

ISSN 1410 – 9565  
Akreditasi No. 399/AU2/P2MI-LIPI/04/2012  
SK Kepala LIPI Nomor : 395/D/2012  
Tanggal : 24 April 2012

# JURNAL TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH

---

---

Volume 17 Nomor 2 Desember 2014



Pusat Teknologi Limbah Radioaktif  
Badan Tenaga Nuklir Nasional

J. Tek. Peng. Lim.	Vol. 17	No. 2	Hal. 1-65	Jakarta Desember 2014	ISSN 1410-9565
--------------------	---------	-------	-----------	--------------------------	----------------

**JURNAL TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH**  
**Volume 17 Nomor 2 Desember 2014**

Jurnal enam bulanan  
Pertama terbit Juni 1998

Penanggung Jawab / Pengarah

Ir. Suryantoro, MT  
(Ka. PTLR BATAN)

Pemimpin Redaksi

Hendra Adhi Pratama, S.Si., M.Si. (PTLR BATAN)

Editor

Dr. Budi Setiawan, M.Eng. (PTLR BATAN)  
Dr. Heny Suseno, M.Si. (PTKMR BATAN)  
Drs. Gunandjar SU. (PTLR BATAN)  
Dr. Asep Nugraha Ardiwinata (KEMENTAN)  
Dr. rer. nat. Budiawan (Dept. Kimia, Universitas Indonesia)

Mitra Bestari

Prof. Drs. Erwansyah Lubis, M.Si. (PTKMR BATAN)  
Dr. Sahat M. Panggabean (Kementerian Negara Riset dan Teknologi)  
Dr. Muhammad Nurdin (Universitas Haluoleo)  
Dr. Muslim (Fak. Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro)

Tim Redaksi

Heru Sriwahyuni, S.ST.  
Mirawaty, S.Si  
Yuli Purwanto, A.Md

Penerbit

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif  
Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Kawasan Puspiptek Serpong, Tangerang Selatan 15310, Indonesia  
Tel. +62 21 7563142, Fax. +62 21 7560927  
e-mail : [ptlr@batan.go.id](mailto:ptlr@batan.go.id)

## JURNAL TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH Volume 17 Nomor 2 Desember 2014

### Pengantar Redaksi

Puji syukur ke hadirat Allah Yang Maha Esa atas terbitnya Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah, Volume 17 Nomor 2, Desember 2014. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah memuat karya tulis ilmiah dari kegiatan penelitian dan pengembangan di bidang pengelolaan limbah yang meliputi aspek-aspek pengolahan limbah, penyimpanan limbah, dekontaminasi-dekomisioning, keselamatan lingkungan dan radioekologi kelautan.

Pada penerbitan kali ini kami menyajikan makalah-makalah hasil penelitian dan pengembangan setelah melalui pemeriksaan oleh tim editor yang terdiri bahan gelas limbah pada vitirifikasi limbah cair tingkat tinggi, karakteristik detektor untuk gamma scanner limbah radioaktif, disposal limbah radioaktif, pengelolaan limbah tandan kosong kelapa sawit dan aplikasi biomassa, radioekologi kelautan zona kedaruratan nuklir di Indonesia.

Semoga penerbitan jurnal ini dapat memberikan informasi yang bermanfaat untuk dijadikan acuan dalam pelaksanaan kegiatan penelitian dan pengembangan pengelolaan limbah di masa yang akan datang.

