

ESTIMASI FAKTOR PENGAYAAN RADIONUKLIDA ALAM HASIL PEMBAKARAN BATUBARA DARI PLTU PAITON

Sukirno, Sri Murniasih, Rosidi

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator – BATAN
Jl. Babarsari No. 21 Po. Box. 6101 ykbb Yogyakarta
sukirno@batan.go.id

ABSTRAK

ESTIMASI FAKTOR PENGAYAAN RADIONUKLIDA ALAM HASIL PEMBAKARAN BATUBARA DARI PLTU PAITON. Pemantauan radioaktivitas alam dalam batubara, bottom ash (abu dasar) dan fly ash (abu layang), sampel dikumpulkan dari dua unit PLTU dengan batubara yang berbeda untuk dianalisis dengan menggunakan spektrometri gamma. Di dalam Fly ash dan batton ash terdapat *technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM)* seperti Pb-210, U-235, U-238, Th-232 dan K-40. Spektrometri gamma digunakan untuk menentukan TENORM dalam butiran halus batubara, bottom ash dan fly ash. Konsentrasi radionuklida alam di butiran halus batubara berkisar 0,04-14,18 Bq/kg, fraksi bottom ash berkisar 0,22-47,96 Bq/kg dan fraksi fly ash memberikan konsentrasi berkisar 0,43-133,73 Bq/kg. Faktor pengayaan yang diamati hampir sama untuk U-238, Th-232, K-40. Hanya U-235 mempunyai factor pengayaan tinggi untuk tahap terakhir fly ash. Hasil dari penelitian ini menunjukkan bahwa radionuklida yang biasanya ditemukan dalam batubara dapat terpekatkan ke bottom ash atau fly ash setelah pembakaran, pengayaan unsur radioaktif hasil pembakaran padat sekitar 3-10 kali konsentrasi aktivitas dalam batubara aslinya. Hasil perhitungan limit deteksi didapatkan nilai berkisar 0,01 sampai dengan 0,405 Bq/kg.

Kata Kunci : faktor pengayaan, TENORM, bottom ash, fly ash, limit deteksi

ABSTRACT

ESTIMATION OF ENRICHMENT FACTOR FOR NATURAL RADIONUCLEIDES FROM FIRED PAITON THERMAL POWER PLANT. Monitoring of natural radioactivity in coal, bottom ash and fly ash samples were collected from two coal units with different power plant to be analyzed using gamma spectrometry. Fly ash and bottom ash contain *technologically enhanced naturally occurring radioactive materials (TENORM)* such as Pb-210, U-235, U-238, Th-232 and K-40. Gamma-ray spectrometry was used to determine TENORM contents in pulverized coal, bottom ash and fly ash samples. The natural radionuclide concentration in pulverized coal ranged from 0.04 to 14.18 Bq/kg, bottom ash fraction ranged from 0,22 to 47.96 Bq/kg and fly ash fraction gave concentration ranged from 0.43 to 133.73 Bq/kg. The same enrichment factor was observed for U-238, Th-232, K-40. Only U-235 presented a high enrichment factor for last stage fly ash. The results of present study show that radionuclides which are normally found in the coals get enriched into the ashes after burn up, the concentration of most radioactive elements in solid combustion were approximately 3-10 times concentration in the original coal. The results show that the detection limits calculated were 0.01 up to 0.405 Bq/kg.

Keywords : enrichment factor, TENORM, bottom ash, fly ash, detection limit

PENDAHULUAN

Di dalam batubara terdapat radionuklida alam primordial sehingga penggunaan batubara sebagai sumber panas untuk pembangkit tenaga listrik akan menghasilkan emisi berbagai unsur-unsur radioaktif alam ke lingkungan. Unsur jejak dalam batubara yang secara radioaktif alam yang termasuk ke dalam jenis ini adalah uranium (U), torium (Th)

bersama anak luruhnya (dikenal juga dengan deret uranium dan torium) dan termasuk radium (Ra), radon (Rn) dan radionuklida K-40 [1]. Bahan radioaktif tersebut disebut juga *NORM* ringkasan dari *Naturally Occurring Radioactive Material*, yang sadar atau tidak merupakan bagian dari kehidupan manusia. Jadi batubara untuk pembangkit listrik merupakan penyumbang utama terhadap radiasi alam karena menghasilkan abu layang (*fly ash*) dan abu

dasar (*bottom ash*) dalam jumlah cukup besar terdapat radionuklida alam.

