

KLIERENS LIMBAH PADAT URANIUM DENGAN SPEKTROMETER GAMMA

Syarbaini dan Bunawas

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi – BATAN
Jl. Lebak Bulus Raya No. 49, Jakarta Selatan
e-mail: sarbini@batan.go.id
(Diterima 27-6-2011, disetujui 4-10 -2011)

ABSTRAK

KLIERENS LIMBAH PADAT URANIUM DENGAN SPEKTROMETER GAMMA. Penetapan klierens material terkontaminasi dari kegiatan desmantling atau dekomisioning perlu dibuktikan dengan hasil pengukuran radionuklida yang terkandung dalam material tersebut. Pada penelitian ini telah dikembangkan teknik pengukuran langsung uranium dalam limbah padat untuk kepentingan klierens menggunakan spektrometri gamma dengan detektor HPGe. Metode pengukuran dikembangkan berdasarkan energi gamma 1001 keV dari Pa-234m dengan mempertimbangkan faktor-faktor yang mempengaruhi pengukuran seperti absorpsi diri, karakteristik detektor, dan cacahan latar. Untuk tujuan validasi, metode dibandingkan dengan teknik aktivasi neutron (AAN). Efisiensi deteksi pada energi 1001 keV adalah antara 0,0991–0,1369 cps/Bq untuk densitas 0,51 – 1,81 g/cm³ dengan batas terendah deteksi antara 8 – 10 Bq/kg. Metode ini dapat diandalkan untuk pengukuran U-238 konsentrasi tinggi dengan nilai P<1%, sedangkan kinerja spektrometer gamma memperlihatkan performa tinggi yang ditunjukkan dengan nilai Zscore <1.

Kata Kunci : klierens, uranium, spektrometri gamma

ABSTRACT

CLEARANCES OF SOLID WASTE URANIUM BY USING GAMMA SPECTROMETRY. Clearances of contaminated materials arising from desmantling or decommissioning must be provided with the result of measurement of radionuclide content in such materials. In this research, direct measurement of uranium in solid waste for a clearance requirement had been developed by using gamma spectrometric with HPGe detector. The measurement method was developed based on 1001 keV gamma energy of Pa-234m considering a self absorption, detector characteristic, background level factors. For validation purpose, this method was compared with a neutron activation analysis (NAA) techniques. Efficiency for 1001 keV of Pa-234m was 0,0991–0,1369 cps/Bq on dencity of 0,51–1,81 g/cm³ with a minimum detectable level of 8–10 Bq/kg. This method was useful for high concentration of U-238 with a precision in acceptance criteria P <1% and the gamma spectrometer showed a high performance with a value Zscore <1.

Free Terms : clearances, uranium, gamma spectrometry

I. PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PP. No. 29 tahun 2008) menyatakan bahwa zat radioaktif terbuka, limbah radioaktif, atau material terkontaminasi atau teraktivasi yang telah mencapai tingkat klierens dapat dibebaskan dari pengawasan. Untuk memperoleh pembebasan dari pengawasan, maka harus mengajukan permohonan penetapan klierens secara tertulis kepada Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dengan melampirkan dokumen yang terdiri dari hasil pengukuran paparan radiasi, dan hasil analisis mengenai aktivitas dan radionuklida yang terkandung dalam material terkontaminasi atau teraktivasi. Jika dokumen menunjukkan bahwa tingkat klierens terpenuhi, maka Kepala BAPETEN menerbitkan penetapan klierens^[1].

Tingkat klierens adalah suatu nilai dimana kandungan bahan radioaktif dalam limbah radioaktif atau material yang terkontaminasi sangat rendah, sehingga tidak diperlukan perlakuan khusus karena tidak mempunyai efek yang patut dipertimbangkan terhadap manusia dan lingkungan. Badan Tenaga Atom Internasional (IAEA = *Internasional Atomic Energy Agency*) pada Januari 1996, menetapkan tingkat klierens untuk radionuklida yang ada dalam zat padat yang dituangkan dalam TECDOC-855. Tingkat klierens diperlukan pada saat ada kegiatan perbaikan dan penggantian fasilitas di instalasi nuklir dalam skala kecil maupun besar atau instalasi non nuklir yang berpotensi menghasilkan *by product* yang mengandung unsur radioaktif uranium seperti industri pupuk fosfat.