Jakarta, Desember 2014

## JURNAL TEKNOLOGI PENGELOLAAN LIMBAH Volume 17 Nomor 2 Desember 2014

### Daftar Isi

- Aisyah:** Pemanfaatan Abu Layang sebagai Bahan Pembentuk Gelas pada Vitrifikasi Limbah Cair Tingkat Tinggi (1-12)
- Hendro, Mohamad Nur Yahya:** Studi Karakteristik Detektor *Sodium iodide* dalam Pemanfaatannya sebagai *Gamma Scanner Limbah Radioaktif* (13-20)
- Nurokhim:** Penentuan Ketebalan Dead Layer Detektor HPGE melalui Simulasi dan Pengukuran Kurva Kalibrasi Efisiensi Untuk Analisis Limbah Radioaktif Pemancar Gamma (21-30)
- Sucipta:** Pemetaan Geologi Lingkungan Kawasan Puspiptek Serpong dan Sekitarnya sebagai Penyangga Tapak Disposasi Demo (31-43)
- Edy Syafril Hayat, Sri Andayani:** Pengelolaan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit dan Aplikasi Biomassa *Chromolaena odorata* terhadap Pertumbuhan dan Hasil Tanaman Padi serta Sifat Tanah *Sulfaquent* (44-51)
- Heny Suseno:** Studi Radioekologi Kelautan di Pesisir Pantai Selatan Yogyakarta: Monitoring  $^{137}\text{Cs}$  untuk Keperluan Baseline Data dan untuk Mengantisipasi Kemungkinan Dampak Kecelakaan Nuklir di Fukushima (52-57)
- Pande Made Udiyani, Sri Kuntjoro:** Penentuan Zona Kedaruratan Nuklir Off-Site (Luar Tapak) di Indonesia (58-65)

## STUDI KARAKTERISTIK DETEKTOR *SODIUM IODIDE* DALAM PEMANFAATANNYA SEBAGAI *SEGMENTED* *GAMMA SCANNER* LIMBAH RADIOAKTIF

Hendro<sup>\*)</sup>, Mohamad Nur Yahya<sup>\*\*</sup>

<sup>\*)</sup>Pusat Teknologi Limbah Radioaktif - BATAN

<sup>\*\*</sup>Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - BATAN

### ABSTRAK

**STUDI KARAKTERISTIK DETEKTOR *SODIUM IODIDE* DALAM PEMANFAATANNYA SEBAGAI *SEGMENTED GAMMA SCANNER* LIMBAH RADIOAKTIF.** Telah dilakukan studi karakteristik detektor *sodium iodide* yang merupakan bagian pencacah sistem *segmented gamma scanner* limbah radioaktif. Studi ini dilakukan dalam rangka pembuatan sistem *segmented gamma scanner* yang akan menggunakan detektor *sodium iodide* sebagai pencacahnya. Studi karakteristik detektor *sodium iodide* ini bertujuan untuk mempersiapkan detektor pencacah radiasi pada sistem *segmented gamma scanner* di instalasi limbah radioaktif agar mampu bekerja secara optimal dalam mencacah radioaktivitas dari limbah radioaktif. Studi karakteristik dilakukan dengan menggunakan sumber radiasi gamma Cs-137 dan Co-60 dengan melakukan pengamatan pada hasil cacahan dari beberapa parameter yang diuji. Hasil studi karakteristik ini diperoleh pengaturan operasi yang menghasilkan cacahan optimal dengan tegangan operasi 800 volt dan amplifikasi sebesar 8 kali. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan detektor *sodium iodide* menghasilkan cacahan yang stabil sehingga bisa digunakan sebagai pencacah pada Sistem *Segmented Gamma Scanner* serta pengaturan operasi yang bisa digunakan sebagai referensi.

**Kata kunci:** *Gamma Scanner*, Detektor, *sodium iodide*, Cs-137, Co-60

### ABSTRACT

**THE STUDY OF *SODIUM IODIDE* DETECTOR CHARACTERISTICS AS PART OF RADIOACTIVE WASTE *SEGMENTED GAMMA SCANNER*.** *The study of sodium iodide detector characteristics as part of radioactive waste segmented gamma scanner have been done. The study was conducted in order to establish segmented gamma scanner using sodium iodide detectors as radiation counter. The research purpose to prepare radiation counter for segmented gamma scanner at radioactive waste installation, so it can working optimally on counting radioactivity of radioactive waste. Study of characteristics performed using gamma radiation sources Cs-137 and Co-60 by observing the counting results from some of parameters tested. Based on the testing parameters, sodium iodide detector produce stable counts with the result that can be used as a radiation counter in segmented gamma scanner system. The result of this study shows that the optimal counts was obtained at the setting operation for voltage and amplification both were 800 volt and multiply 8, respectively. This setting operations can be used as reference when using sodium iodide detector as radiation counter.*

