

Analisis Kandungan Radionuklida Alam Pada *Fly Ash*, *Bottom Ash*, dan Tanah dari PLTU di Industri Gula dengan Menggunakan Spektrometer Gamma

Puspa Tirta Caredek¹, Muji Wiyono², Wahyudi², Kusdiana³, Sri Oktamuliani^{1*}

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Andalas, Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163

²Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi dan Mutu Nuklir
Organisasi Riset Tenaga Nuklir – Badan Riset dan Inovasi Nasional

Jl. Puspitek, Muncul, Kec. Setu, Kota Tangerang Selatan, Banten, 15314

³Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains dan Teknologi
(PDLFRKST) – Deputi Bidang Infrastruktur dan Inovasi (DIRI) –

Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) Jl. Lebak Bulus Raya No. 49 Jakarta Selatan, 12440

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 8 Januari 2023
Direvisi: 24 Februari 2023
Diterima: 26 Maret 2023

Kata kunci:

Aktivitas spesifik
Bottom ash
Fly ash
PLTU
Spektrometer gamma
Tanah

Keywords:

Specific activity
Bottom ash
Fly ash
CFPP
Gamma-ray spectrometry
Soil

Penulis Korespondensi:

Sri Oktamuliani
Email:
srioktamuliani@sci.unand.ac.id

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan aktivitas spesifik ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K yang terdapat pada sampel *fly ash*, *bottom ash*, dan tanah di sekitar PLTU pada industri gula. Masing – masing tiga sampel *fly ash* dan *bottom ash* diambil dari silo, dan Sembilan sampel tanah diambil pada radius (0-4) km dari PLTU. Pencacahan sampel dilakukan menggunakan spektrometer gamma dengan detektor HPGe. Sampel dicacah selama 17 jam, dan diolah menggunakan *software* Maestro. Hasil penelitian menunjukkan bahwa aktivitas spesifik ^{226}Ra dan ^{40}K pada *fly ash* dan *bottom ash* berada di bawah nilai rata-rata dunia, kecuali ^{232}Th pada *fly ash* dengan nilai rata-rata $88,45 \pm 2,48$ Bq/kg di atas nilai yang dilaporkan UNSCEAR. Pengukuran aktivitas spesifik ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K pada tanah di sekitar industri gula menunjukkan konsentrasi tertinggi pada tanah yang berada semakin dekat dengan cerobong PLTU. Kesimpulan dari penelitian ini adalah aktifitas spesifik ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K pada sampel *fly ash*, *bottom ash*, dan tanah di sekitar industri gula tidak menunjukkan peningkatan yang signifikan.

This study purposed to determine the specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in samples of fly ash, bottom ash, and soil around Coal-Fired Power Plants (CFPP) at sugar industry. The three samples of fly ash and bottom ash were taken from the Shilo, and nine soil samples were taken at a radius of (0-4) km from the CFPP. Samples counting using gamma-ray spectrometry with an HPGe detector was carried out. Samples were measured for 17 hours and processed using Maestro software. As a result, the specific activity of ^{226}Ra and ^{40}K in fly ash and bottom ash is still below the average value, except for ^{232}Th in fly ash with an average value of 88.45 ± 2.48 Bq/kg above the reported value. Specific activity measurements of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in the soil around sugar industry showed the highest concentrations on the closest earth from the CFPP chimney. This study concludes that the specific activity of ^{226}Ra , ^{232}Th , and ^{40}K in fly ash, bottom ash, and soil samples around sugar industry did not significantly increase.

Copyright © 2023 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Abu batubara merupakan limbah padat yang berasal dari pembakaran batubara berbentuk partikel halus menyerupai debu atau pasir halus, meliputi abu terbang (*fly ash*) yang ikut terbawa gas buang melalui cerobong asap dan abu dasar (*bottom ash*) yang tertinggal di dasar tungku pembakaran. Abu batubara yang diemisikan melalui cerobong asap pada pembangkit listrik mengandung unsur radioaktif alam dalam jumlah yang cukup besar dan menyebar ke udara (El-Mekawy dkk., 2015). Pelepasan limbah pembakaran batubara yang terdistribusi ke lingkungan tersuspensi melalui radiasi eksternal, inhalasi udara, dan ingesti terhadap konsumsi bahan makanan.

