Jurnal Fisika Unand (JFU)
Vol. 15, No. 4, Juli 2026, hal. 405 – 413
ISSN: 2302-8491 (Print); 2686-2433 (Online)
https://doi.org/10.25077/jfu.15.4.405-413.2026

Open Access

Analisis Respons Dosimetri Phantom Berbasis PMMA dengan Variasi Media Air dan Nylon Menggunakan Sumber Cs-137 Berdasarkan Standar ISO 4037:2019

Widya Rachma Wulan[1], Primasari Cahya Wardhani[1*], Fajar Timur[1] , Wahyu Dwi Lestari[2], Arie Chintya Martania[3]

[1]Fisika, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Indonesia
[2]Teknik Mesin, Fakultas Teknik dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Indonesia
[3]Instalasi Kalibrasi Alat Ukur Radiasi dan Radioterapi, Balai Pengamanan Alat dan Fasilitas Kesehatan (BPAFK) Surabaya, Indonesia

Info Artikel

Histori Artikel:
Diajukan: 13 Januari 2026
Direvisi: 5 Mei 2026
Diterima: 31 Juli 2026

Kata kunci:
Cs-137
ISO 4037:2019
Phantom PMMA
TLD Hp(10)

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons dosimetri phantom berbasis *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) dengan variasi media air dan nylon sebagai alternatif material pengukuran dosis radiasi. Phantom berbentuk silinder menyerupai ekstremitas manusia dibuat menggunakan teknologi 3D *printing* mengacu pada standar ISO 4037. Pengukuran dosis menggunakan *Thermoluminescent Dosimeter* (TLD) tipe Hp(10) dengan sumber radiasi gamma Cesium-137 (662 keV) pada sudut 0°, 40°, dan 235°. Hasil menunjukkan bahwa dosis pada media *nylon* secara konsisten lebih tinggi dibandingkan media air pada semua sudut. Rata-rata dosis pada media air berkisar antara (31,95–32,20) µGy dosis serap, (31,95–32,20) µSv dosis ekuivalen. Sedangkan pada media *nylon* berkisar antara (33,03–33,45) µGy dosis serap dan (33,03–33,45) µSv dosis ekuivalen. Persentase selisih dosis antara kedua media berada pada rentang 2,61%–3,88%, masih dalam batas toleransi dosimetri yang dikeluarkan oleh IAEA sebesar 5%. Perbedaan ini dipengaruhi oleh karakteristik hamburan pada material *nylon* yang meningkatkan probabilitas interaksi radiasi, terutama hamburan Compton. Selain itu, nilai standar deviasi menunjukkan distribusi dosis pada air lebih homogen dibandingkan dengan *nylon*. Meskipun demikian, kesesuaian nilai dosis menunjukkan bahwa nylon memiliki kesetaraan radiologis yang cukup baik terhadap air. Oleh karena itu, *nylon* berpotensi digunakan sebagai material alternatif dalam pembuatan phantom dosimetri, terutama pada kondisi di mana penggunaan air memiliki keterbatasan.

Keywords:
Cs-137
ISO 4037:2019
Phantom PMMA
TLD Hp(10)

Penulis Korespondensi:
Primasari Cahya Wardhani
Email:primasari.cahya.fisika@upnjatim.ac.id

This study analyzes the dosimetric response of Polymethyl Methacrylate (PMMA)-based phantoms with water and nylon as alternative media for radiation dose measurement.. Cylindrical phantoms resembling human extremities were fabricated using 3D printing according to the ISO 4037 standard. Dose measurements used a Thermoluminescent Dosimeter (TLD) type Hp(10) with a Cesium-137 gamma source (662 keV) at angles of 0°, 40°, and 235°. The results show that the dose in nylon consistently produced higher dose values than water at all angles. The average dose ranged from (31,95–32,20) µGy (absorbed dose) and (31,95–32,20) µSv (equivalent dose), while the nylon medium ranged from. (33,03–33,45) µGy (absorbed dose) and (33,03–33,45) µSv The percentage difference between the two media was in the range of 2,61%–3,88%, which is close to the 5% dosimetry tolerance limit by the IAEA. This variation is influenced by the scattering characteristics of the nylon material, which increase the probability of radiation interaction, particularly Compton scattering. Additionally, standard deviation values indicate that the dose distribution in water is more homogeneous than in nylon. Nevertheless, the consistency of the dose values suggests that nylon possesses good radiological equivalence to water. Therefore, nylon has the potential to be used as an alternative material in dosimetry phantom fabrication, especially in conditions where the use of water is limited.

Copyright © 2026 Author(s).

