertengger merupakan simpanan air pada akuifer ini yang akan mencapai sistem pelorongan *conduit* melalui saluran penghubung seperti rongga batuan dan rekahan.

Permeabilitas

Komponen permeabilitas dibedakan berdasarkan kecepatannya, yaitu granular permeability, fracture permeability, dan conduit permeability. Ketiga klasifikasi tersebut identik dengan sifat aliran *diffuse*, *fissure*, dan *conduit* yang didefinisikan oleh Shuster & White (1971) [12], Smart dan Hobbs (1986) [13], Gilleson (1996) [14].

Debit Keluaran

Debit keluaran akuifer karst seringkali muncul sebagai mataair yang dapat dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *overflow spring* ketika aliran muncul hanya saat terjadi hujan dan *underflow spring* ketika aliran mataair selalu ada sepanjang tahun akibat adanya suplai *baseflow*.

Gambar 3. Konseptual Model Akuifer Karst (White, 2002) [4]

4. Pembahasan

4.1. Metode Karakterisasi Akuifer Karst Sistem Pindul yang Tepat

Hasil observasi lapangan menunjukkan bahwa obyek wisata Goa Pindul dan Goa Tanding merupakan aktifitas

manusia yang paling dominan di sistem ini. Goa Pindul terletak tepat pada outlet Sistem Karst Pindul (Gambar 1 dan 4). Sementara itu, Goa Tanding berada tepat setelah *sinking stream* Kedungbuntung (Gambar 1 dan 5). Posisi kedua obyek tersebut menjadikannya rawan terhadap banjir.

Luapan sungai bawah tanah dari *sinking stream* Kedungbuntung dan outlet sistem karst dapat terjadi setiap saat ketika hujan deras turun.

Gambar 4. Outlet Sisktem Karst Pindul (Dokumentasi Pribadi, 2016)

Gambar 5. Singking Steream Kedungbuntung (sebelum Goa Tanding) (Dokumentasi Pribadi, 2016)

Sementara itu, permukiman dan pertanian merupakan aktifitas manusia yang juga dominan di lokasi ini. Kedua aktifitas tersebut menggunakan sumberdaya airtanah Sistem Karst Pindul. Permukiman dan pertanian juga berpotensi mencemari sumberdaya air melalui limbah yang dihasilkannya. Oleh karena itu, aktifitas-aktifitas manusia yang telah dijelaskan diatas berpotensi merusak sumberdaya air dalam segi kuantitas dan kualitas.

Berdasarkan permasalahan-permasalahan utama diatas, Karakterisasi akuifer karst yang tepat dilakukan adalah konseptual model menurut Smart & Hobbs (1986) [13] dan White (2002) [4]. Perhitungan kuantitatif tiga parameter

(imbuhan, simpanan, dan sifat aliran) dari konsep Smart & Hobbs (1986) [13] digunakan sebagai analisis tingkat perkembangan karst, variasi simpanan airtanah, dan waktu menuju banjir di Goa Pindul dan Goa Tanding. Konseptual model menurut White (2002) [4] digunakan untuk memperdalam analisis mengenai sistem kerja/siklus aliran dari Akuifer Pindul.

4.2. Sustainable Water Resources dengan Karakterisasi Akuifer Karst

a. Rencana Pemasangan Alat dan Data yang Dikumpulkan

Data yang dibutuhkan adalah debit aliran pengukuran lapangan dan fluktuasi TMA (tinggi muka air) dari *logger*. Kedua data diukur selama waktu satu tahun (variasi musim kemarau dan penghujan) pada tiga lokasi yang berbeda (Gambar 6).

b. Rencana Pengolahan Data

Debit pengukuran lapangan digunakan untuk membuat *rating curve* yang selanjutnya menghasilkan konstanta (Gambar 7). Kombinasi konstanta dan TMA akan menghasilkan hidrograf aliran selama rentang waktu satu tahun (Gambar 8).

