ANALISIS *BREAKTHROUGH CURVE* UNTUK KARAKTERISERISASI PELORONGAN DI SISTEM SUNGAI BAWAH TANAH PINDUL KABUPATEN GUNUNGKIDUL

BREAKTHROUGH CURVE ANALYSIS FOR PASSAGE CHARACTERISATION IN PINDUL UNDER GROUND RIVER SYSTEM

Ahmad Cahyadi¹, Romza Fauzan Agniy²

¹Departemen Geografi Lingkungan Fakultas Geografi Univeristas Gadjah Mada, ahmadcahyadi@geo.ugm.ac.id

² Departemen Geografi Lingkungan Fakultas Geografi Univeristas Gadjah Mada

ABSTRAK

Karakteristik hidrogeologi sistem sungai bawah tanah di kawasan karst sangat penting untuk didefinisikan dalam rangka untuk mendukung perencanaan pengelolaannya di masa mendatang. Namun demikian, lorong-lorong sungai bawah tanah di kawasan karst tidak semuanya dapat dengan mudah dipetakan karena berbagai kendala berupa lorong yang sempit, terdapat kolam yang dalam dan keberadaan lorong yang penuh dengan air, sehingga pendefinisian sistem hidrogeologi suatu kawasan karst menjadi sulit dilakukan. Penelitian ini dilakukan untuk (1) mengetahui keterhubungan antara Goa Sioyot dengan Goa Pindul, dan (2) menganalisis karakteristik pelorongan sistem sungai bawah tanah berdasarkan pada *breakthrough curve* hasil uji tracer. Uji tracer dilakukan dengan menggunakan serbuk uranin yang dilarutkan dan dituangkan pada aliran sungai bawah tanah di Goa Sioyot, sedangkan pencatatan *breakthrough curve* dilakukan dengan menggunakan Fluorometer yang diletakkan di Goa Pindul. Hasil analisis menunjukkan bahwa (1) sungai bawah tanah di Goa Sioyot memiliki keterhubungan dengan sungai bawah tanah di Goa Pindul dan (2) sistem kelorongan yang berkembang pada sungai bawah tanah di antara Goa Sioyot dan Goa Pindul dikontrol oleh lorong *conduit* dan lorong *diffuse*. Baik lorong *conduit* ataupun *diffuse* memiliki peranan yang sama besar yang nampak dari dua puncak konsentrasi uranin dalam aliran yang

terbentuk pada *breakthrough curve* hasil pencatatan Fluorometer.

Kata Kunci: *Breakthrough Curve*, Pelorongan, Uji Tracer, Karst, Sungai Bawah Tanah

PENDAHULUAN (INTRODUCTION)

Pemahaman akan kondisi hidrogeologi suatu kawasan menjadi sangat penting dalam upaya pengelolaan sumberdaya khususnya sumberdaya airtanah (Bakalowicz, 2011; Worthington, 2011; Cahyadi dkk., 2013). Kajian ini akan sangat membantu terkait analisis simpanan air di kawasan karst yang dapat dimanfaatkan, analisis pengelolaan khususnya terkait dengan perlindungan airtanah dari polutan/ bahan pencemar serta perencanaan pengelolaan wilayah (Leibundgut *et al.*, 2009).

Kawasan karst adalah kawasan yang berkembang akibat dominannya proses pelarutan. Berkembangnya porositas sekunder di kawasan karst menyebabkan wilayah ini memiliki karakteristik yang unik sekaligus memberikan tantangan tersendiri bagi pengelolaannya (Kresik, 2013). Zona anisotropis di mana aliran sulit diprediksi arah dan karakteristiknya menyebabkan kawasan karst seringkali belum dikelola sebagaimana mestinya.

Tipe aliran di kawasan karst secara garis besar dibedakan menjadi 2, yakni aliran airtanah melalui rongga antar butir batuan yang disebut *diffuse* dan aliran airtanah yang melalui celah

atau lorong pelarutan yang disebut konduit. Meskipun demikian, banyak ahli yang kemudian menambahkan jenis antara keduanya yang melalui lorong yang relatif kecil dengan sebutan fissure. Masing-masing tipe aliran ini memiliki konsekuensi yang besar bagi sifat aliran, karakteristik hidrogeokimia dan karakteristik simpanan air di kawasan karst (White, 1989; Hess dan White, 1989).

