

Distribusi radionuklida alam dalam sampel lingkungan tanah, air dan tanaman sekitar PLTU Rembang

Aditya Yoga Syah Putra¹⁾, Dwi P. Sasongko¹⁾, Zaenal Arifin¹⁾, dan Sukirno²⁾

¹⁾Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Semarang

²⁾Pusat Sains dan Teknologi Akselerator, BATAN, Yogyakarta

E-mail: aditya@st.fisika.undip.ac.id

ABSTRACT

Research of the natural radionuclide distribution of soil, water and plant samples around Rembang Coal Fired Power Plant (CFPP) has been done with the purpose of the study is to know the activity concentration of natural radionuclide, the pattern of distribution of environment radioactivity around Rembang CFPP with soil, water and plant samples and compare the activity concentration of natural radionuclide around Rembang CFPP with Environmental Radioactivity Limit Values (ERLV) which is listed on the Perka Bapeten No 16 of 2013 about Safety Radiation in Storage of Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactivity Material. Sample analysis method using gamma spectrometry with HPGe detector and Maestro 2 software is based on SNI 1070.3-2009. The calculated concentration of natural radionuclide activity ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K in soil sample is $(8.17 \times 10^{-3} \pm 2.33 \times 10^{-4}; 9.99 \times 10^{-3} \pm 1.69 \times 10^{-4}; 7.84 \times 10^{-3} \pm 2.78 \times 10^{-4}; 4.46 \times 10^{-2} \pm 6.78 \times 10^{-4})$ Bq/g. Water sample $(3.07 \times 10^{-3} \pm 4.05 \times 10^{-4}; 3.59 \times 10^{-3} \pm 3.22 \times 10^{-4}; 6.59 \times 10^{-4} \pm 5.59 \times 10^{-5}; 2.82 \times 10^{-2} \pm 1.93 \times 10^{-3})$ Bq/L. Plant sample $(1.69 \times 10^{-3} \pm 9.06 \times 10^{-5}; 7.56 \times 10^{-4} \pm 5.04 \times 10^{-5}; 4.13 \times 10^{-4} \pm 3.03 \times 10^{-5}; 1.17 \times 10^{-2} \pm 7.52 \times 10^{-4})$ Bq/g. The distribution pattern of the concentration of natural radionuclide activity that is formed that is in the soil sample has the distribution pattern of the distance from CFPP Rembang the bigger concentration activity. Furthermore, in water and plant samples the distribution pattern tends to lead to a location close to the CFPP that has a bigger concentration of activity. Comparison the concentration of natural radionuclide activity with Environmental Radioactivity Limit Values (ERLV) it was found that the overall concentration of natural radionuclide activity in soil, water or plant samples at each sampling site still did not exceed the Environmental Boundary Limit Radioactivity (ERLV) that defined by Perka Bapeten No 16 of 2013 about Safety Radiation in Storage of Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactivity Material.

Key words: Natural radionuclide, environment sample, Rembang CFPP, gamma spectrometry, radioactivity, distribution.

ABSTRAK

Penelitian mengenai distribusi radionuklida alam sampel lingkungan tanah, air dan tanaman di sekitar PLTU Rembang telah dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui konsentrasi aktivitas radionuklida alam, pola distribusi radioaktivitas lingkungan di sekitar PLTU Rembang dengan sampel tanah, air dan tanaman serta membandingkan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida alam sampel tanah, air dan tanaman sekitar PLTU Rembang dengan Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan (NBRL) yang dicantumkan pada Perka Bapeten No 16 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan *Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactivity Material*. Metode analisis sampel menggunakan spektrometri gamma dengan detektor HPGe serta *software Maestro 2* didasarkan atas SNI 1070.3-2009. Hasil perhitungan konsentrasi aktivitas radionuklida alam ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K pada sampel tanah sebesar $(8,17 \times 10^{-3} \pm 2,33 \times 10^{-4}; 9,99 \times 10^{-3} \pm 1,69 \times 10^{-4}; 7,84 \times 10^{-3} \pm 2,78 \times 10^{-4}; 4,46 \times 10^{-2} \pm 6,78 \times 10^{-4})$ Bq/g. Sampel air $(3,07 \times 10^{-3} \pm 4,05 \times 10^{-4}; 3,59 \times 10^{-3} \pm 3,22 \times 10^{-4}; 6,59 \times 10^{-4} \pm 5,59 \times 10^{-5}; 2,82 \times 10^{-2} \pm 1,93 \times 10^{-3})$ Bq/L. Sampel tanaman $(1,69 \times 10^{-3} \pm 9,06 \times 10^{-5}; 7,56 \times 10^{-4} \pm 5,04 \times 10^{-5}; 4,13 \times 10^{-4} \pm 3,03 \times 10^{-5}; 1,17 \times 10^{-2} \pm 7,52 \times 10^{-4})$ Bq/g. Pola distribusi konsentrasi aktivitas radionuklida alam yang terbentuk yaitu pada sampel tanah memiliki pola distribusi semakin jauh jarak dari PLTU Rembang semakin besar konsentrasi aktivitasnya. Selanjutnya, pada sampel air maupun tanaman pola distribusinya cenderung mengarah ke lokasi yang dekat dengan PLTU yang

