

KONSENTRASI FAKTOR PADA BIOAKUMULASI PLUTONIUM OLEH SIPUT MACAN (*Babylonia spirata L.*) DI PERAIRAN TELUK JAKARTA

Murdahayu Makmur¹⁾, Muhammad Qowi Fikri²⁾, Defri Yona²⁾, Syarifah Hikmah JS²⁾

¹⁾ Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – Badan Tenaga Nuklir Nasional

²⁾ Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan Universitas Brawijaya Malang

Email: mdhayu@batan.go.id

ABSTRAK

KONSENTRASI FAKTOR PADA BIOAKUMULASI PLUTONIUM OLEH SIPUT MACAN (*Babylonia spirata L.*) DI PERAIRAN TELUK JAKARTA. Salah satu komoditas hasil laut dari perairan Teluk Jakarta adalah siput macan (*Babylonia spirata L.*). Siput merupakan biota laut yang mempunyai kemampuan untuk mengakumulasi bahan tercemar termasuk cemaran radioaktif. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan siput macan dalam mengakumulasi serta melepaskan plutonium yang merupakan salah satu pencemar radioaktif. Dari hasil penelitian ditemukan nilai Biokonsentrasi Faktor (BCF) plutonium pada siput macan adalah berkisar antara 90.66 - 122.47 ml.g⁻¹ dengan rata-rata 101.26 ml.g⁻¹. Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa siput macan mampu mengakumulasi sebesar 101.22 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut. Nilai persentase plutonium yang tertahan (retensi) di tubuh siput macan berkisar antara 55.7 - 72.1% dengan rata-rata 62.73±8.45%. Kemampuan retensi plutonium pada siput macan dapat digunakan untuk membuktikan kejadian pencemaran plutonium pada satu wilayah walaupun telah berhenti selama 7 hari.

Kata Kunci: Siput macan, Radionuklida, Plutonium, Bioakumulasi, Depurasi

ABSTRACT

FACTOR CONCENTRATION OF PLUTONIUM BIOACCUMULATION BY TIGER SNAIL (*Babylonia Spirata L.*) FROM THE JAKARTA BAY. Tiger snail (*Babylonia spirata L.*) is one of commodity from the Tanjung Kait Beach which can accumulate various contaminants, including radionuclide contaminant. The purposes of this research was to determine accumulate and depuration ability of plutonium in tiger snail. The Bioconcentration Factor (BCF) of plutonium in the body of tiger snail was ranged from 90.66 - 122.47 ml.g⁻¹ with average value 101.26 ml.g⁻¹. This indicated that the tiger snail was able to accumulate 101.26 times higher than the concentration of plutonium in seawater. The percentage of retention value of plutonium in the body of the tiger snail was ranged from 55.7 - 72.1% with average value 62.73±8.45%. The retention ability of tiger snail can be used to demonstrate plutonium contamination incident although it has been stopped for 7 days.

Keywords : Siput Macan, Plutonium, BCF, Bioaccumulation, Depuration

PENDAHULUAN

Tingginya aktifitas manusia di berbagai sektor, selain meningkatkan kesejahteraan masyarakat dapat juga memberikan tekanan terhadap lingkungan. Apalagi dengan kenaikan jumlah penduduk yang sangat pesat, semakin memperbesar tekanan terhadap kualitas lingkungan akibat meningkatnya limbah padat, cair, gas dari aktifitas manusia tersebut. Hasil pemantauan kualitas lingkungan, memperlihatkan telah terjadi penurunan kualitas air sungai, air tanah dan udara sehingga pencemaran Jakarta sudah mencapai ambang yang cukup serius. (BPLHD DKI Jakarta, 2015). Kawasan perairan Teluk Jakarta merupakan salah satu kawasan perairan yang mendapat tekanan

luar biasa dari aktifitas daratan, sehingga mengalami penurunan kualitas lingkungan. Berbagai macam kegiatan industri, pertanian, transportasi termasuk sampah domestik dan rumah tangga yang tidak terkelola dengan baik menjadi faktor penentu dalam penurunan kualitas lingkungan tersebut.

Penurunan kualitas lingkungan di ekosistem perairan merupakan suatu masalah yang sangat kompleks dan membahayakan bagi organisme dan lingkungan akuatik. Mulai dari pencemar organik dan anorganik, termasuk limbah B3 dan limbah radioaktif yang membahayakan makhluk yang hidup dan berkembang di perairan tersebut, sampai terdegradasinya lingkungan perairan secara fisik

(Budiawan, 2013). Pencemaran perairan dapat terdistribusi secara luas sehingga perlu mendapat perhatian secara khusus karena bersifat toksik dan berbahaya bagi lingkungan hidup. Salah satu limbah radionuklida yang berbahaya karena sifat bioakumulasinya pada organisme akuatik adalah kelompok senyawa antropogenik, termasuk senyawa plutonium salah satunya.

Plutonium berasal dari sumber antropogenik dan secara global dihasilkan karena uji senjata nuklir, operasi reaktor rutin maupun kecelakaan nuklir seperti kecelakaan nuklir Chernobyl (Ukraina, 1986) dan Fukushima Daiichi (Jepang, 2011) dimana keduanya dianggap sebagai kecelakaan besar (*major accident*) dan ditempatkan pada skala 7 berdasarkan *International Nuclear and Diological Event Scale (INES)* (Steinhauser et al, 2014).

Radionuklida plutonium tersebut terjerap di dalam komponen abiotik (air dan sedimen) pada suatu ekosistem perairan laut dan akan memberikan dampak buruk terhadap biota yang hidup di kawasan tersebut.