Dominasi porositas sekunder dan sifat anisotropis di kawasan karst menyebabkan batas hidrologi dan batas topografi seringkali sama sekali tidak terkait (Milanović, 2004). Hal ini berbeda dengan wilayah lain yang didominasi porositas primer, di mana batas hidrologi seringkali sama dengan batas hidrologi berupa igir pegunungan (La Moreaux dan Daoxian, 2004). Oleh karenanya diperlukan suatu pendekatan yang dapat digunakan untuk mendefinisikan karakteristik daerah tangkapan air dari sungai bawah tanah dan mataair untuk dapat menyusun suatu rencana pengelolaannya (Cahyadi dkk., 2013).

Awalnya banyak model yang dikembangkan di kawasan karst lebih berupa “*Black Box*”, namun seiring dengan perkembangan kajian dan kepentingan, maka kemudian banyak pula metode yang menganalisis sistem hidrologi kawasan karst dengan model “*Grey Box*”, salah satunya adalah model *invers modelling* (Ford and Williams, 2007). *Invers modelling* adalah suatu metode yang dikembangkan berdasarkan asumsi bahwa karakteristik *output* yang dikeluarkan dari mata air atau sungai bawah tanah mencerminkan proses yang terjadi di dalamnya (Rehrl dan Birk, 2010). Karakteristik yang dimaksud dapat berupa debit

(hidrograf), karakteristik hidrokimia air (karakteristik unsur tertentu, isotop, bahan pencemar dan *natural tracer* lain), respon aliran terhadap hujan dan respon aliran terhadap *artificial tracer* (Rehrl dan Birk, 2010). Gambar 1 menunjukkan ilustrasi dari *Invers Modelling*.

Tracer test atau sering pula disebut sebagai *dye tracer* adalah salah satu metode yang dapat digunakan dalam analisis *invers modelling*, dengan hasil yang cukup dapat diandalkan (Leibundgut *et al.*, 2009; Gilli, 2015). *Tracer test* adalah metode yang digunakan untuk mengetahui hubungan (konektivitas) antara beberapa goa, ponor, *sink hole*, sungai bawah tanah dan mataair dengan memasukkan zat pelacak (dapat berupa padat ataupun cair) tertentu ke dalam aliran (Benischke *et al.*, 2007; Singhal dan Gupta, 2010). Analisis *invers modelling* dapat dilakukan dengan melakukan analisis terhadap kurva yang terbentuk dari fungsi konsentrasi zat pelacak dengan waktu atau disebut *breakthrough curve*. Stanley *et al.* (1980) menjelaskan bahwa *tracer* dalam jenis yang cukup kompleks meliputi air panas, spora, substansi ionik, isotop yang stabil, zat radioaktif, gas, florokarbon, dan pewarna alami. Bahan-bahan yang digunakan tidak sembarangan agar keuntungan yang diperoleh dari tracer test tidak diikuti dengan kerusakan lingkungan. Hal ini yang menjadi sebab banyaknya zat pelacak yang saat ini tidak diperbolehkan lagi untuk digunakan, misalnya radioaktif (Benischke *et al.*, 2007). Beberapa jenis zat pelacak yang sering digunakan ditunjukkan oleh Tabel 1.

