

**SIMULASI PENGARUH *DOPANT DYSPROSIUM* (Dy^{3+})
TERHADAP KOEFISIEN SERAPAN ENERGI
MASSA DAN RESPON ENERGI RELATIF
THERMOLUMINESCENT DOSIMETER
BERBAHAN *LITHIUM MAGNESIUM*
BORATE MENGGUNAKAN *SOFTWARE*
*MONTE CARLO N-PARTICLE***

TUGAS AKHIR

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



diajukan oleh:

Dyon Novan Prawira

19106020035

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA**

2023



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-156/Un.02/DST/PP.00.9/01/2024

Tugas Akhir dengan judul : Simulasi Pengaruh Dysprosium (Dy³⁺) terhadap Koefisien Penyerapan dan Respon Energi Relatif Thermoluminescent Dosimeter (TLD) Berbahan Lithium Magnesium Borate (LMB) Menggunakan Monte Carlo N-Particle (MCNP)

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : DYON NOVAN PRAWIRA
Nomor Induk Mahasiswa : 19106020035
Telah diujikan pada : Kamis, 18 Januari 2024
Nilai ujian Tugas Akhir : A

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

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

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

Valid ID: 65b36e74d7553



Penguji I

Dr. Thaibul Fikri Niyartama, S.Si., M.Si.
SIGNED

Valid ID: 65b2aea15a7c6



Penguji II

Andi, M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 65b18e9d6b450



Yogyakarta, 18 Januari 2024
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

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

Valid ID: 65b721a5468c2

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Dyon Novan Prawira

NIM : 19106020035

Program Studi : Fisika

Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Simulasi Pengaruh *Dopant Dysprosium* (Dy^{3+}) terhadap Koefisien Serapan Energi Massa dan Respon Energi Relatif *Thermoluminescent Dosimeter* Berbahan Lithium Magnesium Borate Menggunakan *Software Monte Carlo N-Particle*” 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, 3 Januari 2024

Penulis



Dyon Novan Prawira

NIM. 19106020035



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 : DYON NOVAN PRAWIRA
NIM : 19106020035
Judul Skripsi : Simulasi Pengaruh *Dopant Dysprosium* (Dy^{3+}) terhadap Koefisien Serapan Energi Massa dan Respon Energi Relatif *Thermoluminescent Dosimeter* Berbahan Lithium Magnesium Borate Menggunakan *Software Monte Carlo N-Particle*

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.

Yogyakarta, 3 Januari 2023

Pembimbing II

Fajar Arianto, S.Si., M.Si
NIP. 198608012021041001

Pembimbing I

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si.
NIP. 19820126 200801 2 008

MOTTO

...

Selamat datang di hidup yang baru

Kita beranjak dari masa lalu

Belajar dari apa yang engkau tahu

Tentukan arah yang kita tuju

Mungkin tak sesuai angan-anganmu

Mungkin lebih dari yang engkau kira

Namun yakinlah apa yang engkau tabur

Akan tumbuh dan bermakna

...

Biru Baru – Selamat Datang

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

HALAMAN PERSEMBAHAN

Skripsi ini dipersembahkan untuk:

Allah SWT

Nabi Muhammad SAW

Ibu dan Bapak

Adek

Teman-teman Fisika 2019

dan orang-orang kuat di luar sana

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamu'alaikum Warakhmatullahi Wabarakatuh

Alhamdulillah, Alhamdulillah, Alhamdulillah rabbil 'alamin puja dan puji syukur kami panjatkan kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala karena atas berkat rahmat-Nya lah penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini dengan judul **“Simulasi Pengaruh Dopant Dysprosium (Dy^{3+}) terhadap Koefisien Serapan Energi Massa dan Respon Energi Relatif *Thermoluminescent Dosimeter* Berbahan Lithium Magnesium Borate Menggunakan *Software Monte Carlo N-Particle*”**. Shalawat serta salam tidak lupa tercurahkan selalu kepada Nabi yang insyaa Allah akan memberi syafaat ialah Nabi Muhammad SAW beserta keluarga, sahabat dan para umatnya.

Alhamdulillah berkat dukungan dari berbagai pihak akhirnya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Karenanya penulis menyampaikan rasa terimakasih yang tulus kepada:

1. Bapak Prof. Dr. Phil. Al Makin, S.Ag., M.A. selaku Rektor UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.

2. Ibu Dr. Khurul Wardati, M.Si. selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
3. Ibu Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D. selaku Kepala Program Studi Fisika. Semoga selalu memberikan yang terbaik untuk generasi fisika.
4. Ibu Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si. selaku dosen pendamping yang membimbing penulis sejak sah statusnya sebagai mahasiswa fisika. Semoga senantiasa dimudahkan segala urusannya.
5. Bapak Fajar Arianto, S.Si., M.Si. selaku dosen pengampu magang yang dengan sabar dan menyenangkan berbagi ilmu tentang MCNP.
6. Teman-teman Fisika 2019 UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta, kalian luar biasa.
7. Serta semua pihak memberikan bantuan tulus dan dukungan dalam penyusunan tugas akhir ini yang tidak tersebutkan satu persatu.

Dengan segala keterbatasan, penulis menyadari bahwa penelitian ini masih jauh dari kata sempurna oleh karena itu diharapkan kritik dan saran demi kemajuan dan peningkatan

tugas akhir ini. Semoga penelitian ini bermanfaat untuk semuanya.

