

Analisis Radionuklida pada *Fly Ash* dan *Bottom Ash* PLTU Teluk Sirih Menggunakan Spektrometer Gamma

Rahmi Dwi Putri^{1,*}, Imam Taufiq¹, Nurokhim²

¹Laboratorium Fisika Nuklir, Jurusan Fisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas,
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163

²Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi-BATAN

Jl. Lebak Bulus Raya No.49, Jakarta Selatan, 12440

*dwiputrirahmi@gmail.com

ABSTRAK

Analisis radionuklida pada *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU Teluk Sirih telah dilakukan menggunakan spektrometer gamma. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui radionuklida yang terdapat pada *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Teluk Sirih, kemudian membandingkan konsentrasi aktivitas radionuklida yang didapatkan dengan PP RI no.101/2014 mengenai pengelolaan limbah B3. Sampel *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU Teluk Sirih dipreparasi sesuai dengan prosedur standar yang ditetapkan oleh BATAN, lalu dicacah menggunakan spektrometer gamma yang dilengkapi detektor HPGe selama 17 jam. Radionuklida yang didapatkan dari hasil pencacahan adalah ^{210}Pb , ^{230}Th , ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{228}Th , ^{238}U , ^{40}K . Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel *fly ash* berkisar antara $21,20 \pm 5,378$ Bq/kg sampai dengan $320,40 \pm 31,279$ Bq/kg, sedangkan konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel *bottom ash* berkisar antara $\leq 2,529$ Bq/kg sampai dengan $163,728 \pm 15,88$ Bq/kg. Berdasarkan PP RI No.101/2014 pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU Teluk Sirih masih diperbolehkan karena konsentrasi aktivitas pada *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Teluk Sirih berada dibawah ambang batas yaitu untuk deret uranium dan thorium adalah 1000 Bq/kg dan untuk kalium sebesar 10.000 Bq/kg.

Kata kunci : aktivitas, *bottom ash*, *fly ash*, limbah B3, radionuklida, spektrometer gamma

ABSTRACT

Radionuclides analysis on the fly ash and bottom ash of Teluk Sirih power plant has been done by using gamma spectrometer. The purpose of this research is to determine the radionuclides contained in the fly ash and bottom ash of the Teluk Sirih power plant, then compared the activity concentrations obtained with Government Regulation no.101/2014. Samples of fly ash and bottom ash from the Teluk Sirih power plant, are prepared according to standards procedure set by BATAN, then analyzed using gamma spectrometer equipped with HPGe detector. Some radionuclides such as ^{210}Pb , ^{230}Th , ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{228}Th , ^{238}U , ^{40}K were detected in samples. The concentration of radionuclide activity in fly ash samples ranged from 21.20 ± 5.378 Bq/kg to 320.40 ± 31.279 Bq/kg, and the concentration of radionuclide activity in bottom ash samples ranged from $\leq 2,529$ Bq/kg to $163,728 \pm 15.88$ Bq/kg. Based on Government Regulation No.101/2014 the use of fly ash and bottom ash from the Teluk Sirih power plant is still permitted because the concentration of activity on the fly ash and bottom ash of the Teluk Sirih power plant is below the limit which are 1000 Bq / kg for uranium and thorium series and for potassium is 10,000 Bq / kg.

Keywords: activity, bottom ash, fly ash, B3 waste, radionuclides, gamma spectrometer

I. PENDAHULUAN

Radiasi alam merupakan radiasi yang dipancarkan dari radionuklida alamiah. Keberadaan radionuklida alamiah dapat ditemukan dari dua sumber utama, yaitu radionuklida primordial yang terbentuk secara alamiah di dalam perut bumi, dan radionuklida kosmogenik yang terbentuk secara alamiah di atmosfer (Akhadi, 2018). Radionuklida alam yang ada di bumi tidak terdistribusi secara merata, radionuklida tersebut terdistribusi pada tanah, air, pasir, dan batuan termasuk batubara.