Gambar 1. Invers Model untuk Mengetahui Karakteristik Wilayah Tangkapan Air Pada Sungai Bawah Tanah atau Mataair (Rehrl dan Birk, 2010)

Tabel 1. Beberapa Jenis Zat Pelacak yang Sering Digunakan

No	Tracer	Jenis	Batas Deteksi (µg/L)	Natural Background	Toksikologi	Permasalahan	
1	Uranin	Fluorescent dyes	10 ⁻¹	Tidak Ada	Aman	Mudah Terlarut pada pH rendah dan Sensitif Terhadap Cahaya	
2	Eosin	Fluorescent dyes	10 ⁻²				
3	Sulforhodamine B	Fluorescent dyes			Ecotox,Tidak Aman		
4	Amidorhodamine G	Fluorescent dyes			Aman		
5	Rhodamine WT	Fluorescent dyes			Genotoxic		
6	Pyranine	Fluorescent dyes			Aman	Not Reliable (Mengalami Degradasi)	
7	Napthionate	Fluorescent dyes	10 ⁻¹				
8	Tinopal	Fluorescent dyes					Mudah Larut
9	Sodium	Garam	Tergantung Metode, biasanya sekitar 0,1 µg/L sampai dengan 1mg/L		Tinggi		
10	Potasium	Garam			Sedang		
11	Lithium	Garam		Sangat Rendah	Aman pada Batas Tertentu	Mudah Larut	
12	Strontium	Garam		Sedang			
13	Klorida	Garam		Tinggi			
14	Bromida	Garam		Rendah			
15	Iodida	Garam	Sangat Rendah	Belum Dievaluasi	Tidak Stabil		
16	Spora	Partikel	Terdeteksi sebagai Partikel Tunggal	Tidak Ada	Aman	Sulit Dilakukan Analisis Kuantitatif	
17	Microspheres	Partikel			Aman	Membutuhkan Waktu yang Lama	
18	Spesific Bacteria	Partikel			Belum Dievaluasi		
19	Bacteriophages	Partikel					

Sumber: Benischke *et al.* (2007) dan Behrens *et al.* (2001)

Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengetahui keterhubungan antara Goa Sioyot dengan Goa Pindul, dan (2) menganalisis karakteristik pelorongan sistem sungai bawah tanah berdasarkan pada *breakthrough curve* hasil uji *tracer*. Penelitian ini adalah penelitian lanjutan yang dilakukan setelah dilakukannya pemetaan lorong gua, mataair, *ponor* dan *sinking stream* di lokasi kajian. Selain itu, penelitian ini adalah bagian dari penelitian besar terkait pengelolaan sumberdaya air di Goa Pindul untuk mendukung perencanaan pengelolaan pariwisata

berbasis karakteristik sumberdaya dan pengurangan risiko bencana.

LOKASI PENELITIAN (*STUDY AREA*),

Penelitian ini dilakukan di sistem sungai bawah tanah Pindul yang secara administrasi masuk di Desa Bejiharjo, Kecamatan Karangmojo, Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Secara fisografis, lokasi terletak pada Cekungan Wonosari (Gambar 2).

Gambar 2. Letak Lokasi Kajian

Lokasi kajian memiliki topografi berbukit dengan berbagai bentuk khas kawasan karst berupa *sinking stream*, *ponor*, *karst window*, goa, mataair karst, *conical hill*, dan sungai bawah tanah. Batuan penyusun berupa batuan gamping yang masuk dalam Formasi Wonosari. Batuan penyusun di lokasi ini sedikit berbeda dengan wilayah di sekitarnya yang merupakan batuan gamping Formasi Kepek, di mana pada Formasi Kepek bentuk khas kawasan karst relative tidak berkembang.

METODE (METHODS)

Alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi peralatan uji tracer seperti zat pelacak dan *fluoro meter* yang digunakan untuk mencatat konsentrasi larutan zat pelacak dalam aliran. Zat pelacak yang digunakan dalam penelitian ini adalah uranin, yakni sejenis fluorescent dyes yang memiliki warna hijau dengan batas deteksi paling kecil dibandingkan

yang lain yakni 10^{-1} $\mu\text{g/L}$, paling cocok untuk pelacakan pada zona gelap (tidak terkena cahaya langsung) dan cocok untuk wilayah dengan pH air tinggi. Sebagai peralatan pendukung digutuhkan pita ukur dan *current meter* untuk menentukan debit aliran saat dilakukan injeksi zat pelacak.