Gambar 7. Rating Curve (Pengolahan data dengan nilai simulasi/sembarang)

Gambar 8. Hidrograf Aliran (Pengolahan data dengan nilai simulasi/sembarang)

Gambar 6. Rencana Lokasi Pengukuran

Pemilihan kejadian banjir pada hidrograf dilakukan untuk menghitung koefisien resesi (Persamaan 1) yang selanjutnya menghasilkan sifat aliran (Tabel 3).

$$Kr = -1/(t-t_0) \ln(Q_t/Q_0) \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan:

Q_t : Debit aliran waktu ke- t

Q_0 : Debit aliran waktu

ke- $(t-n)$

e^{-k} : K_r (Konstanta resesi)

Tabel 3. Nilai Konstanta Resesi (Schulz, 1976) [15]

Komponen Aliran	Nilai Konstanta Resesi
<i>Streamflow/ conduit</i>	0.05 – 0.2
<i>Interflow/ fissure</i>	0.5 – 0.8
<i>Baseflow/ diffuse</i>	0.85 – 0.98

Kejadian banjir terpilih pada ketiga lokasi (Gambar 6) juga digunakan untuk menghitung waktu menuju puncak banjir (Gambar 9). Variasi simpanan airtanah didapatkan dengan melakukan pemisahan aliran dasar menggunakan rumus oleh Eckhardt (2005) [16] (Persamaan 2, Gambar 10).

$$b_k = \frac{(1-BFI_{max})\alpha b_{k-1} + (1-\alpha)BFI_{max}y_k}{(1-\alpha)BFI_{max}} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

b_k : aliran dasar pada waktu “ k ”

b_{k-1} : aliran dasar pada waktu $k-1$

y_k : debit aliran (*stream flow*) pada waktu k

α : konstanta resesi aliran dasar

BFI_{max} : Indeks aliran dasar maksimum

Gambar 9. Hidrograf Banjir (Pengolahan data dengan nilai simulasi/sembarang)

Gambar 10. Pemisahan Aliran Dasar (Pengolahan data dengan nilai simulasi/sembarang)

c. Sustainable Water Resources

Karakterisasi akuifer karst yang dijelaskan diatas dapat memberi manfaat secara langsung terhadap sumberdaya air di Sistem Pindul. Perhitungan waktu menuju puncak banjir (*time to peak*) digunakan sebagai dasar sistem peringatan dini serta rencana pembangunan di obyek wisata Goa Pindul dan Goa Tanding. Analisis tersebut dapat mengurangi kerugian yang disebabkan oleh bencana banjir.

Variasi debit airtanah menunjukkan potensi airtanah yang dapat digunakan untuk aktifitas manusia. Pembangunan yang terus berkembang di Sistem Pindul menjadikan penggunaan airtanah akan terus meningkat. Data PAD dapat digunakan sebagai landasan prakiraan dan regulasi pengeboran sumur atau pemompaan sungai bawah tanah.

Karakteristik sifat aliran yang didapatkan digunakan untuk mengetahui sejauh mana perkembangan karst di Sistem Pindul. Karakteristik ini merupakan data dasar yang memengaruhi waktu menuju puncak banjir dan PAD Sistem Pindul. Lebih lanjut lagi, karakteristik akuifer Sistem Karst Pindul merupakan data penting yang dibutuhkan untuk melakukan analisis kualitas air (beban pencemar, daya tampung beban pencemar, pengurangan pencemar). Oleh karena itu, perencanaan pembangunan berkelanjutan di Sistem Karst Pindul tidak dapat dilepaskan dari karakteristik akuifernya

5. Kesimpulan

Karakterisasi akuifer karst yang tepat dilakukan di Sistem Karst Pindul adalah konseptual model menurut Smart & Hobbs (1986) [13] dan White (2002) [4]. Hal tersebut didasarkan atas permasalahan utama yang ada. Obyek wisata Goa Pindul dan Goa Tanding memiliki kerawanan banjir akibat posisinya yang berada di outlet sistem karst dan *sinking stream* Kedungbuntung. Selain itu, adanya permukiman dan sawah menimbulkan ancaman terhadap kuantitas serta kualitas air.