Batubara merupakan bahan bakar dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTU mengkonversi energi kinetik dari uap hasil pembakaran batubara untuk menghasilkan energi listrik. Pembakaran batubara akan menghasilkan limbah berupa abu yang terpisah. Abu batubara tersebut terdiri atas abu terbang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Laju produksi limbah batubara sekitar 10% dari volume batubara dengan persentase *fly ash* sebesar 80% dan *bottom ash* sebesar 20% (Sukandarrumidi, 2006).

Pada *fly ash* dan *bottom ash* terkandung sejumlah zat radioaktif alamiah yang termasuk ke dalam limbah Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Pembakaran batubara pada suhu tinggi menyebabkan terlepasnya radionuklida primordial yaitu ^{40}K , ^{238}U dan ^{232}Th beserta anak luruhnya yang memancarkan partikel alfa, partikel beta dan sinar gamma ke lingkungan (Sutarman dan Warsona, 1998). Penyebaran gas radioaktif ke lingkungan dapat menimbulkan dampak berbahaya bagi makhluk hidup disekitar PLTU, jika melebihi ambang batas yang ditentukan. Berdasarkan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PP RI) Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah B3, bahwa setiap limbah B3 dilarang penggunaannya sebagai substitusi bahan baku, substitusi sumber energi, sebagai bahan baku yang memiliki nilai radioaktivitas melebihi 1 Bq/g (satu Becquerel per gram) untuk tiap radionuklida anggota deret uranium dan thorium atau 10 Bq/g (sepuluh Becquerel per gram) untuk kalium (Database Peraturan JDIH BPK RI, 2014).

Kegiatan pembakaran batubara pada PLTU merupakan salah satu kegiatan yang dapat meningkatkan konsentrasi radionuklida, sehingga konsentrasi radionuklida pada abu batubara lebih tinggi dibanding konsentrasi radionuklida pada batubara sebelum pembakaran. Peningkatan konsentrasi (pengayaan) pada beberapa unsur terjadi pada abu batubara PLTU Paiton. Penelitian mengenai estimasi faktor pengayaan radionuklida alam hasil pembakaran batubara PLTU Paiton ini dilakukan oleh Sukirno dkk (2014). Pengayaan konsentrasi radionuklida hasil pembakaran batubara pada *bottom ash* berkisar 3 kali (^{210}Pb) sampai dengan 5 kalinya (^{40}K), sedangkan pengayaan konsentrasi aktivitas dari *fly ash* berkisar 6 kali (^{210}Pb) sampai 11 kali (^{235}U). Sukirno dkk (2016) kembali melakukan penelitian mengenai radioaktivitas alam hasil pembakaran batubara dari PLTU Pacitan. Sampel yang diteliti meliputi tanah, air, *fly ash*, *bottom ash* dan batubara. Radionuklida alam yang ditentukan konsentrasi aktivitasnya adalah ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , ^{235}U dan ^{210}Pb . Hasil penelitian menunjukkan bahwa faktor pengayaan *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Pacitan berkisar antara 5,2 sampai 9,7 kali. Konsentrasi radionuklida alam pada butiran halus batubara, *fly ash* dan *bottom ash* berkisar (0,057-162,182) Bq/kg. Konsentrasi radionuklida alam pada tanah berkisar (0,041-169,34) Bq/kg dan konsentrasi radionuklida alam pada air berkisar (0,003-0,045) Bq/L. Analisis batubara PLTU Pacitan masih jauh dibawah nilai batas yang diizinkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) yaitu sekitar 1000Bq/kg.