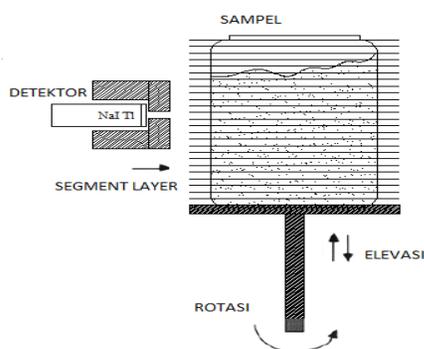
**Keywords:** *Gamma Scanner*, Detector, *Sodium iodide*, Cs-137, Co-60

### PENDAHULUAN

Perkembangan aplikasi teknik nuklir di Indonesia baik aplikasi radiasi maupun radioisotop berkembang sangat pesat. Hal tersebut seiring dengan meningkatnya pemanfaatan Ilmu Pengetahuan dan Teknologi (iptek) nuklir tersebut dalam bidang industri, kesehatan, serta penelitian dan pengembangan (Litbang) iptek nuklir itu sendiri, hal ini akan meningkatkan jenis maupun jumlah limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang. Berdasarkan PP No. 61 Tahun 2013 BATAN merupakan satu-satunya institusi resmi di Indonesia yang melaksanakan pengelolaan limbah radioaktif. Sesuai dengan prinsip dasar pengelolaan limbah radioaktif yang memastikan perlindungan kesehatan manusia dan lingkungan serta tidak membebani generasi yang akan datang maka dibutuhkan suatu pengelolaan yang efektif dan efisien.

Limbah yang masuk dari penghasil limbah mempunyai karakteristik yang beragam. Untuk keperluan pengelolaan harus diidentifikasi kandungan dan jenis limbah yang merupakan tahapan awal dari pengelolaan limbah radioaktif salah satunya dengan menggunakan sistem gamma scanner. Detektor yang digunakan untuk *gamma scanner* sudah banyak jenisnya baik yang terbuat dari semikonduktor, sintilasi maupun isian gas. Namun demikian dalam berbagai pengelompokannya semua detektor tersebut digunakan untuk tujuan yang sama, yaitu untuk mengidentifikasi radionuklida. Dalam pemanfaatannya gamma scanner yang dipasang pada instalasi Pusat Teknologi Limbah Radioaktif BATAN akan menggunakan detektor *sodium iodide*.

Desain *gamma scanner* yang diaplikasikan pada instalasi pengolahan limbah mengadopsi system *Segmented Gamma-ray Scanner* (SGS) dengan menggunakan detektor *sodium iodide* sebagai pencacah radiasinya. SGS di desain sebagai sebuah uji tak rusak untuk mengukur radionuklida yang terkandung pada drum limbah radioaktif dalam berbagai matriks. Pada umumnya system SGS ini menggunakan detektor *High Purity Germanium* (HPGe) namun detektor HPGe membutuhkan perawatan khusus dan sangat sensitif terhadap gangguan.



**Gambar 1.** Instrumentasi *segmented gamma scanner*

Sistem SGS adalah teknik yang paling banyak digunakan untuk mengidentifikasi drum limbah radioaktif sebelum dilakukan pengolahan limbah. Drum dibagi menjadi beberapa segmen dan setiap segmen akan tercacah pada saat drum berotasi dan berelevasi. Dengan asumsi bahwa pada setiap segmen matriks dan densitas sampel adalah konstan dan homogen serta distribusi pancaran radiasinya sama.

Pemanfaatan detektor *sodium iodide* sebagai pencacah pada system SGS merupakan salah satu opsi yang bisa pilih selain menggunakan detektor jenis HPGe. Detektor *sodium iodide* dipilih sebagai detektor dalam system SGS ini karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya konsumsi daya rendah dan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan detektor HPGe

## TATA KERJA

### Bahan dan Alat

Pemanfaatan detektor *sodium iodide* sebagai pencacah pada sistem SGS merupakan salah satu opsi yang bisa pilih selain menggunakan detektor jenis HPGe. Studi karakteristik ini dilakukan dengan pengujian beberapa parameter menggunakan sumber radiasi standard Cs-137 dan Co-60. Detektor NaI(Tl) yang digunakan adalah model 3MW3 produksi BICRON Saint-Gobain Crystals USA. Untuk memenuhi semua kebutuhan detektor mulai dari tegangan tinggi, *preamp*, *amplifier*, *counter*, *timer*, *stabilizer*, *memory*, *signal discriminator* dan ADC digunakan ASA-100 produksi Canberra.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Tegangan Operasi

