

TINGKAT RADIOAKTIVITAS RADIONUKLIDA ALAM PADA BAHAN MAKANAN SEKITAR CALON TAPAK PLTN SEMENANJUNG MURIA

Heni Susiati¹⁾

ABSTRAK

TINGKAT RADIOAKTIVITAS RADIONUKLIDA ALAM PADA BAHAN MAKANAN SEKITAR CALON TAPAK PLTN UJUNG LEMAHABANG. Data rona awal konsentrasi radionuklida alam (^{238}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K) dalam sampel bahan makanan, tanah pertanian, dan sumur di sekitar calon tapak PLTN Ujung Lemahabang telah ditentukan dengan spektrometer gamma dengan detektor HPGe. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa konsentrasi radionuklida air sumur penduduk untuk ^{40}K berkisar antara Batas Deteksi Terendah (BDT) – 2,11 Bq/L, untuk ^{226}Ra berkisar antara 0,06 – 0,12 Bq/L, sedang untuk ^{228}Th dan ^{228}Ra tidak terdeteksi. Tanah pertanian di desa Balong dan Tubanan mengandung radionuklida alam dalam konsentrasi yang cukup tinggi, demikian pula untuk beberapa jenis makanan seperti umbi singkong dan daunnya. Konsentrasi ^{40}K cukup tinggi disemua jenis bahan pangan yang diteliti.

Kata kunci : Rona awal, radionuklida, batas deteksi terendah.

ABSTRACT

THE RADIOACTIVITY LEVELS OF NATURAL RADIONUCLIDE ON FOODSTUFF AT CANDIDATE SITE. The baseline values of the natural radionuclides concentration (^{238}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra and ^{40}K) have been determined in the foodstuffs, soil, and wells water samples around nuclear power plant site candidate by gamma spectrometry with HPGe detector. The results which obtained indicate that concentration of resident well water radionuclide for ^{40}K ranging from Low Detection Limit - 2,11 Bq/L, ^{226}Ra range from 0,06 - 0,12 Bq/L, and for ^{228}Th and ^{228}Ra is not detected. Farmland in Balong and Tubanan district contain natural radionuclide in concentration of which enough high, and so do for a few food type like the corm and cassava leaf. Concentration of ^{40}K enough high all the checked foodstuffs types.

Key words : Initial condition, radionuclide, low detection limit.

I. PENDAHULUAN

Di dalam kerak bumi terdapat unsur alamiah primordial yaitu jenis radioaktif alam *NORM (Naturally Occurring Radioactive Material)* yang sudah terbentuk semenjak terbentuknya planet bumi ini. Secara umum, radionuklida alam yang dominan ditemukan di dalam *NORM* adalah ^{238}U , ^{232}U , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{210}Pb dan ^{210}Po . Radiasi yang dipancarkan *NORM* merupakan campuran partikel alpha, beta, dan photon gamma. Radon (^{222}Rn) dan thoron (^{220}Rn) adalah pemancar alpha murni dan berwujud gas. Berdasarkan sifat dan wujud dari masing-masing radionuklida ini maka metode penentuan setiap radionuklida tersebut berbeda.

¹⁾ Staf Bidang Pengkajian Kelayakan Tapak PLTN

Isotop uranium alam mempunyai waktu paro sangat panjang yaitu $4,5 \times 10^9$ tahun untuk ^{238}U . Thorium-232 yang mempunyai waktu paro $1,39 \times 10^{10}$ tahun adalah unsur awal dari deret peluruhan yang berakhir pada $\text{Pb-208}^{[1]}$. Dalam industri non nuklir seperti industri listrik berbahan

bakar gas, minyak, ataupun batubara dan penggunaan pupuk untuk pertanian akan menambah terhadap konsentrasi radionuklida alam tersebut dan kejadian tersebut dikenal dengan istilah *TENORM (Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material)*.

Radionuklida dalam TENORM berasal dari peluruhan radionuklida primordial dari peluruhan ^{238}U , ^{232}Th , dan $^{40}\text{K}^{[2]}$.

Umumnya perhatian terhadap penanganan radiasi alam di lingkungan akibat kegiatan beberapa industri non nuklir yang dapat memobilisasi masih belum dilakukan secara maksimal, hal ini karena adanya anggapan bahwa kontribusi pajanan radiasinya relatif sangat rendah. Namun demikian perlu diperhatikan apabila pajanan terjadi secara terus-menerus yang akan mengakibatkan terjadinya akumulasi pada materi yang terkena radiasi alam dan berpotensi memberikan dampak radiologi terhadap pekerja lingkungan, apabila tidak dikelola dengan baik.

