

MODEL MATEMATIS SEDERHANA UNTUK PERKIRAAN JANGKAUAN PENGUKURAN PADA DETEKTOR GEIGER MULLER

Benar Bukit, Jos Budi Sulistyono, Abdul Jalil
Pusat Rekayasa Perangkat Nuklir (PRPN) – BATAN
E-mail : benar.bukit170458@yahoo.com

ABSTRAK

MODEL MATEMATIS SEDERHANA UNTUK PERKIRAAN JANGKAUAN PENGUKURAN PADA DETEKTOR GEIGER-MULLER. Suatu model matematis sederhana untuk menggunakan informasi mengenai waktu mati (dead time) dan sensitivitas suatu detektor Geiger Muller (GM) untuk mendapatkan perkiraan kasar secara cepat atas resolusi, jangkauan pengukuran yang timbul pada saat laju dosis yang sebenarnya bernilai tertentu. Model matematis tersebut kemudian digunakan untuk membandingkan jangkauan pengukuran dan resolusi 34 jenis detektor GM yang dibuat oleh LND, Inc. Ditemukan bahwa detektor-detektor GM tersebut secara umum tidak sekaligus mencapai jangkauan ukur dan resolusi tertinggi. Diantara 34 jenis detektor GM tersebut, jenis 7802 memiliki resolusi yang tertinggi, sedangkan 71623 memiliki jangkauan ukur terbesar.

Kata kunci: detektor GM, model matematis, jangkauan pengukuran

ABSTRACT

A SIMPLE MATHEMATICAL MODEL FOR THE ESTIMATION OF THE MEASUREMENT RANGE ON GEIGER-MULLER DETECTORS. Proposed here is a simple mathematical model which allows the use of information on dead time and sensitivity of a Geiger Muller (GM) detector for back-of-the-envelope estimation of resolution, dose rate measurement range, and the dose rate measurement error as a function of incident dose rate. The aforementioned model was then employed for comparing the measurement range and resolution of 34 types of GM detectors manufactured by LND, Inc. It was found that they generally did not attain the widest measurement range and the finest resolution at the same time. Further, it was found that among the 34 detector types analyzed, the 7802 possessed the finest measurement resolution while the 71623 possessed the widest measurement range.

Keyword : GM detector, mathematical model, measurement range

1. PENDAHULUAN

Sistem instrumen pengukuran radiasi nuklir lingkungan sangat diperlukan dalam operasi suatu instalasi nuklir seperti PLTN atau reaktor riset. Instrumentasi tersebut digunakan misalnya sebagai langkah antisipasi untuk mengetahui penyebaran radiasi bila terjadi kebocoran radiasi, atau untuk memperhitungkan dosis radiasi yang diterima personil dalam operasi normal, ataupun untuk menemukan sumber radiasi bila terjadi kebocoran.

Salah satu jenis detektor yang banyak digunakan dalam instrumentasi pengukuran radiasi adalah detektor Geiger-Muller (GM). Karena pentingnya detektor ini bagi instrumentasi nuklir, para pamanufaktur detektor GM telah membuat berbagai jenis detektor GM dengan karakteristik yang sangat beragam. Walaupun hal ini menguntungkan pengguna, karena memperbesar kemungkinan bahwa ada jenis detektor GM yang tepat untuk penggunaan yang dituju, ada kalanya hal ini membingungkan karena menjadi kurang jelas pilihan mana yang paling tepat. Kesulitan dalam pemilihan ini diperparah oleh kurang seragamnya informasi yang dicakup dalam lembar spesifikasi (*specification sheet*), bahkan bila alat yang sama diproduksi oleh pamanufaktur yang sama. Misalnya, beberapa spesifikasi ^{[1][2][3]} mencakup grafik laju cacah yang dihasilkan

detektor sebagai fungsi laju dosis yang diterima detektor tersebut, tetapi ada beberapa spesifikasi lainnya ^{[3][2]} yang tidak mencakup grafik tersebut, walaupun baik spesifikasi tersebut maupun detektor GM yang ditampilkan dalam spesifikasi berasal dari LND, Inc. Grafik yang diberikan ^{[1][2][3]} menunjukkan besar laju cacah yang dihasilkan suatu detektor GM, pada sumbu y, bila terpapar radiasi yang memberikan laju dosis tertentu, semisal 1 mR/jam, pada sumbu x. Selain memudahkan pengguna memperkirakan laju dosis dari laju cacah yang diberikan instrumen yang menggunakan detektor GM yang diacu, grafik tersebut juga memungkinkan pengguna menentukan laju cacah tertinggi yang dapat diberikan oleh detektor. Karena laju dosis diperkirakan berdasarkan laju cacah, batas laju cacah ini juga menentukan laju dosis tertinggi yang sebenarnya dapat diukur. Dalam makalah ini, diturunkan suatu model matematis untuk membantu perhitungan kasar atas tiga parameter berikut:

- Batas laju dosis yang dapat diukur dengan nilai kesalahan tidak melebihi suatu batas tertentu
- Batas laju cacah yang dapat diukur dengan nilai kesalahan tidak melebihi suatu batas tertentu
- Resolusi pengukuran dosis

Ketiga informasi di atas diperlukan, karena penggunaan yang berbeda menuntut resolusi dan jangkauan pengukuran yang berbeda pula. Selain itu, ketiga parameter itu seringkali tidak tercakup dalam spesifikasi. Model ini ditujukan untuk mempermudah pemilihan jenis detektor GM yang tepat berdasarkan informasi yang hampir bisa dipastikan ada di spesifikasi, yaitu sensitivitas dan *dead time*.

2. METODOLOGI

2.1. SIMBOL-SIMBOL YANG DIGUNAKAN

Sebelum derivasi model matematis ini dilakukan, terlebih dahulu simbol-simbol yang akan digunakan lebih dahulu didefinisikan. Perhatikan bahwa disini simbol-simbol itu hanya didefinisikan, sedangkan penjelasan secara lebih rinci akan diberikan bersama dengan penurunan model matematis pada Seksi 2.2. Simbol-simbol yang akan digunakan adalah sebagai berikut:

k	=	Sensitivitas detektor (cps/ μ Sv.jam) yang dicantumkan di spesifikasi
R	=	Resolusi pengukuran, μ Sv/jam/cps
s	=	Subskrip yang menandakan nilai sebenarnya dari suatu besaran, atau nilai yang seharusnya diberikan oleh suatu alat ukur ideal
0	=	Subskrip yang menyatakan nilai yang terukur dari suatu besaran, atau perkiraan nilai besaran itu berdasarkan parameter-parameter lainnya yang terukur
MIN, MAX	=	Subskrip yang menyatakan nilai minimum atau maksimum dari suatu besaran
h, l	=	Subskrip yang menyatakan mana yang nilainya lebih tinggi / lebih rendah diantara dua besaran
D	=	Laju dosis yang ditimbulkan oleh suatu radiasi (μ Sv/jam)
D_s	=	Laju dosis yang sebenarnya (μ Sv/jam) dari radiasi yang tiba di detektor GM
D_0	=	Laju dosis terukur, yakni laju dosis yang diperkirakan (μ Sv/jam) dari radiasi yang tiba di detektor GM
T_d	=	Dead time (detik), dicantumkan di spesifikasi
T_c	=	Waktu cacah; penyebut dalam satuan laju cacah yang digunakan
f	=	Frekuensi pulsa yang diberikan oleh suatu detektor GM
f_s	=	Frekuensi pulsa yang seharusnya diberikan detektor GM dalam laju dosis D bila hubungan linier berlaku
f_0	=	Frekuensi / laju pulsa terukur, yakni laju pulsa yang kenyataannya

	dihasilkan detektor GM
T_{pp}	= Waktu antara awal dua pulsa berturutan yang dihasilkan detektor GM
x_s	= Nilai yang sebenarnya dari suatu kuantitas atau parameter
x_0	= Nilai yang diperkirakan atau diukur dari suatu kuantitas atau parameter
Δx	= Kesalahan mutlak pengukuran atau perkiraan
δx	= Kesalahan nisbi suatu pengukuran atau perkiraan
$\varepsilon_D, \varepsilon_f$	= Kesalahan pengukuran laju dosis dan laju cacah karena dead time
ε	= Kesalahan pengukuran oleh detektor GM; dianggap sepenuhnya timbul karena dead time. Juga digunakan sebagai subskrip yang menyatakan nilai suatu besaran saat kesalahan pengukuran sebesar ε timbul.
$D_{s,\varepsilon}$	= Besar laju dosis yang sebenarnya D_s yang mengakibatkan detektor GM memberikan kesalahan nisbi sebesar ε
$f_{0,\varepsilon}$	= Besar laju cacah f_0 yang ditunjukkan oleh detektor GM yang mengakibatkan detektor GM memberikan kesalahan nisbi sebesar ε