Dengan demikian semua bentuk konversi yang berasal dari batubara dalam proses kegiatan industri akan menghasilkan produk, yang merupakan radionuklida alam yang disebut dengan *technologically enhanced naturally occurring radioactive material (TENORM)*. Batubara yang digunakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Paiton Probolinggo pada umumnya berasal dari Kalimantan. Pada dasarnya batubara lokal memiliki kandungan mineral utama seperti kaolinite, quartz, jarosite, illite maupun pyrite yang berwarna coklat sehingga biasa disebut dengan *brown coal*, atau batubara sub bituminous. Sementara nilai kalor yang dimiliki batubara lokal berkisar antara 4000-6000 kcal/kg dari PT. Prima Coal Kalimantan Timur, PT. Batu Licin Kalimantan Tengah dan PT. Sungai Danau Kalimantan Selatan [2].

Batubara umpan yang digunakan dalam pembangkit listrik mengandung berbagai unsur, mineral dan konstituen organik. Setelah batubara terbakar, maka elemen *TENORM* cenderung diperkaya dalam abu, dalam abu layang maupun abu dasar. Radionuklida yang biasanya ditemukan dalam abu dapat diperkaya setelah pembakaran. Pengayaan unsur radioaktif dalam abu layang maupun abu dasar dapat terjadi 5-10 kali konsentrasi dalam batubara aslinya [1,3].

Kualitas udara di Indonesia mulai mengalami penurunan. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor yang berpengaruh, diantaranya adalah peningkatan transportasi akibat pertumbuhan penduduk dan tingkat urbanisasi yang tinggi, ketergantungan yang tinggi terhadap bahan bakar minyak, serta masih rendahnya tingkat kesadaran pemerintah dan masyarakat [4]. Pencemaran udara yang semakin memburuk ini berdampak pada kesehatan masyarakat.

Penyebab utama tingkat pencemaran yang melebihi batas ambang di beberapa bagian dari bumi ini adalah adanya kegiatan yang dilakukan manusia secara terus menerus namun kurang memperhatikan dampak dari kegiatan tersebut terhadap lingkungan hidup sekitarnya, salah satunya adalah industri. Selain itu penurunan kualitas udara juga dikarenakan kenaikan polusi yang berdampak pada kelangsungan hidup makhluk itu sendiri.

Menurut Keputusan Negara Lingkungan Hidup Nomor 17 Tahun 2001, pembangunan PLTU berpotensi menimbulkan dampak pada kualitas udara. Kontaminan seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), oksida belerang (SO_x), senyawa karbon dan debu dapat ditimbulkan dari pemakaian batubara sebagai bahan bakar [5]. Kontaminasi CO₂ yang dihasilkan dari emisi kegiatan industri ikut berperan dalam proses pemanasan global. Selain kontaminasi di atas, ada kontaminasi bersifat karsinogen yaitu radioaktif.

Tujuan analisis batubara ini adalah untuk mengetahui konsentrasi aktivitas radionuklida alam yang terdapat dalam batubara sebagai umpan yang digunakan untuk pembangkit listrik tenaga uap (PLTU), abu dasar dan abu layang dan untuk mengetahui pengayaan *TENORM* hasil pembakaran batubara. Analisis radionuklida dengan menggunakan alat spektrometri gamma.

TATA KERJA

Alat

Seperangkat alat Spektrometer Gamma (γ), detektor HPGe dengan perangkat lunak Genie 2000, memiliki efisiensi relatif 35 % dan resolusi 1,90 keV pada energi gamma 1332 keV dari Co-60. Penumbuk tahan karat, nampan penjemuran sampel, wadah pencacahan, ayakan 100 mesh dan alat homogeniser.