Penelitian mengenai penentuan radioaktivitas pada *fly ash* batubara juga telah dilakukan oleh Akhyariansyah (2017). *Fly ash* yang digunakan diambil dari salah satu pabrik kimia kota Medan. Radionuklida alam yang diteliti adalah ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K . Hasil penelitian menunjukkan konsentrasi ^{238}U pada sampel *fly ash* sebesar 1778,766Bq/Kg untuk sampel pertama dan 36460,6 Bq/Kg untuk sampel kedua. Konsentrasi yang didapatkan ini telah melebihi ambang batas yang ditetapkan PP RI No. 101 tahun 2014 yaitu sebesar 1000Bq/kg. Penelitian yang sama juga telah dilakukan oleh Silalahi (2017). *Bottom ash* yang digunakan diambil dari tempat penimbunan *bottom ash (ash disposal)* batubara di Kawasan Industri Medan (KIM). Hasil penelitian menunjukkan salah satu sampel yang diteliti memiliki konsentrasi ^{238}U sebesar 5540Bq/kg. Berdasarkan PP RI No. 101 tahun 2014 *bottom ash* yang berasal dari penimbunan *bottom ash* kota Medan ini tidak dapat lagi digunakan sebagai substitusi bahan baku, substitusi sumber energi dan sebagai bahan baku karena telah melebihi ambang batas yang ditetapkan.

PLTU Teluk Sirih merupakan salah satu PLTU di provinsi Sumatera Barat yang tergolong baru beroperasi, sehingga analisis mengenai konsentrasi radionuklida yang terdapat pada *fly ash* dan *bottom ash* belum dilakukan. *Fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan PLTU Teluk Sirih setiap bulan adalah sekitar 5.000 ton. Limbah ini kemudian dikirim ke PT.Semen Padang sebagai bahan pencampur semen (Redaksi6, 2019). Pemanfaatan limbah PLTU Teluk Sirih ini seharusnya dilakukan setelah diketahui konsentrasi radionuklida yang terdapat didalam limbah tersebut. Untuk mengetahui apakah *fly ash* dan *bottom ash* yang dihasilkan PLTU Teluk Sirih sesuai dengan PP RI No.101 tahun 2014 maka diperlukan analisis mengenai kandungan radionuklida yang terdapat di dalam *fly ash* serta *bottom ash* dari PLTU Teluk Sirih.

II. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari sekop, ayakan, wadah penampung, plastik *zip lock*, oven, cetakan, spektrometer gamma dengan detektor HPGe, beaker Marinelli, lem dan neraca. Bahan yang digunakan pada penelitian ini yaitu sumber standar sampel *fly ash* dan *bottom ash*.

2.2 Preparasi Sampel

Sampel *fly ash* dan *bottom ash* diambil dengan menggunakan sekop kemudian dimasukkan ke dalam plastik *zip lock* ukuran 2kg. Sampel *fly ash* dan *bottom ash* yang diperoleh, kemudian diayak dengan menggunakan ayakan 60 *mesh*. Sampel selanjutnya dioven selama sekitar 17 jam pada suhu 110°C dengan tujuan untuk menghilangkan kadar air dalam sampel. Sampel lalu dikirm ke PTKMR-BATAN untuk pencacahan. Persiapan sampel sebelum pencacahan antara lain sampel dimasukkan ke dalam *beaker* Marinelli, setiap *beaker* Marinelli diberi kode, kemudian massa sampel ditimbang menggunakan neraca analitik, setelah itu *beaker* marinelli ditutup dan direkatkan dengan lem *araldite* agar tutup *beaker* tidak mudah terbuka. Sampel yang telah selesai dipreparasi kemudian didiamkan selama sekitar 30 hari untuk menyetarakan anak luruh radionuklida alam yang akan dianalisis dengan induknya.

2.3 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Kalibrasi spektrometer gamma dilakukan dengan menggunakan sumber standar. Kalibrasi spektrometer gamma terdiri dari kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi. Kalibrasi energi dilakukan untuk menentukan hubungan antara energi dari radionuklida sumber standar dan nomor salur (*Channel*) yang didapat dari hasil pencacahan sumber standar. Hubungan antara energi dan nomor salur adalah sebanding, sehingga kurva yang akan diperoleh berupa garis lurus yang linier. Hubungan linier tersebut dinyatakan secara matematis dalam persamaan garis lurus yang mempunyai bentuk seperti pada Persamaan 1 (Susetyo, 1988) :

$$y = ax + b \quad (1)$$

dengan y adalah energi gamma (keV), a adalah bilangan konstanta linier yang menyatakan gradien garis, b adalah bilangan konstanta linier yang menyatakan intersep garis dan x adalah nomor salur (*channel*).

