

Perhitungan Stok Karbon Inorganik Batugamping dan Fluks Karbon di Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK) Tasikmalaya, Jawa Barat

Limestone Carbon Stock and Carbon Flux Calculation in Tasikmalaya Karst Landscape Area, West Java

Aldian Fahrialam¹, Paul Vito Parluhutan Sinabang¹, Atifa Maritza Giwangkara¹, Selasian Gussyak³, Tantan Hidayat³, Himawan Tri Bayu Petrus², Hendra Amijaya¹, dan Ferian Anggara¹

¹Departemen Teknik Geologi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika Bulaksumur No.2, Sinduadi, Mlati, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55284, Indonesia

³Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan, Badan Geologi
Jalan Diponegoro No. 57 Bandung, 40122, Indonesia

e-mail: aldianfahrialam@gmail.com

Naskah diterima 22 Maret 2024, selesai direvisi 16 November 2024, dan disetujui 30 Desember 2024

ABSTRAK

Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK) merupakan kawasan yang dilindungi dan perlu adanya upaya konservasi untuk mencegah terjadinya pengerukan dan pembukaan lahan secara ilegal. Tercatat, konsentrasi karbondioksida secara global per tahun 2018 mengalami peningkatan hingga 50% dari mulainya revolusi industri dengan konsentrasi sebesar 421 ppm. Tujuan penelitian ini adalah melakukan perhitungan terhadap karbon yang tersimpan di KBAK Tasikmalaya sebagai upaya konservasi terhadap KBAK Tasikmalaya. Perhitungan stok karbon dibagi menjadi dua area. Area utara yang terdiri dari Anggota Sukaraja memiliki stok karbon sebesar 418.528,05 ton dan area selatan yang tersusun atas Formasi Kalipucang memiliki stok karbon sebesar 13×10^6 ton. Besaran nilai dari stok karbon dipengaruhi oleh kadar CaO dalam batugamping serta volume batugamping. Total fluks karbon yang dihasilkan di daerah penelitian mencapai $4,98 \times 10^{10}$ mg/hari hingga $9,78 \times 10^{13}$ mg/hari dengan rata-rata nilai per sampel $3,16 \times 10^{11}$ hingga $2,58 \times 10^{13}$ mg/hari. Besaran nilai fluks karbon dipengaruhi oleh kadar ion bikarbonat dan nilai debit.

Kata kunci: batugamping, fluks karbon, karbon, kars, stok karbon

ABSTRACT

The Karst Landscape Conservation Area (KBAK) is a protected area that requires conservation efforts to prevent illegal excavation and land clearing. It is noted that the global concentration of carbon dioxide in 2018 increased by up to 50% since the beginning of the industrial revolution, with a concentration of 421 ppm. The purpose of this research is to calculate the carbon stored in KBAK Tasikmalaya as a conservation effort for KBAK Tasikmalaya. Carbon stock calculations are divided into two areas. The northern area, consisting of the Sukaraja Member, has a carbon stock of 418,528.05 tons, and the southern area, consists of the Kalipucang Formation, has a carbon stock of 13×10^6 tons. The magnitude of the carbon stock value is influenced by the CaO content in limestone and the volume of limestone. The total carbon flux generated in the research area ranges from $4,98 \times 10^{10}$ mg/day until $9,78 \times 10^{13}$ mg/day, with an average of each sample value ranging from $3,16 \times 10^{11}$ to $2,58 \times 10^{13}$ mg/day. The value of carbon flux is influenced by the bicarbonate ion content and the water discharge value.

Keywords: Cox proportional hazard, south and north pacific, climate change, tropical cyclone

PENDAHULUAN

Akumulasi karbon dioksida antropogenik mengubah susunan siklus karbon global secara