Dalam kaitannya dengan rencana pembangunan PLTN (Pusat Listrik Tenaga Nuklir) di Ujung Lemahabang dan akan beroperasinya Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) Batubara Tanjungjati tidak menutup kemungkinan akan terjadi penambahan radioaktif alam khususnya di dalam bahan makanan di daerah tersebut. Lokasi terpilih tapak PLTN di Ujung Lemahabang letaknya berdekatan dengan PLTU Batubara Tanjung Jati yang menggunakan batubara sebagai sumber energinya. Batubara merupakan bahan galian yang terdapat dikulit bumi yang mengandung berbagai macam radionuklida alam dan logam berat. Pembakaran batubara mengakibatkan terlepasnya unsur-unsur tersebut ke lingkungan. Kandungan radionuklida alam dalam batubara bervariasi tergantung dari jenis dan daerah pertambangannya.

Radioaktivitas bahan pangan di Semenanjung Muria diperkirakan akan mengalami perubahan yang sangat signifikan sebagai konsekuensi dari perkembangan di berbagai sektor dan akan beroperasinya PLTU Tanjungjati yang kemungkinan akan berpengaruh pada kesehatan masyarakat akibat dampak radiologi yang akan ditimbulkan. Bahan pangan adalah merupakan salah satu jalur paparan yang penting yang perlu dipertimbangkan sehubungan dengan evaluasi risiko terhadap jalan masuknya polutan radionuklida alam ke dalam tubuh manusia yang dapat berpengaruh terhadap kesehatan masyarakat.

Berdasarkan alasan tersebut, maka dilakukan pengukuran terhadap tingkat radioaktivitas dalam bahan makanan di daerah studi. Pada studi ini, penentuan radioaktivitas radionuklida dilakukan dengan menggunakan alat spektrometer gamma dengan detektor HPGe. Maksud penelitian ini adalah untuk mengetahui konsentrasi

radionuklida alam deret uranium dan deret thorium serta ^{40}K di dalam tanah pertanian, air sumur serta beberapa contoh bahan makanan di lokasi calon tapak PLTN untuk mendapatkan *database* konsentrasi radioaktif alam deret uranium dan deret thorium serta ^{40}K .

Dalam rangka mengetahui rona awal lingkungan lokasi tapak Ujung Lemahabang sedini mungkin sebelum beroperasinya pusat listrik (PLTU & PLTN) di wilayah ini, maka salah satu pengamatan yang perlu dilakukan adalah mengetahui tingkat radioaktivitas pada bahan makanan yang berasal dari radionuklida alam dan kelak akan berpengaruh pula terhadap intensitas dosis internal pada manusia. Contoh makanan yang umum dikonsumsi oleh penduduk dikumpulkan dari dua desa yaitu Balong dan Tubanan. Radionuklida yang diukur dari jenis makanan tersebut adalah thorium, radium dan kalium (potasium). Pengukuran menggunakan alat spektrometer gamma dengan detektor HPGe.

II. BAHAN DAN METODE

Untuk pre-survei dosis internal penduduk digunakan jenis makanan yang biasa dan banyak dikonsumsi sehari-hari. Jenis makanan yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari desa Balong dan Tubanan yang meliputi daun singkong, umbi ketela/singkong, ubi jalar, ayam, ikan, pisang, air sumur yang merupakan sumber air minum penduduk, tanah dan air hujan. Pengukuran radionuklida dititik beratkan pada radionuklida alam yaitu ^{228}Th , ^{228}Ra , ^{226}Ra dan ^{40}K . Unsur-unsur ini juga merupakan radionuklida yang terdapat dalam bahan bakar batu bara yang digunakan oleh PLTU Batubara sebagai bahan bakar dan juga bahan pupuk yang digunakan untuk pertanian.

