Karakteristik sistem aliran sungai bawah tanah di kawasan Karst Jonggrangan dengan tracer test

R F Agniy¹, T N Adji^{1,2*}, E Haryono^{1,2}, Afid Nurkholis¹, Ahmad Cahyadi^{1,2}, Aji Dwi Pratama¹, Dicky Satria Dwiputra¹

¹Karst Research Group, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada

²Department of Environmental Geography, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

*corresponding author

*adji_tjahyo@ugm.ac.id

Abstract. Karakteristik hidrogeologi bawah permukaan di kawasan karst penting untuk diketahui guna mendukung pengelolaan sumber daya airnya. Namun demikian, lorong-lorong perguaan di daerah karst tidak semuanya dapat diakses karena berbagai kendala seperti penyempitan lorong yang mengakibatkan manusia tidak dapat memasukinya serta adanya lorong gua yang penuh dengan air sehingga pendefinisian sistem hidrogeologi bawah permukaan karst sulit untuk dilakukan. Penelitian ini dilakukan di 3 lokasi yang terletak di Kawasan Karst Jonggrangan, Kabupaten Kulon Progo (Jawa Tengah) dan Kabupaten Purworejo (DIY). Lokasi yang dikaji adalah Mata air Mudal, Gua Kiskendo, dan Gua Anjani. Tujuan penelitian ini adalah : (1) Mengetahui sistem aliran bawah permukaan di 3 lokasi tersebut; dan (2) Menganalisis kurva hasil uji tracer di 3 lokasi tersebut. Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode survai yang terbagi dalam beberapa tahap meliputi tahap persiapan, tahap kerja lapangan, dan tahap pasca lapangan. Tahap persiapan meliputi pemilihan lokasi penelitian dan pemilihan lokasi untuk dilakukan injeksi zat tracer. Tahap kerja lapangan meliputi pemasangan fluorometer di 3 lokasi penelitian, serta injeksi zat tracer. Tahap pasca lapangan adalah analisis hidrokemograf uji tracer. Hasil penelitian menunjukkan bahwa : (1) terdapat konektivitas aliran bawahtanah antara gua-gua disekitar 3 lokasi penelitian, yakni sistem Kali Cebong-Anjani dan Jumbleng Sawah – Anjani, sistem Gua Semar – Gua Kiskendo, sistem Gua Nguwik – Mata air Mudal. Hasil uji tracer menunjukkan single peak di 3 lokasi penelitian yang mencerminkan bahwa tidak adanya cabang aliran dari lokasi penuangan zat perunut hingga lokasi pemantauan. Karakteristik lain yang mampu dianalisis dari hasil uji tracer antara lain time of first detection, time to peak, maximum concentration, distance, dan peak velocity.

1. Introduction

Sistem hidrologi karst memiliki karakter khusus dengan adanya dominasi proses pembentukan lorong perguaan di bawah permukaan. Proses pelarutan pada bentanglahan karst mengakibatkan minimnya aliran permukaan dan lebih berkembangnya sistem aliran bawah permukaan. Karakteristik aliran bawah permukaan bersifat tidak seragam atau heterogen dan anisotropis yang kemudian diklasifikasikan oleh White (1988) menjadi sistem aliran rembesan (*diffuse*), sistem aliran rekahan (*fissure*), dan sistem aliran lorong (*conduit*). Ford dan Williams

(1989) juga mengemukakan bahwa bentanglahan karst tersusun oleh kombinasi batuan yang mudah larut dan perkembangan porositas sekunder yang tinggi, sehingga sistem hidrologi karst memiliki keistimewaan berupa dominasi proses pembentukan aliran bawah permukaan yang merupakan produk dari proses pelarutan.

Batuan karbonat akan mudah terlarutkan oleh air hujan dan air freatik yang banyak mengandung gas karbondioksida (Bogli, 1980). Bloom (1991) menjelaskan proses pelarutan tersebut dengan persamaan reaksi sebagai berikut :

Dari persamaan reaksi tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin banyak air yang mengandung gas karbondioksida (CO_2) maka akan semakin mudah air tersebut melarutkan batuan karbonat (Adji, 2005; Adji et al 2017).

