

Why are Allogenic Watersheds not Protected (Again)?

Ahmad Cahyadi, Eko Haryono, Tjahyo Nugroho Adji, M. Widyastuti

Universitas Gadjah Mada
ahmad.cahyadi@ugm.ac.id

Article History

accepted 31/08/2020

approved 22/09/2020

published 28/10/2020

Abstract

Allogenic recharge generally contributes to the formation of the main underground river system in a karst area. However, allogenic recharge have a higher susceptibility to contamination than autogenic recharge. This is because recharge from allogenic rivers enters the underground river system without undergoing filtration by soil or rock cavities. This paper discusses changes to ministerial regulations related to karst management that have led to the exclusion of allogenic river areas from the management of allogenic rivers, examines the urgency of managing allogenic rivers, and recommends future management of karst areas from the perspective of water resources management. The change in the Minister of Energy and Mineral Resources (ESDM) regulation regarding karst management has led to a simplification of the scope related to the main tasks and functions of the Ministry of ESDM. This should be followed by making changes to regulations that are higher than the ministerial level regulations so that the management objectives stated in the previous regulation can be covered and there is holistic management of the karst area.

Keywords: Watershed, Allogenic Recharge, Karst Hydrology, Allogenic River

Abstrak

Imbuhan alogenik umumnya membentuk sistem sungai bawah tanah yang utama di kawasan karst. Namun demikian, imbuhan alogenik memiliki kerentanan terhadap pencemaran yang lebih tinggi dibandingkan imbuhan autogenik. Hal ini karena imbuhan dari sungai alogenik masuk ke dalam sistem sungai bawah tanah tanpa mengalami filtrasi oleh tanah atau rongga batuan. Makalah ini membahas tentang perubahan peraturan menteri terkait dengan pengelolaan karst yang menyebabkan tidak lagi dimasukkannya daerah sungai alogenik ke dalam bagian pengelolaan kawasan karst, menelaah urgensi pengelolaan sungai alogenik dan merekomendasikan pengelolaab kawasan karst di masa mendatang dalam sudut pandang pengelolaan sumberdaya air. Perubahan peraturan menteri ESDM tentang pengelolaan karst menyebabkan terjadinya penyederhanaan cakupan yang terkait dengan tupoksi Kementerian ESDM. Hal ini seharusnya diikuti dengan pembuatan perubahan peraturan yang lebih tinggi dari peraturan setingkat menteri agar tujuan pengelolaan yang telah dicantumkan pada aturan sebelumnya tetap dapat tercakup dan terjadi pengelolaan yang holistic terhadap kawasan karst.

Kata kunci: Daerah Aliran Sungai, Imbuhan Alogenik, Hidrologi Karst, Sungai Alogenik

Social, Humanities, and Education Studies (SHes): Conference Series

p-ISSN 2620-9284

<https://jurnal.uns.ac.id/shes>

e-ISSN 2620-9292

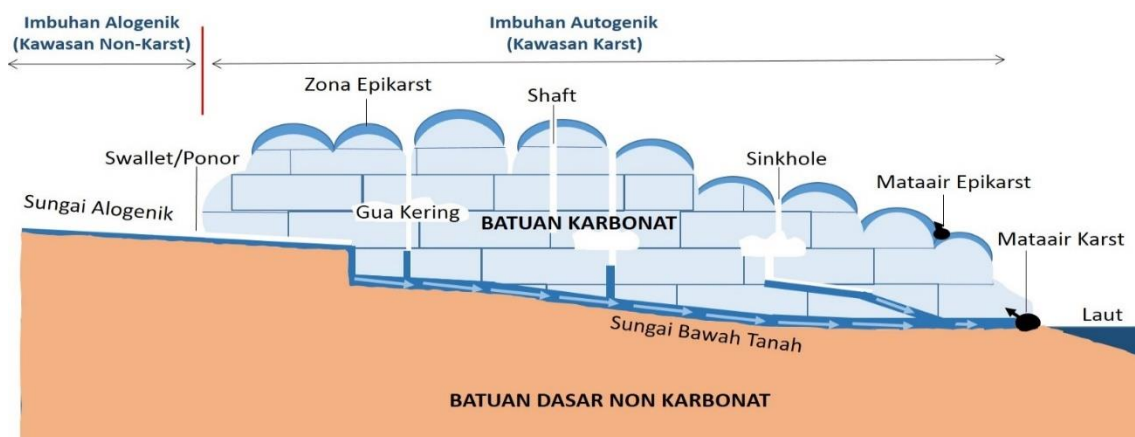


This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.