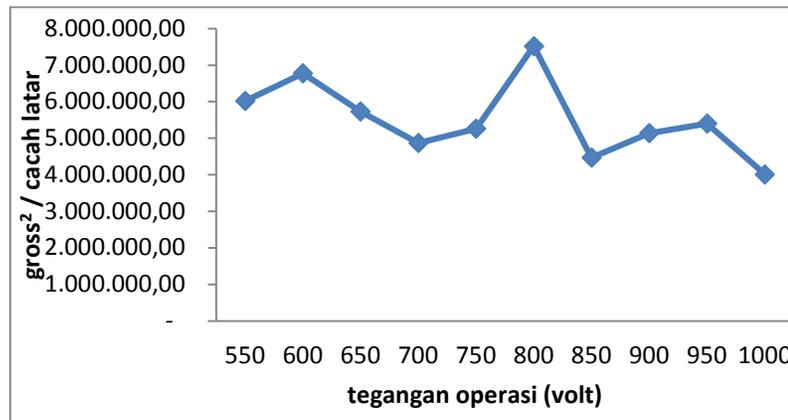
*Photomultiplier tube* yang terpasang pada detektor NaI(Tl) memiliki tegangan operasi berbeda-beda berkisar antara 500 – 1100 Volt. Tegangan operasi yang maksimal bisa diketahui dengan membuat grafik data pengamatan antara tegangan operasi vs cacahan.

Data pada Tabel 1 menunjukkan dengan tegangan 600 volt didapat cacahan perdetik paling tinggi akan tetapi hal ini tidak menandakan bahwa tegangan operasi yang optimal pada tegangan tersebut karena tegangan operasi yang maksimal merupakan perbandingan cacahan radiasi terhadap cacahan latar belakang yang terbaik.

**Tabel 1.** Determinasi tegangan operasi pada puncak energi 662 keV

Tegangan (volts)	Gross (cps)	Cacah Latar (cps)	Net (cps)	(Gross) <sup>2</sup>	gross <sup>2</sup> / cacah latar
550	16460	45	16415	270931600	6,020,702.22
600	17847	47	17800	318515409	6,776,923.60
650	17429	53	17376	303770041	5,731,510.21
700	15449	49	15400	238671601	4,870,849.00
750	16053	49	16004	257698809	5,259,159.37
<b>800</b>	<b>16222</b>	<b>35</b>	<b>16187</b>	<b>263153284</b>	<b>7,518,665.26</b>
850	15247	52	15195	232471009	4,470,596.33
900	15206	45	15161	231222436	5,138,276.36
950	15059	42	15017	226773481	5,399,368.60
1000	15120	57	15063	228614400	4,010,778.95

Tegangan operasi terpasang pada variasi tertentu akan didapat cacahan bervariasi pula. Untuk menentukan tegangan kerja detektor yang optimal adalah dengan cara mencari perbandingan cacahan sumber terhadap cacahan latar belakang yang terbaik.



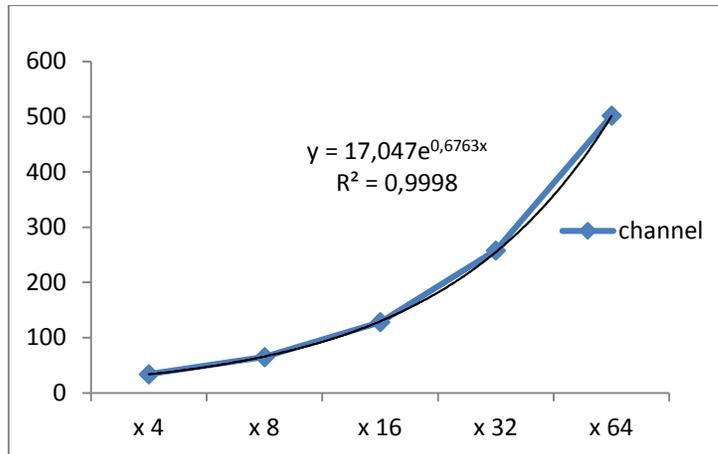
**Gambar 1.** Grafik tegangan operasi vs cacahan perdetik

Dari Gambar 1 dapat dilihat bahwa detektor sintilasi NaI(Tl) ini memiliki cacahan yang terbaik jika diberikan tegangan operasi sebesar 800 volt, dengan demikian tegangan operasi yang digunakan pada system SGS adalah sebesar 800 volt.

