Variasi Temporal Hidrogeokimia Sungai Bawah Tanah (SBT) Anjani, Karst Jonggrangan, Java Island, Indonesia

Aji Dwi Pratama, Tjahyo Nugroho Adji¹, Dicky Satria Dwiputra¹

¹Karst Research Group, Environmental Geography Department, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Indonesia

Email: dwi.pratama@mail.ugm.ac.id

Abstract. Gua Anjani merupakan salah satu bagian dari kawasan karst Jonggrangan yang memiliki peran penting bagi masyarakat. Underground river yang mengalir melewati gua ini dimanfaatkan oleh masyarakat sekitar untuk memenuhi kebutuhan sehari-hari. Karakterisasi akuifer perlu dilakukan untuk menunjang pengelolaan sumberdaya air yang berkelanjutan di SBT Gua Anjani. Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan variasi temporal kondisi hidrogeokimia yang selanjutnya diharapkan dapat membantu mendefinisikan secara lebih detail terkait kondisi akuifer yang me-recharge Anjani underground river. Pengambilan sampel di underground river dilakukan selama satu tahun mencakup musim kemarau dan penghujan, serta saat flood-events. Analisis hidrokimia dilakukan berdasarkan data konsentrasi ion mayor yang terlarut dalam air dan sifat fisik-kimia air. Selain itu, SI kalsit dan log PCO_2 dihitung untuk melihat variasi temporal agresivitas terhadap mineral kalsit. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semua sampel air memiliki tipe HCO_3-Ca . Chemical constituent in water bervariasi secara temporal, yang menunjukkan konsentrasi tinggi ketika musim kemarau dan menurun ketika musim penghujan. Tingginya kandungan kimia ketika musim kemarau disebabkan underground river didominasi oleh slow-flow (diffuse), sehingga air memiliki waktu tinggal yang lama dalam akuifer. Hal ini memungkinkan water-rock interaction terjadi lebih intensif. Sementara itu, kandungan kimia yang rendah ketika musim penghujan disebabkan karena masukan dari quick-flow yang merubah water-rock interaction menuju proses dilution by precipitation. Secara umum, air di underground river bersifat saturated sepanjang tahun, sedangkan sample saat flood-events menunjukkan sifat agresif untuk melarutkan batugamping. Hal ini salah satunya dipengaruhi oleh suplai CO_2 dari sungai alogenis yang merecharge Anjani underground river, sehingga memungkinkan terjadinya proses pelarutan lebih intensif.

1. Introduction

Bentuklahan karst merupakan bentuklahan yang terjadi akibat proses pelarutan pada batuan yang mempunyai sifat mudah larut [1] yang dicirikan dengan kenampakan bentuklahan dan kondisi hidrologi yang unik [2]. Bentuklahan karst tersebar secara luas di berbagai benua, dan menempati 10-15% total luas area daratan di bumi [2]. Sebagai akuifer [3], karst menyimpan potensi sumberdaya airtanah yang melimpah. Akan tetapi, di sisi lain akuifer karst juga dinilai rentan terhadap pencemaran dan terdampak berbagai macam aktivitas manusia [4]. Selain itu, akuifer

karst dikenal memiliki sifat heterogen-anisotropis yang membedakannya dengan akuifer pada formasi batuan lain, sehingga menyebabkan kondisi hidrogeologi akuifer karst bersifat kompleks.

Pengelolaan sumberdaya air karst yang berkelanjutan memerlukan pemahaman mengenai karakteristik sistem karst [5]. Ahli hidrogeologi karst menerapkan beberapa metode untuk mempelajari akuifer karst, di antaranya adalah karakterisasi struktur dengan pendekatan geologi dan geomorfologi, delineasi sistem karst dengan pemetaan geologi, *tracer test*, dan neraca air, karakterisasi akuifer secara hidrodinamika dan hidrogeokimia [13], dan karakterisasi sifat lokal dengan *tracer test* buatan dan *pumping test* [3]. Pendekatan hidrogeokimia menyediakan informasi yang signifikan dalam karakterisasi sistem akuifer karst, dan bersifat melengkapi deskripsi perkembangan akuifer karst yang dilihat dari aspek sifat alirannya [6].

Penelitian ini dilakukan di Anjani underground river yang merupakan bagian dari Karst Jonggrangan, Kabupaten Purworejo, Central Java. Gua Anjani memiliki arti penting bagi masyarakat sekitar, yakni sebagai penyedia sumberdaya air bagi masyarakat. Tujuan dari penelitian ini adalah: (1) mengetahui variasi temporal kandungan kimia Anjani underground river, dan (2) mengetahui hubungan antara kandungan kimia dengan debit aliran Anjani underground river untuk membantu mengkarakterisasi kondisi akuifernya.

2. Methodology

2.1. Research Location

Karst Jonggrangan memiliki total luas 17,6 km² dan terletak di perbatasan antara Kabupaten Kulonprogo, DIY dan Purworejo, Jawa Tengah. Secara fisiografi, Karst Jonggrangan terletak di bagian puncak Pegunungan Kulonprogo. Karst Jonggrangan secara geologi terletak di Formasi Jonggrangan yang terdiri dari konglomerat, napal tufan, dan batupasir gampingan dengan sisipan lignit pada bagian bawah. Menurut [7], batugamping Karst Jonggrangan diendapkan pada fase susut laut pada lingkungan zona tidal hingga laut terbuka.

Lokasinya yang berada di puncak Pegunungan Kulonprogo menjadikan Karst Jonggrangan memiliki curah hujan tinggi. Data curah hujan selama tahun 2008-2017 di stasiun hujan Kecamatan Kaligesing menunjukkan bahwa rerata curah hujan tahunan sebesar 2563 mm. Sementara itu, rerata suhu bulanan di Karst Jonggrangan adalah 24,1 °C.

Gua Anjani terletak di bagian barat laut Karst Jonggrangan, dan secara administratif terletak di Desa Tlogoguwo, Kecamatan Kaligesing, Kabupaten Purworejo, Provinsi JawaTengah (**Figure 1**). Anjani underground river direcharge oleh tiga sungai allojenik, yakni Jumbleng Sawah, Kali Cebong, dan Kali Setro [14]. Anjani underground river selanjutnya keluar sebagai air terjun di Mataair Anjani yang terletak di sebelah barat daya dari Gua Anjani. Perhitungan luas daerah tangkapan air berdasarkan neraca air yang telah dilakukan menunjukkan bahwa luas catchment Anjani underground river adalah 3,69 km² [15].

2.2. Method

Data pada penelitian ini dikumpulkan selama satu tahun (Maret 2018 - Maret 2019) untuk mengakomodasi kondisi aliran ketika musim kemarau dan musim penghujan. Data yang dikumpulkan meliputi data tinggi muka air, debit aliran, konsentrasi ion mayor (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻), dan sifat fisik-kimia air (pH, DHL, TDS, dan suhu).

Data tinggi muka air di Anjani underground river dicatat secara otomatis dengan automatic water level logger (HOBO U-20L) dengan interval pencatatan setiap 15 menit. Pengukuran debit dilakukan sebanyak 10 kali dengan metode *velocity area*, adapun kecepatan aliran diukur dengan *current meter* dan pelampung. Data debit aliran yang telah dikumpulkan diolah menjadi stage-discharge rating curve untuk mendapatkan rumus hubungan tinggi muka air dengan debit aliran. Rumus yang telah didapatkan selanjutnya diaplikasikan pada data tinggi muka air yang telah

dicatat oleh logger sehingga didapatkan hidrograf aliran SBT Gua Anjani selama periode penelitian.

Figure 1. Peta Lokasi Gua Anjani

Data kimia air didapatkan melalui pengambilan sampel air dengan interval setiap satu bulan ketika musim kemarau dan setiap dua minggu ketika musim penghujan. Pengambilan sampel juga dilakukan ketika kejadian banjir dengan interval setiap 2 jam untuk menggambarkan respon akuifer terhadap perubahan kondisi aliran secara lebih detail. Konsentrasi Ca^{2+} dan HCO_3^- diukur secara langsung di lapangan dengan cara titrasi menggunakan alat *Calcium Test Kit* dan *Alkalinity Test Kit*, sedangkan konsentrasi Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , dan SO_4^{2-} dianalisis di laboratorium. Konsentrasi Mg^{2+} dan Cl^- diketahui melalui analisis volumetri. Konsentrasi Na^+ dan K^+ diketahui melalui analisis colorimetri, sedangkan konsentrasi SO_4^{2-} diketahui melalui analisis turbidimetri. Selain itu, dihitung pula nilai indeks kejenuhan terhadap mineral kalsit (SI kalsit) dan tekanan parsial gas CO_2 (PCO_2) menggunakan bantuan software PHREEQC [5]. Indeks kejenuhan kalsit dirumuskan dengan:

$$\text{SIc} = \log ((\text{Ca}^{2+})(\text{CO}_3^{2-})/\text{Kc}) \quad (1)$$

dimana SIc adalah indeks kejenuhan kalsit, Ca^{2+} adalah konsentrasi Ca^{2+} dalam air, CO_3^{2-} adalah konsentrasi CO_3^{2-} dalam air, dan Kc adalah konstanta ekuilibrium untuk pelarutan. Sementara itu, tekanan parsial gas CO_2 dirumuskan dengan:

$$\text{PCO}_2 = \frac{[\text{HCO}_3^-][\text{H}^+]}{\text{K}_1 \cdot \text{KCO}_2} \quad (2)$$

dimana PCO_2 adalah tekanan parsial gas CO_2 dalam air, $[HCO_3^-]$ adalah aktivitas ion bikarbonat, $[H^+]$ adalah aktivitas ion hydrogen, K_1 adalah kesetimbangan konstanta reaksi pelarutan pada suhu $25^\circ C$, dan KCO_2 adalah kesetimbangan konstan gas CO_2 di dalam air. Selanjutnya, interpretasi kemograf juga dilakukan untuk menjabarkan variasi temporal kondisi hidrogeokimia.

3. Results and discussion

3.1. Stage-Discharge Rating Curve dan Hidrograf Aliran

Stage-discharge rating curve di Anjani underground river ditunjukkan pada **Figure 2**. TMA dan debit aliran memiliki korelasi yang tinggi, ditunjukkan dengan nilai R^2 sebesar 0.9668. Persamaan tersebut dituliskan sebagai berikut:

$$Discharge = 1131.8(Stage) - 45.013 \quad (3)$$

Figure 2. Stage-discharge rating curve di Anjani underground river

Figure 3 menunjukkan hidrograf aliran Gua Anjani selama periode penelitian. Fluktuasi debit di Anjani underground river cukup tinggi, yang menunjukkan debit terendah 43,27 liter/detik, sedangkan debit tertinggi mencapai 1441,04 liter/detik. Musim kemarau terjadi pada bulan Maret hingga Oktober 2018 sedangkan musim penghujan terjadi dari bulan Oktober 2018 hingga Maret 2019 yang ditandai dengan beberapa flood events.

Figure 3. Discharge hidrograph of Anjani underground river (March 2018 - March 2019)

3.2. Hydrochemistry of Anjani underground river

Selama periode penelitian, semua sampel (24 samples) yang dianalisis menunjukkan kisaran pH yang cenderung netral hingga basa (6,7-8,1 dengan rerata 7,4). Sementara itu, TDS dan fluid conductivity (EC) memiliki fluktuasi yang cukup besar, yaitu masing masing 205-429 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (rerata 292 $\mu\text{S}/\text{cm}$) dan 103-213 ppm (rerata 145 ppm). Sementara itu, suhu air menunjukkan fluktuasi yang kecil yaitu 22,6-23,9 $^{\circ}\text{C}$.

Kation mayor dengan konsentrasi terbesar secara berturut-turut adalah $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^{+} > \text{K}^{+}$. Konsentrasi Ca^{2+} memiliki rentang antara 50-104 dengan rerata 73 mg/l, konsentrasi Mg^{2+} antara 2,42-13,61 dengan rerata 6,93 mg/l, konsentrasi Na^{+} antara 5-11 dengan rerata 8 mg/l, dan K^{+} antara 1-5 dengan rerata 2 mg/l. Sementara itu, urutan anion mayor dengan konsentrasi paling besar hingga terkecil adalah $\text{HCO}_3^{-} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^{-}$. Konsentrasi HCO_3^{-} memiliki rentang antara 164,75-307,5 dengan rerata 215,74 mg/l, konsentrasi SO_4^{2-} antara 7,3-8,1 dengan rerata 7,7 mg/l, dan Cl^{-} memiliki rentang antara 2-5,5 dengan rerata 3,6 mg/l. Semua sampel memiliki nilai Saturation Indices (SI) with respect to calcite mineral yang positif dan log PCO_2 yang negatif, kecuali saat kejadian banjir. SI kalsit memiliki rentang antara -0,63-1,09 dengan rerata 0,23. Sementara itu, nilai log PCO_2 memiliki rentang antara -2,53 - -1,29 dengan rerata -2,3. Konsentrasi ion mayor dari 24 sampel air SBT Gua Anjani diplot pada Diagram Piper untuk menunjukkan tipe kimia airtanah. Semua sampel memiliki tipe kimia airtanah sama, yakni tipe $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (**Figure 4**).

