

INVENTORI RADIONUKLIDA PLUTONIUM DAN AMERICIUM DI SEDIMEN PESISIR LAUT GRESIK

Murdahayu Makmur

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - BATAN

ABSTRAK

INVENTORI RADIONUKLIDA PLUTONIUM DAN AMERICIUM DI SEDIMEN PESISIR LAUT GRESIK. Teknik radiokimia untuk determinasi isotop plutonium dan americium telah dilakukan untuk melihat inventori $^{239,240}\text{Pu}$ dan ^{241}Am pada sampel sedimen dari pesisir Perairan Gresik yang diambil pada tahun 2013. Persentase jenis material pembentuk sedimen juga diteliti termasuk mengamati dan besaran dan arah arus pada saat dilakukan pengambilan sampel. Konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ pada sedimen yang didapatkan dalam penelitian ini berkisar antara 0,06 sampai dengan $0,34 \text{ Bq.kg}^{-1}$ dengan rata-rata $0,15 \text{ Bq.kg}^{-1}$ sedangkan untuk ^{241}Am berkisar antara 0,54 sampai dengan $0,79 \text{ Bq.kg}^{-1}$, dengan rata-rata sebesar $0,63 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Sebaran kedua radionuklida hampir seragam pada semua titik pengambilan sampel, mengindikasikan bahwa tidak ada input radionuklida dari daerah setempat. Walaupun perairan Gresik bukan jalur utama Arus Lintas Indonesia (Arlindo), tetapi terhubung melalui arus lokal yang dipengaruhi oleh angin muson, sehingga diperkirakan plutonium dan americium yang terdeteksi berasal dari *fallout* dari uji senjata nuklir, baik yang jatuh di wilayah Gresik maupun yang terbawa arus laut dari Samudera Pasifik.

Kata Kunci: Americium, Plutonium, Perairan Gresik, *Fallout*

ABSTRACT

INVENTORY OF PLUTONIUM AND AMERICIUM RADIONUCLIDES IN MARINE SEDIMENT FROM GRESIK COASTAL. Radiochemical techniques for the determination of plutonium and americium isotopes have been carried out to see the inventory $^{239,240}\text{Pu}$ and ^{241}Am in sediments from Gresik Sea in 2013. Percentage of material sediments composition were also observed, including the magnitude and direction of the current sea at the time of sampling. The concentration of $^{239,240}\text{Pu}$ in sediments obtained about 0.06 to 0.34 Bq.kg^{-1} with an average of 0.15 Bq.kg^{-1} , while for ^{241}Am concentration ranged from 0.54 to 0.79 Bq.kg^{-1} , with an average of 0.63 Bq.kg^{-1} . The concentration distribution of both radionuclides nearly uniform at all sampling points, this indicates that there is no input of that radionuclides from the local area. However, the Gresik Sea is not the main line of the Indonesian Throw Flow (ITF), but it is connecting by local current sea caused by monsoon winds. It is predicted that both radionuclides, plutonium and americium, are originating from fallout of the nuclear weapons testing that were drifting through the Pacific Ocean.

Keywords: Americium, Plutonium, Fallout, Gresik Coastal

PENDAHULUAN

Radionuklida hasil *fallout* dari uji coba senjata nuklir pada beberapa waktu yang lalu, menyebar dan terdistribusi ke seluruh dunia, terutama ke belahan dunia sebelah utara. Sekitar 76% jatuhnya berada pada belahan bumi sebelah utara dan 24% di bumi belahan barat. Paling banyak pada lintang pertengahan 30° - 60° dan lebih sedikit pada daerah tengah dan kutub^[1]. Indonesia yang terletak di lintang rendah, juga menerima dampak dari jatuhnya radionuklida tersebut, baik di daratan maupun di lautan.

Samudera Pasifik, yang terletak di lintang sebelah utara, menerima radionuklida hasil *fallout* dalam jumlah yang lumayan besar. Radionuklida yang masuk ke perairan laut, karena sifat kimia dan fisika perairan laut, sebagian radionuklida akan terbawa arus dan sebagian lainnya akan mengalami pengendapan dan akhirnya akan terdeposit di sedimen^[1]. Pergerakan air laut dari Lautan Pasifik ke Samudera Hindia akan memasuki perairan laut Indonesia melalui Arus Lintas Indonesia (Arlindo) yang dikenal dengan istilah *Indonesian Throw Flow* (ITF). *Inflow* terbesar dari Lautan Pasifik akan

masuk melalui Selat Makasar (sekitar 75%), Terusan Lifamatola, Terusan Laut Halmahera dan Selat Karimata, dengan tiga *outflow* utama melalui Selat Lombok, Selat Ombai dan Selat Timor^[2].

Penelitian untuk determinasi radionuklida, termasuk untuk nuklida americium dan plutonium dalam kompartemen laut belum terlalu banyak dilakukan di Indonesia. Nareh dkk melakukan analisis konsentrasi Cs-137 dan Pu-239/240 dalam sedimen Semenanjung Muria dan wilayah sekitarnya pada tahun 2000^[3]. Penelitian lain dilakukan oleh Makmur pada tahun 2011 dan tahun 2013 yang melakukan analisis ^{239,240}Pu di air permukaan Perairan Bangka Selatan^[4] dan di Selat Bangka^[5]. Analisis ^{239,240}Pu di sedimen juga telah dilakukan oleh Makmur pada sedimen laut di Semenanjung Muria pada tahun 2011^[6] dan di Laut Bangka pada tahun 2013^[5]. Sedangkan untuk data dasar americium, sama sekali tidak ada penelitian yang ditemukan untuk perairan laut Indonesia. Untuk mengisi kekosongan data konsentrasi radionuklida di perairan laut Indonesia, perlu dilakukan analisis radionuklida pada kompartemen laut, termasuk di wilayah perairan laut Gresik yang terletak di Selat Madura.

Perairan Gresik ini terletak di Selat Madura dan tidak mendapat pengaruh langsung dari perputaran arus global tersebut, tetapi terhubung melalui arus lokal yang digerakkan oleh angin muson baik angin muson timur atau barat. Selain pemanfaatan sumberdaya kelautannya, kota Gresik juga dikenal sebagai kota industri, yang juga turut memberikan kontribusi terhadap pencemaran di perairan Gresik melalui Sungai Manyar. Sedimen muara Sungai Manyar, selain mendapat masukan dari *fallout* langsung, juga mengalami masukan dari sedimen dari *runoff* sungai yang membawa radionuklida yang jatuh di daratan. Penelitian ini dimaksudkan untuk melihat inventori plutonium dan americium di perairan Gresik dan melihat pengaruh komposisi sedimen terhadap distribusi kedua radionuklida tersebut.

TATA KERJA

Bahan dan Alat

Tracer ²⁴²Pu dan ²⁴³Am

Tracer ²⁴²Pu dan ²⁴³Am, dibeli dari Eckert & Ziegler. Kedua tracer dilarutkan secara terpisah dan digunakan sebagai perunut.

Pengambilan sampel

Pengambilan sampel dilakukan di pesisir perairan Gresik, tepatnya di Muara sungai Manyar, pada bulan September 2013. Sampel sedimen diambil menggunakan sediment corer dan diproses mengikuti Instruksi Kerja Pengambilan dan Preparasi Contoh Sedimen^[7]. Sebagian sampel dipisahkan untuk dilakukan analisis komposisi material pembentuk sedimen.

Prosedur Analisis material pembentuk sedimen

Analisis material pembentuk sedimen dilakukan di Laboratorium Geologi Laut FPIK UNDIP, untuk melihat tekstur sedimen yang didasarkan pada ukuran butiran. Analisis ini berdasarkan metode Eleftheriou dan McIntyre (2005)^[8].

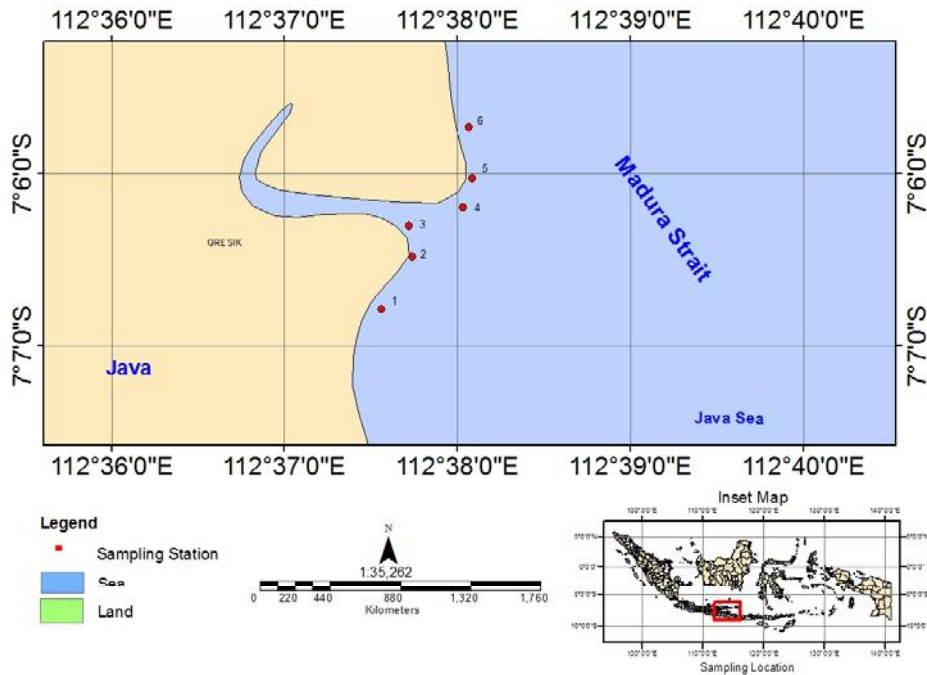
Prosedur Analisis konsentrasi ^{239,240}Pu dan ²⁴¹Am

Sampel sedimen, masing masing sebanyak 9 gram yang ditambahkan tracer ²⁴²Pu dan ²⁴³Am dan dipreparasi mengikuti prosedur yang dikeluarkan oleh Milestone^[9]. Proses selanjutnya adalah pemisahan radionuklida yang dilakukan dengan kolom kromatografi, mengikuti prosedur yang digunakan oleh Nakano (2007). Resin yang digunakan adalah resin dowex 1-x8, 200 mesh dengan elutan HNO₃ untuk pemisahan fraksi americium dan elutan HI-HCl untuk fraksi plutonium^[10]. Plutonium kemudian dielektrodeposisi dan siap untuk dicacah menggunakan alpha analyst. Pemurnian Americium dilanjutkan dengan prosedur dari HASL (EML, 1997) untuk purifikasi dan elektrodeposisi. Pengukuran sampel yang telah terdeposisi pada plat stainless steel menggunakan spektrometer alfa selama 72 jam^[11].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Gresik memiliki luasan wilayah laut mencapai 5.773,8 km² dengan luas daratan hanya 1.192 km², dimana seperti wilayah Gresik merupakan pesisir pantai dengan panjang pantai 140 km. Selain pemanfaatan sumberdaya kelautannya, kota Gresik juga dikenal sebagai kota industri, yang juga turut memberikan kontribusi terhadap pencemaran di perairan Gresik, melalui Sungai Manyar

yang bermuara ke Perairan Laut Gresik, yang dipilih menjadi lokasi penelitian ini. Peta titik pengambilan sampel dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Lokasi pengambilan sampel sedimen di Perairan Laut Gresik

Distribusi Konsentrasi ^{239,240}Pu dalam sedimen

Konsentrasi ^{239,240}Pu di dalam sedimen di Perairan Laut Gresik ditunjukkan pada Tabel 1. berikut ini. Dilihat dari data distribusi konsentrasinya, dapat dikatakan bahwa radionuklida plutonium menyebar merata pada setiap titik, termasuk pada titik Gre 03 yang merupakan input dari sungai Manyar. Ini menunjukkan bahwa, tidak adanya input plutonium dari daerah setempat, karena memang tidak ada industri yang menghasilkan radionuklida plutonium di sepanjang sungai Manyar yang bermuara di Perairan Gresik. Selain hal tersebut, dapat dikatakan bahwa tidak terjadi penumpukan radionuklida *fallout* yang jatuh di daratan yang terbawa erosi dari daratan.

Distribusi radionuklida yang hampir seragam di setiap titik penyamplingan juga diasumsikan karena lokasi penelitian merupakan perairan yang terbuka dan pergerakan arus dan proses fisik lainnya mengakibatkan kolom air mengalami pengadukan secara terus-menerus sehingga ^{239/240}Pu tersebar merata dalam kolom air yang kemudian terendapkan dalam sedimen. Prihatiningsih (2011) menjelaskan bahwa karakter pesisir yang dinamis menyebabkan terjadinya pencampuran secara terus-menerus dan hal tersebut memberi pengaruh terhadap sebaran konsentrasi radionuklida^[12].

Tabel 1. Konsentrasi ^{239,240} Pu dalam Sedimen

Titik Sampling	Konsentrasi ^{239,240} Pu (Bq.kg ⁻¹)
Gre 01	0,34
Gre 02	0,23
Gre 03	0,06
Gre 04	0,06
Gre 05	0,13
Gre 06	0,07

Konsentrasi $^{239/240}\text{Pu}$ sedimen yang didapatkan dalam penelitian ini berkisar antara 0,06 sampai dengan $0,34 \text{ Bq.kg}^{-1}$ dengan rata-rata $0,15 \text{ Bq.kg}^{-1}$, lebih besar jika dibandingkan dengan data konsentrasi yang ada diperairan Bangka Selatan dengan nilai rata rata sebesar $13 \times 10^{-3} \text{ Bq.kg}^{-1}$ [5] dan di Semenanjung Muria, Jepara yaitu sekitar $10 \times 10^{-3} \text{ Bq.kg}^{-1}$ [6]. Penelitian yang dilakukan oleh Nareh dkk di sepanjang pesisir utara pulau Jawa menemukan konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ sekitar $26,47 \text{ mBq.kg}^{-1}$ [3].

Distribusi Konsentrasi ^{241}Am dalam sedimen

Hasil analisis konsentrasi ^{241}Am di sedimen Perairan Gresik ditunjukkan pada Gambar 2 dibawah ini. Nilai konsentrasi ^{241}Am yang terbesar yaitu pada titik Gre 04 yaitu sebesar $0,79 \text{ Bq.kg}^{-1}$ dan konsentrasi terkecil pada stasiun Gre 02 yaitu sebesar $0,54 \text{ Bq.kg}^{-1}$, dengan rata rata sebesar $0,63 \text{ Bq.kg}^{-1}$.

Tabel 2. Nilai konsentrasi ^{241}Am dalam sedimen

Titik Sampling	Konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ (Bq.kg^{-1})
Gre 01	0,62
Gre 02	0,54
Gre 03	0,62
Gre 04	0,79
Gre 05	0,61
Gre 06	0,57

Konsentrasi ^{241}Am di lautan Pasifik berkisar antara 0,5 sampai dengan 7 Bq.kg^{-1} . Apabila dibandingkan dengan data yang didapatkan, maka ^{241}Am yang terukur di sedimen Perairan Gresik sangat kecil, apabila dibandingkan dengan yang terukur di Lautan Pasifik sehingga dapat dikatakan bahwa ^{241}Am tidak berasal dari perairan Gresik. Sumber asal ^{241}Am di perairan Gresik di duga berasal dari laut Pasifik dan yang terbawa arus dan *global fallout* hingga masuk ke perairan Indonesia. Selain masuk ke dalam perairan laut, *global fallout* juga tersebar pada lingkungan daratan dan dapat terbawa oleh sungai hingga masuk laut melalui muara.

Noshkin (1998) telah melakukan penelitian serupa dengan mengambil contoh sampel sedimen permukaan di atol Rongelap yang berada di Laut Pasifik. Nilai konsentrasi ^{241}Am yang diteliti menunjukkan nilai dengan kisaran $3,4-13,0 \text{ Bq.kg}^{-1}$ [13]. Hasil tersebut apabila dibandingkan dengan konsentrasi di perairan Gresik sangat jauh berbeda, membuktikan bahwa ^{241}Am makin jauh dari sumber sebaran makin kecil konsentrasinya.

Pengaruh arus laut terhadap konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ dan ^{241}Am di sedimen Perairan Gresik

Masuknya radionuklida $^{239/240}\text{Pu}$ dan ^{241}Am ke Perairan Gresik tidak bisa terlepas dengan pergerakan arus dunia yang melewati perairan laut Indonesia. Pola arus tersebut yang dikenal dengan *Indonesian Throw Flow* (ITF), membawa massa air dari Samudera Pasifik, mengalir masuk melalui selat Makassar sebagai jalur utamanya. Kemudian meninggalkan perairan Indonesia melalui selat Lombok dan sebagian berbelok melalui laut Flores, laut Banda dan memasuki Samudera Hindia. Melihat jalur aliran tersebut, pergerakan massa arus dunia tidak berpengaruh secara langsung terhadap perairan Gresik. Tetapi, karena arus laut yang dinamis, maka pergerakan arus global akan terhubung dengan perairan Gresik melalui angin musim, dimana arus akan mengalir ke timur pada bulan selama Musim Barat dan mengalir ke arah barat selama Musim Timur.

Hasil pengukuran arah dan kecepatan arus pada saat pengambilan sampel berkisar $0,1906 \text{ m/s}$ hingga $0,0065 \text{ m/s}$. Besaran arus ini dikategorikan termasuk ke dalam arus tenang, sehingga dapat dikatakan bahwa tidak ada pengaruh arus terhadap sebaran konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ dan ^{241}Am di sedimen perairan tersebut. Data kecepatan dan arah arus pada setiap titik pengambilan sampel dapat dilihat pada Tabel 3.

Melihat arah arus yang terukur, dapat dikatakan bahwa peran input massa air dari sungai Manyar berpengaruh sangat besar terhadap arah arus di perairan gresik, karena pada saat pasang naik, arah arus bergerak ke arah sungai, sedangkan ketika pasang surut, arah arus bergerak menjauhi muara sungai.

Tabel 3. Kecepatan dan Arah Arus Permukaan

Titik Sampling	Kecepatan Arus (m/det)	Posisi (derajat)	Arah Arus
Gr 1	0.0065	23	Tenggara
Gr 2	0.0308	313	Barat Laut
Gr 3	0.1341	279	Barat
Gr 4	0.1602	350	Utara
Gr 5	0.1906	355	Utara
Am 6	0.0914	19	Utara

Keterangan : Data Bulan september 2013.

Faktor fisika Oseanografi yang turut berpengaruh dalam distribusi konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ dan ^{241}Am perairan Gresik, dimana arus yang dibangkitkan oleh angin maupun fenomena pasang surut dapat mengakibatkan pengadukan pada kolom air dan kemungkinan adanya transpor sedimen mengingat lokasi penelitian yang berada pada muara sungai.

Korelasi material pembentuk sedimen dengan konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ dan ^{241}Am

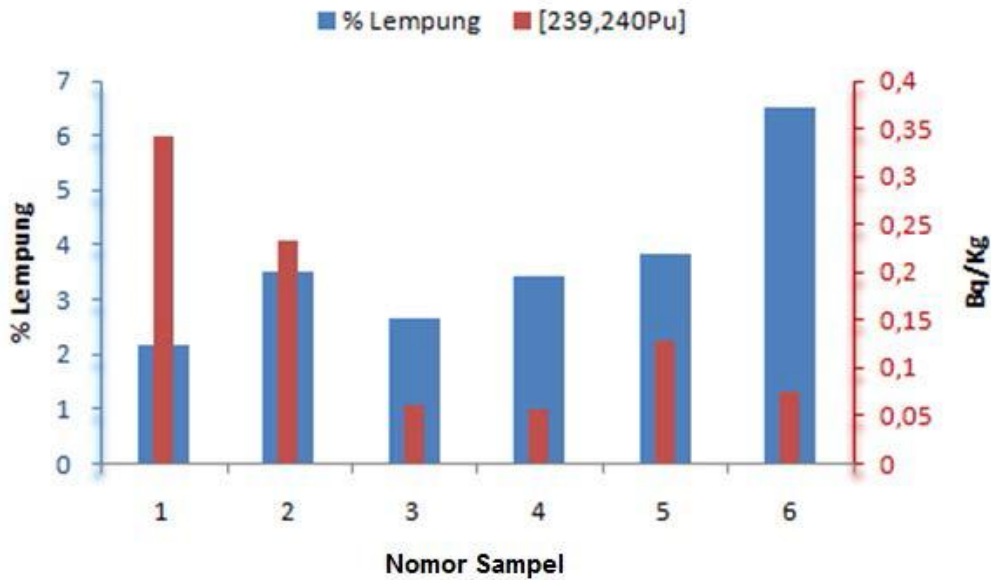
Plutonium dan americium karena bersifat partikel rekatif, cenderung akan terikat pada fasa padat dibandingkan dengan fasa cair. Sepertinya di kompartemen laut, plutonium dan americium yang berada di larutan akan mengendap dan berasosiasi dengan material pembentuk sedimen. Ikatan yang terbentuk antara radionuklida dengan material pembentuk sedimen digambarkan dengan istilah koefisien distribusi (Kd). Koefisien distribusi akan mempengaruhi kemampuan distribusi suatu partikel, dimana semakin tinggi nilai Kd nya maka kemampuan partikel untuk terdistribusi juga tinggi. Menurut Mahara dan Kudo (2000) plutonium mempunyai nilai Kd yang tinggi pada jenis sedimen jenis *clay* atau lempung karena berukuran lebih kecil, sehingga besar kemungkinan akan terdistribusi lebih jauh dibandingkan dengan jenis sedimen lain yang mempunyai butiran lebih besar^[14].

Data analisis material pembentuk sedimen pada lokasi penelitian menunjukkan komposisi *clay* atau lempung lebih kecil (3,68%) dibandingkan dengan material lain, seperti pasir (80,34%) dan lanau (15,98%). Hasil analisis material pembentuk sedimen dapat dilihat pada Tabel 4 berikut ini.

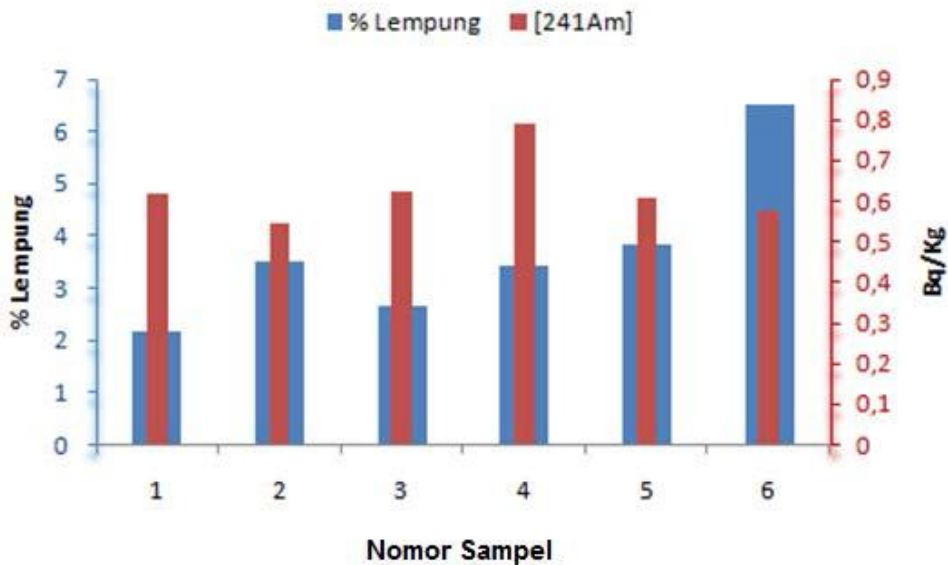
Tabel 4. Hasil Analisa material pembentuk sedimen Perairan Gresik

Stasiun	Dominasi Sedimen		
	Pasir	Lanau	Lempung
Gr 01	89.76%	8.08%	2.17%
Gr 02	81.00%	15.48%	3.52%
Gr 03	82.46%	14.90%	2.64%
Gr 04	80.43%	16.15%	3.42%
Gr 05	79.60%	16.57%	3.83%
Gr 06	68.81%	24.68%	6.51%

Dibandingkan dengan penelitian yang dilakukan di sedimen perairan Semenanjung Muria, komposisi lempung mempunyai persentase yang lebih tinggi (sekitar 18%), sehingga diasumsikan mempunyai nilai Kd yang lebih besar. Sehingga distribusi radionuklida lebih luas dan menyebabkan data plutonium pada setiap stasiun pengambilan tidak berbeda jauh^[5]. Dengan demikian, dapat diasumsikan bahwa semakin tinggi persentase lempung, maka semakin kecil plutonium dan americium yang terikat pada sedimen jenis *clay*. Hubungan antara konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ dan ^{241}Am dengan persentase sedimen jenis lempung dapat dilihat pada Gambar 2 dan 3 berikut ini.



Gambar 2. Hubungan persentase lempung dengan konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ di sedimen perairan Gresik



Gambar 3. Hubungan persentase lempung dengan konsentrasi ^{241}Am di sedimen perairan Gresik

Berdasarkan grafik pada Gambar 2, untuk hubungan persentase lempung dengan konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ dapat dilihat terdapat korelasi terbalik antara kedua variabel. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi persentase lempung pada sedimen tersebut, maka akan semakin tinggi konsentrasi $^{239,240}\text{Pu}$ yang terikat pada material jenis ini. Sedangkan untuk radionuklida ^{241}Am , yang digambarkan pada Gambar 3, tidak ditemukan korelasi serupa.

Berdasarkan hasil penelitian Lujaniene (2012) ditemukan bahwa ada perbedaan kinetika ikatan antara plutonium dengan americium terhadap lempung, dimana plutonium akan terikat lebih kuat apabila sedimen tersebut lebih banyak mengandung oksida besi dan bahan organik,

sedangkan americium akan lebih terikat kuat apabila material tersebut lebih banyak mengandung karbonat^[154]. Dengan melakukan uji komposisi unsur penyusun lempung pada sedimen tersebut, maka akan dapat menjawab mekanisme ikatan antara kedua radionuklida tersebut terhadap sedimen perairan Gresik.