Analisis sifat aliran dapat mengetahui sejauh mana Sistem Karst Pindul telah berkembang (dominasi *diffuse*, *fissure*, atau *conduit*). Variasi hidrograf banjir dapat menganalisis seberapa cepat debit besar mencapai Goa Pindul dan Goa Tanding, sehingga *early warning system* dapat dirancang. PAD dapat menunjukkan variasi simpanan airtanah, sehingga regulasi pemanfaatan sumberdaya air

untuk aktifitas manusia dapat diperkirakan. Perencanaan pembangunan berkelanjutan di Sistem Karst Pindul tidak dapat dilepaskan dari karakteristik akuifernya.

6. Pengakuan/Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini merupakan bagian dari Hibah Penelitian Unggul Perguruan Tinggi (PUPT) Dikti tahun 2016 yang berjudul “*Karakterisasi Hidrologi dan Banjir di Sungai Bawah Tanag Goa Pindul untuk Mendukung Pengelolaan Pariwisata Berkelanjutan Berbasis Manajemen Kebencanaan*”. Penulis menyampaikan ucapan terimakasih kepada Dikti dan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat (LPPM) Universitas Gadjah Mada selaku pihak yang mendukung kegiatan penelitian ini. Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih untuk pihak-pihak lainnya yang terkait dengan berjalannya kegiatan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] Agniy, Romza F. 2016. Kajian Hidrogeologi Karst Sistem Goa Pindul, Kecamatan Karangmojo, Kabupaten Gunungkidul. *Skripsi*. Fakultas Geografi UGM.
- [2] Musadad. 2014. Partisipasi Masyarakat Dusun Gelaran II dalam Pengembangan Wisata di Goa Pindul, Kabupaten Gunungkidul, Yogyakarta. *Tesis*. Fakultas Geografi UGM.
- [3] Panizza, M. 1996. *Environmental Geomorphology*. Amsterdam: Elsevier Science.
- [4] White, W.B. 2002. Conceptual Models For Karstic Aquifers. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers, 1 (1) January 2003, p.2, The Virtual Scientific Journal*, www.speleogenesis.info.
- [5] Ford, D. and William, P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester.
- [6] Kusumayudha, Sari B. 2005. *Hidrogeologi Karst dan Geometri Fraktal di Daerah Gunungsewu*. Adicita Karya Nusa, Yogyakarta.
- [7] Haryono, E. 2008. Model Perkembangan Karst Berdasarkan Morfometri Jaringan Lembah di Karangbolong, Gunungsewu, Blambangan, dan Rengel. *Disertasi*. Fakultas Geografi UGM.

- [8] Haryono, E. dan Adji, T.N. 2004. *Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst*. Kelompok Studi Karst Fakultas Geografi UGM, Yogyakarta.
- [9] Todd, D.K., 1980. *Groundwater Hidrology*. John Willey and Sons, New York.
- [10] White, W.B. 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York: Oxford University Press.
- [11] White, W.B. 1969. Conceptual Models for Carbonate Aquifers. *Ground Water, Vol.7, No.3*.
- [12] Shuster, E. T., White, W. B. 1971. Seasonal Fluctuations in The Chemistry of Limestone Springs: A Possible Means for Characterizing Carbonate Aquifers. *J. Hydrology 14, 93-128*.
- [13] 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.
- [14] Gillieson, D. 1996. *Caves: Processes, Development, and Management*. Blackwell, Oxford.
- [15] Schulz, E.F. 1976. *Problems in Applied Hydrology*. Water Resources Publication, Colorado.
- [16] Eckhardt K, 2005. How to Construct Recursive Digital Filters for Baseflow Separation. *Hydrological Processes 19, 507-515*.