PENDAHULUAN

Kawasan karst memiliki karakteristik hidrologi yang berbeda dibandingkan wilayah lainnya karena berkembangnya lorong *fissure* dan *conduit* yang dibentuk oleh proses pelarutan batuan (Riyanto et al., 2018; Kurniawan et al., 2019; Agniy et al., 2019). Pembentukan lorong pelarutan menyebabkan airtanah bergerak dengan sistem anisotropis yang acak, sehingga karakter simpanan airtanah di kawasan karst sangat berbeda dengan wilayah lain yang memiliki sistem isotropis, di mana aliran airtanah bergerak di antara ruang antar butir (Nurkholis et al., 2018). Karakter hidrologi yang unik menyebabkan kawasan karst memiliki karakteristik simpanan air yang besar karena air yang meresap akan mengalir masuk ke dalam satu sistem sungai bawah tanah dan keluar sebagai mataair atau *resurgence* (Adji dan Cahyadi, 2016; Nurkholis et al., 2019; Ramadhan et al., 2020). Kawasan karst berperan dalam penyediaan air sekitar 25% penduduk di seluruh dunia (Ford and Williams, 2007; Sullivan et al., 2020).

Sistem hidrologi kawasan karst memiliki karakteristik yang disebut oleh Ford and Williams (2007) sebagai "*duality of recharge*". *Duality of Recharge* diartikan bahwa airtanah di kawasan karst memiliki dua jenis imbuhan airtanah, yakni imbuhan alogenik dan imbuhan autogenik (Gambar 1). Imbuhan alogenik adalah imbuhan airtanah di kawasan karst yang berasal dari luar kawasan karst (Cahyadi dkk., 2020a), sedangkan imbuhan autogenik adalah imbuhan airtanah yang berasal dari hujan yang jatuh di kawasan karst itu sendiri. Imbuhan alogenik umumnya berasal dari sungai permukaan dari luar kawasan karst, kemudian masuk ke dalam sistem sungai bawah tanah di kawasan karst melalui ponor (beberapa peneliti menyebut *swallow hole* atau *swallet*, misalnya Jennings, 1985 dan White, 1988). Imbuhan autogenik terdiri atas *internal runoff* (air hujan yang masuk melalui *sinkhole*), *subcutaneous fissure* (air hujan masuk melalui retakan pada *zona subcutaneous* atau di antara zona pelapukan batuan dan bagian bawah lapisan tanah), serta *intergranular* (air hujan meresap melalui rongga antar butir batuan atau tanah) (White, 1988; Gillieson, 1996).



Gambar 1. Skema Sederhana Sistem Hidrologi Kawasan Karst

Keberadaan imbuhan alogenik dalam tinjauan sumberdaya air dapat menjadi pengimbuhan airtanah di kawasan karst, dan di sisi yang lain menyebabkan kerentanan yang tinggi terhadap pencemaran. Imbuhan alogenik yang berasal dari sistem terbuka (*open system*) menyebabkannya memiliki banyak kandungan karbondioksida yang memungkinkannya memiliki kemampuan melarutkan batuan yang tinggi dibandingkan dengan sistem tertutup (*Closed system*) (Cahyadi et al., 2020b). Di sisi lain, aliran yang deras karena air masuk melalui satu titik saja akan menyebabkan imbuhan alogenik memiliki kekuatan mekanik yang besar dalam membentuk lorong sungai bawah tanah di kawasan karst (Palmer, 2007). Oleh karenanya, tidak mengherankan banyak

kawasan karst yang memiliki sistem sungai bawah utama yang dikontrol oleh keberadaan sungai alogenik sebagai pengimbuhan airtanah di kawasan karst. Sungai bawah tanah di kawasan karst yang dikontrol imbuhan dari sungai alogenik umumnya akan membentuk *single conduit* dan atau *maze cave*, yakni gua dengan banyak cabang (Palmer, 2001).