#### Amplifikasi detektor

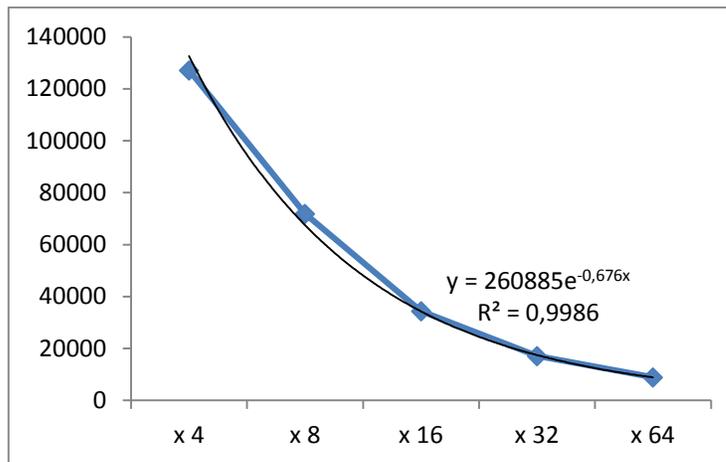
Kemampuan optimal dari detektor NaI(Tl) dalam mengukur intensitas radiasi dipengaruhi oleh efisiensi dari detektor tersebut. Dalam instrument pengukuran nuklir amplifikasi bersifat eksponensial mengikuti sifat radiasi yang memiliki probabilitas sehingga penguatan akan terlihat

eksponensial. Berikut ini akan ditampilkan dua buah grafik yaitu grafik penguatan terhadap posisi *channel* dan grafik intensitas cacahan terhadap besar penguatan.



**Gambar 2.** Faktor amplifikasi vs *channel*

Dari respon grafik pada Gambar 2 dapat diperoleh bahwa semakin tinggi penguatan maka *channel* akan semakin bergeser ke *channel* yang lebih besar yang merupakan posisi *channel-channel* dengan resolusi yang kurang bagus. Bentuk respon grafik penguatan tidak linear akan tetapi berbentuk eksponensial karena sifat radiasi yang memiliki probabilitas sehingga tidak terlihat respon linear selain itu didapat juga grafik perbandingan antara besar penguatan dengan jumlah cacahan.



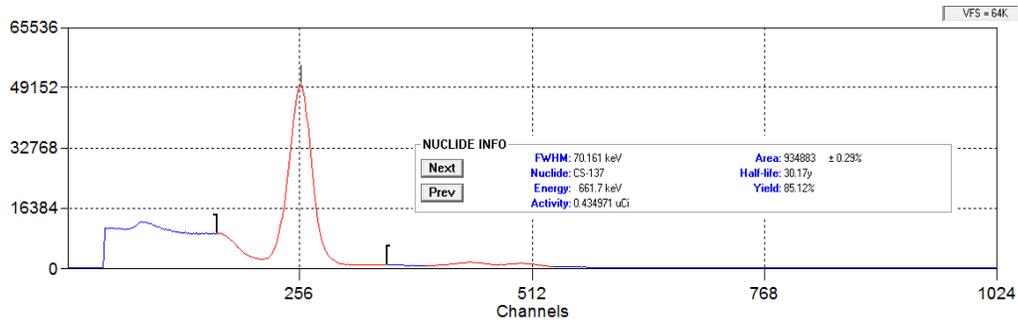
**Gambar 3.** Grafik Amplifikasi vs Intensitas cacahan

Pada Gambar 3 bisa diperoleh bahwa respon intensitas cacahan terhadap besar amplifikasi menghasilkan eksponensial menurun. Semakin tinggi amplifikasi semakin rendah cacahan yang didapat, hal ini dikarenakan semakin besar penguatan *channel* akan bergeser ke *channel* kanan, berdasarkan data yang telah didapat cacahan akan semakin buruk jika bergeser ke *channel* sebelah kanan atau *channel* tinggi.