Sungai Bawah Tanah (SBT) merupakan salah satu hasil bentukan proses pelarutan. Aliran sungai bawah tanah ini jauh lebih berkembang dari pada aliran sungai permukaan pada bentanglahan karst. Terbentuknya sungai bawah tanah tidak terlepas dari terbentuknya gua-gua karst. Palmer (2007) menyebutkan bahwa gua merupakan bentukan rongga kosong di bawah tanah hasil pelarutan batuan yang soluble dengan ukuran yang cukup besar sehingga memungkinkan manusia untuk bisa memasukinya. Keberadaan gua-gua karst yang saling terhubung satu sama lain menjadikannya sebagai sistem perguaan, yang kemudian sistem perguaan ini ketika terisi oleh air maka menghasilkan bentukan sungai bawah tanah dan kadang-kadang keluar ke permukaan sebagai mata air (Kusumayudha, 2005).

Sungai bawahtanah dan mata air yang ada di Kawasan Karst Jonggrangan antara lain SBT Kiskendo, SBT Anjani, dan Mata air Mudal. Sistem sungai bawah tanah ini melewati beberapa gua di Kabupaten Kulon Progo dan Kabupaten Purworejo. Potensi sumberdaya air bawah tanah pada sistem ini tergolong besar serta dimanfaatkan oleh penduduk sekitar sebagai objek wisata. Dari beberapa latar belakang tersebut maka penelitian ini mempunyai tujuan untuk menerapkan uji tracer untuk mengestimasi konektivitas atau jaringan sistem perguaan yang me-recharge SBT Kiskendo, SBT Anjani, dan Mata air Mudal serta mengetahui parameter-parameter kurva hasil uji tracer.

Methods

Metode yang digunakan pada penelitian ini menggunakan metode survey yang terbagi menjadi 3 tahapan, yakni tahap pra-lapangan, tahap lapangan, dan tahap pasca lapangan. Tahap pra-lapangan meliputi pengumpulan data-data sekunder dari penelitian sebelumnya. Tahap lapangan meliputi pemetaan gua dan uji tracer sedangkan tahap pasca lapangan lebih cenderung untuk mengolah data dari tahap lapangan yang diperoleh sebelumnya.

Tahap pertama sebelum melakukan tracer sungai bawahtanah adalah survey lapangan dengan melakukan pemetaan sebaran lokasi mulut gua, ponor, sinking stream dan persebaran mata air. Penuangan zat perunut dilakukan di sinking stream Kali Cebong, sinking stream Kalisetro, dan sinking stream dari aliran persawahan yang kemudian masuk di Luweng Jurang Omah yang diprediksi bahwa aliran permukaan tersebut tertelan menjadi aliran bawah permukaan ini akan muncul kembali di Gua Anjani. Lokasi injeksi yang kedua yang diprediksi menjadi sistem dari Gua Kiskendo adalah aliran sungai bawah tanah di Gua Semar. Aliran sungai bawah tanah di Gua Nguwik menjadi lokasi injeksi ketiga yang diprediksi mengarah ke Mata air Mudal.

Uji tracer merupakan metode yang tepat untuk penyelidikan asal muasal, pergerakan, dan muara dari aliran airtanah tersebut. Metode tracer sangat tepat diaplikasikan di daerah karst. Dalam bidang hidrogeologi, perunut menggunakan bahan yang larut dalam air serta ditandai dengan bahan yang dapat diidentifikasi. Dua jenis bahan perunut yang sering digunakan adalah pewarna fluorescent dan garam. (Benischke, dkk, 2007). Kuantitas zat tracer yang diperlukan menggunakan factor jarak dari titik injeksi sampai dengan lokasi pengamatan (Field 2003 dan Field 2005). Penelitian in

menggunakan 2 macam zat perunut yakni Uranine dan Tinopal. Kedua zat perunut ini aman untuk digunakan (Behrens dkk 2001, Goldscheider dkk 2008, Alammareen 2010).