I. PENDAHULUAN

Pengukuran dosis radiasi penting untuk mengetahui batas maksimal dosis yang diberikan kepada pasien atau pekerja yang menggunakan radiasi. Penggunaan *phantom* sering dilakukan untuk mengukur dosis dalam proses kalibrasi serta menentukan dosis radioterapi (Hiswara, 2020). *Phantom* adalah alat bantu anatomi tubuh yang digunakan untuk mewakili tubuh pasien, berbentuk kubus dan silinder, dengan bahan PMMA atau akrilik di mana bentuk silinder lebih merepresentasikan anatomi manusia (Artikah et al., 2024; Nasir, 2020). Namun, *phantom* komersial yang banyak digunakan memiliki harga yang relatif mahal dan tidak semua instansi memiliki ketersediaan alat tersebut. Selain itu, proses pengadaan phantom juga memerlukan waktu yang tidak singkat, sehingga dapat menghambat kegiatan kalibrasi maupun penelitian. Keterbatasan ini, termasuk yang terjadi di Balai Pengamanan Alat dan Fasilitas Kesehatan (BPAFK), mendorong perlunya inovasi dalam pengembangan phantom alternatif. Dengan mengacu pada standar internasional seperti ISO, studi ini berupaya merancang phantom menggunakan bahan yang lebih mudah diperoleh, lebih ekonomis, namun tetap memiliki sifat fisik dan radiologis yang mendekati jaringan tubuh manusia (Wegner et al., 2023).

Meskipun beberapa penelitian telah mengembangkan model alternatif jaringan untuk keperluan dosimetri radiasi, studi yang secara khusus menganalisis kombinasi bahan *Polymethyl Methacrylate* (PMMA) dengan variasi media seperti air dan nylon pada struktur lengan berbasis 3D printing yang mengacu pada standar ISO 4037 masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya menggunakan material homogen atau hanya berfokus pada satu jenis media tanpa mengkaji pengaruh variasi komposisi terhadap respons radiologis (Sookpeng et al., 2016). Hal ini menunjukkan adanya kesenjangan dalam memahami pengaruh kombinasi material padat dan cair terhadap sifat fisik serta distribusi dosis radiasi sesuai standar ISO 4037 (ISO, 2019)

Standar yang umum digunakan dalam kalibrasi dosimeter adalah ISO 4037-1:2019, ISO 4037-2:2019, dan ISO 4037-3:2019, yang mengatur karakteristik radiasi acuan sinar-X dan gamma, metode pembangkitan radiasi, serta prosedur pengukuran dosis pada rentang energi 8 keV hingga 1,3 MeV (ISO, 2019). Simulasi untuk bagian tubuh ekstremitas menggunakan benda berbentuk silinder dengan diameter 7,3 cm dan panjang 30,00 cm, yang dianggap mewakili bagian lengan manusia (PTW Dosimetry, 2024).

Oleh karena itu, penelitian ini mengembangkan phantom berbasis PMMA sebagai dinding luar phantom dengan variasi pengisi media air dan nylon. PMMA digunakan sebagai bahan *phantom* sesuai dengan *International Atomic Energy Agency* (IAEA) (IAEA, 2024). Banyak jenis material sudah dibuat sebagai penggunaan dosimetri radiasi, seperti air yang digunakan sebagai media acuan, PMMA, serta Nylon Rod (BAPETEN, 2020). Sebagai alternatif nylon dipilih karena sifat fisik dan radiologisnya mirip dengan air (PTW Dosimetry, 2025). Pada penelitian ini, phantom dirancang dengan lapisan luar berbahan PMMA yang dicetak menggunakan 3D printing. Bahan padat seperti PMMA sering digunakan dalam pengukuran *Computed Tomography Dose Index* (CTDI) dan uji kalibrasi CT *number*. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa material padat seperti PMMA dan nylon memiliki karakteristik yang mendekati air, namun tetap menunjukkan deviasi dalam pengukuran dosis akibat perbedaan densitas dan struktur internal (Kurniawati et al., 2015). Di mana karakteristik radiasi PMMA tersebut menyerupai karakteristik air yang merupakan komponen utama tubuh manusia yang tersusun dari 90% air. Air digunakan secara luas sebagai acuan dalam pengukuran dosis karena sifat radiologisnya sangat mirip dengan jaringan lunak tubuh manusia yang tersusun 90% air, sehingga sering dijadikan tolak ukur utama dalam mengevaluasi kesetaraan material phantom padat (PTW Dosimetry, 2025). Namun, penggunaan phantom air memiliki beberapa kekurangan, seperti ketidakstabilan mekanik, kesulitan dalam mengangkut, dan kurangnya kemudahan dalam merancang bentuknya (Kurniawati et al., 2015).