Wassalamualaikum Warakhmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 8 Januari 2024

Penulis



**Simulasi Pengaruh *Dopant Dysprosium (Dy³⁺)*
terhadap Koefisien Serapan Energi Massa dan
Respon Energi Relatif *Thermoluminescent
Dosimeter* Berbahan *Lithium Magnesium
Borate* Menggunakan *Software
Monte Carlo N-Particle***

**Dyon Novan Prawira
19106020035**

INTISARI

TLD banyak digunakan sebagai dosimeter personal dan medis. Oleh karena itu, TLD diharapkan memiliki koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif yang ideal terhadap jaringan organ tubuh manusia. Beberapa material TLD menunjukkan karakter koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif terhadap material ICRU *tissue* sebagai material ekuivalen jaringan lunak tubuh manusia. Tujuan penelitian ini adalah menganalisis pengaruh *dopant Dy³⁺* terhadap koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif material LMB berbasis simulasi dan perhitungan teoretis. Simulasi dilakukan menggunakan *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) dengan bantuan aplikasi *Notepad++*, *Total Commander*, dan *Visual Editor*. Kalkulasi hasil simulasi dan teoretis dilakukan menggunakan aplikasi *Spreadsheet* dan hasil kalkulasi akan dibandingkan secara statistik menggunakan perbedaan relatif dan uji-t berpasangan. Hasil penelitian yang menunjukkan bahwa *Dopant Dy³⁺* memengaruhi koefisien serapan energi massa LMB berupa penurunan pada nilai energi 0,02 MeV sebesar 0,02 dan peningkatan pada energi 0,06 dan 0,08 MeV sebesar 0,002. *Dopant Dy³⁺* menunjukkan peningkatan nilai pada respon energi relatif yang merentang antara 0,05 sampai dengan 0,09. Perbedaan relatif tertinggi material LiF:Mg,Ti bernilai 0,15%, LMB bernilai 0,13%, dan LMBDy³⁺ bernilai 0,13% dan dari metode uji-t berpasangan menunjukkan adanya perbedaan yang signifikan dari hasil simulasi dan teoretis.

KATA KUNCI: MCNP, TLD, LMBDy³⁺, koefisien serapan energi massa, respon energi relatif

***Simulation of The Effect of Dysprosium
Dopant (Dy³⁺) on The Mass Energy Absorption
Coefficient and Relative Energy Response
of Thermoluminescent Dosimeters Made
from Lithium Magnesium Borate Using
Monte Carlo N-Particle Software***

**Dyon Novan Prawira
19106020035**

ABSTRACT

TLD is widely used as a personal and medical dosimeter. Therefore, TLD is expected to have an ideal mass energy absorption coefficient and relative energy response to human organ tissue. Several TLD materials show the characteristics of mass energy absorption coefficient and energy response relative to ICRU tissue material as an equivalent material for human body soft tissue. The aims of this research are to analyze the effect of Dy³⁺ dopant on the mass energy absorption coefficient and relative energy response of LMB materials based on simulations and theoretical calculations. The simulation was carried out using Monte Carlo N-Particle (MCNP) with the help of the Notepad++, Total Commander and Visual Editor. Calculation of simulation and theoretical results uses the Spreadsheet application and calculation results will be compared statistically using relative differences and paired t-tests. The research results show that the Dy³⁺ dopant affects the LMB mass energy absorption coefficient in the form of a decrease at the 0.02 MeV energy point by 0.02 and an increase at the 0.06 and 0.08 MeV energies by 0.002. Dopant Dy³⁺ shows an increase in energy response relative values ranging from 0.05 to 0.09. The highest relative difference between LiF:Mg,Ti materials is 0.15%, LMB is 0.13%, and LMBDy³⁺ is 0.13% and the paired t-test method shows that there is a significant difference from the simulation and theoretical results.

Keywords: *MCNP, TLD, LMBDy³⁺, mass energy absorption coefficient, relative energy response*

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERNYATAN KEASLIAN SKRIPSI	iii
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
MOTTO	v
HALAMAN PERSEMBAHAN	vi
KATA PENGANTAR	vii
INTISARI	x
ABSTRACT	xi
DAFTAR ISI	xii
DAFTAR TABEL	xvi
DAFTAR GAMBAR	xviii
DAFTAR LAMPIRAN	xx
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian	9
1.4 Batasan Penelitian.....	9

1.5	Manfaat Penelitian	10
BAB II TINJAUAN PUSTAKA		11
2.1	Studi Pustaka.....	11
2.2	Landasan Teori	18
2.2.1	Radiasi	18
2.2.2	Dosimeter <i>Thermoluminescence</i>	22
2.2.3	Dosimetri	35
2.2.4	Interaksi Foton dengan Materi.....	39
2.2.5	LMBDy ³⁺	45
2.2.6	MCNP.....	48
2.2.7	Analisis Statistik.....	51
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		55
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	55
3.2	Alat dan Bahan.....	55
3.2.1	Alat	55
3.2.2	Bahan.....	56
3.3	Tahapan Penelitian.....	58
3.3.1	Studi Pustaka	58

3.3.2	Pengumpulan Data.....	59
3.3.3	Simulasi MCNP dan Penghitungan Teoretis ..	63
3.3.4	Running MCNP	64
3.3.5	Hasil Running MCNP.....	64
3.3.6	Penghitungan Excel	64
3.3.7	Pengolahan Data.....	65
3.3.8	Analisis Data	67
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		69
4.1	Hasil	69
4.1.1	Koefisien Serapan Energi Massa	69
4.1.2	Respon Energi Relatif (RER)	72
4.1.3	Hasil Uji Statistik	75
4.2	Pembahasan	78
4.2.1	Koefisien Serapan Energi Massa	78
4.2.2	Respon Energi Relatif (RER)	81
4.2.3	Uji Statistik.....	83
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		85
5.1	Kesimpulan	85

5.2	Saran	86
DAFTAR PUSTAKA		87
LAMPIRAN		100



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Rangkuman studi pustaka	17
Tabel 2.2 Evaluasi efek dosis terhadap kesehatan manusia (UNEP, 2016).....	21
Tabel 2.3 Panduan paparan radiasi oleh <i>International Commission on Radiological Protection (ICRP)</i> . 36	
Tabel 2.4 Komposisi unsur-unsur penyusun $\text{LMBDy}^{3+}_{0,10\%}$ (Hashim dkk. (2019)	47
Tabel 3.1 Jadwal pelaksanaan penelitian	55
Tabel 3.2 Detail perangkat keras yang digunakan dalam penelitian.....	56
Tabel 3.3 Detail perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian.....	56
Tabel 3.4 Detail bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian.....	57
Tabel 3.5 Fraksi berat setiap unsur yang ada pada material- material yang digunakan (Bos, 2001; Tanner dkk., 2004; Hashim dkk., 2019).....	57
Tabel 3.6 Tabel hasil pengolahan data untuk koefisien serapan energi massa simulasi dan teoretis.....	65
Tabel 3.7 Tabel hasil pengolahan data untuk respon energi relatif simulasi dan teoretis	66

Tabel 4.1 Koefisien serapan energi massa simulasi.....	69
Tabel 4.2 Koefisien serapan energi massa teoretis	70
Tabel 4.3 Respon energi relatif simulasi.....	72
Tabel 4.4 Respon energi relatif teoretis	73
Tabel 4.5 Perbedaan relatif, PR (%), oefisien serapan energi massa.....	76
Tabel 4.6 Tabel hasil Uji-t koefisien serapan energi massa yang memuat <i>p-value</i>	77
Tabel 4.7 Perbedaan relatif, PR (%), respon energi relatif ..	77
Tabel 4.8 Tabel hasil Uji-t respon energi relatif yang memuat <i>p-value</i>	78

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Sumber radiasi yang memapar manusia (UNEP, 2016).....	2
Gambar 2.1 Klasifikasi radiasi berdasarkan kemampuan pengionan (UNEP, 2016)	19
Gambar 2.2 Klasifikasi radiasi pengion	20
Gambar 2.3 Ilustrasi kerusakan DNA yang disebabkan oleh radiasi pengion (UNEP, 2016).....	22
Gambar 2.4 Bentuk-bentuk TLD (Kry dkk, 2020)	23
Gambar 2.5 Sistem pembaca TLD	25
Gambar 2.6 Mekanisme pendaran cahaya (a) fluoresens dan (b) fosforesens (Sunta, 2015).....	27
Gambar 2.7 Model OTOR	29
Gambar 2.8 Gambaran efek fotolistrik (Khan, 2003)	41
Gambar 2.9 Ilustrasi efek Compton (Khan, 2003).....	42
Gambar 2.10 Ilustrasi mekanisme produksi pasangan (Khan, 2003).....	44
Gambar 2.11 Gambar sampel dan spektrum <i>Energy Dispersive X-ray</i> (EDX) kaca LMBDy ³⁺ _{0,1%} (Hashim dkk, 2019)	46
Gambar 2.12 Tampilan aplikasi Notepad++	50

Gambar 2.13 Tampilan aplikasi Vised.....	50
Gambar 2.14 Tampilan aplikasi Total Commander.....	51
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian.....	59
Gambar 3.2 Ilustrasi simulasi TLD menggunakan MCNP (Redd, 2003)	61
Gambar 3.3 Ilustrasi chip TLD tampak depan (Siebert, 2002).....	62
Gambar 3.4 Ilustrasi TLD tampak samping (Siebert, 2002)	62
Gambar 4.1 Koefisien serapan energi massa	71
Gambar 4.2 Koefisien serapan energi massa LMB vs LMBDy ³⁺ (a) sebelah kiri untuk grafik semua rentang energi (b) sebelah kanan untuk grafik rentang energi 0,04 sampai dengan 0,2 MeV ..	72
Gambar 4.3 Respon energi relatif simulasi dan teoretis material	74
Gambar 4.4 Respon energi relatif LMB vs LMBDy ³⁺	75
Gambar 4.5 Perbedaan relatif, PR (%), koefisien serapan energi massa	76
Gambar 4.6 Perbedaan relatif, PR (%), respon energi relatif	77

DAFTAR LAMPIRAN

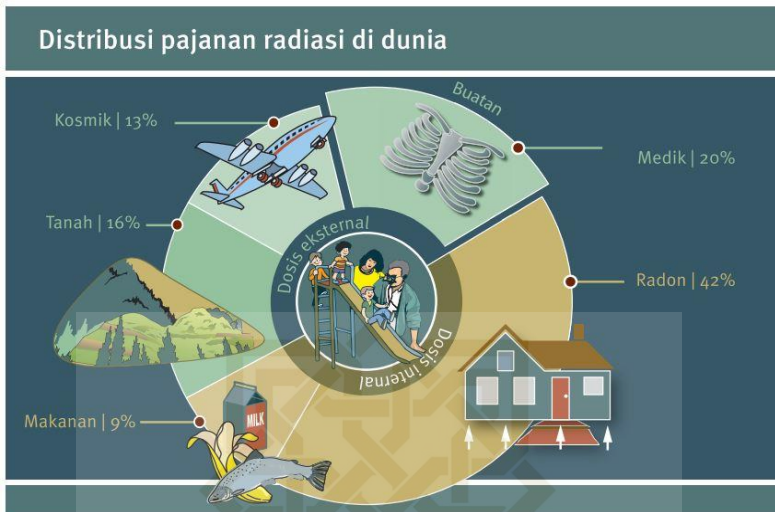
Lampiran 1: Koding.....	100
Lampiran 2: Geometri Hasil Koding	105
Lampiran 3: <i>Plotting</i> Partikel	108
Lampiran 4: Kalkulasi Koefisien Serapan Energi Massa Hasil Simulasi.....	109
Lampiran 5: Kalkulasi Koefisien Serapan Energi Massa Teoretis	117
Lampiran 6: Koefisien Serapan Energi Massa Simulasi dan Teoretis	121
Lampiran 7: Kalkulasi Respon Energi Relatif Simulasi dan Teoretis	122
Lampiran 8: Kalkulasi Perbedaan Relatif (%) Koefisien Serapan Energi Massa	123
Lampiran 9: Kalkulasi Perbedaan Relatif (%) Respon Energi Relatif	124
Lampiran 10: Hasil Uji-t Koefisien Serapan Energi Massa	125
Lampiran 11: Hasil Uji-t Respon Energi Relatif	126

