

**ANALISIS VARIASI MATERIAL SINTILATOR
DALAM PENGHITUNGAN EFISIENSI DETEKTOR
RADIASI MENGGUNAKAN PHITS VERSI 3.35**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat
Sarjana S-1 Program Studi Fisika



diajukan oleh :

Andini Faradilla Wijayanti

21106020023

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

PROGRAM STUDI FISIKA

FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI

UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA

YOGYAKARTA

2026



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1291/Un.02/DST/PP.00.9/06/2026

Tugas Akhir dengan judul : Analisis Variasi Material Sintilator dalam Penghitungan Efisiensi Detektor Radiasi Menggunakan PHITS versi 3.35

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ANDINI FARADILLA WIJAYANTI
Nomor Induk Mahasiswa : 21106020023
Telah diujikan pada : Kamis, 04 Juni 2026
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

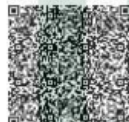
TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 6a276809b359



Penguji I

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED

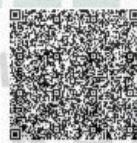
Valid ID: 6a27d0809362e



Penguji II

Dr. Widayanti, S.Si. M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a27d4382a65e



Yogyakarta, 04 Juni 2026
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6a290d254fb77

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Andini Faradilla Wijayanti

NIM : 21106020023

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Analisis Variasi Material Sintilator Dalam Penghitungan Efisiensi Detektor Radiasi Menggunakan PHITS Versi 3.35” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 15 Mei 2026

Penulis



Andini Faradilla Wijayanti

NIM. 21106020023



SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan Skripsi

Lamp : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamu'alaikum wr. wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

Nama : Andini Faradilla Wijayanti
NIM : 21106020023
Judul Skripsi : Analisis Variasi Material Sintilator dalam Penghitungan Efisiensi Detektor Radiasi Menggunakan PHITS Versi 3.35

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamu'alaikum wr. wb.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

Pembimbing II

Fajar Arianto, S.Si., M.Si.

NIP. 19860801 202104 1 001

Yogyakarta, 25 Mei 2026

Pembimbing I

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.

NIP. 19830614 200901 02 009

ANALISIS VARIASI MATERIAL SINTILATOR DALAM PENGHITUNGAN EFISIENSI DETEKTOR RADIASI MENGGUNAKAN PHITS VERSI 3.35

Andini Faradilla Wijayanti

21106020023

INTISARI

Detektor sintilasi merupakan salah satu instrumen utama dalam deteksi dan pengukuran radiasi gamma, dengan kinerja yang sangat bergantung pada karakteristik material sintilator yang digunakan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan desain detektor sintilasi, distribusi lintasan foton gamma, spektrum energi, resolusi energi, serta efisiensi detektor dari empat variasi material sintilator, yaitu NaI(Tl), CsI(Tl), CeBr₃, dan LaBr₃(Ce) menggunakan perangkat lunak *Particle and Heavy Ion Transport Code System* (PHITS) berbasis metode *Monte Carlo*. Simulasi dilakukan dengan konfigurasi dua buah detektor yang ditempatkan secara simetris saling berhadapan, dengan sumber Cs-137 berada tepat di antara kedua detektor. Jarak antara sumber dan permukaan detektor divariasikan pada 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, dan 5 cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa detektor sintilasi dari keempat material berhasil dimodelkan sebagai dua volume silinder berukuran 2 inci × 2 inci, distribusi lintasan foton menunjukkan bahwa fluks foton menurun seiring bertambahnya jarak sesuai hukum kuadrat terbalik, dengan distribusi yang lebih homogen pada material CeBr₃ dan LaBr₃(Ce), spektrum energi memperlihatkan karakteristik khas gamma Cs-137 berupa *backscatter peak*, *Compton continuum*, *Compton edge*, dan *photopeak*. Resolusi energi terbaik dimiliki oleh detektor dengan material LaBr₃(Ce), diikuti CeBr₃, NaI(Tl), dan CsI(Tl). Efisiensi intrinsik keempat material berada pada rentang 49–57%, sementara efisiensi absolut berada pada rentang 2–18%. Dari keempat material detektor, LaBr₃(Ce) unggul dalam memberikan keseimbangan yang baik antara efisiensi deteksi dan resolusi energi.

Kata kunci: detektor sintilasi, efisiensi detektor, material sintilator, PHITS, radiasi gamma

**ANALYSIS OF SCINTILLATOR MATERIAL VARIATIONS IN THE
CALCULATION OF RADIATION DETECTOR EFFICIENCY USING PHITS
VERSION 3.35**

Andini Faradilla Wijayanti

21106020023

ABSTRACT

Scintillation detectors are among the primary instruments for detecting and measuring gamma radiation, with performance that strongly depends on the physical characteristics of the scintillator material employed. This study aims to analyze and compare the detector design, photon track distribution, energy spectrum, energy resolution, and detection efficiency of four scintillator material variations NaI(Tl), CsI(Tl), CeBr₃, and LaBr₃(Ce) using the Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS), a Monte Carlo-based simulation software. Simulations were performed using a symmetric configuration of two detectors placed face-to-face with a Cs-137 source positioned at the center between them. The source-to-detector surface distance was varied at 1, 2, 3, 4, and 5 cm. Results show that scintillation detectors for all four materials were successfully modeled as two cylindrical volumes measuring 2 × 2 inches; photon track distribution simulations revealed that photon flux decreases with increasing distance in accordance with the inverse square law, with more homogeneous distributions observed in CeBr₃ and LaBr₃(Ce); and the energy spectra exhibited characteristic features of Cs-137 gamma radiation, including the backscatter peak, Compton continuum, Compton edge, and photopeak. The best energy resolution was achieved by the LaBr₃(Ce) detector, followed by CeBr₃, NaI(Tl), and CsI(Tl). Intrinsic efficiency for all four materials ranged from 49% to 57%, while absolute efficiency ranged from 2% to 18%. Among the four detector materials, LaBr₃(Ce) stands out as the most balanced option, offering the best combination of detection efficiency and energy resolution.