Kalibrasi efisiensi menunjukkan pengukuran cuplikan zat radioaktif dari pancaran sinar gamma yang terdeteksi oleh detektor. Efisiensi tiap energi gamma mempunyai nilai tertentu, untuk menghitung efisiensi tiap-tiap energi yang teramati (%) digunakan Persamaan 2 (BATAN, 2013):

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{N}{A_t P_{\gamma}} \quad (2)$$

dengan N adalah laju cacah radionuklida pada energi tertentu (Bq), A_t adalah aktivitas radionuklida (Bq) dan P_{γ} adalah kelimpahan sinar gamma (*yield*) pada energi tertentu (%).

Untuk menentukan aktivitas radionuklida pada saat t (A_t), maka digunakan Persamaan 3.4 (Susetyo, 1988) :

$$A_t = A_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

dengan A_0 adalah aktivitas radionuklida pada saat $t = 0$ (Bq), λ adalah konstanta peluruhan radionuklida dan t adalah waktu (s).

2.4 Pencacahan *Background*

Pengukuran latar (*background*) dilakukan dengan cara mengukur secara terus-menerus *beaker* Marinelli kosong selama 17 jam menggunakan sistem spektrometer gamma. Pengukuran *background* bertujuan untuk mengetahui radiasi awal sebelum melakukan pengukuran pada sampel.

2.5 Pencacahan Sampel

Pencacahan sampel *fly ash* dan *bottom ash* dilakukan selama 17 jam untuk masing-masing sampel. dan kemudian dilakukan analisis spektrum yang dihasilkan untuk mengetahui radionuklida alam apa yang terdapat didalam sampel dan berapa radioaktivitasnya.

2.6 Pengolahan Data

Penentuan konsentrasi radionuklida (C) dalam sampel menggunakan Persamaan 4 (BATAN, 2013):

$$C = \frac{N_s - N_b}{\epsilon_\gamma P_\gamma W} \pm \sigma \quad (4)$$

dengan N_s adalah laju cacah sampel (cps), N_b adalah laju cacah latar (cps), W adalah massa atau volume sampel (kg atau lt) dan σ adalah deviasi standar. Penentuan deviasi standar melalui Persamaan 5 (BATAN, 2013):

$$\sigma = \sqrt{\frac{N_s}{T_s} + \frac{N_b}{T_b}} \quad (5)$$

dengan T_s adalah waktu cacah sampel (detik), N_b adalah laju cacah standar (cps), dan T_b adalah waktu cacah latar (detik).

Data konsentrasi aktivitas yang telah didapatkan kemudian ditentukan ketidakpastian pengukurannya (U_T) menggunakan Persamaan 6:

$$U_T = C \times \sqrt{\left(\frac{U_N}{N}\right)^2 + \left(\frac{U_\epsilon}{\epsilon_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_P}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{U_W}{W}\right)^2} \quad (6)$$

dengan U_N adalah ketidakpastian pencacahan sampel (%), U_ϵ adalah ketidakpastian efisiensi pada energi gamma (%), U_P adalah ketidakpastian *yield* (%) dan U_W adalah ketidakpastian berat sampel (%).

Besarnya konsentrasi minimum yang dapat dideteksi oleh detektor *Minimum Detectable Concentration* (MDC) dipengaruhi oleh efisiensi pencacahan, cacahan latar, dan berat sampel. Untuk menghitung MDC digunakan Persamaan 7 (BATAN, 2013):