2.2. PENURUNAN MODEL MATEMATIS

Mula-mula, kita anggap bahwa suatu detektor GM ideal menunjukkan hubungan linier murni antara laju dosis radiasi yang diterimanya dan laju cacah yang dihasilkan. Pada grafik laju dosis vs laju cacah yang diberikan di beberapa spesifikasi, semisal ^{[1][2][3]}, untuk laju dosis yang rendah, laju cacah tergantung secara linier dari laju dosis. Hubungan linier itu dapat dinyatakan sebagai:

$$f_s = kD_s \dots\dots\dots(1)$$

Selanjutnya dalam makalah ini, persamaan (1) dianggap sebagai definisi matematis detektor linier ideal. Persamaan ini juga mendefinisikan sensitivitas k sebagai besarnya peningkatan laju cacah yang ditimbulkan oleh peningkatan laju dosis sebesar satu satuan, karena dari (1) dapat dilihat bahwa $k = df_s/dD_s$. Adapun istilah "sensitivitas" (*sensitivity*) diperoleh dari spesifikasi LND ^[1]

Analisa selanjutnya berasumsi bahwa detektor GM itu digunakan untuk memperkirakan laju dosis mengikuti dua langkah berikut:

1. Instrumen tersebut digunakan sebagai pencacah, dan dihasilkanlah suatu laju cacah f_0 yang mungkin berbeda dari f_s .
2. Laju dosis diperkirakan dari $D_0 = f_0/k$.

Berdasarkan model ini, f_s kita anggap sebagai laju pulsa yang *seharusnya* dihasilkan oleh detektor GM pada saat menerima radiasi dengan laju dosis D_s . Karena informasi yang sebenarnya lebih diperlukan adalah laju dosis, bukan laju pulsa, dan laju dosis diperkirakan dari persamaan (1) dalam bentuk $D = f/k$. Dengan demikian, bila frekuensi pulsa yang sebenarnya f_s berbeda secara sistematis dari f_0 maka perkiraan laju dosis akan juga secara sistematis inakurat ke arah yang sama. Disini, perbedaan antara f_s dan f_0 dianggap sebagai suatu kesalahan.

Adapun karena jarak antara dua pulsa yang dihasilkan oleh detektor tidak bisa kurang dari dead time T_d , maka laju pulsa yang dihasilkan tidak akan melebihi nilai berikut:

$$f_{0,MAX} = \frac{1}{T_d} \dots\dots\dots(2)$$

Karena laju dosis kita perkirakan dari $D_0 = f_0/k$, maka berdasarkan persamaan diatas, laju dosis yang diperkirakan dari bacaan laju cacah tidak akan melebihi batas berikut:

$$D_{0,MAX} \equiv \frac{1}{kT_d} \dots\dots\dots (3)$$

Dengan asumsi itu, maka laju pulsa yang seharusnya dihasilkan detektor f_s dapat ditemukan dari laju pulsa yang kenyataannya dihasilkan f_0 dan dead time T_d sebagai berikut [5]:

$$f_s = \frac{f_0}{1 - f_0T_d} \dots\dots\dots (4)$$

. Dengan manipulasi aritmetik, persamaan (4) dapat ditata ulang untuk mendapatkan laju pulsa yang dihasilkan detektor f_0 sebagai fungsi laju pulsa yang seharusnya f dan dead time T_d sebagai berikut:

$$\frac{1}{f_s} = \frac{1 - f_0T_d}{f_0} = \frac{1}{f_0} - T_d$$

.....(5)

$$\frac{1}{f_0} = \frac{1}{f_s} + T_d \dots\dots\dots (6)$$

Dengan mengambil resiprok kedua sisi, didapatkan:

$$f_0 = \frac{1}{\frac{1}{f_s} + T_d} \dots\dots\dots (7)$$

$$f_0 = \frac{f_s}{1 + f_sT_d} \dots\dots\dots (8)$$

Dengan menggabungkan persamaan (1) dan (8), ditemukan bahwa laju cacah yang teramati, yaitu laju cacah rata-rata pulsa yang dihasilkan detektor adalah:

$$f_0 = \frac{1}{\frac{1}{kD_s} + T_d} \dots\dots\dots (9):$$

$$f_0 = \frac{kD_s}{1 + kD_sT_d} \dots\dots\dots (10)$$

Karena besaran-besaran diatas non-negatif, $1 + kD_sT_d \geq 1$, sehingga:

$$f_0 \leq kD_s \dots\dots\dots (11)$$

$$f_0 \leq f_s \dots\dots\dots (12)$$

$D_0 = f_0/k$, maka $D_0 \leq D_s$. Selain itu, $(df_0/dD_s) = k$ hanya pada saat $D_s = D_0 = 0$ dan $f_s = f_0 = 0$. Dengan kata lain, kecuali pada saat tidak ada radiasi, baik laju dosis yang teramati D_0 maupun laju cacah yang teramati f_0 selalu lebih rendah daripada laju dosis yang sebenarnya D_s dan laju pulsa pulsa f_s yang dihasilkan oleh detektor GM linier ideal.