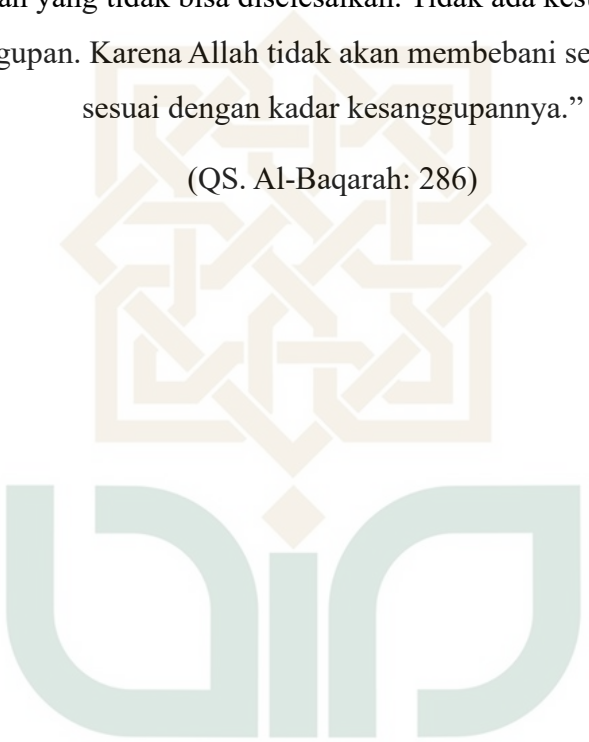
Keywords: *scintillation detector, detector efficiency, scintillator material, PHITS, gamma radiation*

MOTTO

“Setiap orang diuji dengan cara yang berbeda. Tak apa melangkah pelan, asalkan terus maju setahap demi setahap, hingga setiap usaha akhirnya terbayar.”

“Tidak ada ujian yang tidak bisa diselesaikan. Tidak ada kesulitan yang melebihi batas kesanggupan. Karena Allah tidak akan membebani seseorang melainkan sesuai dengan kadar kesanggupannya.”

(QS. Al-Baqarah: 286)



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Tugas Akhir ini penulis persembahkan untuk kedua orang tua, kakak, adik, serta keluarga besar yang senantiasa memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis hingga saat ini. Terima kasih atas doa yang tak pernah terhenti, serta setiap pengorbanan dan lelah yang tak terhitung jumlahnya. Tugas akhir ini menjadi ungkapan rasa syukur penulis atas doa, kasih sayang, dan pengorbanan yang tiada batas. Semoga karya ini dapat memberikan manfaat.



KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT. atas limpahan rahmat dan hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini yang berjudul “Analisis Variasi Material Sintilator Dalam Penghitungan Efisiensi Detektor Radiasi Menggunakan PHITS Versi 3.35”. Tugas Akhir ini disusun dan diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana pada Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta.

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan bimbingan, dukungan, arahan, dan saran selama proses penyusunan Tugas Akhir ini, khususnya kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang selalu memberikan doa, dukungan, dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan sarjana hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Prof. Noorhaidi Hasan, S.Ag., M.A., M.Phil., Ph.D. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Dr. Khurul Wardati, M.Si., selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
4. Ibu Dr. Widayanti, S.Si., M.Si. selaku Ketua Program Studi Fisika.
5. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.
6. Bapak Fajar Arianto, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini.

7. Seluruh Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga yang telah memberikan ilmu pengetahuan dan pengalaman selama perkuliahan.
8. Program Studi Fisika Universitas Diponegoro yang telah menjalin kerja sama dengan Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian ini.
9. Pemerintah Daerah Kaimana yang telah memberikan dukungan dan kontribusi nyata dalam pembiayaan pendidikan tinggi penulis melalui Studei Kaimana.
10. Siti Asmahanik dan Annisa Fathirah Wijayanti yang telah memberikan dukungan dan motivasi selama penulis menempuh pendidikan sarjana.
11. Teman-teman terdekat penulis diantaranya, Ulfa, Nisa, Nisrina, Ulya, Rahmi, Febi, Ayu, Fajrus, Aulia, Dita, Khurnia, dan Agnes yang selalu memberikan motivasi dan dukungan kepada penulis selama menjalani studi.
12. Teman-teman mahasiswa Fisika angkatan 2021 serta *Study Club* Biofisika dan Fisika Medis yang telah kebersamai penulis dalam menjalani perkuliahan.
13. Seluruh pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih memiliki kekurangan dan ketidaksempurnaan. Oleh karena itu, kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi perbaikan dan kemajuan penulis di masa mendatang. Semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan bagi penulis, pembaca, dan pihak lainnya.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, April 2026

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR.....	iii
SURAT PERSETUJUAN TUGAS AKHIR	iv
INTISARI	v
ABSTRACT	vi
MOTTO	vii
HALAMAN PERSEMBAHAN	viii
KATA PENGANTAR.....	ix
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	iv
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	10
1.3 Tujuan Penelitian.....	10
1.4 Batasan Penelitian	10
1.5 Manfaat Penelitian.....	11
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	12
2.1 Studi Pustaka	12
2.2 Landasan Teori	18
2.2.1 Konsep Dasar Fisika Radiasi	18
2.2.2 Radiasi Gamma Cesium-137 (¹³⁷ Cs).....	20
2.2.3 Detektor Radiasi.....	23
2.2.4 Detektor Sintilasi.....	25
2.2.5 Interaksi Foton dengan Materi	36
2.2.6 Dosimetri Radiasi pada Sistem Detektor Sintilasi	46
2.2.7 Resolusi Energi	48
2.2.8 Efisiensi Detektor.....	54
2.2.9 <i>Particle and Heavy Ion Transport Code System (PHITS)</i>	57
2.2.10 Nilai-Nilai Islam dalam Penelitian Detektor Sintilasi	61
BAB III METODE PENELITIAN	64

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian.....	64
3.2 Alat dan Bahan Penelitian.....	64
3.2.1 Alat Penelitian.....	64
3.2.2 Bahan Penelitian.....	65
3.3 Tahapan Penelitian.....	66
3.3.1 Studi Literatur	67
3.3.2 Instalasi <i>Software</i> PHITS	67
3.3.3 <i>Input</i> Parameter	68
3.3.4 <i>Input Source</i>	69
3.3.5 <i>Input Geometry</i> Detektor.....	69
3.3.6 Simulasi Distribusi Lintasan Foton Gamma	70
3.3.7 Simulasi Spektrum Energi.....	71
3.3.8 Tally.....	72
3.3.9 <i>Running</i> PHITS	73
3.3.10 <i>Output</i> Desain, <i>Particle Track</i> , dan Deposit Energi.....	73
3.4 Metode Analisa Data	74
3.4.1 Analisis Desain Detektor.....	74
3.4.2 Analisis Distribusi Lintasan Foton.....	74
3.4.3 Analisis Spektrum Energi	75
3.4.4 Menghitung Resolusi Energi.....	75
3.4.5 Menghitung Efisiensi Detektor	76
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	77
4.1 Hasil dan Pembahasan Desain Detektor Sintilasi.....	77
4.2 Hasil dan Pembahasan Distribusi Lintasan Foton.....	79
4.2.1 Detektor NaI(Tl).....	79
4.2.2 Detektor CsI(Tl).....	82
4.2.3 Detektor CeBr ₃	84
4.2.4 Detektor LaBr ₃ (Ce)	87
4.2.5 Perbandingan Distribusi Fluks dari Keempat Material Detektor..	89
4.3 Hasil dan Pembahasan Spektrum Energi.....	93
4.3.1 Detektor NaI(Tl).....	95
4.3.2 Detektor CsI(Tl).....	98

4.3.3	Detektor CeBr_3	100
4.3.4	Detektor $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	102
4.3.5	Perbandingan Spektrum Energi dari Keempat Material Detektor	104
4.4	Hasil dan Pembahasan Efisiensi Detektor Sintilasi.....	106
4.4.1	Efisiensi Detektor Sintilator $\text{NaI}(\text{Tl})$	106
4.4.2	Efisiensi Detektor Sintilator $\text{CsI}(\text{Tl})$	107
4.4.3	Efisiensi Detektor Sintilator CeBr_3	108
4.4.4	Efisiensi Detektor Sintilator $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	109
4.4.5	Perbandingan Efisiensi Detektor dari Keempat Material.....	110
4.5	Integrasi-Interkoneksi.....	113
BAB V	KESIMPULAN.....	115
5.1	Kesimpulan.....	115
5.2	Saran	116
DAFTAR PUSTAKA.....		117



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Studi Pustaka	17
Tabel 2.2 Karakteristik Material Sintilator (Fabjan & Schopper, 2020)	32
Tabel 3.1 Alat Penelitian.....	64
Tabel 3.2 Database Variasi Material Sintilator (DMAMC, 2021)	65
Tabel 4.1 Nilai fluks foton dari simulasi detektor NaI(Tl)	80
Tabel 4.2 Nilai fluks foton dari simulasi detektor CsI(Tl)	82
Tabel 4.3 Nilai fluks foton dari simulasi detektor CeBr ₃	85
Tabel 4.4 Nilai fluks foton dari simulasi detektor LaBr ₃ (Ce).....	87
Tabel 4.5 Nilai cacahan maksimum, FWHM dan resolusi detektor NaI(Tl).....	96
Tabel 4.6 Nilai cacahan maksimum, FWHM dan resolusi detektor CsI(Tl)	98
Tabel 4.7 Nilai cacahan maksimum, FWHM dan resolusi detektor CeBr ₃	100
Tabel 4.8 Nilai cacahan maksimum, FWHM dan resolusi detektor LaBr ₃ (Ce) .	102
Tabel 4.9 Nilai efisiensi detektor NaI(Tl).....	107
Tabel 4.10 Nilai efisiensi detektor CsI(Tl)	108
Tabel 4.11 Nilai efisiensi detektor CeBr ₃	109
Tabel 4.12 Nilai efisiensi detektor LaBr ₃ (Ce)	110

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Sumber Paparan Radiasi Global (UNSCEAR, 2024).....	3
Gambar 2.1 Hubungan Panjang Gelombang dan Energi Radiasi (IAEA, 2023). 19	
Gambar 2.2 Klasifikasi Radiasi Pengan (Podgorsak, 2006)	20
Gambar 2.3 Skema Peluruhan ^{137}Cs (Putra, 2016).....	21
Gambar 2.4 Hubungan Material dan Metode Deteksi (Yanagida, 2018)	24
Gambar 2.5 Skema Detektor Sintilasi (Sarah, 2023).....	26
Gambar 2.6 Peristiwa sebelum dan sesudah efek fotolistrik (Podgorsak, 2006) 38	
Gambar 2.7 Peristiwa Hamburan Compton (Maqbool, 2017).....	40
Gambar 2.8 Proses Produksi Pasangan (Podgorsak, 2005)	43
Gambar 2.9 Probabilitas Mekanisme Interaksi Foton (Fabjan, 2020).....	45
Gambar 2.10 Radiasi mengenai suatu area (Maqbool, 2017).....	46
Gambar 2.11 FWHM dari distribusi Gaussian (Knoll, 2010).....	49
Gambar 2.12 Spektrum Gamma Monoenergetik (Knoll, 2010)	50
Gambar 2.13 Representasi Realistik Spektrum Gamma (Geist, 2024).....	53
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	66
Gambar 3.2 Particle track foton Co-60 (JAEA, 2025b)	71
Gambar 3.3 Contoh Spektrum Energi Gamma (JAEA, 2025b)	72
Gambar 4.1 Desain detektor sintilasi dalam tampilan tiga dimensi	77
Gambar 4.2 Peta distribusi lintasan foton detektor NaI(Tl) dengan jarak terhadap sumber (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm	81
Gambar 4.3 Peta distribusi lintasan foton detektor CsI(Tl) dengan jarak terhadap sumber (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm	83
Gambar 4.4 Peta distribusi lintasan foton detektor CeBr ₃ dengan jarak terhadap sumber (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm	86
Gambar 4.5 Peta distribusi lintasan foton detektor LaBr ₃ (Ce) dengan jarak terhadap sumber (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm ...	88
Gambar 4.6 Grafik fluks pada bagian depan detektor	92
Gambar 4.7 Grafik fluks pada bagian tengah detektor	92
Gambar 4.8 Grafik fluks pada bagian belakang detektor	93
Gambar 4.9 Grafik jumlah cacahan dengan deposit energi Cs-137 dari detektor NaI(Tl) pada jarak (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm .	97

Gambar 4.10	Grafik jumlah cacahan dengan deposit energi Cs-137 dari detektor CsI(Tl) pada jarak (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm..	99
Gambar 4.11	Grafik jumlah cacahan dengan deposit energi Cs-137 dari detektor CeBr ₃ pada jarak (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm..	101
Gambar 4.12	Grafik jumlah cacahan dengan deposit energi Cs-137 dari detektor LaBr ₃ (Ce) pada jarak (a) 1 cm (b) 2 cm (c) 3 cm (d) 4 cm (e) 5 cm	103
Gambar 4.13	Grafik perbandingan efisiensi intrinsik dari keempat material detektor.....	112
Gambar 4.14	Grafik perbandingan efisiensi intrinsik dari keempat material detektor.....	112

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

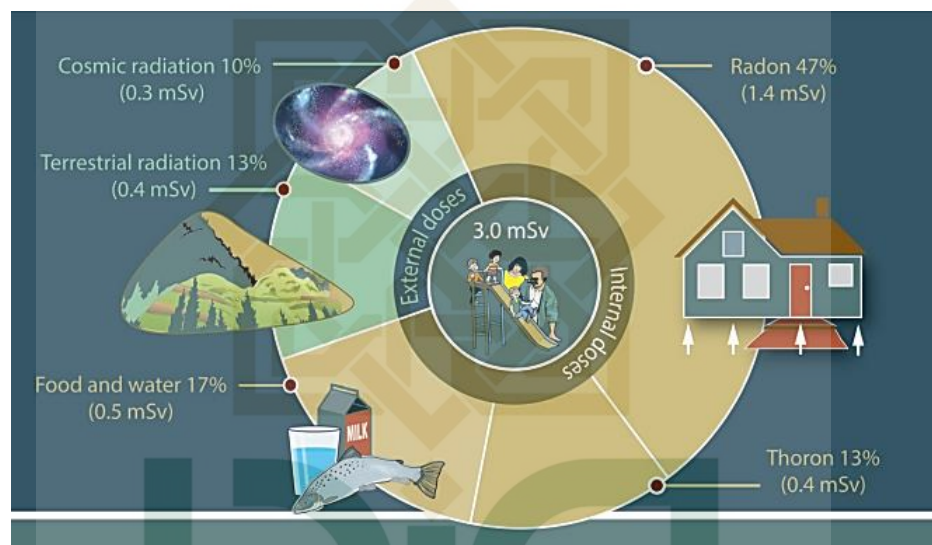
Radiasi merupakan proses pemancaran dan perpindahan energi dari suatu medium ke medium lainnya dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau partikel. Energi ini berasal dari unsur alami yang memiliki inti atom tidak stabil sehingga mengalami peluruhan, atau yang biasa disebut radioaktivitas (IAEA, 2023). Radiasi dapat dikategorikan menjadi dua jenis utama berdasarkan kemampuannya berinteraksi dengan materi, yakni radiasi pengion dan radiasi non-pengion. Radiasi pengion adalah jenis radiasi yang dapat menyebabkan proses ionisasi apabila berinteraksi dengan materi. Radiasi yang termasuk dalam jenis radiasi pengion adalah partikel alfa, partikel beta, sinar gamma, sinar-X, dan neutron. Sedangkan radiasi non-pengion adalah jenis radiasi yang tidak akan menyebabkan efek ionisasi apabila berinteraksi dengan materi. Contoh radiasi non-pengion antara lain adalah gelombang radio, gelombang mikro, sinar inframerah, cahaya tampak, dan sinar ultraviolet (Syarifudin, 2023).

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, pemanfaatan radiasi telah meluas ke berbagai bidang dan memberikan kontribusi besar bagi kemajuan sains, industri, dan kesehatan. Dalam bidang kedokteran, radiasi digunakan untuk diagnosis dan terapi. Di bidang industri, radiasi digunakan untuk uji *Non-Destructive Testing* guna mendeteksi cacat pada material logam atau

konstruksi tanpa merusaknya, membantu dalam pengawetan pangan dan memperpanjang masa simpan produk makanan. Sementara itu, di bidang penelitian ilmiah dan teknologi nuklir, radiasi digunakan untuk mempelajari struktur material, menelusuri reaksi nuklir, serta sebagai sumber dalam reaktor penelitian (IAEA, 2024). Selain memiliki banyak manfaat, radiasi juga dapat menimbulkan risiko paparan dalam penggunaannya. Paparan radiasi berasal dari berbagai sumber, baik alami maupun hasil buatan. Sumber radiasi alami mencakup lebih dari 60 unsur radioaktif yang secara alami terdapat di tanah, air, dan udara. Sementara itu, paparan radiasi yang berasal dari hasil buatan manusia mencakup pembangkit listrik tenaga nuklir hingga penggunaan radiofarmasi pada bidang medis untuk diagnosis atau pengobatan (WHO, 2024).

Paparan radiasi dapat terjadi melalui jalur internal dan eksternal. Paparan internal terjadi ketika radionuklida masuk ke dalam tubuh melalui inhalasi, tertelan, atau masuk ke peredaran darah, misalnya melalui suntikan atau luka terbuka. Sedangkan paparan eksternal dapat terjadi ketika partikel radioaktif di udara menempel pada kulit atau pakaian (WHO, 2023). Berdasarkan laporan *United National Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation* (UNSCEAR) tahun 2024 mengenai paparan radiasi global, sekitar 80% paparan radiasi yang diterima manusia berasal dari sumber alami, sedangkan 20% sisanya berasal dari sumber buatan. Radiasi pengion dari alam memberikan dosis efektif rata-rata sekitar 3,0 mSv per tahun. Dari total paparan tersebut, radiasi internal memberikan kontribusi terbesar, terutama dari gas radon (47%) dan toron (13%), yang jika digabungkan mencapai sekitar 1,8 mSv per tahun. Paparan internal lainnya berasal

dari radionuklida alami yang masuk melalui makanan dan minuman sebesar 17%, dengan Kalium-40 sebagai sumber dominan. Selain itu, paparan eksternal berasal dari radiasi terrestrial yang menyumbang sekitar 13% (0,4 mSv), sementara radiasi kosmik menyumbang sekitar 10% (0,3 mSv) dari total dosis tahunan, seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Sumber Paparan Radiasi Global (UNSCEAR, 2024)

Sejak ditemukannya radiasi, beberapa penelitian telah memberikan pemahaman tentang bagaimana radiasi dapat memengaruhi kesehatan manusia. Ketika radiasi pengion berinteraksi dengan jaringan tubuh, energi yang dibawanya akan diserap oleh sel-sel yang sebagian besar tersusun atas molekul air (H_2O). Interaksi tersebut menyebabkan proses ionisasi yang menghasilkan radikal bebas dan dapat merusak komponen sel, terutama molekul asam deoksiribonukleat (DNA) dalam kromosom. Kerusakan DNA dapat mengakibatkan kematian sel, perubahan struktur sel, mutasi genetik, hingga peningkatan risiko terjadinya kanker (UNEP, 2016). Dengan demikian, jika kerusakan terjadi dalam

jumlah yang besar, fungsi jaringan dan organ dapat terganggu, yang pada kondisi tertentu berpotensi menyebabkan dampak kesehatan yang serius hingga kematian.

Efek radiasi dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis bergantung pada konteksnya. Bila ditinjau dari dosis radiasi ambang (*threshold*) dan untuk kepentingan proteksi radiasi, efek radiasi dibedakan atas efek stokastik dan efek deterministik. Efek stokastik adalah efek yang terjadi tanpa ambang dosis. Efek ini tidak dapat dipastikan kapan akan terlihat, probabilitas kemunculannya semakin besar apabila dosisnya semakin besar. Efek stokastik umumnya terjadi akibat paparan rendah dalam jangka panjang yang menyebabkan terjadinya perubahan pada sel, contohnya adalah kanker dan kelainan hereditas. Sedangkan efek deterministik terjadi ketika paparan melebihi ambang dosis tertentu, umumnya akibat paparan tinggi dalam waktu singkat. Efek ini menyebabkan katarak, kerusakan kulit, kematian janin, dan kemandulan (ICRP, 2021).

Pemanfaatan radiasi dalam berbagai bidang memerlukan sistem deteksi dan pengukuran yang andal untuk menjamin keselamatan dan efektivitas penggunaannya. Setiap jenis radiasi memiliki tingkat risiko yang berbeda sehingga membutuhkan tindakan proteksi yang sesuai, misalnya untuk radiasi pengion umumnya memerlukan pengawasan yang lebih ketat dibandingkan radiasi non-pengion karena memiliki energi yang lebih tinggi dan berpotensi menimbulkan dampak biologis. *International Atomic Energy Agency* (IAEA) sangat menekankan pentingnya sistem deteksi radiasi sebagai bagian dari penerapan keselamatan dalam pemanfaatan teknologi nuklir (IAEA, 2023). Hal tersebut sesuai dengan Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) Nomor 4 Tahun 2024 tentang

pemanfaatan radiasi pengion dan proteksi radiasi. Alat yang digunakan untuk mendeteksi dan mengukur radiasi disebut detektor radiasi, yang berfungsi untuk memantau tingkat paparan, menilai risiko, memastikan penggunaan radiasi yang aman, serta mencegah dampak yang ditimbulkan oleh paparan radiasi berlebih (BAPETEN, 2024).

Detektor radiasi bekerja dengan cara mengukur perubahan yang terjadi pada suatu medium karena adanya penyerapan energi radiasi. Berdasarkan jenis radiasi yang dideteksi, detektor radiasi dikembangkan dalam berbagai bentuk, seperti detektor alfa, detektor gamma, dan detektor neutron (Schotanus, 2018). Salah satu detektor yang banyak digunakan untuk mendeteksi radiasi pengion adalah detektor sintilasi. Detektor ini bekerja dengan menggunakan material sintilator untuk mengubah radiasi menjadi cahaya tampak, yang kemudian dikonversi menjadi sinyal listrik yang dapat diukur. Detektor sintilasi umumnya digunakan dalam kedokteran nuklir untuk tujuan pencitraan dan diagnostik, serta dalam terapi radiasi untuk memantau pemberian perawatan. Kemampuan detektor ini untuk mendeteksi berbagai jenis radiasi, termasuk sinar gamma dan sinar-X, menjadikannya alat serbaguna dalam pengaturan perawatan kesehatan (Fabjan & Schopper, 2020).

Detektor sintilasi terus mengalami perkembangan untuk meningkatkan sensitivitas, resolusi, dan efisiensi deteksi. Kinerja detektor dipengaruhi oleh berbagai faktor, terutama karakteristik material sintilator seperti nomor atom efektif, densitas, hasil cahaya (*light yield*), dan waktu peluruhan (*decay time*). Selain itu, faktor geometri sistem, termasuk jarak antara sumber radiasi dan detektor, juga berpengaruh terhadap jumlah foton yang dapat dideteksi (Lin dkk,

2022). Perkembangan detektor sintilasi didorong oleh kebutuhan akan sistem deteksi yang semakin akurat dan spesifik di berbagai bidang. Dalam bidang medis, misalnya pada teknologi pencitraan PET (*Positron Emission Tomography*) dan SPECT (*Single Photon Emission Computed Tomography*) diperlukan detektor dengan kemampuan identifikasi energi yang tinggi untuk menghasilkan citra diagnostik yang akurat. Dalam keamanan nuklir, detektor beresolusi tinggi diperlukan untuk membedakan material radioaktif secara tepat, sedangkan pada eksplorasi sumber daya energi dibutuhkan detektor dengan efisiensi tinggi untuk analisis geologi dan minyak bumi (BNC, 2022). Oleh karena itu, pengembangan material dan teknologi detektor sintilasi menjadi aspek penting dalam meningkatkan kualitas pengukuran radiasi serta mendukung keselamatan dan efektivitas berbagai aplikasi radiasi.

Pemilihan material sintilator yang tepat merupakan faktor penting dalam meningkatkan kinerja detektor radiasi pada berbagai aplikasi. Simulasi dapat digunakan sebagai metode yang efektif untuk mengevaluasi karakteristik dan performa berbagai material sebelum dilakukan pengujian secara eksperimen. Metode simulasi memungkinkan analisis dilakukan dengan lebih cepat, efisien, dan ekonomis karena mengingat pengujian seluruh jenis material sintilator dalam kondisi nyata memerlukan biaya yang besar, waktu yang lebih lama, serta peralatan eksperimen yang kompleks.

Seorang saintis tidak hanya berperan menghasilkan pengetahuan baru, tetapi juga memastikan bahwa pengembangan teknologi harus dilakukan secara aman, etis, bertanggung jawab, serta mampu meminimalkan berbagai dampak negatif

yang mungkin timbul di masa depan. Hal ini sesuai dengan firman Allah SWT dalam Q.S. Yusuf ayat 22:

وَلَمَّا بَلَغَ أَشُدَّهُ آتَيْنَاهُ حُكْمًا وَعِلْمًا ۖ وَكَذَلِكَ نَجْزِي الْمُحْسِنِينَ

Artinya: “Dan tatkala dia cukup dewasa, Kami berikan kepadanya hikmah dan ilmu. Demikianlah Kami memberi balasan kepada orang-orang yang berbuat baik.”

Dalam ayat tersebut, dijelaskan bahwa ketika Nabi Yusuf mencapai usia dewasa, Allah SWT menganugerahkannya hikmah dan ilmu. Anugerah tersebut menunjukkan bahwa kematangan seseorang tidak hanya diukur dari aspek fisik, tetapi juga dari kemampuan memahami ilmu pengetahuan dan menggunakan kebijaksanaan dalam menghadapi berbagai persoalan kehidupan. Ayat ini juga mengandung janji bahwa Allah SWT akan memberikan hikmah dan ilmu kepada orang-orang yang berbuat kebaikan (Wahidi, 2016). Ayat tersebut menegaskan bahwa ilmu pengetahuan merupakan karunia Allah SWT yang harus disyukuri, dipelajari, dan diamalkan secara bertanggung jawab. Oleh karena itu, pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, termasuk dalam bidang fisika radiasi dan sistem deteksi radiasi tidak hanya bertujuan untuk meningkatkan pemahaman terhadap fenomena alam, tetapi juga menjadi sarana untuk menghadirkan manfaat bagi kehidupan manusia (Perpustakaan Muslim Kobe, 2008).

Penelitian mengenai analisis jenis material sintilator yang mampu mendeteksi radiasi serta efisiensi detektor telah banyak dilakukan menggunakan metode simulasi. Putro dkk (2025) telah meneliti kemampuan sintilator plastik polistiren (C_8H_8) dalam mendeteksi radiasi gamma menggunakan metode simulasi

Monte Carlo. Selanjutnya, penelitian yang serupa juga telah dilakukan oleh Tajik (2025), menggunakan material sintilator NE213 yang diaplikasikan dengan kode simulasi *Monte Carlo N-Particle eXtended* (MCNPX). Kitajima dkk (2024) juga melakukan penelitian mengenai simulasi penggunaan material NaI(Tl) pada spektrometer untuk mendeteksi radiasi dari iodium dengan kode PHITS. Berikutnya, Shehada dan Krivobokov (2021) juga melakukan penelitian untuk menghitung efisiensi detektor aktivasi perak menggunakan kode simulasi MCNP. Selain itu, Pu dkk (2020) melakukan penelitian terkait evaluasi kinerja detektor sintilasi kaca litium menggunakan kode simulasi PHITS.

Berdasarkan beberapa penelitian serupa yang telah dilakukan sebelumnya, hingga saat ini belum ditemukan penelitian yang secara khusus membandingkan kinerja material sintilator NaI(Tl), CsI(Tl), CeBr₃, dan LaBr₃(Ce) dengan ukuran kristal 2 inci × 2 inci dalam pendeteksian sinar gamma Cs-137 menggunakan perangkat lunak *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS). Selain itu, penelitian yang mengkaji distribusi lintasan foton, spektrum energi, resolusi energi, dan efisiensi detektor untuk keempat material tersebut pada konfigurasi geometri yang sama juga masih sangat terbatas. Keempat material sintilator tersebut dipilih karena mewakili karakteristik dan perkembangan material sintilasi yang banyak digunakan dalam aplikasi deteksi sinar gamma. NaI(Tl) merupakan material sintilator yang paling umum digunakan dan telah lama dijadikan sebagai standar dalam sistem spektrometri gamma karena memiliki kinerja yang baik dengan biaya yang relatif ekonomis. CsI(Tl) dipilih karena memiliki densitas dan nomor atom efektif yang lebih tinggi dibandingkan NaI(Tl), sehingga memberikan probabilitas

interaksi gamma yang lebih besar. Sementara itu, CeBr_3 dan $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ merupakan sintilator generasi modern yang memiliki densitas dan hasil cahaya yang tinggi, serta waktu peluruhan yang lebih singkat. Adapun penambahan *dopant* seperti talium (Tl) pada kristal NaI dan CsI, serta cerium (Ce) pada LaBr_3 dapat meningkatkan hasil cahaya dan mempercepat waktu peluruhan. *Dopant* menjadi salah satu faktor utama yang menentukan efisiensi dan kinerja detektor sintilasi dalam mendeteksi radiasi pengion. Perbedaan sifat fisik dan karakteristik sintilasi dari masing-masing material tersebut menjadikannya menarik untuk dibandingkan.

PHITS merupakan perangkat lunak simulasi berbasis metode *Monte Carlo* yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Agency* (JAEA) bekerja sama dengan berbagai lembaga internasional. PHITS memiliki beberapa keunggulan dibandingkan perangkat lunak simulasi lainnya, khususnya dalam simulasi transport partikel dan aplikasi detektor radiasi. PHITS mampu menyimulasikan berbagai jenis partikel, mulai dari neutron, foton, dan elektron hingga proton, ion berat, dan meson dalam rentang energi yang sangat besar, yaitu mulai dari 10^{-5} eV hingga 1 TeV (JAEA, 2024). Selain itu, PHITS menyediakan pendefinisian geometri dan sumber radiasi yang relatif lebih fleksibel, sehingga memudahkan pemodelan sistem deteksi yang mendekati kondisi nyata. PHITS juga tersedia dengan lisensi gratis serta didukung oleh kualitas grafis yang lebih bagus (JAEA, 2025a). Dengan demikian, metode simulasi PHITS dapat membantu mengoptimalkan pemilihan material detektor melalui analisis pengaruh jenis sintilator terhadap efisiensi deteksi, serta menentukan material yang paling optimal di antara NaI(Tl), CsI(Tl), CeBr_3 , dan $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ untuk aplikasi tertentu.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana desain detektor sintilasi?
2. Bagaimana simulasi distribusi lintasan foton gamma dalam medium detektor sintilasi?
3. Bagaimana simulasi spektrum energi dalam detektor sintilasi dan berapakah resolusi detektor?
4. Berapakah nilai efisiensi detektor sintilasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan diadakannya penelitian ini, meliputi:

1. Membuat desain detektor sintilasi menggunakan *software* PHITS versi 3.35.
2. Menyimulasikan distribusi lintasan foton gamma dalam medium detektor sintilasi.
3. Menyimulasikan spektrum energi dan menghitung resolusi energi detektor sintilasi.
4. Menghitung efisiensi detektor sintilasi.

1.4 Batasan Penelitian

Adapun batasan dalam penelitian ini, meliputi:

1. Material sintilator yang akan digunakan adalah NaI(Tl), CsI(Tl), CeBr₃, dan LaBr₃(Ce).

- 2 Sumber radiasi yang digunakan adalah sinar gamma dari Cs-137 (0,662 MeV) dan sumber berupa titik.
- 3 Jarak sumber radiasi dengan permukaan detektor adalah 1 cm, 2 cm, 3 cm, 4 cm, dan 5 cm.
- 4 Geometri detektor berbentuk silinder berukuran 2 inci x 2 inci.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini, meliputi:

1. Penelitian ini dapat memberikan pemahaman mengenai pengaruh karakteristik material sintilator terhadap distribusi lintasan foton gamma, spektrum energi, resolusi energi, dan efisiensi detektor yang dapat menjadi referensi untuk riset lanjutan dan pengembangan teknologi deteksi radiasi
2. Hasil penelitian dapat menjadi bahan pertimbangan dalam pemilihan material sintilator yang sesuai untuk berbagai aplikasi deteksi radiasi gamma, serta dapat membantu mengidentifikasi material yang memiliki kombinasi terbaik antara efisiensi deteksi dan resolusi energi sesuai kebutuhan aplikasi tertentu.
3. Penelitian ini memberikan gambaran mengenai kinerja berbagai material sintilator sebelum dilakukan pengujian eksperimental, sehingga dapat mengurangi biaya, waktu, dan sumber daya yang diperlukan dalam proses pengembangan detektor radiasi.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil dari penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain detektor sintilasi dengan material NaI(Tl), CsI(Tl), CeBr₃, dan LaBr₃(Ce) berhasil dimodelkan dan disimulasikan menggunakan perangkat lunak *Particle and Heavy Ion Transport code System* (PHITS). Sistem deteksi terdiri dari dua volume detektor berbentuk silinder berukuran 2 inci x 2 inci yang merupakan ukuran standar detektor sintilasi untuk pendeteksian radiasi gamma. Sumber radiasi Cs-137 berada di antara kedua detektor, tepat pada pusat sistem.
2. Simulasi distribusi lintasan foton di dalam volume detektor menunjukkan bahwa pola penyebaran dan intensitas foton dipengaruhi oleh variasi material dan variasi jarak sumber terhadap permukaan detektor. Seluruh material mengalami penurunan intensitas fluks seiring bertambahnya jarak, yang sesuai dengan hukum kuadrat terbalik. Distribusi lintasan yang lebih homogen dimiliki oleh material CeBr₃, dan LaBr₃(Ce).
3. Spektrum energi dari keempat material sintilator pada semua variasi jarak menunjukkan karakteristik spektrum gamma Cs-137 yang ditandai oleh keberadaan *backscatter peak*, *Compton continuum*, *Compton edge*, dan

photopeak. Perbedaan antar material terlihat pada besarnya intensitas cacahan (*counts*) yang dihasilkan dan resolusi energinya. Variasi jarak sumber terhadap detektor memengaruhi jumlah cacahan yang terdeteksi, namun tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai resolusi energi. Dari keempat material, detektor $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ menunjukkan performa terbaik dalam identifikasi energi foton gamma, diikuti oleh CeBr_3 , $\text{NaI}(\text{Tl})$, dan $\text{CsI}(\text{Tl})$.

4. Efisiensi intrinsik keempat material detektor berada pada rentang 49–57%, sementara efisiensi absolut berada pada rentang 2–18%. Efisiensi absolut dari keempat material sintilator menunjukkan penurunan nilai seiring bertambahnya jarak sumber, sementara nilai efisiensi intrinsik tidak mengalami kenaikan maupun penurunan nilai yang konsisten seiring bertambahnya jarak. Hasil menunjukkan bahwa karakteristik material memengaruhi efisiensi intrinsik detektor, sementara faktor geometri dan jumlah foton yang mencapai permukaan detektor menjadi faktor utama yang menentukan efisiensi deteksi secara keseluruhan.

5.2 Saran

Penelitian selanjutnya dapat mempertimbangkan perluasan variasi sumber radiasi, dengan rentang energi yang lebih tinggi. Selain itu, pengaruh variasi ukuran kristal, misalnya 3 inci $\times$ 3 inci atau 1 inci $\times$ 1 inci terhadap efisiensi dan distribusi fluks agar diperoleh desain optimal untuk aplikasi tertentu. Hasil simulasi juga dapat divalidasi dengan pengukuran eksperimental.

DAFTAR PUSTAKA

- Agustina, N. Iaras. 2019. Scintillation Detector. *Teknik Nuklir*, 1–9.
- Baatout, S. 2023. Radiobiology Textbook. In *Springer*.
- BAPETEN. 2024. *Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2024 Tentang Izin Bekerja Petugas Pada Fasilitas Radiasi Dan/Atau Kegiatan Pemanfaatan Sumber Radiasi Pengion*. 1–23.
- Cao, Y., Zhou, L., Ren, H., & Zou, H. 2022. Determination, Separation and Application of ^{137}Cs : A Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(16). <https://doi.org/10.3390/ijerph191610183>
- Ce, Y. A. G. O., Smyslova, V., Bondarau, A., Fedorov, A., Borisevich, E., Lagutskiy, I., Karpuyk, P., Komendo, I., Kalinov, V., Mechinsky, V., Retivov, V., Talochko, Y., Vasil, A., & Korzhik, M. 2025. *New High Light Yield and Fast Ceramic Scintillator*. 1–11.
- DMAMC. 2021. *Compendium of Material Composition Data for Radiation Transport Modeling* (Number April).
- Fabjan, C. W., & Schopper, H. 2020. Particle Physics Reference Library Volume 2: Detectors for Particles and Radiation. In *Particle Physics Reference Library: Volume 2: Detectors for Particles and Radiation (Vol. 2)*. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-35318-6>
- Geist, W. H., Santi, P. A., & Swinhoe, M. T. 2024. Nondestructive Assay of Nuclear Materials for Safeguards and Security, Second Edition. In *Nondestructive Assay of Nuclear Materials for Safeguards and Security, Second Edition*. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-58277-6>
- Hafızoğlu, N. 2024. Efficiency and energy resolution of gamma spectrometry system with HPGe detector depending on variable source-to-detector distances. *European Physical Journal Plus*, Vol 139 No. 2, 1–9. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-04903-y>
- Hawrami, R., Ariesanti, E., Farsoni, A., Szydel, D., & Sabet, H. 2022. *Growth and Evaluation of Improved CsI : Tl and NaI : Tl Scintillators*.
- Hermanto, A. 2022. *Maqashid Al-Syari'ah Metode Ijtihad dan Pembaruan Hukum Keluarga Islam*.
- IAEA. 2023. *Neutron Monitoring for Radiation Protection*.
- IAEA. 2024. *IAEA Safety Standards: Protection of Workers Against Exposure Due to Radon*.
- ICRP. 2021. Annals of the Archive ICRP Use of Dose Quantities in Radiological Protection. In *From the Margins*, Vol. 50, No. 1.

<https://doi.org/10.1215/9780822383345-002>

JAEA. 2024. General Introduction Particle and Heavy Ion Transport code System 3.35. In *The Index of Middle English Prose*. <https://doi.org/10.1515/9781846157370-001>

JAEA. 2025a. *Basic Lecture I: Geometry and Source Definition*.

JAEA. 2025b. *User 's Manual Particle and Heavy Ion Transport code System* (Number PHITS Ver. 2.30 User's Manual: English Version).

James, M. 2013. Physics for Radiation Protection. In *Statistical Methods in Radiation Physics*. <https://doi.org/10.1002/9783527646548>

Jenkins, D. 2020. Radiation Detection for Nuclear Physics. In *Radiation Detection for Nuclear Physics*. <https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1428-2>

Knoll, G. F. 2010. Radiation Detection and Measurement. In *Journal of the Franklin Institute*, **Vol. 231 No. 5**. [https://doi.org/10.1016/S0016-0032\(41\)90498-2](https://doi.org/10.1016/S0016-0032(41)90498-2)

Kobe, P. M. 2008. *Tafsir Ibnu Katsir Surah Yusuf*.

Lin, Z., Lv, S., Yang, Z., Qiu, J., & Zhou, S. 2022. Structured Scintillators for Efficient Radiation Detection. *Advanced Science*, 9(2), 1–26. <https://doi.org/10.1002/advs.202102439>

Maqbool, M. (2017). *Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering: An Introduction to Medical Physics*.

Martin, A., Harbison, S., Beach, K., & Cole, P. 2019. An Introduction to Radiation Protection. In *An Introduction to Radiation Protection*. <https://doi.org/10.1201/9780429444104>

McGregor, D. S. 2018. Materials for Gamma-Ray Spectrometers: Inorganic Scintillators. *Annual Review of Materials Research*, 48(March), 245–277. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070616-124247>

Michail, C., Liaparinos, P., Kalyvas, N., Kandarakis, I., Fountos, G., & Valais, I. 2024. Radiation Detectors and Sensors in Medical Imaging. *Sensors*, **Vol 24 No. 19**. <https://doi.org/10.3390/s24196251>

Milbrath, B. D., Choate, B. J., Fast, J. E., Hensley, W. K., Kouzes, R. T., & Schweppe, J. E. 2018. *Comparison of LaBr₃ : Ce and NaI (Tl) Scintillators for Radio-Isotope Identification Devices*. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2006.12.003>

Min, S., Kang, H., Seo, B., Cheong, J., Roh, C., & Hong, S. 2021. Nanomaterial Based Scintillators. *Energies*, **Vol 14 No. 22**, 1–43. <https://doi.org/10.3390/en14227701>

Min, S., Kang, H., Seo, B., Roh, C., Hong, S., & Cheong, J. 2021. Integrated and

- Portable Probe Based on Functional Plastic Scintillator for Detection of Radioactive Cesium. *Applied Sciences (Switzerland)*, **Vol 11 No. 11**. <https://doi.org/10.3390/app11115210>
- Moszyński, M., Syntfeld-Kazuch, A., Swiderski, L., Grodzicka, M., Iwanowska, J., Sibiński, P., & Szczeniński, T. 2016. Energy resolution of scintillation detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 805, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.nima.2015.07.059>
- Muhammad, W., Hussain, A., & Maqbool, M. 2017. *Basic Concepts in Radiation Dosimetry* (Number November). https://doi.org/10.1007/978-3-319-61540-0_2
- Mukh Syaifudin. 2023. Biologi Radiasi: Dasar-dasar dan Aplikasi. In *Biologi Radiasi: Dasar-dasar dan Aplikasi*. <https://doi.org/10.55981/brin.563>
- Park, J. H., Song, S., Kim, S., Lee, S., Kim, J., Pyeon, C. H., Kim, S., & Lee, B. 2025. Comparison of LaBr₃:Ce and CeBr₃ scintillators for ⁵⁵Fe detection. *Nuclear Engineering and Technology*, **Vol 57 No. 7**. <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103506>
- Podgorsak, E. B. 2005. Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students. In *IAEA* (Vol. 2020). <https://doi.org/10.1155/2020/7269840>
- Podgorsak, E. B. 2006. Radiation Physics for Medical Physicists. *Sustainability (Switzerland)*, **Vol 11 No. 1**, 1–14.
- Putra, D. I. P. (BATAN). 2016. Pengaruh Penambahan Radioaktivitas ¹³⁷CS Pada Pengukuran Menggunakan Liquid Scintillation Counter (LSC) Dalam Pelarut Toulene. *Seminar Keselamatan Nuklir 2016*, 48:1-5.
- Putri Susanto, A. N., Muhammad Siddiq, I., & Muliyawati, W. 2024. Kemajuan Teknologi Terbaru dalam Prosedur Deteksi Radiasi Nuklir: Tinjauan Literatur Sistematis. *Jurnal Agama Dan Sosial Humaniora (JASH)*, **Vol 1 No. 1**, 43–53. <https://doi.org/10.15575/jash.v1i1.717>
- Schotanus, P. 2018. *Scintillation Detectors*. 1–78.
- Singh, I., Singh, B., Sandhu, B. S., & Sabharwal, A. D. 2020. *Comparative study for intermediate crystal size of NaI (Tl) scintillation detector*. 073105(July). <https://doi.org/10.1063/5.0005243>
- Tavernier, S. 2022. Experimental Techniques in Nuclear and Particle Physics. In *Sustainability (Switzerland)*, **Vol. 11 No. 1**.
- Tayebany, R. A. 2024. *The Impact of Different Light-Reflecting Materials Compositions of (LaBr 3 : Ce) Scintillation Detector on Spent Nuclear Fuel Gamma Spectrum*.
- UNEP. 2016. *Radiasi: Efek dan Sumber*.

- Venturi, S. 2021. Cesium in biology, pancreatic cancer, and controversy in high and low radiation exposure damage—scientific, environmental, geopolitical, and economic aspects. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **Vol 18 No. 17**. <https://doi.org/10.3390/ijerph18178934>
- Wahidi, R. 2016. *Tafsir dan Kontekstualisasi Ayat-ayat Pendidikan*.
- Wang, B., Yang, X., Chen, S., Lu, S., Zhao, S., Qian, Q., Cai, W., Wang, S., & Zang, Z. 2022. Flexible perovskite scintillators and detectors for X-ray detection. *IScience*, **Vol 25 No. 12**, 105593. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2022.105593>
- WHO. 2024. *Radiation Safety Culture in Health Care*.
- Yanagida, T. 2018. *Inorganic Scintillating Materials and Scintillation Detector*. **Vol 94 No. 2**, 75–97.