Besarnya zat pelacak yang digunakan ditentukan berdasarkan Persamaan 1 (Käss, 1998; Goldscheider *et al.*, 2008). Faktor yang menentukan banyaknya zat pelacak yang digunakan secara garis besar adalah jarak yang diperkirakan akan ditempuh zat pelacak dan debit aliran di mana zat pelacak diinjeksikan. Setidaknya ada 33 persamaan yang telah dibuat untuk menentukan banyaknya zat pelacak yang harus diinjeksikan dalam aliran agar dapat terdeteksi pada lokasi yang diharapkan (Field, 2003; 2005).

$$M = L \cdot k \cdot B \dots\dots\dots(1)$$

di mana M = Kuantitas zat Pelacak yang diperlukan (Kg), k = koefisien zat pelacak yang digunakan (nilai k untuk unranine adalah 1) dan B = faktor kondisi hidrogeologi (biasanya bernilai 0,1 – 0,9). Nilai k dan B dapat dilihat pada Tabel 2.

Injeksi zat pelacak di lakukan di Goa Sioyot sebagai lokasi yang diperkirakan berada di bagian hulu. Injeksi dilakukan pada aliran sungai bawah tanah . Pencatat fluoro meter dipasang di Goa Pindul yang diperkirakan terletak di bagian hilir. Selain itu, dipasang pula karbon aktif pada beberapa mataair yang terletak di lokasi kajian untuk mengetahui apakah terdapat koneksi antara sungai bawah tanah di Goa Sioyot dengan masing-masing mataair. Pencatatan dengan menggunakan karbon aktif

hanya akan menunjukkan adanya konektivitas ataukah tidak, namun tidak akan menghasilkan data *breakthrough curve*. Hal ini dilakukan karena keterbatasan jumlah *fluoro meter* yang digunakan oleh peneliti. Gambar 3 menunjukkan lokasi Goa Pindul, Goa Sioyot dan beberapa mataair dan goa di sekitarnya.

Analisis konektivitas antara Goa Sioyot dan Goa Pindul ditentukan dari terdeteksi atau tidaknya uranin yang diinjeksikan di Goa Sioyot oleh Fluorometer di Goa Pindul. Kemudian analisis terkait dengan karakteristik pelorongan dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan karakteristik *breakthrough curve*. Analisis terhadap *breakthrough curve* dalam penelitian ini hanya dilakukan secara deskriptif berdasarkan pada hasil kajian dari peneliti-peneliti terdahulu.

Tabel 2. Penentuan Nilai Koefisien Zat Pelacak (k) dan Faktor Kondisi Hidrogeologi (B)

Tracer	k	Framework conditions	B
Water soluble tracers: mass [kg]		Surface streams	0.1–0.9
Uranine	1	Karst aquifers (conduits)	
Eosin	5.5	Pure sand/gravel aquifers	
Sulforhodamine B	4	Highly fissured aquifers	
Amidorhodamine G	2	Impure sand/gravel aquifers	2–4
Pyranine	5.5	Injection into groundwater	
Naphthionate	15	through unsaturated zone	
Tinopal	3	Karst aquifers (matrix),	
NaCl	20000	Poorly fissured aquifers	
LiCl	1000	River bank filtration	
KCl	10000	Turbid sampling water or	
Particle tracers: number of particles		tracer background level > 0	
Microspheres	1E+12	Injection through thick or	5–10
Bacteriophages	1E+13	loamy unsaturated zone	
Bacteria (<i>Serratia marcescens</i>)	1E+13	High clay/silt contents	

Sumber: Käss (1998); Goldscheider *et al.*, 2008

Gambar 3. Lokasi Goa Pindul, Goa Sioyot dan Beberapa Mataair serta Goa di Sekitarnya

HASIL DAN PEMBAHASAN (RESULT AND DISCUSSIONS)

Hasil uji tracer yang dilakukan dengan uranin menunjukkan bahwa Goa Sioyot dan Goa Pindul positif terkoneksi. Hal ini nampak dari hasil pencatatan pada fluorometer serta kenampakan visual pada aliran sungai bawah tanah di Goa Pindul (Gambar 4a.). Selain keluar

di Goa Pindul, uranin secara visual nampak pula muncul di Mataair Ngancar (Gambar 4b) yang kemudian masuk ke dalam *sinking stream* yang menuju ke arah Goa Pindul. Hal ini nampak dari waktu kemunculan uranin di Mataair Ngancar yang lebih awal dibandingkan dengan waktu kemunculan di Goa Pindul. Berdasarkan pada hasil pelacakan yang telah dilakukan, maka konektivitas antara Goa Sioyot dan Goa Pindul

secara sederhana dapat di sajikan seperti pada Gambar 5.