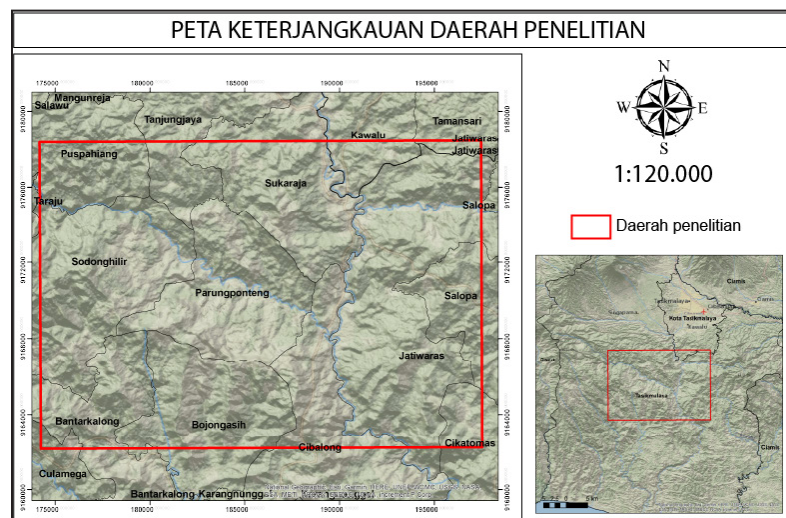
signifikan. Hampir 50% dari karbon dioksida antropogenik terjebak di atmosfer dan terserap ke laut dan dataran (Melnikov dan O'Neill,

2006). Peningkatan emisi karbon dioksida tiap tahunnya menyebabkan terjadinya pemanasan global (Parrenin dr., 2013). Peningkatan dari konsentrasi karbondioksida di atmosfer mayoritas disebabkan oleh aktivitas manusia, sehingga terjadi ketidakseimbangan dalam siklus karbon jangka panjang. Salah satu penyebabnya adalah industri semen. Industri ini menghasilkan karbondioksida melalui penggunaan bahan bakar fosil dan listrik dan proses kalsinasi dalam penambangan batugamping (CaCO_3) (Worrell dr., 2001). Tercatat, setiap produksi 1 ton semen, terdapat 0,6 ton CO_2 yang terlepas ke atmosfer (Andrew R.M., 2018). Sehingga, banyak ahli melakukan penelitian untuk mengurangi emisi gas karbon dioksida di atmosfer (Worrell dr., 2001), (Ding dr., 2022), (Song dr., 2017).

Salah satu upaya yang dilakukan untuk mengurangi emisi gas karbon dioksida adalah memaksimalkan potensi penyerapan karbon di darat dan laut, salah satunya dengan batuan karbonat (Haryono dr., 2009). Batuan karbonat merupakan batuan penyimpan gas karbon terbesar di Bumi yang mencapai 61×10^{15} ton (Falkowski dr., 2000) dengan kadar kandungan karbon yang tersimpan di batuan ini dapat mencapai hingga 99,55%. Setiap satu ton batugamping yang terlarutkan, maka ada sekitar 0,12 ton karbon yang ada di atmosfer akan terserap pada batugamping tersebut (Haryono dr., 2009). Oleh karena itu, batugamping merupakan

media dari formasi geologi yang berpotensi untuk menangkap dan menyimpan gas karbon. Fokus penelitian ini merujuk pada penyebaran batugamping yang menyusun daerah Kabupaten Tasikmalaya, Provinsi Jawa Barat dengan luas area mencapai 120 hektar (Gambar 1). Secara regional, daerah Tasikmalaya termasuk ke dalam dua lembar peta geologi yaitu Peta Geologi Lembar Karangnunggal, Jawa (Supriatna, Sarmil, Sudana, & Koswara, 1992) dan Peta Geologi Lembar Tasikmalaya, Jawa Barat (Budhitrisna, 2000).

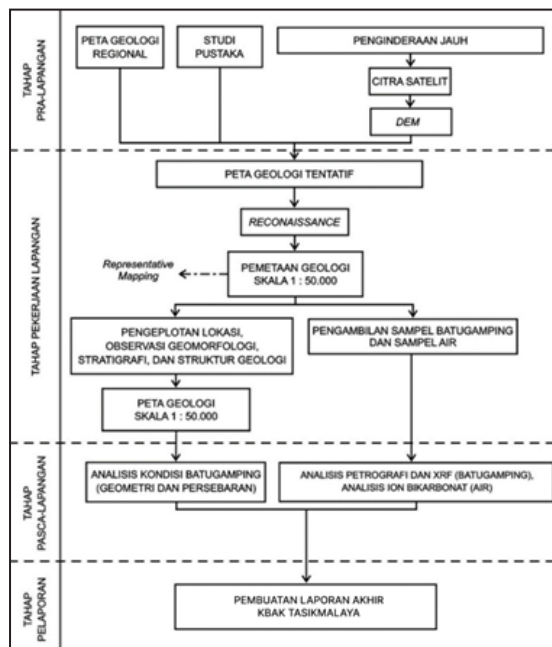
Batugamping yang berada di daerah penelitian tersusun atas dua formasi. Formasi Kalipucang tersusun atas batugamping foraminifera dan batugamping pasir. Selain itu, terdapat juga Anggota Sukaraja Formasi Bentang (Tmbs) yang tersusun atas batugamping pasir dan batugamping terumbu. Terdapat pula litologi non-batugamping seperti breksi aneka bahan dan tuf Formasi Jompang (Tomj), perselingan tuf dan breksi dasitik Formasi Jampang (Tmjg), dan batugamping pasir, kalsilitutit, dan napal dari Formasi Pamutuan (Tmpl), lalu batupasir gampingan dari Gormasi Bentang (Tmb), dan endapan hasil gunung api berumur Kuartar. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui jumlah karbon tersimpan di formasi batugamping dan mengetahui laju pelarutan batugamping di daerah penelitian.



Gambar 1. Lokasi daerah penelitian (kotak merah) yang berada di selatan Kota Tasikmalaya

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan melalui tiga tahapan, yakni tahap pra-lapangan yang terdiri dari kajian pustaka dan pembuatan peta dasar menggunakan data sekunder. Kedua, tahap pekerjaan lapangan untuk mengumpulkan data primer dan observasi geomorfologi, stratigrafi, dan struktur geologi. Ketiga, tahap pasca lapangan yang terdiri dari analisis geometri dan persebaran batugamping, dan analisis laboratorium berupa analisis petrografi, XRF (sampel batuan), dan ion bikarbonat (sampel air). Tahapan metodologi penelitian disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Alir Metodologi Penelitian.

Perhitungan dari massa karbon yang terdapat di batugamping menggunakan hasil analisis XRF untuk mengetahui kadar CaO yang tersimpan di batugamping. Selanjutnya, analisis petrografi juga digunakan untuk menghitung massa karbon yang tersimpan dalam batugamping berdasarkan satuan batuan yang telah diklasifikasikan. Rumus perhitungan dari massa karbon di batugamping berdasarkan (Danardono dr., 2019) merujuk ke (1).

$$MC = \left(\frac{ArC}{MrCaCO_3} \right) \times \left(\frac{MrCaCO_3}{MrCaO} \right) \times \%CaO \times \rho CaCO_3 \times VCaCO_3 \dots (1)$$

M C = Massa karbon di batugamping

Ar C = massa atom karbon (12 g/mol)

Mr CaCO₃ = massa molekul relatif CaCO₃ (100 g/mol)

Mr CaO = massa molekul relatif CaO (56 g/mol)

%CaO = Persentase kandungan CaO dalam batugamping

ρ CaCO₃ = berat jenis CaCO₃

V CaCO₃ = volume batugamping

Ar C = Massa atom karbon

Perhitungan luas area dan ketebalan dari batugamping daerah penelitian digunakan menggunakan perhitungan luas *polygon* batugamping dan ketebalan rata-rata batugamping diambil dari penelitian pemetaan geologi (Budhitrisna, 2000). Perhitungan stok karbon merujuk ke (2).

$$Carbon Stock = MC \times A \times H \dots \dots \dots (2)$$

M C = Massa karbon di batugamping

A = Luas area batugamping

H = Ketebalan batugamping

Perhitungan dari fluks karbon dilakukan menggunakan hasil analisis ion bikarbonat pada sampel air yang diambil bulan April 2023 (Gambar 3). Selanjutnya, dilakukan pengambilan data debit menggunakan data sekunder berupa curah hujan dan suhu harian untuk mendapatkan rata-rata debit per hari. Perhitungan potensi debit dilakukan menggunakan rumus imbalanced air sederhana (Thorntwaite & Mather, 1957) dengan menggunakan indeks evapotranspirasi dan curah hujan. Data curah hujan diambil dari data raster Climate Hazards Center InfraRed Precipitation With Station Data (CHIRPS) dari bulan November 2022-Juni 2023. Pengukuran debit yang dilakukan terbatas pada debit aliran di permukaan, dengan nilai *runoff* yang dihitung terbatas pada *runoff* di musim penghujan.

Tujuan dari perhitungan fluks karbon adalah untuk mengetahui pemasukkan kadar karbon dioksida melalui proses pelarutan batuan karbonat. Proses pelarutan karbonat dapat

menyerap karbon dioksida sehingga dapat mengurangi jumlah karbon dioksida di atmosfer (Mattey drr., 2016). (Liu dan Zhao, 2000) Perhitungan ini mempertimbangkan hubungan antara total konsentrasi HCO_3^- limpasan permukaan dan sungai serta persebaran batuan, kemudian mengkalkulasikan kecepatan pelapukan batuan dengan persamaan sebagai berikut (3) (Jiang dan Yuan, 1999).

$$F = \frac{1}{2} \times \sum [\text{HCO}_3^-] \times \sum Q \times \text{MCO}_2 / \text{MCaCO}_3 \quad (3)$$

F = Fluks karbon

$\Sigma[\text{HCO}_3^-]$ = Konsentrasi HCO_3^- rata-rata

ΣQ = Debit rata-rata

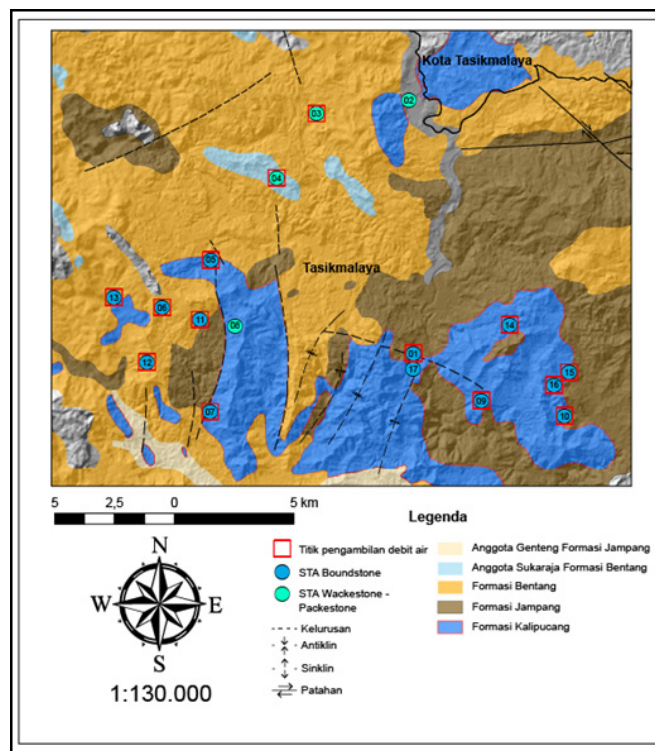
$\text{MCO}_2/\text{MCaCO}_3$ = Berat molar CO_2 / Berat molar CaCO_3

HASIL DAN PEMBAHASAN

Daerah penelitian terbagi menjadi dua, yakni batugamping Anggota Sukaraja yang terletak di zona bagian utara dengan luas sebesar 8,17 km²,

dan batugamping Formasi Kalipucang dengan luas 112,5 km². Berdasarkan hasil pemetaan lapangan dan analisis petrografi, litologi penyusun batugamping Anggota Sukaraja berupa *wackestone* dan *packestone*. Sementara itu, daerah penelitian bagian selatan, yakni batugamping Formasi Kalipucang tersusun atas litologi *boundstone* (Gambar 3). Pengambilan sampel batuan ditujukan di berdasarkan dari jenis litologi dan tingkat pelapukan batuan. Batugamping penyusun daerah penelitian berasal dari Anggota Sukaraja Formasi Bentang (Tmbs) dengan ketebalan 200 m dan Formasi Kalipucang (Tmkl) dengan ketebalan mencapai 500 m (Supriatna, S. drr., 1992 dan Budhistrisna, T., 2010).

Distribusi luas area Anggota Sukaraja Formasi Bentang di daerah Tasikmalaya mencapai 8.170.590 m² sedangkan distribusi Formasi Kalipucang sangat luas mencapai 112.498.957 m². Hasil pemetaan menunjukkan terdapat dua satuan yaitu satuan *wackestone* – *packestone* dan satuan *boundstone*. Pengambilan sampel batuan tiap stasiun titik amat (STA) dilakukan



Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian

pengamatan sayatan tipis batuan sebagai sampel batuan yang representatif tiap satuan batuan sebanyak 4 buah. Pengambilan sampel air berasal dari goa yang memiliki aliran sungai bawah tanah. Goa yang berkembang di daerah penelitian memiliki kenampakan morfologi berupa stalagtit, stalagmit. Sampel air berjumlah 14 sampel (Gambar 3.) yang dianalisis titrasi ion bikarbonat dan hasil analisis disajikan dalam Lampiran 2.

Identifikasi objek hidrogeologi menemukan mata air dan sungai bawah tanah yang masih berada dalam Kawasan Bentang Alam Karst Tasikmalaya. Besaran debit *runoff* bervariasi ($1,83 \times 10^8$ L/hari $8,24 \times 10^{10}$ L/hari) dengan catatan data diambil berdasarkan perhitungan imbalanced air pada bulan Januari-Desember 2023. Keberadaan mata air dan sungai bawah tanah dipetakan untuk mengetahui kadar ion HCO_3^- dan debit rata-rata untuk perhitungan fluks karbon.

Perhitungan stok karbon dilakukan menggunakan persamaan (1) dan (2) dan menggunakan tabulasi hasil analisis laboratorium XRF. Tabulasi data hasil analisis XRF dapat dilihat pada Tabel 1. dan Lampiran 1. Perhitungan persentase kadar CaO di daerah penelitian dibagi menjadi dua zona yaitu zona bagian utara dan zona bagian selatan (Gambar 3.). Zona bagian utara didominasi oleh batugamping dari Anggota Sukaraja Formasi Bentang, sedangkan zona bagian selatan didominasi batugamping Formasi Kalipucang. Untuk menghitung *carbon stock* yang terdapat dalam batugamping dilakukan dengan menggunakan persamaan (1) dan (2).

Luas area Anggota Sukaraja Formasi Bentang di zona bagian utara sebesar $8.170.590 \text{ m}^2$ dengan tebal mencapai 200 m memiliki persentase kadar senyawa CaO dengan rentang nilai 89% hingga 97% (Tabel 1.). *Carbon stock* di zona bagian utara ini diestimasi mencapai 418 ribu ton.

Berbeda halnya dengan zona bagian selatan daerah penelitian, yang tersusun atas *boundstone* dari Formasi Kalipucang yang terdistribusi seluas $11.2498.957 \text{ m}^2$ dengan tebal mencapai 500 m, maka kadar persentase senyawa CaO di zona ini relatif rendah mulai 80% hingga 99% dan rata – rata 87,68% (Tabel 2.). Estimasi *carbon stock* yang terdapat pada batugamping di zona ini mencapai 13 juta ton atau sekitar 13×10^6 ton. Jumlah *carbon stock* yang cukup besar dipengaruhi oleh kadar CaO yang tinggi dan luas wilayah yang cukup luas.

Perhitungan Fluks Karbon. Hasil titrasi analisis ion bikarbonat air dari ke 14 sampel menunjukkan kadar bikarbonat sampel air dari sungai bawah tanah rata – rata mengandung 320 mg/L sampai 350 mg/L. TA 05 menunjukkan adanya anomali dengan kadar bikarbonat mencapai 1878 mg/L yang disebabkan oleh mata air yang tertutup sehingga kadar bikarbonat yang terlarut cukup banyak. Debit aliran sungai bawah tanah mengacu pada perhitungan neraca air yang dilakukan oleh (Hartanto, 2012). Tabel 3. Menunjukkan nilai data curah hujan (Funk drr. 2015) dalam climate hazard infrared precipitation with stations (CHRIPS).

Tujuan perhitungan *carbon flux* adalah untuk mengetahui potensi karbon dioksida yang dapat

Tabel 1. *Carbon stock* yang terkandung pada batugamping Anggota Sukaraja Formasi Bentang di bagian utara daerah penelitian

Sampel	CaO (%)	Massa karbon di batugamping (M C)	Luas area batugamping (A)	Ketebalan (H)	<i>Carbon Stock</i> (ton)
TA-02A	94,949	55,138	$8.170.590 \text{ m}^2$	200 m	418.528,05
TA-02B	96,808	56,218			
TA-02C	97,382	56,551			
TA-03A	95,452	55,430			
TA-03B	94,766	55,032			
TA-04A	89,384	51,907			
TA-04B	90,454	52,528			
TA-04C	96,875	56,256			
Rata - rata	94,509	54,883			

Perhitungan Stok Karbon Inorganik Batugamping dan Fluks Karbon
di Kawasan Bentang Alam Karst (KBAK) Tasikmalaya, Jawa Barat

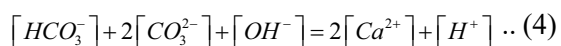
Tabel 2. Stok karbon yang terkandung pada batugamping Formasi Kalipucang di bagian selatan daerah penelitian

Sampel	CaO (%)	Massa karbon di batugamping (M C)	Luas area batugamping (A)	Ketebalan (H)	Stok Karbon
TA-01A	94,784	55,04	11.2498.957 m ²	500 m	13 x 10 ⁶ ton
TA-01B	93,331	54,20			
TA-05A	96,189	55,86			
TA-05B	97,586	56,67			
TA-06B	96,061	55,78			
TA-06C	95,366	55,38			
TA-07B	98,513	57,21			
TA-07C	96,195	55,86			
TA-08B	95,323	55,36			
TA-08C	13,039	7,57			
TA-08D	82,684	48,02			
TA-09A	71,728	41,65			
TA-09A2	92,441	53,68			
TA-09B	81,89	47,55			
TA-10	93,977	54,57			
TA-11A	99,085	57,54			
TA-12A	85,798	49,82			
TA-13B	85,082	49,41			
TA-14	95,318	55,35			
TA-16	89,309	51,86			
RATA-RATA	87,685	50,92			

Tabel 3. Curah hujan daerah penelitian (tahun 2023)

STA	CURAH HUJAN (mm/bulan)							
	JAN	FEB	MAR	APR	MEI	JUN	NOV	DES
UTARA								
TA-03	259	321	413	437	206	125	350	150
TA-04	247	311	386	422	204	98	365	154
RATA-RATA	253	316	400	430	205	112	358	152
SELATAN								
TA-05	247	311	386	422	204	98	365	154
TA-06	250	329	399	417	229	90	357	149
TA-07	229	283	320	385	206	96	359	144
TA-09	237	298	335	379	197	104	320	153
TA-10	237	298	335	379	197	104	320	153
TA-11	243	294	358	412	213	91	356	147
TA-12	250	329	399	417	229	90	357	149
TA-13	250	329	399	417	229	90	357	149
TA-14	239	322	358	380	212	98	324	159
TA-15	239	322	358	380	212	98	324	159
TA-16	239	322	358	380	212	98	324	159
RATA-RATA	242	312	364	397	213	96	342	152

terserap melalui proses pelarutan batugamping formasi Kalipucang dan Anggota Sukaraja formasi Bentang. Perhitungan *carbon flux* yang menggunakan kadar ion bikarbonat karena ion tersebut yang lebih stabil saat terjadinya kesetimbangan pelarutan dalam kondisi *aqueous* (Milanolo dan Gabrovšek, 2015), dalam persamaan rumus kimia (4).



Selain itu, umumnya pH air sungai bawah tanah berkisar 7 - 8 yang mendukung terbentuknya karbon inorganik dalam bentuk senyawa HCO_3^- (Appelo dan Postma, 2005 dalam Milanolo dan Gabrovšek, 2015). Berdasarkan hasil perhitungan (Tabel 3.), total *carbon flux* yang dihasilkan di daerah utara penelitian mencapai $4,98 \times 10^{10}$ mg/hari hingga $2,85 \times 10^{13}$ mg/hari, sedangkan *carbon flux* yang dihasilkan di daerah selatan penelitian mencapai $6,58 \times 10^{10}$ mg/hari hingga $9,78 \times 10^{13}$ mg/hari (Tabel 4.) menunjukkan ka-

Tabel 4. Hasil estimasi *carbon flux* Daerah Utara

UTARA					
Sample	Kadar Bikarbonat (mg/L)	Debit Min (L/day)	Carbon Flux Min (mg/day)	Debit Max (m3/day)	Carbon Flux Max (mg/day)
TA01	346,1	1,50,E+09	5,18,E+11	8,08,E+10	2,80,E+13
TA 03	346,1	1,83,E+08	6,34,E+10	8,24,E+10	2,85,E+13
TA 04	271,9	1,83,E+08	4,98,E+10	7,67,E+10	2,08,E+13
Total			6,31,E+11		7,73,E+13
Rata – rata			3,16,E+11		2,58,E+13

Tabel 5. Hasil estimasi *carbon flux* Daerah Selatan

SELATAN					
Sample	Kadar Bikarbonat (mg/L)	Debit Min (L/hari)	Carbon Flux Min (mg/hari)	Debit Max (m3/hari)	Carbon Flux Max (mg/hari)
TA 05	1878,7	9,74,E+09	1,83,E+13	5,21,E+10	9,78,E+13
TA 06	321,4	2,05,E+08	6,58,E+10	2,28,E+09	7,33,E+11
TA 07	327,5	9,74,E+09	3,19,E+12	6,26,E+10	2,05,E+13
TA 09	290,5	9,61,E+09	2,79,E+12	6,39,E+10	1,86,E+13
TA-10	358,4	9,61,E+09	3,44,E+12	6,39,E+10	2,29,E+13
TA-11A	321,4	1,00,E+10	3,22,E+12	7,15,E+10	2,30,E+13
TA-12A	210,1	1,21,E+10	2,53,E+12	7,78,E+10	1,63,E+13
TA-13B	333,7	1,21,E+10	4,02,E+12	7,78,E+10	2,59,E+13
TA-14	377	1,05,E+10	3,95,E+12	6,50,E+10	2,45,E+13
TA 15	370,8	1,05,E+10	3,89,E+12	6,50,E+10	2,41,E+13
TA-16	352,3	1,05,E+10	3,69,E+12	6,50,E+10	2,29,E+13
Total			4,91,E+13		2,97,E+14
Rata - rata			4,46,E+12		2,70,E+13

dar karbon inorganik yang dihasilkan sangatlah tinggi.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemetaan lapangan, terdapat 17 titik stasiun pengamatan dengan 14 stasiun titik amat berupa goa dan 3 stasiun titik amat berupa singkapan tebing dengan litologi penyusun yang bervariasi berupa *wackestone*, *packestone*, dan *boundstone* dengan kondisi tingkat pelapukan rendah hingga tinggi. Kandungan CaO pada sampel batugamping di lokasi penelitian bervariasi sebesar 71-99%. Estimasi *carbon stock* di zona bagian utara mencapai 418 ribu ton, sedangkan pada batugamping di zona selatan mencapai 13 juta ton atau sekitar 13×10^6 ton. Hasil analisis titrasi ion bikarbonat pada 14 sampel air menunjukkan kadar bikarbonat dari sungai bawah tanah rata – rata mengandung 320 mg/L hingga 350 mg/L. Total *carbon flux* yang dihasilkan di daerah utara penelitian mencapai $4,98 \times 10^{10}$ mg/hari hingga $2,85 \times 10^{13}$ mg/hari, sedangkan *carbon flux* yang

dihasilkan di daerah selatan penelitian mencapai $6,58 \times 10^{10}$ mg/hari hingga $9,78 \times 10^{13}$ mg/hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Pusat Air Tanah dan Geologi Tata Lingkungan – Badan Geologi sebagai sponsor utama dalam pengambilan data penelitian. Ucapan terima kasih juga dihaturkan kepada tim editor dan tim redaksi yang telah menerbitkan tulisan ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrew R.M., 2018, Global CO₂ emissions from cement production.: Earth System Science Data, v. 10, p. 1–20.
- Budhitisna, T. (2000). Peta Geologi Lembar Tasikmalaya, Jawa Barat. Skala 1 : 100.000. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Danardono, Haryono, E., dan Widyastuti, M., 2019, Potential of Carbon Stocks and