Batubara memiliki unsur-unsur radionuklida yang berasal dari sumber radiasi alam. Menurut penelitian Varinlioglu dkk. (2000), unsur-unsur radionuklida yang terdapat pada batubara ialah ^{235}U , ^{238}U , ^{228}Th , ^{232}Th , ^{226}Ra , ^{40}K dan ^{137}Cs . Lalu dari penelitian Putri dkk. (2019) telah mengidentifikasi radionuklida alam yang terkandung di dalam *fly ash* dan *bottom ash* di PLTU Teluk Sirih ialah ^{210}Pb , ^{230}Th , ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{228}Th , ^{238}U , ^{40}K . Dari beberapa radionuklida alam tersebut bersifat radioaktif yang memancarkan radiasi gamma dan memiliki waktu paruh yang sangat lama yaitu ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K . *United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation* (UNSCEAR) telah merekomendasikan aktivitas spesifik rata-rata dunia dalam abu batubara yaitu sebesar 240 Bq/kg untuk ^{226}Ra , 70 Bq/kg untuk ^{232}Th , dan 265 Bq/kg untuk ^{40}K (UNSCEAR, 1988).

Hasani dkk., (2014) melakukan penelitian dengan mengukur batubara dan abu hasil pembakaran batubara dari PLTU di Kosovo. Aktivitas spesifik radionuklida diukur dengan spektrometer gamma dan detektor *High Pure Germanium* (HPGe). Hasilnya diperoleh aktivitas spesifik rata-rata pada batubara ialah 9 ± 1 untuk ^{226}Ra , 9 ± 3 untuk ^{232}Th , dan 36 ± 8 untuk ^{40}K , pada *fly ash* ialah 30 ± 3 untuk ^{226}Ra , 30 ± 3 untuk ^{232}Th , 133 ± 16 untuk ^{40}K , dan pada *bottom ash* ialah 28 ± 3 untuk ^{226}Ra , 34 ± 2 untuk ^{232}Th , 195 ± 13 untuk ^{40}K . Hal ini membuktikan jika aktivitas spesifik pada abu batubara akan meningkat dari aktivitas batubara sebelum dibakar. Dikutip dari *United States Geological Survey* (1997), peningkatan aktivitas radionuklida alam pada limbah pembakaran batubara di United States bahkan hingga 10 kali lipat lebih tinggi dari aktivitas batubara semula.

Penelitian terkait aktivitas radionuklida pada PLTU juga dilakukan oleh Liu dkk. (2015) di kota Shenzhen dengan sampel tanah yang berjarak <1 km, 1–3 km, dan 3–4 km dari PLTU Mawan. Studi ini membuktikan bahwa tingkat radionuklida alam di China Selatan sangat tinggi, tepatnya kota Shenzhen yaitu 204 Bq/kg ^{226}Ra , 265 Bq/kg untuk ^{232}Th , dan 1269 Bq/kg untuk ^{40}K . Angka yang diperoleh dari penelitian ini jauh melebihi dari aktivitas spesifik yang telah direkomendasikan oleh UNSCEAR (2000) yaitu 35 Bq/kg untuk ^{226}Ra , 30 Bq/kg untuk ^{232}Th , dan 400 Bq/kg untuk ^{40}K , sekaligus menjadi bukti bahwa aktivitas PLTU Mawan telah meningkatkan dosis radioaktif yang diterima lingkungan sekitarnya.

Industri gula yang dijadikan studi kasus pada penelitian ini terletak di Provinsi Lampung dan telah mengoperasikan PLTU sebagai sumber energi untuk menggerakkan mesin-mesin produksi sejak tahun 2008. Daya listrik yang dihasilkan memiliki kapasitas 156 kW dengan membakar 350 ton/hari batubara dan memiliki tinggi cerobong 35 m. Lokasinya sangat dekat dengan pemukiman warga, bahkan pola arah angin dominan cenderung mengarah ke bagian timur hingga barat daya di mana wilayah tersebut merupakan wilayah padat penduduk yang tinggal berdampingan dengan pabrik. Semakin besar kecepatan dan arah angin pada suatu wilayah maka pola penyebaran polutan berupa *fly ash* akan semakin menyempit dan meningkatkan konsentrasi polutan pada pusat sebaran wilayah tersebut (Hasibuan, Warsito dan Suciwati, 2015). Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai aktivitas spesifik ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K yang terdapat dalam sampel abu batubara dan tanah di sekitar PLTU pada industri gula menggunakan spektrometer gamma dengan detektor HPGe.

