



Potensi Serapan Karbon Inorganik pada Kawasan Karst Tropis di Karst Biduk-Biduk, Kalimantan Timur

Potential of Inorganic Carbon Uptake in Tropical Karst Areas in the Biduk-Biduk Karst, East Kalimantan

D. Danardono¹

Fakultas Geografi Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia

Eko Haryono

Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

M. Widyastuti

Fakultas Geografi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta, Indonesia

Artikel Masuk : 8 September 2021

Artikel Diterima : 16 Desember 2022

Tersedia Online : 31 Desember 2022

Abstrak: Peningkatan emisi karbon di Indonesia menjadi masalah yang perlu ditangani, salah satunya melalui inventarisasi kawasan yang potensial menyerap karbon. Salah satu kawasan yang potensial menyerap karbon inorganik yaitu kawasan karst melalui proses karstifikasi. Namun, penelitian tentang serapan karbon inorganik di kawasan karst utamanya di kawasan karst tropis masih jarang diteliti. Potensi serapan karbon inorganik ini perlu dikaji untuk mengetahui peran penting kawasan karst dalam upaya pengurangan emisi karbon global. Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengidentifikasi potensi nilai serapan karbon inorganik di Kawasan Karst Biduk-Biduk dan nilai pentingnya dalam mendukung upaya pengurangan emisi karbon di Indonesia. Serapan karbon inorganik dihitung berdasarkan nilai laju pelarutan batuan karbonat menggunakan *standard limestone tablet*. Nilai penting kawasan karst dalam pengurangan emisi karbon dimodelkan dengan perbandingan nilai total serapan karbon inorganik di kawasan karst dan nilai emisi karbon di Indonesia. Hasil kajian menunjukkan bahwa potensi yang dimiliki Karst Tropis Biduk-Biduk untuk menyerap karbon inorganik sebesar 726,864 tons/years-CO₂. Serapan karbon inorganik menunjukkan adanya variasi berdasarkan perbedaan kondisi morfologi permukaan, yaitu pada wilayah dengan kemiringan lereng datar memiliki nilai serapan karbon inorganik lebih besar. Nilai ini dapat membantu untuk mengurangi emisi karbon di Kalimantan Timur sebesar 7,3% dan Indonesia sebesar 0,5%. Hal ini menunjukkan bahwa perlunya konservasi kawasan karst untuk mendukung program pengurangan emisi karbon di Indonesia.

Kata Kunci: karbon inorganik; karst; *limestone tablets*; pelarutan; serapan karbon

¹ Korespondensi Penulis: Fakultas Geografi, Universitas Muhammadiyah Surakarta, Surakarta, Indonesia
Email: danardono@ums.ac.id

Abstract: The increase in carbon emissions in Indonesia is a problem that needs to be mitigated. One of the ways is to make an inventory of areas that have the potential to absorb carbon. One of areas that has the potential to absorb inorganic carbon is the karst area through the karstification process. However, research on inorganic carbon sequestration in karst areas, especially in tropical karst areas, is rarely studied. This potential needs to be studied to determine the important role of karst areas in efforts to reduce global carbon emissions. This study aims to identify the potential value of inorganic carbon sequestration; in Biduk-Biduk Karst Area and this efforts to reduce carbon emissions in Indonesia. Inorganic carbon sequestration was calculated based on the dissolution rate of carbonate rocks using standard limestone tablets. The efforts of karst areas to reduce carbon emissions was modeled by comparing the total value of inorganic carbon sequestration in karst areas with the value of carbon emissions in Indonesia. The results showed that the potential of the Biduk-Biduk Tropical Karst to absorb inorganic carbon is 726.864 tons/year-CO₂. Inorganic carbon uptake shows variation based on differences in surface morphology, where areas with flat slopes have a higher inorganic carbon sequestration. This value can help to reduce carbon emissions in East Kalimantan by 7.3% and Indonesia by 0.5%. Therefore, conservation of karst areas is important to do to support carbon emission reduction programs in Indonesia.

Keywords: carbon sequestration; dissolution rate; inorganic carbon; karst; limestone tablets

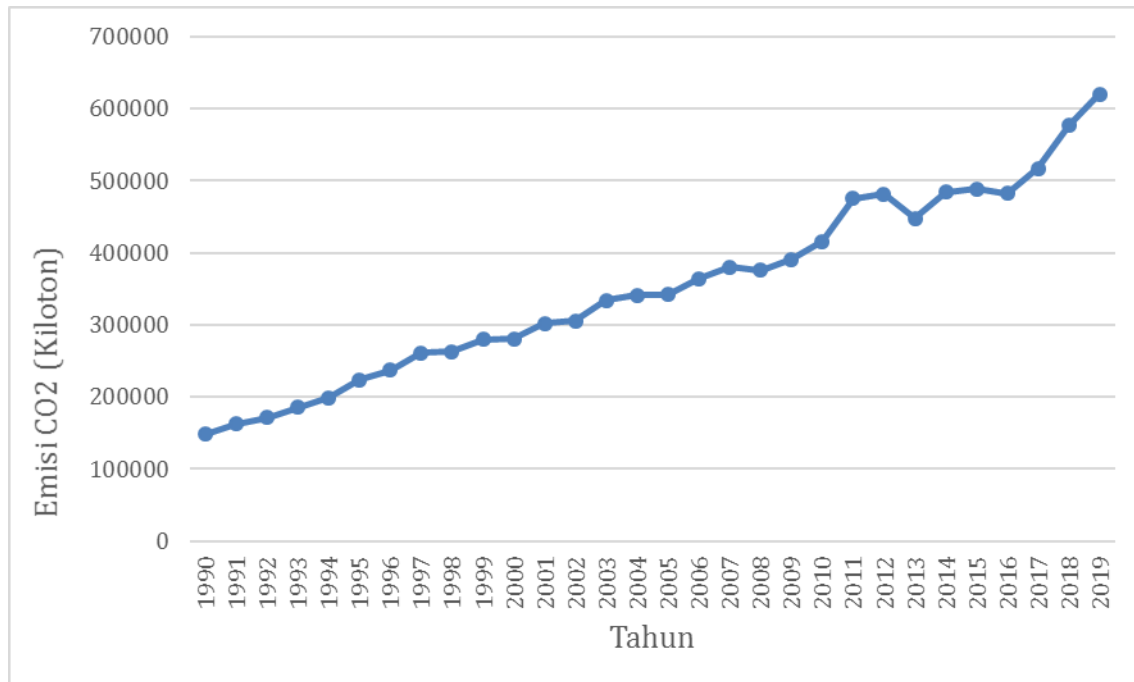
Pendahuluan

Karbon utamanya karbondioksida termasuk dalam salah satu gas rumah kaca yang menjadi penyebab terjadinya perubahan iklim global. Proporsi karbondioksida di atmosfer memiliki nilai terbesar dibandingkan gas rumah kaca lainnya. Besarnya proporsi karbondioksida di atmosfer disebabkan karena adanya peningkatan kadar karbondioksida yang dihasilkan oleh lapisan biosfer.

Peningkatan kadar karbondioksida di atmosfer telah terjadi pada beberapa dekade lalu. Berdasarkan data IPCC (2013) menyebutkan bahwa tren peningkatan konsentrasi karbondioksida di atmosfer telah terjadi sejak tahun 1870 atau saat terjadinya revolusi industri di Eropa. Peningkatan kadar karbondioksida disebabkan karena semakin meningkatnya emisi karbondioksida yang dilepas oleh lapisan biosfer ke atmosfer. Emisi karbondioksida yang dilepaskan ke atmosfer didominasi oleh aktivitas antropogenik melalui pembakaran bahan bakar fosil. International Energy Agency menyebutkan emisi karbondioksida yang dilepas oleh aktivitas antropogenik sebesar 32 juta ton pertahun dengan rata-rata konsentrasi di atmosfer sebesar 397 ppm pada tahun 2013 (International Energy Agency, 2018). Nilai emisi tersebut semakin meningkat sebesar 1,5% hingga tahun 2017.

