

# PENGELOLAAN KAWASAN KARST DAN PERANANNYA DALAM SIKLUS KARBON DI INDONESIA

Ahmad Cahyadi

Jurusan Geografi Lingkungan

Fakultas Geografi, Universitas Gadjah Mada

[ahmadcahyadi@geo.ugm.ac.id](mailto:ahmadcahyadi@geo.ugm.ac.id)

## INTISARI

Karst adalah suatu istilah yang digunakan untuk menyebutkan suatu bentuklahan yang terbentuk oleh proses pelarutan (solusional). Kawasan karst di Indonesia memiliki luas kurang lebih 15,4 juta hektar. Namun demikian, kawasan ini memiliki peranan penting dalam siklus karbon di Indonesia, khususnya dalam proses penyerapan karbondioksida yang terjadi dalam proses karstifikasi atau pelarutan.

Peranan kawasan karst di Indonesia dalam penyerapan karbondioksida memiliki fungsi strategis berkaitan dengan adanya fenomena ITCZ (*Intertropic Convergence Zone*) yang menyebabkan adanya aliran masa udara menuju daerah tropis. Aliran ini berasal dari 30<sup>o</sup> lintang utara dan 30<sup>o</sup> lintang selatan yang tidak hanya membawa uap air, namun juga membawa berbagai gas rumah kaca dan polutan udara yang lain. Oleh karena itu, maka Indonesia membutuhkan penyerap karbondioksida yang cukup banyak agar jumlahnya di atmosfer tidak berlebihan dan menyebabkan berbagai dampak negatif. Selain itu, curah hujan di Indonesia yang tinggi memungkinkan terjadinya proses pelarutan yang intensif sehingga proses penyerapan karbondioksida dapat berjalan dengan baik. Berkaitan dengan hal di atas, maka pengelolaan kawasan karst melalui zonasi kawasan karst menjadi sangat penting untuk dilakukan, sehingga fungsi penyerapan karbondioksida di kawasan karst di Indonesia dapat terus berlangsung dengan baik.

**Kata Kunci:** Karst, Penyerapan Karbondioksida, Pengelolaan Kawasan Karst

Karst adalah sebuah istilah dalam Bahasa Jerman yang diturunkan dari Bahasa Slovenia yang berarti lahan gersang berbatu (Haryono dan Adji, 2004). Istilah tersebut sebenarnya menggambarkan kondisi yang sering ditemui di banyak daerah yang berbatuan karbonat atau batuan lain yang memiliki sifat mudah larut. Akibat terjadinya proses pelarutan (solusional/karstifikasi), maka terbentuklah suatu sistem hidrologi yang unik. Sistem hidrologi kawasan karst sangat dipengaruhi oleh porositas sekunder yang menyebabkan air masuk ke dalam sistem aliran bawah tanah dan menyebabkan kondisi kering di permukaan.

### **Karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan Pemanasan Global**

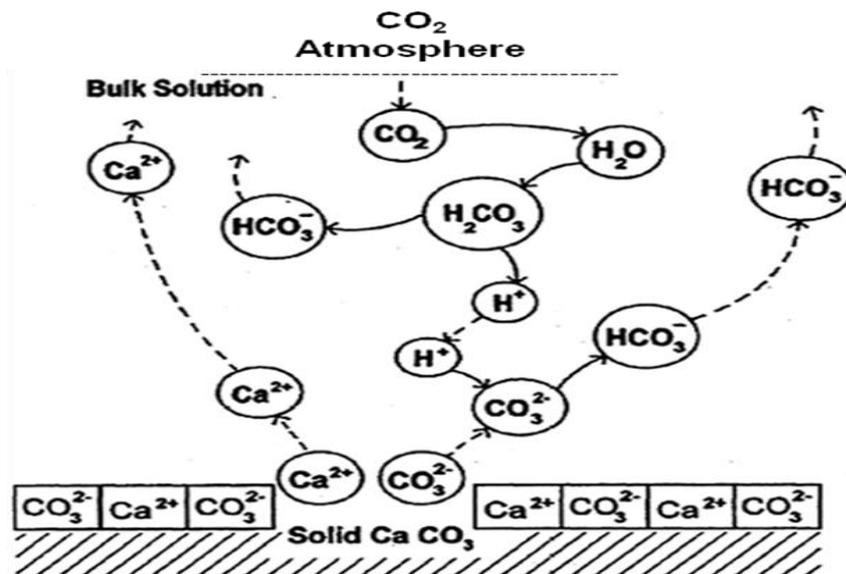
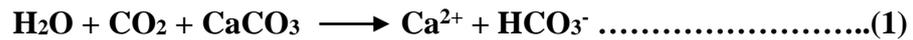
Karbondioksida adalah molekul yang tersusun atas unsur karbon dan oksigen. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) merupakan salah satu penyebab pemanasan global selain beberapa gas lain seperti CH<sub>4</sub>, CFC, N<sub>2</sub>O, dan O<sub>3</sub>. Gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) dipakai sebagai komparasi terhadap kenaikan temperatur akibat adanya kenaikan gas rumah kaca karena memberi kontribusi terbesar dalam pemanasan global yakni 50%, sedangkan gas CFC berkontribusi sebesar 20%, CH<sub>4</sub> sebesar 15%, O<sub>3</sub> sebesar 8% dan NO<sub>x</sub> berkontribusi sebesar 7% (Cahyono, 2009).