Bahan baku untuk pembuatan pupuk fosfat adalah batuan fosfat yang mengandung uranium dengan konsentrasi relatif tinggi. Papastefanou^[2] melaporkan bahwa konsentrasi aktivitas ^{238}U dalam batuan fosfat berkisar antara 182–1800 Bq/kg dengan rata-rata 984 Bq/kg, dan ^{266}Ra berkisar antara 112–1800 Bq/kg dengan rata-rata 1050 Bq/kg. Pemrosesan batuan fosfat oleh industri pupuk fosfat, mengakibatkan ^{238}U dan anak-anak luruhnya terdistribusi di dalam produk-produk utama, produk sampingan (*by product*) dan limbah industri tersebut. Sehubungan dengan itu pengembangan teknik pengukuran radionuklida uranium metode cepat dan dapat dipercaya untuk mengetahui material atau komponen yang terkontaminasi uranium untuk kepentingan klierens pada waktu kegiatan dekomissioning suatu industri sangat diperlukan^[3].

Kegiatan klierens limbah uranium mempunyai tanggung jawab yang berat baik secara hukum, psikologi dan moral, karena menyangkut paparan dan

dampak radiologik terhadap masyarakat. Oleh karena itu hasil pengukuran harus dapat dipercaya dan dipertanggung jawabkan. Dalam makalah ini dilaporkan aplikasi spektrometer gamma untuk pengukuran uranium dalam limbah padat untuk proses kegiatan klierens yang telah dikembangkan di Laboratorium Keselamatan, Kesehatan dan Lingkungan (Lab. KKL) PTKMR - BATAN. Makalah ini menguraikan metodologi fundamental pengukuran uranium dengan spektrometri gamma, beserta faktor-faktor koreksi yang mempengaruhinya seperti faktor kalibrasi, absorpsi diri dan lain-lain serta validasi metode dengan metode yang sudah mapan.

II. Dasar Teori

2.1. Kesetimbangan Uranium

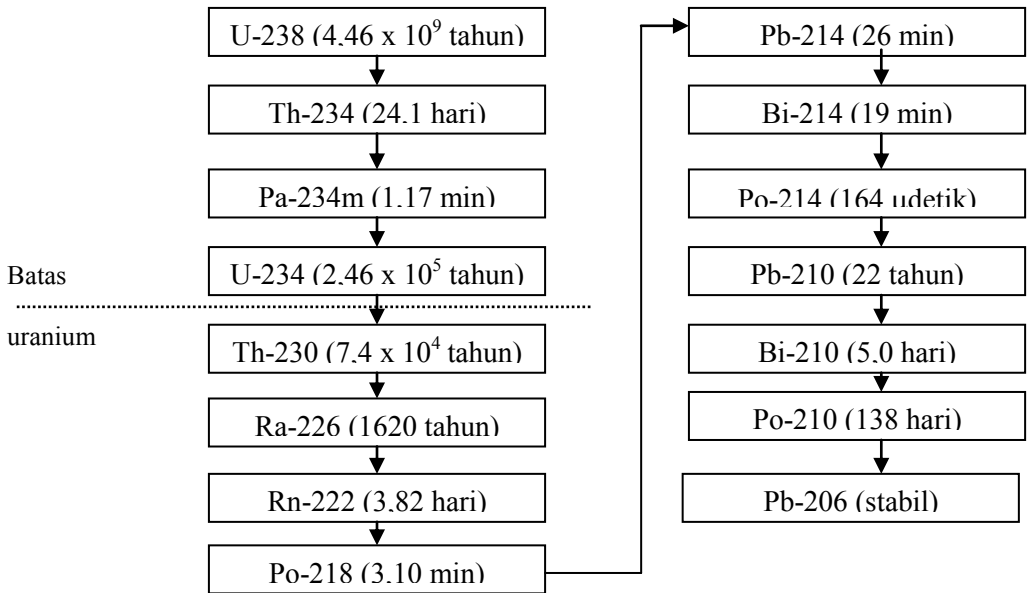
Dalam kondisi alami di lingkungan, khususnya untuk batuan yang *masive*, uranium alam (U-238 99,27 %, U-235 0,718 %) mengalami peluruhan dan berada dalam kesetimbangan sekuler dengan anak-anaknya. Pengukuran dalam kondisi alami menggunakan spektrometer gamma dengan detektor germanium kemurnian tinggi (HPGe) dapat dilakukan dengan cukup baik dan mudah melalui energi gamma dari anak-anaknya yang berumur pendek seperti Pb-214 (242; 295 dan 352 keV) dan Bi-214 (609 dan 1120 keV) [4].