Imbuhan alogenik yang masuk melalui ponor (Gambar 2) menyebabkan kerentanan airtanah di kawasan karst menjadi sangat tinggi (Cahyadi dan Hartoyo, 2011). Kondisi ini terjadi karena air dari sungai alogenik akan masuk ke dalam sistem sungai bawah tanah karst tanpa mengalami proses filtrasi (penyaringan) oleh tanah (Cahyadi dkk., 2013). Kondisi berbeda terjadi jika imbuhan airtanah karst berasal dari air hujan yang meresap melalui epikarst dan sistem *diffuse* yang memungkinkan terjadinya filtrasi secara alamiah oleh tanah dan butir batuan.



Gambar 2. Ponor yang Menjadi Jalan Masuk Sungai Alogenik Menuju ke Sungai Bawah Tanah Karst (a) Ponor Ngeleng sebagai Outlet dari Sungai Alogenik Kepuh, Paliyan, Gunungkidul (Kiri) dan (b) Ponor Seropan yang Merupakan Salah Satu Ponor pada Sistem Sungai Alogenik Kedungparan, Ponjong, Gunungkidul (kanan)

Perlindungan terhadap sungai alogenik pernah ditetapkan melalui Keputusan Menteri (Kepmen) Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tahun 2000 tentang Pedoman Pengelolaan Kawasan Karst. Peraturan ini mengatur daerah aliran sungai alogenik menjadi kawasan karst kelas II, yakni kawasan non karst tetapi memiliki peranan dalam mengimbuhan air di kawasan karst. Namun demikian, saat peraturan yang lebih baru terbit yakni Permen ESDM Nomor 17 tahun 2012 tentang Penetapan Bentang Alam Karst, daerah aliran sungai alogenik tidak masuk dalam area perlindungan karena dalam aturan tersebut hanya melindungi kawasan bentang alam karst (KBAK). Mengingat pentingnya daerah aliran sungai alogenik dalam menjaga sumberdaya air kawasan karst, maka paper ini bermaksud untuk melakukan studi komparasi antara dua produk hukum yang telah disebutkan sebelumnya, melakukan telaah pustaka tentang arti penting daerah aliran

sungai alogenik dan kemudian merumuskan rekomendasi kepada pemerintah dalam pengelolaan daerah aliran sungai alogenik.

METODE

Pertama, kajian dalam paper ini dilakukan dengan studi komparasi antara KEPMEN ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tahun 2000 tentang Pedoman Pengelolaan Kawasan Karst dan Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012 mengenai Penetapan Bentang Alam Karst, khususnya terkait dengan pengaturan daerah aliran sungai alogenik. Kedua, nilai penting daerah aliran sungai alogenik ditelusuri berdasarkan pada studi pustaka dari laporan penelitian, jurnal, buku dan publikasi lainnya. Publikasi yang dianalisis khususnya terkait dengan karakteristik sungai alogenik di Indonesia. Ketiga, hasil analisis dari tujuan satu dan dua kemudian digunakan untuk membuat rekomendasi pengelolaan daerah aliran sungai alogenik di masa mendatang, khususnya di Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Studi Komparasi antara Kepmen ESDM 1456 K/20/MEM/2000 tahun 2000 dan Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012

Pasal 16 Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012 menyebutkan bahwa dengan berlakunya peraturan tersebut, maka Kepmen ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 Tahun 2000 dinyatakan tidak berlaku lagi. Padahal jika ditinjau dari tujuan keduanya memiliki tujuan yang cukup berbeda. Perbedaan tujuan di antara keduanya dapat dilihat pada Tabel 1. Tabel 1 menunjukkan bahwa cakupan tujuan pada Kepmen ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 Tahun 2000 ternyata jauh lebih luas dibandingkan dengan aturan penggantinya, yakni Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012. Hal ini nampak dari tidak munculnya tujuan pelestarian flora, fauna, nilai sejarah dan budaya serta tujuan meningkatkan kehidupan masyarakat di dalam dan sekitarnya.