Zat perunut dituang di 3 sinking stream yakni Kalicebong, Jumbleng Sawah, dan Kalisetro. Ketiga sungai ini diduga menyuplai sungai bawah tanah di Gua Anjani. Aliran bawah tanah di Gua Semar diduga mempunyai konektivitas dengan aliran bawah tanah di Gua Kiskendo. Di lokasi ini dituang zat perunut berupa uranine. Zat perunut uranine juga dituang di Gua Nguwik yang diduga terhubung dengan Mata air Mudal. Penelitian ini menggunakan 2 macam zat perunut yakni Uranine dan Tinopal. Kedua zat perunut ini aman untuk digunakan (Behrens dkk 2001, Goldscheider dkk 2008, Alammareen 2010).

2. Results and Discussion

3.1. The Regional Geology of the Study Area

Sistem aliran bawah tanah Gua Anjani, Gua Kiskendo, dan Mata air Mudal secara geologis terletak di Formasi Karst Jonggrangan. Formasi ini membentang dari utara ke selatan sepanjang kurang lebih 32 km yang merupakan bagian dari Pegunungan Kulon Progo. Pegunungan ini terbentuk karena adanya proses pengangkatan yang terjadi pada Zaman Pleistocene (Bemmelen, 1949). Kajian terkini menunjukkan bahwa pengangkatan yang terjadi di Pegunungan Kulon Progo berkaitan dengan empat formasi gunungapi tersier yang menyusun batuan dasar dari Formasi Jonggrangan, yakni Gunungapi Kukusan, Ijo, Gajah, dan Menoreh (Harjanto, 2011).

Puncak dari Pegunungan Kulon Progo tersusun oleh Formasi Jonggrangan yang ditunjukkan seperti pada Gambar 1. Formasi Jonggrangan tersusun oleh konglomerat, tuffaceous marl, batu pasir dengan sisipan lignite, batu gamping berlapis, dan batu gamping terumbu. Formasi Jonggrangan berada tepat di bawah Formasi Sentolo yang menurut kaidah superposisi bahwa formasi yang terletak di bawahnya berumur lebih tua. Stratigrafi regional Kulon Progo menurut kaidah tersebut adalah Formasi Nanggulan, Formasi Andesit Tua, Formasi Jonggrangan, dan Formasi Sentolo (Titisari dan Warmada, 2005). Ketebalan Formasi Jonggrangan adalah sekitar 250 meter (Raharjo et al, 1977 dalam Hidayah 2007). Selanjutnya, peta daerah kajian, daerah tangkapan masing-masing mataair dan sungai bawah tanah, serta arah sistem sungai bawah tanah yang diperoleh dari hasil dari uji tracer ditunjukkan seperti pada Gambar 2,3, dan 4.

Figure 1. The Sketch of Kulonprogo Mountains [11, 12]

3.2. Tracer Test Result

Gua Anjani secara administratif berada di Desa Tlogoguwo, Kecamatan Kaligesing, Kabupaten Purworejo, Jawa Tengah. Gua Anjani berada pada koordinat 402476 mT dan 9145281 mU.

Entrance gua ini berada di tebing dengan diameter 1,2 meter. Karakteristik lorong gua ini bervariasi dengan dua kondisi berbeda, yakni lorong berair dan lorong kering.

Gambar 2. Peta konektivitas sistem aliran bawah tanah Gua Anjani

Gambar 3. Peta konektivitas sistem aliran bawah tanah Gua Kiskendo

Gambar 3. Peta konektivitas sistem aliran bawah tanah Mata air Mudal

Uji tracer dilakukan dengan menuang zat perunut berupa uranine dan tinopal di sinking stream Kalicebong, Jumbleng Sawah, dan Kalisetro. Hasil dari uji tracer menunjukkan hasil positif yakni terdapat konektivitas aliran dari ketiga lokasi injeksi tersebut. Hasil dari uji tracer sistem Gua Anjani ini menunjukkan single peak yang menandakan tidak adanya pemecah aliran dari titik injeksi sampai titik pengamatan serta karakteristik lorongnya berupa *single conduit*.

