

Logam Berat dalam Lingkaran Tahun Kerangka Kapur Karang *Platygyra sp.* Pulau Pari, Kepulauan Seribu: Perbandingan Sekarang dan Zaman Pertengahan Holosen

*Heavy Metals in Annual Band of Skeleton Coral *Platygyra sp.* in Pari Island, Kepulauan Seribu: Comparison between Recent and Mid-Holocene*

A. Arman*, A. D. P. Putra, D. Shintianata, U. Sugiharto

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta 12440, Indonesia

* E-mail : alilubis@batan.go.id

ABSTRAK

Terumbu karang dapat berfungsi sebagai perekam perubahan lingkungan daerah pesisir yang tersimpan dalam kerangka karangnya. Pada penelitian ini digunakan terumbu karang jenis *Platygyra sp.* untuk kajian perubahan lingkungan daerah pesisir Pulau Pari, Kepulauan Seribu. Terumbu karang hidup (karang modern) diambil dari lokasi penelitian dan dipotong menjadi bentuk lempeng dengan ketebalan 1 cm, dicuci dengan akuabides dan dikeringkan dalam oven. Selanjutnya digunakan radiografi sinar-X untuk menentukan umur karang melalui lingkaran tahun dan arah pertumbuhan. Sub sampel diambil menggunakan alat bor tangan dari setiap lingkaran tahun dan dianalisis kandungan logam berat Ca, Sr, Cr, Cu, Pb dan Zn dengan alat *Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometer* (ICP-OES). Sebagai pembanding dan *database* kandungan logam berat, dilakukan analisis fosil karang dengan spesies yang sama dari Kepulauan Seribu. Pada sampel fosil terlebih dahulu dilakukan analisis umur dengan radio-karbon ^{14}C dan kandungan aragonit dengan Difraksi sinar-X (XRD). Berdasarkan radiografi sinar-X diperoleh umur karang modern adalah 12 tahun dan berdasarkan ^{14}C diperoleh umur fosil karang adalah 3255 tahun BP (*mid-holocene*). Analisis XRD menunjukkan bahwa fosil karang mengandung 100% aragonit. Rata-rata konsentrasi logam berat unsur utama karang Sr dan Ca tidak menunjukkan perubahan antara zaman pertengahan holosen dan kondisi saat ini dengan perbedaan di bawah 1 %. Logam lainnya (Cr, Cu, Pb, dan Zn) yang merupakan antropogenik mengalami peningkatan pada saat sekarang dibanding dengan zaman pertengahan holosen dengan persentase yang bervariasi yang menunjukkan adanya peningkatan aktivitas manusia dan industri.

Kata kunci: logam berat, kerangka karang, *Platygyra sp.*, radiografi sinar-X, ^{14}C

ABSTRACT

Coral reefs have been known as environmental archives on the coastal area that can provide earth history records in their skeleton. This study used *Platygyra sp.* to analyze environmental changes in the coastal area of Pari Island, Kepulauan Seribu. Coral was collected from the sampling location and cut into the slab with a thickness of 1 cm, cleaned with aquabidest and dried in the oven. The slab was X-radiographed to determine annual banding and growth pattern. Sub-sampling was conducted with an aid of hand drill from each annual banding and analyzed by using ICP-OES for the analysis of heavy metals including Ca, Sr, Cr, Cu, Pb, and Zn. For comparison and baseline data, in situ fossil coral from Kep. Seribu was collected and analyzed using the same treatment as the modern coral. The geochronological record of coral growth was determined by radiocarbon dating ^{14}C and the aragonite content identified by X-ray diffraction (XRD). Based on x-ray radiography for modern coral and ^{14}C for fossil coral, the age of modern coral is 12 years before present (BP) and fossil coral is 3255 years BP (Mid-Holocene). The XRD shows that the fossil coral is 100% aragonite. The average concentration of major elements Sr and Ca show that the difference between recent and mid-holocene is below 1%. Other trace elements (Cr, Cu, Pb, and Zn) attributed to anthropogenic elements are higher in modern than fossil coral with the difference of percentage varied which may indicate to the increase of human and industrial activities.