Bahan

Sampel batubara, *bottom ash* dan *fly ash* dari unit I dan II, sumber Eu-152 multi energi dan Co-60. Sedimen laut dengan kode *reference material (RM) IAEA-135 radionuclides marine sediment*.

Preparasi sampel

Batubara *bottom ash* dan *fly ash* yang ada di dalam plastik klip dikeluarkan dan dipindahkan ke dalam nampan plastik kemudian dibiarkan hingga kering dalam beberapa hari dan dibersihkan dari kotoran yang ada, setelah batubara *bottom ash* dan *fly ash* kering ditumbuk dengan penumbuk tahan karat, dan dilakukan pengayakan hingga lolos 100 mesh kemudian dilakukan homogenisasi dan ditimbang 70 g dalam wadah pencacahan yang berlabel dan disegel untuk membuat sampel tersebut kedap udara selama 1 bulan, untuk memastikan terjadinya kesetimbangan sekuler dan mencegah hilangnya anak luruh dari U-238 dan Th-232 terutama radon [1,6,7].

Analisis Spektrometri Gamma

Analisis sampel dilakukan menggunakan spektrometer gamma, dengan detektor HPGe selama 86400 detik. Sampel, standar dan blanko secara bergantian dilakukan pencacahan dengan waktu yang sama. Radionuklida alam yang ditentukan aktivitasnya pada penelitian ini adalah Pb-210, Pb-212, Pb-214, Ra-226, Tl-208, Bi-212, B-214, Ac-228 dan K-40. Pengukuran radioaktivitas berdasarkan *point source* dari energi karakteristik radionuklida masing-masing [6,7]. Karakteristik masing-masing radionuklida disajikan pada Tabel 1. Aktivitas spesifik radionuklida ($A = \text{Bq/kg}$) dengan metoda absolut [8,9] menggunakan persamaan (1) dan dengan metoda komparatif persamaan (2).

$$A = \frac{C_{net}}{P_{y.E.t.m}} \quad (1)$$

$$A = \frac{cps_{spl}/m_{spl}}{cps_{std}/m_{std}} \cdot A_{std} \quad (2)$$

Metoda yang digunakan adalah *point source* pada penentuan efisiensi detektor persamaan (1). C_{net} = cacah sampel setelah dikurangi blanko, P_y adalah probabilitas emisi absolut radionuklida, E adalah efisiensi absolut, t adalah waktu pencacahan dan m adalah berat sampel kering (kg). Metoda komparatif persamaan (2): cps cacah per detik sampel dan standar, m = berat sampel dan standar dan A_{std} = aktivitas standar Bq/kg.

Limit deteksi

Batas deteksi terendah (*lower limit of detection* LLD) adalah konsentrasi terendah yang dapat dideteksi dengan tingkat keyakinan tinggi. Untuk lebih sederhana, digunakan istilah batas ketentuan dengan ketidakpastian yang dapat diterima oleh metode. Uji batas deteksi terendah menggunakan (*lower limit of detection* LLD) [7] sumber radionuklida yang dipakai standar *standard reference material IAEA-315*, sedang blangko atau latar belakang hanya tempat cacah kosong yang dicacah, diberikan pada persamaan (3). Batas deteksi terendah untuk radionuklida, parameter atau besaran-besaran yang tersaji merupakan hasil perhitungan kecuali probabilitas yang diambil dari tabel radionuklida ERDTMANN dan SOYKA [9].

$$LLD = \frac{4,66.Sb}{E.P_y} \quad (3)$$

Sb = standar deviasi blangko

E = efisiensi

P_y = Probabilitas radionuklida yang diperhatikan

Tersaji bahwa batas deteksi terendah setiap radionuklida mempunyai kepekaan terhadap detektor HPGe yang dipergunakan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Secara Kualitatif

Identifikasi radionuklida (*TENORM*) dalam cuplikan batubara, *bottom ash* dan *fly ash* secara kualitatif dapat dilihat pada Tabel 1. Identifikasi radionuklida tersebut dilakukan dengan menganalisis puncak-puncak energi spektrum sinar γ karakteristik spektrum masing-masing radionuklida. Puncak energi spektrum sinar γ karakteristik yang diperoleh ini dicocokkan dengan tabel isotop yang disusun oleh ERDTMANN dan SOYKA [9], sehingga dapat diketahui radionuklida yang teridentifikasi.