$$MDC = \frac{4,66\sqrt{N_b/T_b}}{\epsilon_\gamma P_\gamma W} \quad (7)$$

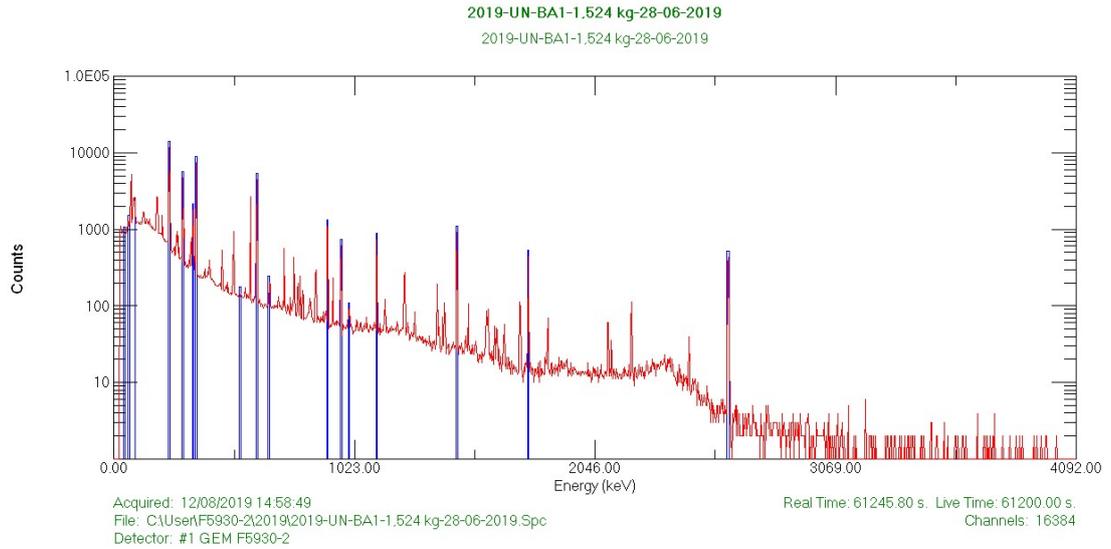
Penentuan radioaktivitas dalam sampel dinyatakan seperti Persamaan 8:

$$C_{sp} = C \pm U_T \quad (8)$$

dengan C_{sp} adalah konsentrasi zat radioaktif dalam sampel terkoreksi (Bq/kg), C adalah konsentrasi zat radioaktif dalam sampel rata-rata (Bq/kg) dan U_T adalah ketidakpastian pengukuran (Bq/kg).

III. HASIL DAN DISKUSI

Sampel *fly ash* dan *bottom ash* dicacah menggunakan spektrometer gamma yang dilengkapi detektor HPGe selama 17 jam. Spektrum yang dihasilkan sampel dievaluasi dengan menggunakan tabel isotop. Pengolahan data pada spektrum hasil pengukuran sampel dilakukan dengan menggunakan *software* Maestro. Hasil pengukuran 6 sampel *fly ash* dan *bottom ash* yang telah didapatkan kemudian dirata-ratakan untuk masing-masing sampel, sehingga didapatkan konsentrasi masing-masing radionuklida yang terdapat pada sampel. Spektrum pencacahan salah satu sampel dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Spektrum pencacahan sampel

Konsentrasi radionuklida pada sampel ditentukan dengan menggunakan Persamaan 4. Penentuan ketidakpastian pengukuran konsentrasi radionuklida ditentukan dengan menggunakan Persamaan 6 dan penentuan konsentrasi minimum yang terdeteksi (MDC) menggunakan Persamaan 7. Hasil pengukuran konsentrasi radionuklida pada sampel dapat dilihat pada Tabel 1 dan Tabel 2.