Meskipun karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) berkontribusi paling besar, sebenarnya karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) memiliki nilai *global warming potential* (GWP) terkecil dibandingkan dengan gas rumah kaca yang lain (Adiningsih, 2009). Kontribusi yang besar disebabkan karena konsentrasinya terbesar dibandingkan gas rumah kaca yang lain, yakni mencapai 800 gigaton karbon di atmosfer (Sumaryati, 2009). Hal ini diantaranya disebabkan karena senyawa CO, CH<sub>4</sub>, dan senyawa hidrokarbon non-metan lainnya pada akhirnya akan berubah menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), misalnya karbon monoksida (CO) akan berubah menjadi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) setelah 2-3 bulan terbentuk.

### **Keterkaitan Karst dan Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)**

Penyerapan karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) di kawasan karst terjadi pada proses karstifikasi. Proses ini diawali dengan larutnya karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) di dalam air membentuk H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Larutan H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> bersifat tidak stabil sehingga terurai menjadi HCO<sub>3</sub><sup>2-</sup> dan H<sup>+</sup>. Ion H<sup>+</sup> inilah yang kemudian akan menguraikan batugamping

( $\text{CaCO}_3$ ) menjadi  $\text{Ca}^{2+}$  dan  $\text{HCO}_3^-$ . Proses karstifikasi berlangsung dengan kesetimbangan reaksi kimia tertentu, di mana setiap pelarutan 1 ton batugamping ( $\text{CaCO}_3$ ) akan diikuti dengan penyerapan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) sebanyak 0,12 ton dari atmosfer (Gambar 1). Berikut ini adalah reaksi yang terjadi pada proses pelarutan batu gamping:



Gambar 1. Penyerapan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) dari atmosfer pada proses pelarutan batu gamping, di mana setiap pelarutan 1 ton batu gamping akan diikuti penyerapan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) sebesar 0,12 ton dari atmosfer (Adji, 2009)

### Perhitungan Karbondioksida yang Terserap dari Atmosfer oleh Proses Pelarutan Batuan Karbonat

Peranan kawasan karst dalam penyerapan karbondioksida pertama kali diperkenalkan dalam program dari UNESCO/IUGS IGCP 299 dengan tema program “Geologi, Iklim, Hidrologi dan Formasi Karst” pada tahun 1990-1994, dan kemudian diteruskan dalam UNESCO/IUGS IGCP 379 yang bertemakan “Karstifikasi dan Siklus Karbon” pada tahun 1995-1999 (Daoxian, 2002). Pedoman IGCP 299 adalah untuk menginvestigasi morfologi karst dan hubungannya dengan

kondisi lingkungan seperti; air, panas, energi kimia dan bioenergi serta kemudian menentukan mekanisme fisika-kimia dari bentukan karst. Kesimpulan dari IGCP 299 mengindikasikan bahwa studi karst bisa sangat membantu untuk memahami siklus karbon global dan dengan demikian dapat berkontribusi lebih jauh untuk memahami perubahan global. Oleh karena itu, maka kemudian muncul program kedua yakni UNESCO/IUGS IGCP 379 yang bertujuan untuk:

- a. Untuk menghitung kontribusi dari batuan karbonat dan proses-proses di kawasan karst untuk mengisi CO<sub>2</sub> di atmosfer;
- b. Untuk membandingkan keseimbangan CO<sub>2</sub> tahunan antara atmosfer dan sistem karst dalam lingkungan geologi, iklim, dan ekologi yang berbeda;
- c. Untuk menentukan asal mula dan jumlah emisi CO<sub>2</sub> tahunan ke dalam atmosfer dari kawasan karst dengan aktivitas geotermal atau vulkanik atau patahan aktif, terutama di daerah dekat dengan batas lempeng;
- d. Untuk menyediakan informasi tentang proses-proses perubahan lingkungan setelah akhir pleistosen dalam sebagian besar kawasan karst dunia, terutama pada suatu wilayah dengan tanpa bagian lingkungan masa lalu.

Hasil penelitian yang dikeluarkan dari program tersebut diantaranya adalah bahwa penyerapan karbon tahunan secara global dari atmosfer oleh proses karstifikasi diperkirakan sekitar  $1,5 \times 10^9$  ton per tahun, dan karst di China berkontribusi sebesar  $9,46 \times 10^8$  ton per tahun (Daoxian, 2002). Perhitungan tersebut dilakukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$C = Q \cdot \left[ \frac{HCO_3}{2} \times \frac{12}{61} \right] \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

C = Volume karbondioksida yang terserap dalam proses karstifikasi  
( $\text{m}^3/\text{year}/\text{km}^2$ )

Q = Runoff per desa (Presipitasi – Evaporasi) (dm)

$\text{HCO}_3$  = Konsentrasi  $\text{CaCO}_3$  dalam air yang keluar melalui mata air (mg/l)

### **Fungsi Strategis Kawasan Karst Indonesia**

Kawasan karst di Indonesia memiliki fungsi yang sangat strategis dalam penyerapan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ). Hal tersebut berkaitan dengan posisi Indonesia yang terletak di kawasan tropis, di mana terpengaruh sistem gerakan atmosfer secara global. Gerakan atmosfer secara global yang berpengaruh terhadap kadar karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) di wilayah tropis diantaranya adalah gerakan yang ditimbulkan oleh fenomena *intertropical convergence zone* (ITCZ). Keberadaan ITCZ menyebabkan terjadinya gerakan massa udara dari  $30^0$  LU dan  $30^0$  LS menuju wilayah tropis. Hal tersebut tentunya tidak hanya membawa massa udara saja, tetapi membawa uap air, gas-gas penyebab efek rumah kaca dan lain-lain. Oleh karena itu, penyerapan karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) oleh kawasan karst di daerah tropis menjadi sangat penting dalam upaya mencegah atau mengurangi dampak pemanasan global akibat konsentrasi karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) yang berlebihan.

Curah hujan menjadi faktor yang sangat berpengaruh terhadap proses karstifikasi. Karstifikasi hanya terjadi apabila kawasan batuan karbonat terletak pada wilayah dengan curah hujan lebih dari 250 mm/tahun, semakin besar curah hujannya maka proses karstifikasi akan berjalan dengan lebih intensif. Hal ini berarti bahwa proses karstifikasi di kawasan karst Indonesia akan berlangsung dengan sangat intensif karena Indonesia yang terletak di daerah tropis yang memiliki curah hujan tinggi. Pengaruh curah hujan terhadap kecepatan pelarutan batuan gamping dapat dilihat dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Putro (2010) yang menyebutkan bahwa proses pelarutan yang terjadi di Kawasan Karst Jonggrangan, Kabupaten Kulon Progo dengan curah hujan rata-rata 2.516 mm/tahun ternyata lebih besar dibandingkan dengan kecepatan pelarutan yang

terjadi di Karst Gunungsewu di Kabupaten Gunungkidul, Wonogiri dan Pacitan yang memiliki curah hujan rata-rata curah hujan 2.051 mm/tahun. Hasil kajian terkait dengan laju pelarutan kawasan karst Gunungsewu dan Jonggrangan ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Laju Pelarutan Gamping