memiliki konsentrasi aktivitas lebih besar. Perbandingan konsentrasi aktivitas radionuklida alam dengan Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan (NBRL) menunjukkan keseluruhan konsentrasi aktivitas radionuklida alam di sampel tanah, air maupun tanaman di setiap lokasi pengambilan sampel masih belum melebihi Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan (NBRL) yang telah ditetapkan oleh Bapeten dalam Perka Bapeten No 16 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan *Technologically Enhanced Naturally Occuring Radioactivity Material*.

Kata kunci: Radionuklida alam, sampel lingkungan, PLTU Rembang, spektrometer gamma, radioaktivitas.

PENDAHULUAN

Industri pembangkit tenaga listrik dengan bahan bakar batubara tanpa disadari akan menaikkan tingkat radionuklida alam di lingkungan dan kemudian akan menaikkan paparan radiasi alam terhadap kehidupan di lingkungannya. Industri PLTU-batubara menurut laporan UNSCEAR yang mempunyai potensi besar sebagai pencemar radionuklida ke lingkungan [1]. Batubara layaknya bahan lain yang berasal dari alam mengandung ^{40}K , ^{238}U dan ^{232}Th beserta anak-anak luruhnya oleh karena proses pembakaran. Pembakaran tersebut menghasilkan limbah berupa abu yang terdiri dari abu ringan yang dapat terbawa melalui saluran buang pembakaran kemudian tersebar ke atmosfer disebut *fly ash* dan abu berat yang mengendap di bagian bawah tempat pembakaran disebut *bottom ash* [2].

Kandungan radionuklida alam di dalam batubara bervariasi bergantung pada jenis dan lokasi penambangan batubara. Konsentrasi radionuklida alam di dalam abunya juga akan bervariasi dan cenderung lebih kaya dibandingkan dengan unsur radionuklida alam yang terkandung di dalam batubara. Laju produksi abu batubara pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) kira-kira 10% dari volume batubara. Lebih dari 90% abu yang dihasilkan terdiri dari 20% berupa abu dasar, lainnya 80% berupa abu terbang [3].

Radionuklida alam dapat digolongkan sebagai bahan berbahaya dan beracun, hal ini karena sifat dan konsentrasinya, baik langsung maupun tidak langsung dapat merusak kesehatan, kelangsungan hidup manusia serta makhluk hidup

lainnya [4]. Radionuklida alam sebagai unsur pencemar yang masuk ke dalam ekosistem akan mengikuti rantai makanan dan dapat berujung pada jaringan tubuh manusia [5]. Radionuklida alam penyumbang terbesar terhadap paparan gamma ke manusia adalah anak luruh ^{238}U , ^{232}Th , dan ^{40}K [6]. Oleh karena itu, diperlukan pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida alam serta distribusi radionuklida alam di kawasan PLTU Rembang.

DASAR TEORI

Batubara

Batubara merupakan bahan yang berasal dari alam sehingga mengandung ^{40}K , ^{238}U dan ^{232}Th beserta anak-anak luruhnya. Proses pembakaran pada batubara mengakibatkan aktivitas radionuklida alam dalam batubara akan terdistribusi menuju alam sekitar [2]. Kebanyakan batubara digunakan untuk bahan bakar pembangkitan listrik serta kegiatan industri. Paparan radiasi yang muncul dari siklus batubara terdiri dari proses penambangan, pembakaran batubara serta dari abu terbang (*fly ash*). Jika terjadi kenaikan paparan hasil pemanfaatan batubara maka akan mengganggu kesehatan dan lingkungan hidup oleh karena itu, tingkat paparan dan obyek paparan dari masyarakat harus dibatasi sepanjang terdapat data pendukung [7].