Uji tracer yang pertama dilakukan pada tanggal 28 April 2018 sampai dengan 1 Mei 2018 dengan lokasi injeksi di Kalicebong menggunakan zat perunut uranine dan di Jumbleng Sawah menggunakan zat perunut tinopal. Uji tracer yang kedua dilakukan pada tanggal 13 sampai dengan 15 April 2019 dengan lokasi injeksi di Kalisetro menggunakan zat perunut tinopal. Berdasarkan uji tracer yang pertama diketahui bahwa puncak konsentrasi uranine sebesar 221 ppb yang terdeteksi pada 28 April 2018 pukul 17.00 WIB, sedangkan puncak konsentrasi tinopal terdeteksi pada 29 April 2018 pukul 04.00 WIB sebesar 212,93 ppb. Time to peak (Tp) zat uranine adalah 155 menit, sedangkan Tp zat tinopal 210 menit. Hasil uji tracer kedua menggunakan zat perunut tinopal yang diinjeksikan di Kalisetro pada tanggal 13 April 2019 pukul 11.30 WIB. Puncak konsentrasi tinopal sebesar 1202,5 ppb dijumpai pada pukul 17.45 WIB atau sekitar 375 menit setelah injeksi tinopal. Selanjutnya, *breakthrough curve* dari hasil uji tracer di sistem Gua Anjani ditunjukkan pada Table 1.

Gua Kiskendo berada di Kecamatan Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo dengan koordinat mulut gua 404204 mT dan 9143500 mU. Gua ini memiliki beberapa cabang sistem perguaan yang saling terhubung pelorongannya dari barat ke timur yakni meliputi Jumbleng Silodho, Jumbleng Tengah, Jumbleng Sanyar, Jumbleng Kemejing, Jumbleng Semelong, Gua Kiskendo Atas, Gua Kiskendo Bawah, dan Gua Soemitro (Surawan, 2010). Gua Semar dengan koordinat mulut gua 403800 mT dan 9143697 mU memiliki panjang lorong mencapai 158,2 meter, serta terdapat aliran bawahtanah yang masuk ke lorong yang sudah tidak dapat ditelusuri lagi (sump). Uji tracer dilakukan di sump Gua Semar dengan menggunakan zat perunut berupa uranine. Hasil dari uji tracer ini menunjukkan adanya konektivitas aliran dari Gua Semar dengan Gua Kiskendo.

Uji tracer di sistem Gua Kiskendo dilakukan pada tanggal 30 Agustus 2018 dan pemantauan resesinya dilakukan sampai dengan tanggal 4 Juli 2018. Hasil uji tracer menunjukkan konektivitas antara aliran bawahtanah dari Gua Semar menuju Gua Kiskendo. Puncak konsentrasi uranine tertinggi di Gua Kiskendo tercatat pada tanggal 30 Juni 2018 (20.05 WIB) dengan konsentrasi 138,05 ppb. Penuangan uranine di Gua Semar dilakukan pada tanggal 30 Juni 2018 jam 13.00 WIB. Time to peak (Tp) yang terekam pada fluorometer tergolong cepat dengan waktu tempuh sekitar 7 jam. Hidrokemograf uji tracer menunjukkan bahwa konsentrasi uranine mengalami periode resesi sampai dengan tanggal 4 Juli 2018 (11.45 WIB). Hasil dari uji tracer ini menunjukkan kurva yang bersifat single peak yang mengindikasikan bahwa sistem pelorongan antara Gua Semar-Kiskendo berupa single conduit tanpa adanya cabang aliran. Kurva hasil uji tracer sistem Gua Kiskendo ditunjukkan pada Gambar 5.

Tabel 1. Kurva hasil uji tracer sistem Gua Anjani

No.	Injection Point	Dye Tracer	Breakthrough Curve
1	Sinking stream Kalicebong	Uranine
2	Sinking stream Jumbleng Sawah	Tinopal
3	Sinking stream Kalisetro	Tinopal

Sumber : hasil pengolahan data (2019)

Mata air Mudal secara administratif terletak di Kecamatan Girimulyo, Kabupaten Kulon Progo dengan koordinat 402501 mT dan 9141934 mU. Mata air ini bertipe resurgence, yakni tipe mata

air yang alirannya berasal dari aliran bawah tanah yang kemudian muncul menjadi aliran permukaan. Berdasarkan periode pengalirannya, mata air ini merupakan mata air perenial atau mengalir terus sepanjang tahun. Ponor-ponor yang berada di sekitar Mata air Mudal antara lain Jumbleng Sapi Mati, Jumbleng Sigendhol, Jumbleng Sepeti, dan Pledangan. Gua berair yang berada di sekitar Mata air Mudal adalah Gua Nguwik yang secara administratif masuk di wilayah Kabupaten Purworejo. Aliran bawah tanah yang ada di Gua Nguwik ini kemudian masuk ke sump yang kemudian dilakukan uji tracer pada titik ini dengan menggunakan zat perunut berupa uranine.