Pada Tabel 1, atau pada Gambar 1 dapat dilihat dengan jelas, radionuklida teridentifikasi dalam cuplikan batubara, *bottom ash* dan *fly ash*, ada 10 radionuklida yaitu Pb-210, Ra-226, Pb-212, Pb-214, Bi-214, Bi-212, Tl-208, Ac-228 dan K-40. Pada umumnya radionuklida mempunyai multi energi misalnya radionuklida Pb-214 mempunyai 26 energi puncak, mempunyai probabilitas 0,005% sampai dengan 37,1% dengan umur paro 26,8 menit, Pb-212 mempunyai 4 energi puncak, dengan probabilitas 0,02% sampai dengan 43,1% dan umur paro 10,6 jam [8,9]. Pada Tabel 1 tidak semua puncak energi disajikan, hanya energi yang mempunyai probabilitas tinggi dan yang diperhatikan, kecuali K-40 mempunyai energi puncak tunggal dan mempunyai probabilitas 10,7 %.

Tabel 1. Hasil pengamatan secara kualitatif sampel batubara, *bottom ash* dan *fly ash*

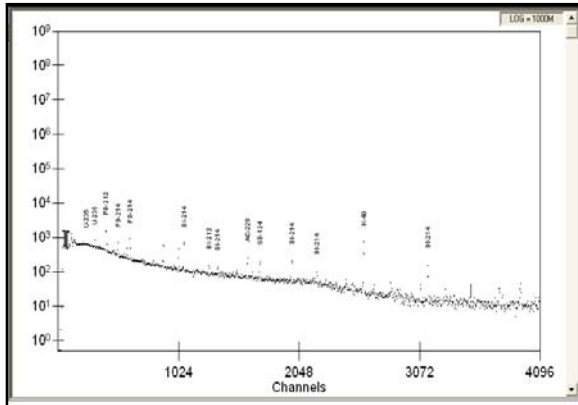
No	Radionuklida	Energi, keV	Probabilitas, %	Umur paro
1	Pb-210	46,5	4,00	20,5 tahun
2	Th-234	63,29	3,90	24,1 hari
3	Ra-226	186,2	3,28	1600 tahun
4	Pb-212	238,6	53,10	10,64 hari
5	Pb-214	295,6; 351,9	19,2; 37,10	26,8 menit
6	Bi-214	609,3; 1120,3; 1764,5	46,09; 15,04; 15,9	19,9 menit
7	B-212	727,2	11,80	60,5 menit
8	Tl-208	583,14	86,00	3,1 menit
9	Ac-228	911,1	29,00	6,13 jam
10	K-40	1460,7	10,7	1,28.10 ⁹ tahun

Gambar 1 merupakan spektrum radionuklida alam dalam *bottom ash* PLTU Paiton Probolinggo. Pencacahan dilakukan selama 24 jam (86400 detik), tidak semua radionuklida alam memperlihatkan spektrumnya, misalnya Pb-210, Th-234, sedangkan U-238 dan Th-232 tidak mempunyai pemancar gamma, kedua radionuklida ini diidentifikasi melalui anak luruhnya.