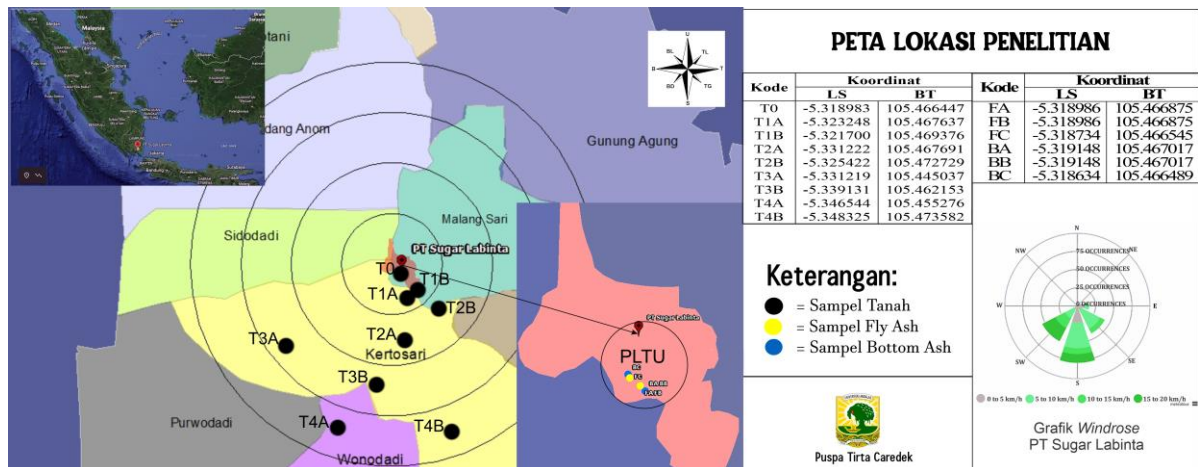
II. METODE

2.1 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan antara lain *pulverizer* tipe TSL-3/100A, ayakan 70 mesh, oven, nampan *stainless steel*, *beaker* marinelli 500 ml, lem araldite, timbangan digital akurasi 0,1 gram, dan seperangkat spektrometer gamma dengan detektor HPGe. Bahan yang digunakan pada penelitian ini ialah *fly ash*, *bottom ash*, tanah di sekitar industri gula, dan sumber standar gamma.

2.2 Pengambilan Sampel

Sampel *fly ash* dan *bottom ash* diambil di tempat penyimpanan abu batubara (silo), sedangkan tanah diambil pada radius (0-4) km dari pusat PLTU menuju wilayah pemukiman warga serta mengikuti arah angin dominan. Jika dilihat dari grafik *windrose* melalui aplikasi *meteoblue weather & maps* pola arah angin dominan cenderung mengarah ke bagian timur hingga barat daya dimana wilayah tersebut merupakan wilayah padat penduduk yang tinggal berdampingan dengan pabrik. Sampel diambil pada permukaan tanah dengan kedalaman ±(0-5) cm. Kode dan lokasi *sampling* ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Peta lokasi penelitian

2.3 Preparasi Sampel

Sampel yang telah diambil selanjutnya dihaluskan dengan menggunakan *pulverizer*. Kemudian disaring menggunakan ayakan sampai diperoleh sampel sebanyak ±1500 gram. Langkah berikutnya yaitu memanaskan sampel yang telah diletakkan pada nampan *stainless steel* dengan suhu 105° C selama 24 jam untuk menghilangkan kadar air dari sampel. Lalu sampel dimasukkan ke dalam *beaker* Marinelli dan diberi label. Kemudian massanya ditimbang menggunakan timbangan lalu *beaker* Marinelli ditutup rapat. Lem Araldite digunakan untuk membantu beaker Marinelli tertutup lebih rapat dan kedap udara. Sampel tersebut didiamkan selama ±30 hari supaya terjadi kesetimbangan dengan menyetarakan induk dan anak luruhnya dari radionuklida.