Injeksi zat perunut uranine dilakukan pada tanggal 16 Juli 2018 yang sebelumnya telah dipasang alat pendeteksi zat perunut berupa fluorometer FL30 di Mata air Mudal. Berdasarkan hasil uji tracer ini menunjukkan konektivitas antara Gua Nguwik dan Mataair Mudal. Hidrokemograf uji tracer pada sistem ini menunjukkan single peak yang artinya tidak dijumpai adanya percabangan aliran yang berarti sistem yang ada merupakan single conduit antara Gua Nguwik dan Mata air Mudal.

Gambar 5. Kurva hasil uji tracer di sistem aliran bawah tanah Gua Kiskendo

Puncak konsentrasi uranine terjadi pada tanggal 22 Juli 2018 kurang lebih pada pukul 09.00 WIB sebesar 138,82 ppb. Kemunculan uranine sudah mulai terlihat yang ditandai dengan adanya kenaikan konsentrasi sejak tanggal 21 Juli 2018 pukul 24.00 WIB. Fluorometer yang dipasang di Mata air Mudal dilepas pada tanggal 31 Juli 2018 pukul 07.15 WIB yang menunjukkan tahap resesi konsentrasi uranine sudah selesai dengan ciri warna air sudah jernih kembali seperti semula. Secara ringkas karakteristik hasil uji tracer di daerah penelitian disajikan pada Tabel 2, 3, dan 4.

Gambar 6. Kurva hasil uji tracer di sistem aliran bawah tanah Mata air Mudal

Tabel 2. Karakteristik hasil uji tracer sistem Gua Anjani

Injection	Injection point code	Unit	IP-1	IP-2	IP-3	IP-4	IP-5
	Dye tracer		Uranine	Tinopal	Tinopal	Uranine	Uranine
	Quantity (gr)		400	300	400	80	500
	Injection location		Sinking stream Kali Cebong	Sinking stream Jumbleng Sawah	Sinking stream Kalisetro	SBT Gua Semar	SBT Gua Nguwik
	Name						
Observation point	Parameter						
OP-1 (Anjani Cave)	Time of first detection	minute	180	655	305		
	Time to peak	minute	155	210	95		
	Max concentration	ppb	221	212.93	1202.5		
	Distance	meter	611	853	605		
	Peak velocity	m/ minute	3.94	4.06	6.37		
	R ²	-	0.8	0.89	0.88		

Tabel 3. Karakteristik hasil uji tracer sistem Gua Kiskendo

Injection	Injection point code		IP-1	IP-2	IP-3	IP-4	IP-5
	Dye tracer		Uranine	Tinopal	Tinopal	Uranine	Uranine
	Quantity (gr)		400	300	400	80	500
	Injection location		Sinking stream Kali Cebong	Sinking stream Jumbleng Sawah	Sinking stream Kalisetro	SBT Gua Semar	SBT Gua Nguwik
	Name						
Observation point	Parameter	Unit					
OP-2 (Kiskendo Cave)	Time of first detection	minute				315	
	Time to peak	minute				245	
	Max concentration	ppb				138.05	
	Distance	meter				448	
	Peak velocity	m/ minute				1.83	
	R ²	-				0.98	

Tabel 4. Karakteristik hasil uji tracer sistem Mata air Mudal

Injection	Injection point code		IP-1	IP-2	IP-3	IP-4	IP-5
	Dye tracer		Uranine	Tinopal	Tinopal	Uranine	Uranine
	Quantity (gr)		400	300	400	80	500
	Injection location		Sinking stream Kali Cebong	Sinking stream Jumbleng Sawah	Sinking stream Kalisetro	SBT Gua Semar	SBT Gua Nguwik
	Name						
Observation point	Parameter	minute					
OP-3 (Mudal Spring)	Time of first detection	minute					7200
	Time to peak	ppb					540
	Max concentration	meter					138.82
	Distance	m/ minute					584
	Peak velocity	minute					1.08
	R ²	-					0.95

Conclusions

Sistem aliran bawah permukaan di kawasan karst Jonggrangan yang dapat diestimasi dari tracer test adalah: (1) sistem Kalicebong-Gua Anjani; (2) sistem Jumbleng Sawah-Gua Anjani; (3) sistem Kalisetro-Gua Anjani; (4) sistem Gua Semar-Gua Kiskendo; dan (5) dan sistem Gua Nguwik-Mata air Mudal. Berdasarkan hasil uji tracer, karakteristik pelorongan yang ditemukan pada kelima sistem aliran sungai bawah tanah tersebut, menunjukkan tipe single conduit yang ditunjukkan dari breakthrough curve berupa single peak.

Acknowledgment

This research was supported by the RTA Research Grant Universitas Gadjah Mada with a contract number of 3069/ UN1/DITLIT/DIT-LIT/LT/2019. Authors also would like to thank those who directly or indirectly contributed to this research, especially when collecting field data.

References

- [1] White, W. B. 1988. *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York: Oxford University Press.
- [2] Ford, D and Williams, P. 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. London: Chapman and Hall.
- [3] Bogli, A. 1980. *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Berlin: Springer-Verlag.
- [4] Bloom, A.L. 1991. *Geomorphology : A systematic analysis of late Cenozoic landform*, ed. 2. New Jersey: Prentice Hall.
- [5] Adj, T.N. 2005. Agresivitas airtanah karst Sungai Bawah Tanah Bribin Gunungsewu. Yogyakarta : Gunungsewu-Indonesia Cave and Karst Journal (Vol:1 – April 2005).
- [6] Adj, T.N., Haryono, E., Fatchurohman, H., Oktama, R, 2017, Spatial and temporal hydrochemistry variations of karst water in Gunung Sewu, Java, Indonesia, *Environmental Earth Sciences*, 76:709
- [7] Palmer, A.N. 2007. *Cave Geology*. USA: Allen Press.
- [8] Kusumayudha, S.B. 2005. *Hidrogeologi Karst dan Geometri Fraktal Daerah Gunungsewu*. Yogyakarta: Adicita Karya Nusa.
- [9] Benischke, R., Goldsneider, N., dan Smart, C. 2007. Tracer Techniques. dalam Goldsneider, N., dan Drew, D (eds). 2007. *Methods in Karst Hydrogeology*. London: Taylor & Francis Group.
- [10] 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.
- [11] Field, M.S. 2005. Tracer-Test Design for Losing Stream-Aquifer Systems. *International Journal of Speleology*, 35(1): 25-36.
- [12] 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
- [13] Goldscheider N., Meiman J., Pronk M., Smart C. 2008. Tracer tests in karst hydrogeology and speleology. *International Journal of Speleology*, 37 (1), 27-40.
- [14] Alammareen, A.M. 2010. *Groundwater Exploration in Karst Examples for Shallow Aquifers Using Microgravity Technique in Paderborn-Germany and the Reconnaissance of Deep Aquifers in Catchment of Barada Spring-Syria*. Disertasi. Berlin: Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt der Technischen Universität Berlin.
- [15] Bemmelen, R.,W,V. (1949), *The Geology of Indonesia*, The Hague : Goverment Printing Office
- [16] Harjanto, A. 2011. Vulkanostratigrafi di Daerah Kulon Progo dan Sekitarnya, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Jurnal Ilmiah MTG*, 4(2).
- [17] Titisari dan Warmada. 2005. Genesa Batugamping Merah Muda di Daerah Klepu, Kecamatan Kokap, Kabupaten Kulon Progo, Yogyakarta. *Jurnal Media Teknik*, No. 4, November 2005 No. ISSN 0216-3012
- [18] Hidayah, H. 2007. Potensi mata air untuk kebutuhan air minum penduduk di Kawasan Karst Jonggrangan. Skripsi. Yogyakarta: Fakultas Geografi UGM.
- [19] Surawan C. 2010. Kajian speleogenesis dan karakteristik morfologi lorong perguruan Kiskendo-Soemitro Kabupaten Kulonprogo, Undergraduate Thesis in Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Indonesia.