Peningkatan kadar emisi karbondioksida juga terjadi di Negara Indonesia, pada rentang tahun 1990 sampai 2019 terjadi tren peningkatan kadar karbondioksida yang dihasilkan dari berbagai aktivitas manusia. Berdasarkan data yang dikeluarkan oleh World Bank, terjadi peningkatan emisi karbondioksida di Indonesia sebesar 400% selama rentang waktu 30 tahun. Data peningkatan emisi karbondioksida di Indonesia dapat dilihat pada Gambar 1. Oleh karena itu, perlu adanya upaya untuk mengurangi emisi karbondioksida di Indonesia agar dampak yang ditimbulkan akibat perubahan iklim dapat diminimalkan.

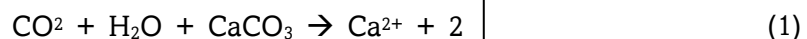
Upaya pengurangan emisi karbon telah diteliti dan digagas oleh para ahli melalui penentuan neraca dan siklus karbon global (Jianhua Cao et al., 2016; Pan et al., 2011). Perhitungan neraca karbon global dimaksudkan untuk mengidentifikasi potensi serapan karbondioksida sehingga dapat menyeimbangkan nilai emisi karbondioksida. Identifikasi potensi serapan dilakukan pada setiap lapisan dan wilayah di permukaan bumi untuk mencari sumber penyerap karbon berupa karbon organik maupun inorganik.



Sumber: World Bank, 2021

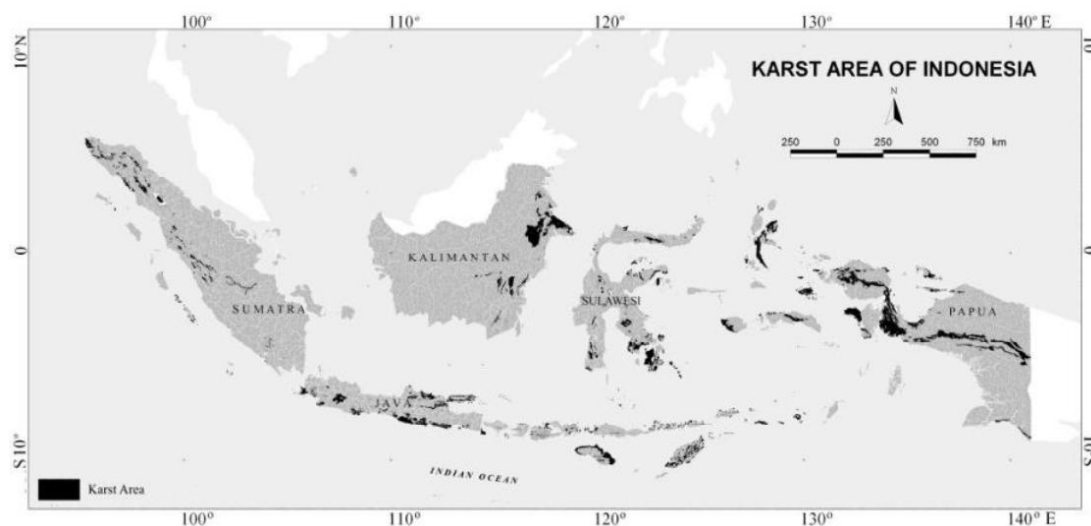
Gambar 1. Tren Peningkatan Emisi Karbondioksida di Indonesia

Karst merupakan salah satu bentang alam yang dicirikan dengan keterdapatannya bentukan gua (Danardono et al., 2018) dan memiliki kemampuan untuk menyerap sejumlah karbondioksida (Jianhua Cao et al., 2016; Danardono et al., 2019; Jiang, 2013; Song et al., 2017). Karbon yang terserap dalam bentang alam karst dikenal dengan karbon inorganik. Karbon inorganik terserap melalui proses pembentukan bentang alam karst yang dinamakan karstifikasi (Jian-hua Cao et al., 2018; Ford & Williams, 2007). Karstifikasi merupakan proses pelarutan batuan karbonat oleh air dengan bantuan karbondioksida (Srijono & Nadia, 2013). Secara kimiawi, proses pelarutan batuan karbonat memiliki rumus kimia seperti pada Persamaan 1.



Interaksi antara karbondioksida (CO_2), air (H_2O), dan batuan karbonat (CaCO_3) dikenal dengan istilah karst dynamic system (KDS). Karbondioksida pada proses karstifikasi berasal dari karbondioksida tanah dan atau atmosfer. Proses pengambilan karbondioksida atmosfer untuk proses karstifikasi terjadi saat air hujan bersinggungan atmosfer. Air hujan akan berinteraksi secara kimiawi dengan gas karbondioksida membentuk larutan H_2CO_3 yang nantinya akan melarutkan batuan karbonat. Penggunaan karbondioksida untuk pelarutan batuan karbonat dapat mengurangi emisi karbondioksida yang dihasilkan oleh biosfer ke atmosfer.

Di sisi lain, Indonesia memiliki bentang alam karst yang cukup luas. Luasan bentang alam karst di Indonesia mencapai 140.000 km^2 (Haryono, 2011). Bentang alam karst di Indonesia tersebar di seluruh wilayah kepulauan Indonesia. Sebaran bentang alam karst di Indonesia dapat terlihat pada Gambar 2.



Sumber: Haryono, 2011

Gambar 2. Sebaran Kawasan Karst di Indonesia

Ciri khas bentang alam Karst di Indonesia yaitu memiliki curah hujan yang tinggi dan ditutupi oleh ekosistem hutan (Amin et al., 2017). Curah hujan di Indonesia memiliki nilai sebesar 2000 – 3000 mm/tahun sehingga dapat mempercepat proses pelarutan di bentang alam Karst. Selain itu, tutupan hutan di bentang alam karst dapat meningkatkan kadar karbondioksida tanah sehingga menghasilkan air yang lebih agresif dalam pelarutan batuan karbonat (Jianhua Cao et al., 2016). Adanya kedua faktor tersebut menyebabkan karstifikasi berjalan lebih intensif sehingga potensi penyerapan karbondioksida dari atmosfer di wilayah Karst Indonesia juga semakin meningkat.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa rata-rata laju pelarutan batuan karbonat di lima wilayah Karst Indonesia (Gunungsewu sebesar 82,9 m³/ km²/ tahun (Haryono, 2011). Berdasarkan nilai laju pelarutan tersebut, dapat dihitung total nilai serapan karbondioksida di wilayah Karst Indonesia. Total nilai serapan karbondioksida yang dapat dihasilkan dari keseluruhan bentang alam karst di Indonesia sebesar 13,482 Gg CO₂/ tahun (Haryono, 2011). Serapan karbondioksida melalui proses pelarutan di wilayah Karst Indonesia memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai pendukung program REDD+ di negara Indonesia.

Studi potensi karst dalam menyerap karbon masih jarang diteliti di Indonesia. Penelitian tentang kalkulasi karbon di Indonesia banyak didominasi oleh penaksiran stok/ cadangan karbon vegetasi. Penelitian dari Rutishauser *et al.* (2013) meneliti tentang cadangan karbon pada tegakan biomassa di hutan Indonesia, begitu juga dengan penelitian yang dilakukan Saner *et al.* (2012) dan Enghart *et al.* (2014) meneliti tentang cadangan karbon di kawasan hutan Kalimantan. Selain itu, penelitian Hertel *et al.* (2009) dari yang juga mengkaji potensi cadangan biomassa dari tegakan vegetasi di Hutan Sulawesi. Kesemua penelitian yang telah dilakukan menyatakan bahwa hutan di Indonesia memiliki potensi cadangan karbon organik dari vegetasi yang besar. Akan tetapi, penelitian tentang potensi fluks serapan karbon baik berupa karbon organik dan karbon inorganik secara keseluruhan belum banyak dilakukan di Indonesia. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada penentuan atau perhitungan potensi fluks serapan karbon inorganik yang dimiliki oleh kawasan di Indonesia, salah satunya kawasan karst.

Sejauh ini penelitian tentang fluks serapan karbon inorganik di kawasan karst pernah diteliti oleh para ahli yaitu Liu and Zhao (2000); Song *et al.* (2017); dan Cao *et al.* (2018) pada kawasan karst di China. Berdasarkan hasil tersebut menunjukkan bahwa kawasan

karst pada iklim sedang memiliki potensi serapan karbon inorganik melalui proses karstifikasi yang tidak dimiliki oleh kawasan lain. Akan tetapi, belum ada kajian spesifik mengenai fluks serapan karbon inorganik di kawasan tropis dengan mengkaji variasinya berdasarkan perbedaan toposekuen. Oleh karena itu, penelitian ini mencoba untuk mengkaji besaran fluks serapan karbon inorganik di kawasan karst tropis Indonesia dengan menunjukkan variasinya secara toposekuen. Hal inilah yang menjadi kebaruan dari penelitian ini dimana penelitian berfokus pada kuantifikasi variasi nilai serapan karbon inorganik berdasarkan toposekuen pada kawasan karst tropis.

Salah satu kawasan karst di Indonesia yang memiliki potensi untuk menyerap karbon inorganik yaitu kawasan Karst Biduk-Biduk. Kawasan Karst Biduk-Biduk merupakan bagian dari Kawasan Karst Sangkulirang-Mangkalihat yang terletak di Kabupaten Berau, Kalimantan Timur. Kawasan Karst Biduk-Biduk termasuk dalam karst tropis dengan nilai curah hujan tinggi dan sebagian besar tutupan lahan berupa hutan. Adanya dua faktor pendukung laju pelarutan batuan karbonat di kawasan ini dapat mengoptimalkan proses pelarutan dan penyerapan karbondioksida. Kemampuan Kawasan Karst Biduk-Biduk dalam menyerap karbondioksida dapat mendukung program pengurangan emisi karbon di Kabupaten Berau yang tertuang dalam Rencana Aksi Daerah Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAD-GRK). Penelitian ini memiliki tujuan untuk mengidentifikasi potensi nilai serapan karbon inorganik di Kawasan Karst Biduk-Biduk dan nilai pentingnya dalam mendukung upaya pengurangan emisi karbon di Indonesia.

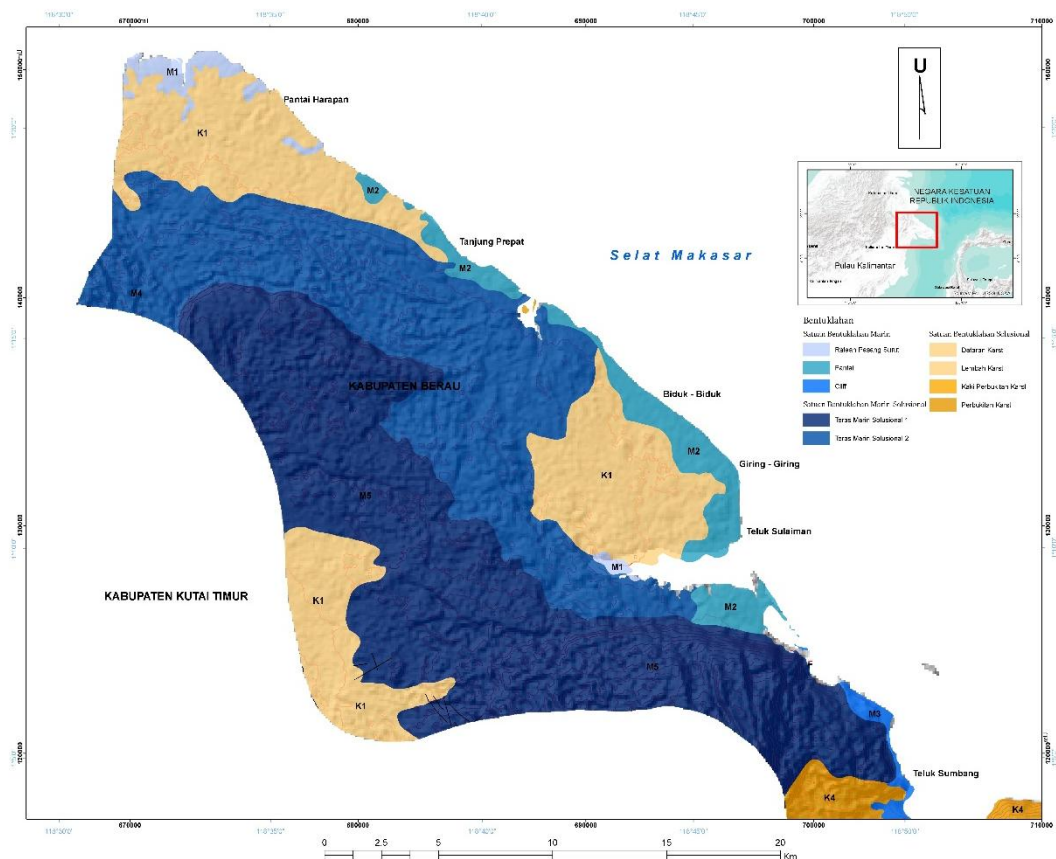
Metode Penelitian

Deskripsi Wilayah Kajian

Wilayah kajian dalam penelitian ini yaitu Kawasan Karst Biduk-Biduk. Kawasan Karst Biduk-Biduk termasuk dalam wilayah Karst Sangkulirang-Mangkalihat yang secara administratif berada di Kabupaten Berau, Provinsi Kalimantan Timur, Indonesia. Letak Kawasan Karst Biduk-Biduk berada dekat dengan garis katulistiwa sehingga kawasan ini termasuk dalam zona iklim tropis. Curah hujan tahunan di Kawasan Karst Biduk-Biduk sebesar 2521 mm/tahun dengan tidak adanya bulan kering selama setahun (curah hujan < 100 mm/bulan). Suhu udara rata-rata di wilayah kajian sebesar 26,4 – 27,4°C. Berdasarkan klasifikasi iklim Koppen, wilayah kajian masuk dalam klasifikasi iklim Af dengan ciri tidak adanya bulan kering selama setahun dan suhu udara relatif hangat setiap tahunnya.

Kawasan Karst Biduk-Biduk berkembang pada area dengan litologi berupa perselingan batugamping kerangka dan batugamping kristalin pada Formasi Domaring (Tm_{pd}); batugamping bioklastik dengan sisipan breksi pada Formasi Lebak (Tom_l); dan batugamping bioklastik dengan sisipan batugamping kerangka pada Formasi Karangan (Teok) (Djamal et al., 1995). Ketiga litologi tersebut terendapkan pada lingkungan pengendapan laut dangkal-neritik pada zaman tersier. Setiap litologi di Kawasan Karst Biduk-Biduk akan membentuk satuan geomorfologi yang berbeda-beda.

Satuan geomorfologi di wilayah kajian dikontrol oleh tiga proses utama yaitu pelarutan (solusional), marin, dan struktural. Ketiga proses tersebut membentuk tiga satuan geomorfologi di Kawasan Karst Biduk-Biduk. Satuan geomorfologi yang dapat diidentifikasi di wilayah kajian yaitu dataran karst, teras marin solusional 1, dan teras marin solusional 2. Sebaran satuan geomorfologi di wilayah kajian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Peta Geomorfologi di Kawasan Karst Biduk-Biduk

Dataran karst memiliki morfologi bergelombang dengan kemiringan lereng berkisar 0 – 13%. Litologi di satuan geomorfologi dataran karst berupa perselingan batugamping kerangka dan batugamping kristalin pada Formasi Domaring (Tmpd). Satuan geomorfologi teras marin solusional 1 memiliki morfologi dominan berupa perbukitan dengan kemiringan lereng berkisar 8 – 80%. Litologi teras marin solusional 1 berupa batugamping bioklastik dengan sisipan batugamping kerangka pada Formasi Karangan (Teok). Bentuk asal proses solusional yang dapat ditemukan di satuan geomorfologi ini berupa ceruk, ponor, dan limestone pavement. Satuan geomorfologi teras marin solusional 2 tersingkap setelah teras marin solusional. Teras marin solusional 2 memiliki morfologi dominan berupa perbukitan dengan kemiringan lereng 8 – 55%. Litologi teras marin solusional 2 yaitu perselingan batugamping bioklastik dengan sisipan breksi pada Formasi Lebak (Toml). Bentuk asal proses solusional yang dapat ditemukan di satuan geomorfologi ini berupa bentuk bukit-bukit conical mengelompok dan cockpit.

Pengumpulan Data

Data yang diperlukan dalam penelitian ini terdiri dari data primer dan sekunder. Data primer yang diperlukan yaitu data laju pelarutan batuan karbonat. Data laju pelarutan digunakan untuk mengetahui nilai serapan karbon inorganik di kawasan karst. Metode yang digunakan untuk menghitung laju pelarutan yaitu limestone tablets. Limestone tablets ditanam selama 1 tahun mulai bulan Oktober 2015 sampai November 2016 pada tiga kedalaman yaitu 1 meter di atas permukaan tanah, serta 30 cm dan 60 cm di bawah

permukaan tanah. Lokasi penanaman limestone tablets terletak pada dua bentuklahan berbeda dengan asumsi adanya perbedaan nilai laju pelarutan pada bentuklahan dataran karst, teras solusional 1, dan teras solusional 2.

Data sekunder yang diperlukan dalam penelitian yaitu data emisi karbon di Kabupaten Berau dan Provinsi Kalimantan Timur. Data emisi karbon di Kabupaten Berau dan Provinsi Kalimantan Timur didapatkan dari INCAS-Indonesia. Data emisi karbon digunakan untuk mengetahui kemampuan wilayah kajian dalam mendukung upaya pengurangan emisi karbon di tingkat regional dan global.

Analisis Data

Data hasil pengukuran limestone tablets digunakan untuk menghitung laju pelarutan batuan karbonat di wilayah kajian. Laju pelarutan batuan karbonat dapat dihitung dengan menggunakan formula pada Persamaan 2 (Daoxian & Cai, 1988).

$$DR = \left(\frac{(w_1 - w_2)}{A} \times 1000 \times \frac{T}{365} \right) \quad (2)$$

Ket: DR = dissolution rate of Limestone Tablets (mg/cm²/year); w₁-w₂ = selisih berat Limestone Tablets sebelum dengan sesudah ditanam (gr); A = luas area permukaan Limestone Tablets (cm²); T = waktu penanaman (hari). Selanjutnya, nilai laju pelarutan digunakan untuk menghitung nilai serapan karbon inorganik dengan menggunakan formula pada Persamaan 3 (Zhongcheng & Daoxian, 1999).

$$F = E \times S \times R \times 0,44 \quad (3)$$

Ket: F = fluks konsumsi CO₂ dari proses karstifikasi (gr-CO₂/ tahun); E = dissolution rate of Limestone Tablets (gr/cm²/year); S = luas wilayah karst (cm²); R = kandungan karbonat dalam Limestone Tablets (~90%). Nilai potensi serapan karbondioksida dihitung pada setiap bentuklahan di wilayah kajian. Selanjutnya, nilai serapan karbon inorganik pada tiap bentuklahan dijumlahkan untuk mengetahui nilai total potensi serapan karbon di wilayah kajian.

Kemampuan wilayah kajian dalam mendukung upaya pengurangan emisi karbon dihitung dengan membandingkan nilai total serapan karbon dengan nilai emisi karbon. Hasil perbandingan dapat menghasilkan persentase nilai kontribusi wilayah kajian dalam mengurangi emisi karbon atmosfer. Perbandingan dilakukan terhadap data emisi di Kabupaten Berau dan Provinsi Kalimantan Timur.

Hasil

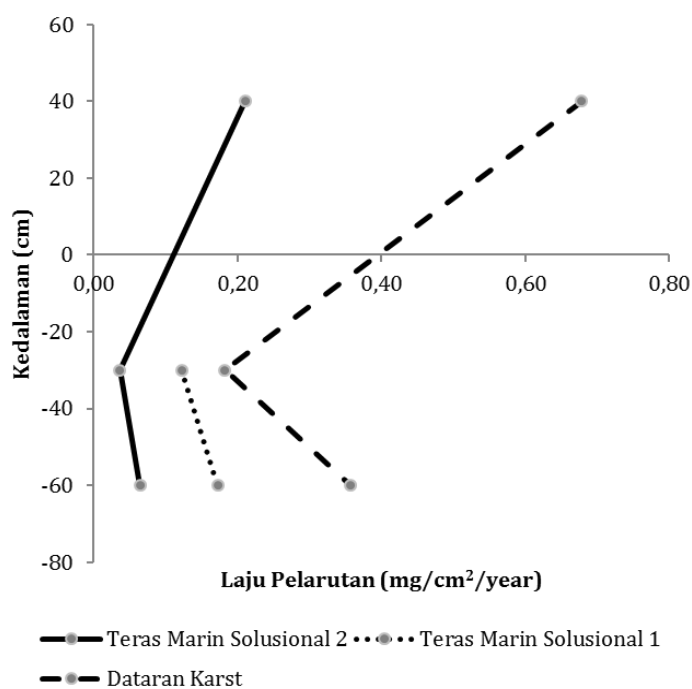
Laju Pelarutan Batuan Karbonat

Laju pelarutan batuan karbonat di Kawasan Karst Biduk-Biduk dapat dihitung dengan mempertimbangkan selisih berat Limestone Tablets sebelum dengan setelah ditanam di dalam tanah. Laju pelarutan batuan karbonat dapat dihitung secara absolut maupun relatif. Nilai relatif dihitung dengan menghitung persentase berkurangnya Limestone Tablets, sedangkan nilai absolut didapatkan dengan menggunakan rumus yang dikembangkan oleh Daoxian and Cai (1988). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa terdapat variasi nilai laju pelarutan secara vertikal pada tiap kedalaman dan secara spasial pada tiap satuan geomorfologi. Persentase laju pelarutan batuan karbonat di Kawasan Karst Biduk-Biduk dapat terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Persentase Laju Pelarutan Batuan Karbonat di Wilayah Kajian

No	Bentuk lahan	Kedalaman Tanah (cm)	Percentage of Denudation Rate (%)
1	Teras Marin Solusional 2	40	3.5
2	Teras Marin Solusional 2	-30	0.7
3	Teras Marin Solusional 2	-60	1.2
4	Teras Marin Solusional 1	-30	2.3
5	Teras Marin Solusional 1	-60	3.1
6	Dataran Karst	40	11.8
7	Dataran Karst	-30	3.3
8	Dataran Karst	-60	6.3

Berdasarkan Tabel 1 dapat diketahui bahwa laju pelarutan batuan karbonat di wilayah kajian bervariasi pada tiap satuan geomorfologi. Satuan geomorfologi dengan nilai laju pelarutan tertinggi yaitu pada dataran karst sebesar 4,8%. Sementara itu, nilai laju pelarutan terkecil terdapat pada satuan geomorfologi teras marin solusional 2 sebesar 0,95%. Perbedaan nilai laju pelarutan pada satuan geomorfologi mengindikasikan terdapat perbedaan perkembangan karst pada ketiga satuan geomorfologi. Satuan geomorfologi dataran karst dengan nilai laju pelarutan tinggi memiliki potensi perkembangan karst lebih intensif.

**Gambar 4. Nilai Laju Pelarutan Batuan Karbonat di Wilayah Kajian**

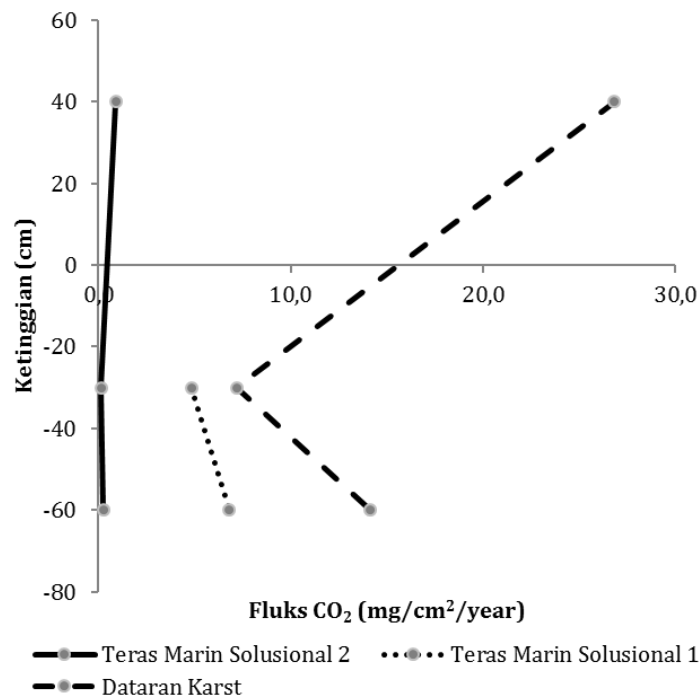
Laju pelarutan batuan karbonat di wilayah kajian juga memiliki variasi nilai secara vertikal. Variasi vertikal terjadi pada tiap perbedaan kedalaman tanah. Nilai terbesar terdapat pada ketinggian di atas permukaan tanah, sedangkan nilai terkecil terdapat pada kedalaman 30 cm dari permukaan tanah. Tren laju pelarutan batuan karbonat secara

vertikal pada tiap satuan geomorfologi cenderung sama. Nilai laju pelarutan di atas permukaan tanah relatif tinggi dan menurun pada kedalaman 30 cm. Nilai tersebut akan kembali naik seiring dengan bertambahnya kedalaman (60 cm). Hal ini mengindikasikan bahwa laju pelarutan batuan karbonat cenderung berlangsung intensif pada kedalaman tanah dekat dengan batuan dasar (batu gamping). Nilai absolut laju pelarutan batuan karbonat perlu dihitung untuk menghitung nilai serapan karbon inorganik. Nilai laju pelarutan batuan karbonat di Kawasan Karst Biduk-Biduk secara vertikal dapat dilihat pada Gambar 4.

Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa nilai rata-rata laju pelarutan terbesar terdapat pada satuan geomorfologi dataran karst sebesar $0,269 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$. Secara vertikal, nilai laju pelarutan terbesar terdapat lapisan atas permukaan tanah sebesar $0,677 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$ disusul oleh lapisan tanah pada kedalaman 60 cm sebesar $0,357 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$. Nilai terkecil laju pelarutan di wilayah kajian terdapat pada satuan geomorfologi teras marin solusional 2 pada kedalaman 30 cm sebesar $0,108 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$.

Serapan Karbon Inorganik

Serapan karbon inorganik dapat dihitung dengan memanfaatkan hasil perhitungan laju pelarutan batuan karbonat. Serapan karbon inorganik di Kawasan Karst Biduk-Biduk menunjukkan variasi secara vertikal dan spasial. Secara spasial, nilai serapan karbon inorganik di wilayah kajian bervariasi pada tiap satuan geomorfologi. Sementara secara vertikal, nilai serapan karbon inorganik di wilayah kajian bervariasi pada tiap kedalaman. Hasil perhitungan nilai serapan karbon inorganik di wilayah kajian dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Potensi Serapan Karbon Inorganik di Wilayah Kajian

Nilai serapan karbon inorganik terbesar terdapat pada satuan geomorfologi dataran karst sebesar $16,060 \text{ mg/cm}^2/\text{year}$. Sementara itu, nilai terendah terdapat pada satuan

geomorfologi teras marin solusional 2 sebesar 4,425 mg/cm²/year. Perbedaan nilai serapan karbon pada tiap satuan geomorfologi disebabkan karena faktor topografi dan kemiringan lereng pada tiap satuan geomorfologi. Secara vertikal, nilai serapan karbon inorganik terbesar terdapat pada lapisan di atas permukaan tanah sebesar 26,839 mg/cm²/year. Sedangkan nilai terendah terdapat pada kedalaman 30 cm di bawah tanah sebesar 1,440 mg/cm²/year. Perbedaan nilai pada tiap kedalaman disebabkan karena lama kontak air dengan Limestone Tablets. Semakin cepat kontak air dengan Limestone Tablets maka nilai serapan karbon inorganik juga memiliki nilai yang tinggi.

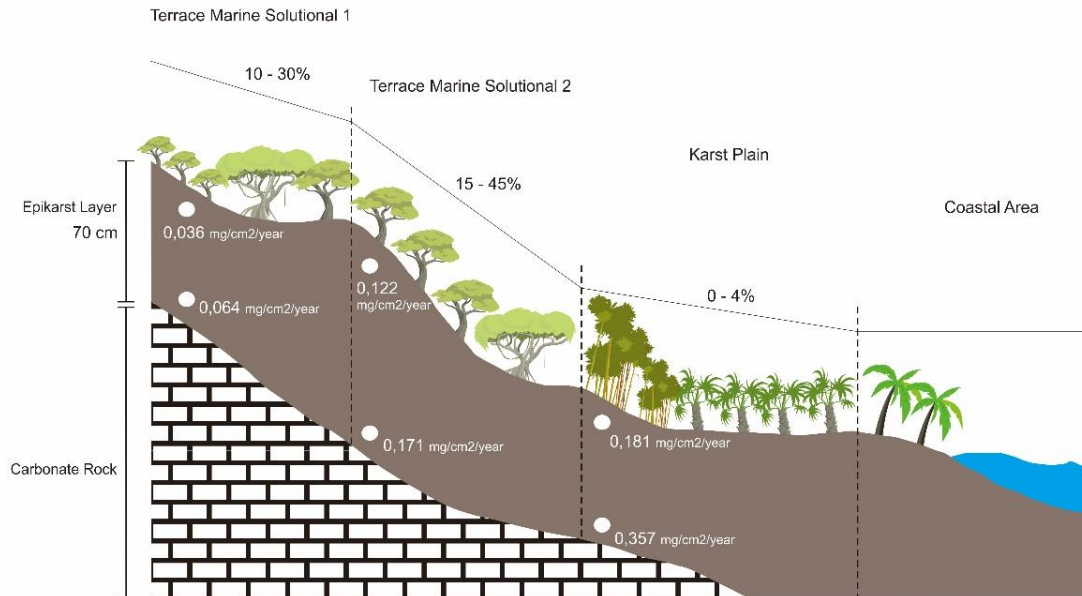
Pembahasan

Nilai serapan karbon inorganik dapat dihitung berdasarkan nilai laju pelarutan batuan karbonat di kawasan karst. Potensi serapan karbon inorganik akan memiliki tren nilai sama dengan nilai laju pelarutan batuan karbonat. Semakin tinggi nilai laju pelarutan batuan karbonat akan diikuti oleh peningkatan nilai serapan karbon inorganik.

Nilai laju pelarutan di kawasan karst tropis (Biduk-Biduk Karst) memiliki variasi nilai yang beragam pada tiap satuan geomorfologi dan kedalaman tanah. Perbedaan laju pelarutan pada satuan geomorfologi teras marin solusional 2, teras marin solusional 1, dan dataran karst menunjukkan bahwa terdapat variasi nilai laju pelarutan pada tiap sekuen lereng. Nilai laju pelarutan di wilayah kajian mengalami peningkatan seiring dengan berkurangnya kemiringan lereng. Nilai laju pelarutan terbesar terdapat pada dataran karst dengan kemiringan lereng sebesar 0 – 4%. Sedangkan, nilai laju pelarutan terendah terdapat pada teras marin solusional 2 dengan kemiringan lereng sebesar 15 – 30%. Variasi nilai laju pelarutan batuan karbonat pada sekuen lereng di Biduk-Biduk Karst tersaji pada Gambar 6.

Perbedaan nilai laju pelarutan pada tiap sekuen lereng juga terjadi di wilayah karst lain seperti Gunungsewu Karst, Indonesia (Haryono et al., 2016b), Guilin, China (Liu & Zhao, 2000), and Austria Alps (Plan, 2005); Akiyoshi-da'i, Japan (Akiyama et al., 2015). Hasil penelitian pada ketiga wilayah karst menunjukkan nilai laju pelarutan terbesar pada satuan geomorfologi dengan kemiringan lereng rendah. Besarnya nilai resapan air ke dalam lapisan epikarst melalui infiltrasi dan perkolasi menjadi faktor penyebab besar kecilnya nilai laju pelarutan (Gabrovšek, 2009; Plan, 2005). Pada wilayah dengan kemiringan lereng rendah, retensi air untuk terserap ke dalam lapisan epikarst memiliki waktu yang lebih lama dibandingkan pada wilayah dengan kemiringan lereng tinggi. Semakin banyaknya air yang membawa karbondioksida ke dalam lapisan epikarst menjadikan proses pelarutan berjalan lebih intensif. Namun nilai laju infiltrasi dan perkolasi tidak dihitung dalam penelitian ini sehingga pengaruh laju infiltrasi dan perkolasi terhadap nilai laju pelarutan di wilayah kajian tidak dapat diketahui secara pasti. Nilai laju pelarutan di wilayah kajian memiliki rentang nilai variasi tinggi pada tiap kedalaman tanah. Nilai pelarutan tertinggi terdapat pada atas permukaan tanah. Pada kedalaman 20 cm nilai laju pelarutan akan mengalami penurunan dan akan kembali naik pada kedalaman 60 cm. Variasi nilai laju pelarutan pada tiap kedalaman tanah juga terjadi di wilayah karst lain baik karst tropis maupun karst non tropis seperti Guilin Karst, China (Liu & Zhao, 2000; Zaihua Liu et al., 1998), Nongla, Guangxi and Jinfo, Chongqing, China (Cheng, 2011). Perbedaan nilai laju pelarutan pada tiap kedalaman disebabkan karena faktor kontak air dengan batuan karbonat dan ketersediaan karbondioksida (Cheng, 2011; Liu & Zhao, 2000; Zaihua Liu et al., 1998). Pada bagian atas permukaan tanah nilai laju pelarutan berlangsung intensif karena kontak antara air pembawa karbondioksida dengan batuan karbonat terjadi secara langsung tanpa perantara. Sementara pada bagian bawah permukaan tanah air pembawa karbondioksida akan

berinteraksi dengan lapisan tanah epikarst sebelum mengkorosi batuan karbonat di bagian bawah lapisan tersebut.



Gambar 5. Variasi Nilai Laju Pelarutan pada Perbedaan Morfologi di Wilayah Kajian

Nilai laju pelarutan di wilayah kajian berbeda pada tiap kedalaman tanah dapat disebabkan karena perbedaan kandungan karbondioksida (Haryono et al., 2016a; Liu & Zhao, 2000; Zaihua Liu et al., 1998). Namun karena nilai kandungan karbondioksida pada tiap kedalaman tidak diukur dalam penelitian ini menjadikan pengaruh kandungan karbondioksida terhadap variasi nilai pelarutan tidak dapat dibuktikan. Secara teori nilai kandungan karbondioksida tanah pada lapisan tanah bawah memiliki nilai lebih besar dibandingkan lapisan tanah atas (Zaihua Liu et al., 1998; Urushibara-Yoshino et al., 1999) sehingga kemampuan air dalam mengkorosi batuan karbonat juga meningkat (Krklec et al., 2016). Adanya sumber karbondioksida selain dari atmosfer, dapat dimanfaatkan oleh aliran air di dalam tanah untuk mengkorosi batuan karbonat terutama saat tidak ada input dari air hujan (musim kemarau).

Nilai potensi serapan karbon inorganik dapat dihitung dengan menggunakan data nilai laju pelarutan. Nilai serapan karbon inorganik menunjukkan nilai kebutuhan karbondioksida untuk melarutkan batuan karbonat yang diambil dari atmosfer dan atau tanah. Nilai serapan karbon inorganik di wilayah kajian memiliki nilai rata-rata sebesar 8,770 mg/cm²/year. Nilai tersebut tidak berbeda jauh dengan nilai serapan karbon inorganik di wilayah karst tropis lain seperti Gunungsewu Karst, Indonesia (Haryono et al., 2016a), Nongla, Guangxi and Jinfo, Chongqing, China (Cheng, 2011), Guilin, China (Liu & Zhao, 2000). Namun berbeda dengan nilai serapan karbon inorganik di kawasan high mountain karst di Huanglong, China, semiarid karst di Beijing, China, humid temperate karst di Taizihe (Liu & Zhao, 2000) yang memiliki nilai serapan karbon inorganik lebih rendah. Perbandingan nilai serapan karbon inorganik di wilayah kajian dengan kawasan karst lain dapat dilihat pada Tabel 2.

Salah satu faktor yang mempengaruhi perbedaan nilai serapan karbon inorganik di wilayah kajian dengan kawasan karst non-tropis yaitu curah hujan. Curah hujan tahunan di wilayah kajian dan kawasan karst tropis yang memiliki nilai lebih tinggi dibandingkan curah hujan di kawasan karst non-tropis menjadikan proses pelarutan berjalan lebih intensif.

Semakin besar intensitas curah hujan di kawasan karst tropis dapat mempercepat dan meningkatkan intensitas proses pelarutan di kawasan karst tersebut sehingga karbondioksida yang diserap dari atmosfer juga akan semakin meningkat. Pola curah hujan bulanan juga perlu dikaji untuk mengetahui pola perbedaan nilai laju pelarutan pada tiap perbedaan musim.

Tabel 2. Perbandingan Nilai Serapan Karbon Inorganik di Wilayah Kajian dengan Karst Lain

Lokasi	Tipe Karst	Curah Hujan Tahunan (mm)	Serapan Karbon Inorganik (mg/cm ² /year)	Sumber
Gunungsewu Karst, Indonesia	Tropical Karst	1500 – 2986	5,600	(Haryono et al., 2016a)
Nongla, Guanxi, China	Tropical Karst	1750	0,632	(Yu, Li, Zhou, Zeng, & Zhang, 2020; Zhang, 2011)
Guilin, China	Tropical Karst	1000 – 1850	2,926	(Liu & Zhao, 2000)
Jinfo, Chongqing, China	High Mountain Karst	1436	1,239	(Zhang, 2011)
Huanglong, China	High Mountain Karst	300 – 800	1,495	(Liu & Zhao, 2000)
Beijing, China	Semiarid Karst	400 – 600	0,271	(Liu & Zhao, 2000)
Taizihe, China	Humid Temperate Karst	800 – 1000	0,081	(Liu & Zhao, 2000)

Nilai serapan karbon inorganik dari proses pelarutan batuan karbonat di wilayah kajian dapat berkontribusi mengurangi emisi karbon atmosfer. Kontribusi nilai serapan karbon inorganik dapat membantu mewujudkan program pengurangan emisi karbon di tingkat regional (Provinsi Kalimantan Timur) dan nasional (Negara Indonesia). Program pengurangan emisi karbon di tingkat regional dan nasional yang tertuang dalam RAD-GRK dan RAN-GRK memiliki tujuan untuk mengurangi emisi karbon sebesar 26%. Adanya kemampuan kawasan karst menyerap karbondioksida dapat ikut membantu mewujudkan target pengurangan emisi karbondioksida di Negara Indonesia.

Total nilai serapan karbon inorganik di Biduk-Biduk Karst dapat dihitung untuk mengetahui kontribusi wilayah kajian dalam mendukung kebijakan pengurangan karbon di Indonesia. Kontribusi wilayah kajian dapat dihitung dengan membandingkan total potensi serapan karbon inorganik di wilayah kajian dengan total emisi tahunan di Provinsi Kalimantan Timur dan Negara Indonesia. Nilai total potensi serapan karbon inorganik di wilayah kajian sebesar 30.254 Mg/tahun (lihat Tabel 3). Sedangkan nilai emisi karbondioksida tahunan di Provinsi Kalimantan Timur sebesar 39.835.354 Mg/year (INCAS, 2017) dan di Negara Indonesia sebesar 347.000.000 Mg/year. Nilai emisi tersebut merupakan nilai rata-rata emisi karbondioksida tahunan dari tahun 2009 sampai 2012. Apabila dibandingkan, total potensi serapan karbon inorganik di Biduk-Biduk Karst dapat membantu mengurangi emisi karbondioksida di Provinsi Kalimantan Timur sebesar 0,07% dan di Negara Indonesia sebesar 0,008%.

Tabel 3. Potensi Serapan Karbon Inorganik Total di Wilayah Kajian

No	Bentuk lahan	Laju Pelarutan (mg/cm ² /year)	CO ₂ Flux (mg/cm ² /year)	Luas (hektar)	Serapan Karbon Inorganik (Mg/year)
1	Teras Marin Solusional 2	0.050	4.425	13772.00	6094.15
2	Teras Marin Solusional 1	0.147	5.826	8834.04	5146.81
3	Dataran Karst	0.269	16.060	11838.99	19013.42
Total				34445.03	30254.38

Persentase nilai kontribusi karst terhadap pengurangan emisi karbon menunjukkan bahwa kawasan karst sangat potensial dimanfaatkan untuk mendukung program pengurangan emisi karbon. Luasan Biduk-Biduk Karst yang hanya 0,180% dari luasan total di Negara Indonesia saja dapat membantu mengurangi 0,008% emisi karbondioksida. Padahal, luasan karst di Negara Indonesia sebesar 7,31% sehingga apabila seluruh kawasan karst di Indonesia dihitung potensi serapan karbonnya, maka emisi karbon di Negara Indonesia dapat berkurang hingga 4% tiap tahun. Oleh karena itu, perlu adanya integrasi potensi kawasan karst dalam menyerap karbon ke dalam program pengurangan emisi karbon salah satunya yaitu REDD+.

Kesimpulan

Nilai rata-rata serapan karbon inorganik di Biduk-Biduk Karst sebesar 8,770 mg/cm²/year. Nilai tersebut bervariasi pada tiap satuan geomorfologi dan kedalaman tanah. Satuan geomorfologi yang memiliki nilai tertinggi yaitu satuan dataran karst sebesar 16,060 mg/cm²/year. Sedangkan nilai terendah terdapat pada satuan teras marin solusional 2 sebesar 4,425 mg/cm²/year. Perbedaan nilai pada satuan geomorfologi disebabkan karena adanya perbedaan kemiringan lereng. Serapan karbon inorganik yang dihitung berdasarkan nilai laju pelarutan batuan karbonat sangat dipengaruhi oleh kemiringan lereng. Kemiringan lereng yang lebih rendah pada satuan dataran karst dibandingkan satuan geomorfologi lain menyebabkan nilai laju pelarutan dan serapan karbon inorganik menjadi lebih besar. Pengaruh kemiringan lereng terhadap laju pelarutan batuan karbonat dapat diteliti lebih lanjut dengan menambahkan perhitungan infiltrasi dan perkolasi yang terjadi di lapisan epikarst.

Nilai serapan karbon inorganik juga bervariasi pada tiap kedalaman tanah. Nilai tertinggi serapan karbon inorganik terdapat pada atas permukaan tanah, diikuti pada kedalaman 60 cm, dan terendah pada kedalaman 20 cm. Adanya kontak langsung antara air sebagai media pelarut dengan batuan karbonat di atas permukaan tanah menjadikan nilai laju pelarutan dan serapan karbon inorganik menjadi lebih besar. Sedangkan penyebab perbedaan nilai serapan karbon inorganik di bawah permukaan tanah yaitu kandungan karbondioksida pada tiap kedalaman tanah. Pengaruh kandungan karbondioksida terhadap laju pelarutan dan serapan karbon inorganik dapat diteliti lebih lanjut dengan melakukan pengukuran karbondioksida tanah dan membandingkannya dengan nilai laju pelarutan.

Total serapan karbon inorganik di Biduk-Biduk Karst sebesar 30254 Mg/year. Berdasarkan nilai tersebut, Biduk-Biduk Karst dapat berkontribusi dalam program pengurangan emisi karbon di lingkup regional (Provinsi Kalimantan Timur) dan nasional (Negara Indonesia). Biduk-Biduk Karst dapat berkontribusi untuk mengurangi emisi karbon di Provinsi Kalimantan Timur sebesar 0,07% tiap tahun dan di Negara Indonesia sebesar 0,008% tiap tahun.

Hasil penelitian dapat memberikan gambaran dan arahan dalam manajemen lingkungan utamanya pada kawasan karst. Arahan pemanfaatan kawasan karst perlu mempertimbangkan kelestarian lapisan epikarst yang berada di atas batuan gamping. Hal ini mengingat bahwa berdasarkan hasil penelitian epikarst memiliki potensi besar untuk menyerap sejumlah karbon dari atmosfer. Oleh karena itu, prinsip konservasi kawasan karst perlu dikembangkan untuk menjaga keberadaan lapisan epikarst sehingga peran kawasan karst dalam pengurangan emisi karbon tetap terjaga dengan baik. Hal ini sangat tepat diterapkan di Indonesia, mengingat luasnya kawasan karst di Indonesia. Selain itu, penelitian ini juga memperlihatkan pentingnya konservasi kawasan karst dalam perencanaan tata ruang guna pencapaian target pengurangan emisi karbon di Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini dibiayai oleh Kelompok Studi Karst dan Yayasan Keanekaragaman Hayati (KEHATI) melalui program Tropical Forest Conservation Act (TFCA) Kalimantan dengan judul “Characterization and Revitalization of Important Values in Sangkulirang-Mangkalihat Karst Region, East Kalimantan Province, Indonesia”.

Daftar Pustaka

- Akiyama, S., Hattajji, T., Matsushi, Y., & Matsukura, Y. (2015). Dissolution rates of subsoil limestone in a doline on the Akiyoshi-dai Plateau, Japan: An approach from a weathering experiment, hydrological observations, and electrical resistivity tomography. *Geomorphology*, 247, 2–9. doi:10.1016/j.geomorph.2015.05.028.
- Amin, C., Priyono, P., Jauhari, A., Priyana, Y., Priyono, K. D., & Cholil, M. (2017). Management of an underground river to overcome water scarcity in the Gunung Sewu Karst Area, Indonesia. *Forum Geografi*, 31(1), 176–183. doi:10.23917/forgeo.v31i1.4502.
- Cao, Jian-hua, Wu, X., Huang, F., Hu, B., Groves, C., Yang, H., & Zhang, C. (2018). Global significance of the carbon cycle in the karst dynamic system: Evidence from geological and ecological processes. *China Geology*, 1(1), 17–27. doi:10.31035/cg2018004.
- Cao, Jianhua, Hu, B., Groves, C., Huang, F., Yang, H., & Zhang, C. (2016). Karst dynamic system and the carbon cycle. *Zeitschrift Für Geomorphologie, Supplementary Issues*, 60(2), 35–55. doi:10.1127/zfg_suppl/2016/00304.
- Cheng, Z. (2011). Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their. *Chinese Science Bulletin*, 56(35), 3759–3765. doi:10.1007/s11434-011-4404-4.
- Danardono, D., Haryono, E., & Widyastuti, M. (2019). The nature of carbon flux in various ecosystem types in the Biduk-Biduk Karst Region, Berau District, East Kalimantan. *E3S Web Conf.*, 76, 1–7. doi:10.1051/e3sconf/20197604005.
- Danardono, D., Putra, E. B. D., Haryono, E., Nurjani, E., & Sunariya, M. I. T. (2018). Speleoclimate monitoring to assess cave tourism capacity in Gelatik Cave, Gunungsewu Geopark, Indonesia. *Forum Geografi*, 32(2), 181–194. doi:10.23917/forgeo.v32i2.6958.
- Daoxian, Y., & Cai, G. (1988). *Karst Environmental Science*. Chongqing: Chongqing Science and Technology Publishing.
- Djamal, B., Sudana, D., Soetrisno, Baharuddin, & Hasan, K. (1995). *Peta Geologi Lembar Tanjung Mangkalihat, Kalimantan*. Bandung.
- Englhart, S., Franke, J., Keuck, V., & Siegert, F. (2014). Carbon stock estimation of tropical forests on Borneo, Indonesia, for REDD+. In I. Manakos & M. Braun (Eds.), *Land Use and Land Cover Mapping in Europe: Practices & Trends* (pp. 411–427). doi:10.1007/978-94-007-7969-3_24.
- Ford, D. C., & Williams, P. W. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester: John Wiley and Sons Inc.
- Gabrovšek, F. (2009). On concepts and methods for the estimation of dissolutional denudation rates in karst

- areas. *Geomorphology*, 106(1), 9–14. doi:10.1016/j.geomorph.2008.09.008.
- Haryono, E. (2011, January 11). *Atmospheric carbon dioxide sequestration through karst denudation processes estimated from Indonesian karst region*. 203–207. Asian Trans-Disciplinary Karst Conference.
- Haryono, E., Danardono, D., Mulatsih, S., Putro, S. T., & Adji, T. N. (2016a). The nature of carbon flux in Gunungsewu Karst, Java-Indonesia. *Acta Carsologica*, 45(2). doi:10.3986/ac.v45i2.4541.
- Haryono, E., Danardono, D., Mulatsih, S., Putro, S. T., & Adji, T. N. (2016b). The nature of carbon flux in Gunungsewu Karst, Java, Indonesia. *Acta Carsologica*, 45(1), 173–185.
- Hertel, D., Moser, G., Culmsee, H., Erasmi, S., Horna, V., Schuldt, B., & Leuschner, C. (2009). Forest ecology and management below- and above-ground biomass and net primary production in a paleotropical natural forest (Sulawesi , Indonesia) as compared to neotropical forests. *Forest Ecology and Management*, 258(9), 1904–1912. doi:10.1016/j.foreco.2009.07.019.
- International Energy Agency. (2018). *Emissions Factors (2018)*. France: International Energy Agency.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Working Group 1 Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press.
- Jiang, Y. (2013). The contribution of human activities to dissolved inorganic carbon fluxes in a karst underground river system: Evidence from major elements and $\delta^{13}\text{CDIC}$ in Nandong, Southwest China. *Journal of Contaminant Hydrology*, 152, 1–11. doi:10.1016/j.jconhyd.2013.05.010.
- Krklec, K., Domínguez-Villar, D., Carrasco, R. M., & Pedraza, J. (2016). Current denudation rates in dolostone karst from central Spain: Implications for the formation of unroofed caves. *Geomorphology*, 264, 1–11. doi:10.1016/j.geomorph.2016.04.007.
- Liu, Z., & Zhao, J. (2000). Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink. *Environmental Geology*, 39(9), 1053–1058. doi:10.1007/s002549900072.
- Liu, Zaihua, He, S. Y., Yuan, D. X., & Zhao, J. B. (1998). The CO₂ regime of soil profile and its drive to dissolution. *Hydrology and Engineering Geology*, 25, 42–45.
- Pan, Y., Birdsey, R. A., Fang, J., Houghton, R., Kauppi, P. E., Kurz, W. A., ... Hayes, D. (2011). A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 333(6045), 988–993. doi:10.1126/science.1201609.
- Plan, L. (2005). Factors controlling carbonate dissolution rates quantified in a field test in the Austrian alps. *Geomorphology*, 68(3), 201–212. doi:10.1016/j.geomorph.2004.11.014.
- Rutishauser, E., Noor'an, F., Laumonier, Y., Halperin, J., Rufi'ie, Hergoualc'h, K., & Verchot, L. (2013). Generic allometric models including height best estimate forest biomass and carbon stocks in Indonesia. *Forest Ecology and Management*, 307, 219–225. doi:10.1016/j.foreco.2013.07.013.
- Saner, P., Loh, Y. Y., Ong, R. C., & Hector, A. (2012). *Carbon stocks and fluxes in tropical lowland dipterocarp rainforests in Sabah , Malaysian Borneo*. 7(1). doi:10.1371/journal.pone.0029642.
- Song, X., Gao, Y., Wen, X., Guo, D., Yu, G., He, N., & Zhang, J. (2017). Carbon sequestration potential and its eco-service function in the karst area, China. *Journal of Geographical Sciences*, 27(8), 967–980. doi:10.1007/s11442-017-1415-3.
- Srijono, S., & Nadia, N. (2013). Urang Cave Karst environmental development as tourism object. *Forum Geografi*, 27(2), 99. doi:10.23917/forgeo.v27i2.2369.
- Urushibara-Yoshino, K., Miotke, F.-D., Kashima, N., Enomoto, H., Kuramoto, T., Kina, H., ... Higa, M. (1999). Solution rate of limestone in Japan. *Physics and Chemistry of the Earth, Part A: Solid Earth and Geodesy*, 24(10), 899–903. doi:10.1016/S1464-1895(99)00133-7.
- Yu, Y., Li, J., Zhou, Z., Zeng, L., & Zhang, C. (2020). Estimation of the value of ecosystem carbon sequestration services under different scenarios in the Central China (the Qinling-Daba Mountain Area). *Sustainability*, 12(337), 1–18.
- Zhang, C. (2011). Carbonate rock dissolution rates in different landuses and their carbon sink effect. *Chinese Science Bulletin*, 56(35), 3759–3765. doi:10.1007/s11434-011-4404-4.
- Zhongcheng, J., & Daoxian, Y. (1999). CO₂ source-sink in karst processes in karst areas of China. *International Union of Geological Sciences*, 22(1), 33–35. doi:10.18814/epiugs/1999/v22i1/005.