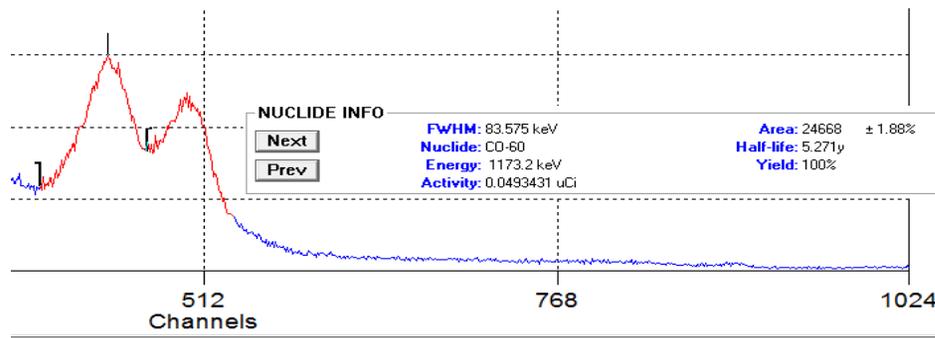
### Resolusi detektor

Resolusi merupakan salah satu parameter yang menentukan kualitas dari detektor. Semakin tinggi kemampuan detektor untuk membedakan 2 buah puncak yang berdekatan maka

semakin bagus kualitas detektor tersebut. Besar resolusi tersebut direpresentasikan sebagai nilai FWHM (*full width at half maximum*). Apabila sebuah spektrum energi radiasi (spektrum intensitas terhadap perubahan energi) sudah diperoleh, maka dapat dihitung resolusi detektornya.



**Gambar 4.** Puncak energi 662 keV



**Gambar 5.** Puncak energi 1173 keV dan energi 1332 keV

Dari gambar spektrum puncak energi diatas dihitung persentase resolusi detektor dengan rumus :

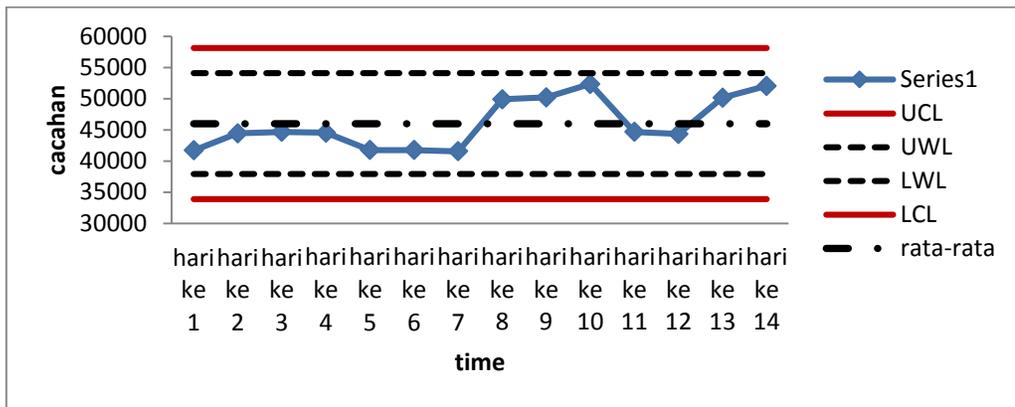
$$\%resolution = \frac{FWHM}{photopeak\ energy} \times 100 \% = 28 \%$$

**Tabel 2.** Resolusi detektor dalam persentase

Radionuklida	Puncak energi (keV)	Resolusi pengukuran
Cs-137	662	10.5 %
Co-60	1173	7.1 %
	1332	6.06%

### Grafik kendali pengukuran

Grafik kendali merupakan gambaran dari kinerja detektor apakah dalam kondisi optimal, jika kondisi detektor dalam kondisi yang optimal maka akan dihasilkan pengukuran yang bermutu. Grafik kendali dilakukan dengan memantau kondisi alat ukur dari hari ke hari. Salah satu faktor yang menyebabkan nilai tampilan sistem pencacah tidak sama dengan jumlah radiasi yang memasuki detektor adalah cacahan yang fluktuatif yaitu sifat probabilitas radiasi.