Parameter	Karts Jonggrangan	Karst Gunungsewu
Hujan Wilayah (dm/tahun)	25,16	20,51
Evapotranspirasi (dm)	15,71	16,42
Run Off (dm)	9,45	4,09
Konsentrasi CaCO <sub>3</sub> (mg/l)	215	218
Laju Pelarutan Gamping (ton/tahun/km <sup>2</sup> )	42,97	18,86

Sumber: Putro (2010)

Berdasarkan hasil penelitian di atas, maka kemudian dapat pula diperhitungkan jumlah penyerapan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) pada masing-masing wilayah. Penyerapan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) di Kawasan Karst Jonggrangan oleh proses pelarutan batu gamping adalah sebesar 5,16 ton/tahun/km<sup>2</sup>, sedangkan penyerapan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) di Kawasan Karst Gunungsewu oleh proses pelarutan batu gamping adalah sebesar 2,26 ton/tahun/km<sup>2</sup>. Berdasarkan perhitungan tersebut, maka berarti bahwa Kawasan Karst Jonggrangan yang memiliki luas kurang lebih 25 km<sup>2</sup> berpotensi menyerap karbondioksida (CO<sub>2</sub>) sebesar 12.900 ton/tahun, sedangkan Kawasan Karst Gunungsewu yang memiliki luas 1.300 km<sup>2</sup> berpotensi menyerap karbondioksida (CO<sub>2</sub>) sebesar 293.800 ton/tahun.

### **Permasalahan Kawasan Karst di Indonesia dan Pengaruhnya terhadap Penyerapan Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)**

Fungsi penyerapan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) di kawasan karst di Indonesia dewasa ini menjadi terganggu, diantaranya akibat adanya penambangan batu gampig. Penambangan batu gamping di kawasan karst di Indonesia seringkali

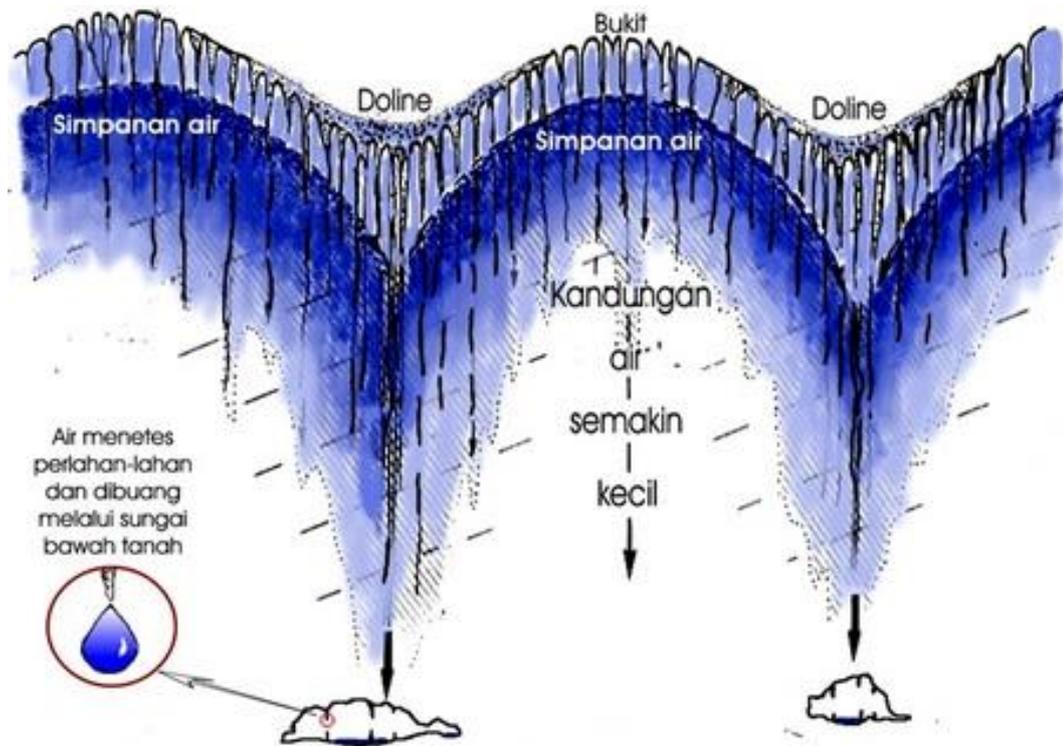
dilakukan dengan cara *overburden* (pengelupasan) kerucut karst baik secara manual (dengan tenaga manusia) ataupun dengan menggunakan alat berat. Proses penambangan ini menyebabkan hilangnya lapisan epikarst pada batuan gamping sehingga proses karstifikasi tidak dapat terjadi (Gambar 2).