Selain mengalami penyempitan dalam tujuan, Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012 mengamanatkan inventarisasi untuk menetapkan kawasan karst sebagai kawasan lindung dengan kriteria yang lebih sederhana. Dalam peraturan ini, inventarisasi hanya membatasi pada bentang alam kawasan karst yang memiliki bentukan eksokarst dan endokarst saja, sedangkan wilayah di luar kawasan karst tidak masuk dalam inventarisasi. Peta KBAK juga berisi informasi yang jauh lebih sedikit dibandingkan dengan peta kelas kawasan karst pada aturan sebelumnya. Permen ESDM nomor 17 Tahun 2012 mengatur bahwa peta KBAK berisi batas KBAK, koordinat bentukan eksokarst dan endokarst, batas administratif, dan keterangan peta berupa legenda, skala garis, sumber peta dan peta indeks.

Daerah aliran sungai alogenik pada Kepmen ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 Tahun 2000 setidaknya disebutkan dalam dalam pasal 8 dan 9 tentang pengumpulan data hidrologi yang mengharuskan adanya informasi terkait dengan wilayah tangkapan, informasi tentang jumlah air yang masuk dan keluar kawasan karst, dan informasi tentang wilayah penyangga dari suatu kawasan karst. Dalam peraturan ini daerah aliran sungai alogenik dimasukkan dalam kawasan karst kelas II, yakni kawasan di luar kawasan karst yang berfungsi sebagai wilayah tangkapan air, pengimbuah airtanah dan mendukung fungsi hidrologi suatu kawasan karst. Namun demikian, pada Permen ESDM Nomor 17 tahun 2012 perlindungan hanya terbatas pada KBAK yang tidak memuat daerah aliran sungai alogenik. Selain itu, kawasan perlindungan terhadap situs budaya, wilayah perlindungan flora, fauna dan kawasan lain yang berfungsi secara sosial dan ekonomi tidak lagi masuk dalam KBAK. Hal ini disebabkan karena pada peraturan tingkat menteri faktor-faktor tersebut memang akan menjadikannya melebihi tupoksi dari Kementerian ESDM. Dalam *website* resmi Kementerian ESDM, tugas pokok dan fungsi dari kementerian ini mencakup pada hal-hal yang terkait dengan minyak dan gas bumi, ketenagalistrikan,

mineral dan batubara, energi baru, energi terbarukan, konservasi energi, dan geologi (<https://www.esdm.go.id/id/profil/tugas-fungsi>).

Tabel 1. Perbedaan Tujuan Kepmen ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 Tahun 2000 dan Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012

Tujuan Kepmen ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 Tahun 2000	Tujuan Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012
BAB II Pasal 2	BAB II Pasal 2
<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Pengelolaan kawasan karst bertujuan untuk mengoptimalkan pemanfaatan kawasan karst untuk menunjang pembangunan yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan (ayat 1);</i> 2. <i>Pengelolaan kawasan karst mempunyai sasaran (ayat 2):</i> <ol style="list-style-type: none"> a. <i>Meningkatkan upaya perlindungan kawasan karst dengan cara melestarikan fungsi hidrogeologi, proses geologi, flora, fauna, nilai sejarah serta budaya yang ada di dalamnya;</i> b. <i>Melestarikan keunikan dan kelangkaan bentukan alam di kawasan karst;</i> c. <i>Meningkatkan kehidupan masyarakat di dalam dan di sekitarnya;</i> d. <i>Meningkatkan pengembangan ilmu pengetahuan.</i> 	<ol style="list-style-type: none"> 1. <i>Melindungi kawasan bentang alam karst yang berfungsi sebagai pengatur alami tata air;</i> 2. <i>Melestarikan kawasan bentang alam karst yang memiliki keunikan dan nilai ilmiah sebagai objek penelitian dan penyelidikan bagi pengembangan ilmu pengetahuan; dan</i> 3. <i>Mengendalikan pemanfaatan kawasan bentang alam karst.</i>

Sumber: Kepmen ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 Tahun 2000 dan Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012, dikutip dalam bentuk *quote*

3.2. Urgensi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Alogenik

Sungai alogenik memiliki peranan yang besar dalam pembentukan lorong pelarutan. Seperti dijelaskan sebelumnya bahwa karakteristik kimia dan fisika dari aliran sungai alogenik dapat membentuk sistem sungai bawah tanah utama di kawasan karst, sehingga keberadaannya sangat berpengaruh terhadap kondisi sumberdaya air di sungai bawah tanah yang umumnya menjadi sumber air utama di kawasan karst. Contoh kasus tersebut adalah pada Sistem Sungai Bawah Tanah Bribin-Baron yang merupakan sistem sungai bawah tanah utama di Kawasan Karst Gunungsewu. Sistem sungai bawah tanah ini diimbuh oleh banyak sungai alogenik yang berhulu di Cekungan Wonosari.