KESIMPULAN

Konsentrasi ^{239,240}Pu pada sedimen yang didapatkan dalam penelitian ini berkisar antara 0,06 sampai dengan 0,34 Bq.kg⁻¹ dengan rata-rata 0,15 Bq.kg⁻¹. Konsentrasi ²⁴¹Am berkisar antara 0,54 sampai dengan 0,79 Bq.kg⁻¹, dengan rata-rata sebesar 0,63 Bq.kg⁻¹. Sebaran kedua radionuklida hampir seragam pada semua titik pengambilan sampel, mengindikasikan bahwa tidak ada input radionuklida dari daerah setempat. Walaupun perairan Gresik bukan jalur utama ITF, tetapi terhubung melalui arus lokal yang dipengaruhi oleh angin muson, sehingga diperkirakan plutonium dan americium yang terdeteksi berasal dari *fallout* dari uji senjata nuklir, baik yang jatuh di wilayah gresik maupun yang terbawa arus laut dari Samudera Pasifik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Aston, S.R. & Stanners, D.A., Americium in intertidal sediment from the coastal environs in windscale. *Marine pollution Bulletin*, Vo.. 12. No.5. 149-153, 1981.
- [2]. Metzger, E.J., Hurlburt, H.E., Xu, X., Shriver, J.F., Gordon, A.L., Srintall, J., Susanto, R.D. and van Aken, H.M., Simulated and observed circulation in the Indonesia Seas: 1/12o Global HYCOM and the INSTANT Observation. *Dynamic of Atmosphere and Ocean* 50, 275 – 300, 2010.
- [3]. Nareh, M. & Warsono, A., Penentuan konsentrasi Cs-137 dan Pu-239/240 dalam sedimen Semenanjung Muria dan wilayah sekitarnya. *Jurnal Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir*. Vol 8. 131-137, 2000.
- [4]. Makmur, M., Sebaran radionuklida ^{239,240}Pu di air permukaan Selat Bangka. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*. Volume 16 Nomor 2, Desember 2013.
- [5]. Makmur, M., Penentuan nilai koefisien distribusi (Kd) ^{239,240}pu pada perairan laut Bangka Selatan. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*. Volume 16 Nomor 1, Juli 2013.
- [6]. Makmur, M., Mekanisme penjerapan plutonium pada sedimen di perairan laut Semenanjung Muria Jepara. (in review @ Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah). PTLR BATAN, 2013.
- [7]. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Instruksi Kerja Pengambilan dan Preparasi Contoh Sedimen. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN, 2011.
- [8]. Eleftheriou, A and A. McIntyre (editor). *Methods for The Study of Marine Benthos*. 3rd ed. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 2005.
- [9]. Milestone. Digestion Application Note DG-EN-34: Sea Sediment. www.milestonesrl.com. 2013.
- [10]. Nakano, M. Manual of standart procedures for analysis of marine samples. Nuclear Fuel Cycle Engineering Laboratories, JAEA. 10-16. 2007.
- [11]. Environmental Measurement Laboratory (EML). *Analytical Chemistry*. HASL-300. 28th edition. U. S. Departement of Energy. 1997.
- [12]. Prihatiningsih, W.R. Radioekologi Kelautan di Semenanjung Muria: Studi distribusi dan perilaku radionuklida di Perairan Pesisir. Thesis Universitas Indonesia. Jakarta. 2011.
- [13]. Noshkin, V.E., Wong, K.M., Jokela, T. A, Brunk, J.L & Eagle, R.J. Chapter 14: Plutonium and Americium Behavior in Coral Atoll Environments in Oceanic Processes in Marine Pollution. T.P. Corner, W.V. Burt & I.A. Duedall (eds). Vol 2. 1987. Pp. 159 – 174, 1987.
- [14]. Mahara, Y. & Kudo, A. Plutonium mobility and its fate in soil and sediment environments in Plutonium in Environment. A.kudo (Editor) . Elsevier science Ltd. 348- 362, 2000.
- [15]. Lujaniene, G. Benes, P., Stamberg, K & Sciglio T. Kinetics of plutonium and plutonium sorption to natural clay. *Journal of Environmental Radioactivity* 108. 41 – 48, 2012.