Pencemaran radionuklida alam dan antropogenik ke suatu lingkungan perairan seperti halnya pencemaran logam berat yang dapat dikategorikan membahayakan, sebab bahan tersebut berdasarkan sifatnya tidak terdegradasi secara fisik, kimia, maupun biologi, melainkan terakumulasi secara biologis oleh suatu organisme yang hidup di lingkungan perairan tersebut (Povinec, 2004). Plutonium yang bersifat sebagai partikel reaktif, cenderung untuk mengendap ke dasar perairan, dan berpotensi terakumulasi pada biota perairan dasar seperti kerang, siput dan ikan dasar lainnya.

Siput macan (*Babylonia spirata L.*) merupakan salah satu biota bentik yang dapat mengakumulasi zat pencemar, termasuk cemaran radionuklida (Yandra et al, 2013). Kecenderungan siput macan yang berkembang biak di dasar perairan akan mampu mengakumulasi bahan pencemar yang terdapat pada dasar perairan termasuk plutonium.

Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) melalui kelompok radioekologi kelautan telah melakukan banyak penelitian tentang studi bioakumulasi dan depurasi radionuklida terhadap biota laut di Indonesia antara lain bioakumulasi ^{137}Cs , ^{242}Pu oleh

berbagai macam biota, antara lain: *Perna viridis*, *Anadara granosa*, *Pomacea canaliculata* dan lainnya. Penelitian mengenai bioakumulasi plutonium oleh siput macan diharapkan dapat menambah *baseline* data tentang bioakumulasi radionuklida terhadap biota laut.

Pada penelitian ini dilakukan studi bioakumulasi dan depurasi plutonium oleh siput macan melalui jalur air laut dengan menggunakan metode biokinetik kompartemen tunggal. Kemampuan bioakumulasi plutonium oleh siput macan penting dipelajari untuk memprediksi perpindahan plutonium dalam lingkungan akuatik yang berakhir pada manusia. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui sifat akumulasi plutonium oleh siput macan menggunakan metode biokinetik kompartemen tunggal serta mengetahui proses depurasi plutonium oleh biota tersebut.

METODOLOGI

Penelitian dilakukan di laboratorium Bidang Radioekologi Kelautan PTKMR BATAN pada Bulan November 2015 sampai dengan Bulan Pebruari 2016. Pengambilan biota dilakukan di perairan Teluk Jakarta dan dibawa sesegera mungkin ke Laboratorium Akuatik untuk mengurangi resiko kematian biota.

Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif untuk menganalisa tingkat kenaikan pengambilan (*uptake*) dan tingkat pelepasan (*depurasi*) kontaminan plutonium pada siput macan. Pendekatan ini dilakukan dengan cara mendeskripsikan tingkat kenaikan konsentrasi ^{242}Pu di hari ke-1 sampai hari ke-19 pada siput macan. Penelitian ini juga mendeskripsikan tingkat pelepasan ^{242}Pu di hari ke-1 sampai hari ke-7 pada siput macan setelah pemaparan dihentikan.

Aklimatisasi Plutonium pada Siput Macan

Proses aklimatisasi bertujuan untuk menghilangkan stres hewan percobaan dalam kondisi akuarium sehingga dapat digunakan dalam percobaan bioakumulasi. Proses aklimatisasi biota dilakukan dengan menempatkan siput macan pada akuarium air

laut, yang dilengkapi dengan sistem sirkulasi, filtrasi dan penghilang buih. Selama proses aklimatisasi, pemberian pakan biota dengan *Artemia sp* dilakukan 3 hari sekali.

Proses Bioakumulasi ^{242}Pu Terhadap Siput Macan

Proses bioakumulasi plutonium oleh siput macan dengan mengambil 39 individu siput macan yang berasal dari akuarium aklimatisasi. Siput kemudian dimasukkan ke dalam 3 akuarium, yang masing-masing berisi sebanyak 13 individu perakuarium. Pemilihan siput berdasarkan kondisi hewan percobaan yang sehat untuk mengurangi resiko kematian biota di tengah percobaan bioakumulasi.

Akuarium untuk proses bioakumulasi berkapasitas 80 liter yang diisi air laut sebanyak 60 liter. Sebelum sampel biota dimasukkan, terlebih dulu akuarium ditambahkan perunut radioaktif ^{242}Pu dengan menggunakan metode pengenceran. Perunut radioaktif digunakan sebagai penandaan (*labelling*) polutan sehingga memudahkan pendeteksian dan percobaan dapat dilakukan secara kontinyu (Fowler *et al*, 2003). Pada penelitian ini, aktifitas ^{242}Pu yang digunakan adalah sebesar 74×10^{-2} Bq/ml. Adapun persamaan metode pengenceran pada perunut radioaktif disajikan pada persamaan (1):

$$(V.N)_{std} = (V.N)_{smp}$$

Dimana:

V dan N_{std} = Volume dan aktivitas standar (perunut ^{242}Pu)

V dan N_{smp} = Volume dan aktifitas ^{242}Pu pada sampel air dalam akuarium

Perunut ^{242}Pu ditambahkan sebanyak 20 ml ke dalam masing masing akuarium. Proses bioakumulasi dilakukan selama 19 hari dan selama proses tersebut, hewan percobaan tidak diberi makan. Pengambilan dan penimbangan sampel biota dilakukan pada hari ke 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 15, 17 dan ke-19.

Proses Depurasi plutonium Terhadap Siput Macan

Proses depurasi dilakukan dengan menempatkan 21 buah sampel biota percobaan yang telah terpajan ^{242}Pu selama 7 hari ke dalam 3 akuarium dengan kapasitas 60 liter air laut. Pada masing masing akuarium ditempatkan 7 biota. Pengambilan dan penimbangan sampel biota dilakukan setiap hari (1, 2, 3, 4, 5, 6, dan 7 hari) masing-masing diambil sampel sebanyak 1 ekor. Selama proses depurasi, penggantian media air laut kepada biota dilakukan setiap hari

Analisis plutonium dari sampel biota

Sampel biota kemudian dibersihkan, lalu dibakar sampai menjadi arang pada cawan porselen yang sudah diberi label. Arang tersebut diabukan pada suhu 400°C selama 2 jam dengan menggunakan furnace dan didinginkan (dibiarkan) selama 1 malam (12 jam).