Wilayah tangkapan yang besar dapat pula berpengaruh pada kuantitas sumberdaya air yang disumbangkan oleh daerah aliran sungai alogenik ke dalam airtanah karst. Daerah aliran sungai alogenik di Kawasan Karst Gunungsewu misalnya memiliki luas sekitar 188,91 km² (Cahyadi dkk., 2018) dan diperkirakan memasok sekitar 30% dari total sumberdaya airtanah di Sungai Bawah Tanah Bribin-Baron. Sumberdaya air di Potensi airtanah di Sungai Bawah Tanah Bribin saja misalnya mencapai sebesar 521.337.699 m³/tahun (Bappeda Kabupaten Gunungkidul, 2007),

dan jumlah tersebut menurut Adji (2015) memiliki nilai ekonomi setara dengan 782 milyar rupiah.

Selain memberikan dampak positif bagi sumberdaya air di kawasan karst, daerah sungai alogenik memiliki potensi negatif yakni sebagai penyuplai kontaminan. Proses imbuhan yang tidak melalui penyaringan akan memudahkan bahan pencemar masuk ke dalam sistem sungai bawah tanah. Widyastuti dkk (2019) menyebutkan bahwa 5 sungai alogenik besar di Kawasan Karst Gunungsewu tercemar sedang sampai dengan cemar berat. Kondisi tersebut karena banyaknya masyarakat yang membuang limbah rumah tangga langsung ke sungai, misalnya di Kota Wonosari (Adji dkk., 2005). Selain itu, daerah aliran sungai alogenik yang tidak dikelola dengan baik akan menimbulkan bencana banjir dan dapat menyebabkan banyaknya sedimen yang masuk ke dalam sistem lorong sungai bawah tanah dan dapat menyebabkan kerugian lain seperti pendangkalan bendungan sungai bawah tanah dan kualitas air sungai bawah tanah yang semakin buruk.

3.3. Rekomendasi Pengelolaan Daerah Aliran Sungai Alogenik di Masa Mendatang

Daerah aliran sungai alogenik merupakan bagian tidak terpisahkan dari sistem hidrologi kawasan karst. Oleh karenanya pengelolaan sumberdaya air di kawasan karst seharusnya mempertimbangkan keberadaan dari imbuhan alogenik. Pengelolaan sumberdaya air di kawasan karst haruslah menggunakan unit karst drainage basin (KDB) atau cekungan drainase karst (CDK). Istilah KDB memang banyak sekali padanannya di dalam Bahasa Inggris, misalnya *chactment area*, *springshed*, *karst basin*, *karst groundwater system*, *karst watershed*, *recharge area* dan *underground river system*. Namun demikian, istilah karst drainage basin dianggap paling sesuai dengan kondisi hidrologi kawasan karst (Taylor and Greene, 2008). Karst drainage basin didefinisikan sebagai keseluruhan wilayah yang terdiri atas drainase permukaan ataupun bawah permukaan yang memiliki berperan dalam mengimbuhi airtanah pada suatu kawasan karst baik pada sungai bawah tanah, mataair atau *resurgence* (Quinland and Ewers, 1989). Pengelolaan atas dasar unit KDB atau CDK akan mempermudah dalam melakukan perhitungan neraca air, menganalisis terjadinya gangguan terhadap sistem hidrologi, menilai dampak dari suatu kegiatan, mengevaluasi kinerja suatu program dan melakukan pelacakan terhadap sumber pencemar pada suatu sistem hidrologi karst (Bonacci *et al.*, 2006 ; Cahyadi dkk., 2013).

Pengelolaan kawasan karst seperti yang tercantung dalam Kepmen ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tahun 2000 meliputi banyak sekali bidang, seperti hidrologi, geologi, flora dan fauna, serta situs penting dalam ilmu pengetahuan, budaya, dan ekonomi masyarakat. Cakupan yang sangat luas terhadap faktor yang dianggap penting untuk dilindungi di kawasan karst tersebut kemungkinan hanya dapat dilakukan dengan melibatkan banyak kementerian. Oleh karenanya, pengelolaan kawasan karst yang holistik harus diatur pada peraturan di atas peraturan setingkat menteri. Hal ini agar memungkinkan dilakukannya pengelolaan yang serba cakup, sehingga tidak terkesan saling lepas antara perlindungan satu hal dengan hal yang lainnya di kawasan karst.