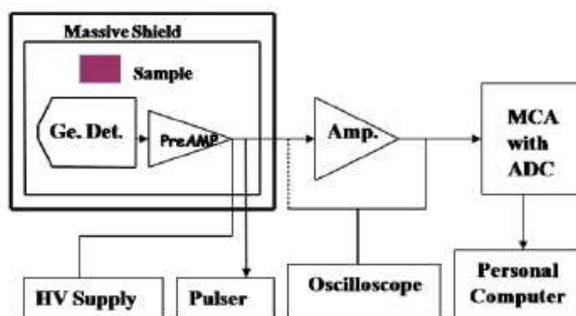
Radionuklida

Kandungan radionuklida alam di dalam batubara bervariasi tergantung jenis dan lokasi

penambangan. Suatu unsur dikatakan radionuklida atau isotop radioaktif apabila suatu unsur dapat memancarkan radiasi. Pada umumnya radionuklida digunakan untuk berbagai keperluan seperti dalam bidang kedokteran dan industri. Radionuklida yang digunakan tersebut tidak terdapat di alam, disebabkan waktu paruh dan beberapa faktor lainnya yang kurang memenuhi persyaratan. Unsur radioaktif alam dan buatan menunjukkan aktivitas radiasi yang sama yaitu radiasi sinar α , sinar β dan sinar γ . Salah satu sifat menguntungkan dari sinar radioaktif adalah daya tembusnya yang tinggi. Kekuatan tembus sinar-sinar radioaktif ini dipengaruhi oleh daya ionisasinya [8].

Spektrometer Gamma

Spektrometer Gamma merupakan suatu alat yang dapat digunakan untuk melakukan analisa zat radioaktif yang memancarkan radiasi gamma. Setiap radionuklida mempunyai tenaga tertentu dan bersifat spesifik. Hal ini digunakan sebagai dasar dalam analisis secara kualitatif dilakukan berdasarkan nilai cacahan dari spektrum yang dipancarkan. Sebelum digunakan dalam pengukuran terlebih dahulu sistem spektrometer gamma dikalibrasi dengan sumber standar untuk menentukan hubungan antara nomor saluran dan energi gamma (KeV). Agar dapat mengidentifikasi isotop radioaktif spektrometer gamma dilengkapi dengan suatu perangkat lunak untuk kalibrasi dan mencocokkan puncak-puncak energi foton dengan suatu pustaka data nuklir [9].



Gambar 1 Diagram blok spektrometer gamma [10]

Analisis kualitatif sistem pencacah spektrometer gamma dilakukan dengan cara kalibrasi energi. Hasil dari hubungan antara energi dan nomor salur adalah diperolehnya gambar garis lurus dalam grafik yang digunakan untuk analisis kualitatif [9]. Perumusan hubungan energid an nomor salur ditunjukkan oleh persamaan sebagai berikut:

$$Y = aX + b \quad (1)$$

dengan Y adalah tingkat tenaga, X adalah nomor salur dan a, b merupakan suatu tetapan [11].

Analisis kuantitaif sistem pencacah spektrometer gamma dilakukan dengan cara kalibrasi efisiensi. Selain itu ditentukan pula oleh laju emisi yang merupakan hasil perkalian antara intensitas dengan aktivitas radionuklida pada saat pengukuran [12]. Perumusan untuk menghitung nilai efisiensi sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{N}{A_{std} \cdot P_{\gamma}} \times 100 \quad (2)$$

dengan ε adalah nilai efisiensi, N adalah luas area spektrum dibawah energi tertentu, A_{std} adalah aktivitas sumber standar pada saat pengukuran (Bq) dan P_{γ} adalah intensitas pancaran gamma pada energi tertentu [11].

Setelah mendapatkan nilai efisiensi makan selanjutnya dapat digunakan untuk mencari konsentrasi aktivitas raionuklida dengan persamaan sebagai berikut:

$$A = \frac{(N_t - N_b)}{\varepsilon \cdot P_{\gamma} \cdot W} \quad (3)$$

dengan A adalah konsentrasi aktivitas radionuklida (Bq/kg atau Bq/L), N_t adalah laju cacah sampel (cps), N_b adalah laju cacah latar (cps), ε adalah efisiensi, P_{γ} adalah pancaran radiasi gamma (%), W adalah massa sampel (kg) untuk padatan atau volume (L) untuk sampel cair [11].

MDC (*Minimum Detectable Concentration*) merupakan kemampuan suatu alat dalam mendeteksi konsentrasi minimum. Besarnya konsentrasi minimum yang dapat dideteksi dipengaruhi oleh efisiensi pencacahan, cacah latar dan massa sampel. Perhitungan MDC dengan tingkat kepercayaan 95% dapat dilakukan melalui persamaan:

$$MDC = 4,66 \cdot \frac{\sqrt{\frac{N_{BG}}{t_{BG}^2}}}{\varepsilon_{\gamma} \cdot P_{\gamma} \cdot F_k \cdot W} \quad (4)$$

dengan MDC adalah konsentrasi minimum yang dapat dideteksi (Bq/kg atau Bq/L), N_{BG} adalah laju cacah latar (cps), t_{BG} adalah waktu cacah latar (detik), ε_{γ} adalah efisiensi pencacahan (%), P_{γ} adalah kelimpahan energi gamma (%), F_k adalah faktor koreksi serapan diri dan W adalah massa sampel (kg) [13].

Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan

Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan dicantumkan pada Perka Bapeten Nomor 16 Tahun 2013 tentang Keselamatan Radiasi dalam Penyimpanan *Technologically Enchahced Naturally Occuring Radioactivity Material* dapat ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai batas radioaktivitas lingkungan

Radionuklida	Cair (Bq/l)	Padat (Bq/g)	Gas (Bq/m ³)
Deret Uranium-238	1	0,3	0,003
Uranium-238	10	10	0,05
Thorium-230	5	10	0,01
Radium-226	5	0,3	0,05
Plumbun-210	1	0,3	0,05
Deret Thorium-232	1	0,3	0,002
Thorium-232	1	10	0,006
Radium-228	5	0,3	0,005
Thorium-228	1	0,3	0,003
Kalium-40	-	3	-

Sumber: Perka Bapeten No 16 Tahun 2013

METODE PENELITIAN

Pengambilan Sampel

Pengambilan sampel dilakukan di 6 titik lokasi berdasarkan perkiraan mawar angin yang ditunjukkan pada Gambar 2, dimana di setiap lokasi memiliki rentang jarak sekitar 1 km dan pada sudut 45°, 68° dan 90°. Sampel tanah, air dan tanaman diambil di sekitar PLTU Rembang. Pengambilan sampel tanah, air dan tanaman di sekitar PLTU Rembang dengan radius 1 km sampai 2 km.



Gambar 2 Lokasi pengambilan sampel berdasarkan perkiraan mawar angin

Tanah yang diambil adalah tanah permukaan dengan seluas 30-50 cm² dan kedalaman 10-15 cm sebanyak 1 kg. Sampel air didapatkan dari sumber air minum atau sumur sebanyak 1000 ml. Sampel tanaman diambil dari tanaman singkong yang diambil daunnya secara acak sebanyak kira-kira 1000 gram. Kemudian sampel tanah dan tanaman dikeringkan dan diayak hingga menjadi 70 gram, sampel air di panaskan hingga menjadi 20 ml selanjutnya ketiga sampel dimasukkan kedalam botol polietilen (diberi label dan kode sampel). Sampel siap diukur konsentrasi setelah didiamkan selama 30 hari.

Analisis Sampel

Sampel tanah, air dan tanaman dicacah selama 86400 detik. Pencacahan dilakukan sebanyak 2 kali untuk mendapatkan hasil yang obyektif. Hasil pencacahan berupa data spektrum, kemudian ditentukan puncak spektrum pada rentang energi tertentu. Penentuan radionuklida induk pada sampel ditentukan dari anak luruh radionuklida deret uranium dan thorium. Radionuklida ⁴⁰K ditentukan langsung pada puncak energi 1.460,83 keV, radionuklida ²²⁶Ra ditentukan melalui anak luruhnya yaitu ²¹⁴Pb pada puncak energi 608,93 keV, 1.119,39 keV, 1.763,62 keV dan ²¹⁴Pb pada puncak energi 295,21 keV, 351,61 keV. Radionuklida ²²⁸Ra ditentukan melalui anak luruhnya yaitu ²²⁸Ac pada puncak energi 910,72 keV dan 986,43 keV, kemudian pada radionuklida ²³²Th ditentukan melalui

anak luruhnya ^{212}Pb dengan puncak energi 238,42 keV dan ^{208}Tl dengan puncak energi 582,44 keV. Setelah didapatkan energid an jenis radionuklida dilakukan ROI pada luasan spektrum. Luasan pada cacahan pertama akan dibandingkan dengan luasan pada pencacahan kedua sehingga luasan akan identic, apabila belum maka dilakukan ROI kembali.

terendah sebesar $6,59 \times 10^{-4} \pm 5,59 \times 10^{-5}$ Bq/L sampai dengan $2,82 \times 10^{-2} \pm 1,93 \times 10^{-3}$ Bq/L.

Konsentrasi aktivitas radionuklida alam (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K) pada sampel tanah, air dan tanaman setelah diolah dengan *surfer* 12 didapatkan kontur distribusi sebagai berikut:

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil perhitungan konsentrasi aktivitas radionuklida alam (^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{232}Th dan ^{40}K) pada sampel tanah, air dan tanaman di setiap lokasi disajikan pada Tabel 2, 3 dan tabel 4.