Gambar 4. Kemunculan Uranin yang Nampak Secara Visual di Goa Pindul (a) dan Mataair Ngancar (b)

Gambar 5. Sketsa Konektivitas Sistem Sungai Bawah Tanah Antara Goa Sioyot dan Goa Pindul

Breakthrough curve yang terbentuk dari hasil pencatatan fluorometer (Gambar 6) menunjukkan terdapat dua puncak dengan karakteristik yang berbeda. Bagian awal *breakthrough curve* berbentuk kurva lancip dengan waktu menuju konsentrasi puncak sangat cepat dan menurun dengan cepat pula, sedangkan kurva kedua (kanan) berbentuk kurva yang landai yang menunjukkan waktu menuju ke puncak relatif lambat dibandingkan dengan kurva pertama. Kurva *breakthrough curve* yang lancip pada Gambar 6 menunjukkan perkembangan lorong konduit yang menyebabkan terjadinya respon aliran yang cepat, sedangkan kurva yang melandai menunjukkan adanya perkembangan yang jauh berbeda, yakni aliran fissure dan/atau diffuse.

Beberapa peneliti sebelumnya seperti Benischke *et al.* (2007), Goldscheider *et al.* (2008), Gilli (2015) menyebutkan bahwa

kemunculan dua puncak pada *breakthrough curve* disebabkan oleh adanya percabangan. Gambar 7 menunjukkan dua *breakthrough curve* dengan dua puncak. Hasil penelitian dan pemetaan jaringan goa dan sungai bawah tanah selanjutnya terkait dengan sistem yang membentuknya menunjukkan bahwa Goa Fort's Funnel dan Mataair Buffalo memiliki percabangan pada sistem sungai bawah tanahnya (Goldscheider *et al.* 2008). Berdasarkan hal tersebut maka kemudian diketahui bahwa sistem sungai bawah tanah antara Goa Sioyot dan Goa Pindul dikontrol oleh dua lorong, di mana saluran yang memisah kemudian kembali ke saluran utama seperti yang ditunjukkan Gambar 8 huruf I). *Breakthrough curve* yang terbentuk juga menunjukkan bahwa satu saluran pada sistem yang dikkaji memiliki karakteristik berupa saluran conduit, sedangkan yang satu berupa saluran diffuse dan/atau fissure.

Gambar 6. *Breakthrough Curve* yang Terbentuk Hasil *Tracer Test* di Sistem Sungai Bawah Tanah Pindul

Gambar 7. Contoh *Breakthrough Curve* yang Dihasilkan oleh Percabangan Pelorongan (Goldscheider *et al.*, 2008)

Gambar 8. Berbagai Jenis Tipe Pelorongan pada Sungai Bawah Tanah Kawasan Karst (Goldscheider *et al.*, 2008)

KESIMPULAN (CONCLUSION)

Hasil analisis yang dilakukan menunjukkan bahwa Goa Sioyot dan Goa Pindul positif memiliki konektivitas. Konektivitas antara keduanya diduga berupa pelorongan yang bercabang dengan sifat yang berbeda yakni pelorongan berupa konduit dan diffuse. Lorong Konduit akan memiliki respon yang cepat terhadap injeksi artificial tracer ataupun hujan, sedangkan sistem diffuse akan memiliki respon yang relatif lambat namun berarti memungkinkan adanya simpanan airtanah di dalamnya.