$$\delta x \equiv \frac{\Delta x}{x_s} = \frac{x_0 - x_s}{x_s} = \frac{x_0}{x_s} - 1 \dots\dots (13)$$

Disini, "nilai sebenarnya" mengacu kepada f_s dan D_s , sedangkan "nilai yang diperkirakan atau diukur" mengacu kepada f_0 dan D_0 . Karena kesalahan nisbi selalu berupa *underestimation*, kesalahan itu selalu negatif. Meskipun demikian, harga mutlak kesalahan akan digunakan, dan besar kesalahan perkiraan laju dosis dan laju cacah ε_D dan ε_f , yang selanjutnya dapat secara kolektif kita sebut ε , dapat didefinisikan sebagai:

$$\varepsilon_D \equiv (100\% \times) \left| \frac{D_0 - D_s}{D_s} \right| \dots\dots\dots(14)$$

$$\varepsilon_f \equiv (100\% \times) \left| \frac{f_0 - f_s}{f_s} \right| \dots\dots\dots(15)$$

Karena $f = kD$, maka:

$$\varepsilon_D = \varepsilon_f = \varepsilon \dots\dots\dots(16)$$

Untuk mempersingkat penulisan, selanjutnya penulisan "100% x" dihindari; selanjutnya, dari diskusi sebelumnya, $f_0 \leq f$ dan $D_0 \leq D_s$. Dengan demikian:

$$\varepsilon = \frac{D_s - D_0}{D_s} = \frac{f_s - f_0}{f_s} \dots\dots\dots(17)$$

Selanjutnya, akan menurunkan rumus untuk menentukan tiga parameter berikut ini:

1. Jangkauan pengukuran laju cacah, yaitu aju cacah terukur tertinggi $f_{0,\varepsilon}$ yang dapat dicapai tanpa mengakibatkan kesalahan pengukuran nisbi melebihi ε ;
2. Jangkauan pengukuran laju dosis, yaitu laju dosis maksimum yang sebenarnya $D_{s,\varepsilon}$ yang tidak mengakibatkan memenuhi nilai kesalahan melebihi ε ;
3. Resolusi pengukuran laju dosis R .

Selanjutnya, untuk menemukan $f_{0,\varepsilon}$, derivasi berikut memberikan:

$$\varepsilon = f_0 T_d = \frac{f_0}{f_{0,MAX}} \dots\dots\dots(18)$$

Sehingga, bila ε ditentukan, didapatkanlah jangkauan pengukuran laju cacah:

$$f_{0,\varepsilon} = \frac{\varepsilon}{T_d} = \varepsilon f_{0,MAX} \dots\dots\dots(19)$$

$$\varepsilon = 1 - \frac{D_0}{D_s} = 1 - \frac{f_0/k}{f_s/k} = 1 - \frac{f_0}{f_s} \dots\dots\dots(20)$$

Dengan mensubstitusi (7) untuk f_0 , kita dapatkan:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{1 + f_s T_d} = \frac{1 + f_s T_d - 1}{1 + f_s T_d} = \frac{f_s T_d}{1 + f_s T_d} \dots\dots\dots(21)$$

Selanjutnya, kita perhatikan dari (1) bahwa $f_s = kD_s$ sehingga:

$$\varepsilon = \frac{kD_s T_d}{1 + kD_s T_d} = \frac{D_s / (1/kT_d)}{1 + (D_s / (1/kT_d))} \dots\dots\dots(22)$$

Karena $D_{0,MAX} = 1/kT_d$ menurut persamaan (3), maka:

$$\varepsilon = \frac{1}{\left(\frac{1}{D_s/D_{0,MAX}}\right) + 1} \dots\dots\dots (23)$$