Figure 4. Piper Diagram of Anjani underground river

3.3. Variasi Temporal Hidrogeokimia

Kemograf di Anjani underground river selama periode penelitian ditunjukkan pada **Figure 5**. TDS, EC, Ca^{2+} , HCO_3^{-} , dan $\text{SI}_{\text{calcite}}$ cenderung menunjukkan nilai yang tinggi pada musim kemarau dan rendah pada musim penghujan. Sementara itu, suhu, pH, dan PCO_2 menunjukkan nilai yang

rendah pada musim kemarau dan cenderung tinggi pada musim penghujan. TDS, EC, pH, Ca^{2+} , HCO_3^- , dan $\text{SI}_{\text{calcite}}$ memiliki hubungan yang berbanding terbalik dengan debit, sehingga ketika musim kemarau memiliki nilai yang tinggi. Sebaliknya, suhu dan $\log \text{PCO}_2$ menunjukkan hubungan yang berbanding lurus dengan debit, sehingga nilainya rendah pada musim kemarau.

Kondisi kimia dari akuifer merupakan fungsi dari *residence time* (waktu tinggal) dan kondisi aliran [8]. Ketika kondisi *low water*/musim kemarau air cenderung bergerak lebih lambat dibandingkan ketika *high water*/ musim penghujan, kondisi aliran yang cepat mengurangi durasi kontak (waktu tinggal singkat) antara air dengan batuan, sehingga kandungan kimia menjadi rendah [9]. Konsentrasi ion terlarut yang tinggi pada musim kemarau dikarenakan proses yang dominan dalam akuifer adalah water-rock interaction, yang menyebabkan banyaknya jumlah ion yang terlarut dalam air. Sementara itu, konsentrasi yang rendah pada musim penghujan dikarenakan adanya proses dilution by precipitation, sehingga menurunkan konsentrasi ion terlarut dalam air [10]. Dominasi proses water-rock interaction ketika musim kemarau ini buktikan oleh nilai SI kalsit yang tinggi ketika musim kemarau, di mana hal ini menunjukkan bahwa proses pelarutan telah intensif terjadi di dalam akuifer, sehingga ketika air sampai di lokasi pengambilan sampel, maka kondisinya telah jenuh terhadap kalsit. Perbedaan kandungan kimia menurut musim ini juga dikarenakan adanya perbedaan durasi kontak antara air dan batuan. Lebih jauh, hal ini menunjukkan bahwa akuifer Anjani underground river telah mengalami perkembangan, sehingga memungkinkan terjadinya perbedaan durasi kontak air-batuan melalui mekanisme kecepatan aliran yang berbeda. Ketika musim hujan, air yang dilalukan melalui rekahan conduit akan mengalami kontak dengan batuan yang singkat, sehingga batuan belum sempat mengubah komposisi kimia air, menyebabkan kandungan kimia yang rendah pada air.

Pengambilan sampel juga dilakukan pada kejadian banjir 22-23 Januari 2019. Konsentrasi Ca^{2+} dan HCO_3^- menunjukkan pola yang jelas terhadap water level, sedangkan pH dan DHL menunjukkan pola yang jelas pada awal pengambilan sampel tetapi berfluktuasi pada akhir pengambilan sampel (**Figure 6**). Konsentrasi Ca^{2+} , HCO_3^- , dan DHL mengalami kenaikan pada awal kejadian banjir, mengindikasikan adanya air lama yang terdorong keluar oleh air hujan yang terinfiltrasi (piston effect) [2][4]. Hal ini terjadi karena adanya ketidakseimbangan antara kinetika pelarutan dengan kecepatan aliran, yaitu aliran air yang terlalu cepat ketika terjadi banjir menyebabkan air tidak mampu mencapai kesetimbangan termodinamika [11].

Pada periode banjir, Ca^{2+} dan HCO_3^- mengalami penurunan konsentrasi, yang menunjukkan tibanya air hujan pada titik pengambilan sampel. Kemudian, Ca^{2+} dan HCO_3^- mengalami kenaikan hingga akhir pengambilan sampel, hal ini kemungkinan dikarenakan proses pelarutan yang telah terjadi karena adanya supai CO_2 sehingga konsentrasi terus mengalami kenaikan atau karena periode resesi yang secara perlahan-lahan kembali didominasi oleh simpanan diffuse. Sementara itu, pola EC dan pH yang fluktuatif pada tengah hingga akhir pengambilan sampel kemungkinan dipengaruhi oleh pengaruh dari sinking stream (allogenic) yang merecharge Anjani underground river. EC dan pH yang mengalami fluktuasi mengindikasikan waktu datangnya air dari masing-masing sinking stream yang berbeda-beda. Ketiga sinking stream merupakan sungai permukaan dengan karakteristik yang berbeda, sehingga mungkin memiliki waktu konsentrasi aliran yang berbeda pula.

Figure 5. Kemograf Anjani underground river (Maret 2018-Maret 2019)

Figure 6. Chemograph during flood events at Anjani underground river

3.4. Water aggressivity with respect to calcite mineral

Agresivitas air dalam melarutkan mineral kalsit yang ditunjukkan oleh nilai SI_{calcite} di Anjani underground river selama periode penelitian ditunjukkan pada **Figure 7**. Airtanah bersifat agresif terhadap mineral kalsit ketika berada pada kondisi tidak jenuh ($SI_{\text{calcite}} < 0$), sebaliknya, air bersifat tidak agresif ketika air berada pada kondisi jenuh ($SI_{\text{calcite}} > 0$) [12]. Semua sampel menunjukkan keadaan yang telah jenuh (*saturated*) terhadap kalsit ($SI_{\text{calcite}} > 0$) kecuali ketika kejadian banjir. Secara temporal, nilai SI_{calcite} menunjukkan trend kenaikan ketika memasuki musim kemarau, dan mengalami penurunan dan berfluktuasi ketika penghujan. Adanya fluktuasi ini bergantung pada adanya kejadian hujan. Nilai SI_{calcite} yang mayoritas telah jenuh menunjukkan pelarutan telah terjadi intensif pada bagian dalam akuifer, sehingga ketika air sampai pada lokasi pengambilan sampel, maka kondisinya telah jenuh (*saturated*) terhadap kalsit dan air tidak lagi bersifat agresif.

Figure 7. Grafik SI kalsit SBT Gua Anjani Periode Maret 2018-Maret 2019

Selanjutnya, variasi temporal nilai $\log PCO_2$ di Anjani underground river selama periode penelitian ditunjukkan pada **Figure 8**. $\log PCO_2$ juga mengalami pola fluktuasi yang dikontrol oleh musim, akan tetapi hubungannya berkebalikan dengan SI_{calcite} . $\log PCO_2$ menunjukkan nilai yang tinggi ketika musim penghujan dan menunjukkan nilai yang rendah ketika musim kemarau. Nilai yang tinggi ketika musim penghujan ini disebabkan oleh adanya suplai CO_2 dari air hujan.

Kejadian banjir tanggal 22-23 Januari 2019 menunjukkan nilai SI kalsit paling rendah (*undersaturated*) dan $\log PCO_2$ yang paling tinggi selama periode penelitian. SI kalsit yang berada dalam keadaan undersaturated ini menunjukkan bahwa air masih bersifat agresif untuk melarutkan

mineral kalsit. Hal ini dipengaruhi oleh suplai CO_2 yang dibawa oleh air hujan ketika terjadi banjir, sehingga memungkinkan terjadinya reaksi pelarutan kalsit.

Figure 8. Variasi temporal log PCO_2 di Anjani underground river (Maret 2018-Maret 2019)

4. Conclusions

Kondisi hidrogeokimia di Anjani underground river mengalami variasi secara temporal. Kandungan ion-ion terlarut dalam air cenderung tinggi ketika musim kemarau dan rendah ketika musim penghujan. Hal ini disebabkan adanya dominasi aliran lambat (slowflow) ketika musim kemarau, yang menyebabkan air mengalami durasi kontak yang lama dengan batuan (proses water-rock interaction dominan), sehingga terjadi kesetimbangan air dengan batuan di sekitarnya. Sebaliknya, rendahnya kandungan kimia ketika musim penghujan dikarenakan adanya masukan air yang bergerak secara cepat (quickflow) melalui lorong conduit yang menyebabkan durasi kontak air dengan batuan menjadi singkat. Akibatnya, batuan tidak sempat mengubah komposisi kimia air. Selain itu, penambahan volume air yang masuk saat flood events ke dalam akuifer juga menyebabkan adanya proses pengenceran sehingga menurunkan konsentrasi kimia dalam air (proses dilution by precipitation dominan).

Acknowledgments

Finalization of the study was made possible by funding from RTA Grant (contract number 3069/UN1/DITLIT/DIT-LIT/ LT/2019). Authors also thanked the Faculty of Geography, Gadjah Mada University for the support of facilities to conduct this research both in the preparation, field and writing stages. The authors would like to thank Wisnu Agung Waskito, Hamzah Fatoni, Ikhwan Arbi Kurniawan, and Lili Ismangil for collecting the field monitoring data. In addition, we also thank the residents of Tlogoguwo Village, Begelen sub-district, Purworejo for their support and assistance during field data collection.

References

- [1] Verstappen, H.T. 1983. Applied Geomorphology. Amsterdam: Elsevier
- [2] Ford D. & Williams, P. 2007. Karst Geomorphology and Hydrology. London: Chapman and Hall.7
- [3] Bakalowicz, M. 2005. Karst Groundwater: A New Challenge for New Resources
- [4] Drew, D. & Hötzl, H. 1999. Karst Hydrogeology and Human Activities. Impacts, Consequences and Implications. International Contributions to Hydrogeology, 20, 322
- [5] Sheffer, N. A., E. Dafny, H. Gvirtzman, S. Navon, A. Frumkin, & E. Morin. 2010. Hydrometeorological Daily Recharge Assessment Model (DREAM) for the Western Mountain Aquifer, Israel: Model Application and Effects of Temporal Patterns. Water Resources, 46, W05510, doi:10.1029/2008WR007607
- [6] Goldscheider, N & Drew, D. 2007. Methods in Karst Hydrogeology. London: Taylor and

Francis

- [7] Rahardjo, W., Rumidi S., Rosidi H.M.D., 1977, *Geological map of the Yogyakarta Quadrangle, Java*, skala 1:100.000, Geological Survey of Indonesia, 1-15.
- [8] Appelo, C.A.J. & Postma, D. 2005. *Geochemistry, Groundwater and Pollution* 2nd Edition. Leiden: A.A. Balkema. (Freeze dan Cherry, 1979; Petalas, 2017)
- [9] Bogli. 1980. *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Verlag: Springer
- [10] Lecomte, K. L., Bicalho, B. C., & Silva-Filho, E. V. 2016. Geochemical Characterization in Karst Basin Tributaries of The San Franciscan Depression: The Corrente River, Western Bahia, NE-Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 69, 119-130.
- [11] Plagnes, V. & 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. Besançon: Franche-Comté University, 293-298.
- [12] Adji, T. N., Haryono, E., Fatchurohman, H., & Oktama, R.. 2016. Diffuse Flow Characteristics and Their Relation to Hydrochemistry Conditions in The Petoyan Spring, Gunungsewu Karst, Java, Indonesia. *Geosciences Journal*, 20(3), 381–390. <https://doi.org/10.1007/s12303-015-0048-8>.
- [13] Adji, 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, <https://doi.org/10.1007/s12665-017-7057-z>
- [14] Kurniawan, I.A., Adji, T.N., Nurkholis, A., Haryono, E., Fatoni, H., Waskito, W.A., Cahyadi, A., Agniy, R.F., Karst aquifer response by time series analysis applications in Jonggrangan Karst, Java Island, Indonesia, *Environmental Earth Sciences*, 76:709, doi: 10.1007/s12665-019-8386-x, 2019
- [15] Fatoni, H., 2019, Variabilitas Debit dan Sistem Memori Untuk Karakterisasi Akuifer Karst Jonggrangan Kulonprogo-Purworejo (Studi Kasus Mataair Gua Kiskendo, Gua Anjani, dan Mudal), unpublished thesis, Faculty of Geography, Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta