

## STUDI PENINGKATAN RADIONUKLIDA ALAM KARENA LEPASAN ABU TERBANG DI SEKITAR PLTU LABUAN

Niken Hayudanti Anggarini<sup>1\*</sup>, Dadong Iskandar<sup>2</sup>, Megi Stefanus<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan,

<sup>2</sup>Pusat Teknologi Kalibrasi dan Metrologi Radiasi, BATAN, Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan

\*Email : niken84@batan.go.id

Diterima: 03-11-2017

Diterima dalam bentuk revisi: 10-02-2018

Disetujui: 22-02-2018

### ABSTRAK

**STUDI PENINGKATAN RADIONUKLIDA ALAM KARENA LEPASAN ABU TERBANG DI SEKITAR PLTU LABUAN.** Abu terbang dan abu dasar hasil pembakaran batu bara mengandung radionuklida alam dengan konsentrasi tertentu. Lepasannya dapat berpotensi meningkatkan konsentrasi radionuklida alam di lingkungan sekitarnya. Tujuan penelitian ini adalah mengukur konsentrasi radionuklida alam di tanah dan menganalisis kemungkinan adanya peningkatan konsentrasi radionuklida alam di tanah sekitar PLTU Labuan. Metode penelitian diawali dengan pengambilan sampel tanah yang lokasinya disesuaikan dengan sampling sebelum PLTU Labuan beroperasi. Selanjutnya dilakukan preparasi dan pengukuran sampel tanah menggunakan spektrometer gamma detektor *HPGe* selama 61.200 detik. Hasil pengukuran konsentrasi yang didapat dibandingkan dengan data konsentrasi sampel tanah sebelum PLTU Labuan beroperasi. Perbandingan ini menggunakan komparasi dengan uji-t. Hasil pengukuran rata-rata konsentrasi radionuklida alam di sampel tanah saat ini adalah untuk Ra-226, Th-232, dan K-40 masing-masing sebesar 23,15±3,05 Bq/kg; 35,89±4,07 Bq/kg; dan 153,52±16,71 Bq/kg, sedangkan saat sebelum PLTU Labuan beroperasi adalah 22,94±1,92 Bq/kg; 38,60±2,58 Bq/kg; dan 122,10±8,90 Bq/kg. Hasil uji komparasi ketiga radionuklida antara sebelum dan sesudah PLTU Labuan beroperasi menunjukkan tidak ada perbedaan signifikan. Kesimpulan penelitian ini adalah tidak ada peningkatan rata-rata konsentrasi radionuklida alam di sekitar PLTU Labuan yang signifikan.

**Kata kunci :** radionuklida alam, *TENORM*, abu terbang, PLTU batu bara, PLTU Labuan.

### ABSTRACT

**STUDY OF INCREASING NATURAL RADIONUCLIDE DUE TO FLY ASH DISCHARGED AT AROUND LABUAN COAL POWER PLANT.** Fly ash from coal-fired power plants containing radionuclides will probably potentially improve concentration of natural radionuclides and radiation dose rate in the surrounding environment. The object of this study are to measure and analyze presence of increasing natural radionuclides concentrations around Labuan power plant after 6 years operation. The research method begun with soil sampling whose location was adjusted to the sampling before Labuan power plant operates. The next step was measurement of soil samples using *HPGe* spectrometers. The last step was comparing radionuclide concentration in soil samples on this time with the previous data before Labuan coal-fired power plant operated using t-test comparison. The average concentration of natural radionuclides in soil samples today are Ra-226 23.15 ± 3.05 Bq/kg, Th-232 amounted to 35.89 ± 4.07 Bq/kg, and K-40 amounted to 153.52 ± 16.71 Bq/kg. The value of this radionuclide concentrations did not differ significantly compared with the concentration of radionuclides in soil before Labuan power plant operation. It is concluded that there is no significant increase in the average natural radionuclide concentrations around Labuan power plant.

**Keywords:** natural radionuclide, *TENORM*, fly ash, coal power plant, Labuan power plant.

## 1. PENDAHULUAN

*Technologically enhance naturally occurring radioactive materials (TENORM)* adalah bahan radioaktif alam yang meningkat konsentrasinya atau terekspos ke lingkungan karena aktifitas manusia yang menggunakan bahan baku dari kulit bumi (1,2). *TENORM* dapat dihasilkan dari kegiatan industri nonnuklir. Sektor industri yang berpotensi sebagai sumber *TENORM* salah satunya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang menggunakan batu bara dan panas bumi sebagai bahan bakar (3).

PLTU berbahan bakar batu bara mendominasi penyediaan listrik di Indonesia. Kapasitas yang terpasang sampai saat ini adalah 51% dari total kapasitas pembangkit di Indonesia (4). Salah satu PLTU yang tergolong baru beroperasi dalam rangka mendukung kebijakan pemerintah untuk sektor listrik adalah PLTU Labuan di daerah Labuan, Banten. PLTU Labuan mulai beroperasi tahun 2010, termasuk dalam Program Percepatan Diversifikasi Energi (PPDE) 10.000 MW. Bahan bakar yang digunakan adalah batu bara berkalori rendah yang berasal dari Kalimantan dan Sumatera. Konsumsi perhari sebesar 8000 MT (5).

Penggunaan batu bara sebagai bahan bakar PLTU menghasilkan *bottom ash* (abu dasar) dan *fly ash* (abu terbang) sebagai sisa pembakaran. Sekitar 60–80% abu terbang akan dihasilkan dari pembakaran batu bara pada boiler bersuhu 700-800 °C (6), sedangkan abu dasar akan jatuh ke dalam *hopper* di dasar tungku. Abu terbang dan abu dasar akan terkonsentrasi

sejumlah unsur radionuklida alam yang terkandung dalam batu bara. Beberapa unsur yang dominan terkandung dalam abu terbang adalah Ra-226, Th-232, dan K-40 (7), sedangkan konsentrasi radionuklida dalam abu terbang di tiga negara tahun 2012 ada pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsentrasi radionuklida pada Abu terbang di beberapa negara(8)

Radionuklida	Konsentrasi (Bq/kg)		
	Afrika Selatan	Australia	Indonesia
Ra-226	213	93	76
Th-232	191	93	76
K-40	172	210	400

Abu terbang memiliki potensi untuk terlepas ke lingkungan karena sistem filtrasi pada cerobong seperti *electrostatic precipitators*, *baghouses*, dan *scrubber* jika berfungsi dengan baik hanya dapat mengurangi emisi abu terbang ke udara sekitar 95 % (9). Beberapa faktor yang mempengaruhi terlepasnya radionuklida alam ke lingkungan dari PLTU batu bara adalah berasal dari konsentrasi radionuklida alam yang dikandung dalam batu bara, jenis batu bara, efisiensi alat pengendali emisi, suhu pembakaran, dan ukuran abu dasar serta abu terbang (10). Abu terbang memiliki sifat fisik yang lebih berat dari udara (11), sehingga pada saat tertentu akan jatuh ke permukaan tanah. Selanjutnya, abu terbang dapat terdeposisi ke dalam tanah di sekitar PLTU hingga kedalaman 5 cm (12). Radionuklida yang terakumulasi di tanah berkontribusi sebagai sumber radiasi eksternal. Semakin tinggi kandungan radionuklida alam di wilayah tersebut, semakin tinggi pula laju dosis

radiasinya (13). Seiring dengan kegiatan beroperasinya PLTU, maka konsentrasi radionuklida alam yang terkandung di dalam tanah sekitar PLTU perlu dilakukan pengukuran secara periodik. Hal ini mengingat karena lepasan abu terbang dari kegiatan operasi PLTU tersebut dapat meningkatkan potensi akumulasi radionuklida alam atau disebut *TENORM*.

Tujuan dari penelitian ini adalah mengukur konsentrasi radionuklida alam di tanah sekitar PLTU Labuan setelah beroperasi selama 6 tahun dan membandingkannya dengan data konsentrasi tanah sebelum PLTU beroperasi. Hal ini untuk menganalisis ada atau tidaknya akumulasi radionuklida *TENORM* di tanah sekitar PLTU Labuan. Data konsentrasi tanah sebelum PLTU Labuan beroperasi tahun 2010 adalah Ra-226 sebesar  $9,77 \pm 0,80$  Bq/kg sampai  $44,54 \pm 2,94$  Bq/kg dengan rata-rata seluruh lokasi  $22,94 \pm 1,92$  Bq/kg, radionuklida Th-232 berkisar  $15,71 \pm 1,72$  Bq/kg sampai  $103,30 \pm 6,15$  Bq/kg dengan rata-rata konsentrasi di seluruh lokasi  $38,60 \pm 2,58$  Bq/kg, radionuklida K-40 berkisar antara  $15,35 \pm 1,47$  Bq/kg sampai  $482,51 \pm 27,78$  Bq/kg dengan rata-rata konsentrasi  $122,10 \pm 8,90$  Bq/kg (14).

## 2. TATAKERJA (BAHAN DAN METODE)

Pengambilan sampel tanah pada penelitian ini dilakukan pada bulan November 2016 dengan kondisi cuaca tidak hujan. Lokasi pengambilan sampel mengikuti koordinat lokasi yang sudah ditandai pada saat pengambilan sampel sebelum PLTU Labuan beroperasi, tahun 2010. Teknik pengambilan sampel

dilakukan dengan menentukan titik-titik pengambilan sampel tanah berdasar pada radius tertentu dari PLTU Labuan sebagai titik pusat koordinat dan penempatan *grid*. Penentuan radiusnya adalah 1 km, 3 km, 5 km, 10 km, 15 km, 20 km, 25 km, 30 km, sedangkan besaran *grid* adalah 1 km x 1 km, 3 km x 3 km, 5 km x 5 km, 10 x 10 km, 15 km x 15 km. Titik lokasi pengambilan sampel digambarkan pada Gambar 1.

Sampel tanah yang sudah diambil selanjutnya dipreparasi dengan cara dipanaskan pada suhu  $105^{\circ}\text{C}$  selama 24 jam. Sampel tanah selanjutnya diayak dengan ayakan berukuran 100 mesh kemudian ditempatkan di dalam marinelli beaker ukuran 1 liter. Sampel tanah dalam marinelli beaker diberi kode, tanggal preparasi, dilem sampai kepal udara menggunakan *araldite*. Selanjutnya, sampel didiamkan selama 30 hari sebelum diukur supaya terjadi kesetimbangan antara Radium dan Radon karena yang diukur adalah anak luruh Radon yang memancarkan gamma.

Pengukuran konsentrasi radionuklida alam dalam sampel tanah menggunakan spektrometer gamma dengan detektor semikonduktor *High Purity Germanium (HPGe)* selama 17 jam atau 61.200 detik. Standar tanah yang digunakan untuk pengukuran adalah *mixed gamma source* SRS 92555.

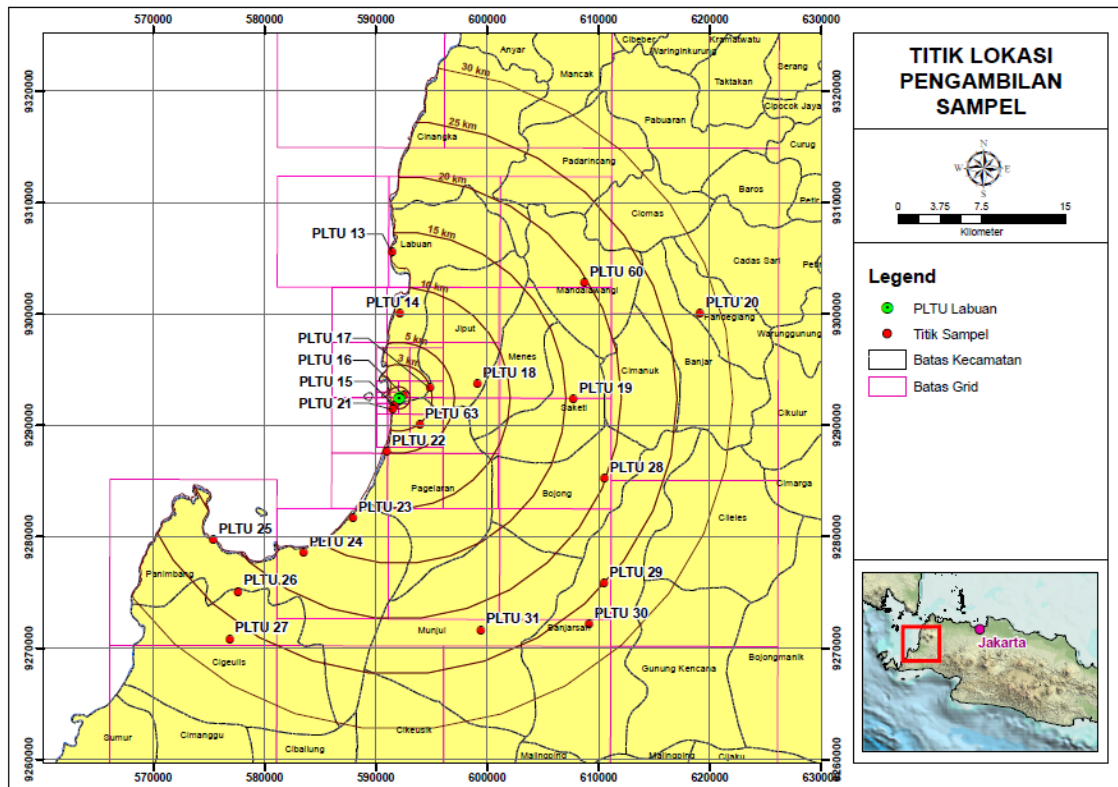
Analisis yang digunakan untuk menilai perbedaan konsentrasi tanah antara sebelum dan sesudah PLTU Labuan beroperasi adalah analisis komparasi dengan uji t-dua sampel. Uji ini membutuhkan data sekunder konsentrasi

radionuklida alam sebelum PLTU beroperasi, kemudian dibandingkan dengan data konsentrasi radionuklida dalam tanah pada saat ini dari 22 lokasi sampling. Hipotesis operasional ( $H_0$ ) yang digunakan adalah tidak ada perbedaan konsentrasi radionuklida di tanah sebelum dan sesudah PLTU beroperasi. Signifikansi penelitian ini ditentukan nilainya sebesar 0,05.

Gambar 1 menunjukkan lokasi pengambilan sampel tanah sampai pada radius 30 km. Total lokasi pengambilan sampel tanah adalah 22 lokasi yang tersebar di beberapa desa/kelurahan di Kabupaten Pandeglang. Keterangan Lokasi pada Gambar 1 dituliskan pada Tabel 2

Tabel 2. Kode dan lokasi pengambilan sampel tanah

No.	Kode Lokasi	Nama Lokasi	Koordinat	
			S	E
1	PLTU-13	Desa Sukarame, Kec. Carita	-6,28221	105,82665
2	PLTU-14	Desa Banjarmasik, Kec. Carita	-6,33133	105,83308
3	PLTU-15	Desa Margagiri, Kec. Labuan	-6,40607	105,82883
4	PLTU-16	Desa Margasana, Kec. Pagelaran	-6,39804	105,83641
5	PLTU-17	Desa Margasana, Kec. Pagelaran	-6,39254	105,85776
6	PLTU-18	Desa Cipucung, Kec. Cikedal	-6,38897	105,89616
7	PLTU-19	Desa Sodong, Kec. Saketi	-6,40082	105,97417
8	PLTU-20	Desa Palurahan, Kec. Kaduhejo	-6,33130	106,07686
9	PLTU-21	Desa Palurahan, Kec. Kaduhejo	-6,40987	105,82742
10	PLTU-22	Kp. Tegalpapak, Kec. Labuan	-6,44360	105,82253
11	PLTU-23	Kp. Panimbangan, Kec. Labuan	-6,49824	105,79535
12	PLTU-24	Kp. Cisekeut, Kec. Panimbangan	-6,52669	105,75529
13	PLTU-25	Kp. Citeureup, Kec. Panimbangan	-6,51637	105,68173
14	PLTU-26	Kp. Nampu, Kec. Cigeulis	-6,55814	105,70207
15	PLTU-27	Kp. Panimbangan, Kec. Cigeulis	-6,59632	105,69528
16	PLTU-28	Kec. Saketi	-6,46571	105,99960
17	PLTU-29	Desa Cidahu, Kec. Banjarsari	-6,55082	105,99929
18	PLTU-30	Desa Cisampih, Kec. Munjul	-6,58405	105,98720
19	PLTU-31	Desa Kota Dukuh, Kec. Munjul	-6,58873	105,89937
20	PLTU-60	Desa Pari, Kec. Mandalawangi	-6,30668	105,98290
21	PLTU-61	Desa Sukasari, Kec. Pulosari	-6,32376	105,94350
22	PLTU-63	Desa Pagelaran, Kec. Pagelaran	-6,42201	105,84930



Gambar 1. Titik lokasi pengambilan sampel tanah

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran konsentrasi radionuklida yang dilakukan antara sebelum dan sesudah PLTU beroperasi adalah pada kedalaman tanah 0-5 cm. Hal ini dilakukan karena akumulasi radionuklida alam yang berasal dari lepasan abu terbang paling mengkontaminasi adalah lapisan permukaan tanah. Pertimbangan lainnya adalah sifat fisik radionuklida yang membutuhkan waktu lama untuk bermigrasi ke lapisan tanah lebih dalam, bahkan sampai puluhan tahun. Hal inilah yang menjadi pertimbangan untuk melakukan pengambilan sampel pada tanah permukaan, yaitu pada kedalaman 0-5 cm.

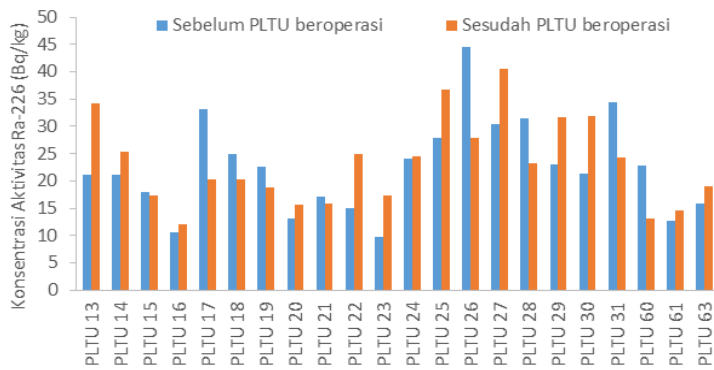
Pengambilan sampel tanah pada penelitian ini juga memperhatikan tutupan tanah. Hal ini untuk memastikan bahwa

tanah yang diambil adalah tanah yang dapat merepresentasikan adanya akumulasi lepasan abu terbang yang mengandung radionuklida. Pada pengambilan sampel tanah harus memperhatikan kondisi bahwa tanah tersebut tidak terolah selama 6 tahun dan tidak terkena pohon atau pelindung lain pada jarak tertentu. Kepastian mengenai hal ini adalah dengan melakukan wawancara singkat pada warga sekitar lokasi pengambilan sampel. Pada beberapa lokasi pengambilan sampel, tanah hanya ditutupi oleh rerumputan liar.

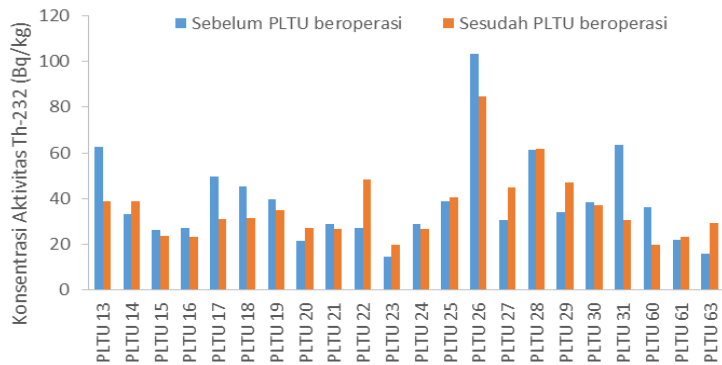
Grafik pengukuran konsentrasi radionuklida alam di dalam tanah sebelum dan sesudah PLTU Labuan ditampilkan pada Gambar 2. Pada grafik tersebut, konsentrasi radionuklida Ra-226 dalam tanah sesudah PLTU Labuan beroperasi

selama 6 tahun adalah sebesar  $12,01 \pm 1,68$  Bq/kg sampai  $40,50 \pm 5,77$  Bq/kg dengan rata-rata konsentrasi seluruh lokasi  $23,15 \pm 3,05$  Bq/kg. Radionuklida Th-232 berkisar  $19,71 \pm 2,43$  Bq/kg sampai  $84,63 \pm 8,63$  Bq/kg dengan rata-rata

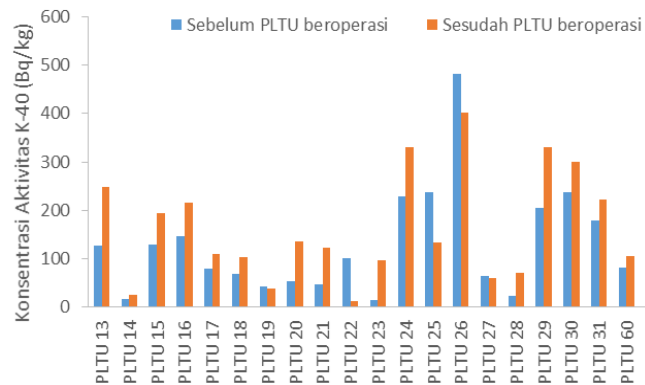
konsentrasi di seluruh lokasi  $35,89 \pm 4,07$  Bq/kg. Lebih lanjut, kandungan radionuklida K-40 berkisar antara  $25,07 \pm 4,73$  Bq/kg sampai  $401,79 \pm 40,46$  Bq/kg dengan konsentrasi rata-rata  $153,52 \pm 16,71$  Bq/kg.



a



b



c

Gambar 2. Konsentrasi aktivitas radionuklida dalam tanah di sekitar PLTU Labuan sebelum dan sesudah PLTU Labuan beroperasi: a. Radionuklida Ra-226, b. Radionuklida Th-232, c. Radionuklida K-40.

Rata-rata konsentrasi radionuklida Ra-226, Th-232, dan K-40 menunjukkan ada perubahan jika dibandingkan data sebelum PLTU Labuan beroperasi tahun 2010. Rata-rata konsentrasi Ra-226 dan K-40 dalam tanah yang terukur saat ini menunjukkan hasil lebih tinggi jika dibandingkan data sebelum PLTU Labuan beroperasi, sedangkan konsentrasi Th-232 dalam tanah yang terukur saat ini menunjukkan hasil yang sedikit menurun dibandingkan data sebelum PLTU Labuan beroperasi. Perbedaan ini dapat terjadi karena adanya perubahan titik lokasi pengambilan sampel antara sebelum dan sesudah PLTU

beroperasi walaupun masih dalam satu grid yang sama. Hal ini tidak dapat dihindari akibat sulitnya untuk menentukan titik koordinat sampling yang sama dengan 6 tahun lalu karena adanya perubahan penggunaan lahan saat ini. Perubahan ini menyebabkan adanya perbedaan sekitar 2-5% dari konsentrasi referansinya (15), tapi perbedaan ini tidak akan mencapai 50-100% (16).

Hasil pengujian komparasi menggunakan uji t antara konsentrasi sebelum dan sesudah PLTU Labuan ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Analisis komparasi uji-t.

Radionuklida	Perbedaan kelompok sampel sebelum-sesudah PLTU beroperasi			Sig. (2-tailed)
	Rata-rata	Standar deviasi	Standar eror rata-rata	
Ra-226	-0,2150	8,1736	1,7426	0,9030
Th-232	2,7109	13,4574	2,8691	0,3550
K-40	-31,4186	63,2285	13,4804	0,0300

Nilai Sig. (2-tailed) pada analisis komparasi ketiga radionuklida yang diukur menunjukkan tidak lebih besar dari nilai  $\alpha/2$  (0,025), sehingga  $H_0$  diterima. Kesimpulan dari analisis ini adalah tidak ada perbedaan konsentrasi radionuklida alam di tanah sekitar PLTU Labuan selama kurun waktu 6 tahun ini.

Hasil penelitian ini dapat menguatkan pernyataan bahwa lepasan abu terbang tidak berpengaruh besar pada konsentrasi radionuklida alam di tanah sekitar PLTU (17). walaupun begitu, penelitian di Cina menyatakan hasil yang berbeda bahwa

konsentrasi radionuklida di tanah sekitar PLTU dapat lebih tinggi dibanding daerah lainnya (18).

Salah satu faktor yang mungkin dapat diamati pada pengaruh lepasan abu terbang di tanah sekitar PLTU adalah waktu. Penelitian ini dilakukan hanya berjarak 6 tahun dari saat PLTU Labuan beroperasi, sehingga abu terbang yang mengandung radionuklida belum cukup terakumulasi pada tanah di sekitar PLTU Labuan.

Tabel 4. Konsentrasi aktivitas radionuklida alam dalam abu terbang di beberapa negara

	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)			Keterangan
	Ra-226	Th-232	K-40	
Cina(19)	67,6	74,3	225,3	rata-rata dalam abu dasar dan abu terbang Xi'an Power Plant
Yunani(20)	142-605	27-68	204-382	abu terbang yang terlepas ke atmosfer
India(21)	118	147	352	rata-rata dalam abu terbang National Thermal Power Plant Dadri, India
Serbia(22)	120	72	360	rata-rata dalam abu terbang di Nicola Tesla Power Plant
Kosovo(23)	30	30	133	rata-rata dalam abu terbang
Malaysia(7)	139	108	291	rata-rata dalam abu terbang
Indonesia(24)	77,55	65,96	162,59	dalam abu terbang di PLTU Labuan



Konsentrasi radionuklida alam dalam tanah di sekitar PLTU Labuan setelah 6 tahun belum meningkat mungkin disebabkan oleh konsentrasi radionuklida dalam abu terbang. Tabel 4 menunjukkan perbandingan konsentrasi aktivitas radionuklida dalam abu terbang di beberapa negara.

Berdasarkan Tabel 4 konsentrasi aktivitas radionuklida alam dalam abu terbang dari PLTU Labuan cenderung lebih rendah dibandingkan negara lain. Perbedaan konsentrasi aktivitas ini tergantung pada jenis dan kualitas batu bara yang digunakan di setiap negara.

Akumulasi yang berlebih radionuklida alam dalam tanah di sekitar PLTU Labuan tidak terjadi bisa disebabkan karena PLTU sudah memperhatikan faktor lepasan partikulat ke udara. Berdasarkan data dari PLTU Labuan, emisi partikulat yang terlepas ke udara berkisar antara 70,50-85,40 mg/m<sup>3</sup>(25). Besaran emisi partikulat ini masih dibawah baku mutu yang ditetapkan oleh pemerintah. Berdasarkan Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup nomor 21 tahun 2008 tentang Baku Mutu Emisi Sumber Tidak Bergerak Bagi Usaha dan/atau Kegiatan Pembangkit Tenaga Listrik Termal, baku mutu untuk emisi partikulat adalah 100 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### 4. KESIMPULAN

Dari penelitian ini diperoleh rata-rata konsentrasi radionuklida alam Ra-226, Th-232, dan K-40 di sekitar PLTU Labuan sebelum beroperasi adalah 22,94±1,92 Bq/kg; 38,60±2,58 Bq/kg; 122,10±8,90 Bq/kg dan sesudah 6 tahun beroperasi

adalah 23,15±3,05 Bq/kg; 35,89±4,07 Bq/kg; dan 153,52±16,71 Bq/kg. Hasil analisis komparasi uji t menunjukkan bahwa tidak ada perbedaan yang signifikan antara konsentrasi ketiga radionuklida antara sebelum dan sesudah PLTU beroperasi selama 6 tahun.

#### 5. UCAPAN TERIMAKASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Program Studi Ilmu Lingkungan, Sekolah Ilmu Lingkungan UI, Bidang Radioekologi PTKMR-BATAN, Bidang Keselamatan PAIR-BATAN yang telah membantu dalam memberikan saran, fasilitas, dan peralatan untuk keberhasilan dan kelancaran kegiatan penelitian.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. WNA. Naturally-occurring radioactive materials (NORM) 2016, <http://www.world-nuclear.org/info/inf30>.
2. Durasevic M, Kandic A, Stefanovic P, Vukanac I, Seslak B, Milosevic Z, Markovic T. Natural radioactivity in lignite samples from open pit mines. J. applied radiation and isotopes 2014; (87): 73-76.
3. Karamis D, Loannides K, Stamoulis K. Environmental assessment of natural radionuclides and heavy metals in waters discharged from a lignite-fired power plant. J. Fuel 2009; (88): 2046-2052.
4. DEN. Indonesia energy outlook 2016. <https://den.go.id/index.php/publikasi/download/49>

5. PT. PLN Unit Pembangkitan Jawa-Bali. (2011). Sektor pengendalian pembangkit I, Serang. <http://www.pln.co.id/upjb/?p=309>. Tanggal 10 Desember 2015, pk. 08.34 WIB.
6. Soeswanto B. Pengaruh parameter proses pada pemungutan kembali silica dari abu batu bara. Master thesis di Universitas Diponegoro 2011.
7. Amin YM, Khandaker MU, Shyen AKS, Mahat RH, Noor RM, Bradley DA. Radionuclide emission from coal-fired power plant. *J. Applied Radiation and Isotopes* 2013; (80): 109-116.
8. Israeli coal ash board. General information radionuclides in Israeli National Coal Ash Board 2012.
9. Dinis MDL, António F, de Carvalho JS, Góis J, Castro ACM. Radiological impact associated to technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM) from coal-fired power plants emissions. *Proceeding of WM2013 Conference, Phoenix, Arizona USA* 2013.
10. Ozden B, Guler E, Vaasma T, Horvath M, Kiisk M, Kovacs T. Enrichment on naturally occurring radionuclides and trace elements in Yatagan and Yenikoy coal-fired thermal power plants, Turkey. *J. Environmental Radioactivity* 2017; (30): 1-8
11. Lookwood. (2010). How breathing coal ash is hazardous to your health. University of Buffalo: 20 hlm. <http://www.psr.org/assets/pdfs/ash-in-the-lungs.pdf>. Tanggal 15 November 2015, pk. 13.07 WIB.
12. Zakaria N, Ba'an R, Kathiravale S. Radiological impact from airborne routine discharges of coal-fired power plant. *Proceeding of RnD Dewan Tun Dr. Ismail Agensi Nuklear Malaysia* 2010.
13. Santos Jr, dos JA, Amaral R dos S, Menezes RSC, Álvarez JRE, Santos JM do N, Fernández ZH, Bezerra JD, da Silva AA, Damascena KFR, Neto J de AM. (2017). Influence of terrestrial radionuclides on environmental gamma exposure in a uranium deposit in Paraiba, Brazil. *J. Ecotoxicology and environmental safety* 2017; (141): 154-159.
14. Wiyono M, Dadong I, Wahyudi, Kusdiana, Syarbaini. Environmental radiation and radioactivity levels around the coal-fired power plants in Banten Province. *Proceeding 2<sup>nd</sup> International Conference on the Source, Effect, and Risk of Ionizing Radiation* 2016.
15. Zorzi PD, Barbizzi S, Belli M, Fajgelj A, Jacimovic R, Jeran Z, Sansone U, Perk MVD. A soil sampling reference site: the challenge in defining reference material for sampling. *J. Applied Radiation and Isotope* 2008; (66)(11): 1588-1591.
16. IAEA. Soil sampling for environmental contaminant, IAEA-TECDOC-1415 2004. Vienna: International Atomic Energy Agency, IAEA.
17. Sutarman, Marzaini N, Asep W, Emlinarni, Buchari R. Penentuan tingkat radiasi dan radioaktivitas lingkungan di kawasan pusat listrik tenaga uap batu bara di daerah Paiton.

- 
- Prosiding dalam Seminar Nasional ke-9  
Teknologi dan Keselamatan PLTN  
serta Fasilitas Nuklir 2003.
18. Lu, Xinweil, Zhao C, Chen C, Liu W.  
Radioactivity level of soil around Baqiao  
coal-fired power plant in China. J.  
Radiation physics and chemistry 2012;  
(8)(12): 1827-1832.
19. Lu, Xinwei, Li LY, Wang F, Wang L,  
Zhang X. Radiological hazards of coal  
and ash samples collected from Xi'an  
coal-fired power plants of China. J.  
Environmental earth science 2012;  
(66): 1925-1932
20. Papastefanou C. Escaping radioactivity  
from coal-fired power plants (CPPs)  
due to coal burning and the associated  
hazards: a review. J. environmental  
radioactivity 2010; (101)(3): 191-200
21. Gupta M, Mahur AK, Varshney R,  
Sankawade RG, Verma KD, Prasad R.  
Measurement of natural radioactivity  
and radon exhalation rate in fly ash  
samples from a thermal power plant  
and estimation of radiation doses. J.  
radiation measurement 2013; (50): 160-  
165.
22. Janković MM, Todorović DJ, Nikolić JD.  
Analysis of natural radionuclides in  
coal, slag and ash in Serbia. J. mining  
and metallurgy 2011; (42)(2): 149-155
23. Hasani F, Shala F, Xhixha G, Xhixha  
MK, Hodolli G, Kadiri S, Bylyku E,  
Cfarku F. Naturally occurring  
radioactive materials (NORMs)  
generated from lignite-fired power  
plants in Kosovo. J. Environmental  
radioactivity 2014; (138): 156-161.
24. PLTU Labuan. Laporan tingkat  
radioaktivitas di PLTU Labuan 2015.
25. PLTU Labuan. Dokumen PLTU Labuan  
2016.