Penentuan Secara Kuantitatif

Hasil pengukuran radioaktivitas yang terdapat dalam batubara unit I (BB-1), batubara unit II (BB-2), *bottom ash* unit I (BA-1), *bottom ash* unit II (BA-2), dan *fly ash* unit I (FA-1) unit II (FA-2), disajikan pada Tabel 2. Pada umumnya *TENORM* yang diperhatikan adalah radionuklida Pb-210, U-238, U-235, Th-232 dan K-40. Pada Tabel 2, terlihat radioaktivitas pada unit I untuk ketiga sampel

mempunyai konsentrasi aktivitas lebih besar dari pada unit II. Pembakaran batubara di pembangkit listrik mengarah ke redistribusi radionuklida alam berasal dari batubara, radionuklida ini berkonsentrasi dalam *bottom ash* (abu dasar) dan *fly ash* (abu layang). Konsentrasi aktivitas umpan batubara akan mempengaruhi hasil *bottom ash* dan *fly ash*, semakin besar konsentrasi aktivitas batubara sebagai umpan maka semakin besar konsentrasi *bottom ash* dan *fly ash*, yang dihasilkan.



Gambar 1. Spektrum radionuklida alam dalam *bottom ash* PLTU Paiton

Uranium alam (U-238) dan torium (Th-232) tidak memancarkan sinar gamma sehingga tidak dapat dilakukan pengukuran secara langsung. Untuk identifikasi radionuklida U-238, dan Th-232 melalui anak luruhnya dan pada energi tertentu. Pengukuran U-238 berdasarkan anak luruhnya yaitu rerata (Pb-214+Bi-214) pada energi masing-masing 295,2 keV (19,2%) dan 609,3 keV (46,09%) [8,10,11]. Dapat juga ditentukan melalui Th-234 pada energi 63,29 keV (3,8%), 92,35 keV (2,72%) dan 92,78 keV (2,695) pada umumnya dilakukan pada energi 63,26

keV, hal ini disebabkan pada energi 92,35 keV dan 92,78 keV sangat sulit memisahkan kedua energi yang sangat berdekatan [9]. U-238 dapat juga ditentukan melalui puncak energi 100,03 keV yang mempunyai probabilitas sangat kecil yaitu 0,837% dan umur paro pendek ($t_{1/2} = 1,17$ menit) dari radionuklida Pa-234m [9,10].

Pada penelitian ini dilakukan untuk menentukan U-238 melalui energi 63,29 keV. Konsentrasi aktivitas terukur untuk U-238 pada ketiga sampel, untuk *fly ash* merupakan yang terbesar yaitu unit I dan unit II berkisar 17,457-21,831 Bq/kg. Hasil konsentrasi aktivitas untuk U-238 keseluruhan disajikan pada Tabel 2.

Untuk radionuklida Th-232 pengukuran berdasarkan rerata konsentrasi aktivitas anak luruhnya dirata-rata (Pb-212+Ac-228) pada energi masing-masing 238,6 keV (53,10%) dan 911,1 keV (29,00%) [8,10-13]. Konsentrasi aktivitas terbesar terukur adalah sampel *fly ash* merupakan yang terbesar yaitu unit I dan unit II berkisar 29,416-33,605 Bq/kg.

Konsentrasi aktivitas U-235 ditentukan langsung pada energi puncak 143,8 keV yang mempunyai probabilitas 10,50 %, [9,15,16]. Pada energi 185,7 keV U-235 mempunyai probabilitas lebih besar yaitu 54,00 % akan tetapi terjadi 'interfering' atau saling mengganggu dengan energi puncak Ra-226 (186,2 keV). Pada energi 185,7 keV radionuklida U-235 dapat juga ditentukan akan tetapi harus dikoreksi dengan Ra-226 energi 186,2 keV [11,13]. Konsentrasi aktivitas untuk U-235 disajikan pada Tabel 2, dimana konsentrasi berkisar $0,04 \pm 0,004$ Bq/kg yang terdapat dalam batubara sampai dengan $0,51 \pm 0,04$ Bq/kg yang terdapat dalam *fly ash*.