SIMPULAN

Perubahan aturan dari KEPMEN ESDM Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tahun 2000 tentang Pedoman Pengelolaan Kawasan Karst menjadi Permen ESDM Nomor 17 Tahun 2012 mengenai Penetapan Bentang Alam Karst menyebabkan penyederhanaan cakupan dalam pengelolaan kawasan karst. Kondisi tersebut disebabkan karena pada aturan yang baru menyesuaikan tugas pokok dan fungsi dari Kementerian ESDM

selaku pemilik kewenangan dan penerbit aturan. Meskipun demikian, perlu sungai alogenik sebenarnya memiliki urgensi yang tinggi untuk dikelola dalam rangka pengelolaan sumberdaya air di kawasan karst. Oleh karenanya, untuk mencakup pengelolaan kawasan karst yang lebih holistik sebaiknya disusun peraturan khusus di atas peraturan setingkat menteri yang secara khusus mengatur pengelolaan kawasan karst. Hal ini agar tercipta pengelolaan kawasan karst yang serba cakup di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Adji, T.N.; Widyastuti, M.; Sudarmadji dan Haryono, E. (2005). Identification of Contaminant Recharge Area of Bribin-Baron Karst Water System, Gunung Sewu, Indonesia. *Laporan Penelitian*. Yogyakarta: Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.
- Adji, T.N. (2015). Nilai Ekonomi Air di Daerah Karst. Disampaikan dalam *Lokakarya Nasional Ekosistem Karst*, 16 Desember 2015. Jakarta: Direktorat Bina Pengelolaan Ekosistem Essensial Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.
- Adji, T.N. dan Cahyadi, A. (2016). Pentingnya Monitoring Parameter-parameter Hidrograf dalam Pengelolaan Airtanah di Daerah Karst. Seminar Nasional Hidrolika APCE-UNESCO, Yogyakarta, 12-14 Oktober 2016.
- Agniy, R.F., Adji, T.N., Cahyadi, A., Nurkholis, A., and Haryono, E. (2019). Characterizing the Cavities of Anjani Cave in Jonggrangan Karst Area, Purworejo, Central Java, Indonesia. *Earth and Environmental Science*, 256, 1 – 8.
- Bappeda Kabupaten Gunungkidul. (2007). Penyusunan Neraca Air Kabupaten Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Laporan Penelitian*. Wonosari: Bappeda Kabupaten Gunungkidul.
- Bonacci, O., Jukić, D. and Ljubenkov, I. (2006). Definition of Catchment Area in Karst: Case of the Rivers Krčić and Krka, Croatia. *Hydrological Sciences Journal*, 51(4) : 682-699.
- Cahyadi, A. dan Hartoyo, F.A. (2011). Pemanfaatan Sistem Informasi Geografis (SIG) untuk Pemetaan Imbuhan Airtanah dan Kerentanan Airtanah di Kawasan Karst (Studi Kasus di Kecamatan Paliyan dan Kecamatan Saptosari, Kabupaten Gunungkidul). *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi (SNATI)*. Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, 17-18 Juni 2011.
- Cahyadi, A. ; Fatchurohman, H. dan Pratiwi, E.S. (2013). Metode-metode Identifikasi Karakteristik Daerah Tangkapan Air Sungai Bawah Tanah dan Mataair Kawasan Karst. dalam Marfai, M.A. dan Widyastuti, M. (eds.). *Pengelolaan Lingkungan Zamrud Khatulistiwa*. Yogyakarta: Penerbit Pintal.
- Cahyadi, A. ; Riyanto, I.A. ; Firizqi, F. dan Irshabdillah, M.R. (2018). Inventarisasi dan Karakterisasi Sistem aliran Sungai Alogenik di Kawasan Karst Gunungsewu Kabupaten Gunungkidul. *Laporan Penelitian*. Yogyakarta: Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.
- Cahyadi, A., Haryono, E., Adji, T.N., Widyastuti, M., Naufal, M., Ramadhan, F., Agniy, R.F. dan Riyanto, I.A. (2020a). Analisis Konektivitas dan Karakteristik Lorong pada Sistem Hidrogeologi Mataair Beton, Kawasan Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul dengan Uji Peruntan. *Jurnal Geografi*, 12(2): 105-114.
- Cahyadi, A. ; Haryono, E. ; Adji, T.N. ; Widyastuti, M. ; Riyanto, I.A. ; Naufal, M. and Ramadhan, F. (2020b). Allogenic River in the Hydrogeological System of Gremeng Cave, Gunungsewu Karst Area, Java Island, Indonesia. *Earth and Environmental Science*, 448: 1-7.
- Ford, D. and Williams, P. (2007). *Karst Hydrology and Geomorphology*. Chichester, West Sussex: John Wiley and Sons, Ltd.

- Gillieson, D. (1996). *Caves: Processes, Development, and Management*. British: Blacwell Publishers.
- Jennings, J.N. (1985). *Karst Geomorphology*. New York: Basil Blackwell.
- Kurniawan, I.A., Adji, T.N., Nurkholis, A., Haryono, E., Fatoni, H., Waskito, W.A., Cahyadi, A., and Agniy, R.F. (2019). Karst Aquifer Response by Time Series Analysis Applications in Jonggrangan Karst, Java Island, Indonesia. *Environmental Earth Sciences*, 78 : 379.
- Nurkholis, A., Cahyadi, A. and Agniy, R.F. (2018). Spatial and Temporal Flood Characterization of Pindul Karst System, Gunungkidul Regency. *Earth and Environmental Science*, 145, 1 - 10.
- Nurkholis, A., Adji, T.N., Haryono, E., Cahyadi, A., and Suprayogi, S. (2019). Time Series Application for Karst Aquifer Characterisation in Pindul Cave Karst System, Indonesia. *Acta Carsologica*, 48(1), 69 – 84.
- Palmer, A.N. (2001). Dynamics of Cave Development by Allogenic Water. *Acta Carsologica*, 30(2): 13-32.
- Palmer, A.N. (2007). *Cave Geology*. Dayton, Ohio: Caves Books.
- Quinlan, J.F. and Ewers, R.O. (1989). Subsurface Drainage in the Mammoth Cave area. In White, W.B. and White, E.L. (eds.) *Karst Hydrology Concepts from the Mammoth Cave Area*. New York : Van Nostrand Reinhold.
- Ramadhan, F., Widyastuti, M., Adji, T.N., Cahyadi, A., Naufal, M. and Riyanto, I.A. (2020) Characterizing flow release from the aquifer of Guntur Spring in Gunungsewu Karst Area, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 451(1), 012060.
- Riyanto, I.A., Cahyadi, A., Adji, T.N., Haryono, E., Widyastuti, M., Agniy, R.F., Fathoni, W.A., Rahmawati, N., dan Baskoro, H. (2018). Analisis Konektivitas dan Karakterisasi Pelorongan dengan Uji Peruntukan pada Mataair Epikarst Sub-sistem Panggang, Kawasan Karst Gunungsewu. *Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Perhimpunan Ahli Airtanah Indonesia (PAAI) di Aryaduta Hotel, Jakarta, 7-8 November 2018*.
- Sullivan, P.L., Macpherson, G.L., Martin, J.B. and Price, R.M. 2020. Evolution of Carbonate and Karst Critical Zones. *Chemical Geology*, 527, 119223.
- Taylor, C.J. and Greene, E.A. (2008). Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology. dalam Rosenberry, D.O. and LaBaugh, J.W. (eds). *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*. Virginia : U.S. Geological Survey.
- White, W.B. (1988). *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York: Oxford University.
- Widyastuti, M.; Cahyadi, A.; Adji, T.N.; Purnama, S.; Firizqi, F.; Naufal, M.; Ramadhan, F.; Riyanto, I.A. dan Irshabdillah, M.R. (2019). Kualitas Air Sungai-sungai Alogenik di Kawasan Karst Gunungsewu, Kabupaten Gunungkidul pada Musim Kemarau. *Prosiding Seminar Nasional Geografi III*. Yogyakarta: Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada.