

**Makalah Ilmiah Populer**

**EVALUASI KINERJA DETEKTOR *GEIGER-MÜLLER*: ANALISIS  
STABILITAS STATISTIK, LINEARITAS DOSIMETRI, DAN EFISIENSI  
GEOMETRI**

*Artikel ilmiah ini disusun dalam rangka  
untuk pemenuhan capaian kinerja mahasiswa*



Disusun pada tanggal 16 Juli 2026 oleh :  
Haidar Umar / Elektronika Instrumentasi / 022300024

**Dosen Pengampu/Pembimbing :**

**Risky Nurseila Karthika, M.Sc**

**POLITEKNIK TEKNOLOGI NUKLIR INDONESIA  
BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL  
YOGYAKARTA  
2026**

**LEMBAR PERSETUJUAN  
MAKALAH ILMIAH**

**EVALUASI KINERJA DETEKTOR *GEIGER-MÜLLER*: ANALISIS STABILITAS  
STATISTIK, LINEARITAS DOSIMETRI, DAN EFISIENSI GEOMETRI**

***PERFORMANCE EVALUATION OF A GEIGER-MÜLLER DETECTOR: ANALYSIS  
OF STATISTICAL STABILITY, DOSIMETRY LINEARITY, AND GEOMETRIC  
EFFICIENCY***

Disusun oleh  
Haidar Umar / Elektronika Instrumentasi / 022300024

Yogyakarta, 16 Juli 2026  
Telah diperiksa dan disetujui pada tanggal 16 Juli 2026 oleh:

Dosen Pembimbing/Dosen Pengampu Matakuliah



**Risky Nurseila Karthika, M.Sc**  
NIP. 199409132020122008

# EVALUASI KINERJA DETEKTOR *GEIGER-MÜLLER*: ANALISIS STABILITAS STATISTIK, LINEARITAS DOSIMETRI, DAN EFISIENSI GEOMETRI.

## PERFORMANCE EVALUATION OF A *GEIGER-MÜLLER* DETECTOR: ANALYSIS OF STATISTICAL STABILITY, DOSIMETRY LINEARITY, AND GEOMETRIC EFFICIENCY.

Haidar Umar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - Jl. Babarsari Kotak POB 6101/YKKB, Kabupaten Sleman, DI Yogyakarta, 55281

\*Email koresponden : [haidar.umar789@gmail.com](mailto:haidar.umar789@gmail.com)

### ABSTRAK

**EVALUASI KINERJA DETEKTOR *GEIGER-MÜLLER*: ANALISIS STABILITAS STATISTIK, LINEARITAS DOSIMETRI, DAN EFISIENSI GEOMETRI.** Pengujian performa detektor radiasi sangat penting dilakukan untuk memastikan keandalan pencacahan instrumen nuklir sebelum digunakan dalam *monitoring* atau eksperimen lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas kerja, linearitas respons dosimetri, dan karakteristik geometri dari detektor *Geiger-Müller*. Metodologi eksperimen dibagi menjadi tiga pengujian utama menggunakan sumber standar Am-241. Pertama, uji stabilitas dilakukan menggunakan metode *Chi-Square* untuk menguji kesesuaian fluktuasi pencacahan dengan distribusi *Poisson* pada kondisi dalam dan luar ruangan. Kedua, uji linearitas dilakukan untuk memetakan korelasi antara laju cacah (CPM) terhadap laju dosis ( $\mu\text{Sv/jam}$ ). Ketiga, uji variasi jarak dilakukan guna memetakan efisiensi geometri sistem spasial. Hasil analisis statistik *Chi-Square* mengonfirmasi bahwa detektor bekerja sangat stabil, ditunjukkan oleh nilai hitung yang berada jauh di bawah batas kritis tabel pada tingkat signifikansi 0,05. Pada uji linearitas, detektor menunjukkan respons yang sangat linear ( $R^2 > 0,96$ ) dengan perbedaan *minor* faktor kalibrasi antara kondisi dalam dan luar ruangan yang berkorelasi dengan kontribusi *fluks* radiasi hamburan. Sementara itu, hasil pengujian variasi jarak membuktikan validitas Hukum Kuadrat Terbalik, di mana efisiensi geometri dan intensitas cacahan menurun eksponensial seiring bertambahnya jarak akibat penyusutan sudut ruang (*solid angle*). Kesimpulannya, detektor *Geiger-Müller* yang diuji menunjukkan performa statistik, dosimetri, dan spasial yang andal, sehingga layak diimplementasikan untuk pemantauan proteksi radiasi lingkungan

**Kata kunci:** Detektor *Geiger-Müller*, Uji *Chi-Square*, Linearitas Dosimetri, Radiasi Latar, Efisiensi Geometri, Hukum Kuadrat Terbalik.

### ABSTRACT

**PERFORMANCE EVALUATION OF A *GEIGER-MÜLLER* DETECTOR: ANALYSIS OF STATISTICAL STABILITY, DOSIMETRY LINEARITY, AND GEOMETRIC EFFICIENCY.** Testing the performance of radiation detectors is essential to ensure the reliability of nuclear instrument counting before field monitoring or experimental deployment. This study aims to evaluate the operating stability, dosimetry response linearity, and geometric characteristics of a *Geiger-Müller* detector. The experimental methodology is divided into three main tests using a standard Am-241 source. First, a stability test was conducted using the *Chi-Square* method to verify conformity with the *Poisson* distribution in both indoor and outdoor environments. Second, a linearity test was performed to map the correlation between count rate (CPM) and dose rate ( $\mu\text{Sv/h}$ ). Third, distance variation tests were conducted to map the spatial geometric efficiency of the system. The *Chi-Square* statistical analysis confirmed that the detector operates highly stably, indicated by the calculated values remaining well below the critical table limits at a 0.05 significance level. In the linearity test, the detector exhibited a highly linear response ( $R^2 > 0.96$ ) with minor calibration factor variations between indoor and outdoor conditions correlated to the contribution of scattering radiation flux. Meanwhile, the distance variation results validated the *Inverse-Square Law*, where geometric efficiency and count intensity decreased exponentially with increasing distance due to solid angle reduction. In conclusion, the tested *Geiger-Müller* detector demonstrates reliable statistical, dosimetric, and spatial performance, rendering it qualified for environmental radiation protection monitoring

**Keywords:** *Geiger-Müller* Detector, *Chi-Square*, Dosimetry Linearity, Background Radiation, Geometric Efficiency, *Inverse-Square Law*.

## PENDAHULUAN

Pemanfaatan zat radioaktif dan teknologi nuklir dalam berbagai sektor menuntut adanya sistem pemantauan proteksi radiasi yang ketat dan presisi. Salah satu instrumen yang paling *fundamental* dan luas penggunaannya dalam mendeteksi radiasi pengion adalah detektor *Geiger-Müller* (GM). Keunggulan utama instrumen ini terletak pada sensitivitasnya yang tinggi, durabilitas mekanis, serta kemudahan operasional di lapangan. Meskipun demikian, keandalan data pengukuran dari detektor GM tidak dapat diasumsikan mutlak tanpa melalui serangkaian proses karakterisasi dan pengujian kinerja yang komprehensif, mengingat proses peluruhan inti radioaktif itu sendiri merupakan fenomena fisik yang bersifat stokastik atau acak [1].

Sifat keacakan peluruhan nuklir ini secara teoretis mengikuti model probabilitas distribusi *Poisson*. Oleh karena itu, pengujian stabilitas statistik menggunakan metode  $\chi^2$  menjadi langkah pertama yang krusial untuk memverifikasi kelayakan detektor. Uji ini memastikan bahwa fluktuasi laju cacah yang direkam oleh alat murni merupakan representasi dari fluktuasi alami sumber radioaktif, dan bukan merupakan imbas dari kerusakan instrumen (seperti interferensi sirkuit elektronik) ataupun anomali radiasi latar (*background radiation*) dari lingkungan sekitar [3].

Selain keandalan statistik pencacahan, aspek fisis dosimetri juga menjadi parameter krusial dalam evaluasi kelayakan instrumen. Dalam aplikasi proteksi radiasi lapangan, pembacaan data kelistrikan mentah berupa *Count Per Minute* (CPM) harus dapat dikonversi secara akurat dan konsisten menjadi besaran laju dosis ekuivalen ( $\mu\text{Sv/jam}$ ) [4, 6]. Tingkat linearitas respons detektor terhadap variasi intensitas radiasi sangat menentukan ketepatan faktor kalibrasi ini. Lebih jauh lagi, perbedaan karakteristik paparan radiasi hamburan (*scattering*) antara lingkungan tertutup (dalam ruangan) dan terbuka (luar ruangan) berpotensi memengaruhi sensitivitas respons *window* detektor, sehingga analisis komparatif fisis antara kedua kondisi lingkungan tersebut menjadi sangat relevan untuk dikaji.

Di samping faktor statistik dan linearitas dosimetri, sensitivitas detektor secara praktis sangat dibatasi oleh parameter efisiensi geometri spasial. Pemancaran fluks radiasi dari sumber titik (*point source*) seperti Amerisium-241 (Am-241) tunduk pada prinsip Hukum Kuadrat Terbalik (*Inverse-Square Law*) [2, 5]. Interaksi spasial antara rentang jarak sumber radiasi dan luasan area penampang detektor memunculkan konsep penyusutan sudut ruang (*solid angle*), yang secara eksponensial mendegradasi persentase fluks partikel radiasi yang berhasil mengionisasi gas di dalam tabung GM. Pemahaman mendalam terkait efisiensi spasial ini sangat penting untuk mencegah misinterpretasi data saat melakukan pengukuran pada jarak yang bervariasi.

Berdasarkan identifikasi penting tersebut, penelitian ini disusun untuk melakukan evaluasi kinerja detektor *Geiger-Müller* secara komprehensif, tidak sekadar dari aspek operasional dasar, melainkan juga dari aspek landasan fisika dan statistika. Penelitian ini secara spesifik bertujuan untuk: (1) menganalisis stabilitas pencacahan instrumen melalui uji kesesuaian distribusi *Poisson* menggunakan metode  $\chi^2$  (2) memetakan linearitas korelasi dosimetri (CPM terhadap  $\mu\text{Sv/jam}$ ) pada kondisi lingkungan dalam dan luar ruangan; serta (3) memvalidasi karakteristik efisiensi geometri sistem berdasarkan variasi jarak spasial. Melalui pemetaan dan integrasi parameter-parameter tersebut, diharapkan dapat dibuktikan dalam tingkat kelayakan dan akurasi instrumen *Geiger-Müller* dalam mendukung operasional keselamatan dan proteksi radiasi.

## METODOLOGI

Desain eksperimental pada penelitian ini bertumpu pada sistem spektrometri dan pencacahan nuklir berbasis detektor *Geiger-Müller* (GM). Perangkat keras utama yang diintegrasikan meliputi tabung detektor GM, modul catu daya tegangan tinggi (*High Voltage Supply Module*) yang dikalibrasi pada rentang tegangan operasi dataran (*plateau region*) antara 400 V hingga 700 V guna memastikan stabilitas *avalans* elektron di dalam tabung, sistem pencacah (*scaler/counter*), pewaktu otomatis (*timer*), serta sumber radiasi gamma standar [12]. Seluruh konfigurasi tersebut ditempatkan pada bangku optik presisi (*precision optical bench*) guna menjaga akurasi penyelarasan sumbu geometri antara penampang detektor dan sumber radiasi [5].

Pengujian respons detektor terhadap sumber radiasi dilakukan pada dua kondisi lingkungan yang berbeda. Pengujian dalam ruangan lab instrumentasi nuklir (*indoor*) dilaksanakan secara spesifik di Laboratorium Instrumentasi Nuklir, Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia. Pemilihan lokasi ini bertujuan untuk merepresentasikan kondisi laboratorium yang memiliki struktur dinding penutup. Sementara itu, pengujian luar ruangan lab instrumentasi nuklir (*outdoor*) dilakukan di area terbuka tanpa struktur pelindung untuk menganalisis efek hilangnya radiasi hambur. Pada pelaksanaan eksperimen ini, kondisi lingkungan diasumsikan berada pada keadaan yang stabil, dengan suhu ruangan lab instrumentasi nuklir dikondisikan pada 22,5°C dan tingkat kelembapan udara sebesar 55%. Dengan nilai parameter lingkungan yang konstan tersebut, diyakini tidak ada distorsi atau pengaruh yang signifikan terhadap kinerja komponen elektronika maupun hasil cacahan detektor GM.

Prosedur akuisisi data dirancang secara terstruktur menjadi tahapan pengujian statistik dan fisis untuk menjamin tingkat presisi serta keandalan instrumen. Tahap pengujian stabilitas statistik dilakukan melalui perekaman data cacahan secara repetitif sebanyak 20 kali pengulangan, dengan durasi waktu tetap (*preset time*) selama 60 detik untuk setiap kali pengulangannya. Fluktuasi nilai laju cacah yang terekam kemudian dianalisis secara kuantitatif menggunakan metode statistik  $\chi^2$ . Pendekatan ini bertujuan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian (*goodness-of-fit*) sebaran data instrumen terhadap probabilitas distribusi *Poisson* teoretis.

Tahap selanjutnya berorientasi pada karakterisasi efisiensi geometri spasial dan *atenuasi* radiasi. Pada tahap ini, posisi sumber radiasi digeser secara linear menjauhi *window* detektor dengan variasi jarak spesifik (dalam satuan sentimeter), mencakup rentang dari jarak fisis terdekat hingga batas deteksi minimum yang mampu direspons oleh instrumen [6]. Guna meminimalisasi ketidakpastian acak (*random uncertainty*) akibat *fluktuasi* emisi partikel, perekaman laju cacah baik dalam satuan *Counts Per Second* (CPS) maupun *Counts Per Minute* (CPM) pada masing-masing titik jarak direplikasi sebanyak tiga kali [13]. Rata-rata data hasil replikasi tersebut selanjutnya dikomputasi untuk menganalisis korelasi degradasi intensitas *fluks* radiasi terhadap peningkatan jarak spasial, sekaligus memvalidasi keberlakuan Hukum Kuadrat Terbalik (*Inverse-Square Law*) pada sistem deteksi yang diuji.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Peluruhan radioisotop pada dasarnya merupakan fenomena fisis yang bersifat *stokastik*, sehingga pola fluktuasinya secara teoretis diproyeksikan mengikuti model probabilitas distribusi *Poisson* [1, 4]. Dalam konteks evaluasi kapabilitas instrumen detektor *Geiger-Müller* (GM), validasi terhadap sifat keacakan ini mutlak diperlukan guna memastikan bahwa variansi laju cacah yang direkam murni merepresentasikan dinamika peluruhan radioaktif alami, bukan merupakan artefak dari gangguan sistematis atau *instabilitas* sirkuit elektronik alat ukur [3, 5]. Untuk merealisasikan evaluasi stabilitas pencacahan tersebut, metode analitis baku yang diimplementasikan dalam pengujian ini adalah uji kesesuaian  $\chi^2$  [3].

Pengujian statistik  $\chi^2$  dieksekusi menggunakan sumber emisi standar Am-241 yang diposisikan secara presisi pada jarak geometri tetap sejauh 4 cm dari penampang *window* detektor. Guna mengakomodasi analisis komparatif terhadap radiasi latar, perekaman data diakuisisi pada dua kondisi lingkungan fisis yang berbeda, yakni area luar ruangan terbuka dan di dalam ruangan tertutup. Pada masing-masing kondisi lingkungan, sistem instrumen dikonfigurasi untuk melakukan pencacahan repetitif sebanyak 20 kali pengulangan, dengan pengaturan parameter batas waktu (*preset time*) konstan selama 1 menit per pencacahan (*count per minute*).

Hipotesis landasan yang digunakan dalam analisis statistik ini diformulasikan sebagai berikut:

$H_0$  : *Fluktuasi* laju cacah radiasi Am-241 sejalan dengan probabilitas distribusi *Poisson* (mengindikasikan sistem instrumen bekerja dengan normal dan stabil).

$H_1$  : *Fluktuasi* laju cacah radiasi Am-241 menyimpang dari probabilitas distribusi *Poisson* (mengindikasikan *eksistensi anomali* teknis pada sistem deteksi).

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\bar{x}} \quad (1)$$

Berdasarkan persamaan 1 variabel  $\bar{x}$  merepresentasikan nilai rata-rata seluruh cacahan,  $X_i$  mendeskripsikan kuantitas cacah pada pengulangan ke- $i$ , sedangkan parameter derajat kebebasan (*degrees of freedom*) dikalkulasi melalui persamaan  $df = n - 1$ , di mana besaran  $n$  mencerminkan populasi data eksperimen [3]. Nilai  $\chi^2$  komputasional yang diperoleh kemudian dihadapkan dengan batas kritis nilai  $\chi^2$  tabel rujukan pada tingkat signifikansi 95% ( $\alpha = 0,05$ ) [3]. Apabila hasil kalkulasi komputasional membuktikan bahwa  $\chi^2$  hitung lebih *minor* dibandingkan  $\chi^2$  tabel, maka hipotesis  $H_0$  gagal ditolak, yang mengonfirmasi bahwa rentetan pencacahan secara valid selaras dengan sebaran probabilitas *Poisson* [3].

**Tabel 1.** Hasil pengukuran cacah Am-241 sebanyak 20 kali pengulangan pada kondisi luar ruangan

| No. | <i>cs (count/menit)</i> | $\bar{cs} - cs$ | $(\bar{cs} - cs)^2$ |
|-----|-------------------------|-----------------|---------------------|
| 1   | 696                     | -24.25          | 588.0625            |
| 2   | 751                     | 30.75           | 945.5625            |
| 3   | 706                     | -14.25          | 203.0625            |
| 4   | 684                     | -36.25          | 1314.0625           |
| 5   | 711                     | -9.25           | 85.5625             |
| 6   | 694                     | -26.25          | 689.0625            |

| No.             | cs (count/menit) | $\overline{cs} - cs$           | $(\overline{cs} - cs)^2$ |
|-----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 7               | 763              | 42.75                          | 1827.5625                |
| 8               | 736              | 15.75                          | 248.0625                 |
| 9               | 750              | 29.75                          | 885.0625                 |
| 10              | 693              | -27.25                         | 742.5625                 |
| 11              | 741              | 20.75                          | 430.5625                 |
| 12              | 731              | 10.75                          | 115.5625                 |
| 13              | 739              | 18.75                          | 351.5625                 |
| 14              | 748              | 27.75                          | 770.0625                 |
| 15              | 710              | -10.25                         | 105.0625                 |
| 16              | 736              | 15.75                          | 248.0625                 |
| 17              | 695              | -25.25                         | 637.5625                 |
| 18              | 728              | 7.75                           | 60.0625                  |
| 19              | 676              | -44.25                         | 1958.0625                |
| 20              | 717              | -3.25                          | 10.5625                  |
| Rata-rata Cs    |                  | $\Sigma(Cs - \overline{Cs})^2$ |                          |
| 720.25          |                  | 12215.75                       |                          |
| $\chi^2$ hitung |                  | 16.96043041                    |                          |

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{14405}{20} = 720,25 \text{ count/menit} \quad (2)$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 12215,75 \quad (3)$$

$$\chi^2 = \frac{12215,75}{720,25} = 16,9604$$

Merujuk pada ukuran sampel  $n = 20$ , sistem analisis ini beroperasi pada derajat kebebasan  $df = 19$ . Mengacu pada kurva baku distribusi  $\chi^2$  untuk taraf signifikansi  $\alpha = 0,05$  dan  $df = 19$ , batas penerimaan kritis (nilai tabel) ditetapkan pada konstanta 30,144 [3]. Terkait data menunjukkan bahwa  $\chi^2$  hitung (16,9604) berkedudukan signifikan di bawah ambang batas toleransi tabel, sehingga  $H_0$  diakui. Temuan kuantitatif ini membuktikan bahwa dinamika pencacahan Am-241 pada medium luar ruangan merepresentasikan fluktuasi acak *absolut* dari proses peluruhan nuklir, tanpa *intervensi* penyimpangan kelistrikan [1].

Melalui prosedur akuisisi yang identik, eksperimen dilanjutkan untuk memetakan respons keandalan instrumen di dalam ruang tertutup. Data pencacahan *repetitif* sebanyak 20 kali pengulangan dipaparkan pada **Tabel 2**.

**Tabel 2.** Hasil pengukuran cacah Am-241 sebanyak 20 kali pengulangan pada kondisi dalam ruangan

| No. | cs (count/menit) | $\overline{cs} - cs$ | $(\overline{cs} - cs)^2$ |
|-----|------------------|----------------------|--------------------------|
| 1   | 727              | -2.25                | 5.0625                   |
| 2   | 683              | -46.25               | 2139.0625                |
| 3   | 684              | -45.25               | 2047.5625                |
| 4   | 703              | -26.25               | 689.0625                 |
| 5   | 701              | -28.25               | 798.0625                 |
| 6   | 771              | 41.75                | 1743.0625                |
| 7   | 722              | -7.25                | 52.5625                  |
| 8   | 723              | -6.25                | 39.0625                  |
| 9   | 738              | 8.75                 | 76.5625                  |
| 10  | 768              | 38.75                | 1501.5625                |
| 11  | 697              | -32.25               | 1040.0625                |
| 12  | 761              | 31.75                | 1008.0625                |
| 13  | 772              | 42.75                | 1827.5625                |
| 14  | 705              | -24.25               | 588.0625                 |

| No.             | cs (count/menit) | $\overline{cs} - cs$           | $(\overline{cs} - cs)^2$ |
|-----------------|------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 15              | 755              | 25.75                          | 663.0625                 |
| 16              | 742              | 12.75                          | 162.5625                 |
| 17              | 719              | -10.25                         | 105.0625                 |
| 18              | 751              | 21.75                          | 473.0625                 |
| 19              | 747              | 17.75                          | 315.0625                 |
| 20              | 716              | -13.25                         | 175.5625                 |
| Rata-rata cs    |                  | $\Sigma(\overline{cs} - cs)^2$ |                          |
| 729.25          |                  | 15449.75                       |                          |
| $\chi^2$ hitung |                  | 21.18580734                    |                          |

$$\bar{x} = \frac{\sum x_i}{n} = \frac{14585}{20} = 729,25 \text{ count/menit} \quad (4)$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2 = 15449,75$$

$$\chi^2 = \frac{15449,75}{729,25} = 21,1858 \quad (5)$$

Dengan mempertahankan parameter kontrol  $df = 19$  serta nilai ambang batas 30,144 ( $\alpha=0,05$ ), luaran kalkulasi kembali memvalidasi bahwa nilai  $\chi^2$  hitung (21,1858) gagal melampaui batas kritis [3]. Akseptasi  $H_0$  pada kondisi internal tertutup ini mendemonstrasikan bahwa sistem pencacahan mentaati distribusi *Poisson* dengan sangat ideal, sekaligus menunjukkan bahwa instrumen bebas dari gangguan noise elektronik transien yang seringkali mengurangi validitas pengukuran lingkungan [5].

**Tabel 3.** Hasil Ringkasan Hasil Uji  $\chi^2$

| No. | Kondisi       | Df | $\chi^2$ Hitung | $\chi^2$ Tabel ( $\alpha=0,05$ ) | Kesimpulan     |
|-----|---------------|----|-----------------|----------------------------------|----------------|
| 1   | Luar Ruangan  | 19 | 16,9604         | 30,144                           | $H_0$ diterima |
| 2   | Dalam Ruangan | 19 | 21,1858         | 30,144                           | $H_0$ diterima |

Nilai  $\chi^2$  untuk kondisi dalam ruangan (21,1858) sedikit lebih tinggi daripada luar ruangan (16,9604). Ini terjadi karena ruangan tertutup memiliki radiasi latar (*background radiation*) yang lebih besar, berasal dari bahan bangunan dan sistem sirkulasi udara [4, 6, 7]. Meski begitu, kedua nilai masih di bawah batas kritis yang ditentukan, sehingga detektor GM ini terbukti bekerja secara stabil [1] mengalami sedikit peningkatan dibandingkan hasil di area terbuka (16,9604). Perbedaan ini terjadi karena radiasi latar (*background radiation*) cenderung lebih tinggi di ruangan tertutup, yang berasal dari radiasi sekunder material bangunan (seperti dinding) dan sistem sirkulasi udara [4, 6, 7]. Meski ada sedikit fluktuasi akibat radiasi alami di lingkungan sekitar, nilai pada kedua kondisi tersebut tetap berada di bawah batas *Poisson* yang disyaratkan, sehingga menunjukkan bahwa detektor GM yang diuji bekerja secara konsisten [1].

Fenomena anomali latar ini menegaskan esensi karakterisasi spektrum latar dalam setiap prosedur dosimetri lingkungan. Akumulasi radioisotop *primordial* (seperti rantai peluruhan uranium, thorium, serta kandungan kalium-40) di dalam matriks dinding bangunan wajib diisolasi dan dikompensasi secara persisten demi mereduksi bias sistematis (*systematic error*) pembacaan, terutama saat mengeksekusi pengukuran jendela waktu panjang [10].

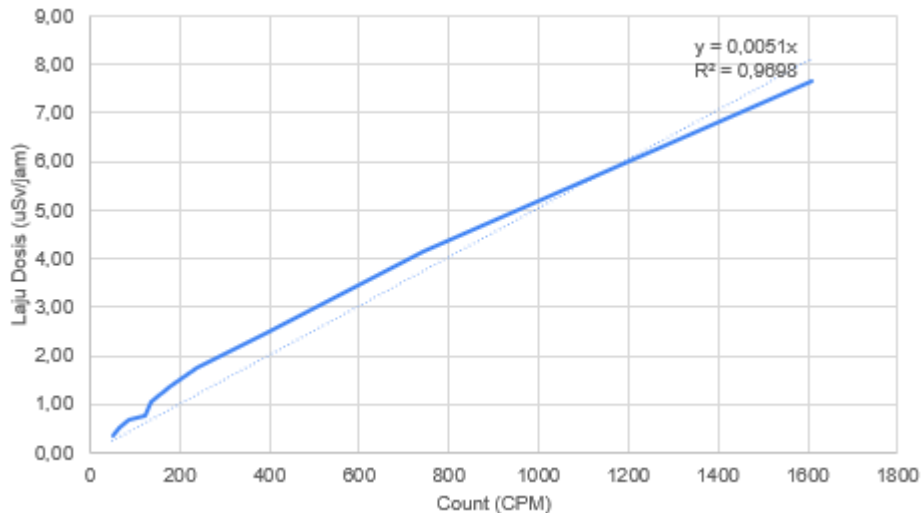
Di luar kapabilitas statistika kelistrikan, pilar teknis selanjutnya dalam kelayakan detektor difokuskan pada tahap karakterisasi linearitas pantauan radiasi [2]. Hipotesis uji ini digunakan untuk menetapkan model korelasi antara respons instrumen berupa pulsa awal (*Counts Per Minute*) terhadap besaran turunan proteksi radiasi berupa laju dosis ekuivalen dalam unit mikrosievert per jam ( $\mu\text{Sv/jam}$ ) [6]. Ketajaman sifat proporsionalitas (*linearity*) yang terbentuk dalam pemodelan berfungsi sebagai akar matematis untuk penentuan faktor kalibrasi portabel instrumen lapangan [2].

Pengujian linearitas tahap awal dilakukan di dalam ruangan dengan cara menggeser posisi sumber Am-241 sedikit demi sedikit, sehingga diperoleh berbagai nilai CPM yang kemudian dipasangkan dengan nilai laju dosis ( $\mu\text{Sv/jam}$ ) hasil pembacaan alat. Dari data tersebut dilakukan regresi linear dan diperoleh garis tren  $y = 0,0051x$  dengan koefisien determinasi  $R^2 = 0,9698$ . Pada kondisi ini,  $y$  menyatakan laju dosis, sedangkan  $x$  menyatakan jumlah pulsa (CPM) yang terbaca. Kemiringan garis (*slope*) sebesar 0,0051 menunjukkan bahwa

setiap kenaikan 1 CPM akan meningkatkan laju dosis sebesar 0,0051  $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ , seperti ditunjukkan pada Persamaan 6. Nilai inilah yang kemudian digunakan sebagai faktor kalibrasi alat [2].

$$\text{Laju Dosis} = 0,0051 \times \text{CPM} \quad (6)$$

Proyeksi dari model ini mencontohkan bahwa apabila elektroda sensor mencatat tangkapan sebanyak 1000 CPM, maka nilai konversi dosimetrinya akan tertaksir pada angka 5,1  $\mu\text{Sv}/\text{jam}$  ( $0,0051 \times 1000$ ), konsisten dengan pemetaan kurva faktual instrumen. Melalui *inversi* matematis, konstanta kalibrasi tersebut juga mengekspos sensitivitas intrinsik sistem berupa kerapatan cacahan sebesar 196,08 CPM (diperoleh dari  $1 / 0,0051$ ) untuk memproduksi tingkat paparan murni 1  $\mu\text{Sv}/\text{jam}$  pada tingkat energi pancaran spesifik Am-241 [6].



**Gambar 1.** Grafik Linearitas Kondisi Dalam Ruangan Am-241 (CPM vs  $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ )

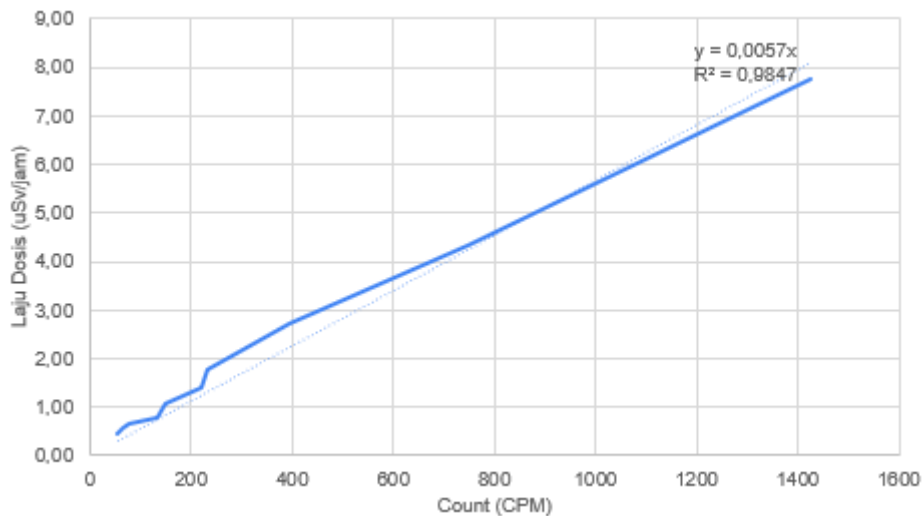
Konfirmasi komputasional  $R^2$  senilai 0,9698 memproyeksikan bahwa sebesar 96,98% fluktuasi indeks laju dosis dapat dirasionalisasikan dan diprediksi dengan sangat presisi melalui variabel laju cacah (CPM) dalam fungsi linear. Sisa deviasi yang merepresentasikan 3,02% variansi probabilitas bersumber dari peleburan antara ketidakpastian stokastik emisi fisis dan hambatan resolusi *temporal* (*dead time*) di sepanjang kavitas gas *Geiger-Müller* [1, 5, 8]. Kerapatan konvergensi nilai  $R^2$  yang menyentuh *level* kesempurnaan proksimal *absolut* membuktikan bahwa instrumen menyajikan superioritas linearitas respon [3]. Meski demikian, observasi cermat pada pita intensitas rendah (spektrum 0-200 CPM) mengidentifikasi deviasi *non-linearitas* ringan di mana koordinat letak sedikit menyimpang ke atas tren kalkulasi. Pergeseran *minor* ini adalah konsekuensi fisis saat rentang spasial instrumen diperbesar secara ekstrem, memicu degradasi *fluks foton* murni Am-241 sehingga radiasi lingkungan (*background*) yang konstan justru mengambil alih intervensi ionisasi di penampang *window* instrumen dibandingkan sumber acuan [1, 5].

Limitasi respons instrumental semacam fenomena waktu mati (*dead time*) sangat lumrah berimplikasi pada sirkuit *counting* berbasis tabung pengion (termasuk arsitektur tabung GM). Setelah mencatat satu radiasi, alat butuh waktu jeda beberapa saat sebelum bisa mendeteksi radiasi berikutnya. Terutama pada pengukuran spektrum berdensitas tinggi, hilangnya pulsa *kation* ini berisiko mengubah nilai fisis, sehingga algoritma kompensasi atau koreksi *dead time* harus disematkan sebagai mekanisme standar kalibrasi spektral demi mempertahankan akurasi sejati instrumen [11].

Berdasarkan analisis uji linearitas, sirkuit pantauan *counter* pada detektor GM terbukti memiliki korelasi linear yang kuat. Hubungan ini ditunjukkan oleh persamaan regresi  $y = 0,0051x$  dengan nilai  $R^2 = 0,9698$ . Nilai kemiringan (*slope*) dari persamaan tersebut dapat diandalkan sebagai acuan kalibrasi pada perangkat portabel, yang berfungsi untuk mengonversi nilai cacahan listrik menjadi data dosis radiasi (dosimetri) secara akurat sesuai batas eksperimen.

Guna menghadirkan validasi yang komprehensif, arsitektur uji linearitas yang identik direplikasi pada kawasan ruang luar. Hasil proyektif menelurkan persamaan garis *linear* berupa  $y = 0,0051x$  ( $R^2 = 0,9698$ ). Eskalasi *gradien* (kemiringan garis batas) yang bergerak ke level 0,0057 mengonfirmasi transisi sensitivitas, mentransformasikan rumusan konversi luar ruang ke dalam model definitif: Laju Dosis  $\mu\text{Sv}/\text{jam}$ ) =  $0,0057 \times \text{CPM}$ . Pada saat pencacahan, konversi konstanta sistem berubah menjadi 175,44 CPM per 1  $\mu\text{Sv}/\text{jam}$  ( $1 / 0,0057$ ). Perbedaan antara kalibrasi regresi pada luar ruangan (0,0057) dengan medium dalam ruangan (0,0051) berkorespondensi mutlak dengan dispersi paparan foton hamburan (*scattering photon flux*); pengukuran di lingkungan terbuka menyebabkan radiasi hambur menyebar bebas karena tidak adanya dinding penahan. Hal ini

mengakibatkan jumlah foton yang diserap oleh permukaan sensor menjadi tidak konsisten, sehingga memunculkan perbedaan nilai pembacaan dosis pada sistem pencacahan.



**Gambar 2.** Grafik Linearitas Kondisi Luar Ruangan Am-241 (CPM vs µSv/jam)

Rekayasa pelebaran rentang spasial antara sumber kalibrasi Am-241 dengan penampang instrumen yang diutilisasi di seluruh perlakuan uji di atas, pada intinya bermanifestasi sebagai pembuktian analitis kapabilitas instrumen terhadap respons efisiensi geometri spasial sistem penangkap nuklir [1]. Peluruhan nilai pencacahan frekuensi pulsa (CPM) sekaligus laju serapan secara simultan yang ditimbulkan dari ekskalasi perpindahan jarak sentimeter berdiri sebagai justifikasi berlakunya hukum universal, Hukum Kuadrat Terbalik (*Inverse-Square Law*) [1, 4].

Rasionalisasi fisis teoretis menyampaikan bahwa pancaran fraksi radiasi ( $\alpha$  maupun *foton primer gamma*) yang bersumber dari entitas bergeometri sumber titik (*point source*) layaknya lempengan Am-241 akan berekspansi isotropik (membentuk geometri proyektif bola speris ke seluruh arah ruang) [1, 6]. Hukum deplesi atenuasi terhadap intensitas partikel murni ( $I$ ) saat bergerak mengarungi dimensi sentimeter ( $d$ ) dirumuskan oleh Persamaan 7 terkait Hukum Kuadrat Terbalik [4]:

$$I = \frac{I_0}{4\pi d^2} \quad (7)$$

Sumbu titik radiasi mengalami pergeseran menjauhi bagian irisan terluar tabung (*window* detektor GM), porsi *foton flux* interaktif yang berekspektasi merangsang kaskade pengionan gas anoda menderita kerugian drastis yang merosot dalam fungsi eksponensial. Anjloknya *level* persentase penangkapan efektifitas instrumen sepenuhnya dilatarbelakangi oleh penyusutan kalkulus *solid angle* (sudut ruang proyektif tangkapan), di mana irisan proyeksi *volume* penyebaran pancaran (bola isotropik) terhadap *limit* luasan konstan tabung terus mendegradasi probabilitas benturan fisik ke sensor.

Semakin jauh jarak pengukuran, sudut tangkap sensor akan mengecil dengan cepat. Akibatnya, radiasi menyebar dan banyak yang meleset tanpa sempat terbaca oleh alat. Hal ini menjelaskan kenapa grafik mulai tidak lurus (menyimpang) pada laju cacah yang sangat rendah, yaitu di kisaran 0 sampai 200 CPM. Pada jarak yang terlalu jauh, kemampuan detektor untuk menangkap radiasi turun drastis hingga menyentuh batas paling minimalnya. Akibatnya, sinyal radiasi asli yang sudah melemah ini jadi kalah dominan dan tertutup oleh radiasi alami dari lingkungan sekitar. Fenomena ini membuktikan bahwa kinerja detektor memang sangat dipengaruhi oleh jarak dan posisi alat saat pengukuran dilakukan.

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa detektor Geiger-Müller (GM) memiliki performa statistik dan karakteristik efisiensi geometri yang sangat andal. Secara kuantitatif, uji stabilitas pencacahan menggunakan metode  $\chi^2$  menunjukkan bahwa fluktuasi data cacah radiasi sumber Am-241 sepenuhnya mengikuti distribusi teoretis *Poisson*. Hal ini terlihat dari nilai  $\chi^2$  hitung yang diperoleh: 16,9604 untuk pengukuran di luar ruangan dan 21,1858 untuk di dalam ruangan. Kedua nilai tersebut masih jauh di bawah nilai kritis pada tabel (30,144), dengan derajat kebebasan 19 dan taraf signifikansi 0,05. Secara kualitatif, pencapaian ini memvalidasi bahwa instrumen pencacah beroperasi dalam kondisi yang sangat mantap, murni

merepresentasikan keacakan alami peluruhan nuklir, dan terbebas dari galat ataupun interferensi elektronik dari lingkungan.

Selain itu, instrumen juga menunjukkan tingkat linearitas respons yang sangat *superior* dengan rentang koefisien determinasi ( $R^2$ ) mencapai 0,9698 hingga 0,9847, yang memungkinkan formulasi faktor konversi laju dosis ( $\mu\text{Sv/jam}$ ) secara presisi. Pada evaluasi karakteristik spasial, hasil eksperimen dengan memvariasikan jarak sumber mengonfirmasi secara berlakunya Hukum Kuadrat Terbalik (*Inverse-Square Law*). Intensitas radiasi dan tingkat efisiensi geometri detektor terbukti mengalami penurunan eksponensial seiring bertambahnya rentang jarak sentimeter. Penurunan ini terjadi karena area tangkap sensornya mengecil drastis. Akibatnya, banyak radiasi hambur yang meleset dan tidak masuk ke jendela detektor. Secara keseluruhan, analisis performa ini memastikan bahwa detektor GM yang diuji memiliki kapabilitas pengukuran yang konsisten, akurat, dan sangat layak diimplementasikan untuk operasional pemantauan proteksi radiasi maupun praktikum lapangan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Sebagai penulis, pertama-tama ucapan terima kasih kepada Allah SWT yang memberikan petunjuk-Nya sehingga penulis dapat menulis dan menyelesaikan karya tulis ilmiah ini dengan baik dan tepat waktu. Selanjutnya, saya ingin mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada dosen atas bimbingan, dukungan dan masukan yang diberikan selama proses penyelesaian karya ilmiah populer ini. Tanpa bimbingan dan dorongan dari Allah SWT dan Ibu Risky Nurseila Karthika, M.Sc. Saya tidak akan dapat menyelesaikan makalah ini dengan baik. Terima kasih juga saya ungkapkan kepada keluarga dan rekan-rekan yang telah memberikan dukungan, dan juga buah pemikiran yang membantu penulis dalam menyelesaikan karya ilmiah populer sehingga penyusunan karya ilmiah ini dapat terselesaikan dengan efisien.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] G. F. Knoll, *Radiation Detection and Measurement*, 4th ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2010.
- [2] N. Tsoulfanidis and S. Landsberger, *Measurement and Detection of Radiation*, 4th ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2015.
- [3] P. R. Bevington and D. K. Robinson, *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [4] J. E. Turner, *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*, 3rd ed. Weinheim: Wiley-VCH, 2007.
- [5] S. Ahmed, *Physics and Engineering of Radiation Detection*, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2014.
- [6] H. Cember and T. E. Johnson, *Introduction to Health Physics*, 4th ed. New York: McGraw-Hill, 2009.
- [7] J. Magill and J. Galy, *Radioactivity, Radionuclides, Radiation*, Berlin: Springer, 2005.
- [8] C. Grupen and B. Shwartz, *Particle Detectors*, 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [9] P. Schotanus, *Radiation Detectors and Readout Electronics*, Cham: Springer, 2021.
- [10] G. Gilmore, *Practical Gamma-ray Spectrometry*, 2nd ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2008.
- [11] M. F. L'Annunziata, *Handbook of Radioactivity Analysis*, 3rd ed. Amsterdam: Academic Press, 2012.
- [12] M. Arkani and H. Khalafi, "An improved formula for dead time correction of GM detectors," *Nukleonika*, vol. 58, no. 4, pp. 533–536, 2013.
- [13] V. Sivasailanathan, P. Kumar, and S. Sagadevan, "Calibration and estimation of efficiency of Geiger Muller counter using a standard radioactive source," *Int. J. Phys. Sci.*, vol. 12, no. 1, pp. 8–12, 2017.