2.4 Kalibrasi Spektrometer Gamma

Kalibrasi spektrometer gamma terdiri dari kalibrasi energi dan efisiensi. Kalibrasi energi pada spektrometer gamma dilakukan untuk menentukan hubungan energi dengan nomor saluran yang dilakukan dengan cara mencacah sumber standar dengan puncak gamma yang tersebar secara merata dari energi rendah hingga energi tinggi (pada jangkauan energi tertentu) (Susetyo, 1988). Kalibrasi efisiensi dilakukan untuk mengetahui kemampuan detektor dalam menangkap energi radionuklida pemancar gamma yang terdapat pada suatu sampel. Penentuan efisiensi setiap energi yang teramati digunakan Persamaan 1 (BATAN, 2013):

$$\varepsilon_{\gamma} = \frac{\left(\frac{N_s}{t_s} - \frac{N_{bg}}{t_{bg}} \right)}{A_s \times p_{\gamma}} \quad (1)$$

dengan N_s adalah cacah standar (cacah), N_{bg} adalah cacah *background* (cacah), t_s adalah waktu cacah sumber standar (s), t_{bg} adalah waktu cacah *background* (s), A_s adalah aktivitas sumber standar pada saat pencacahan (Bq), p_{γ} adalah kelimpahan (*yield*) energi gamma (%).

Untuk menentukan besarnya aktivitas spesifik minimum yang dapat dideteksi atau *Minimum Detectable Concentration* (MDC) oleh spektrometer gamma dengan tingkat kepercayaan 95% ditentukan dengan Persamaan 2 (BATAN, 2013):

$$MDC = 4,66 \times \frac{\sqrt{\frac{N_{bg}}{t_{bg}^2}}}{\varepsilon_{\gamma} \times p_{\gamma} \times W} \quad (2)$$

dengan N_{bg} adalah laju cacah *background* (cps) dan W adalah massa sampel (kg).

2.5 Pencacahan Background

Pencacahan *background* dilakukan dengan cara mengukur beaker Marinelli kosong selama 17 jam menggunakan spektrometer gamma dengan detektor HPGe. Hal ini bertujuan untuk mengetahui nilai awal sebelum mengukur sampel dan sebagai perbandingan dengan peluruhan sumber standar.

2.6 Pencacahan Sampel

Sampel *fly ash*, *bottom ash*, dan tanah dicacah dengan spektrometer gamma selama 17 jam. Hasilnya, diperoleh cacahan spektrum energi gamma yang terlihat pada komputer dan selanjutnya diidentifikasi radionuklida dari spektrum yang ada.

2.7 Pengolahan Data

Setelah teridentifikasi radionuklida dari spektrum pengujian sampel, selanjutnya melakukan pengolahan data untuk menentukan aktivitas ^{226}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K yang terkandung dalam sampel dengan menggunakan Persamaan 3 (BATAN, 2013):

$$A_{avg} = \frac{N_{sp} - N_{bg}}{\varepsilon_{\gamma} \times p_{\gamma} \times W_{sp}}$$

$$U_T = A_{avg} \times \sqrt{\left(\frac{u_N}{N_{sp}}\right)^2 + \left(\frac{u_{\varepsilon}}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{u_p}{p}\right)^2 + \left(\frac{u_W}{W_{sp}}\right)^2}$$

$$A = A_{avg} \pm U_T \quad (3)$$

dengan A adalah aktivitas zat radioaktif dalam sampel (Bq/kg), A_{avg} adalah aktivitas rata-rata (Bq/kg), U_T adalah ketidakpastian pengukuran (Bq/kg), N_{sp} adalah laju cacah sampel (cps), u_N adalah ketidakpastian pencacahan sampel (%), u_{ε} adalah ketidakpastian efisiensi pada energi gamma teramati (%), u_p adalah ketidakpastian *yield* (%), dan u_W adalah ketidakpastian massa sampel (%).

III. HASIL DAN DISKUSI

3.1 Aktivitas Spesifik Pada *Fly Ash* dan *Bottom Ash*

Hasil pengukuran aktivitas spesifik pada sampel abu batubara dibandingkan dengan nilai rata-rata dunia yang direkomendasikan oleh UNSCEAR (1988) dapat dilihat pada Tabel 2 dan grafiknya diperlihatkan pada Gambar 2.

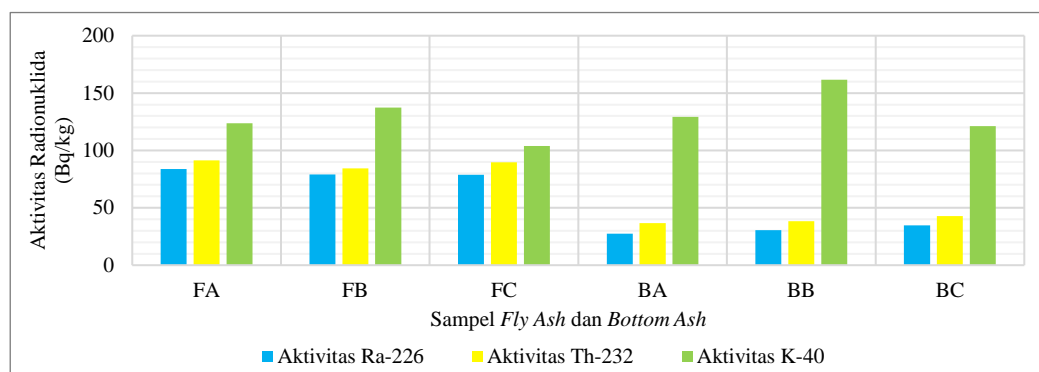
Tabel 2 Aktivitas spesifik radionuklida alam pada *fly ash* dan *bottom ash*

Kode Sampel	Aktivitas Spesifik (Bq/kg)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
FA	83,88 ± 2,31	91,25 ± 2,54	123,62 ± 3,84
FB	79,06 ± 2,28	84,36 ± 2,43	137,30 ± 4,41
FC	78,79 ± 2,19	89,74 ± 2,48	103,89 ± 3,53
BA	27,35 ± 1,12	36,68 ± 1,31	129,21 ± 3,87
BB	30,43 ± 1,02	38,26 ± 1,30	161,61 ± 4,32
BC	34,60 ± 1,30	42,93 ± 1,50	121,05 ± 3,88
Rata-rata <i>fly ash</i>	80,58 ± 2,26	88,45 ± 2,48	121,60 ± 3,93
Rata-rata <i>bottom ash</i>	30,79 ± 1,15	39,29 ± 1,37	137,29 ± 4,02
UNSCEAR (1988)	240	70	265

Dari Tabel 2, diketahui bahwa aktivitas spesifik tertinggi untuk ^{226}Ra dan ^{232}Th terdapat pada sampel *fly ash* dengan kode FA yaitu 83,88 ± 2,31 Bq/kg dan 91,25 ± 2,54 Bq/kg, untuk ^{40}K tertinggi terdapat pada sampel *bottom ash* dengan kode BB yaitu 161,61 ± 4,32 Bq/kg. Aktivitas spesifik rata-

rata pada *fly ash* yaitu sebesar $80,58 \pm 2,26$ Bq/kg untuk ^{226}Ra , $88,45 \pm 2,48$ Bq/kg untuk ^{232}Th , dan $121,60 \pm 3,93$ Bq/kg untuk ^{40}K .

Hasil pengukuran sampel *fly ash* dengan aktivitas spesifik rata-rata ^{232}Th yang diperoleh 26,36% lebih tinggi dari laporan (UNSCEAR, 1988). Aktivitas spesifik ^{232}Th yang tinggi pada *fly ash* disebabkan karena batubara yang digunakan oleh industri gula tersebut berasal dari Sumatera Selatan, sesuai dengan hasil penelitian Akhyariansyah (2017) diperoleh informasi bahwa kandungan radionuklida pada *fly ash* Sumatera Selatan lebih tinggi dikarenakan komposisi batubara di Sumatera Selatan banyak mengandung zat anorganik dibandingkan zat organik. Zat organik pada batubara meliputi lignit, selulosa, dan humus, dan zat anorganik terdiri dari besi, silika, aluminium, magnesium, dll. Menurut Mandal dan Sengupta (2003) uranium dan anak luruhnya berada di fase organik sedangkan thorium berada di fase anorganik pembentukan batubara sehingga saat batubara dibakar maka senyawa anorganik tersebut diubah menjadi senyawa oksida dalam bentuk abu. Radionuklida yang terikat dengan komponen anorganik batubara umumnya tidak mudah lenyap karena proses penguapan saat pembakaran dan cenderung bertahan pada abu batubara. Namun sebaliknya, radionuklida yang terikat dengan komponen organik akan mudah lenyap (Habib dkk., 2019).



Gambar 2 Aktivitas spesifik pada *fly ash* dan *bottom ash*

Aktivitas spesifik yang terkandung di dalam *bottom ash* menunjukkan angka yang lebih rendah jika dibandingkan dengan *fly ash* yaitu sebesar $30,79 \pm 1,15$ Bq/kg untuk ^{226}Ra , $39,29 \pm 1,37$ Bq/kg untuk ^{232}Th , dan $137,29 \pm 4,02$ Bq/kg untuk ^{40}K . Hal ini dikarenakan semakin kecil ukuran suatu partikel maka aktivitas spesifik zat radioaktif akan lebih tinggi dibandingkan partikel berukuran besar (Sanjuán dkk., 2020). Umumnya *fly ash* berukuran $(0,5 - 300)$ μm sedangkan *bottom ash* berukuran lebih besar sekitar 2 mm dan lebih berat dari *fly ash*.

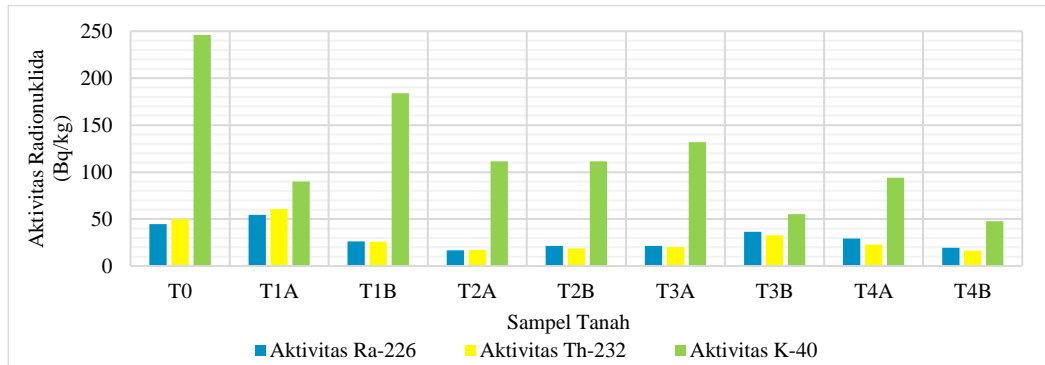
3.2 Aktivitas Spesifik Pada Tanah

Aktivitas spesifik ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K dari 9 sampel tanah di sekitar industri gula yang diperoleh pada penelitian ini dibandingkan dengan nilai aktivitas spesifik rata-rata dunia yang direkomendasikan oleh UNSCEAR (2000) dapat dilihat pada Tabel 3 dan grafiknya diperlihatkan pada Gambar 3.

Tabel 3 Aktivitas spesifik radionuklida alam pada tanah

Kode Sampel	Aktivitas Spesifik (Bq/kg)		
	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K
T0	$44,77 \pm 1,35$	$50,12 \pm 1,54$	$245,99 \pm 6,04$
T1A	$54,47 \pm 1,57$	$60,59 \pm 1,75$	$89,90 \pm 2,91$
T1B	$26,09 \pm 1,08$	$25,90 \pm 1,12$	$184,04 \pm 5,16$
T2A	$16,52 \pm 0,65$	$16,88 \pm 0,75$	$111,51 \pm 3,18$
T2B	$21,49 \pm 0,94$	$18,57 \pm 0,93$	$111,42 \pm 3,55$
T3A	$21,37 \pm 0,77$	$20,12 \pm 0,85$	$131,76 \pm 3,59$
T3B	$36,35 \pm 1,35$	$32,76 \pm 1,26$	$55,03 \pm 2,40$
T4A	$29,29 \pm 0,95$	$22,85 \pm 0,91$	$94,09 \pm 2,79$
T4B	$19,55 \pm 0,87$	$16,38 \pm 0,86$	$47,68 \pm 2,15$
Rata-rata tanah	$29,99 \pm 1,06$	$29,35 \pm 1,11$	$119,05 \pm 3,53$
UNSCEAR (2000)	32	45	420