Keywords: heavy metals, skeleton, *Platygyra sp.*, X-ray radiography, ^{14}C

PENDAHULUAN

Terumbu karang adalah produktivitas primer yang sangat penting di kawasan pesisir daerah tropis [1],[2]. Kerangka (skeleton) terumbu karang masif yang terbentuk dari endapan kalsium karbonat (CaCO_3) dapat tumbuh dari skala milimeter hingga centimeter per tahun [3]. Pertumbuhan skeleton karang masif tersebut terutama dari jenis karang *Porites sp* telah digunakan secara luas dalam studi perubahan iklim dan lingkungan untuk rentang waktu yang terus-menerus (*time series*) [4],[5] seperti perubahan kimia air laut, kandungan nutrisi dan bahkan juga polutan yang masuk ke lingkungan perairan [2],[4],[6]. Hal ini karena laju pertumbuhan karang *Porites* yang relatif sedang dibanding dengan spesies lainnya. Rekonstruksi suhu permukaan laut dalam kaitannya dengan perubahan iklim telah menggunakan skeleton terumbu karang melalui analisis rasio Sr/Ca dan Mg/Ca [7],[8],[9] dan bersamaan dengan $\delta^{18}\text{O}$ untuk penelitian suhu dan salinitas permukaan laut [10],[11]. Kajian berbagai logam berat dalam skeleton karang *Porites sp* telah dilakukan untuk geokronologi pencemaran, karena logam tersebut berinkorporasi dengan struktur kerangka karang jenis aragonit [12],[13]. Logam ini akan tetap berada selamanya di kerangka karang karena pertumbuhan baru akan menutupi kerangka yang sebelumnya [14],[15].

Konsentrasi logam berat di lingkungan bervariasi dengan kategori unsur utama, minor atau kelumit (*trace element*). Logam berat sangat dibutuhkan dalam beberapa hal, seperti dalam fisiologi tumbuhan dan hewan. Namun peningkatan konsentrasi logam berat yang signifikan dapat menyebabkan pencemaran [16]. Logam berat dapat terakumulasi dalam jaringan biota dan menyebabkan dampak yang besar terhadap sistem ekologi karena toksisitasnya [17].

Penelitian kandungan logam berat menggunakan berbagai jenis karang modern telah dilakukan seperti *Porites* [13],[18],[19] *Cladocora caespitose* [20] *Halimeda* [21] *Acropora nobilis* [22]. Pada penelitian ini digunakan jenis karang yang berbeda yaitu *Platygyra sp.* karang modern dan karang fosil untuk mengetahui akumulasi logam yang terekam dalam kerangka karang pada kondisi sekarang dan pada pada zaman pertengahan Holosen yang masing-masing dapat digunakan untuk kajian tingkat pencemaran dan

juga sebagai basis data di daerah pesisir Pulau Pari, Kepulauan Seribu.

BAHAN DAN METODE

Sampel terumbu karang masif jenis *Platygyra sp.* yang masih hidup (karang modern) diambil dari perairan pesisir Pulau Pari, Kepulauan Seribu dengan kordinat $5^{\circ}51'42''$ LS dan $106^{\circ}37'11''$ BT pada bulan Oktober 2019 (Gambar 1). Sedangkan sampel fosil dengan spesies yang sama diambil dari daratan Pulau Pari, lokasi yang sama dengan karang modern. Kedua sampel karang tersebut dibawa ke laboratorium untuk analisis lanjutan. Sampel karang modern dan fosil dicuci dengan air kran dan dibilas dengan akuabides untuk menghilangkan organik pada permukaan karang. Karang dipotong menjadi lempeng dengan ketebalan 1 cm, kemudian dicuci di dalam *ultrasonic bath* dengan akuabides selama 30 menit dengan 3 kali pengulangan dan selanjutnya dikeringkan dalam oven suhu 50°C selama 5 hari.

Sampel karang baik yang hidup maupun fosil dianalisis dengan radiografi sinar-X untuk menentukan lingkaran tahun (*annual banding*). Pada sampel karang modern digunakan alat digital sinar-X Shanghai Guangzho SF 100 BY dengan daya 40 keV selama 1,5 detik yang dilakukan di laboratorium klinik dan rontgen Permata Indah, Jakarta Barat. Sedangkan pada karang fosil digunakan sinar-X Rigaku Radioflex RF-300EGM2 130 keV dengan lama penyinaran 1 detik yang dilakukan di laboratorium *non-destructive test* (NDT) PAIR-BATAN [3]. Umur karang modern ditentukan dari lingkaran tahun dengan menghitung mundur dimulai dari tahun pengambilan sampel (2019). Sementara itu hasil radiografi sinar-X karang fosil hanya untuk menentukan lingkaran tahun. Umur karang fosil ditentukan dengan radioisotop ^{14}C menggunakan metode absorpsi CO_2 , yaitu dengan mereaksikan CaCO_3 dengan HCl 10% sehingga diperoleh CO_2 yang mengandung ^{14}C di dalamnya [23]. Sampel diukur dengan alat *Liquid Scintillation Analyzer* Perkin Elmer 2910TR. Analisis dilakukan di laboratorium hidrologi, PAIR-BATAN. Selanjutnya berdasarkan hasil penentuan umur karang dilakukan kalibrasi untuk mendapatkan ΔR yang merupakan koreksi umur sampel laut terhadap terestrial menggunakan *software* CALIB dan kurva Marine13 [24].

Pengujian mikro struktur secara kuantitatif dengan XRD menggunakan alat Shimadzu XD 610 di laboratorium XRD Pusat Sains dan Teknologi Bahan Maju (PSTBM) - BATAN [25]. Analisis dengan XRD pada karang fosil tersebut adalah untuk mengetahui persentase aragonit yang berkaitan dengan proses diagenesa karang.