**Gambar 6.** Grafik kendali pengukuran

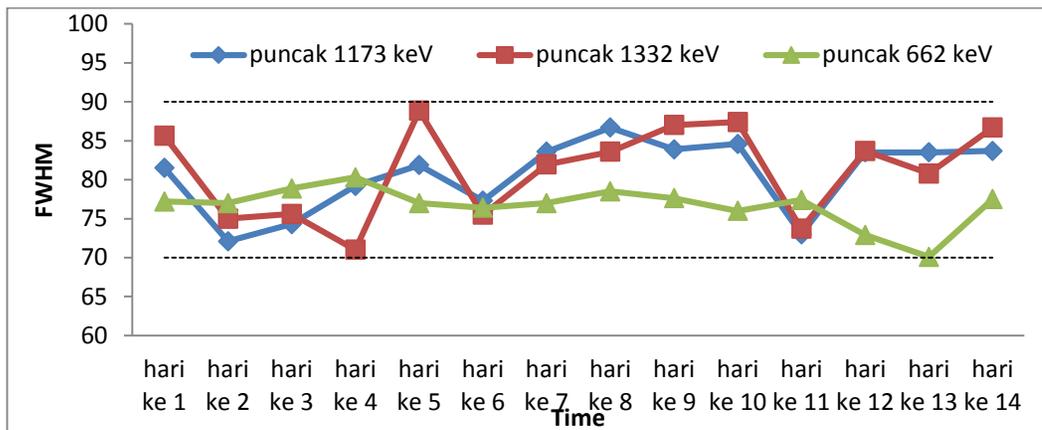
Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa sistem pengukuran berada dalam grafik kendali sebagai jaminan mutu pengukuran. Dalam grafik kendali tersebut terdapat batas-batas yang membatasi yaitu UCL (*Upper Control Limit*), UWL (*Upper Warning Limit*), LWL (*Lower Warning Limit*) dan LCL (*Lower Control Limit*).

Pada grafik kendali tersebut merepresentasikan jumlah cacahan yang berubah dari waktu ke waktu sehingga perlu dilakukan pemantauan dan penentuan batas-batas yang diperbolehkan dengan adanya UCL, UWL, LWL dan LCL.

Pembuatan grafik kendali pengukuran dilakukan untuk menerapkan pengendalian mutu pengukuran yang merupakan suatu tahapan untuk mengevaluasi aspek teknis pengukuran. Dalam praktiknya pengendalian mutu dilakukan untuk pemantauan, pemeriksaan dan pengendalian data hasil analisis untuk memastikan bahwa pengukuran telah berjalan secara baik dan benar.

#### Rasio FWHM Cs-137 dan Co-60

Pengamatan cacahan dengan menggunakan kendali pengukuran sudah dilakukan maka langkah selanjutnya yang juga penting adalah melakukan pengamatan rasio FWHM yang merepresentasikan *gaussian ratio*. FWHM yang baik untuk detektor NaI(Tl) adalah sekitar 70 – 90 keV.



**Gambar 7.** Grafik Rasio FWHM puncak energi Cs-137 dan Co-60

Dari grafik kendali didapat bahwa FWHM dari detektor NaI(Tl) tersebut memiliki nilai yang fluktuatif, akan tetapi FWHM tersebut masih dalam batas yang direkomendasikan yaitu untuk detektor NaI(Tl) sebesar 70 – 90 keV.

### Variasi jarak pengukuran

Salah satu parameter yang mempengaruhi hasil pengukuran adalah jarak antara sumber radiasi dengan detektor. Hal ini dilakukan karena mengingat pengukuran dalam sistem SGS melakukan cacahan bukan dengan jarak yang tetap akan tetapi pada jarak yang fluktuatif karena sistem pengukuran yang mencacah pada masing-masing lajur.