Gambar 2. Penambangan Batu Gamping di Bedoyo, Gunungkidul  
(Ahmad Cahyadi, 2009)

Lapisan epikarst adalah lapisan tipis yang berda di bagian atas bamping yang terbentuk oleh tanah atau rekahan-rekahan yang mampu menyimpan air (Haryono, 2002). Proses karstifikasi sangat tergantung dengan keberadaan lapisan epikarst karena kemampuan meloloskan air batuan gamping rendah, sehingga dibutuhkan suatu lapisan penyimpan air yang berguna untuk menampung air selama belum terloloskan di dalam batuan gamping. Setelah air melewati pori-pori batuan gamping, maka proses karstifikasi baru akan dimulai. Ketiadaan lapisan epikarst akan menyebabkan air langsung mengalir sebagai aliran permukaan (*runoff*),

sehingga dalam waktu singkat akan mudah mengalami penguapan dan tidak menyebabkan terjadinya karstifikasi.



Gambar 3. Lapisan Epikarst (Haryono dan Adji, 2004)

### **Pengelolaan Kawasan Karst sebagai Upaya Menjaga Fungsi Penyerapan Karbondioksida (CO<sub>2</sub>)**

Pengelolaan kawasan karst diartikan sebagai kegiatan yang meliputi inventarisasi, penyelidikan, pemanfaatan, dan perlindungan sumberdaya pada kawasan karst (Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tentang pengelolaan kawasan karst). Fungsi utama dari pengelolaan kawasan karst adalah untuk mengoptimalkan pemanfaatan kawasan karst guna menunjang pembangunan yang berkelanjutan dan berwawasan lingkungan.

Perlindungan kawasan karst di dunia pertama kali dimulai pada tahun 1997 oleh *World Conservation Union (WCU)* yang dahulu bernama *Internasional Union for Conservation Nature (IUCN)* yang bertujuan untuk melindungi daerah tangkapan air di kawasan karst (Ariyanto, 2006). Pengelolaan kawasan karst di Indonesia dilakukan sejak dikeluarkannya Surat Keputusan Menteri Pertambangan dan Energi Nomor 1518 K/20/MPE/1999 tanggal 29 September 1999, yang kemudian direvisi dengan Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tanggal 3 November 2000 mengenai pedoman pengelolaan kawasan karst. Hal yang paling membanggakan dalam sejarah pengelolaan kawasan karst di Indonesia adalah ketika pada tanggal 26-30 Mei 2001 Kawasan Karst Gunungsewu mendapatkan penghargaan dari *Asia-pasific Forum on Karst Ecosystems and World Heritage* sebagai *World Natural Heritage*.

Zonasi kawasan karst menjadi salah satu tahapan yang paling penting dalam pengelolaan kawasan karst. Hasil zonasi kawasan karst dapat digunakan sebagai suatu acuan dalam menentukan kegiatan pembangunan yang akan dilakukan di suatu kawasan karst. Salah satu dasar pemikiran pelaksanaan zonasi kawasan karst adalah karena tidak semua wilayah dengan batuan karbonat (gamping atau dolomit) dapat membentuk kawasan karst. Tingkat perkembangan karst pada batuan karbonat ditentukan oleh beberapa syarat berikut ini:

- a. Terdapat batuan yang mudah larut, kompak, tebal dan mempunyai banyak retakan. Batuan yang mudah larut dapat berupa gamping, dolomit dan gipsum. Semakin tinggi kemurnian batumannya, maka proses pelarutan akan semakin baik. Pembentukan topografi karst memerlukan minimal 50% kemurnian dari batuan yang terlarut, namun demikian proses karstifikasi akan berjalan baik apabila kandungan batuan yang mudah larut adalah lebih dari 90% tetapi kurang dari 96%.
- b. Memiliki curah hujan yang cukup tinggi. Faktor curah hujan menjadi sangat penting karena hujan merupakan media pelarut dalam proses karstifikasi. Oleh karena itu, maka semakin tinggi curah hujan maka proses pelarutan akan semakin intensif.