Analisis logam berat dilakukan dengan alat ICP-OES. Lempong karang digerus dengan alat bor tangan dari tiap lingkaran tahun mengikuti arah pertumbuhan karang (Gambar 2). Sebanyak 20 - 25 mg serbuk karang dimasukkan ke dalam vial 15 mL. Kemudian dilarutkan dengan 2 mL HNO₃ 25%, dihomogenisasi dengan vortex dan ditambahkan aquabides 8 mL. Aquabides yang digunakan adalah hasil pemurnian bertingkat dari alat Milli-Q Merck. Setelah serbuk karang larut dengan sempurna, dilakukan pengukuran kandungan logam menggunakan ICP-OES Thermo iCAP 7400 radial. Analisis kuantitatif dilakukan dengan menggunakan seri larutan standar masing-masing logam dari Merck dan koreksi blanko dengan akuabides.



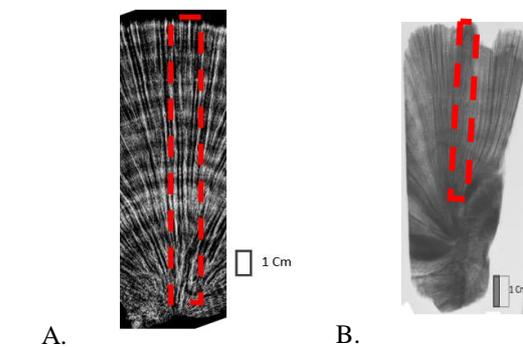
Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel karang *Platygyra sp.* di Pulau Pari, Kepulauan Seribu, (●) adalah titik pengambilan sampel

HASIL DAN PEMBAHASAN

Umur dan laju pertumbuhan karang

Berdasarkan hasil analisis radiokarbon ¹⁴C diperoleh umur karang fosil adalah 3.255 tahun BP dengan $\Delta R = -10$ (¹⁴C tahun). Berdasarkan umur karang fosil tersebut, diperkirakan karang

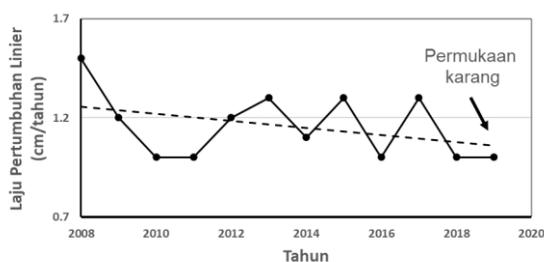
modern pada zaman pertengahan Holosen (*Mid-Holocene* ~4.500 tahun BP) [26]. Holosen adalah periode geologi yang dimulai sekitar 12.000 tahun yang lalu hingga saat sekarang. Foto digital radiografi sinar-X karang modern dan fosil *Platygyra sp.* dapat dilihat pada Gambar 2. Pada Gambar 2 terlihat adanya perbedaan yang nyata antara densitas rendah dan densitas tinggi, hal ini berkaitan dengan periode tahunan (lingkaran tahun) dari pertumbuhan karang. Penghitungan lingkaran tahun dilakukan pada arah pertumbuhan yang lurus dari permukaan hingga dasar karang. Panjang lingkaran tahun ditentukan dengan Coral-XDS [27] dan pengukuran langsung dengan mikrometer.



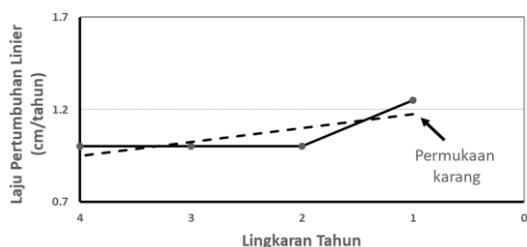
Gambar 2. Radiografi sinar-X sampel karang *Platygyra sp.* modern (A) dan fosil (B). Bagian yang di dalam garis putus-putus adalah untuk penentuan laju pertumbuhan linier dan pengambilan sub-sampel logam berat

Berdasarkan lingkaran tahun tersebut umur karang modern adalah 12 tahun (tahun 2008 sampai dengan 2019) dan karang fosil 4 tahun, akan tetapi tidak dapat ditentukan tahun mulai tumbuhnya karang fosil karena penentuan umur dengan ¹⁴C berdasarkan *bulk* sampel. Rata-rata laju pertumbuhan linear karang modern dan fosil adalah masing-masing 1,16 cm/tahun dan 1,07 cm/tahun. Hasil tersebut menunjukkan rata-rata laju pertumbuhan yang tidak jauh berbeda antara karang modern dan fosil. Laju pertumbuhan tersebut lebih kecil dibandingkan karang *Porites sp.* dari lokasi yang sama yaitu 1,56 cm/tahun [3]. Laju pertumbuhan linier tertinggi karang modern pada tahun 2008 sebesar 1,5 cm/tahun dan laju paling rendah adalah 1 cm/tahun pada tahun 2010, 2011, 2018 dan 2019 (Gambar 3A). Laju pertumbuhan selama 12 tahun dari 2008 sampai dengan 2019 mengalami penurunan yang kemungkinan disebabkan kenaikan suhu