Dalam kondisi ideal suatu partikel radiasi yang memasuki detektor dapat memberikan kontribusi tereksitasinya atom-atom di dalam sintilator dengan efisiensi 100%. Namun, radiasi yang masuk pada sebuah sintilator umumnya hanya sebesar fraksi tertentu dari total radiasi. Selebihnya partikel radiasi tersebut hanya lewat pada detektor tanpa memberikan kontribusi apapun sehingga menghasilkan pembacaan nilai yang berbeda. Berikut ini adalah data hasil pengamatan dari variasi jarak sumber terhadap detektor

**Tabel 3.** Variasi jarak terhadap hasil pengukuran

Jarak (cm)	a1	a2	a3	rata-rata	area /detik	efisiensi
0	545523	574460	575973	565318.7	1884.395556	0.113225
2.5	118178	115186	117479	116947.7	389.825556	0.023423
5	84544	86749	83210	84834.33	282.7811111	0.016991
7.5	42934	44499	44490	43974.33	146.5811111	0.008807

Apabila panjang geometri detektor tetap, namun jarak sumber ke detektor diperbesar atau diperkecil akan mengakibatkan perubahan nilai efisiensi. Semakin pendek jarak sumber dengan detektor, nilai efisiensi akan semakin besar. Hal ini disebabkan, ketika jarak sumber ke detektor diperkecil, lintasan yang ditempuh pada partikel radiasi semakin kecil, sehingga fraksi yang menyatakan besarnya partikel radiasi yang terabsorpsi semakin besar. Dari hasil pengamatan menunjukkan hasil yang sesuai dengan teori tersebut. Efisiensi detektor berkurang sebanding dengan bertambahnya jarak sumber radiasi ke detektor.

### KESIMPULAN

Detektor *sodium iodide* ini dapat bekerja secara optimal dengan pengaturan tegangan sebesar 800 volt dengan faktor amplifikasi 8 kali. Karakteristik detektor *sodium iodide* memiliki ADC yang linier dan *amplifier* yang bersifat eksponensial dengan resolusi puncak energi Cs-137 10,5% dan Co-60 7,1%. Berdasarkan pengujian yang telah dilakukan sistem pengukuran NaI(Tl) menghasilkan cacahan yang stabil sehingga layak digunakan sebagai detektor pada Sistem *Segmented Gamma Scanner* serta pengaturan operasi yang bisa digunakan sebagai referensi.

### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A.Faanu, G.Emi-Reynolds, E.O.Darko, Calibration and Performance Testing of Sodium iodide NaI(Tl) detektor at the Food and Environmental Laboratory GAEC, West African Journal of Applied Ecology Vol.19 , hal : 39-52, 2011.
- [2]. Annisatun, Suharyana, Simulasi Pengukuran Efisiensi Detektor HPGe dan NaI(Tl) Menggunakan Metode MonteCarlo MCNP5, Seminar Nasional 16 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir ,hal : 321-325, 2010.
- [3]. ASA-100 MCA Board Manual by CANBERRA, Model ASA-100 NaI MCA Board User's Manual, diunduh 2011.
- [4]. Desy Amalia, M.Munir, Pengaruh Perubahan Tegangan Tinggi Tabung Photomultiplier (PMT) Terhadap Amplitudo Keluaran Detektor NaI(Tl), Jurnal Berkala Fisika Vol.4 ,hal : 69-78, 3 Juli.
- [5]. Prinsip Dasar Pengelolaan Limbah Radioaktif, Pusat Teknologi Pengelolaan Limbah Radioaktif BATAN, diunduh 2014
- [6]. I.Hossain, N.Sharip, K.K.Viswanathan, Efficiency and resolution of HPGe and NaI(Tl) detektors using gamma-ray spectroscopy, Scientific Research and Essays Vol.7 ,hal : 86-89, 9 Januari 2012

- [7]. K.D.Ianakiev, B.S.Alexandrov, Temperature Behavior of NaI(Tl) Scintillation Detektors, Nuclear Nonproliferation Division & Cambridge University, diunduh 2012.
- [8]. Los Alamos National Laboratory, Application Note "Segmented Gamma Ray Scanner", diunduh 2014.
- [9]. Noviarty,Dian Anggraini,Rosika, Optimasi Pengukuran Keaktifan Radioisotop Cs-137 Menggunakan Spektrometer Gamma, Seminar Nasional V SDM Nuklir, hal:589-596, 2009
- [10]. University of Guelph, Gamma-Ray Spectroscopy Using NaI(Tl) detektor, Departement of Physics Integrated Laboratory, diunduh 2012.