Jumlah sampel untuk masing-masing jenis sekitar 10 kg. Sampel sebelum dilakukan analisis di laboratorium dilakukan pengeringan di bawah sinar matahari untuk mengurangi kadar airnya kemudian dibakar dengan menggunakan kualipengorengan tanah sampai menjadi arang. Analisis kandungan radionuklida dilakukan di Laboratorium P3KrBin-BATAN Jakarta, secara radiokimia sesuai prosedur preparasi sampel yang dikembangkan oleh BATAN. Alat yang digunakan dalam pengukuran kandungan radionuklida adalah dengan spektrometer gamma dengan detektor semikonduktor germanium (HPGe). Penetapan lokasi penelitian dititikbertakan pada lokasi keberadaan PLTU Batubara Tanjungjati dan calon tapak PLTN Ujung Lemahabang.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran radionuklida alam dalam sampel air sumur penduduk dan tanah pertanian disajikan pada Tabel 1. Radionuklida yang terdeteksi di air sumur Balong hanya ^{226}Ra , sedang dari sumur desa Tubanan terukur ^{226}Ra dan ^{40}K dengan konsentrasi sekitar 0.06 – 2,11 Bq/L. Sebaliknya untuk tanah pertanian konsentrasi ke empat jenis radionuklida cukup tinggi, terutama untuk ^{228}Ra , ^{228}Th dan ^{226}Ra yang

konsentrasinya sepuluh kali lebih besar dibandingkan dengan rata-rata konsentrasi unsur tersebut di dunia.

Tabel 1. Konsentrasi radionuklida alam dalam air sumur dan tanah pertanian dari desa Balong dan Tubanan.

Jenis Sampel	Konsentrasi Radionuklida			
	²²⁸ Th	²²⁶ Ra	²²⁸ Ra	⁴⁰ K
Desa Balong				
1. Air sumur (Bq/L)	< 0,02	0,06 ± 0,03	< 0,07	< 0,7
2. Tanah pertanian (Bq/kg)	226,53 ± 0,64	114,55 ± 0,64	202,04 ± 1,26	38,58 ± 2,07
Desa Tubanan				
1. Air sumur (Bq/L)	< 0,02	0,12 ± 0,03	< 0,07	2,11 ± 0,42
2. Tanah pertanian (Bq/kg)	213,66 ± 0,60	122,81 ± 0,63	200,53 ± 1,20	56,27 ± 2,02

Catatan : Batas Deteksi Terendah (BTD) untuk ²²⁸Th : < 0,02 Bq/L
²²⁶Ra : < 0,07 Bq/L
⁴⁰K : < 0,7 Bq/L

Diperkirakan besarnya radioaktivitas radionuklida yang terukur dalam tanah pertanian karena dipengaruhi oleh perilaku dari pengolahan tanah pertanian terhadap pemakaian pupuk khususnya pupuk fosfat dan urea sebagai penyubur tanaman. Beberapa penelitian sehubungan dengan industri fosfat penghasil pupuk menunjukkan bahwa bahan dasar pembuatan pupuk mengandung unsur radionuklida alam seperti thorium, uranium dan anak luruhnya. Pembuatan pupuk fosfat bersumber dari batuan fosfat yang pada permulaan abad ke duapuluh diketahui bahwa batuan ini ternyata mengandung bahan-bahan radioaktif ^[3], seperti kelompok torium, uranium, dan kalium^[4]. Besar kecilnya konsentrasi zat radioaktif tersebut tergantung dari bahan baku pupuk, yang tiap Negara dapat berbeda^[5].

Salah satu anak luruh yang penting diperhatikan adalah ²²⁶Ra yang mempunyai waktu paruh panjang, bersifat radiotoksik dan relatif secara fisik mempunyai kemampuan gerak di dalam organ biologis. Di samping itu dari radionuklida ini akan dihasilkan/ diturunkan gas Radon, ²²²Rn yang merupakan sumber pancaran radiasi. Konsentrasi ²²⁶Ra dalam batuan fosfat bervariasi antara 1 – 2 Bq/g^{[6][7]}.

Dari hasil penelitian Made dkk. (2002) tentang hubungan sebaran radioaktivitas radionuklida alam dalam tanah pertanian dan perilaku penggunaan pupuk di seluruh Jawa Tengah menunjukkan bahwa daerah sekitar Jepara, Pati, dan Demak merupakan daerah dengan sebaran radioaktivitas yang tinggi bila dibandingkan dengan daerah di luar Jepara, Demak, Pati. Dari hasil penelitian itu juga menunjukkan bahwa ada korelasi yang kuat terhadap pemakaian pupuk terhadap sebaran radioaktivitas tanah di daerah

konsumsi bahan pangan oleh penduduk maka adalah sangat penting mengetahui rona awal tingkat radioaktivitas radionuklida alam sebagai data base.