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam kehidupan sehari-hari, kita sering berhadapan dengan sesuatu yang disebut sebagai radiasi. Radiasi merupakan energi yang merambat dari satu titik ke titik lainnya dengan atau tanpa membutuhkan medium. Radiasi yang bersumber dari alam menjadi penyumbang terbesar total paparan yang diterima manusia dibandingkan dengan radiasi yang diciptakan manusia (IAEA, 2022). Jika sumber radiasi dilihat dari bagaimana radiasi itu memapar manusia, maka pembagian dapat dilakukan menjadi sumber radiasi internal dan eksternal, seperti pada Gambar 1.1. Radiasi internal merupakan radiasi yang memapar manusia dari dalam tubuh manusia yang terdistribusi pada sumber penyumbang berupa makanan sebesar 9% dan Radon sebesar 42%. Radiasi eksternal merupakan radiasi yang memapar manusia dari luar tubuh manusia yang terdistribusi pada sumber penyumbang berupa aktivitas medis 20%, sinar kosmik 13%, dan tanah 16% (UNEP, 2016).



Gambar 1.1 Sumber radiasi yang memapar manusia (UNEP, 2016)

Radiasi dapat dikategorikan menjadi radiasi pengion dan radiasi non-pengion. Suatu radiasi dikatakan sebagai radiasi pengion apabila radiasi tersebut memiliki kemampuan untuk melakukan eksitasi dan ionisasi elektron ketika berinteraksi dengan materi. Rentang energi yang dibutuhkan untuk mengeluarkan elektron dari atom adalah 4 eV sampai dengan 25 eV atau 310 nm sampai dengan 49,6 nm jika dikonversikan ke dalam panjang gelombang. Pada rentang ini, sebagian besar pita energi radiasi sinar UV termasuk ke dalam radiasi pengion beserta sinar- γ dan sinar-X untuk rentang energi di atasnya (Attix, 2004).

Terdapat beberapa faktor yang dapat digunakan untuk mengetahui efek destruktif radiasi pengion terhadap tubuh, salah satunya adalah jumlah energi yang terdeposisi pada

jaringan tubuh. Regulasi yang berlaku secara internasional mengatur dosis efektif paparan radiasi pengion yang dapat diterima pekerja radiasi secara rata-rata tidak lebih dari 50 mSv/tahun. Sementara itu, dosis efektif yang diterima masyarakat umum tidak lebih dari 5 mSv/tahun (Bapeten, 1998; Duragkar dkk., 2019).

Radiasi pengion, seperti sinar- γ dan sinar-X, banyak dikembangkan untuk keperluan radioterapi sebab memiliki keunggulan. Keunggulan radiasi pengion adalah karakteristik daya tembusnya yang unik terhadap material sehingga dengan kemampuan ini radiasi pengion dapat dimanfaatkan dalam dunia medis untuk membunuh sel-sel di dalam tubuh manusia tanpa perlu melakukan pembedahan yang sifatnya invasif (Gordon, 2023). Radioterapi sendiri merupakan suatu bentuk penanganan pasien penderita kanker menggunakan radiasi. Sumber radiasi yang digunakan dapat berupa sinar-X, sinar- γ , dan partikel neutron. Sementara itu, rentang energi yang banyak digunakan berkisar dari 0,02 MeV sampai dengan 20 MeV (Redd, 2003; Terasawa dkk., 2009).

Pengaruh radiasi pengion dalam radioterapi terhadap jaringan tubuh sehat yang sifatnya merusak tentunya harus diantisipasi sehingga perlakuan radioterapi tepat sasaran. Selain pengaturan pasien dalam ruang lingkup radiasi tidak berubah-ubah, pengukuran dosis keluaran dari sumber radiasi

merupakan hal yang penting dalam perencanaan radioterapi. Maka dari itu, dosimeter menjadi aspek krusial dalam penjaminan kualitas dosis yang akan diterima pasien apakah dosis radiasi yang dihasilkan sumber radiasi telah akurat dan sesuai atau tidak. Salah satu dosimeter yang dapat digunakan adalah *thermoluminescence dosimeters* (TLD) (Maruyama dkk., 2020).

TLD merupakan dosimeter yang digunakan pada bidang saintifik seperti riset lingkungan terkait dengan paparan radiasi maupun bidang terapan seperti proteksi radiasi. TLD ini termasuk dalam kategori dosimeter pasif yang tidak membutuhkan energi dalam pengukuran radiasi sehingga dengan kelebihan ini dosimeter dapat digunakan untuk kepentingan pengukuran dengan biaya yang lebih terjangkau (Hourdakis & Nowotny, 2014; Petrovi dkk., 2021). Berdasarkan laporan *The European Radiation Dosimetry* (EURADOS), pengukuran kadar paparan radiasi oleh penyedia layanan terkait di Eropa pada tahun 2016 lebih dari 80% menggunakan *thermoluminescence dosimeter*. Sementara itu, material *thermoluminescence* (TL) yang banyak digunakan adalah *lithium fluoride* (LiF) dengan berbagai *dopant* (Duch dkk., 2021).

Penggunaan TLD sebagai alat pengawasan paparan radiasi pengion dalam ranah medis menjadikan studi interaksi

foton dengan material TL penting untuk dilakukan karena TLD diasumsikan sebagai *tissue-equivalent*. Dosimeter yang diposisikan sebagai *tissue-equivalent* mengharuskan material TL yang digunakan memiliki nilai koefisien serapan energi massa (μ_{en}/ρ) dan respon energi yang setara dengan *human-tissue* pada situasi yang sama (Chand dkk., 2021; Petrovi dkk., 2021; Souza dkk., 2019). Koefisien serapan energi massa merupakan koefisien yang dapat digunakan untuk memperkirakan jumlah energi foton yang digunakan untuk menghasilkan efek kimia dan biologi yang berhubungan dengan paparan radiasi pengion. Oleh karenanya, koefisien tersebut berguna untuk menaksir kadar serapan dalam bidang fisika medis dan kesehatan. Sementara itu, respon energi berguna untuk penentuan metode koreksi energi pada material TL (Souza dkk., 2019).

Pengembangan TLD dari aspek material penyusunnya terus dilakukan untuk mencapai idealitas TLD itu sendiri sebagai dosimeter radiasi. TLD dikatakan sebagai dosimeter yang ideal apabila memiliki respon dosis yang linier untuk semua rentang energi, sensitivitas yang tinggi, *tissue equivalency*, *reproducibility*, dan stabilitas sinyal TL (Yukihara dkk., 2022). Material *lithium fluoride* (LiF) dan *carbon-doped aluminum oxide* ($\text{Al}_2\text{O}_3:\text{C}$) merupakan material yang telah komersil digunakan sebagai bahan TLD. Meskipun memiliki beberapa keunggulan, material ini

memiliki nilai koefisien serapan energi massa yang cukup tinggi dan respon energi relatif yang menunjukkan nilai *over-response* ketika dibandingkan dengan material ekivalin jaringan lunak tubuh manusia (ICRU *tissue*). Pengembangan material MgB_4O_7 oleh Souza dkk. (2019) ternyata juga menghasilkan nilai koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif yang lebih tinggi dibandingkan ICRU *tissue* (Souza dkk., 2019). Oleh karena itu, pengembangan material TLD perlu dilakukan untuk mencapai koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif yang setara dengan ICRU *tissue*.

Dari sekian banyak material TL yang digunakan untuk keperluan dosimetri, material kaca *lithium borate* (LB) banyak diteliti karena karakteristik *dosimetric*-nya yang baik dan menjanjikan sebagai bahan dosimeter TL (Bakhsh dkk., 2018). Beberapa karakteristik kaca LB tersebut adalah sensitivitas tinggi, *near tissue equivalence*, *stress-free fabrication*. Namun, material ini memiliki kekurangan yaitu intensitas puncak TL yang rendah dan pendaran cahaya yang pendek sehingga beberapa ilmuwan melakukan rekayasa material dengan menambahkan logam magnesium. Rekayasa ini menghasilkan material baru, yaitu *lithium magnesium borate* (LMB), dengan performa yang meningkat dibandingkan material LB seperti *hardness*, stabilitas sinyal

TL, dan memiliki linieritas yang baik atas rentang dosis yang lebar (Ahamad dkk., 2021).

Akan tetapi dalam sisi lain, LMB memiliki beberapa aspek yang merugikan bila ditinjau dalam perspektif dosimetri radiasi, seperti *fading* yang disebabkan oleh cahaya, rendahnya puncak intensitas TL, dan luminesens jangka pendek (Anishia dkk., 2011; Ahamad dkk., 2021). Solusi yang dapat dilakukan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan memberikan unsur *rare earth* ke dalam LMB agar performa TLD meningkat karena ion logam *rare earth* dapat mengaktivasi material TL sebagai *luminescent center* (Kaur dkk., 2019). Ion *dysprosium(III)* (Dy^{3+}) dapat digunakan sebagai *dopant* karena unsur ini memiliki respon dosis liner, meningkatkan sensitivitas TL, menguatkan puncak intensitas TL, dan meningkatkan jangka waktu luminesens (Hashim dkk., 2019). Walaupun demikian, TLD berbahan LMB dan $LMBDy^{3+}$ perlu untuk dievaluasi karakteristik koefisien serapan energi massa dan respon energi relatifnya saat akan digunakan sebagai dosimeter personal dan medis dan hal ini belum ada penelitian yang melakukannya.

Berangkat dari perspektif tersebut, simulasi TLD dengan bahan material *lithium magnesium borate* (LMB) dengan doping Dy^{3+} ($LMB: Dy^{3+}$) untuk mengetahui

koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif dapat dilakukan. Perangkat lunak yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi adalah *Monte Carlo N-Particle* (MCNP). MCNP merupakan perangkat lunak yang menggunakan Monte Carlo sebagai basis metode komputasinya. Metode Monte Carlo merupakan metode stokastik yang memanfaatkan teknik pengambilan sampel acak untuk menyelesaikan masalah persamaan integral multidimensi yang kompleks. Salah satu aplikasi penyelesaian masalah menggunakan MCNP adalah problem fisika medis termasuk dosimetri di dalamnya (Fielding, 2023).

1.2 Rumusan Masalah

Dari uraian yang telah disampaikan, maka penelitian ini memiliki beberapa rumusan masalah di antaranya :

1. Bagaimana pengaruh penambahan *dopant* Dy^{3+} terhadap koefisien serapan energi massa TLD berbahan LMB?
2. Bagaimana pengaruh penambahan *dopant* Dy^{3+} terhadap respon energi relatif TLD berbahan LMB?
3. Bagaimana perbedaan koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif TLD dari hasil simulasi dan penghitungan teoretis?

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan ini memiliki beberapa tujuan antara lain:

1. Menganalisis pengaruh penambahan *dopant* Dy^{3+} terhadap koefisien serapan energi massa TLD berbahan LMB.
2. Menganalisis pengaruh penambahan *dopant* Dy^{3+} terhadap respon energi relatif TLD berbahan LMB.
3. Menganalisis perbedaan koefisien serapan energi massa dan respon energi relatif TLD dari hasil simulasi dan penghitungan teoretis.

1.4 Batasan Penelitian

Penelitian yang akan dilaksanakan tentunya memiliki beberapa batasan. Adapun batasan tersebut adalah sebagai berikut:

1. Sumber radiasi berupa titik.
2. Partikel yang disimulasikan adalah foton.
3. Rentang energi yang disimulasikan antara 0,02 MeV s.d. 20 MeV.

4. Perangkat lunak yang digunakan adalah *Monte Carlo N-Particle* (MCNP) versi 6.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan ini akan memberikan beberapa manfaat. Adapun manfaat yang akan didapatkan sebagai berikut:

1. Memberikan informasi tentang material LMB sebagai bahan pembuatan TLD.
2. Mengembangkan pemanfaatan program simulasi MCNP untuk penelitian material TLD.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan hasil penelitian di atas, maka kesimpulan dapat diambil sebagaimana berikut

1. Penambahan *dopant* Dy^{3+} terhadap koefisien serapan energi massa TLD berbahan LMB berpengaruh pada nilai energi tertentu, yaitu 0,06 MeV, 0,08 MeV, dan 0,10 MeV. Pada ketiga nilai energi ini, koefisien serapan energi massa mengalami peningkatan karena penambahan *dopant* berpengaruh pada kenaikan nilai bilangan atom efektif (Z_{eff}) LMB.
2. *Dopant* Dy^{3+} memberikan pengaruh terhadap respon energi relatif TLD hampir ke semua rentang energi kecuali energi 0,4 MeV. Penurunan nilai respon energi relatif terjadi pada rentang energi di bawah 0,05 MeV dan di atas 0,4 MeV sedangkan peningkatan terjadi pada rentan energi 0,05 sampai dengan 0,3 MeV.
3. Hasil dari perhitungan yang dilakukan menunjukkan bahwa PR (%) koefisien serapan eneri massa tertinggi material LiF:Mg,Ti bernilai 0,15%, LMB bernilai 0,13%, dan LMBDy³⁺ bernilai 0,13%. PR (%) respon energi relatif tertinggi material LiF:Mg,Ti 0,14%, LMB

bernilai 0,11%, dan $LMBDy^{3+}$ bernilai 0,10%. Selain itu, dengan menggunakan metode uji-t berpasangan hasil simulasi dan penghitungan teoretis koefisien serapan energi massa menampilkan perbedaan yang signifikan sedangkan respon energi relatif tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa kekurangan pada sistem. Oleh karena itu, disarankan melakukan hal-hal sebagai berikut:

1. Melakukan variasi bentuk dan ketebalan TLD sekaligus memperkaya material *tissue-equivalent* yang telah tersedia di berbagai literatur.
2. Menggunakan variasi bentuk sumber radiasi, skema iradiasi, dan jenis partikel yang disimulasikan.
3. Memasukkan parameter interaksi foton dalam penghitungan dan analisis seperti kalkulasi Z_{eff} , densitas elektron, dan koefisien atenuasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahamad, T., ALOthman, Z. A., Naushad, M., dan Yusuf, K. 2021. Synthesis and Characterization of CuO Doped Lithium Magnesium Borate Glasses for Thermoluminescence Dosimetry. *Optik*, **Vol.231 Januari 2021**: 166369. doi: 10.1016/j.ijleo.2021.166369.
- Andreo, P. 2018. Monte Carlo Simulations in Radiotherapy Dosimetry. *Radiation Oncology*, **Vol.13 No.121 Juni 2018** : 1–15. doi: 10.1186/s13014-018-1065-3.
- Anishia, S. R., Jose, M. T., Annalakshmi, O., dan Ramasamy, V. 2011. Thermoluminescence Properties of Rare Earth Doped Lithium Magnesium Borate Phosphors. *Journal of Luminescence*, **Vol.131 No.12 Juni 2011** : 2492–2498. doi: 10.1016/j.jlumin.2011.06.019.
- Attix, F. H. 2004. *Introduction To Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. Weinheim.
- Bakhsh, M., Abdullah, W. S. W., Mustafa, I. S., Al Musawi, M. S. A., dan Razali, N. A. N. 2018. Synthesis, Characterisation and Dosimetric Evaluation of

MgB4O7 Glass As Thermoluminescent Dosimeter. *Radiation Effects and Defects in Solids*, **Vol.173 No.5–6 April 2018** : 446–460. doi: 10.1080/10420150.2018.1471080.

Bapeten. 1998. *Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi*. Tersedia di :
https://jdih.bapeten.go.id/unggah/dokumen/peraturan/5-1_%28PERATURAN%29-1557808187.pdf.

Bos, A. J. J. 2001. High Sensitivity Thermoluminescence Dosimetry. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **Vol.184 No.1–2 April 2001** : 3–28. doi: 10.1016/S0168-583X(01)00717-0.

Bos, A. J. J. 2007. Theory of Thermoluminescence. *Radiation Measurements*, **Vol.41 Desember 2006** : S45-S56 . doi: 10.1016/j.radmeas.2007.01.003.

Bos, A. J. J. 2011. Fundamentals of Radiation Dosimetry. *AIP Conference Proceedings*, **Vol.1345 Mei 2011** : 5–23. doi: 10.1063/1.3576156.

Bull, J. S. 2017. How to Build MCNP 6.2, La-Ur-17-30373. Diakses 21 September 2023 dari

<http://permalink.lanl.gov/object/tr?what=info:lanl-repo/lareport/LA-UR-17-30373>.

Burgio, E., Piscitelli, P. dan Migliore, L. 2018. Ionizing Radiation and Human Health: Reviewing Models of Exposure and Mechanisms of Cellular Damage. An Epigenetic Perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **Vol.15 No.9 September 2018** : 1–13. doi: 10.3390/ijerph15091971.

Chand, S., Mehra, R., dan Chopra, V. 2020. Recent Developments in Phosphate Materials for Their TLD Applications. *Luminescence*, **Vol.36 No.8 Oktober 2020** : 1808–1817. doi: 10.1002/bio.3960.

Chen, R., dan McKeever, S. W. S. 1997. *Theory of Thermoluminescence and Related Phenomena*. World Scientific Publishing Company. doi: 10.1142/2781.

Siebert, B. 2002. *Intercomparison on the Usage of Computational Code in Radiation Dosimetry*. Diakses 21 Desember 2023 dari <http://www.nea.fr/download/quados/quados.html>.

Cuttler, J. M. 2020. Application of Low Doses of Ionizing Radiation in Medical Therapies. *Dose-Response: An International Journal*, **Vol.18 No.1 Januari 2020**: 1–17. doi: 10.1177/1559325819895739.

Dong, S., Lyu, X., Yuan, S., Wang, S., Li, W., Chen, Z., Yu, H., Li, F., dan Jiang, Q. 2020. Oxidative Stress: A Critical Hint in Ionizing Radiation Induced Pyroptosis. *Radiation Medicine and Protection*, **Vol.1 No.4 Desember 2020**: 179–185. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radmp.2020.10.001>

Duch, M. A., Dombrowski, H., dan Hranitzky, C. 2021. *Overview of Passive Area Dosimetry Systems Used in European Countries*. doi: 10.12768/w4hj-ef08.

Duragkar, A., Muley, A., Pawar, N. R., Chopra, V., Dhoble, N. S., Chimankar, O. P., dan Dhoble, S. J. 2019. Versatility of Thermoluminescence Materials and Radiation Dosimetry – A Review. *Luminescence*, **Vol.34 No.7 Mei 2019**: 656–665. doi: 10.1002/bio.3644.

EPA. 2023. *Radiation Sources and Doses*. Tersedia di :

<https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-05/documents/402-b-00-001.pdf>.

Fielding, A. L. 2023. Monte-Carlo Techniques for Radiotherapy Applications I: Introduction and Overview of The Different Monte-Carlo Codes. *Journal of Radiotherapy in Practice*, **Vol.22 No.247 Februari 2023**: 1–6. doi: 10.1017/S1460396923000079.

Gordon, E. 2023. *Chemistry and Global Awareness*. LibreTexts.

Hashim, S., Omar, R. S. dan Ghoshal, S. K. 2019. Realization of Dysprosium Doped Lithium Magnesium Borate Glass Based TLD Subjected to 1–100 Gy Photon Beam Irradiations. *Radiation Physics and Chemistry*, **Vol.163 Februari 2019**: 1–10. doi: 10.1016/j.radphyschem.2019.05.016.

Hendricks, J. S., Swinhoe, M. T. dan Favalli, A. 2022. *Monte Carlo N-Particle Simulations for Nuclear Detection and Safeguards An Examples-Based Guide for Students and Practitioners*. Springer. Switzerland.

Hourdakis, J. C., dan Nowotny, R. 2014. *Diagnostic Radiology Physics: A Handbook for Teachers and Students*. IAEA. Vienna. doi: 10.1201/9781482266641-12.

Hubbell, J. H. dan Seltzer, S. M. 2004. *X-Ray Mass Attenuation Coefficients*. Diakses 14 Desember 2023 dari <https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>.

Humphreys, J. C. & Chappell, S. E. 1979. *Standard Procedure for Use of Thermoluminescence Dosimetry in Radiation-Hardness Testing of Electronic Devices*. Diakses 21 September 2023 dari <https://www.govinfo.gov/content/pkg/GOVPUB-C13-b074ca580b23f82ecf753d1cab791260/pdf/GOVPUB-C13-b074ca580b23f82ecf753d1cab791260.pdf>.

IAEA. 2018. *Radiation Protection and Safety in Medical Uses of Ionizing Radiation: Specific Safety Guide*. IAEA. Vienna.

IAEA. 2022. *What is Radiation?*. Diakses 22 Januari 2024 dari <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-radiation>.

ICRP. 2005. *Protecting People againsts Radiation Exposure in the Event of a Radiological Attack*. ICRP. Stockholm.

Kaur, R., Bhatia, V., Kumar, D., Rao, S. M. D., Singh, S. P., dan Kumar, A. 2019. Physical, Structural, Optical and Thermoluminescence Behavior of Dy₂O₃ Doped Sodium Magnesium Borosilicate Glasses. *Results in Physics*, **Vol.12 Maret 2019**: 827–839. doi: 10.1016/j.rinp.2018.12.005.

Khan, F. M. 2003. *Physics of Radiation Therapy* (3rd ed). LIPPINCOTT WILLIAMS & WILKINS. Philadelphia.

Knoll, G. F., dan Kraner, H. W. 1981. *Radiation Detection and Measuremen* (3rd ed). John Wiley & Sons, Inc. New York.

Krane, K. S. 2012. *Modern Physics* (3rd ed). John Wiley & Sons, Inc.

Kry, S. F., Alvarez, P., Cygler, J. E., DeWerd, L. A., Howell, R. M., Meeks, S., O'Daniel, J., Reft, C., Sawakuchi, G., Yukihara, E. G., dan Mihailidis, D. 2020. AAPM TG 191: Clinical Use of Luminescent Dosimeters: TLDs

and OSLDs. *Medical Physics*, **Vol.47 No.2 Februari 2020** : e19–e51. doi: 10.1002/mp.13839.

Kulesza, J. A., Adams, T. A., Armstrong, J. D., Bolding, S. R., Brown, F. B., Bull, J. S., Burke, T. P., Clark, A. R., Forster, R. A. I., Giron, J. F., Grieve, T. S., Josey, C. J., Martz, R. L., McKinney, G. W., Pearson, E. J., Rising, M. E., Solomon, C. J. Jr., Swaminarayan, S., Trahan, T. J., Wilson, S. C., Zukaitis, A. J. 2022. *MCNP® Code Version 6.3.0 Theory & User Manual*. Diakses 21 September 2023 dari <https://www.osti.gov/servlets/purl/1889957/>.

Legorreta-Alba, O., Cruz-Zaragoza, E., Diaz, D., dan Marcazzo, J. 2018. Synthesis of $\text{MgB}_4\text{O}_7:\text{Dy}^{3+}$ and Thermoluminescent Characteristics at Low Doses of Beta Radiation. *Journal of Nuclear Physics, Material Sciences, Radiation and Applications*, **Vol.6 No.1 Agustus 2018** : 71–76. doi: 10.15415/jnp.2018.61012.