Apabila nilai tertinggi ε yang bisa ditolerir telah ditentukan, jangkauan laju dosis, yakni nilai laju dosis sebenarnya $D_{s,\varepsilon}$ yang mengakibatkan nilai kesalahan nisbi tersebut dapat ditentukan sebagai berikut:

$$D_{s,\varepsilon} = D_{0,MAX} \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right) = D_{0,MAX} \left(\frac{1}{1-\varepsilon} - 1\right) \dots\dots\dots (24)$$

Dari persamaan (23) dan (24), dapat diperhatikan bahwa semakin kecil nilai ε yang ditolerir, semakin rendah pula laju dosis atau laju pulsa yang dapat diijinkan. Semakin laju pulsa yang dihasilkan mendekati $f_{0,MAX}$, semakin besar pula deviasi nisbinya dari f_s .

$$f_0 \leq \frac{f_{0,MAX}}{5} \dots\dots\dots (25)$$

$$D_s \leq \frac{D_{0,MAX}}{4} \dots\dots\dots (26)$$

Sedangkan resolusi dapat kita anggap diberikan dalam rumus berikut. Suatu pengukur laju cacah dapat membedakan dua laju dosis, semisal secara sembarang kita sebut D_h dan D_l , dimana $D_h > D_l$, hanya bila kedua laju dosis itu menghasilkan laju cacah yang berbeda. Dengan menganggap bahwa laju dosis cukup rendah hingga $f_0 \approx f_s$, dapat kita tulis:

$$kD_h > kD_l \dots\dots\dots (27)$$

Selanjutnya, waktu cacah T_c kita definisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk membilang jumlah cacah. Dalam contoh diatas, bila satuan "cpm" digunakan, maka dianggap $T_c = 60$ detik.

Jumlah cacah yang dihasilkan oleh suatu detektor GM linier ideal dalam suatu kurun waktu pencacahan T_c adalah:

$$n_s = f_s T = kD_s T_c \dots\dots\dots (28)$$

Disini digunakan n_s dan bukan jumlah cacah yang sebenarnya dihasilkan n_0 karena secara matematis lebih sederhana, disamping hanya perkiraan kasar yang dituju disini. Lebih lanjut, kita perhatikan bahwa laju cacah, semisal dalam satuan cps atau cpm, yang dihasilkan oleh pencacah digital biasanya ditampilkan sebagai bilangan bulat. Dengan demikian, perbedaan antara D_h dan D_l hanya bermakna bila besar hasil pembulatan jumlah cacah yang dihasilkan berbeda sebesar satu satuan jumlah cacah. Dengan kata lain, apabila dalam waktu pencacahan T_c , laju dosis radiasi sebesar D_h menghasilkan $n_{s,h}$ cacahan, sedangkan laju dosis D_l menghasilkan $n_{s,l}$ cacahan, maka agar pencacah itu dapat membedakan D_h dan D_l , haruslah dipenuhi:

$$\Delta n_s = n_{s,h} - n_{s,l} \geq 1 \dots\dots\dots (29)$$

Resolusi detektor R dapat didefinisikan sebagai perbedaan laju dosis yang sekecil-kecilnya yang masih memenuhi persamaan (29) diatas setelah pencacahan dilakukan selama T_c . Dari persamaan (28), kita dapatkan:

$$R = \frac{1}{kT_c} \dots\dots\dots(30)$$

Hasil diatas menunjukkan bahwa resolusi berbanding terbalik dengan sensitivitas k . Semakin tinggi sensitivitas, semakin halus (tinggi) resolusi. Dengan demikian, semakin sensitif suatu detektor, semakin sedikit perubahan laju dosis yang diperlukan untuk mengubah laju cacah secara teramati.

Selain itu, dapat kita perhatikan juga dari persamaan (3) dan (30), bahwa:

$$D_{0,MAX} = \frac{R}{T_d} T_c \dots\dots\dots(31)$$

Dengan mensubstitusikan (24) ke (31), kita dapatkan pula:

$$D_{s,\varepsilon} = \frac{R}{T_d} T_c \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \dots\dots\dots(32)$$

Rumus (32) mengisyaratkan bahwa untuk *dead time* dan waktu cacah tertentu, jangkauan pengukuran yang besar ($D_{s,\varepsilon}$ yang besar) cenderung berkaitan dengan resolusi rendah (R besar) – suatu hal yang akan kita amati dalam seksi berikut.