Pada studi ini dilakukan pengukuran dosis serap dan dosis ekuivalen pada masing-masing phantom dengan medium air dan nylon, dengan menggunakan *Thermoluminescent Dosimeter* (TLD) perorangan, pada kedalaman 10 mm TLD Hp(10). Pada studi ini dilakukan penyinaran eksternal menggunakan Cesium-137. Pemilihan sumber radiasi Cs-137 dalam penelitian ini didasarkan pada relevansinya sebagai standar kalibrasi dosimeter dan pengujian proteksi radiasi yang sesuai dengan standar ISO 4037:2019 (ISO, 2019). Selain itu, waktu paruh Cs-137 yang panjang, yaitu sekitar 30 tahun, menjamin pengukuran yang konsisten dalam jangka panjang. Pemilihan Cs-137 diharapkan memiliki kesesuaian aplikasi yang lebih baik untuk kondisi pengujian. Desain phantom dibuat dalam bentuk silinder simetris agar dapat menjamin konsistensi respons terhadap radiasi dari berbagai arah

(Chung et al., 2018). Pada penelitian ini juga dilakukan variasi sudut penyinaran sebesar $0°, 40°,$ dan $235°$. Untuk mengevaluasi pengaruh arah datang radiasi terhadap distribusi dosis serap dan dosis ekuivalen pada phantom. Selanjutnya dilakukan komparasi atau perbandingan nilai dosis serap dan dosis ekuivalen antara media air dan *nylon*. Penggunaan *nylon* dalam phantom memungkinkan variasi dalam komposisi jaringan tanpa mengubah karakteristik interaksi radiasi secara signifikan. Sebelum penerapan, *nylon* harus diuji untuk sifat fisiknya seperti ukuran, volume, dan densitas agar sesuai dengan jaringan lunak dan medium air (Adhillaksa et al., 2024). Kombinasi dari bahan seperti PMMA, *nylon*, dan air dalam phantom lengan memungkinkan analisis interaksi radiasi pada material dengan bahan padat dan cair, serta penilaian kesetaraan jaringan sesuai dengan standar ISO 4037 (Yohannes et al., 2016). Dengan demikian, penelitian ini dapat menjadi dasar.

Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada pengembangan phantom berbasis PMMA dengan integrasi media air dan *nylon* dalam satu sistem berbasis 3D *printing*, serta evaluasi respons dosimetri terhadap variasi kondisi penyinaran berdasarkan standar ISO 4037 sebagai upaya untuk memperoleh alternatif *phantom* yang lebih ekonomis dan representatif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan alternatif *phantom* yang lebih ekonomis, mudah diproduksi, serta aplikatif dalam kegiatan kalibrasi dosimeter dan pengujian proteksi radiasi di fasilitas kesehatan maupun laboratorium dosimetri.

II. METODE

Penelitian ini dilakukan di laboratorium fisika UPN "Veteran" Jawa Timur dan BPAFK Surabaya untuk mengetahui sifat fisik dan sifat radiologis *phantom* lengan berbahan PMMA hasil 3D printing dengan variasi media air dan *nylon*. Desain *phantom* mengacu pada standar ISO 4037 dengan bentuk silinder (diameter 7,30 cm, tinggi 30,00 cm dan ketebalan 0,25 cm) sebagai representasi ekstremitas manusia. Material utama berupa PMMA densitas (1,18 – 1,20) g/cm³ dengan media pengisi (1,00 g/cm³). Pengukuran uji fisik meliputi pengukuran diameter (d), tinggi (t), massa (m), volume (V), Massa jenis (ρ). Pengukuran dilakukan di *Research Center* UPN "Veteran" Jawa Timur Pengukuran dimensi penelitian ini menggunakan jangka sorong dan neraca digital, pengukuran ini dilakukan pengulangan sebanyak sepuluh kali untuk meningkatkan ketepatan data. Volume phantom berbentuk silinder dihitung menggunakan persamaan.

$$V = \pi r^2 t \tag{1}$$

Phantom dibuat menggunakan *SolidWorks* 2014 berdasarkan desain yang ditunjukkan Gambar 1, dan dicetak dalam format *Stereolithography* (STL) dengan teknologi *3D printing*. Studi menghasilkan dua model, yaitu model A (dinding luar berbahan PMMA dengan media pengisi air) dan model B (dinding luar berbahan PMMA dengan media pengisi *nylon*), dengan dimensi yang sama untuk kedua model yang sesuai dengan standar ISO 4037, ditunjukkan pada gambar 2. Dengan dimensi yang sama pada model A dan B, dilakukan uji fisik dan uji geometris untuk memastikan perbandingan hanya dipengaruhi oleh jenis material.