DAFTAR PUSTAKA (REFERENCES)

- Bakalowicz, M. 2011. Management of Karst Groundwater Resources. dalam van Beynen, P.E. (ed). 2011. *Karst Management*. Dordrecht: Springer.
- Behrens, H., Beims, U., Dieter, H., Dietze, G., Eikmann, T., Grummt, T., Hanisch, H., Henseling, H., Käss, W., Kerndorff, H., Leibundgut, C., Müller-Wegener, U., Rönnefahrt, I., Scharenberg, B., Schleyer, R., Schloz, W. dan Tilkes, F. 2001. Toxicological and Ecotoxicological Assessment of water Tracer. *Hydrogeology Journal*, 9: 321-325.
- Benischke, R., Goldscheider, N., dan Smart, C. 2007. Tracer Techniques. dalam Goldscheider, N., dan Drew, D (eds). 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. London: Taylor & Francis Group.
- Cahyadi, A., Pratiwi, E.S. dan Fatchurohman, H. 2013. Metode-metode Identifikasi Karakteristik Daerah Tangkapan Air Sungai Bawah Tanah dan Mataair Kawasan Karst: Suatu Tinjauan. dalam Marfai, M.A. dan Widyastuti, M. 2013. *Pengelolaan Lingkungan Zamrud Khatulistiwa*. Yogyakarta: Pital.
- Field, M.S. 2003. A Review of Some Tracer-Test Design Equations for Tracer-Mass Estimation and Sample-Collection Frequency. *Environmental Geology*, 43: 867-881.
- Field, M.S. 2005. Tracer-Test Design for Losing Stream-Aquifer Systems. *International Journal of Speleology*, 35(1): 25-36.
- Ford, D. dan Williams, P. 2007. *Karst Hydrology and Geomorphology*. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons, Ltd.
- Gilli, E. 2015. *Karstology - Karst, Caves and Springs: Elements of Fundamental and Applied Karstology*. Boca Raton: CRC Press.
- Goldscheider, N., Meiman, J., Pronk, M dan Smart, C. 2008. Tracer Tests in Karst Hydrogeology and Speleology. *International Journal of Speleology*, 37 (1): 27-40.
- Hess, J.W. dan White, W.B. 1989. Chemical Hydrology. dalam White, W.B. dan White, E.L (eds). 1989. *Karst Hydrology: Concepts from the Mammoth Cave Area*. New York: Springer.
- Käss, W. 1998. *Tracing Technique in Geohydrology*. Rotterdam: Balkema.
- Kresic, N. 2013. *Water in Karst: Management, Vulnerability and Restoration*. New York: Mc Graw Hill.
- LaMoreaux, P.E. dan Daoxian, Y. 2004. Hydrogeology of Carbonate Rocks. dalam Kovalevsky, V.S., Kruseman, G.P. dan Rushton, K.R. 2004. *Groundwater Studies: An International Guide for Hydrogeological Investigation*. Paris: UNESCO.
- Leibundgut, C., Maloszewski, P. dan Külls, C. 2009. *Tracer Hydrology*. New York: Wiley-Blackwell.
- Milanović, P.T. 2004. *Water Resources Engineering in Karst*. Boca Raton: CRC Press.
- Riehl, C. dan Birk, S. 2010. Hydrogeological Characterisation and Modelling of Spring

- Chatchments in a Changing Environment. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 103 (2), 106-117.
- Singhal, B.B.S. dan Gupta, R.P. 2010. *Applied Hydrogeology of Fractured Rocks*. Dordrecht: Springer.
- Stanley, N.D., Thomson, G.M., Bentley, H.W. dan Styles, G. 1980. Groundwater Tracer: A Short Review. *Groundwater Journal*, 18(1): 14-21.
- White, E.L. 1989. Flood Hydrology. dalam White, W.B. dan White, E.L (eds). 1989. *Karst Hydrology: Concepts from the Mammoth Cave Area*. New York: Springer.
- Worthington, S.R.H. 2011. Management of Carbonate Aquifers. dalam van Beynen, P.E. (ed). 2011. *Karst Management*. Dordrecht: Springer.