- Its Economic Values in Tropical Karst Landscape (Case Study in Biduk-Biduk Karst, East Kalimantan, Indonesia): *Journal of Physics: Conference Series*, v. 1373, doi:10.1088/1742-6596/1373/1/012030.
- Ding, S., Zhou, Z., Dong, H., Yan, L., Shi, L., Huang, J., dan Zhang, H., 2022, Spatiotemporal Variations of Riverine CO₂ Partial Pressure and its Effect on CO₂ Flux at the Water–Air Interface in a Small Karst River: *Aquatic Geochemistry*, v. 28, p. 135–154, doi:10.1007/s10498-022-09406-9.
- Falkowski, P. dr., 2000, The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system: *Science*, v. 290, p. 291–296, doi:10.1126/science.290.5490.291.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., & Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data*, 2(1). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Hartanto, P., 2012, Sumberdaya Air Bagi Pemenuhan Masyarakat Di Kabupaten Tasikmalaya Jawa Barat: *Jurnal Riset Geologi dan Pertambangan*, v. 22, p. 131, doi:10.14203/risetgeotam2012.v22.64.
- Haryono, E., Adji, T.N., Widyastuti, M., dan Trijuni, S., 2009, Atmospheric Carbon Dioxide Sequestration Trough Karst Denudation Process: Preliminary Estimation from Gunung Sewu Karst: *International Seminar on Achieving Resilient*, p. 1–7, <https://osf.io/preprints/inarxiv/wduzn/>.
- Jiang, Z., dan Yuan, D., 1999, CO₂ source-sink in karst processes in karst areas of China: *Episodes*, v. 22, p. 33–35.
- Liu, Z., dan Zhao, J., 2000, Contribution of carbonate rock weathering to the atmospheric CO₂ sink: *Environmental Geology*, v. 39, p. 1053–1058, doi:10.1007/s002549900072.
- Mattey, D.P., Atkinson, T.C., Barker, J.A., Fisher, R., Latin, J.P., Durrell, R., dan Ainsworth, M., 2016, Carbon dioxide, ground air and carbon cycling in Gibraltar karst: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 184, p. 88–113, doi:10.1016/j.gca.2016.01.041.
- Melnikov, N.B., dan O'Neill, B.C., 2006, Learning about the carbon cycle from global budget data: *Geophysical Research Letters*, v. 33, p. 2–5, doi:10.1029/2005GL023935.
- Milanolo, S., dan Gabrovšek, F., 2015, Estimation of carbon dioxide flux degassing from percolating waters in a karst cave: Case study from Bijambare cave, Bosnia and Herzegovina: *Chemie der Erde*, v. 75, p. 465–474, doi:10.1016/j.chemer.2015.10.004.
- Parrenin, F., Masson-Delmotte, V., Köhler, P., Raynaud, D., Paillard, D., Schwander, J., Barbante, C., Landais, A., Wegner, A., dan Jouzel, J., 2013, Synchronous change of atmospheric CO₂ and antarctic temperature during the last deglacial warming: *Science*, v. 339, p. 1060–1063, doi:10.1126/science.1226368.
- Song, X., Gao, Y., Wen, X., Guo, D., Yu, G., He, N., dan Zhang, J., 2017, Carbon sequestration potential and its eco-service function in the karst area, China: *Journal of Geographical Sciences*, v. 27, p. 967–980, doi:10.1007/s11442-017-1415-3.
- Supriatna, S., Sarmil, L., Sudana, D., & Koswara, A. (1992). Peta Geologi Lembar Karangnunggal, Skala 1 : 100.000. Bandung: Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi.
- Thorntwaite, C., & Mather, J. (1957). Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and the Water Balance. *Laboratory of Climatology*, 10.
- Worrell, E., Price, L., Martin, N., Hendriks, C., dan Meida, L.O., 2001, Carbon dioxide emissions from the global cement industry: *Annual Review of Energy and the Environment*, v. 26, p. 303–329, doi:10.1146/annurev.energy.26.1.303.