Tabel 2 Nilai konsentrasi aktivitas sampel tanah di setiap lokasi

Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)													
	Lokasi 1		Lokasi 2		Lokasi 3		Lokasi 4		Lokasi 5		Lokasi 6		Rerata	
	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD
^{226}Ra	10,6065	0,1764	9,4112	0,3433	6,8576	0,4919	10,4135	0,2804	0,7711	0,1083	10,9753	0,0000	8,1725	0,2334
^{228}Ra	12,8719	0,1900	11,4104	0,3654	7,5662	0,3115	13,0210	0,0443	2,2052	0,1015	12,8895	0,0000	9,9941	0,1688
^{232}Th	10,3834	0,3972	9,2568	0,6365	6,3641	0,3734	10,3948	0,1289	0,8855	0,1296	9,7764	0,0000	7,8435	0,2776
^{40}K	51,1674	1,0064	76,2999	2,0355	28,5137	0,9580	47,4758	0,0527	10,0616	0,0153	54,0735	0,0000	44,5986	0,6780

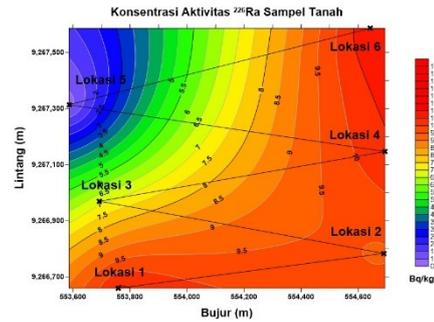
Tabel 3 Nilai konsentrasi aktivitas sampel air di setiap lokasi

Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/L)													
	Lokasi 1		Lokasi 2		Lokasi 3		Lokasi 4		Lokasi 5		Lokasi 6		Rerata	
	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD
^{226}Ra	0,0032	0,0004	0,0041	0,0003	0,0036	0,0003	0,0002	0,0006	0,0035	0,0004	0,0037	0,0004	0,0031	0,0004
^{228}Ra	0,0037	0,0003	0,0034	0,0002	0,0063	0,0007	0,0007	0,0002	0,0025	0,0001	0,0049	0,0005	0,0036	0,0003
^{232}Th	0,0011	0,0001	0,0009	0,0001	0,0008	0,0000	0,0000	0,0001	0,0007	0,0000	0,0004	0,0000	0,0007	0,0001
^{40}K	0,0212	0,0019	0,0307	0,0016	0,0456	0,0051	0,0020	0,0000	0,0171	0,0006	0,0525	0,0023	0,0282	0,0019

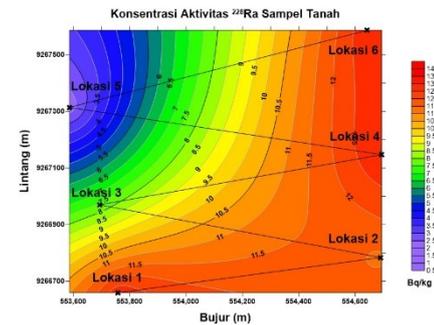
Tabel 4 Nilai konsentrasi aktivitas sampel tanaman di setiap lokasi

Radionuklida	Konsentrasi Aktivitas (Bq/kg)													
	Lokasi 1		Lokasi 2		Lokasi 3		Lokasi 4		Lokasi 5		Lokasi 6		Rerata	
	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD	A	SD
^{226}Ra	1,6686	0,0570	1,7592	0,0441	1,6706	0,0325	1,4763	0,0456	1,2972	0,0428	2,2440	0,0002	1,6860	0,0906
^{228}Ra	0,6342	0,1202	1,1636	0,0810	0,9741	0,0392	0,2520	0,0818	0,7970	0,0615	0,7161	0,0002	0,7562	0,0504
^{232}Th	0,4645	0,0041	0,3638	0,0265	0,1879	0,0206	0,6723	0,0114	0,2570	0,0135	0,5297	0,0002	0,4125	0,0303
^{40}K	2,3321	2,6785	16,1301	2,1669	6,7715	4,3202	18,8451	1,8960	11,5826	1,3094	14,3249	0,0005	11,6644	0,7516

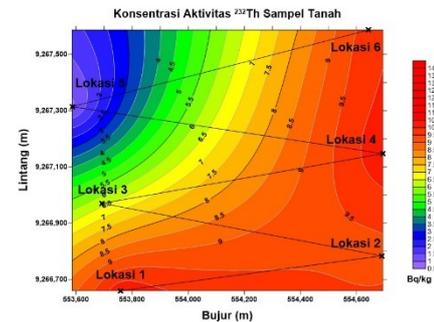
Berdasarkan Tabel 2, 3 dan 4 diatas menunjukkan bahwa pada sampel tanah memiliki konsentrasi aktivitas terbesar yaitu $7,84 \pm 0,28$ Bq/kg sampai dengan $44,60 \pm 0,68$ Bq/kg. Kemudian disusul oleh sampel tanaman yang memiliki konsentrasi aktivitas sebesar $0,41 \pm 0,03$ Bq/kg sampai dengan $11,66 \pm 0,75$ Bq/kg dan pada sampel air memiliki konsentrasi aktivitas