Sebagai suatu rangkuman, model yang kita turunkan dalam seksi ini dapat dinyatakan dalam tiga persamaan, yaitu persamaan (19), (24) dan (30) yang kita ulangi sebagai berikut:

$$f_{0,\varepsilon} = \mathcal{E} f_{0,MAX} \dots\dots\dots(19)$$

$$D_{s,\varepsilon} = D_{0,MAX} \left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon} \right) \dots\dots\dots(24)$$

$$R = \frac{1}{kT_c} \dots\dots\dots(30)$$

Dalam seksi berikut, model yang kita turunkan ini akan kita gunakan untuk menganalisa sejumlah detektor GM. Akan ditentukan secara kualitatif detektor mana yang akan paling tepat untuk digunakan dalam suatu aplikasi tertentu.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam bagian ini, persamaan (19), (24), dan (30) akan digunakan untuk memperhitungkan jangkauan pengukuran dan resolusi 34 jenis detektor GM dari LND, Inc, dengan menggunakan data yang tersedia di dalam spesifikasi [1]-[34]. Perhatikan bahwa *dead time* dan sensitivitas selalu tersedia didalam spesifikasi diatas untuk radiasi gamma dari ^{60}Co . Disini kita memperkirakan besaran dari $\varepsilon \leq 20\%$, dan bahwa dalam penggunaan waktu cacah $T_c = 1$ detik.

Disini, dianggap bahwa karakteristik yang penting hanya jangkauan pengukuran dan resolusi untuk ^{60}Co . Karakteristik lainnya, semisal laju cacah latarbelakang atau sensitivitas terhadap radiasi dengan energi yang beragam, tidak merupakan bagian dari model kita. Perhitungan dilakukan menggunakan Microsoft Excel..

Tabel I dan II menunjukkan hasil perhitungannya. Pada Tabel 1, ke-34 jenis detektor itu diurutkan menurut jangkauan pengukuran laju dosisnya (terlebar paling dulu). Pada

Tabel 2, mereka diurutkan menurut sensitivitasnya (tertinggi lebih dulu) – atau dengan kata lain, menurut resolusinya (terhalus paling dulu). Pada kedua tabel, juga dicantumkan peringkat detektor pada tabel satunya. Selain itu, sensitivitas (dalam cpm/mR/h) dan dead time (dalam μ s) juga selalu dicantumkan karena kedua karakteristik ini selalu tercantum pada spesifikasi.

4. KESIMPULAN

Dengan model matematis yang telah dipaparkan, kesalahan pengukuran, resolusi dan jangkauan ukur suatu detektor GM dapat diperkirakan dari sensitivitas atau waktu mati (*dead time*) dari spesifikasinya.

Selain itu, detektor GM cenderung tidak mencapai resolusi terbaik dan jangkauan pengukuran terbesar sekaligus, sehingga bila keduanya dituntut dari suatu instrumen, penggunaan dua atau lebih detektor mungkin merupakan keharusan.

Diantara detektor yang dianalisa, detektor jenis 7802 keluaran LND, Inc memiliki resolusi terbaik, sedangkan detektor jenis 71623 memiliki jangkauan ukur terluas.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Anonymous, 710,712,718,7241, *End Window-Alpha-Beta-Gamma Detector*, <http://www.lndinc.com/products/340/>, LND Inc., Oceanside, New York, 2012
- [2]. Anonymous, 714,716,7163,74218,74321,78016,78017,7808, *Gamma Detector*, <http://www.lndinc.com/products/318/>, LND Inc., Oceanside, New York, 2012
- [3]. Anonymous, 71611,71611,7165, *Energy Independent Gm Detector*, <http://www.lndinc.com/products/308/>, LND Inc., Oceanside, New York, 2012
- [4]. Anonymous, 71627,719, 721,72513, 72513, 72527, 726, *Thin Wall Beta-Gamma Detector*, <http://www.lndinc.com/products/310/>, LND Inc., Oceanside, New York, 2012

Lampiran I – Contoh Perhitungan untuk LND 712

Sebagai contoh, disini dilakukan perhitungan untuk detektor LND 712. Dianggap bahwa nilai kesalahan pengukuran ε yang dapat ditolerir adalah 20% = 0,2, dan rangkaian pencacah yang kita gunakan menggunakan waktu pencacahan T_c sebesar satu detik. Pencacah tersebut menggunakan satuan laju cacah cps dan menampilkan laju cacah sekali tiap detik.