Tabel 3. Konsentrasi Radionuklida Alam dalam Bahan Pangan (Bq/kg)

No.	Bahan Pangan	Jenis Radionuklida	Konsentrasi (Bq/kg)	
			Desa Balong	Desa Tubanan
1.	Pisang	^{238}Th	0,09 ± 0,01	0,08 ± 0,01
	Ubi singkong		-	1,28 ± 0,01
	Daun singkong		0,54 ± 0,01	0,20 ± 0,01
	Ubi rambat		0,08 ± 0,01	-
	Beras		0,06 ± 0,01	0,04 ± 0,01
	Daging Ikan		0,25 ± 0,03	0,03 ± 0,01
	Daging ayam		1,00 ± 0,05	0,48 ± 0,03
2.	Pisang	^{226}Ra	0,19 ± 0,02	0,49 ± 0,03
	Ubi singkong		-	1,61 ± 0,04
	Daun singkong		1,39 ± 0,03	1,15 ± 0,02
	Ubi rambat		0,17 ± 0,03	-
	Beras		0,25 ± 0,03	0,17 ± 0,03
	Daging Ikan		Ttd	0,07 ± 0,03
	Daging ayam		2,77 ± 0,13	1,17 ± 0,09
3.	Pisang	^{228}Ra	0,42 ± 0,04	0,63 ± 0,04
	Ubi singkong		-	3,03 ± 0,04
	Daun singkong		4,69 ± 0,06	1,73 ± 0,04
	Ubi rambat		Ttd	-
	Beras		0,10 ± 0,03	0,15 ± 0,04
	Daging Ikan		0,58 ± 0,11	0,19 ± 0,04
	Daging ayam		5,17 ± 0,22	2,54 ± 0,04
4.	Pisang	^{40}K	161,83 ± 0,86	151,21 ± 0,86
	Ubi singkong		-	344,39 ± 1,42
	Daun singkong		116,18 ± 0,58	95,07 ± 0,52
	Ubi rambat		225,37 ± 1,23	-
	Beras		38,16 ± 0,53	44,45 ± 0,58
	Daging Ikan		106,03 ± 1,58	40,69 ± 0,61
	Daging ayam		114,00 ± 2,07	89,21 ± 1,65

Catatan: - tidak dilakukan pengukuran
 - Batas Deteksi terendah (BDT) : ^{228}Ra = 0,07 Bq/kg
 ^{226}Ra = 0,1 Bq/kg

tersebut. Hal ini tentunya dapat dilakukan evaluasi bahwa seperti dari beberapa hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa di dalam pupuk khususnya pupuk fosfat terkandung unsur radionuklida alam yang berpotensi meningkatkan radioaktivitas alam. Hal ini wajar apabila pemakaian pupuk pertanian yang terus menerus tentunya akan terjadi akumulasi di daerah dengan radioaktivitas radionuklida yang cukup besar^[5]. Dari hasil penelitian Made dkk tersebut juga dihasilkan konsentrasi radioaktivitas radionuklida alam dari beberapa jenis pupuk seperti ditunjukkan pada Tabel 2^[5]. Dari tabel 2 tersebut ditunjukkan bahwa semua jenis contoh pupuk mengandung unsur dari hasil peluruhan ²³⁸U, ⁴⁰K, dan ²³²Th. Unsur yang selalu ada pada setiap pupuk adalah ⁴⁰K. Oleh karena itu dengan data-data tersebut menunjukkan bahwa semakin besar pemakaian pupuk juga akan menambah akumulasi zat radioaktif alam di lingkungan tersebut.

Tabel 2. Data Hasil Analisis Beberapa Jenis Pupuk yang Digunakan di Indonesia^[5]
(Bq/kg)

Jenis Pupuk	²³⁸ U	²³² Th	⁴⁰ K
TSP (1)	102,6 ± 3,7	34,1 ± 1,2	349,7 ± 7,6
TSP (2)	92,1 ± 0,9	44,6 ± 1,9	352,2 ± 8,3
NPK (1)	33,6 ± 1,5	45,8 ± 1,6	568,6 ± 8,5
NPK (2)	45,2 ± 1,6	35,5 ± 1,0	686,3 ± 10,6
KCI (1)	90,1 ± 2,9	Tidak terdeteksi	830,1 ± 13,4
KCI (2)	89,5 ± 2,1	Tidak terdeteksi	800,4 ± 18,6