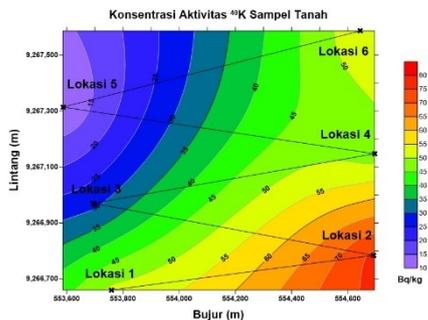
Gambar 3 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{226}Ra sampel tanah



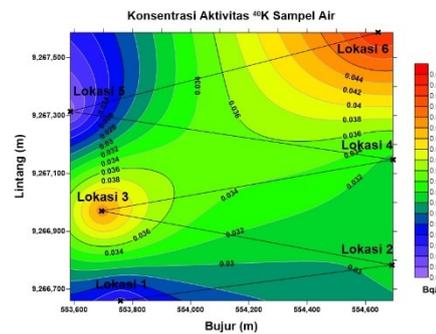
Gambar 4 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{228}Ra sampel tanah



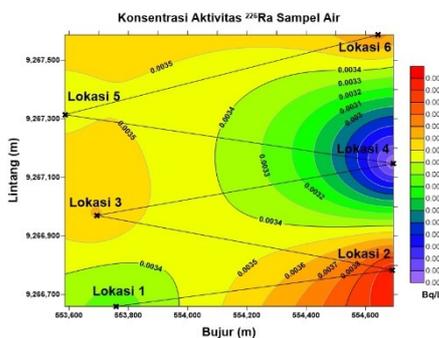
Gambar 5. Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{232}Th sampel tanah



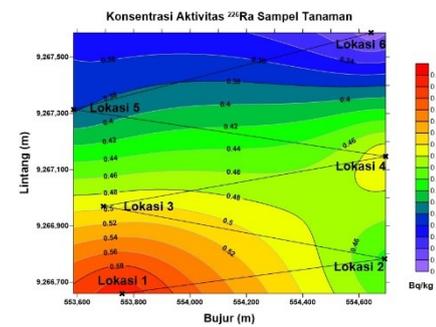
Gambar 6 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{40}K sampel tanah



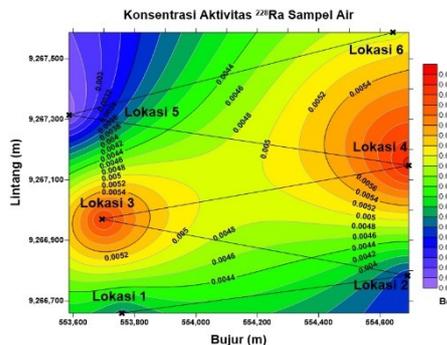
Gambar 10 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{40}K sampel air



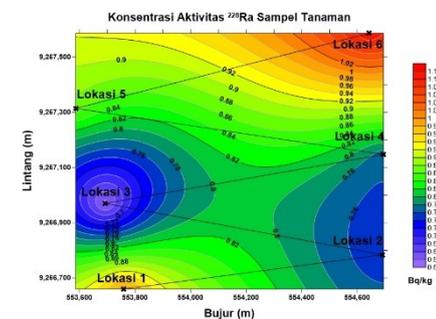
Gambar 7 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{226}Ra sampel air



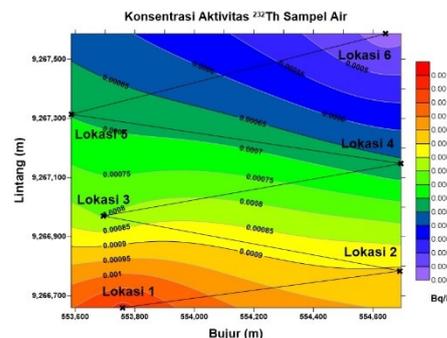
Gambar 11 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{226}Ra sampel tanaman



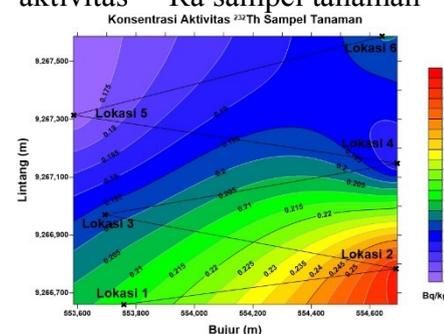
Gambar 8 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{228}Ra sampel air