Tabel 1 Hasil pengukuran konsentrasi aktivitas pada *fly ash*

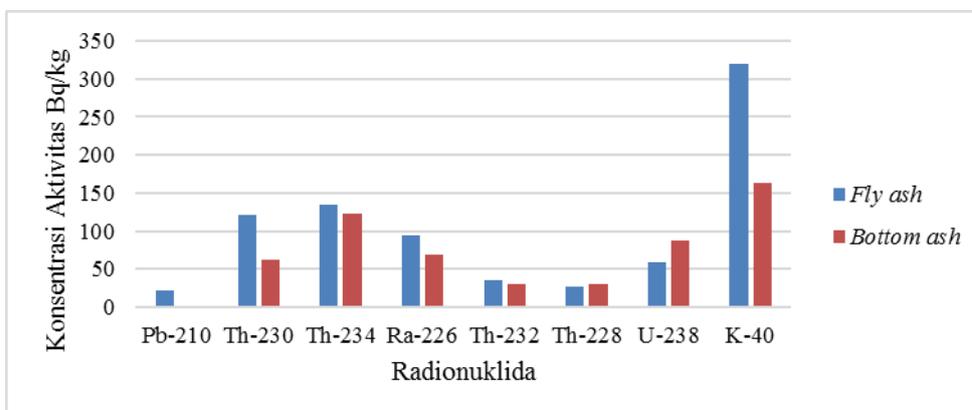
Radionuklida	Konsentrasi (Bq/kg)	Ketidakpastian	MDC
²¹⁰ Pb	21,201	5,378	0,897
²³⁰ Th	120,415	18,740	2,287
²³⁴ Th	134,001	14,582	0,223
²²⁶ Ra	94,577	9,305	0,057
²³² Th	35,016	5,087	0,056
²²⁸ Th	27,089	5,015	0,037
²³⁸ U	58,414	14,179	2,134
⁴⁰ K	320,401	31,280	0,159

Tabel 2 Hasil pengukuran konsentrasi aktivitas pada *bottom ash*

Radionuklida	Konsentrasi (Bq/kg)	Ketidakpastian	MDC
²¹⁰ Pb	<0,380	2,530	0,380
²³⁰ Th	62,843	6,780	0,807
²³⁴ Th	122,711	12,419	0,095
²²⁶ Ra	69,407	6,698	0,024
²³² Th	30,462	4,289	0,024
²²⁸ Th	29,653	5,411	0,016
²³⁸ U	87,626	13,516	0,905
⁴⁰ K	163,728	15,880	0,067

Radionuklida alam yang terdeteksi pada kedua sampel *fly ash* dan *bottom ash* adalah ²¹⁰Pb, ²³⁰Th, ²³⁴Th, ²²⁶Ra, ²³²Th, ²²⁸Th, ²³⁸U, ⁴⁰K. Pada Tabel 1 tampak bahwa untuk sampel *fly ash*, radioaktivitas alam tertinggi terdapat pada unsur ⁴⁰K yaitu 320,401±31,280 Bq/kg sedangkan radioaktivitas alam terendah terdapat pada unsur ²¹⁰Pb yaitu 21,201±5,378Bq/kg. Sampel *bottom ash* pada Tabel 2 menunjukkan hasil radioaktivitas alam tertinggi juga terdapat pada unsur ⁴⁰K yaitu 163,728±43,44Bq/kg, dan radioaktivitas alam terendah juga terdapat pada unsur ²¹⁰Pb yaitu sebesar <0,380±2,53Bq/kg. Hasil pengukuran unsur ²¹⁰Pb menunjukkan bahwa unsur tersebut memiliki konsentrasi yang sangat kecil yaitu lebih kecil dibanding kemampuan

detektor untuk mendeteksi unsur tersebut. Radionuklida yang terdapat didalam *fly ash* dan *bottom ash* disajikan dalam bentuk grafik seperti yang tampak pada Gambar 2.



Gambar 2 Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel

Berdasarkan PP RI no.101 tahun 2014 konsentrasi aktivitas radionuklida alam yang terdapat didalam *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Teluk Sirih masih berada dibawah ambang batas yang diperbolehkan yaitu aktivitas maksimal untuk radionuklida deret uranium dan thorium adalah 1000 Bq/kg, sehingga penggunaan *fly ash* dan *bottom ash* yang berasal dari PLTU Teluk Sirih sebagai substitusi bahan baku, untuk industri semen atau keperluan lainnya.

Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Teluk Sirih tergolong cukup rendah, sehingga berdasarkan PP RI no. 29 th 2008 PLTU Teluk Sirih dapat pengajuan pembebasan pengawasan kepada Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) karena konsentrasi aktivitas *fly ash* dan *bottom ash* telah mencapai tingkat klirens. Tingkat klirens merupakan suatu nilai dimana kandungan bahan radioaktif dalam limbah radioaktif atau material terkontaminasi sangat rendah, sehingga tidak diperlukan perlakuan khusus karena tidak mempunyai efek yang patut dipertimbangkan terhadap manusia dan lingkungan (*Database Peraturan JDIH BAPETEN, 2008*).

IV. KESIMPULAN

Kesimpulan yang didapatkan dari penelitian ini adalah radionuklida alam yang terdeteksi pada sampel *fly ash* dan *bottom ash* adalah ^{210}Pb , ^{230}Th , ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{228}Th , ^{238}U , ^{40}K . Konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel *fly ash* berkisar antara (21,20±5,378) Bq/kg sampai dengan (320,40±31,279) Bq/kg, sedangkan konsentrasi aktivitas radionuklida pada sampel *bottom ash* berkisar antara ≤2,529 Bq/kg sampai dengan (163,728±15,88) Bq/kg. Konsentrasi aktivitas pada *fly ash* dan *bottom ash* PLTU Teluk Sirih berada dibawah ambang batas yang diperbolehkan oleh PP RI No.101 tahun 2014, sehingga pemanfaatan *fly ash* dan *bottom ash* dari PLTU tersebut dikategorikan aman untuk digunakan. PLTU Teluk Sirih dapat mengajukan pembebasan pengawasan kepada BAPETEN karena konsentrasi radionuklida pada *fly ash* dan *bottom ash* telah mencapai tingkat klirens.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kepada Bapak Kusdiana, S.T selaku Kepala Sub Bidang Keselamatan Lingkungan PTKMR-BATAN, Bapak Wahyudi, S.ST selaku penanggung jawab ruang pencacahan spektrometer gamma di PTKMR-BATAN serta semua pihak yang telah banyak memberikan bantuan dalam penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Akhadi, M., *Penanganan Radioaktif*. BATAN Press, Jakarta Selatan, 2018.
 Akhyariansyah, D., "Penentuan Radioaktivitas pada Abu Terbang Batubara dengan Spektrometer Gamma Detektor HPGe", *Skripsi*, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2017.

- BATAN, *Pedoman tentang Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan*, BATAN, Jakarta, 2013.
- Database Peraturan JDIH BPK RI, Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun. <https://peraturan.bpk.go.id> diakses 26 Mei 2019.
- Database Peraturan JDIH-BAPETEN, Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 29 Tahun 2013 tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir, <https://jdih.bapeten.go.id> diakses 26 Mei 2019.
- Redaksi6, PLTU Teluk Sirih Semen Padang Bersinergi Manfaatkan Limbah Batubara. <https://prokabar.com> diakses 21 July 2019.
- Silalahi, D., "Identifikasi dan Penentuan Radioaktivitas Alam dalam Abu Dasar (*Bottom ash*) Batubara dengan Spektrometer Gamma Detektor HPGe", *Skripsi*, Universitas Sumatera Utara, Medan, 2017.
- Sukandarrumidi, *Batubara dan Pemanfaatannya*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, 2006.
- Sukirno, Murniasih, S. & Rosidi, "Estimasi Faktor Pengayaan Radionuklida Alam Hasil Pembakaran Batubara dari PLTU Paiton", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah- Penelitian Dasar Ilmu pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator BATAN, Yogyakarta, 2014.
- Sukirno, Murniasih, S., Rosidi & Sutanto, "Radioaktivitas Alam Hasil Pembakaran Batu Bara dari PLTU Pacitan", *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah- Penelitian Dasar Ilmu pengetahuan dan Teknologi Nuklir*, Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, pp. 70-74, Surakarta, 2016.
- Susetyo, W., *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan Neutron*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta, 1988.
- Sutarman & Warsona, A., "Pemantauan Total Alfa di Udara dan Paparan Radiasi Gamma di Kawasan dan Sekitar PLTU Paito", *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Aplikasi Isotop dan Radiasi*, Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi (PSPKR) BATAN, Jakarta, 1998.