Nilai berikut ini didapatkan untuk *dead time* dan sensitivitas detektor dari spesifikasi [2]:

$$T_d = 90 \mu s = 9,0 \times 10^{-4} \text{ detik}$$
$$k = 18 \text{ cps/mRem/jam} = 18 \text{ cps.jam/mRem}$$

Mengikuti sistim satuan SI, satuan laju dosis diubah dari rem ke mikrosievert. Karena 1 sievert = 100 rem, maka:

$$k = (18 \text{ cps.jam/mRem}) \times (1000 \text{ mRem/Rem}) \times (100 \text{ Rem/Sv}) \times (10^{-6} \text{ Sv}/\mu\text{Sv})$$
$$k = 1,8 \text{ cps}/(\mu\text{Sv}/\text{jam})$$

Persamaan (2), kita dapatkan:

$$f_{0,MAX} = \frac{1}{T_d} = \frac{1}{9 \times 10^{-4} \text{ s}} = 11.111,11 \text{ cps}$$

Disini dianggap bahwa semua satuan takberdimensi adalah sama. Selain itu, dalam langkah antara dalam perhitungan, kita belum mengikuti kaidah angka penting.

Penggunaan (3) memberikan:

$$D_{0,MAX} = 1/kT_d = 1/[(1,8 \text{ cps.jam}/\mu\text{Sv}) (9,0 \times 10^{-4} \text{ detik})] = 1/(1,62 \times 10^{-4} \text{ cps.detik.jam}/\mu\text{Sv})$$
$$D_{0,MAX} = 6.172,84 \mu\text{Sv}/\text{jam}$$

Dari (19), nilai tertinggi laju cacah keluaran pencacah yang dapat diijinkan adalah:

$$f_{0,\varepsilon} = \varepsilon f_{0,MAX} = 0,2 \times 11.111,11 \text{ cps} = 2,2 \text{ kcps}$$

Karena besaran yang langsung berpengaruh terhadap keselamatan makhluk hidup adalah laju dosis dan bukan laju cacah, maka laju dosis tertinggi yang bisa diukur dengan akurasi yang dituntut, $D_{s,\varepsilon}$, perlu ditentukan dengan (24). Adapun $f_{0,\varepsilon}$ mungkin penting bagi perancang instrumen, semisal dalam menentukan jumlah bit data pencacahan dalam perangkat lunak pencacah bila mikrokontroler digunakan sebagai pencacah. Dengan menggunakan (24) kita dapatkan:

$$D_{s,\varepsilon} = D_{0,MAX} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \right) = (6.172,84 \mu\text{Sv}/\text{jam}) (0,2) (1-0,2)$$
$$D_{s,\varepsilon} = 1,54 \times 10^3 \mu\text{Sv}/\text{jam}$$

Selanjutnya, untuk menentukan resolusi pencacah, perhatikan bahwa $T_c = 1$ detik.

Penggunaan (30) memberikan:

$$R = 1/kT_c = 1 / [(1,8 \text{ cacah.jam}/\text{detik}.\mu\text{Sv}) (1 \text{ detik})] = 1 / (1,8 \text{ cacah.jam} / \mu\text{Sv})$$
$$R = 0,556 \mu\text{Sv}/\text{jam}$$

Tabel I dan II menampilkan nilai $D_{s,\varepsilon}$ dan R yang didapatkan diatas untuk LND 712.