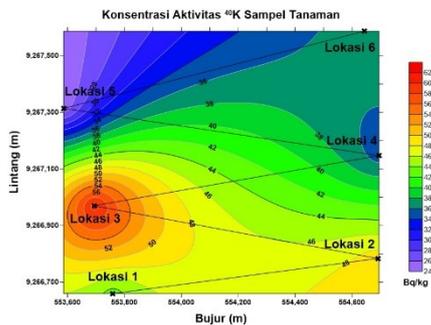
Gambar 12 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{228}Ra sampel tanaman



Gambar 9 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{232}Th sampel air



Gambar 13 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ^{232}Th sampel tanaman



Gambar 14 Kontur distribusi konsentrasi aktivitas ⁴⁰K sampel tanaman

Konsentrasi aktivitas radionuklida alam rata-rata dari terendah berada pada sampel air, sampel tanaman kemudian sampel tanah. Konsentrasi aktivitas radionuklida alam terendah berada di air disebabkan oleh bioakumulasi yang terjadi pada air masih relatif singkat karena pada air sendiri sering dimanfaatkan dan diambil oleh makhluk hidup yang membutuhkannya, serta dari faktor cuaca, air dapat mengering yang disebabkan suhu lingkungan yang tinggi. Kemudian pada sampel tanaman memiliki konsentrasi aktivitas rata-rata lebih tinggi daripada sampel air disebabkan oleh bioakumulasi yang terjadi pada tanaman relatif lebih lama dibandingkan dengan air karena pada tanaman pemanfaatannya memiliki waktu yang lebih lama yaitu menunggu tanaman tersebut cukup umur buat bisa dimanfaatkan oleh manusia. Serta tanaman mendapatkan nutrisi melalui akar, akar tersebut bisa mendapat nutrisi dari air dan tanah yang bisa saja memiliki radioaktif, sehingga ada kemungkinan terjadi bioakumulasi yang lebih besar. Pada sampel tanah memiliki konsentrasi aktivitas terbesar dibandingkan dengan kedua sampel tadi yaitu sampel air dan tanaman, diakibatkan pada sampel tanah memiliki bioakumulasi paling lama dan besar karena pada tanah yang digunakan untuk sampel merupakan tanah yang tidak dimanfaatkan oleh penduduk, sehingga waktu untuk terjadinya bioakumulasi pada tanah paling lama serta pada tanah ada kemungkinan mendapatkan akumulasi radioaktif dari udara maupun air yang berada disekitar, misalnya pada air waktu mengalir melalui tanah dan waktu air mengering, kemudian pada udara

dapat melalui radiasi kosmik dan abu terbang yang berasal dari pembakaran batubara.

Hasil perbandingan konsentrasi aktivitas radionuklida alam (²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K) pada sampel tanah, air dan tanaman dengan NBRL sebagai berikut:

Tabel 5 Konsentrasi aktivitas radionuklida sampel tanah

Radionu klida	Konsentrasi Aktivitas Sampel Tanah (Bq/g)						NBRL* (Bq/g)
	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4	Lokasi 5	Lokasi 6	
²²⁶ Ra	0,0106	0,0094	0,0069	0,0104	0,0008	0,0110	0,3
²²⁸ Ra	0,0129	0,0114	0,0076	0,0130	0,0022	0,0129	0,3
²³² Th	0,0104	0,0093	0,0064	0,0104	0,0009	0,0098	10
⁴⁰ K	0,0512	0,0763	0,0285	0,0475	0,0101	0,0541	3

Tabel 6 Konsentrasi aktivitas radionuklida sampel air

Radionu klida	Konsentrasi Aktivitas Sampel Air (Bq/L)						NBRL* (Bq/L)
	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4	Lokasi 5	Lokasi 6	
²²⁶ Ra	0,0032	0,0041	0,0036	0,0002	0,0035	0,0037	5
²²⁸ Ra	0,0037	0,0034	0,0063	0,0007	0,0025	0,0049	5
²³² Th	0,0011	0,0009	0,0008	0,0000	0,0007	0,0004	1
⁴⁰ K	0,0212	0,0307	0,0456	0,0020	0,0171	0,0525	-

Tabel 7 Konsentrasi aktivitas radionuklida sampel tanaman

Radionu klida	Konsentrasi Aktivitas Sampel Tanaman (Bq/g)						NBRL* (Bq/g)
	Lokasi 1	Lokasi 2	Lokasi 3	Lokasi 4	Lokasi 5	Lokasi 6	
²²⁶ Ra	0,0017	0,0018	0,0017	0,0015	0,0013	0,0022	0,3
²²⁸ Ra	0,0006	0,0012	0,0010	0,0003	0,0008	0,0007	0,3
²³² Th	0,0005	0,0004	0,0002	0,0007	0,0003	0,0005	10
⁴⁰ K	0,0023	0,0161	0,0068	0,0188	0,0116	0,0143	3

Berdasarkan Tabel 5, 6 dan 7 diketahui bahwa nilai konsentrasi aktivitas seluruh radionuklida alam baik di sampel tanah, air maupun tanaman di setiap lokasi masih belum melebihi Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan (NBRL) yang telah ditetapkan oleh Bapeten dalam Perka Bapeten Nomor 16 Tahun 2013.