permukaan laut. Hal yang sama juga terjadi pada sampel karang *Porites sp.* dari Pulau Pari, Pulau Panjang dan Pulau Penjaliran [3], sedangkan laju pertumbuhan karang fosil mengalami sedikit kenaikan selama 4 tahun pertumbuhannya. Pada bagian permukaan laju pertumbuhannya 1,25 cm/tahun, lebih besar dibandingkan dengan 3 tahun di bawahnya yang mempunyai laju pertumbuhan linier yang sama yaitu 1 cm/tahun (Gambar 3B).



Gambar 3A. Laju pertumbuhan linier karang modern *Platygyra sp.* Garis putus-putus adalah regresi linier dari laju pertumbuhan

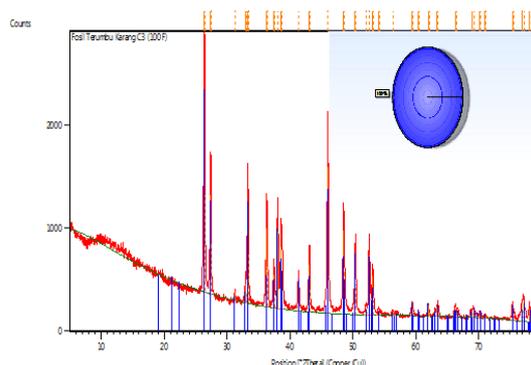


Gambar 3B. Laju pertumbuhan linier karang fosil *Platygyra sp.*, dengan umur karang 3.255 tahun BP. Garis putus-putus adalah regresi linier dari laju pertumbuhan

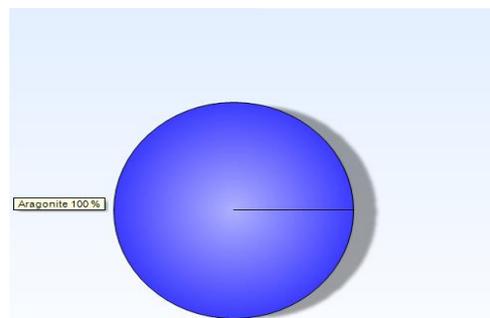
Diagenesa karang fosil

Komposisi utama karang adalah mineral aragonit. Diagenesa merupakan proses perubahan kandungan unsur kimia yang dipengaruhi oleh faktor lingkungan dan iklim. Mineral kalsit pada karang merupakan hasil ubahan (diagenesa) dari mineral aragonite. Diagenesa berpotensi menjadi sumber kesalahan dalam merekonstruksi variabel lingkungan dan iklim karena pada proses diagenesa terjadi penambahan atau substitusi unsur sehingga mempengaruhi hasil interpretasi [4]. Terjadinya diagenesa pada karang ditentukan dengan analisis XRD. Hasil analisis XRD pada sampel fosil menunjukkan bahwa karang fosil mengandung 100% aragonit dan tidak terdapat kalsit (Gambar 4A dan 4B). Pada gambar 4A

terlihat spektrum yang menunjukkan bahwa karang fosil hanya mengandung aragonit. Hal ini juga ditunjukkan pada gambar 4B dengan kandungan aragonit 100%. Berdasarkan hal itu diperoleh bahwa tidak terjadi proses diagenesa pada sampel fosil sehingga kandungan logam berat yang ada belum terjadi perubahan sejak karang menjadi fosil yaitu sejak sekitar 3.250 tahun yang lalu.



Gambar 4A. Spektrum hasil analisis XRD karang fosil, spektrum dengan puncak dari 20 menunjukkan bahwa terdapat hanya aragonit



Gambar 4B. Hasil analisis kuantitatif karang fosil dengan XRD, aragonit 100%

Profil kandungan logam berat

Logam berat yang diukur dari karang modern hanya rentang waktu 11 tahun (2008-2018) karena pada bagian atas dari karang (permukaan) masih terdapat polip karang mengandung senyawa organik dan organisme yang bukan termasuk bagian kerangka karang. Akan tetapi hal ini berbeda dengan karang fosil yang tidak lagi memiliki polip, sehingga logam berat dianalisis mulai dari permukaan. Selanjutnya, seperti yang disampaikan pada

pembahasan umur dan laju pertumbuhan bahwa tahun mulai tumbuh karang fosil tidak dapat ditentukan sehingga hanya diberi angka yang berkaitan dengan lingkaran tahun (Gambar 5A sampai dengan 5F dan Tabel 2).