Sedangkan aktivitas radionuklida alam dalam bahan pangan, seperti dalam sayuran daun singkong, ubi singkong, ubi rambat, pisang, beras, disamping daging ayam dan ikan disajikan pada Tabel 3. Dari hasil pengukuran radionuklida alam yang terdapat dalam bahan pangan terlihat bahwa konsentrasi radionuklida ⁴⁰K tertinggi di semua jenis makanan yang bervariasi antara 38,16 – 344,39 Bq/kg berat bahan pangan segar. Umumnya konsentrasi radionuklida yang diamati dapat terukur di atas Batas Deteksi Terendah (BDT), namun untuk ²²⁶Ra dan ²²⁸Ra terukur lebih dari 1 Bq/kg pada daging ayam maupun tanaman singkong (daun dan ubi). Bahkan untuk ²²⁸Ra konsentrasinya dapat mencapai 2 – 5 Bq/kg.

Pada saat ini telah banyak dilakukan penelitian untuk menentukan kandungan radioaktivitas radionuklida alam dalam bahan pangan. Karena bahan pangan sangat berperan dalam kajian risiko terhadap internal dosis efektif. Hal ini disebabkan bahwa radionuklida alam deret khususnya ⁴⁰K, dan radionuklida deret ²³⁸U dan ²³²Th merupakan sumber utama paparan radiasi terhadap manusia yang disebabkan karena masuknya bahan pangan tersebut ke manusia. Untuk melakukan evaluasi terhadap

Sebagai bahan perbandingan, Tabel 4 menunjukkan besarnya konsentrasi radionuklida alam dalam bahan pangan yang berasal dari beberapa negara yang dapat digunakan sebagai evaluasi. Dari Tabel 4 tersebut jelas terlihat juga bahwa dari bahan pangan tersebut, konsentrasi radionuklida ^{40}K yang dominan. Hal ini menunjukkan bahwa tidak terdapat perbedaan terhadap kuantitas terhadap konsentrasi dari radionuklida dari deret ^{40}K yang terukur di daerah Ujung Lemahabang sebagai calon tapak PLTN dengan besarnya konsentrasi radionuklida alam dari bahan pangan yang berasal dari luar negeri^[8]. Dari tabel 4 tersebut juga dapat kita bandingkan antara jenis bahan pangan yang sama terhadap besarnya konsentrasi yang terkandung dalam bahan pangan tersebut. Seperti untuk bahan pangan jenis beras, konsentrasi radionuklida ^{40}K yang

Tabel 4. Konsentrasi radionuklida dalam makanan import di Iran^[8]
(Bq/kg)

No.	Sampel	Negara	^{40}K	^{226}Ra	^{232}Th
1	Daging Sapi	Brazil	106,0 ± 3,2	0,094 ± 0,019	0,142 ± 0,024
2	Daging Ayam	Prancis	52,4 ± 2,6	0,675 ± 0,115	0,195 ± 0,053
3	Beras	Pakistan	31,7 ± 1,0	0,112 ± 0,016	0,073 ± 0,015
4	Beras	Pakistan	49,6 ± 1,5	0,042 ± 0,020	0,056 ± 0,031
5	Beras	Pakistan	45,0 ± 1,4	0,054 ± 0,011	0,086 ± 0,016
6	Beras	Thailand	22,2 ± 0,9	0,217 ± 0,065	0,204 ± 0,061
7	Beras	Thailand	22,8 ± 1,1	0,575 ± 0,063	< 0,027
8	Beras	Pakistan	7,1 ± 0,4	0,134 ± 0,021	< 0,026
9	Beras	Irak	37,6 ± 2,6	< 0,018	< 0,027
10	Susu	Jerman	610,0 ± 18,3	0,064 ± 0,018	0,094 ± 0,027
11	Susu	Selandia Baru	605,5 ± 12,1	0,149 ± 0,034	0,147 ± 0,037
12	Susu	Selandia Baru	549,0 ± 16,5	0,186 ± 0,035	0,166 ± 0,032
13	Susu	Prancis	434,1 ± 13,0	0,05 ± 0,011	0,142 ± 0,026
14	Jewawut	Jerman	124,6 ± 2,5	0,432 ± 0,048	< 0,037
15	Gandum	Prancis	146,3 ± 7,3	0,570 ± 0,057	< 0,035
16	Gandum	Kazakhstan	99,4 ± 2,0	1,100 ± 0,176	< 0,035
17	Jagung	USA	87,0 ± 2,6	0,210 ± 0,057	0,195 ± 0,055
18	Jagung	USA	9,3 ± 0,5	0,147 ± 0,025	< 0,035