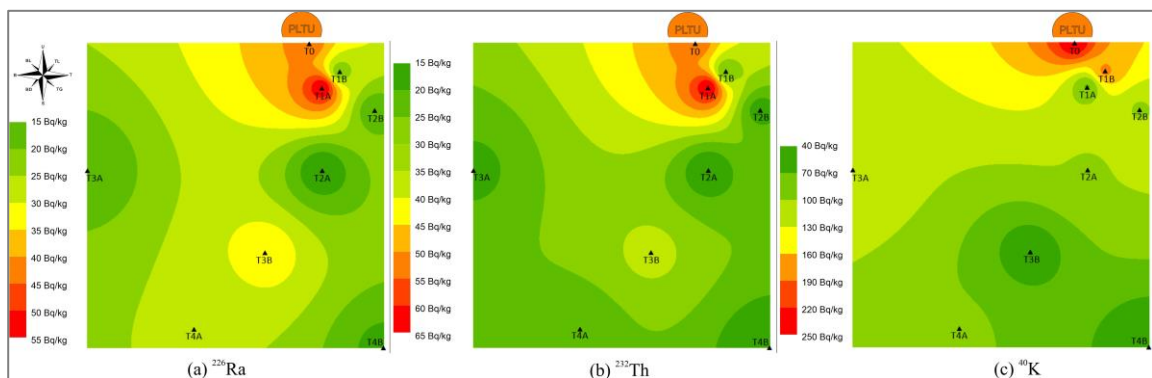
Dari Tabel 3 menunjukkan bahwa aktivitas spesifik ^{226}Ra , ^{232}Th , dan ^{40}K pada sampel tanah memiliki nilai yang relatif sama dan berada di bawah standar aktivitas spesifik tanah yang telah direkomendasikan. Namun, beberapa lokasi memiliki aktivitas spesifik ^{226}Ra dan ^{232}Th melebihi nilai yang direkomendasikan terdapat pada sampel tanah pada radius 0 km dan 1 km dari PLTU. Berbeda halnya dengan aktivitas spesifik ^{40}K pada semua sampel masih berada di bawah laporan (UNSCEAR, 2000).



Gambar 3 Aktivitas spesifik pada tanah

Aktivitas spesifik *fly ash* dan *bottom ash* batubara relatif lebih tinggi dibandingkan tanah. Sampel tanah (T0) diambil di area boiler yang berdekatan dengan lokasi penyimpanan dan operasi batubara seperti proses penghalusan batubara (*grinding*), pembersihan batubara yang tumpah dari pulverizer (*scraper*), dan proses pemisahan abu batubara (*classifier*). *Fly ash* dan *bottom ash* batubara yang jatuh ke tanah menjadi kontaminasi untuk tanah. Selain itu berdekatan juga dengan silo *fly ash* dan *bottom ash* yang dapat mengakibatkan abu batubara dari silo ikut terbawa angin dan menjadi polutan. Akibatnya aktivitas spesifik pada tanah di lokasi tersebut akan meningkat. Semakin banyak abu terbang yang jatuh pada jarak tertentu serta diikuti dengan kecenderungan arah angin pada suatu daerah mengakibatkan adanya peningkatan sebaran radionuklida di tanah pada daerah tersebut.

Aktivitas pembakaran batubara sebagai sumber energi untuk menggerakkan motorik mesin-mesin produksi memberikan pengaruh untuk lingkungan sekitarnya. Khususnya wilayah selatan yang menjadi daerah dengan arah angin dominan di lingkungan industri gula. Gambar 4 yang menunjukkan bahwa aktivitas spesifik ^{226}Ra dan ^{232}Th pada sampel tanah dengan kode T1A yang berada dalam radius 1 km dari pusat PLTU lebih tinggi dibandingkan dengan sampel tanah lainnya.



Gambar 4 Sebaran aktivitas spesifik pada tanah (a) ^{226}Ra (b) ^{232}Th (c) ^{40}K di sekitar industri gula

IV. KESIMPULAN

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa hasil pengukuran aktivitas spesifik ^{226}Ra dan ^{232}Th tertinggi pada sampel *fly ash* yaitu pada kode FA dengan nilai masing-masing $83,88 \pm 2,31$ Bq/kg dan $91,25 \pm 2,54$ Bq/kg dan konsentrasi ^{40}K tertinggi terdapat pada kode FB dengan nilai $137,30 \pm 4,41$ Bq/kg. Namun dari ketiga radionuklida tersebut, konsentrasi ^{232}Th melebihi nilai konsentrasi *fly ash* yang telah direkomendasikan oleh UNSCEAR (1988). Untuk aktivitas spesifik pada sampel *bottom ash* lebih rendah jika dibandingkan dengan *fly ash* dan hasilnya masih berada di bawah rekomendasi UNSCEAR (1988). Pada sampel tanah menunjukkan aktivitas spesifik ^{226}Ra , ^{232}Th , dan