Lampiran II – Hasil Perhitungan dalam Bentuk Tabel

Tabel 1: Peringkat Detektor GM Menurut Jangkauan Ukurnya

Peringkat	Jenis	Dead Time (μ s)	Sensitivitas (cps.h/mR)	Jangkauan Ukur (μ Sv/h)	Resolusi (μ Sv/h)	Peringkat Menurut Resolusi
1	71623	20	0,15	$8,33 \times 10^5$	66,7	34
2	7165	13	0,26	$7,40 \times 10^5$	38,5	29-33
3-4	71627	18	0,26	$5,34 \times 10^5$	38,5	29-33
3-4	716	18	0,26	$5,34 \times 10^5$	38,5	29-33
5-6	71616	20	0,26	$4,81 \times 10^5$	38,5	29-33
5-6	71611	20	0,26	$4,81 \times 10^5$	38,5	29-33
7	714	20	1,5	$8,33 \times 10^4$	6,67	28
8	726	45	3,5	$1,59 \times 10^4$	2,86	27
9	7241	45	6	$9,26 \times 10^3$	1,67	26
10	710	50	10	$5,00 \times 10^3$	1,00	25
11-13	73118	20	60	$2,08 \times 10^3$	0,167	12-18
11-13	8767	20	60	$2,08 \times 10^3$	0,167	12-18
11-13	7311	20	60	$2,08 \times 10^3$	0,167	12-18
14	72510	65	20	$1,92 \times 10^3$	0,500	22-23
15	712	90	18	$1,54 \times 10^3$	0,556	24
16-17	7313	40	60	$1,04 \times 10^3$	0,167	12-18
16-17	7312	40	60	$1,04 \times 10^3$	0,167	12-18
18	72319	30	100	$8,33 \times 10^2$	0,100	6
19	725	200	20	$6,25 \times 10^2$	0,500	22-23
20-21	74321	75	60	$5,56 \times 10^2$	0,167	12-18
20-21	74318	75	60	$5,56 \times 10^2$	0,167	12-18
22-23	72514	50	90	$5,56 \times 10^2$	0,111	7-11
22-23	721	100	45	$5,56 \times 10^2$	0,222	20
24	74310	100	46	$5,43 \times 10^2$	0,217	19
25	718	300	30	$2,78 \times 10^2$	0,333	21
26-27	71916	100	90	$2,78 \times 10^2$	0,111	7-11
26-27	719	100	90	$2,78 \times 10^2$	0,111	7-11
28	78014	100	120	$2,08 \times 10^2$	0,0833	5
29-30	72513	150	90	$1,85 \times 10^2$	0,111	7-11
29-30	78016	150	90	$1,85 \times 10^2$	0,111	7-11
31	7802	100	180	$1,39 \times 10^2$	0,0556	1-2
32	7808	150	180	$9,26 \times 10^1$	0,0556	1-2
33	78017	200	160	$7,81 \times 10^1$	0,0625	3-4
34	7807	210	160	$7,44 \times 10^1$	0,0625	3-4

Tabel 2: Peringkat Detektor GM Menurut Resolusinya

Peringkat	Jenis	Dead Time (μ s)	Sensitivitas (cps.h/mR)	Jangkauan Ukur (μ Sv/h)	Resolusi (μ Sv/h)	Peringkat Menurut Jangkauan Ukur
1-2	7802	100	180	$1,39 \times 10^2$	0,0556	31
1-2	7808	150	180	$9,26 \times 10^1$	0,0556	32
3-4	78017	200	160	$7,81 \times 10^1$	0,0625	33
3-4	7807	210	160	$7,44 \times 10^1$	0,0625	34
5	78014	100	120	$2,08 \times 10^2$	0,0833	28
6	72319	30	100	$8,33 \times 10^2$	0,100	18
7-11	72514	50	90	$5,56 \times 10^2$	0,111	22-23
7-11	71916	100	90	$2,78 \times 10^2$	0,111	26-27
7-11	719	100	90	$2,78 \times 10^2$	0,111	26-27
7-11	72513	150	90	$1,85 \times 10^2$	0,111	29-30
7-11	78016	150	90	$1,85 \times 10^2$	0,111	29-30
12-18	73118	20	60	$2,08 \times 10^3$	0,167	11-13
12-18	8767	20	60	$2,08 \times 10^3$	0,167	11-13
12-18	7311	20	60	$2,08 \times 10^3$	0,167	11-13
12-18	7313	40	60	$1,04 \times 10^3$	0,167	16-17
12-18	7312	40	60	$1,04 \times 10^3$	0,167	16-17
12-18	74321	75	60	$5,56 \times 10^2$	0,167	20-21
12-18	74318	75	60	$5,56 \times 10^2$	0,167	20-21
19	74310	100	46	$5,43 \times 10^2$	0,217	24
20	721	100	45	$5,56 \times 10^2$	0,222	22-23
21	718	300	30	$2,78 \times 10^2$	0,333	25
22-23	72510	65	20	$1,92 \times 10^3$	0,500	14
22-23	725	200	20	$6,25 \times 10^2$	0,500	19
24	712	90	18	$1,54 \times 10^3$	0,556	15
25	710	50	10	$5,00 \times 10^3$	1,00	10
26	7241	45	6	$9,26 \times 10^3$	1,67	9
27	726	45	3,5	$1,59 \times 10^4$	2,86	8
28	714	20	1,5	$8,33 \times 10^4$	6,67	7
29-33	7165	13	0,26	$7,40 \times 10^5$	38,5	2
29-33	71627	18	0,26	$5,34 \times 10^5$	38,5	3-4
29-33	716	18	0,26	$5,34 \times 10^5$	38,5	3-4
29-33	71616	20	0,26	$4,81 \times 10^5$	38,5	5-6
29-33	71611	20	0,26	$4,81 \times 10^5$	38,5	5-6
34	71623	20	0,15	$8,33 \times 10^5$	66,7	1