terukur di daerah Ujung Lemahabang dan sekitarnya yaitu desa Balong (38,16 Bq/kg) dan desa Tubanan (44,45 Bq/kg) apabila dibandingkan dengan konsentrasi radionuklida ^{40}K dalam beras yang berasal dari negara Pakistan (31,7 ± 1,0 dan 49,6 ± 1,5 Bq/kg), Thailand (22,2 ± 0,9 dan 22,8 ± 1,1 Bq/kg) dan Irak (37,6 ± 2,6 Bq/kg) menunjukkan bahwa konsentrasi radionuklida ^{40}K dari bahan pangan beras yang berasal dari desa

Tubanan mempunyai konsentrasi yang paling tinggi dibanding dengan konsentrasi dari daerah atau negara lain, sedangkan konsentrasi terendah terdapat pada bahan pangan jenis beras yang berasal dari Negara Thailand. Demikian juga dengan jenis radionuklida alam ^{226}Ra , konsentrasi radionuklida dari bahan beras, tertinggi berasal dari Negara Thailand, dan terendah berasal dari Pakistan. Sedangkan konsentrasi ^{232}Th , nilai tertinggi berasal dari Thailand dan terendah berasal dari Thailand, Pakistan dan Irak. Demikian juga dengan jenis radionuklida yang paling dominan adalah konsentrasi radionuklida yang berasal dari radionuklida dari deret ^{40}K .

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian sebelumnya, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

- Studi ini menyediakan database untuk radioaktivitas radionuklida alam di bahan pangan yang diambil di daerah calon tapak PLTN Ujung Lemahabang, khususnya di desa Tubanan dan desa Balong.
- Jenis radionuklida alam yang ada di dalam bahan makanan meliputi radionuklida alam berasal dari ^{40}K , ^{238}Th , ^{226}Ra , dan ^{228}Ra .
- Konsentrasi radionuklida dalam tanah pertanian mempunyai nilai yang cukup tinggi untuk radionuklida ^{238}Th , ^{226}Ra , dan ^{228}Ra dan terendah konsentrasi radionuklida ^{40}K .
- Konsentrasi radionuklida terbesar ditemukan pada bahan pangan yang berasal dari ubi singkong yaitu sebesar 344,39 Bq/kg untuk ^{40}K , sedang nilai terendah ditemukan pada jenis bahan pangan yang berasal dari daging ikan yaitu sebesar 0,03 Bq/kg untuk ^{238}Th .

V. DAFTAR PUSTAKA

1. BENEDICT, M. and PIGFORD, T.H., Nuclear Chemical Engineering, Ed. 2nd, McGraw-Hill Book Company, New York, 1981.
2. HEATON, B. and LAMBLEY, J., Tenorm in the Oil, Gas and Mineral Mining Industry, J. Appl. Radiation and Isotop, 1995.
3. STRUTT, R., The accumulation of Helium in Biological Time, Proceeding R. Soc. London Ser. A, 1908.
4. EISENBUD, M., The Natural Radiation Environment Health Physic. Rad. Protect. J., 1993.
5. PANDE MADE U., M. SRI SAENI, YUS RUSDIAN A., dan NURMALA, Sebaran Zat Radioaktif di Lingkungan dan Hubungannya dengan Perilaku Petani dalam Penggunaan Pupuk, Seminar PPs IPB, 2002.
6. PFISTER, H., PHILIP, G., PAULY, H., Population dose from natural radionuclides in Phosphate Fertilizers, Radiation Environmental Biophys, 1977.
7. LARDINOYE, M.H., WETERINGS, K. VAN DE BERG., S., Unexpected Ra-226 build-up in a wet process Phosphoric acid Plant, Health Phys, 1982.
8. HOSSEINI, TAHEREH, ASEFI, MARYAM, BARATI, HIRSA and KARIMI, Measurement of Natural and Artificial Radionuclide Concentrations in Imported Foodstuffs in Iran.