Untuk kondisi non-alami, misalnya dalam suatu instalasi nuklir yang memproses *Yellow-cake*, U-238 tidak berada dalam kesetimbangan dengan anak luruhnya. U-234 dengan waktu paro panjang 246.000 tahun merupakan pembatas nyata untuk pembentukan Pb-214 dan Bi-214 sebab adanya proses pengayaan uranium dan tanpa adanya anak luruhnya yang lain [5]. Hanya Pa-234m dan Th-234 yang berada dalam kesetimbangan dengan U-238 setelah beberapa bulan sekitar 250 hari, seperti yang terlihat pada Gambar 1 dan Tabel 1.

Adapun persamaan peluruhan radioaktif U-238 dan Th-234 adalah sebagai berikut :

$$N_1 = N_{(0)} e^{-\lambda_1 t} \quad (1)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N(0) e^{-\lambda_2 t} - \left[\frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) - N_2(0) \right] e^{-\lambda_1 t} \quad (2)$$

Gambar 1. Peluruhan radioaktif U-238 ^[5]

dengan indek 1 untuk U-238 dan indek 2 untuk Th-234. Mengingat umur paro U-238 ($4,46 \times 10^9$ tahun) jauh lebih panjang dibandingkan Th-234 (24,1 hari), maka persamaan (1) dan (2) dapat disederhanakan dengan pendekatan :

$$N_1 = N(0) \quad (3)$$

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (4)$$

Yang menghasilkan hubungan :

$$\frac{\lambda_2 N_2}{\lambda_1 N_1} = 1 - e^{-\lambda_2 t} \quad (5)$$

Persamaan (5) di atas tak lain adalah persamaan perbandingan aktivitas Th-234 terhadap U-238, seperti yang ditampilkan pada Tabel 1. Mengingat umur paro Pa-234m hanya 1,17 menit, maka dapat dikatakan Pa-234m akan selalu berada dalam kesetimbangan radioaktif dengan Th-234 bila dihitung dengan persamaan (5) seperti pada lihat Tabel 2.

Tabel 1.
Tumbuhnya Aktivitas Th-234 dari induknya U-238 dalam persen

Pertumbuhan	40 hari	80 hari	120 hari	160 hari	200 hari	240 hari
$\frac{A_{Th-234}}{A_{U-238}}$	68,34	89,98	96,82	98,99	99,68	99,90

Tabel 2.
Tumbuhnya Aktivitas Pa-234m dari induknya Th-234 dalam persen

Pertumbuhan	2 min	4 min	6 min	8 min	10 min	12 min
$\frac{A_{Pa-234m}}{A_{Th-234}}$	69,41	90,64	97,14	99,12	99,73	99,92

Pada Tabel 3 dapat dilihat energi radiasi gamma yang dapat digunakan untuk pengukuran U-238 maupun U-235. Pengukuran U-238 berdasarkan Th-234 pada energi 63 keV dan 93 keV untuk sampel padat dengan densitas > 1 tidak mudah karena adanya absorpsi diri dari sampel, bacaan latar yang tinggi serta diperlukan detektor Germanium energi rendah (LEGe). Selain dari pada itu pada energi 93 keV, ada kontribusi radiasi sinar x pada energi 91,5 keV yang berasal dari Ac-228 (anak luruh Th-232) dan dalam situasi tertentu ada kontribusi sinar x dari U-235. Oleh karena itu pemilihan energi 1001 keV dari Pa-234m untuk pengukuran U-238 menjadi pilihan utama walaupun intensitas (*yield*) rendah hanya 0,845 % tetapi bacaan latar pada energi 1000 keV sangat rendah sekitar 2 – 4 cacah/kanal dalam 10.000 detik^[5,7].