Tabel 2. Hasil pengukuran radioaktivitas U-238, U-235, K-40 dan Th-232 dengan teknik spektrometri gamma

Nuklida	BB-1	BB-2	BA-1	BA-2	FA-1	FA-2
Pb-210	2,47±0,24	2,241±0,21	7,46±0,60	6,88±0,37	15,24±0,37	14,78±0,88
Th-232	5,04±0,72	3,571±0,48	19,36±1,48	15,83±1,61	33,61±1,35	29,42±2,42
U-238	3,77±0,39	3,433±0,41	14,51±1,23	12,35±0,11	26,83±1,04	23,46±2,58
U-235	0,05±0,005	0,04±0,004	0,28±0,01	0,22±0,02	0,51±0,04	0,43±0,009
K-40	14,18±1,58	11,87±1,42	47,96±4,89	47,12±3,31	133,73±8,6	108,6±2,86

Tabel 3 Perbandingan radionuklida Th-232, U-238 dan U-235 dalam batubara, *bottom ash* dan *fly ash*

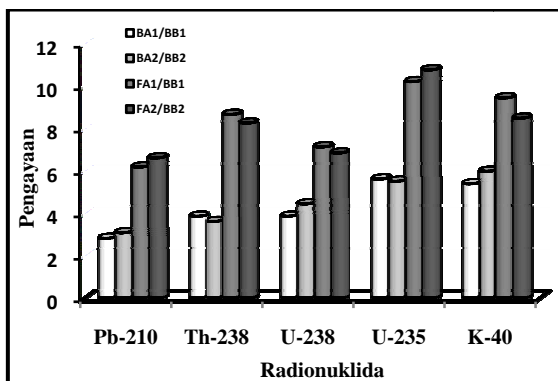
Nuklida	BB1/BB2	BA1/BA2	FA1/FA2	BA1/BB1	BA2/BB2	FA1/BB1	FA2/BB2
Pb-210	1,10	1,01	1,03	3,02	3,07	6,17	6,60
Th-238	1,41	1,22	1,14	3,85	3,60	8,63	8,24
U-238	1,09	1,17	1,01	3,85	4,43	7,12	6,83
U-235	1,23	1,27	1,18	5,60	5,50	10,20	10,75
K-40	1,18	1,01	1,23	5,38	5,97	9,43	8,47

Perbandingan Radioaktivitas.

Perbandingan radioaktivitas antara sampel unit I dan unit II (batubara I dengan batubara II, *bottom ash* I dengan *bottom ash* II dan *fly ash* I dengan *fly ash* II) dan antara *bottom ash* dengan batubara, dan *fly ash* disajikan pada Tabel 3. Batubara yang mengalami pembakaran menghasilkan *bottom ash* dan *fly ash*, telah terjadi pengayaan *TENORM*, pengayaan yang terjadi setiap individu radionuklida berbeda-beda.

Secara umum pengayaan *TENORM* batubara menjadi hasil pembakaran *bottom ash* berkisar 3,02 kali (Pb-210) sampai dengan nilai pengayaan 7,89 kalinya adalah radionuklida U-235. Untuk pengayaan konsentrasi aktivitas dari batubara menghasilkan hasil pembakaran *fly ash* dari 6,16 kali (Pb-210) sampai dengan nilai pengayaan 10,75 kalinya yaitu radionuklida U-235. Pengayaan *TENORM* ini dapat juga dilihat pada Gambar 2 yang merupakan perbandingan histogram antara batubara-*bottom ash* dan batubara-*fly ash*.

Gambar 2 yang merupakan pengayaan batubara dan hasil pembakaran yaitu *bottom ash*-batubara dan *fly ash*-batubara, terlihat jelas perbandingan histogram pengayaan antar radionuklida. Radionuklida Pb-210 terlihat jelas paling rendah, baik pengayaan *bottom ash*-batubara maupun *fly ash*-batubara, sedangkan radionuklida U-235 merupakan pengayaan yang tertinggi.



