

GEOKONSERVASI DALAM FUNGSI PERLINDUNGAN DAN PEMANFAATAN EKOSISTEM KARST GUNUNG SEWU

(Studi Kasus Kapanewon Ponjong, Kabupaten Gunungkidul, D.I. Yogyakarta)

Ira Mughni Pratiwi

Program Studi Teknik Pertambangan, Institut Teknologi Yogyakarta, Jl. Kebun Raya No. 39, Rejowinangun, Kotagede, Yogyakarta 55171
email: mughniira@ity.ac.id

ABSTRAK

Distribusi bentang alam karst di permukaan bumi sebagian besar mengikuti distribusi batuan karbonat (batugamping dan dolomit). Ekosistem karst mempunyai fungsi ekologi dan ekonomi. Meningkatnya kebutuhan pembangunan infrastruktur di Indonesia, mendorong pemanfaatan komoditas batugamping. Kawasan karst merupakan wilayah strategis multisectoral yang mempunyai nilai universal. Pada kawasan Bentang Alam Karst Gunung Sewu terdapat beberapa Wilayah Usaha Pertambangan (WUP), terdapat area dengan sebaran formasi batuan pembawa mineral bukan logam dan batuan (batugamping) dan dapat dimanfaatkan untuk kegiatan pertambangan. Permasalahan utama dalam kegiatan penambangan batugamping di dalam dan/atau yang berada di dekat ekosistem karst adalah berkaitan dengan kondisi hidrogeologi. Perubahan bentuk lahan dalam proses penambangan berpengaruh pada sistem hidrogeologi serta perubahan topografi berpotensi mengubah aliran air mataair. Sebagai wujud pelaksanaan kegiatan penambangan sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku, yaitu dilakukan kontrol dalam perencanaan tambang sebagai bentuk geokonservasi agar tidak merusak sistem hidrogeologi. Rekayasa konservasi hidrogeologi meliputi batasan penambangan dan penanganan risiko terhadap conduit dan mataair.

Kata kunci: Geokonservasi, Karst, Gunung Sewu

GEOCONSERVATION ON PROTECTION AND UTILIZATION FUNCTION OF GUNUNG SEWU KARST ECOSYSTEM

***(CASE STUDY DISTRICT OF PONJONG, GUNUNGKIDUL REGENCY, SPECIAL
REGION OF YOGYAKARTA)***

ABSTRACT

The distribution of karst landscape follows the distribution of carbonat (limestone and dolomite). Karst ecosystem has an ecological and economic functions. The rapid of infrastructure development in Indonesia encourage the use of limestone commodities. Karst areas as a multisectoral strategic areas has an outstanding universal value. There are several Mining Area exist on and/or near the Gunung Sewu Karst Landscape Area, moreover the distribution of bearer for non-metallic mineral (limestone) rocks formation prevail in this area and provide economically beneficial for the mining activity. According to the passage, the main problem of mining activity on and/or near karst area is the impact of hydrogeology system. Changes in land forms in the process of mining effect on the hydrogeological system and topographical potentially alter the flow of springs water. As a matter of mining law in force implementation, control is carried out by the mine planning as one particular form of geoconservation for the purpose against the harmful effect towards hydrogeology system. Appropriate hydrogeological conservation includes mining boundary and also risk management regarding to conduit and springs.

Keywords: Geoconservation, Karst, Gunung Sewu

PENDAHULUAN

Sektor sumber daya mineral mempunyai peran penting dalam pertumbuhan ekonomi dan kemajuan pembangunan di Indonesia. Hal itu ditandai dengan pesatnya pembangunan infrastruktur dan fasilitas pendukungnya. Dalam kegiatan tersebut, batugamping (batuan karbonat) merupakan salah satu sumber daya mineral yang digunakan sebagai bahan baku utama maupun bahan pendukung/bahan penolong. Batuan karbonat berasosiasi dengan perkembangan bentang alam karst. Distribusi bentang alam karst di permukaan bumi sebagian besar mengikuti distribusi batuan karbonat (batugamping dan dolomit) dengan total luas 12,5 juta km², setara dengan 16,7% dari total area daratan di bumi. Persentase distribusi bentang alam karst di Asia Tenggara (termasuk China, Malaysia, dan Indonesia) adalah 1,7% (Jones & White, 2019).

Kawasan karst adalah wilayah strategis yang menyangkut multisektor, seperti kegiatan sektor pertambangan dan pemanfaatan akuifer karst. Bentang alam karst didominasi oleh bentuklahan solusional, hasil pelarutan batuan yang mudah larut dan biasanya berkembang pada batuan karbonat (Waele et al., 2009). Batuan karbonat bereaksi dengan air hujan dan menginfiltasikan air melalui rekahan batuan (berupa *conduit* dan/atau *diffuse*) atau melalui kontak antara tanah dan batuan induk, membentuk akuifer karst yang kompleks (Jones & White, 2019; Liu et al., 2020). Sebagai salah satu representasi akuifer karst adalah mataair yang merupakan luahan hasil spasial dan temporal dari proses hidrologi yang kompleks (An et al., 2020). Tanah yang berkembang pada batuan karbonat tinggi akan kandungan lempung sehingga menunjukkan nilai kapasitas infiltrasi yang rendah pada skala spasial kecil. Namun, pada skala yang lebih besar sistem karst mempunyai nilai kapasitas infiltrasi yang tinggi, yang disebabkan oleh aliran lateral yang menuju ke rekahan yang lebih besar (Hartmann et al., 2014). Ekosistem karst dan akuifernya merupakan salah satu sumber air minum hingga 25% air minum dunia (Hartmann et al., 2014; Onac & Beynen, 2021) dan air tanah pada batuan karbonat terkarstifikasi merupakan sumber air bagi penduduk lokal (Gongyu & Wanfang, 1999). Akan tetapi, akuifer karst secara umum sangat rentan terhadap polusi dan dampak antropogenik (Wu et al., 2010)

Indonesia mempunyai tatanan geologi yang kompleks, sehingga memiliki sumber daya alam yang melimpah (Badan Penataan Ruang Nasional, 2011). Kapanewon Ponjong, Kabupaten Gunungkidul, D. I. Yogyakarta merupakan bagian dari Kawasan Bentang Alam Karst Gunung Sewu dengan tatanan geologi dan hidrologi yang unik, dibentuk oleh batugamping terumbu Formasi Wonosari. Berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3045 K/40/MEM/2014 tentang Penetapan Kawasan Bentang Alam Karst Gunung Sewu, meliputi empat kabupaten yaitu Kabupaten Gunungkidul, Bantul, Wonogiri, dan Pacitan dengan total luas 1.100,17km². Selain berfungsi secara ekologi, Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK) Gunung Sewu juga bernilai ekonomi. Pada area KBAK Gunung Sewu terdapat beberapa Wilayah Usaha Pertambangan (WUP), area dengan sebaran formasi batuan pembawa mineral bukan logam dan batuan (batugamping) dan dapat dimanfaatkan untuk kegiatan pertambangan secara berkelanjutan. Permasalahan utama dalam kegiatan penambangan batugamping di dalam atau yang berada di dekat ekosistem karst adalah berkaitan dengan kondisi hidrogeologi. Karakteristik akuifer karst adalah adanya saluran terbuka atau rekahan sekunder yang berfungsi mengalirkan air ke bawah tanah secara cepat sebagai aliran turbulen (White, 2002; Djakamihardja & Mulyadi, 2013).

Metode penambangan batuan, endapan mineral industri, dan/atau bahan bangunan dengan topografi berbentuk bukit, menggunakan metode kuari (Hatheway, 2005) dengan sistem *side hill type* (Sugiono & Yulhendra, 2019). Penambangan dilakukan dengan pengupasan bukit dengan membuat lereng dari atas ke bawah dengan sistem blok. Jika penambangan dilakukan tanpa Pedoman Pelaksanaan Kaidah teknik Pertambangan yang Baik sesuai Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018, maka akan menyebabkan hilangnya lapisan epikarst (Cahyadi, 2010) dan memotong saluran *conduit* yang harus saling terhubung untuk menginfiltasikan air (White, 2019). Penambangan batugamping di zona selatan Kabupaten Gunungkidul, Kapanewon Ponjong, mengubah bentuk topografi awal secara signifikan (Tyas et al., 2016) dan diperlukan kontrol dalam kegiatan penambangan batugamping untuk menjaga sistem hidrogeologi (Endarto et al., 2015; Kusumayudha, 2017).