Pengukuran U-235 biasanya digunakan energi 185,9 keV, tetapi perlu hati-hati karena adanya interferensi pada energi 186 keV dari Ra-226. Apabila konsentrasi Ra-226 dalam sampel rendah dan bacaan latar dari sistem spektrometer juga rendah, maka substraksi sinyal dengan iterasi dekonvolusi akan menghasilkan puncak U-235 yang bersih^[7].

2.2. Aplikasi Kriteria Klierens

Dalam industri-industri pertambangan dan industri yang memanfaatkan material dari dalam kulit bumi sebagai bahan baku umumnya, ditemukan tiga isotop uranium alam yang akan mengendap di sistim peralatan proses (pipa, *valve*, tangki dll.) yaitu U-238, U-234 dan U-235 serta hasil luruhannya yang berumur pendek Th-234 dan Pa-234m. Menurut rekomendasi Komisi Negara-Negara Eropa No. 113 tahun 2000^[8], tingkat klierens untuk ketiga isotop uranium dalam material masing-masing adalah 1 Bq/g dan untuk permukaan

material yang terkontaminasi uranium adala 10 Bq/m^2 seperti yang terlihat pada Tabel 4.

Tabel 3.

Energi Gamma Uranium untuk Analisis ^[4]

No.	Nuklida	Energi Gamma (keV)	Intensitas (%)	Interferensi
1.	Th-234	62,9 + 63,3	3,830	-
2.	Th-234	92,6	5,420	Ac-228, U-235
3.	Pa-234m	1001,3	0,845	-
4.	U-235	143,8	10,50	-
5.	U-235	185,7	54,70	Ra-226

Tabel 4.

Tingkat Klierens untuk Material yang mau dibuang ke Lingkungan maupun dipakai ulang ^[9,10]

No.	Isotop	Tingkat Klierens ke Lingkungan (Bq/g)	Tingkat Klierens dipakai ulang (Bq/cm ²)
1.	U-238	1	10
2.	U-234	1	10
3.	U-235	1	10

Berdasarkan Tabel 1, dan material yang akan diklierens pada umumnya telah berumur lebih dari 1 tahun, maka dapat dipastikan bahwa kontaminasi uranium berada dalam kesetimbangan radioaktif, sehingga kriteria klierens harus diverifikasi berdasarkan ratio aktivitas isotop uranium dan tingkat klierens harus tetap lebih kecil ≤ 1 dengan menggunakan formula berikut ^[8]:

$$\frac{A_{U-238}}{N_{U-238}} + \frac{A_{U-234}}{N_{U-234}} + \frac{A_{U-235}}{N_{U-235}} \leq 1 \quad (6)$$

di mana :

A_U = aktivitas isotop uranium ke i

N_U = tingkat klierens isotop uranium ke i

Berdasarkan ratio isotop uranium alam, maka dimungkinkan penentuan tingkat klierens untuk U-238 sebesar $0,497 \text{ Bq/g}$ ^[9].

III. TATA KERJA

1. Bahan dan Peralatan :

Bahan untuk pembuatan matriks sumber standar dalam wadah marinelli terdiri dari sumber standar ^{166m}Ho bentuk larutan, air bebas ion dan bebas mineral (air demi), sodium benzoat cap kupu-kupu, dan agar-agar cap burung

sriti. Bahan sampel berasal dari limbah industri (*by product*) pupuk posfat yaitu berupa kerak (slag).

Peralatan disamping alat utama Spektrometer gamma dengan detektor HPGe, Canberra-USA juga digunakan alat-alat penunjang seperti timbangan orde mikrogram buatan Mettler – USA, alat pemanas, dan alat-alat gelas lainnya. Detektor HPGe tipe coaxial dengan efisiensi relatif ~ 23 % terhadap NaI(Tl) yang diletakkan di dalam *shielding* latar rendah yang terdiri atas Pb muda 10 cm, Pb tua 5 cm, timah putih (Sn) 1 cm, tembaga (Cu) 0,3 cm dan polietilen (PE) 0,5 cm, dengan berat *shielding* total ~ 1620 kg. Dengan sistem ini cacah latar pada energi 1001 keV dapat direduksi sepersepertus empat puluh satu (1/141).