- c. Batuan yang mudah larut terangkat di ketinggian yang memungkinkan perkembangan sirkulasi atau drainase secara vertikal. Syarat ini penting ada agar terjadi jarak yang cukup antara batuan gamping yang tidak jenuh air dengan muka airtanah, sehingga mampu terbentuk drainase air secara vertikal. Hal ini berarti bahwa semakin tinggi batuan karbonat terangkat, maka proses karstifikasi akan semakin intensif.

Wilayah dengan batuan karbonat yang tidak mengalami karstifikasi memiliki risiko pemanfaatan yang lebih kecil dibandingkan dengan kawasan karst yang berkembang dengan baik. Namun demikian, perlu pula dipertimbangkan fungsi suatu wilayah dalam perlindungan sumberdaya air, lingkungan budaya dan sejarah, serta perlindungan terhadap keberadaan makhluk hidup (baik tumbuhan ataupun hewan). Oleh karena itu dengan adanya zonasi kawasan karst ini maka kemudian dapat disusun suatu rencana pengelolaan lingkungan yang lebih baik. Misalnya dengan memindahkan lokasi penambangan batu gamping ke wilayah berbatuan gamping yang tidak mengalami karstifikasi atau proses karstifikasi berkembang tidak intensif, sehingga fungsi hidrologis dan penyerapan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) serta fungsi lindung lainnya tidak terganggu.

Proses zonasi kawasan karst dapat dilakukan dengan menggunakan teknologi penginderaan jauh untuk lebih mudah dalam melakukan delineasi suatu kawasan karst. Kawasan karst yang berkembang baik akan dicirikan dengan terbentuknya kerucut-kerucut karst atau menara karst, banyak dijumpai dolin dan memiliki topografi yang sangat kasar serta tidak ditemukan adanya sungai permukaan. Kawasan karst berkembang sedang dicirikan dengan bentuknya yang lebih halus dan mulai ditemukan aliran permukaan yang pendek dan hilang di suatu tempat (lembah buta). Meskipun demikian, proses ini harus ditindak lanjuti dengan menggabungkan dengan data spasial lain seperti peta geologi, peta rupa bumi, serta dilakukan survei lapangan untuk mengetahui tingkat kebenaran delineasi yang telah dilakukan.

Zonasi kawasan karst akan menghasilkan suatu peta tentang klasifikasi wilayah dalam tiga kelompok yakni Kawasan karst kelas I, II dan III. Berikut ini adalah penjelasan kriteria klasifikasi menurut Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tentang pengelolaan kawasan karst:

a. Kawasan Karst kelas I

Kawasan karst kelas I meliputi kawasan karst yang memiliki salah satu fungsi dari beberapa hal berikut:

- 1) Kawasan yang berfungsi sebagai kawasan penyimpan air secara tetap dalam bentuk akuifer, sungai bawah tanah, telaga, atau danau bawah tanah;
- 2) Kawasan yang memiliki gua-gua dan sungai-sungai bawah tanah yang aktif yang membentuk jaringan baik secara horisontal ataupun vertikal;
- 3) Kawasan yang memiliki gua-gua dengan *speleothem* (ornamen-ornamen gua) yang aktif atau peninggalan sejarah sehingga berpotensi dikembangkan sebagai objek wisata; atau
- 4) Kawasan yang memiliki flora dan fauna khas yang memenuhi arti dan fungsi sosial, ekonomi, budaya serta pengembangan ilmu pengetahuan.

b. Kawasan Karst Kelas II

Kawasan karst kelas II adalah kawasan karst yang tidak memiliki kriteria yang disebutkan dalam kawasan karst kelas I namun memiliki salah satu dari kriteria berikut ini:

- 1) Kawasan yang berfungsi sebagai pengimbuh air bawah tanah berupa daerah tangkapan air hujan yang mempengaruhi naik turunnya permukaan air bawah tanah kawasan karst sehingga secara umum masih mendukung fungsi hidrologi kawasan karst; atau
- 2) Kawasan yang berfungsi sebagai jaringan lorong-lorong bawah tanah hasil bentukan sungai dan gua yang sudah kering, serta menjadi

tempat tinggal yang tetap fauna yang semuanya dapat memberi nilai dan manfaat ekonomi.

c. Kawasan Karst Kelas III

Kawasan karst kelas III adalah kawasan yang tidak memiliki kriteria sebagaimana yang disebutkan dalam kawasan karst kelas I dan II.

### **Rekomendasi**

Zonasi kawasan karst dalam mendukung pengelolaan kawasan karst saat ini belum dilakukan oleh semua pemerintah-pemerintah daerah di Indonesia yang memiliki kawasan karst sehingga penyusunan rencana pembangunan dan rencana tata ruang daerah belum mempertimbangkan kemungkinan untuk meminimalisir suatu dampak lingkungan akibat kegiatan pemanfaatan dan eksploitasi di kawasan karst. Mengingat pentingnya zonasi kawasan karst dalam pengelolaan kawasan karst dan menunjang pengelolaan lingkungan yang berkelanjutan, maka diperlukan suatu aturan yang mewajibkan dilakukannya proses zonasi kawasan karst dalam membuat rencana pemanfaatan kawasan karst atau rencana tata ruang wilayah yang berisi pula tentang standar-standar serta aturan-aturan teknis untuk melakukan zonasi tersebut yang lebih detail, sehingga pemanfaatan dan eksploitasi di kawasan karst dapat diminimalisir dampaknya, termasuk dapat menjaga fungsi hidrologis dan penyerapan karbondioksida (CO<sub>2</sub>) serta fungsi lindung lainnya di kawasan karst di Indonesia.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adiningsih, E.S. 2009. Bencana Iklim di Indonesia Menjadi Agenda Sidang di UNCOPUOS-PBB. **Media Dirgantara**, 4(2): 4-9.
- Adji, T.N. 2009. Atmospheric Carbondioxide Sequestration Trough Karst Denudation Process (Preliminary Estimation from Gunung Sewu Karst Area). **Laporan Penelitian**. Karst Research Group Faculty of Geography Gadjah Mada University.
- Ariyanto, K.N. 2006. Pemberdayaan Masyarakat Kawasan Karst Gunung Sewu: Upaya Menuju *World Natural Heritage*. **Laporan Penelitian**. Sekolah Pasca Sarjana Ilmu Lingkungan Universitas Gadjah mada Yogyakarta.
- Cahyadi, A. 2009. **Zonasi Kawasan Karst di Indonesia sebagai Salah Satu Upaya Menjaga Penyerapan Karbondioksida**. Makalah dalam Earth's Challenge di IPB Bogor, 5 Juni 2010.
- Cahyono, E.W. 2009. Telah Terjadi Dampak Pemanasan Global Terhadap Ekosistem. **Media Dirgantara**, 4(2):14-17.
- Daoxian, Y. 2002. **The Carbon Cycle in Karst**. IGCP Report.
- Haryono, E. 2002. Laporan Akhir Zonasi Kawasan Karst Kabupaten Wonogiri. **Laporan Penelitian**. BAPPEDA Kabupaten Wonogiri dan Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.
- Haryono, E. dan Adji, T.N. 2004. **Pengantar Geomorfologi dan Hidrologi Karst**. Yogyakarta: Kelompok Studi Karst Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.
- Keputusan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 1456 K/20/MEM/2000 tentang pengelolaan kawasan karst.
- Putro, S.T. 2010. Laju Pelarutan Batuan Karbonat di Karst Gunungsewu dan Karst Jonggrangan. *Skripsi*. Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada.

Sumaryati. 2009. Meminimalisasi Dampak Gas Rumah Kaca dan Polusi Udara di Atmosfer. **Media Dirgantara**, 4(2):18-24.