Konsentrasi logam berat karang fosil dapat digunakan sebagai basis data logam berat di daerah Pulau Pari dan sekitarnya karena dapat diasumsikan bahwa fosil karang dengan umur 3.250 tahun yang lalu belum dipengaruhi oleh adanya aktivitas manusia/industri. Kandungan logam berat dalam karang fosil selama 4 tahun untuk semua unsur Ca, Sr, Cr, Cu, Pb dan Zn adalah relatif konstan, sementara itu logam berat tersebut bervariasi pada karang modern dengan rentang waktu 11 tahun seperti terlihat pada Gambar 5 C sampai dengan 5F dan Tabel 1 dan 2.

Tabel 1. Konsentrasi logam berat sampel karang modern *Plathygyra sp.*

Tahun	Ca (%)	Sr (%)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
2018	13,66	0,58	10,34	6,40	3,94	5,42
2017	13,99	0,58	10,58	2,88	2,88	5,77
2016	13,57	0,57	7,21	3,37	1,91	4,33
2015	13,93	0,59	6,74	1,90	5,16	5,69
2014	13,70	0,58	12,25	1,47	4,56	4,90
2013	13,82	0,58	13,30	2,88	2,96	4,43
2012	13,94	0,57	9,86	4,04	1,95	5,16
2011	14,16	0,59	7,24	1,48	1,83	4,43
2010	13,82	0,57	5,76	3,90	2,96	3,79
2009	13,97	0,58	6,48	1,48	1,99	4,93
2008	14,13	0,58	7,98	1,41	3,29	2,60
Rata-rata	13,88	0,58	8,89	2,84	3,04	4,68

Tabel 2. Konsentrasi logam berat sampel karang fosil *Plathygyra sp.*

No	Ca (%)	Sr (%)	Cr (ppm)	Cu (ppm)	Pb (ppm)	Zn (ppm)
1	13,97	0,58	4,47	1,47	1,97	2,83
2	13,90	0,58	4,83	1,99	1,36	2,76
3	13,95	0,59	5,36	1,82	1,69	2,31
4	13,97	0,58	5,09	1,91	1,53	2,53
Rata-rata	13,95	0,58	4,94	1,80	1,64	2,61

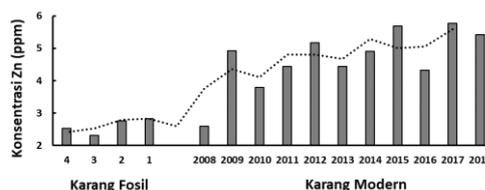
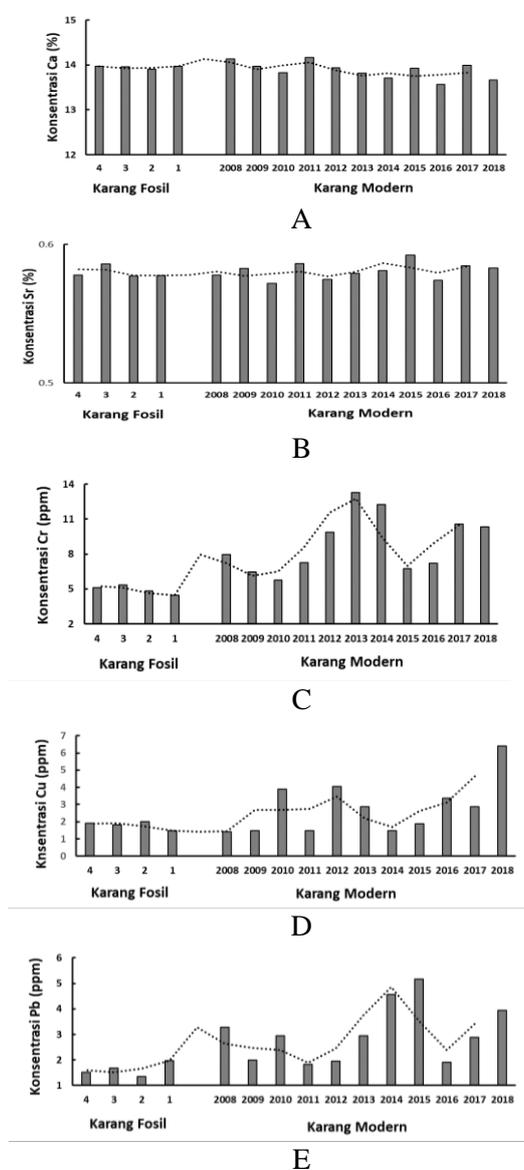
Kandungan logam berat rata-rata untuk logam berat Ca dan Sr yang merupakan unsur utama karang adalah 13,88% dan 0,58% untuk karang modern (Tabel 1) dan 13,95% dan 0,58% untuk karang fosil (Tabel 2). Tidak terlihat adanya peningkatan logam utama dari karang fosil ke

karang modern. Ca adalah unsur pembentuk karang aragonit (CaCO_3), sedangkan Sr adalah unsur utama dari air laut dan keberadaannya di dalam air laut sangat dibutuhkan (esensial) [28]. Hal lain kemungkinan penyebabnya adalah karena unsur utama karang tersebut kemungkinan tidak dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan seperti suhu dan pencemaran (aktivitas industri). Ca dan Sr yang pada umumnya digunakan untuk riset *paleo-climate* (iklim purba), kandungan Sr dan Ca dianalisis dengan interval setiap 1 mm yang berkaitan dengan fluktuasi suhu bulanan (musim) [11],[29], sedangkan dalam penelitian ini hanya dalam interval lingkaran tahun (rata-rata 1 cm).

Konsentrasi logam antropogenik Cr, Cu, Pb dan Zn rata-rata adalah 8,89 ppm, 2,84 ppm, 3,05 ppm dan 4,68 ppm untuk karang modern dan 4,94 ppm, 1,80 ppm, 1,64 ppm dan 2,61 ppm untuk karang fosil. Berbeda dengan Ca dan Sr, untuk logam antropogenik mengalami peningkatan dari karang yang telah menjadi fosil dari 3.250 tahun yang lalu terhadap karang modern dengan persentase kenaikan masing-masing logam Cr, Cu, Pb dan Zn sebesar 79,9%, 57,9%, 85,6% dan 79,3%.

Profil unsur Cr dan Pb karang modern menunjukkan pola fluktuasi yang hampir sama (Gambar 5C dan 5E), dengan konsentrasi masing-masing 7,98 ppm dan 3,29 ppm pada tahun 2008, selanjutnya terjadi penurunan hingga 5,76 ppm pada tahun 2010 untuk logam Cr dan penurunan hingga 1,83 ppm untuk logam Pb tahun 2011. Kemudian terjadi kenaikan konsentrasi Cr hingga 13,30 ppm di tahun 2013 yang merupakan konsentrasi tertinggi dari logam Cr dan untuk Pb naik hingga 5,16 ppm pada tahun 2015 yang juga merupakan konsentrasi tertinggi untuk Pb selama rentang waktu 11 tahun. Rekam jejak Pb dalam karang *Porites* di Pulau Tunda, Banten telah dilaporkan oleh Riska dkk. [30] bahwa telah terjadi kenaikan dari 6 ppm pada tahun 1940 menjadi 16 ppm pada tahun 2015 yang utamanya disebabkan oleh kegiatan baik di daratan utama (*mainland*) maupun di perairan itu sendiri. Sedangkan hasil penelitian logam Pb menggunakan metode spektroskopi serapan atom dalam terumbu karang *Porites stephensoni* di Kepulauan Seribu (Pulau Tidung, Pulau Tikus, dan Pulau Bokor) oleh Melly dkk. [19] diperoleh nilai yang berfluktuasi. Dilaporkan bahwa Pb di Pulau Tikus yang berdekatan dengan Pulau Pari memiliki konsentrasi 1,11 ppm pada tahun 1997

dan meningkat hingga 10,56 ppm tahun 2002 dan tidak terdeteksi pada permukaan karang (tahun 2006). Karena posisi lokasi penelitian yang hampir berdekatan, maka kemungkinan hal yang sama dapat terjadi di Pulau Pari karena lokasi yang cukup berdekatan dengan Pulau Tikus. Seperti diketahui bahwa logam Cr dan Pb adalah termasuk kategori unsur beracun dimana keberadaannya di perairan biasanya berasal dari aktivitas industri seperti *electroplating* dan pembuatan bahan kimia, pigmentasi dan cat primer untuk kapal, industri tekstil, *finishing* logam, pertambangan, dan industri keramik dan bahan bakar fosil [31].



Gambar 5. Profil logam berat pada terumbu karang modern dan fosil untuk logam Ca (A), Sr (B), Cr (C), Cu (D), Pb (E) dan Zn (F).

Logam Cu dan Zn adalah unsur esensial bagi organisme dan mempunyai peran yang sangat penting dalam pertumbuhan, metabolisme sel dan ketahanan untuk hewan termasuk karang [32]. Pada daerah perairan, keberadaan Zn bersumber dari antropogenik dan terakumulasi serta mengalami proses pengayaan (*enrichment*) dalam kerangka karang dibandingkan dengan airlaut sekitarnya [18]. Konsentrasi Cu dan Zn pada tahun 2008 tidak jauh berbeda dengan *baseline* yaitu masing-masing 1,41 ppm dan 2,60 ppm. Terjadi peningkatan logam Cu hingga tahun 2012 dengan konsentrasi 4,04 ppm, kemudian menurun hingga tahun 2014 dan kemudian meningkat hingga mencapai konsentrasi tertinggi sebesar 6,40 ppm pada tahun 2018. Profil logam Zn terlihat berbeda dengan antropogenik lainnya (Cr, Cu dan Pb) karena Zn menunjukkan pola yang meningkat dari tahun 2008 dengan kadar 2,61 ppm hingga 2018 dengan kadar 5,42 ppm.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian di Pulau Pari, Kepulauan Seribu dapat disimpulkan bahwa umur karang fosil *Platygyra sp.* adalah 3.255 tahun BP termasuk zaman pertengahan Holosen berdasarkan radio-karbon ^{14}C dan karang fosil adalah aragonit berdasarkan analisis XRD yang berkaitan dengan belum terjadinya diagenesa perubahan konsentrasi logam berat yang terdapat dalam karang fosil tersebut. Konsentrasi logam berat Ca, Sr, Cr, Cu, Pb dan Zn karang fosil mempunyai nilai yang konstan selama 4 tahun dengan konsentrasi masing-masing 13,95%, 0,58%, 4,94 ppm, 1,80 ppm, 1,64 ppm dan 2,61 ppm yang dapat digunakan sebagai konsentrasi *baseline* untuk mengetahui adanya peningkatan kadar polutan di daerah pesisir Pulau Pari. Konsentrasi rata-rata logam yang sama karang modern selama 11 tahun adalah 13,88%, 0,58%, 8,89 ppm, 2,84 ppm, 3,04 ppm dan 4,68 ppm. Peningkatan konsentrasi

logam-logam tersebut dari zaman pertengahan holosen terhadap kondisi saat ini adalah masing-masing < 1%, < 1%, 79,9%, 57,9%, 85,6% dan 79,3%. Terjadi peningkatan konsentrasi logam antropogenik Zn pada karang modern, sedangkan logam lainnya yaitu Cr, Cu dan Pb mengalami peningkatan yang disertai dengan fluktuasi selama rentang waktu 11 tahun tersebut. Keberadaan polutan antropogenik di daerah pesisir dipengaruhi oleh dinamika perairan, maka perlu dilakukan kajian asal usul polutan di kolom perairan yang terdeposit di kerangka karang melalui kajian isotop stabil dari logam berat yang sama yang berfungsi sebagai *finger-print* dan parameter fisik air laut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada personil di laboratorium NDT PAIR dan Klinik Rontgen Permata Indah untuk radiografi sinar-X, radio-karbon PAIR BATAN, XRD PSTBM BATAN dan Saudara Tubagus Solahudin untuk sampel fosil karang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] B.G. Hatcher, "Coral reef ecosystems - how much greater is the whole than the sum of the parts", *Coral Reefseefs*, pp. 77-91, 1997.
- [2] S. Krishnakumar *et al.*, "Metal concentrations in the growth bands of *Porites* sp.: A baseline record on the history of marine pollution in the Gulf of Mannar, India", *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 101, no. 1, pp. 409-416, 2015.
- [3] A. Arman, N. Zamani, T. Watanabe, "Studi penentuan umur dan laju pertumbuhan terumbu karang terkait dengan perubahan iklim ekstrim menggunakan sinar-X", *J. Apl. Isot. dan Radiasi*, vol. 9, no. 1, pp. 1-10, 2013.
- [4] S.A. Al-Rousan *et al.*, "Heavy metal contents in growth bands of *Porites* corals: Record of anthropogenic and human developments from the Jordanian Gulf of Aqaba", *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 54, no. 12, pp. 1912-1922, 2007.
- [5] N.P. Zamani, A. Arman, Lalang, "The growth rate of coral *porites lutea* relating to the el nino phenomena at Tunda Island, Banten Bay, Indonesia", *Procedia Environ. Sci.*, vol. 33, pp. 505-511, 2016.
- [6] T.R. Chen *et al.*, "Heavy metal pollution recorded in *Porites* corals from Daya Bay, Northern South China Sea", *Mar. Environ. Res.*, vol. 70, no. 3-4, pp. 318-326, 2010.
- [7] N.F. Goodkin *et al.*, "Record of little ice age sea surface temperatures at Bermuda using a growth-dependent calibration of coral Sr/Ca", *Paleoceanography*, vol. 20, no. 4, pp. 1-9, 2005.
- [8] K.L. DeLong *et al.*, "Improving coral-base paleoclimate reconstructions by replicating 350 years of coral Sr/Ca variations", *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 373, pp. 6-24, 2013.
- [9] G. Wei *et al.*, "Mg/Ca, Sr/Ca and U/Ca ratios of a *porites* coral from Sanya Bay, Hainan Island, South China Sea and their relationships to sea surface temperature", *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 162, no. 1-2, pp. 59-74, 2000.
- [10] K.F. Yu *et al.*, " $\delta^{18}\text{O}$, Sr/Ca and Mg/Ca records of *Porites lutea* corals from Leizhou Peninsula, northern South China Sea, and their applicability as paleoclimatic indicators", *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 218, no. 1-2, pp. 57-73, 2005.
- [11] A. Bolton *et al.*, "Paired *Porites* Coral Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ from the Western South China Sea: Proxy calibration of sea surface temperature and precipitation", *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 410, pp. 233-243, 2014.
- [12] G.T. Shen, E.A. Boyle, "Lead in corals: Reconstruction of historical industrial fluxes to the surface ocean", *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 82, no. 3-4, pp. 289-304, 1987.

- [13] W. Jiang *et al.*, "Coral trace metal of natural and anthropogenic influences in the Northern South China Sea", *Sci. Total Environ.*, vol. 607-608, pp. 195-203, 2017.
- [14] R.A. Pastorok, G.R. Bilyard, "Effects of sewage pollution on coral-reef communities", *Mar. Ecol. Ser.*, vol. 21, pp. 175-189, 1985.
- [15] A. Hamid *et al.*, "Heavy metals distribution in the coral reef ecosystems of the Northern Red Sea", *Helgol. Mar. Res.*, vol. 65, no. 1, pp. 67-80, 2011.
- [16] C. Bastidas, E. Garcia, "Metal content on the reef coral porites astreoides: an evaluation of river influence and 35 years of chronology", *Mar. Pollut. Bull.*, vol. 38, no. 10, pp. 899-907, 1999.
- [17] S.A. Barakat, S. Al-Rousan, M.S. Al-Trabeen, "Use of scleractinian corals to indicate marine pollution in the Northern Gulf of Aqaba, Jordan", *Environ. Monit. Assess.*, vol. 187, no. 2, pp. 1-12, 2015.
- [18] S.J. Fallon, J.C. White, M.T. McCulloch, "Porites corals as recorders of mining and environmental impacts: Misima Island, Papua New Guinea", *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 66, no. 1, pp. 45-62, 2002.
- [19] J. Mellawati, R. Bachtiar, "Sebaran timbal dan kadmium dalam terumbu karang perairan Kepulauan Seribu", *J. Ecolab*, vol. 5, no. 1, pp. 20-27, 2011.
- [20] S.H. Royle *et al.*, "Environmental and diagenetic records from trace elements in the Mediterranean Coral *Cladocora Caespitosa*", *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 440, pp. 734-749, 2015.
- [21] M.L. Delaney, L.J. Linn, P.J. Davies, "Trace and minor element ratios in Halimeda Aragonite from the Great Barrier Reef", *Coral Reefs*, vol. 15, no. 3, pp. 181-189, 1996.
- [22] K. Shirai *et al.*, "Minor and trace element incorporation into branching coral *Acropora nobilis* skeleton", *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 72, no. 22, pp. 5386-5400, 2008.
- [23] S. Satrio, "Karakteristik air tanah akuifer dalam sekitar tempat pembuangan sampah terpadu (TPST) Bantar Gebang-Bekasi, Jawa Barat", *J. Teknol. Lingkung.*, vol. 18, no. 1, p. 96, 2017.
- [24] R.W. Reimer, P.J. Reimer, "An online application for Δr calculation", *Radiocarbon*, vol. 59, no. 5, pp. 1623-1627, 2017.
- [25] I. Wahyono, R. Salam, A. Dimiyati, "Karakterisasi struktur mikro menggunakan SEM dan XRD pada ketahanan baja korosi komersial Ss430 dan baja non komersial F1", *Proceeding Semin. Nas. XI SDM Teknol. Nukl.*, no. September, pp. 112-117, 2015.
- [26] R.C. Roche *et al.*, "Mid-Holocene coral community data as baselines for understanding contemporary reef ecological states", *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, vol. 299, no. 1-2, pp. 159-167, 2011.
- [27] B.E. Chalker, D.J. Barnes, "Gamma densitometry for the measurement of skeletal density", *Coral Reefs*, vol. 9, no. 1, pp. 11-23, 1990.
- [28] S. Ohde, A.A. Ramos, "Multielemental determination of fossil corals from a drill core of funafuti atoll by instrumental neutron activation analysis", *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 261, no. 2, pp. 473-477, 2004.
- [29] J.F. Marshall, M.T. McCulloch, "An assessment of the Sr/Ca ratio in shallow water hermatypic corals as a proxy for sea surface temperature", *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 66, no. 18, pp. 3263-3280, 2002.
- [30] Riska dkk., "Konsentrasi timbal (Pb) pada pita tahunan karang porites lutea di Pulau Tunda, Banten", *J. Ilmu dan Teknol. Kelaut. Trop.*, vol. 7, no. 1, pp. 235-246,

- 2015.
- [31] H. Abbas and F. Ali, "Study the effect of hexavalent chromium on some biochemical, cytotoxicological and histopathological aspects of the *Oreochromis* spp fish", *Pakistan J. Biol. Sci.*, vol. 22, no. 10, pp. 3973-3982, 2007.
- [32] S.K. Kumar, N. Chandrasekar, P. Seralathan, "Trace elements contamination in Coral Reef Skeleton, Gulf of Mannar, India", *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, vol. 84, no. 1, pp. 141-146, 2010.