1. Pembuatan Sumber Standar dalam Marinelli :

Matrik standar disiapkan dengan cara melarutkan agar-agar dan bahan pengawet (sodium benzoat) ke dalam air demi di dalam wadah stainless steel, kemudian wadah dipanaskan dan diaduk merata. Dalam kondisi panas, ditambahkan larutan sumber ^{166m}Ho , aduk sampai rata selama 20 menit, selanjutnya dimasukkan ke dalam marinelli sampai hampir penuh. Setelah dingin berupa gel, marinelli ditutup rapat, dan siap digunakan sebagai standar. Matrik standar disiapkan untuk 5 variasi densitas dari 0,51 – 1,81 g/cm³.

2. Pengukuran U-238 dalam sampel

Sampel digerus dan diayak 100 *mesh* dimasukkan dalam beker marineli dan dilem rapat, kemudian dibiarkan 30 hari untuk memastikan Ra-226 berada dalam kesetimbangan dengan U-238. Sampel diukur melalui energi gamma 1001 keV dari Pa-234m dengan intensitas (*yield*) = 0,845. Absorpsi diri dari sampel dikoreksi untuk koefisien absorpsi dan densitas. Faktor koreksi atenuasi (CORR) diperoleh dengan persamaan ^[12] :

$$CORR = \frac{\mu_L \cdot L}{1 - \exp(-\mu_L \cdot L)} \quad (7)$$

di mana μ_L sama dengan koefisien absorpsi linier bergantung pada energi dan material (1/m) dan L adalah total sampel (m). Setiap aktivitas (konsentrasi) dalam sampel yang diukur, dikalikan dengan faktor koreksi ini untuk memperoleh konsentrasi sebenarnya. Konsentrasi U-238 dihitung dengan persamaan :

$$C_{U-238} = \frac{N_T - N_B}{E.Y.M} \cdot xCORR \quad \text{Bq/kg} \quad (8)$$

dengan:

N_T, N_B = laju cacah total dan latar (cps)

E = efisiensi pencacahan pada energi 1001 keV (cps/Bq)

M = massa sampel limbah padat (kg) dan Y adalah intensitas relatif 0,00845

3. Penetapan Batas Terendah Deteksi dan Waktu Cacah Optimum

Konsentrasi U-238 terendah yang dapat dideteksi (BTD) bergantung pada karakteristik detektor (efisiensi, FWHM, dan ratio puncak compton), sistem *shielding* (bacaan latar), kondisi isotop (energi dan *yield*) dan lama pencacahan yang diekspresikan dengan persamaan ^[5] :

$$BTD_{U-238} = \frac{Am}{E.Y.T_s} \sqrt{(2.b.N_B.R + \frac{Am^2}{4} + \frac{Am}{2})} \quad (9)$$

dengan :

Am = kesalahan fraksional resiprocal ~ 5

b = *shape factor* ~ 2 untuk puncak Gaussian simetris

R = resolusi energi (FWHM) pada $E = 1001$ keV

E = efisiensi pencacahan pada energi 1001 keV (cps/Bq)

T_s = lama pencacahan sampel (detik)

N_B = laju cacah latar (cps)

Untuk proses klierens bahan limbah yang jumlahnya banyak, maka perlu waktu pencacahan yang optimum. Mengingat batas klierens untuk U-238 yang berada dalam kesetimbangan dengan U-234 adalah sebesar 497 Bq/kg, maka dengan menggunakan persamaan (9) dapat diperkirakan waktu pencacahan optimum untuk klierens (T_K) :

$$T_K = \frac{Am}{E.Y.497} \sqrt{(2.b.N_B.R + \frac{Am^2}{4} + \frac{Am}{2})} \quad (10)$$

4. Validasi Teknik Pengukuran

Untuk validasi pengukuran uranium dengan teknik ini, dilakukan uji banding dengan metode AAN (Analisis aktivasi neutron) yang sudah mapan. Kualitas hasil pengukuran dengan spektrometri gamma diuji menggunakan persamaan ^[13] :

$$\text{Bias Relatif} = \frac{C\gamma - C_{AAN}}{C_{AAN}} \times 100\% \quad (11)$$

dengan :