Sampel abu pada cawan porselen, dipindahkan ke beaker glass yang telah dilabel, kemudian cawan porselen dibilas dengan sedikit aquadest. Sampel tersebut dipanaskan sampai mendekati kering. Sampel kemudian ditambahkan HClO_4 3-5 tetes dan HNO_3 1 ml, dan dipanaskan kembali sampai mendekati kering. Sampel kemudian dilarutkan dalam H_2SO_4 (1+19) sebanyak 10 ml dan disaring. Ke dalam larutan ditambahkan 3 tetes timol biru, dan ditambahkan NH_4OH (1+1), sehingga diperoleh larutan berwarna kuning (pH 8-9). Ditambahkan H_2SO_4 (1+19) sehingga diperoleh larutan berwarna pink (pH2).

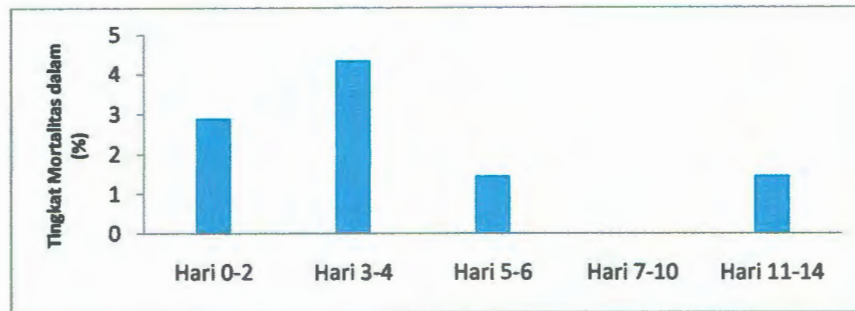
Elektrodeposisi dilakukan dengan besaran arus 10 A selama 2 jam, dimana terjadi proses pelapisan suatu logam atau senyawa logam dari larutan elektrolit pada elektroda dengan bantuan arus listrik searah. Ditambahkan NH_4OH (1+1) sebanyak 1 ml pada menit ke 115 untuk menghentikan proses elektrodeposisi. Plat dikeluarkan dari dalam sel dan dibilas dengan akuades dan etanol. Bagian bawah plat dibakar beberapa saat lalu didinginkan untuk dicacah menggunakan sistem pencacah spektrometer alfa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Aklimatisasi Siput Macan

Sebelum tahap eksperimen, dilakukan proses aklimatisasi biota dengan tujuan menghilangkan stres pada biota serta memperoleh kondisi biota yang optimal dalam percobaan bioakumulasi dan mampu bertahan

pada kondisi akuarium. Proses aklimatisasi dilakukan selama 14 hari tanpa pemberian perunut ^{242}Pu . Hasil aklimatisasi ditunjukkan pada rasio tingkat mortalitas biota pada saat penyesuaian hidup 14 hari seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Rasio tingkat mortalitas siput macan pada proses aklimatisasi

Berdasarkan Gambar 1, pada hari 0-2 aklimatisasi terjadi kematian 2 biota atau sebesar 2,89% dari total populasi. Dihari 3-4, terjadi kematian 3 biota atau sebesar 4,35% dari total populasi. Dihari 5-6, terjadi kematian 1 biota atau sebesar 1,45% dari total populasi dan pada hari 7-10, tidak terjadi kematian biota. Pada hari ke-11 sampai dengan hari ke-14, terjadi satu kematian biota atau sebesar 1,45% dari total populasi. Jadi, dapat dikatakan bahwa siput macan mempunyai kemampuan beradaptasi dengan lingkungan laboratorium yang dibuktikan dengan jumlah persentase kemampuan hidup (viabilitas) biota tersebut sebesar 89,86%. Adapun jumlah persentase total kematian (mortalitas) selama proses aklimatisasi biota sebesar 10,14% dari total keseluruhan populasi yang dilakukan dalam kurun waktu selama 14 hari.

Aktifitas ^{242}Pu pada Air Laut di Akuarium Bioakumulasi

Pengukuran aktifitas ^{242}Pu pada perairan laut di akuarium bioakumulasi dilakukan di Laboratorium Akuatik dengan menggunakan metode pengenceran pada perunut radioaktif ^{242}Pu . Pada penelitian ini, aktifitas radioaktif pada akuarium ke-1, ke-2 dan ke-3 proses

bioakumulasi ^{242}Pu pada siput macan sebesar $2,47 \times 10^{-4}$ Bq/ml atau 0,247 Bq/l air laut.

Pemberian perunut ^{242}Pu harus diatur agar tidak boleh melebihi batas tertinggi dalam regulasi lepasan radionuklida ke dalam lingkungan dikarenakan sifat dari ^{242}Pu memiliki waktu paruh yang sangat panjang di lingkungan perairan (Sakaguchi *et al*, 2012). Perunut ^{242}Pu juga memancarkan radiasi alfa (α) yang memiliki dampak kerusakan paling tinggi dibandingkan radiasi beta (β) dan gamma (λ).

Proses Bioakumulasi plutonium oleh Siput Macan

Unsur radionuklida pemancar alfa memerlukan tahapan-tahapan perlakuan yang kompleks sebelum dilakukan pencacahan dengan spektrometer alfa seperti pemberian perunut, pengabuan, evaporasi, pemisahan, pemurnian dan elektrodeposisi. Hasil elektrodeposisi plutonium diukur dengan spektrometer alfa. Plutonium akan memberikan sinyal yang sangat lemah pada detektor, untuk itu pengukuran membutuhkan waktu yang cukup lama, yaitu sekitar 250.000 detik. Berikut adalah data konsentrasi faktor (CF) pada proses uptake plutonium (^{242}Pu) pada siput macan pada

akuarium ke-1, ke-2, dan ke-3 yang ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1 menunjukkan konsentrasi faktor plutonium pada siput macan yang menggunakan bobot rata-rata biota. Pada hari ke-1, nilai faktor konsentrasi berkisar antara 8,99 ml.g⁻¹ sampai dengan 12,5 ml.g⁻¹. Nilai tersebut terus meningkat dan cenderung mengalami kesetimbangan (*steadystate*). Kondisi

kesetimbangan (*steadystate*) adalah suatu kondisi dimana siput macan telah mencapai batas tertinggi akumulasi plutonium pada tubuhnya. Nilai faktor konsentrasi mencapai nilai tertinggi pada kisaran 100,29ml.g⁻¹ sampai dengan 102,33 ml.g⁻¹. Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa siput macan mampu mengakumulasi sebesar 100,29 sampai dengan 102,33 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut per gram bobot biota.

Tabel 1. Data Konsentrasi Faktor (CF) Pada Proses Uptake²⁴²Pu oleh Siput Macan dalam Satuan (ml.g⁻¹)

Hari Pemaparan	Nilai Konsentrasi faktor (CF) pada akuarium ke-1, ke-2 dan ke-3 (ml.g ⁻¹)			Rerata
1	12,5	8,99	10,91	10,8±1,76
2	20,33	18,97	24,68	21,33±2,98
3	22,12	24,33	20,24	22,23±2,05
4	27,64	33,98	22,79	28,14±5,61
5	29,05	32,21	35,51	32,26±3,23
6	36,45	35,29	28,59	33,44±4,24
7	43,21	42,33	48,33	44,62±3,24
9	45,31	54,77	47,66	49,25±4,93
11	60,67	69,04	59,01	62,91±5,37
13	73,8	71,22	75,19	73,40±2,01
15	89,29	93,56	84,23	89,03±4,67
17	98,08	99,81	97,21	98,37±1,32
19	100,29	101,05	102,33	101,22±1,03

Implementasi dari hasil percobaan ini adalah bahwa jika terjadi pencemaran unsur plutonium di perairan laut Tanjung Kait, maka setelah 1 hari konsentrasi plutonium pada siput macan mencapai 8,99 sampai dengan 12,5 kali lebih banyak jika dibandingkan dengan konsentrasi plutonium di dalam air laut. Jika kontaminasi zat radionuklida tersebut masih berlangsung, maka dalam pada hari ke-19, konsentrasi plutonium pada siput macan akan meningkat menjadi 100,29 sampai dengan 102,33 kali, dibandingkan dengan konsentrasi

plutonium dalam air laut. Hal ini juga diperkuat oleh pernyataan Fowler (2013) yang beranggapan bahwa nilai konsentrasi plutonium pada biota bentik berkisar antara 100-200 kali, yang artinya biota bentik mampu mengakumulasi sebanyak 100-200 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut.

Kemampuan siput macan dalam mengakumulasi bahan lain seperti logam berat pernah diteliti oleh Umbara dan Suseno (2003) dimana ditemukan bahwa siput macan dapat

mengakumulasi logam berat Pb dan Cd sebesar 122,71 dan 100,79. Nilai ini tidak berbeda jauh dengan kemampuan bioakumulasi siput macan terhadap plutonium yang dilakukan pada penelitian ini yaitu sebesar 100,29 sampai dengan 102,33 kali. Bioakumulasi plutonium tertinggi pada siput macan terjadi pada hari ke 11 sampai dengan hari ke 15, dimana peningkatan konsentrasi faktor (CF) sebesar $15,43 \text{ ml.g}^{-1}$, $22,34 \text{ ml.g}^{-1}$ dan $16,18 \text{ ml.g}^{-1}$ untuk 3 bak percobaan.

Pada data tersebut juga menunjukkan sempat terjadinya penurunan nilai konsentrasi faktor (CF) yang dialami oleh siput macan dalam proses pengambilan (*uptake*) kontaminan. Penurunan nilai konsentrasi faktor (CF) pada akuarium kedua yang terjadi pada hari ke-4 dan ke-5, dengan nilai penurunan sebesar $1,77 \text{ ml.g}^{-1}$. Pada akuarium ketiga juga mengalami penurunan nilai konsentrasi faktor (CF), yang terjadi pada hari ke-5 dan ke-6, dengan nilai penurunan sebesar $6,92 \text{ ml.g}^{-1}$. Hal ini dikarenakan kemampuan masing-masing individu siput macan dalam pengambilan kontaminan berbeda-beda. Ada banyak faktor yang menjadikan perbedaan kemampuan individu siput macan dalam pengambilan kontaminan, antara lain: usia, bobot tubuh, enzim, jenis kelamin serta keaktifan biota tersebut dalam mengambil (*uptake*) dan melepaskan (eliminasi) kontaminan (Fowler, 2013).

Pada minggu pertama (hari ke-1 sampai dengan hari ke-7), kenaikan nilai konsentrasi (CF) plutonium oleh siput macan berkisar antara $42,33 \text{ ml.g}^{-1}$ sampai dengan $48,33 \text{ ml.g}^{-1}$. Pada minggu kedua (hari ke-9 sampai dengan hari ke-13), kenaikan nilai konsentrasi (CF) berkisar antara $16,45 \text{ ml.g}^{-1}$ sampai dengan $28,49 \text{ ml.g}^{-1}$. Sedangkan pada minggu ketiga (hari ke-15 sampai dengan hari ke-19), kenaikan nilai konsentrasi (CF) berkisar antara $7,49 \text{ ml.g}^{-1}$ sampai dengan $18,1 \text{ ml.g}^{-1}$. Berdasarkan data tersebut, pada minggu pertama, siput macan memiliki kemampuan akumulasi ^{242}Pu tertinggi dibandingkan dengan minggu kedua dan ketiga. Hal ini dikarenakan, pada awal pemaparan (minggu kesatu) kemampuan biota mengakumulasi kontaminan sangat tinggi. Pada tengah dan akhir (minggu kedua dan ketiga) pemaparan, mengalami penurunan kemampuan

akumulasi dan memasuki fase *steadystate* (Suseno, 2011).

Plutonium merupakan salah satu unsur golongan aktinida yang mempunyai masa partikel lebih berat yang menyebabkan unsur ini cenderung lebih cepat tenggelam ke dasar sedimen dan mengendap ke dalam substrat (sedimen), sehingga jarak perpindahan dari unsur plutonium cenderung lebih pendek dari unsur lainnya (Makmur, 2007). Povinec dan Livingstone (2000) mengatakan bahwa aktifitas radionuklida di dalam perairan laut ditentukan oleh beberapa faktor yaitu persebaran, perpindahan, pengadukan air laut (*mixing*) dan peluruhan radionuklida.

Radionuklida yang masuk ke dalam lingkungan perairan mengalami pengendapan dan diserap oleh organisme di perairan tersebut. Biota benthik, termasuk siput macan atau *Babylonia spirata L.* yang hidup di dasar perairan memiliki peluang mengakumulasi plutonium lebih tinggi dibandingkan biota laut yang lainnya (pelagis) dikarenakan plutonium dapat mengendap dan menjerap (*scavenging*) di dalam sedimen laut (Hirose dan Aoyama 2003). Siput macan (*Babylonia spirata L.*) merupakan salah satu organisme air yang hidup menetap dan memiliki sifat *filter feeder* serta mampu berkembang biak pada tekanan ekologis yang tinggi sesuai dengan sifatnya (Giffari, 2011). Semakin besar kemampuan dari suatu organisme dalam mengakumulasi kontaminan, maka semakin baik pula organisme tersebut digunakan sebagai indikator kualitas dari suatu lingkungan perairan. Pernyataan tersebut dipertegas oleh Nitisupardjo (1998) yang menyatakan bahwa semakin baik suatu organisme menyerap kontaminan, maka semakin besar indeks faktor konsentrasinya.

Secara khusus bioindikator organisme laut dapat didefinisikan sebagai spesies yang dapat beradaptasi terhadap keadaan pencemaran tertentu, keberadaannya dalam suatu wilayah mencirikan adanya pencemaran dan mampu mengakumulasi pencemar yang berada dalam jumlah runutan dalam lingkungan (Suseno, 2011). Berdasarkan hal tersebut maka hampir seluruh invertebrata laut khususnya *gastropoda* dapat digunakan sebagai bioindikator.

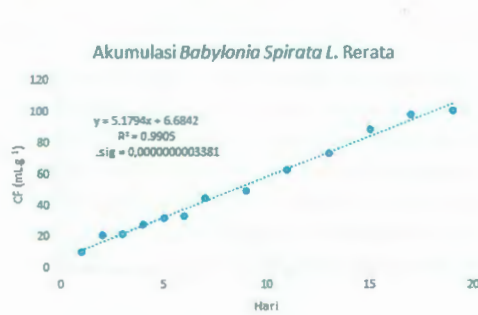
Pengambilan kontaminan plutonium oleh siput macan dipengaruhi oleh beberapa

faktor, salah satunya adalah dari ukuran tubuh biota tersebut. Perbedaan tersebut disebabkan kemampuan pengambilan kontaminan untuk *gastropoda* berukuran kecil lebih cepat dibandingkan yang berukuran lebih besar. Ukuran tubuh *gastropoda* yang kecil (berusia muda) lebih cepat mengambil kontaminan dibandingkan dengan ukuran tubuh yang lebih besar (berusia lebih tua), sehingga lebih cepat mengalami proses *steadystate* (Nakahara dan Nakamura, 2004). Walaupun ukuran tubuh lebih kecil, tetapi luas permukaan, rasio volume dan konsentrasi enzim turut memainkan peranan yang sangat penting. Pada *gastropoda* yang memiliki tubuh lebih besar (berusia lebih tua) memiliki kemampuan mengambil jumlah kontaminan lebih banyak dibandingkan ukuran yang lebih kecil (berusia muda) sehingga biota yang memiliki ukuran tubuh lebih besar (berusia lebih tua) dapat menyimpan dan mengakumulasi kontaminan yang lebih banyak dibandingkan dengan biota yang memiliki ukuran tubuh lebih kecil (berusia muda). Unsur radionuklida diambil oleh organisme laut dari dalam air dan sedimen melalui lebih dari satu jalur transportasi dan secara fisik dipengaruhi oleh luas permukaan hewan tersebut, antara lain (Campbell, 2002):

- *Transport carrier mediated* dimana unsur radionuklida berikatan dengan protein
- Transportasi melalui protein pembawa di mana saluran membran sel (*membran channel*) yang mengandung protein dengan inti hidrophobik yang dapat dilalui oleh radionuklida.

Hubungan Nilai Konsentrasi Faktor (CF) dengan Lamanya Pemaparan

Berikut adalah pemodelan kemampuan bioakumulasi rerata ^{242}Pu terhadap siput macan yang disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Kemampuan Bioakumulasi Rerata ^{242}Pu pada Siput Macan

Berdasarkan Gambar 2, diperoleh persamaan garis lurus rerata Bioakumulasi ^{242}Pu dari ketiga macam siput macan sebagai berikut:

$$Y_{\text{rerata}} = 5,1794x + 6,6842$$

$$R^2 = 0,9905 (2)$$

Berdasarkan persamaan garis lurus di atas dapat ditentukan nilai kemiringan (*slope*) yang merupakan konstanta total *uptake* kontaminan (*ku*). Nilai *ku* rerata akumulasi dari berbagai macam siput macan yang diperoleh yaitu 5,179.

Pada Gambar 2, Nilai *ku* ini menunjukkan bahwa setiap bertambahnya setiap hari pemaparan, maka akan bertambahnya nilai konsentrasi faktor rerata pada penelitian ini sebesar 5,179. Nilai R^2 pada model akumulasi ^{242}Pu rerata pada siput macan ini sebesar 0,9905 (99%) dengan nilai .sig 0,0000000003381 sehingga kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan varians dari variabel terikatnya dikategorikan baik dan model yang dihasilkan signifikan. Hal ini berarti peningkatan nilai konsentrasi faktor (CF) ^{242}Pu pada siput macan dengan lamanya waktu pemaparan menunjukkan hubungan positif artinya semakin lamanya waktu pemaparan, maka jumlah nilai konsentrasi faktor akan semakin meningkat.

Proses Depurasi plutonium oleh siput macan Kemampuan siput macan dalam Melepaskan Kontaminan plutonium

Depurasi adalah proses pembersihan dari biota air laut maupun air tawar dimana biota tersebut ditempatkan ke dalam lingkungan air bersih (bebas kontaminan) untuk periode waktu untuk memungkinkan pembersihan kotoran. Pengukuran depurasi kontaminan pada siput macan dilakukan selama 7 kali dalam 7 hari dengan sistem pengukuran yang sama dengan saat proses pengambilan (*uptake*) kontaminan. Pada pemilihan bioindikator, data proses depurasi polutan dalam tubuh biota percobaan mutlak diperlukan. Data percobaan depurasi plutonium dari siput macan yang direpresentasikan sebagai persen retensi ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Data Percobaan Depurasi ^{242}Pu dari Siput Macan yang Direpresentasikan sebagai Persen Retensi

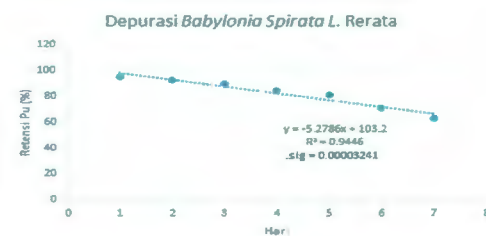
Hari	Pengulangan Kesatu	Pengulangan Kedua	Pengulangan Ketiga	Rerata
0	100 %	100 %	100 %	100 %
1	98,5 %	95,6 %	90,7 %	94,93±3,94 %
2	97,3 %	90,8 %	88,2 %	92,1±4,69 %
3	90,7 %	87,3 %	89,9 %	89,3±1,78 %
4	87,6 %	80,2 %	84,1 %	83,97±3,7 %
5	84,3 %	78,9 %	79,3 %	80,83±3 %
6	76,5 %	70,5 %	65,2 %	70,73±5,65 %
7	60,4 %	72,1 %	55,7 %	62,73±8,45 %

Pada Tabel 2 menunjukkan setelah satu hari pemaparan plutonium dihentikan maka siput macan tersebut akan mengekresikan plutonium yang berada di dalam jaringan hewan tersebut sebesar 1,5 sampai dengan 9,3%. Setelah 7 hari pemaparan dihentikan, maka plutonium yang terekresi menjadi 27,9 sampai 44,3%. Implementasi data ini untuk mengetahui kemampuan depurasi plutonium pada siput macan di perairan laut Tanjung Kait antara lain kejadian pemaparan zat radionuklida plutonium dapat terdeteksi menggunakan biota laut siput macan walaupun berlangsung 1 hari, dimana pada hari ke-1, kontaminan akan tertahan sebesar 90,7 sampai dengan 98,5% atau terekresi sebesar 1,5 sampai dengan 9,3%.

Setelah 7 hari kontaminan masih tertahan sekitar 55,7 sampai dengan 72,1% atau terekresi sebesar 27,9 sampai 44,3%. Kemampuan retensi tersebut dapat digunakan untuk membuktikan kejadian pencemaran plutonium walaupun telah terhenti selama 7 hari.

Hubungan Nilai Retensi dengan Lamanya Pelepasan Kontaminan

Proses depurasi (pelepasan) dilakukan untuk melihat kemampuan eliminasi atau pelepasan ^{242}Pu didalam tubuh siput macan. Berikut adalah perbandingan kemampuan pelepasan ^{242}Pu rerata dalam tubuh siput macan yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kemampuan Pelepasan Rerata ^{242}Pu Pada Siput Macan yang Direpresentasikan dalam Persen Retensi

Berdasarkan Gambar 3, diperoleh persamaan garis lurus pelepasan plutonium dari rerata ketiga macam siput macan. $Y_{\text{rerata}} = -5,2786x + 103,2$ dengan nilai $R^2 = 0,9446$. Berdasarkan persamaan garis lurus di atas dapat ditentukan nilai kemiringan (*slope*) yang merupakan konstanta total eliminasi kontaminan (*ke*). Nilai *ke* rerata depurasi dari berbagai macam siput macan yang diperoleh yaitu 0,051. Nilai *ke* menunjukkan bahwa setiap bertambahnya 1 hari depurasi, maka akan menurunnya nilai retensi kontaminan plutonium rerata pada penelitian ini adalah 0,051.

Nilai R^2 pada model depurasi ^{242}Pu rerata pada siput macan ini sebesar 0,9446 (94%) dengan nilai .sig 0,000032417 sehingga kemampuan variabel bebas dalam menjelaskan varians dari variabel terikatnya dikategorikan baik dan model yang dihasilkan signifikan. Hal ini berarti pelepasan plutonium dengan lamanya waktu depurasi menunjukkan hubungan positif artinya semakin lamanya waktu depurasi, maka jumlah kontaminan plutonium akan semakin menurun.

Waktu tinggal biologis plutonium dalam tubuh siput macan dapat ditentukan dari laju pelepasan yang merupakan nilai *slope* (*ke*) dari plot antara ^{242}Pu yang tertahan dalam tubuh terhadap lama paparan (hari) (Suseno, 2011). Besarnya nilai *ke* yang diperoleh dari akuarium rerata adalah 0,051.

Waktu tinggal biologis dari siput macan pada akuarium rerata adalah 13,55 hari. Berdasarkan hasil eksperimen ini, waktu untuk siput macan melakukan proses depurasi (membersihkan diri) total dari kontaminan, diperlukan waktu selama 13,55 hari.

Rekapitulasi Parameter Biokinetik pada Siput Macan

Salah satu cara untuk menentukan kemampuan bioakumulasi adalah mengetahui nilai Bio Konsentrasi Faktor (BCF). Bio

Konsentrasi Faktor (BCF) adalah rasio konsentrasi kimia disuatu organisme air yang ditentukan dalam percobaan laboratorium terkendali di mana organisme uji yang dipaparkan bahan kimia di dalam air (UK-EPA, 2011). Menurut Reinardy *et al* (2001) jika paparan kontaminan bahan kimia ke organisme memiliki durasi (waktu) yang cukup, kesetimbangan akan terbentuk antara kontaminan di dalam jaringan tubuh organisme dan di dalam lingkungan abiotik (air). Van der Oost *et al* (2003) juga menjelaskan Bio Konsentrasi Faktor (BCF) adalah suatu rasio konsentrasi bahan kimia di dalam tubuh organisme serta di dalam air selama *steadystate* atau setimbang (tunak). Pada percobaan *uptake* ^{242}Pu oleh siput macan dilakukan selama 19 hari, dan cenderung mencapai kondisi *steadystate* pada hari ke 15. Berikut adalah parameter biokinetik dan perhitungan Bio Konsentrasi Faktor (BCF) yang disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Parameter Biokinetik dan Perhitungan Bio Konsentrasi Faktor (BCF)

Akuarium	Konsentrasi ^{242}Pu di Air (Bq/l^{-1})	K_u	K_e	BCF	$t_{1/2} = \ln(2)/k_e$ (hari)
1	0,247	5,1487	0,054	96,14	12,94
2	0,247	5,2651	0,043	122,47	16,12
3	0,247	5,1245	0,057	90,66	12,26
Rerata	0,247	5,1794	0,051	101,26	13,55

Berdasarkan Tabel 3, kemampuan rerata siput macan dalam melakukan bioakumulasi radionuklida plutonium sebesar 101,26 kali dibandingkan konsentrasinya dalam air laut. Konsentrasi plutonium di lingkungan akan berpengaruh besar terhadap faktor bioakumulasi pada biota. Seperti halnya, penelitian yang dilakukan di Polandia dan di Laut Baltik, dimana nilai BCF polonium dan plutonium lebih besar dibandingkan dengan nilai BCF uranium pada biota yang sama. Hal ini disebabkan karena konsentrasi polonium dan plutonium di air lebih besar dibandingkan dengan konsentrasi uranium (Skwarzec, *et al.* 2012)

Mengacu pada hasil percobaan dimana nilai BCF adalah sebesar 101,26 ml.g^{-1} , jika konsentrasi plutonium di dalam air laut pada perairan Indonesia saat ini sebesar $4,69 \times 10^{-4} \text{ Bq/l}$ (Makmur, 2007). Hasil dari percobaan bioakumulasi siput macan adalah $4,75 \times 10^{-2} \text{ Bq/kg}$ yang dimana tidak membahayakan bagi

keselamatan publik dan termasuk dalam kategori aman apabila siput macan dikonsumsi oleh masyarakat dengan asumsi batas masukan makanan sebesar $1 \times 10^5 \text{ Bq}$ pertahun. Konsentrasi plutonium dalam bentuk $^{239/240}\text{Pu}$ di dalam air laut perairan Indonesia dan aktifitasnya pada makanan laut pada saat ini sesuai dengan regulasi lepasan radionuklida ke dalam lingkungan menurut Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor: 02/Ka-Bapeten/V-99.

KESIMPULAN

Pada proses *uptake*, konsentrasi faktor rerata plutonium pada siput macan pada hari pertama pemaparan, nilai konsentrasi faktor rerata sebesar $10,8 \pm 1,76 \text{ ml.g}^{-1}$. Nilai faktor konsentrasi tersebut terus meningkat dan cenderung mengalami *steadystate* setelah waktu 15 hari pengambilan kontaminan. Pada hari 19, nilai faktor konsentrasi sebesar $101,22 \pm 1,03 \text{ ml.g}^{-1}$. Berdasarkan data tersebut, menunjukkan bahwa siput macan mampu mengakumulasi

sebesar 101,22 kali konsentrasi plutonium di dalam air laut.

Pada proses depurasi, dilakukan tujuh hari pengambilan (*Uptake*) kontaminan sebelum dilakukan proses pelepasan (Depurasi). Setelah hari pertama pelepasan (Depurasi), persentase plutonium rerata akan tertahan (retensi) di tubuh siput macan sebesar $94,93 \pm 3,94\%$ atau tereksresi sebesar $5,07\%$. Setelah 7 hari pelepasan (Depurasi), masih tertahan sebesar $62,73 \pm 8,45\%$ atau tereksresi sebesar $37,27\%$. Kemampuan retensi tersebut dapat digunakan untuk membuktikan kejadian pencemaran plutonium walaupun telah berhenti selama 7 hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada semua anggota Tim radioekologi kelautan PTKMR BATAN, terutama kepada Dr. Heny Suseno atas ide dan pemikirannya. Penelitian ini dibiayai oleh DIPA PTKMR BATAN.

DAFTAR PUSTAKA

1. BPLHD DKI Jakarta, 2016. Laporan Status Lingkungan Hidup Daerah Provinsi Daerah Khusus Ibukota Jakarta Tahun 2015. Pemerintahan Provinsi DKI Jakarta. Hal 1-2. <http://bplhd.jakarta.go.id/SLHD2016/Docs/pdf/Buku%20Laporan%20SLHD%20Provinsi%20DKI%20Jakarta%20Tahun%202015.pdf>.
2. Budiawan. 2013. Studi Bioakumulasi Metil Merkuri pada *Perna Viridis* dan *Anadara Indica* Menggunakan Radiotracer. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah Volume 16 Nomor 2 Tahun 2013. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN.
3. Steinhäuser, G., Brandl, A., & Johnson, T.E. 2014. Comparison of the Chernobyl and Fukushima Nuclear Accidents: A Review on the Environmental Impact. *Science of the Total Environment Journal*. 470-471 (2014). P. 800-817.
4. Povinec, P. P. 2004. ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ Concentration Surface Water Time Series in the Pacific and Indian Ocean. *Journal of Environmental Radioactivity* 81 (63-87).
5. Yandra, A., Suseno, H., & Safni. 2013. Bioakumulasi ^{137}Cs oleh Keong Mas (*Pomacea Canaliculata*) dengan Metode Kompartemen Tunggal. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah Volume 16 Nomor 3, Edisi Suplemen Tahun 2013*. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN.
6. Fowler. 2013. Brief Introduction to Marine Radioecology with Emphasis on Bioaccumulation in Marine Organisms. School of Marine and Atmospheric Sciences Stony Brook University. USA.
7. Sakaguchi, A. et al. 2012. Isotopic Determination of U, Pu and Cs in Environmental Waters Following the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Geochem. J.* 46, 355–360 (2012).
8. Umbara, H & Suseno, H. 2003. Simulasi Bioakumulasi Pb dan Cd pada *Anadara Inflata* dan *Babylonia Palida*. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir. P3TM. Yogyakarta. 9 Juli 2003.
9. Suseno, H. 2011. Bioakumulasi Merkuri dan Metil Merkuri oleh *Oreochromis mossambicus* Menggunakan Aplikasi Perunut Radioaktif: Pengaruh Konsentrasi, Salinitas, Partikulat, Ukuran Ikan dan Kontribusi Jalur Pakan (Disertasi). Universitas Indonesia. Depok.
10. Makmur, M., 2007. Penentuan Nilai Koefisien Distribusi (Kd) $^{239,240}\text{Pu}$ pada Perairan Laut Bangka Selatan. PTLR-BATAN. Serpong.
11. Povinec, P. P. & Livingstone, H. 2000. Anthropogenic Marine Radioactivity. *Ocean & Coastal Management* 43. 689-712. Elsevier.
12. Hirose & Aoyama. 2003. Analysis of ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ Concentrations in Surface Waters of the Pacific Ocean. *Deep-Sea Research II* 50, 2675–2700.
13. Giffari, A. 2011. Karakteristik Asam Lemak Daging Keong Macan (*Babylonia Spirata*), Kerang Tahu (*Meretrix Meretrix*), dan Kerang Salju (*Pholas Dactylus*) [Skripsi]. Bogor: Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Institut Pertanian Bogor.
14. Nitisupardjo & Mustofa. 1998. Pencemaran Hg, Cd dan Pb Pada Ikan Belanak (*Mugil sp*), Air dan Sedimen di Perairan Pantai Pelabuhan Tanjung Emas dan Muara Sungai Babon Kotanadya Dati II Semarang Jawa Tengah. Program Pasca Sarjana, Universitas Gajah Mada. Yogyakarta. 126 hlm.
15. Nakahara, M. & Nakamura, R. 2004. Uptake, Retention and Organ/Tissue Distribution of ^{137}Cs by Japanese Catfish (*Silurus Asotus Linnaeus*).

- Journal of Environmental Radioactivity. 77: 191–204.
16. Campbell, 2002. Predicting Metal Bioavailability Applicability of Biotic Ligan Model, Ciesm Workshop Monographs 19, Metal and Radionuclide Bioaccumulation in Marine Organisms, Monaco.
 17. UK-EPA. 2011. Estimation of Fish Bioconcentration Factor (BCF) from Depuration Data. UK Environment Protection Agency, Horizon House, Deanery Road, Bristol.
 18. Reinardy, H.C. Teysse, J.L. Jeffree, R.A. Copplestone, D. Henry, T.B. & Jha, A. 2011. Uptake, Depuration, and Radiation Dose Estimation In Zebrafish Exposed To radionuclides Via Aqueous Or Dietary Routes. Science of the Total Environment, 409: 3771–3779.
 19. Van der Oost, R. Beyer, J. & Vermeulen, N. P. E. 2003. Fish Bioaccumulation and Biomarkers in Environmental Risk assessment: A Review. Environmental Toxicology and Pharmacology, 13: 57-149.
 20. Skwarzec, B., Struminska-Parulska, D.I., Boryto, A., & Kabat, K. 2012. Polonium, Uranium and Plutonium Radionuclides in Aquatic and Land Ecosystem of Poland. Journal of Environmental Science and Health. Part A. Volume 47. Issue 3. Tahun 2012.