^{40}K tertinggi terdapat pada tanah yang berada semakin dekat dengan cerobong PLTU yaitu T0 dengan nilai $44,77 \pm 1,35$ Bq/kg, $50,12 \pm 1,54$ Bq/kg, dan $245,99 \pm 6,04$ Bq/kg dan T1A dengan nilai $54,47 \pm 1,57$ Bq/kg, $60,59 \pm 1,75$ Bq/kg, dan $89,90 \pm 2,91$ Bq/kg. Aktivitas spesifik rata-rata pada sampel tanah masih berada di bawah nilai yang laporan UNSCEAR (2000).

daftar pustaka

- Akhyariansyah, D. (2017), "Penentuan Radioaktivitas Pada Abu Terbang Batubara dengan Spektrometer Gamma Detektor HPGe", *Skripsi*, FMIPA, Universitas Sumatera Utara, Medan.
- BATAN. (2013), "Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan Bagian 2: Analisis Radionuklida Pemancar Gamma", SB.
- European Commission. (1999), "Radiation Protection 112: Radiological Protection Principles Concerning the Natural Radioactivity of Building Materials", European Commission Publication.
- El-Mekawy, A.F. Badran, H.M. Seddeek, M.K. Sharshar, T. dan Elnimr, T. (2015), "Assessment of Elemental and NORM/TENORM Hazard Potential from Non-Nuclear Industries in North Sinai, Egypt", *Springer*, Environmental Monitoring and Assessment, Vol.187, No.9.
- Habib, M.A. Basuki, T. Miyashita, S. Bekelesi, W. Nakashima, S. Techato, K. Khan, R. Majlis, A.B.K. dan Phoungthong, K. (2019), "Assessment of Natural Radioactivity in Coals and Coal Combustion Residues from A Coal-Based Thermoelectric Plant in Bangladesh: Implications for Radiological Health Hazards", *Springer*, Environmental Monitoring and Assessment, Vol.191, No.2.
- Hasani, F. Shala, F. Xhixha, G. Xhixha, M.K. Hodolli, G. Kadiri, S. Bylyku, E. dan Cfarku, F. (2014), "Naturally Occurring Radioactive Materials (NORMs) Generated from Lignite-Fired Power Plants in Kosovo", *Elsevier*, Journal of Environmental Radioactivity, Vol.138, hal.156–161.
- Hasibuan, F. Warsito. dan Suciwati, S. W. (2015), "Simulasi Model Dispersi Polutan Gas Dan Partikulat Molekul Pada Pabrik Semen Dengan Menggunakan Software Matlab 7.12", *Universitas Lampung*, Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika, Vol.03, No.02.
- Liu, G. Luo, Q. Ding, M. dan Feng, J. (2015), "Natural Radionuclides in Soil Near a Coal-Fired Power Plant in The High Background Radiation Area, South China", *Springer*, Environmental Monitoring and Assessment, Vol. 187, No. 356.
- Mandal, A. dan Sengupta, D. (2003), "Radioelemental Study of Kolaghat, Thermal Power Plant, West Bengal, India: Possible Environmental Hazards", *Springer-Verlag*, Environmental Geology, Vol.44, No.2, hal.180–186.
- Putri, R. D. Taufiq, I. dan Norokhim. (2019), "Analisis Radionuklida Pada Fly Ash Dan Bottom Ash PLTU Teluk Sirih Menggunakan Spektrometer Gamma", *Jur. Fisika Unand*, Jurnal Fisika Unand, Vol.8, No.4, hal.387–393.
- Sanjuán, M. Á. Suárez-Navarro, J. A. Argiz, C. dan Mora, P. (2020), "Assessment of Natural Radioactivity and Radiation Hazards Owing to Coal Fly Ash and Natural Pozzolan Portland Cements", *Springer*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.325, No.2, hal.381–390.
- Susetyo, W. (1988), "Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan Neutron", UGM-Press, Yogyakarta.
- United States Geological Survey. (1997), "Radioactive Elements in Coal and Fly Ash: Abundance, Forms, and Environmental Significance", U.S, Department of the Interior.
- UNSCEAR. (1988), "Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation 1988 Report to the General Assembly, with annexes", United Nations, New York.
- UNSCEAR. (2000), "Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly with Scientific Annexes", Vol. 1, United Nations, New York.
- Varinlioglu, A. Akyuz, T. dan Kose, A. (2000), "Natural and Artificial Radionuclides in Selected Lignites from Istanbul", *Akadémiiai Kiadó*, Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, Vol.246, No.2, hal.391–394.