$C\gamma$ = konsentrasi pengukuran spect γ (Bq/kg)
 C_{AAN} = konsentrasi pengukuran AAN (Bq/kg)

Hasil pengukuran U-238 secara langsung dengan spektrometer γ dinyatakan memenuhi kriteria keberterimaan apabila nilai presisi (P) $\leq 12\%$ untuk sampel *spike*. Nilai P ditentukan dengan persamaan berikut ^[12, 13] :

$$P = \sqrt{\left(\frac{U_{AAN}}{C_{AAN}}\right)^2 + \left(\frac{U\gamma}{C\gamma}\right)^2} \times 100\% \quad (12)$$

dengan U_{AAN} dan $U\gamma$ adalah kesalahan relatif pengukuran dengan NAA dan spektrometer γ .

Kinerja pengukuran ditentukan secara kuantitatif dengan Zscore menggunakan persamaan :

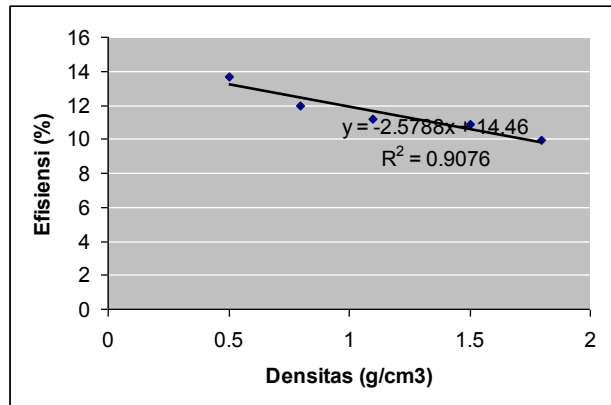
$$Zscore = \frac{C\gamma - C_{AAN}}{0,1.C_{AAN}} \quad (13)$$

di mana,

- ≤ 2 memuaskan
- $2 < Z < 3$ kurang memuaskan
- ≥ 3 tidak memuaskan

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalibrasi spektrometer gamma menggunakan sumber standar Ho-166m yang memancarkan radiasi gamma multi energi dari 49 – 1427 keV dalam wadah marinelli dengan matrik agar-agar (gel) untuk 5 variasi densitas dari 0,51 – 1,81 g/cm³, terlihat bahwa efisiensi cacahan radiasi gamma untuk energi E = 1001 keV sangat bergantung pada nilai densitas dengan nilai 0,0991 – 0,1369 cps/Bq seperti pada Gambar 3. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran langsung uranium yang terkandung dalam suatu bahan dengan spektrometer gamma, perlu dikoreksi terhadap nilai densitas dari bahan tersebut.



Gambar 3. Efisiensi deteksi untuk energi $E = 1001$ keV fungsi densitas (ρ)

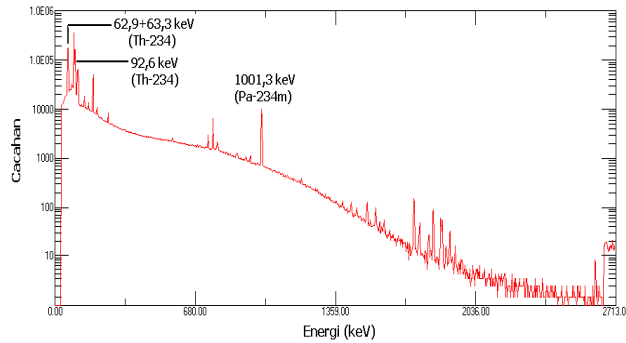
Pada Gambar 4, diperlihatkan contoh spektrum gamma hasil pengukuran uranium secara teknik pengukuran langsung dengan spektrometer gamma dengan detektor HPGe seperti yang dikembangkan dalam penelitian ini.

Berdasarkan hasil cacahan latar belakang (*background*) selama 17 jam dan data efisiensi fungsi densitas dengan menggunakan persamaan (9), maka batas terendah deteksi (BTD) yang dapat dicapai dengan metode ini adalah berkisar antara 8–10 Bq/kg. Nilai ini masuk ke dalam orde nilai yang dilaporkan oleh peneliti lain yaitu antara 9–20 Bq/kg^[5,7,8].