Manjunatha, H. 2016. Mass Attenuation Coefficient and Its Photon Interaction Derivables of Some Skeletal Muscle Relaxants. *Journal of Radiation and Cancer Research*, **Vol.7 No.1 Maret 2016** : 18. doi: 10.4103/0973-0168.184608.

Maruyama, D., Yanagisawa, S., Koba, Y., Andou, T., dan Shinso, K. 2020. Usefulness of Thermoluminescent Slab Dosimeter for Postal Dosimetry Audit of External Radiotherapy Systems. *Sensors and Materials*, **Vol.32 No.4 April 2020**: 1461–1477. doi: 10.18494/SAM.2020.2697.

Mckeever, S. W. S., dan Chen, R. 1997. Luminescence Models. *Radiation Measurements*, **Vol.27 No.5–6 Desember 1997** : 625–661. doi: 10.1016/S1350-4487(97)00203-5.

Nuryadi, Astuti, T. D., Utami, E. S., dan Budiantara, M. 2017. *Buku Ajar Dasar-dasar Statistik Penelitian*. Sibuku Media. Yogyakarta.

Park, S. H. dan Kang, J. O. 2011. Basics of Particle Therapy I: Physics. *Radiation Oncology Journal*, **Vol.29 No.3 September 2011**: 135-146. doi: 10.3857/roj.2011.29.3.135.

Petrovic, J. S. S., Knezevic, Z. I., Krzanovic, N. Lj., Majer, M. C., Zivanovic, M., Ciraj-Bjelac, O. F. 2021. Review of The Thermoluminescent Dosimetry Method for The

Environmental Dose Monitoring. *Nuclear Technology & Radiation Protection*, **Vol.36 No.2 November 2021** : 150–162.

Podgoršak, E. B. 2006. *Radiation Physics for Medical Physicists*. Springer. Berlin.

Podgoršak, E. B. 2016. *Radiation Physics for Medical Physicist*. Springer. Cham.

Redd, R. A. 2003. *Radiation Dosimetry and Medical Physics Calculations Using MCNP 5*. (Tesis), Jurusan *Health Physics*, Departemen Rekayasa Nuklir, Universitas Texas A&M, College Station.

Seneza, C. 2014. *Thermoluminescence of Secondary Glow Peaks in Carbon-Doped Aluminium Oxide*. (Tesis), Jurusan Fisika, Departemen Fisika dan Elektronik, Fakultas Sains, Universitas Rhodes. Grahamstown.

Souza, L. F., William, S. S., Belinato, W., Rogerio, M. V. S., Caldas, L. V. E., dan Souza, D. N. 2019. Mass Energy Absorption Coefficients and Energy Responses of Magnesium Tetraborate Dosimeters for 0.02 MeV to 20 MeV Photons Using Monte Carlo Simulations. *Applied*

Radiation and Isotopes, **Vol.148 April 2019** : 232–239.
doi: 10.1016/j.apradiso.2019.04.015.

Straub, J. M., New, J., Hamilton. C. D., Lominska, C., Shnayder, Y., dan Thomas, S. M. 2016. Radiation-Induced Fibrosis: Mechanisms and Implications for Therapy. *Journal of Cancer Research and Clinical Oncology*, **Vol.141 No.11 November 2016**: 1985–1994. doi: 10.1007/s00432-015-1974-6. Radiation-induced.

Sunta, C. M. 2015. *Unraveling Thermoluminescence, Springer Series in Materials Science*. Springer. Mumbai. doi: 10.1093/rpd/ncu319.

Terasawa, T., Dvorak, T., Ip, S., Raman, G., Lau, J., Trikalinos, T. A. 2009. Review Annals of Internal Medicine Systematic Review : Charged-Particle Radiation Therapy for Cancer. *Annals of Internal Medicine*, **Vol.151 No.8 Oktober 2009**: 556–565. doi: 10.7326/0003-4819-151-8-200910200-00145.

Torres-Cortes, C. O., Vega-Carrillo, H. R., Hernandez-Adame, L., Baltazar-Raigosa, A., Garcia-Duran, A., Vazquez-Banuelos, J., dan Solis-Sanchez, L. O. 2021.

Performance of Two Magnesium Borate Compounds, with Thermoluminescent Properties, to γ -rays and Neutrons. *Radiation Physics and Chemistry*, **Vol.183 Juni 2021**: 109418. doi: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109418>.

Tuieng, R. J., Cartmell, S. H., Kirwan, C. C., dan Sherratt, M. J. 2021. The Effects of Ionising and Non-Ionising Electromagnetic Radiation on Extracellular Matrix Proteins. *Cells*, **Vol.10 No.11 Oktober 2021**: 1–25. doi: [10.3390/cells10113041](https://doi.org/10.3390/cells10113041).

UNEP. 2016. *Radiasi: Efek dan Sumber*. Tersedia di : <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/7790?show=full>.

Vekic, B., Miljanic, S., dan Bos, R. 2002. Main Dosimetric Characteristics of Some Tissue-Equivalent TL Detectors. *Radiation Protection Dosimetry*, **Vol.100 No.1–4 Juli 2002** : 437–442.

Wahyuning, S. 2021. *Dasar-Dasar Dasar Statistik*. Yayasan Prima Agus Teknik. Semarang.

Yuantari, C. dan Handayani, S. 2017. *Buku Ajar Statistik*

Deskriptif & Inferensial. Badan Penerbit Universitas Dian Nuswantoro. Tersedia pada: https://repository.dinus.ac.id/docs/ajar/buku_biostat_rev_2017_fix.pdf.

Yukihara, E. G., Bos, A. J. J., Bilski, P., dan McKeever, S. W. S. 2022. The Quest for New Thermoluminescence and Optically Stimulated Luminescence Materials: Needs, Strategies and Pitfalls. *Radiation Measurements*, **Vol.158 Agustus 2022** : 1-19. doi: 10.1016/j.radmeas.2022.106846.