KESIMPULAN

Hasil perhitungan konsentrasi aktivitas radionuklida alam (²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²³²Th dan ⁴⁰K) pada sampel tanah sebesar ($8,17 \times 10^{-3} \pm 2,33 \times 10^{-4}$; $9,99 \times 10^{-3} \pm 1,69 \times 10^{-4}$; $7,84 \times 10^{-3} \pm 2,78 \times 10^{-4}$; $4,46 \times 10^{-2} \pm 6,78 \times 10^{-4}$) Bq/g.

Sampel air ($3,07 \times 10^{-3} \pm 4,05 \times 10^{-4}$; $3,59 \times 10^{-3} \pm 3,22 \times 10^{-4}$; $6,59 \times 10^{-4} \pm 5,59 \times 10^{-5}$; $2,82 \times 10^{-2} \pm 1,93 \times 10^{-3}$) Bq/L. Sampel tanaman ($1,69 \times 10^{-3} \pm 9,06 \times 10^{-5}$; $7,56 \times 10^{-4} \pm 5,04 \times 10^{-5}$; $4,13 \times 10^{-4} \pm 3,03 \times 10^{-5}$; $1,17 \times 10^{-2} \pm 7,52 \times 10^{-4}$) Bq/g. Pola distribusi konsentrasi aktivitas radionuklida alam yang terbentuk yaitu pada sampel tanah memiliki pola distribusi semakin jauh jarak dari PLTU Rembang semakin besar konsentrasi aktivitasnya. Selanjutnya, pada sampel air maupun tanaman pola distribusinya cenderung mengarah ke lokasi yang dekat dengan PLTU yang memiliki konsentrasi aktivitas lebih besar. Perbandingan konsentrasi aktivitas radionuklida alam dengan Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan (NBRL) menunjukkan keseluruhan konsentrasi aktivitas radionuklida alam di sampel tanah, air maupun tanaman di setiap lokasi pengambilan sampel masih belum melebihi Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan (NBRL) yang telah ditetapkan oleh Bapeten dalam Perka Bapeten No 16 Tahun 2013.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bunawas dan Pujadi, 1998, *Industri dan Pencemaran Radionuklida Alam di Lingkungan*, Buletin ALARA, 2(2): 13-18.
- [2] UNSCEAR, 1982, *Ionizing Radiation: Sources and Biological Effects*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- [3] Sukandarrumidi, 2009, *Batubara dan Pemanfaatannya. Pengantar Teknologi Batubara Menuju Lingkungan Bersih*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- [4] BAPEDAL, 1999, *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran dan/atau Perusakan Laut*, Badan Pengendalian Dampak Lingkungan, Jakarta.
- [5] Thayib M.H, 1990, *Pencemaran oleh Radionuklida*, Jakarta: Universitas Indonesia.
- [6] UNSCEAR, 1988, *Sources, Effects and Risk of Ionizing Radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- [7] UNSCEAR, 2000, *Sources and Effects of Ionizing Radiation*, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York.
- [8] Rusmanto, T., Mulyono, Bambang, I., 2012, *Identifikasi dan Penentuan Radionuklida dalam Partikulat Udara Ukuran TSP disekitar PLTU Cilacap, Jawa Tengah*, Pusat Teknologi Aksektor dan Proses Bahan.BATAN.Yogyakarta.
- [9] Luhur, N., dan Subiharto, K., 2013, *Uji Banding Sistem Spektrometer Gamma dengan Metoda Analisis Sumber ^{152}Eu* , Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir. Vol. X No. 1: 22 – 30, Serpong, April 2013.
- [10] Khandaker, M.U, 2011, *High Purity Germanium Detector in Gamma-Ray Spectrometry*, Nomor 2 Volume 1 Halaman 42-46, International Journal of Fundamental Physical Sciences.
- [11] Susetyo, W., 1988, *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan Neutron*, Gadjah Mada University Press, Yogyakarta
- [12] Hermawan, C., Pujadi., dan Wurdianto, G., 2010, *Pengaruh Efek Geometri pada Kalibrasi Efisiensi Detektor Semikonduktor HGPe menggunakan Spektrometer Gamma*, Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI Jateng dan DIY.hal:258-264.
- [13] Sasongko, D.P., dan Kusminarto, 1998, *Kajian Radioaktivitas Alam Laut Pesisir Semarang*, J. Manusia dan Lingkungan VI (16):33-44.