Berdasarkan hasil cacahan latar belakang selama 17 jam dan data efisiensi fungsi densitas dengan menggunakan persamaan (10), diperoleh waktu pencacahan optimum berkisar antara 5 – 7 menit. Hal ini memperlihatkan bahwa untuk kepentingan klierens limbah padat dengan densitas 0,51 – 1,81 g/cm³, waktu pencacahan yang dibutuhkan adalah selama 5–7 menit.

Hasil pengukuran beberapa contoh sampel limbah industri dengan metode ini dan teknik AAN (Analisis Aktivasi Neutron) diperlihatkan pada Tabel 5. Pengukuran U-238 berdasarkan Pa-234m pada energi 1001 keV. Terlihat bahwa hasil analisis dengan metode langsung cenderung lebih rendah dan mempunyai nilai kesalahan relatif antara (-21 %) – (+2 %) jauh lebih besar dibandingkan AAN yang hanya 1 – 2 %. Hal ini dapat terjadi karena *yield* dari Pa-234m sangat rendah hanya 0,845 % dan sampel yang diukur konsentrasinya rendah yaitu dibawah 60 Bq/kg. Untuk mereduksi kesalahan relatif hasil

pengukuran langsung, dilakukan pengujian dengan sampel limbah industri yang mengandung uranium dengan konsentrasi tinggi (di atas nilai klierens). Hasil dapat dilihat pada Tabel 5 untuk No. Sampel 4, 5 dan 6.



Gambar 4. Spektrum gamma uranium

Nilai presisi (P) untuk sampel No. 1 – 3 dengan aktivitas U-238 rendah, diperoleh nilai P antara 15 – 45 % jauh lebih tinggi dari batas keberterimaan sebesar 12 %. Hal ini menginformasikan bahwa hasil pengukuran sampel No. 1 – 3 tidak dapat dipakai nilainya, sedangkan hasil pengukuran sampel 4 – 6, nilai P jauh lebih rendah dari 12 % yang berarti hasil pengukurannya dengan presisi tinggi atau memenuhi kriteria keberterimaan.

Berdasarkan hasil analisis Z score untuk semua sampel di atas, hanya ada satu sampel (No. 2) yang mempunyai nilai $Z = 2,07$, sedangkan yang lainnya ≤ 2 . Hal ini menunjukkan bahwa kinerja spektrometer γ untuk pengukuran langsung U-238 memenuhi kriteria memuaskan.

Tabel 5.

Hasil Interkomparasi Pengukuran U-238 metode langsung dengan AAN.

No.	Sampel	Spektrometer γ (Bq/kg)	AAN (Bq/kg)	Bias (%)	Nilai P (%)	Zscore
1.	Padat 1	31 ± 14	32 ± 2	- 3	45,59	0,31
2.	Padat 2	42 ± 12	53 ± 2	- 21	28,81	2,07
3.	Padat 3	40 ± 6	39 ± 1	+ 2	15,21	0,26
4.	Padat 4	26659 ± 97	27665 ± 38	-3,6	0,42	0,36
5.	Padat 5	25244 ± 80	26599 ± 46	-5,1	0,36	0,51
6.	Padat 6	24694 ± 116	24995 ± 79	- 1,2	0,56	0,12

Untuk keperluan investigasi suatu lokasi atau kawasan industri, apakah tanahnya terkontaminasi uranium atau tidak, Bikit dkk^[7] mengembangkan metode pengukuran spektrometer γ dengan formula sebagai berikut :

$$C_{KU} = C_U - K.C_{Ra} \text{ (Bq/kg)} \quad (14)$$

Faktor K adalah ratio konsentrasi pada tanah yang tidak terkontaminasi,

$$K = \frac{C_U}{C_{Ra}} \quad (15)$$

dengan C_U dan C_{Ra} adalah konsentrasi U-238 dan Ra-226 dalam sampel sedangkan C_{KU} adalah konsentrasi kontaminan U-238. Apabila nilai K sebesar $1,3 \pm 0,3$ dan $C_{Ra} \sim 29$ Bq/kg digunakan untuk menghitung nilai C_{KU} pada Tabel 5 untuk sampel no. 1 - 3, maka ada indikasi bahwa sampel yang diukur tersebut terkontaminasi uranium dengan peningkatan sebesar $1,3 - 15,3$ Bq/kg. Namun demikian karena nilainya masih lebih rendah dari tingkat klierens sebesar 497 Bq/kg, maka tidak perlu dilakukan tindakan remediasi karena masih aman bagi masyarakat dan lingkungan.