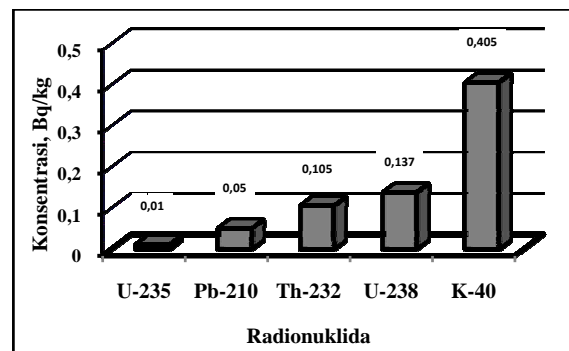
Gambar 2 Pengayaan radioaktivitas dari *bottom ash*-batubara dan *fly ash*-batubara

Batas deteksi

Limit deteksi merupakan salah satu parameter dalam validasi yang menunjukkan sensitivitas metoda sehingga sangat penting untuk dilakukan untuk pengukuran radionuklida. Batas deteksi terendah adalah estimasi dari aktivitas minimum atau konsentrasi yang dapat diukur dengan tingkat kepercayaan spesifik. Jenis batas deteksi yang digunakan di laboratorum dihitung berdasarkan persamaan (3). Batas terkecil deteksi suatu unsur radioaktif yang dicacah dengan alat spektrometer

gamma sangat diperlukan, untuk mengetahui kemampuan alat tersebut yang berhubungan dengan sensitivitas.

Batas deteksi terendah (*lower limit of detection* LLD) untuk radionuklida mempunyai nilai yang berbeda-beda yang diperlihatkan pada Gambar 2, yaitu merupakan perbandingan histogram limit deteksi *TENORM* (U-235, Pb-210, Th-232, U-235 dan K-40), nilai hitung menggunakan persamaan (3). Pada Gambar 3 aktivitas deteksi minimum yang terkecil adalah 0,01 Bq/kg merupakan radionuklida U-235 sedangkan yang terbesar merupakan radionuklida dengan nilai ADM adalah 0,405 Bq/kg yaitu radionuklida K-40.



Gambar 3 Batas deteksi terendah *TENORM* (U-235, Pb-210, Th-232, U-235 dan K-40)

KESIMPULAN

Radioaktivitas yang terdapat dalam batubara pada kedua unit berkisar 0,04 Bq/kg (U-235) sampai dengan 14,18 Bq/kg (K-40), radioaktivitas pada *bottom ash* berkisar 0,22 Bq/kg (U-235) sampai dengan 47,12 Bq/kg (K-40) dan radioaktivitas yang terdapat pada *fly ash* berkisar 0,43 (U-235) Bq/kg sampai dengan 133,73 Bq/kg (K-40). Pengayaan konsentrasi aktivitas batubara hasil pembakaran yang terkecil terjadi pada *bottom ash* berkisar 3 kali (Pb-210) sampai dengan nilai 5 kalinya adalah radionuklida K-40. Untuk pengayaan konsentrasi aktivitas dari batubara menghasilkan hasil pembakaran *fly ash* dari 6 kali (Pb-210) sampai dengan mendekati nilai 11 kalinya yaitu radionuklida U-235. Aktivitas deteksi minimum (ADM) untuk radionuklida mempunyai nilai yang berbeda-beda, aktivitas deteksi minimum yang terkecil adalah 0,011 Bq/kg merupakan radionuklida U-235, sedangkan yang terbesar merupakan radionuklida K-40 dengan nilai ADM adalah 0,405 Bq/kg.

DAFTAR PUSTAKA

- Pandit G.G, Sahu S.K, Puranik V.D., (2011), Natural radionuclides from coal fired thermal power plants estimation of atmospheric release

- and inhalation risk. *Radioprotection, EDP Sciences*, 46: 173-179.
2. Bayuseno A.P, Sulisty, Istadi, (2008), *Pengaruh Sifat Fisik dan Struktur Mineral Batubara Lokal Terhadap Sifat Pembakaran*, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, Semarang.
 3. Heidrich C., Brown S., Colliera D., (2011), *Natural occurring radionuclides in Australian coal combustion Products (CCPs)*, World of coal Ash (WOCA) Conference. In Denver. USA.
 4. Muhayatun, Lestiani D.W., Hidayat A., Kumalasari L., (2009), *Konsentrasi PM-2,5 dan PM-10 Udara Ambien di Bandung dan Lembang Tahun 2000-2006*, PTNBR BATAN Bandung., 363-367
 5. Anonim, (2001), *Keputusan Negara Lingkungan Hidup Nomor 17 Tahun 2001*, Jakarta.
 6. Elegba S.B, Funtua I. I., "Naturally Occurring Radioactive Material Assessment of Oil and Gas Production Installations in Nigeria", (2005), Naturally Occurring Radioactive Material (NORM-IV) Proceedings of an international conference. IAEA-TECDOC-1472. Szczyrk, Poland. IAEA 256-258
 7. Al-Sulaiti H.A., Regan P.H., Bradley D.A., Matthews M., (2008), *Preliminary determination of natural Radioactivity Level of the State of Qatar using High resolution gamma ray spectrometry*, Radiation Physics & Protection Conference IX, Nasr City-Cairo, 213-223.
 8. IAEA, (1989), *Measurement of Radionuclides in Food and the Environment. A Guide Book*, Technical Report Series No 295. Vienna.
 9. Erdtmann G., Soyka W., (1989), *The Gamma rays of the Radionuclides*, New York.
 10. Romala R.C., Chobey V.M., Prasad G., Kies A., (2011), *Radionuclide Analysis in the Soil of Kumaum Himalaya, India Using Gamma Ray Spectrometry*, Research Communications. Current Science, India, vol 100, 6: 906-914.
 11. Flues M., Camargo M.C., Silva P.S., Mazzilli B.P., (2006), Radioactivity of Coal and Ashes Figueira Coal Power Plant in Brazil, *Jurnal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 270: 597-602.
 12. Reguigui N., Kucera J., Ben Kraiem, (2002), *Radioactivity Concentration measurements of U-238, Th-232, K-40 and Cs-137 in Environmental Samples and Technologically Enhanced products in Tunisia using NAA and gamma ray spectrometry*, Proceeding of International Symposium on Environmental Pollution Control and Waste Management, Tiunis : 136-141.
 13. Alaameer A.S., (2008), Assessment of Human Exposures to Natural Sources of Radiation in Soil of Riyadh Saudi Arabia, *Turkish J. Eng. Env. Sci. Riyadh*, 229-234
 14. Hasan N.M., Ishkawa T., Hosada M., Sorimachi A., (2010), Assessment of the Natural Radioactive Using Two Techniques for the Measurement of Radionuclide Concentration in Building Materials Used in Japan, *J. Radional Nucl Chem. Akademiai Kiado, Budapest, Hungary*, 15-21
 15. Moatar F, Shadizadeh S.R., Karbassi A.R., (2010), Determination of Naturally occurring Radioactive Materials (NORM) in Formation Water During Oil Exploration. *J.Radional Nucl Chem*, 283:3-7
 16. Perterson J., Macdonell M., Haroun L., Monette F., (2007), *Radiological and Chemical Fact Sheets to Support Risk Analyses Contaminated Areas*, Argonne National Laboratory Environmental Science Division, U.S. Department of Energy.

TANYA JAWAB

Isman Mulyadi Triatmoko

- Hasil uji komparasi detector yang saudara gunakan mempunyai error/selisih = 37 % disbanding dengan standar untuk energy di sekitar Cs¹³⁷. Bagaimana cara saudara untuk mengukur aktivitas dengan adanya error sebesar itu?
- Saran : dilakukan perhitungan ulang.

Sukirno

- *Pertanyaan ini tidak ada hubungan dengan judul makalah dan tujuan penelitian ini. Pada penentuan kuantitatif radionuklida digunakan standar sama dengan sampel guna mengurangi error yang terjadi, makalah ini ditekankan pada pengayaan radionuklida alam dalam fly ash dan bottom ash baik dalam pembuatan maupun kesimpulan.*