Untuk menemukan solusi benturan antara kebutuhan batugamping dan kerentanan sistem hidrogeologi, tujuan dari penelitian ini adalah menentukan geokonservasi dalam perlindungan dan pemanfaatan nilai universal ekosistem karst.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan menggunakan studi literatur dan pengamatan lapangan daerah penelitian dengan pendekatan kualitatif. Pendekatan kualitatif diperoleh dari gambaran naratif dan deskripsi teksual. Dalam hal perlindungan ekosistem karst, digunakan pendekatan geokonservasi melalui rekayasa konservasi hidrogeologi. Sedangkan studi literatur dalam pemanfaatan karst, dilakukan dengan mempelajari Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara; Undang-Undang Nomor 3 tahun 2020 tentang Perubahan Atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara; dan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik.

Lokasi penelitian ditentukan dengan pertimbangan area penambangan yang berada di dekat kawasan karst yang berfungsi sebagai kawasan resapan air, berdasarkan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3045 K/40/MEM/2014 tentang Penetapan Kawasan Bentang Alam Karst

Karst Gunung Sewu mempunyai ciri berbentuk kerucut yang berujung runcing, membulat (sinusoida), atau datar. Maka, dari itu karst Gunung Sewu masuk dalam klasifikasi *cone karst*. Berdasarkan data lapangan, litologi penelitian dominan dengan batugamping masif (Formasi Wonosari) dengan ketebalan ±80m dari permukaan tanah. Selain itu, dijumpai batugamping berlapis dengan sortasi butir teratur dan kaya akan foraminifera serta bentos. Sifat batugamping di lokasi penelitian memiliki sifat sebagai berikut:

- Warna : Putih
- Kilap : Kilap tanah
- Goresan : Putih sampai putih keabuan
- Bidang belahan : Tidak teratur
- Pecahan : Uneven
- Kekerasan : 2,7-3,4 skala mohs
- Berat Jenis : 2,4
- *Tenacity* : Keras, kompak, sebagian berongga

Hasil test pit menunjukkan secara umum kandungan kalsium karbonat (CaCO_3) berkisar antara 86,91-92,63% dan kandungan kalsium oksida (CaO) berkisar antara 48,69-51,90%.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan Undang-undang Nomor 4 Tahun 2009 Tentang Pertambangan Mineral dan Batubara, setiap usaha pertambangan wajib menerapkan kaidah teknik pertambangan yang baik dan mematuhi batas toleransi daya dukung lingkungan. Kaidah teknik pertambangan yang baik meliputi beberapa pelaksanaan aspek seperti teknis pertambangan; pengelolaan lingkungan hidup pertambangan; reklamasi dan pascatambang, serta pascaoperasi; dan pemanfaatan teknologi, kemampuan rekayasa, rancang bangun, pengembangan, dan penerapan teknologi pertambangan (Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2018 Tentang Pelaksanaan Kaidah Pertambangan yang Baik).

Ketentuan dalam pelaksanaan teknis pertambangan salah satunya terkait dengan aspek hidrologi dan hidrogeologi maupun perencanaan tambang. Geokonservasi sistem hidrogeologi karst dilakukan sebagai upaya perlindungan fungsi air tanah untuk ketersediaan air tanah di masa depan. Geokonservasi sistem hidrogeologi karst dilakukan secara terintegrasi dengan perencanaan tambang dan pengelolaan lingkungan hidup. Perencanaan tambang meliputi penentuan metode penambangan yang sesuai dengan kondisi spasial, geoteknik, endapan, dan desain penambangan. Pengelolaan lingkungan hidup mencakup kegiatan pengelolaan tahap operasi produksi dan pascatambang.

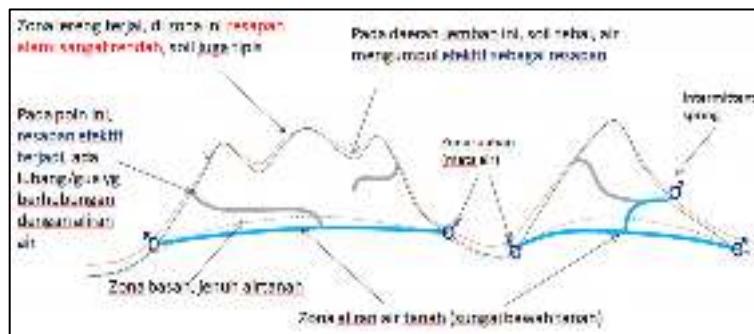
Keterdapatnya air tanah di sekitar daerah penelitian berupa mata air, gua berair yang berasosiasi dengan sungai bawah tanah, sumur bor, dan jaringan PDAM. Berdasarkan data sekunder, sistem akuifer pada daerah dataran karst memiliki kedalaman rata-rata 95m dan secara hidrologi didominasi dengan karakter akuifer semi tertekan. Air tanah dimanfaatkan baik untuk kebutuhan pokok sehari-hari (domestik) maupun untuk irigasi (Setiawan et al., 2019).

Kegiatan penambangan diawali dengan pembersihan lahan kemudian pengupasan top soil dan pengupasan batuan/tanah penutup (*overburden*) yang menutupi secara in situ batuan yang akan ditambang. Dampak yang akan timbul dari kegiatan pembersihan lahan adalah hilangnya vegetasi dan lapisan bagian atas batugamping (Gambar 1) serta terdapat potensi tertutupnya rekahan yang berfungsi sebagai porositas sekunder. Lapisan bagian atas batugamping (zona lereng terjal) merupakan resapan alami. Sedangkan pada lapisan bagian atas batugamping (zona lembah) merupakan resapan air yang efektif mengumpulkan air dan mengalirkan ke *watertable* melalui rekahan (Gambar 2).

Hilangnya vegetasi menyebabkan berkurangnya kuantitas resapan air. Berdasarkan data lapangan, sebelum kegiatan penambangan batugamping mempunyai nilai laju resapan air hujan sebesar 14.147.400m³/tahun. Sedangkan dengan kegiatan penambangan batugamping pada tahun pertama, diperkirakan nilai laju resapan air hujan berkurang menjadi 7.602.862m³/tahun atau terjadi penurunan sebesar 46,26%. Sebagai upaya geokonservasi, baik kegiatan pembersihan lahan maupun pengupasan top soil dan *overburden* dilakukan secara bertahap sesuai dengan perencanaan kemajuan tambang per tahun.



Gambar 1. Rona Awal Lingkungan Hidup Sebelum Kegiatan Penambangan



Gambar 2. Ilustrasi 2D Proses Hidrogeologi Daerah Karst

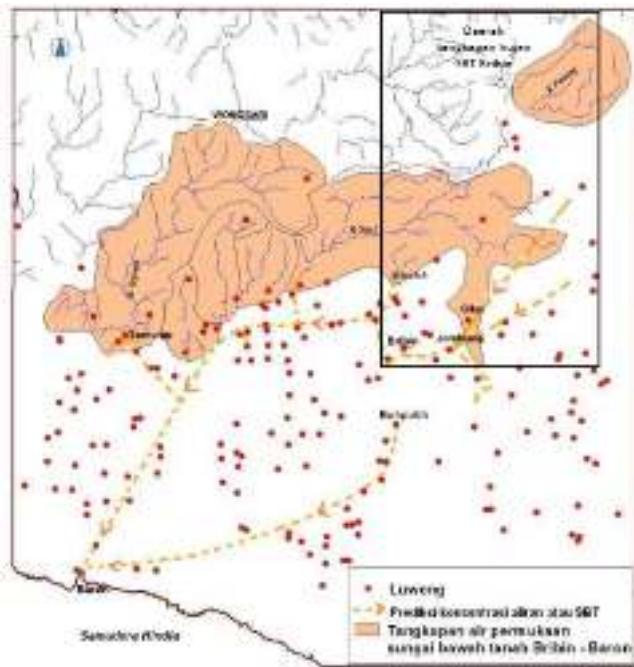
(Sumber: Iskandar, 2016 dalam Utomo, 2017)

Area penelitian merupakan kawasan resapan air dan bagian dari daerah tangkapan air hujan bagi Sungai Bawah Tanah Bribin-Baron (Gambar 3). Namun, di area penelitian tidak ditemukan aliran air permukaan aktif (sungai) atau mata air. Beberapa gua di sekitar area penelitian antara lain sebagai berikut:

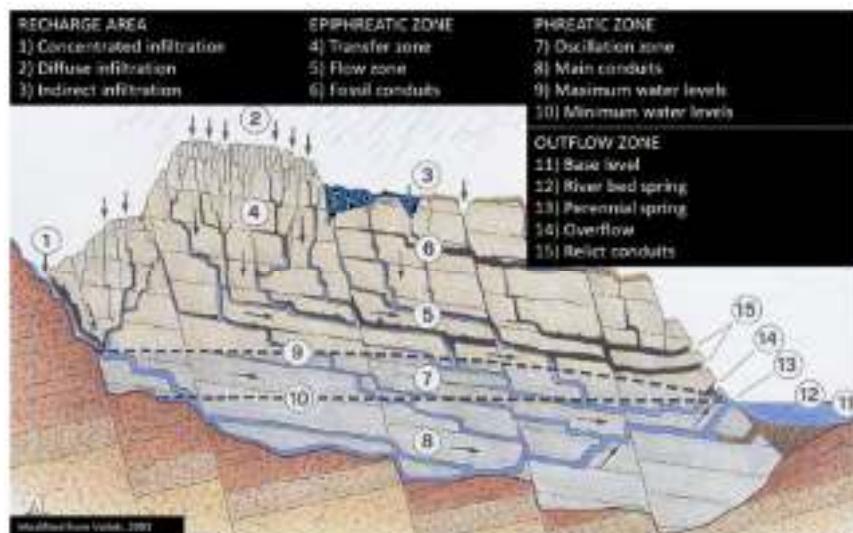
- Sebelah utara : Gua Song Gilap berjarak $\pm 6,8$ km; Gua Gremeng berjarak $\pm 11,2$ km
- Sebelah timur : Gua Tembus berjarak ± 8 km; Gua Putri Kencana berjarak $\pm 9,2$ kms
- Sebelah selatan : Gua Braholo berjarak $\pm 9,9$ km; Gua Bribin berjarak $\pm 15,6$ km
- Sebelah barat : Gua Jomblang berjarak $\pm 17,5$ km; Gua Jlamprong $\pm 11,7$ km;

Sesuai dengan kondisi spasial dan endapan, desain penambangan dibuat dengan pertimbangan rekayasa konservasi hidrogeologi. Batasan penambangan dalam rekayasa konservasi hidrogeologi area batugamping sesuai dengan Società Speleologica Italiana (2009) yang dimodifikasi dari Iskandar (2016) dalam Prihatmoko, 2017) meliputi:

- Penambangan tidak menghilangkan lubang ponor yang berhubungan langsung dengan sistem air tanah
- Tidak memotong zona basah (garis nomor 9 pada Gambar 4)
- Batas level penggalian ± 30 meter di atas muka air tanah (*watertable*) dan/atau batas akhir tambang sejajar dengan topografi jalan di sekitar area penambangan



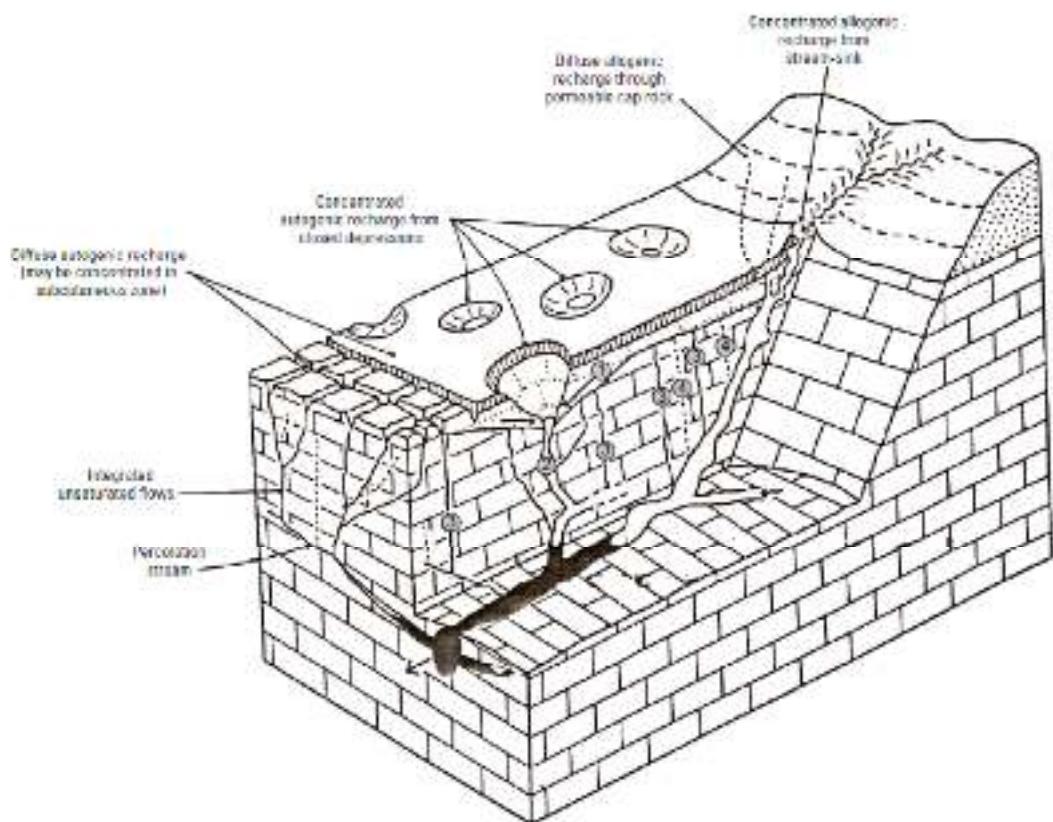
Gambar 3. Wilayah Tangkapan Air Sub Sistem Hidrogeologi Bribin-Baron
(Sumber: MacDonald & Partners, 1984 dalam Tjahyo, 2010)



Gambar 4. Akuifer di Batuan Karbonat
(Sumber: Società Speleologica Italiana, 2009 dalam Prihatmoko, 2017)

Kegiatan penambangan akan mengubah bentuk lahan yang berpengaruh pada sistem hidrogeologi. Karst sebagai akuifer tipe *low storage* dengan porositas rendah dan aliran air dalam karst dikontrol oleh rekahan. Apabila terjadi gangguan pada rekahan tersebut selama kegiatan penambangan, maka air tidak akan mengalir dan mengubah fungsi karst sebagai akuifer. Di samping itu, perubahan topografi akan berpotensi mengubah aliran air mataair.

Sebagai penanganan risiko, apabila dalam kegiatan penambangan ditemukan rekahan (*conduit/diffuse*) maka kegiatan penggalian dihentikan dan berpindah ke lokasi lain. Kemudian dilakukan penutupan dan penelitian karakteristik *conduit/diffuse* tersebut. Pada batuan karbonat air mengalir melalui rekahan melewati zona tak jenuh cepat dan secara turbulen (Gambar 5). Maka, dengan pertimbangan karakteristik batuan karbonat tersebut, arah aliran permukaan air tambang diatur agar tidak masuk pada area *conduit/diffuse* yang terbuka. Hal tersebut dilakukan sebagai langkah perlindungan terhadap kualitas air bawah tanah.

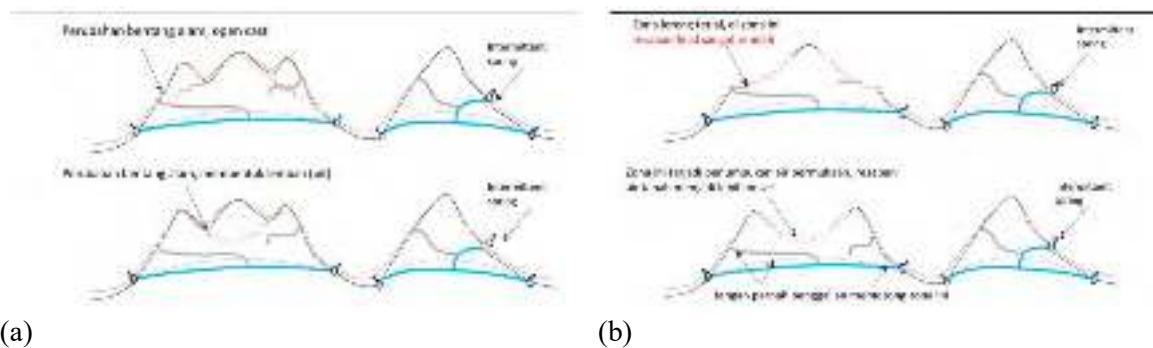


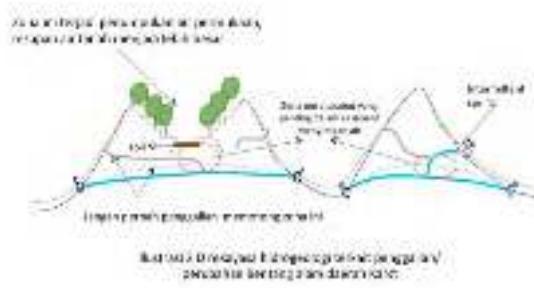
Gambar 5. Penampang Geologi karst menunjukkan berbagai tipe sumber resapan air. Air mengalir melewati zona tak jenuh melalui (1) aliran diffuse (2) aliran terkonsentrasi melalui saluran sinkhole (3) infiltrasi diffuse melalui rekahan vertikal, dan (4) infiltrasi diffuse melalui matriks batuan berpori.

Warna hitam pekat menunjukkan saluran bawah tanah yang terisi dengan air tanah

(Sumber: Dimodifikasi dari Gunn, 1986 dalam Taylor & Greene, 2008)

Gambar 6 menunjukkan ilustrasi rekayasa hidrogeologi untuk menambang tanpa merusak tatanan mataair. Penambangan sebaiknya tidak dilakukan dengan sistem *open cast* atau *side hill type*. Perubahan bentang alam dengan sistem penambangan *open cast* atau *side hill type* berisiko merusakan tatanan mata air serta meningkatkan air larian (*run off*). Akan tetapi, jika menggunakan sistem *open pit* maka area void (lubang bukaan) akan menampung air permukaan sehingga resapan air akan lebih besar seperti disajikan pada Gambar 6 huruf (a). Penambangan dengan sistem open pit dengan tetap memperhatikan batas akhir tambang ± 30 meter di atas muka air tanah (*water table*). Gambar 6 huruf (b) menunjukkan perbedaan besarnya zona resapan antara sistem *open cast/side hill type* dengan *open pit*. Gambar 6 huruf (c) menunjukkan sistem penambangan *open pit* dapat mempertahankan fungsi karst sebagai akuifer, meresapkan dan menyimpan air.





Gambar 6. Ilustrasi 2D Rekayasa Hidrogeologi
(Sumber: Iskandar, 2016 *dalam* Utomo, 2017)

KESIMPULAN

Bentang alam karst mewakili sebagian besar permukaan daratan bumi dan sebagai penyedia air minum bagi seperempat populasi penduduk secara global. Penelitian ini mengulas tentang geokonservasi nilai universal karst melalui rekayasa konservasi hidrogeologi untuk solusi perlindungan kawasan karst simultan penambangan batugamping yang berada di dalam dan/atau di dekat dengan kawasan karst. Sistem hidrogeologi karst dikontrol oleh rekahan sebagai porositas sekundernya. Sebagai upaya perlindungan fungsi karst sebagai penyedia air, kegiatan penambangan dilakukan sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku serta memperhatikan batasan penambangan dan melakukan penanganan risiko terhadap conduit dan mataair.

DAFTAR PUSTAKA

- An, L. Hao, Y. Yeh, T.J. Liu, Y. Liu, W. Zhang, B. (2020). Simulation of Karst Spring Discharge Using a Combination of Time-Frequency Analysis Methods and Long Short-Term Memory Neural Networks. *Journal of Hydrology*, 589, 1-14.

Badan Penataan Ruang Nasional. 2011. Posisi Indonesia dan Kerentanan terhadap Bencana. *Buletin Tata Ruang*, 5, 40-42.

Cahyadi, A. (2010). Pengelolaan Kawasan Karst dan Perannya dalam Siklus Karbon di Indonesia. Makalah disampaikan pada *Seminar Nasional Perubahan Iklim di Indonesia yang diselenggarakan oleh Sekolah Pascasarjana Universitas Gajah Mada, 13 Oktober 2010*.

Djakamihardja, A.S. & Mulyadi, D. (2013). Implikasi Penambangan Batugamping Terhadap Kondisi Hidrologi di Citeureup Kabupaten Bogor Jawa Barat. *Riset Geologi dan Pertambangan*, 23 (1), 49-60.

Endarto, R. Gunawan, T. Haryono, E. (2015). Kajian Kerusakan Lingkungan Karst sebagai Dasar Pelestarian Sumberdaya Air (Kasus di DAS Bribin Hulu Kabupaten Gunungkidul Daerah Istimewa Yogyakarta). *Majalah Geografi Indonesia*, 29 (1), 51-59.

Gongyu, L. & Wanfang, Z. (1999). Sinkholes in Karst Mining Areas in China and Some Methods of Prevention. *Engineering Geology*, 52, 45-50.

Hatheway, A.W. (2005). Quarrying. Dalam Selley, R.C. Cocks, L.R.M. Plimer, I.R. (Ed.). *Encyclopedia of Geology*. Elsevier Ltd.

Hartmann, A. Goldscheider, N. Wagener, N. Lange, J. Weiler, M. (2014). Karst Water resources in A Changing World: Review of Hydrological Modeling Approches. *Reviews of Geophysics*, 52, 218-242.

Jones, W.K. & White, W.B. (2019). Karst. Dalam White, W.B., Culver, D.C., Pipan, T. (Ed.). *Encyclopedia of Caves* (3thed.). Elsevier Inc.

Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1827 K/30/MEM/2018 tentang Pedoman Pelaksanaan Kaidah Teknik Pertambangan yang Baik.

Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3045 K/40/MEM/2014 tentang Penetapan Kawasan Bentang Alam Karst Gunung Sewu.

Kusumayudha, S.B. (2017). Mengenal Hidrogeologi Karst. Yogyakarta: Pohon Cahaya.

Liu, W. Li, Z. Zhu. J. Xu, C. Xu, X. (2020). Dominant Factors Controlling Runoff Coefficients in Karst Watershed. *Journal of Hydrology*, 590, 125-486.

Onac, B.P. & Beynen, P. (2021). Caves and Karst. Dalam Alderton, D. & Elias, S.A. (Ed.). *Encyclopedia of Geology* (2nded.). Elsevier Ltd.

- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 26 Tahun 2018 Tentang Pelaksanaan Kaidah Pertambangan yang Baik (Berita Negara Republik Indonesia Tahun 2018 Nomor 596)
- Peraturan Daerah Istimewa Yogyakarta Nomor 5 Tahun 2019 Tentang Rencana Tata Ruang Wilayah Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2019-2039 (Lembaran Daerah Daerah Istimewa Yogyakarta Tahun 2019 Nomor 5)
- Prihatmoko, S. (2017). Dilema Pengelolaan Kars Konservasi vs Pemanfaatan. *Berita IAGI*, X, 11-14.
- Setiawan, T. Isnaini, S. Asghaf, N.M.A. Effendi, I. (2019). Karakteristik Interaksi Air-CO₂-CaCO₃ dan Analisis Sistem Aliran Air Tanah Karst Musim Kemarau di Kab. Gunungkidul, Daerah Istimewa Yogyakarta, *Riset Geologi dan Pertambangan*, 29(2), 171-183.
- Sugiono & Yulhendra, D. (2019). Rancangan Teknis Penambangan Batukapur pada WIUP OP 412 Ha di PT Semen Padang. *Jurnal Bina Tambang*, 4 (3), 233-246.
- Taylor, C.J. & Greene, E.A. (2008). Hydrogeologic Characterization and Methods Used in the Investigation of Karst Hydrology. Dalam Rosenberry, D.O. & LaBaugh, J.W. (Ed.). *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*. U.S. Geological Survey.
- Tjahyo Nugroho Adji. (2010). Variasi Spasial-Temporal Hidrogeokimia dan Sifat Aliran Untuk Karakterisasi Sistem Karst Dinamis di Sungai Bawah Tanah Bribin, Kabupaten Gunungkidul, DIY. *Disertasi*, tidak dipublikasikan. Universitas Gajah Mada.
- Tyas, D.N. Vittadiawati, R. Nusantari, R. (2019). Konservasi dan Pemanfaatan Berkelanjutan Kawasan Karst Gunung Sewu Sebagai Bagian Geopark untuk Mempertahankan Fungsi Ekologi. *Prosiding Symbion (Symposium on Biology Education) yang diselenggarakan oleh Program Studi Pendidikan Biologi, FKIP Universitas Ahmad Dahlan, tanggal 27 Agustus 2016*. Yogyakarta: Universitas Ahmad Dahlan.
- Undang-Undang Nomor 3 Tahun 2020 Tentang Perubahan Atas Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 Tentang Pertambangan Mineral dan Batubara (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2020 Nomor 147; Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 6525)
- Undang-Undang Nomor 4 Tahun 2009 Tentang Pertambangan Mineral dan Batubara (Lembaran Negara Republik Indonesia Tahun 2009 Nomor 4; Tambahan Lembaran Negara Republik Indonesia Nomor 4959)
- Utomo, A.P. (2017). Adakah Jalan Tengah?. *Berita IAGI*, X, 8-10.
- Waele, J.D. Plan, L. & Audra, P. (2009). Recent Developments in Surface and Subsurface Karst Geomorphology: An Introduction. *Geomorphology*, 106 (1-2), 1-8.
- White, W.B. (2002). Karst Hydrology: Recent Developments and Open Questions. *Engineering Geology*, 65 (2-3), (85-105). Elsevier.
- White, W.B. (2019). Hydrogeology of Karst Aquifers. Dalam White, W.B. Culver, D.C. Pipan, T. (Ed.). *Encyclopedia of Caves* (3rded.). Elsevier Inc.
- Wu, Q. Xing, L. Zhou, W. (2010). Case Study: Utilization and Protection of Large Karst Springs in China. Dalam Kresic, N. & Stevanovic, Z. (Ed.). *Groundwater Hydrology of Springs*. Elsevier Inc.