V. KESIMPULAN

Uranium dalam contoh limbah padat, dapat diukur secara langsung menggunakan spektrometer gamma dengan detektor HPGe berdasarkan energi gamma $E = 1001$ keV. Metode dapat digunakan untuk kegiatan klierens limbah padat yang mengandung uranium dengan konsentrasi di atas 1000 Bq/kg dengan waktu pencacahan optimum berkisar antara 5 – 7 menit bergantung pada densitas limbah.

Hasil uji banding metode hasil penelitian ini dengan analisis aktivasi neutron (AAN), diperoleh informasi bahwa kinerja spektrometer gamma dalam kondisi baik dengan nilai presisi (P) < 1 % dan nilai Zscore < 1. Metode ini perlu diujicobakan di lapangan dalam kaitannya dengan kegiatan proses klierens contohnya untuk kegiatan dekomisioning di industri pupuk fosfat, mengingat batas klierens uranium cukup rendah yaitu sebesar 497 Bq/kg.

VI. DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia (PP. No. 29 tahun 2008) tentang Perizinan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion dan Bahan Nuklir

2. Papastefanou, C.(2001). Radiological Impact from Atmospheric Releases of ^{238}U and ^{226}Ra from Phosphate Rock Processing Plants. *J. Environmental Radioactivity*. 54. 75–83.
3. Gomez, J. J., Garcia, F. J., Salas, E., Alvarez, F., Sollez, E., Bustillo, J., Carretero, L. (2007). Specific Conditional Clearance for Metal Scrap from Santa Maria de Garona and Confrentes Nuclear Power Plants, Proceeding IRPA, Greece.
4. Miller, K. M., Shebell, P., and Klenic, G. A.(1994). In Situ Gamma Ray Spectrometry for the Measurement of Uranium in Soils, *Health Physics*. 62, 140–150.
5. Uyttenove, J., Lemmens, M., and Zizi, M. (2002). Depleted Uranium in Kosovo : Results of a Survey by Gamma Spectrometry on Soil Samples. *Health Physics*. 83, 547-548.
6. Bunawas (1990). Radium-266 yang terkandung dalam Air Minum Mineral. Laporan Internal PSPKR.
7. Bikit, I., Slivka, J., Krmar, M., Veskovic, M., Conkic, L., Varga, E., Curcic, S., Mrdja, D. (2005). Depleted Uranium Determination in Soil Samples. *Radioactivity in the Environment*. 7, 150–162.
8. CEC, (2000). Recommended Radiological Protection Criteria for the Clearance of Buildings and Building Rubble from the dismantling of nuclear Installations, *Radiation Protection*. 113 (RP-113).
9. Alvarez, A., Sancho, C., Conea, E., Navarro, N., Lanzas, R.,(2007). Clearance Measurements of Buildings Structures of CIEMAT Facilities. Proceeding IRPM 12, Greece.
10. IAEA (2004). Application of the Concepts of Exclusion, Exemption, and Clearance, *Safety Standard Series RS-G-1.7*
11. Bunawas, Dadong, I., dan Wahyudi (2008). Sistem Spektrometer Gamma Latar Rendah dengan Detektor Germanium Energi Rendah (LEGe) untuk pengukuran Pb-210, belum dipublikasikan.
12. Dadong, I. (1997, Juni). Koreksi Serapan Diri Sinar γ dalam Wadah Marinelli 1 Liter. Prosiding Presentasi Ilmiah PPNY – BATAN, Yogyakarta. 387–392.
13. ISO (1997). Proficiency Testing by Inter laboratory Comparisons, Part 1 : Development and Operation of Proficiency Testing Schemes (Second Edition), *ISO/IEC Guide 43-1*.
14. IAEA (2004). Final Report Proficiency Test on the Determination of α , β and γ Emitting Radionuclides, TC Project RAS /9/2004.