Gambar 1 Desain *Phantom* Silinder Tampak Perspektif Depan



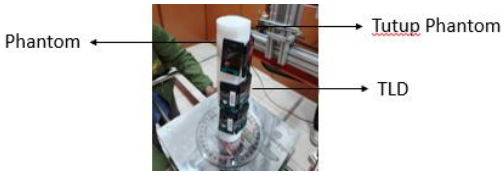
(b) (c)

Gambar 2 (a) *Phantom* Medium Air (b) *Phantom* Medium *Nylon* (c) *Phantom* dan Tutup *Phantom*

Pengukuran uji radiologis menggunakan sumber radiasi Cs-137 (662 keV), karena merupakan sumber gamma referensi sesuai standar ISO 4037:2019 yang umum digunakan untuk kalibrasi dosimeter. Untuk mengetahui evaluasi respons radiologis menggunakan TLD Hp(10) pada kedalaman 10 mm. Pembacaan awal TLD berupa sinyal yang diproses melalui perangkat lunak pembaca TLD, kemudian secara otomatis dikonversi oleh sistem menggunakan faktor kalibrasi menjadi nilai dosis ekuivalen dalam satuan mSv. Penyinaran dilakukan pada beberapa sudut, yaitu $0°, 40°, \text{dan } 235°$ dengan pengulangan tiga kali menggunakan 9 TLD untuk meningkatkan ketepatan data. Waktu penyinaran (t) dihitung berdasarkan dosis ekuivalen yang diminta (D), menggunakan persamaan.

$$t = \frac{D}{Hp(10) \times 60} \tag{2}$$

Dengan t adalah waktu penyinaran (menit), D adalah dosis ekuivalen yang diminta (mSv), dan Hp(10) adalah laju dosis ekuivalen (mSv/jam). 60 digunakan untuk konversi waktu dari jam ke menit.



Gambar 3 Penempatan TLD Pada Phantom

Data hasil pembacaan TLD dianalisis untuk membandingkan respons dosimetri antara media air sebagai acuan dan *nylon* sebagai alternatif (Khallouqi et al., 2025). Medium air digunakan sebagai material acuan pada bidang radiologis dikarenakan memiliki kesetaraan jaringan yang baik (IAEA, 2000). Persentase perbedaan dihitung untuk memahami deviasi relatif antara kedua media dengan menggunakan persamaan:

$$\%Selisih = \left| \frac{D_{nylon} - D_{air}}{D_{air}} \right| \times 100\% \tag{3}$$

Dimana $\%Selisih$ merupakan persentase perbedaan dosis yang dinyatakan dalam persen (%), D_{nylon} nilai dosis yang diukur pada material uji, D_{air} merupakan dosis pada media air sebagai acuan, 100% merupakan faktor konversi ke persen.

III. HASIL DAN DISKUSI

Karakterisasi fisik dilakukan untuk memastikan kesesuaian geometri dan kestabilan struktur tutup dengan badan *phantom* sebelum uji radiologis. Parameter yang diuji mencakup diameter luar, panjang badan *phantom* (dengan tutup bawah yang sudah terpasang), panjang silinder aktif, massa, serta volume. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa *phantom* berbasis PMMA dengan media air dan nylon memiliki dimensi yang sama dan mendekati desain standar, dengan rata-rata tinggi tabung sebesar 28,00 cm, tinggi tutup 1,00 cm dan diameter sekitar rata-rata 7,28 cm. Pengukuran dilakukan berulang sebanyak sepuluh kali untuk meningkatkan akurasi, dan hasilnya menunjukkan konsistensi bentuk yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa proses pencetakan menggunakan *3D printing* mampu menghasilkan bentuk yang presisi dan stabil, sehingga dapat digunakan dalam pengujian dosimetri. Adapun ringkasan dari pengukuran fisik dari phantom tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1 Hasil Pengukuran Uji Geometri Pada Phantom Lengan dengan Variasi *Nylon* dan Air

Bagian	Material	Jari-Jari (cm)	Ketebalan (cm)	Tinggi (cm)
Tabung	Air	$3{,}644 \pm 0{,}01$	$0{,}15 \pm 0{,}01$	$28{,}00 \pm 0{,}01$
	Nylon	$3{,}640 \pm 0{,}01$	$0{,}15 \pm 0{,}01$	$28{,}00 \pm 0{,}01$
Tutup	Air	$3{,}625 \pm 0{,}01$	$1{,}00 \pm 0{,}01$	$1{,}00 \pm 0{,}01$
	Nylon	$3{,}633 \pm 0{,}01$	$1{,}00 \pm 0{,}01$	$1{,}00 \pm 0{,}01$

Berdasarkan Tabel 1, hasil pengukuran parameter geometris menunjukkan bahwa ukuran *phantom* pada media air dan *nylon* memiliki nilai ketebalan dinding dan ukuran penutup yang konsisten, menandakan proses 3D printing menghasilkan struktur yang stabil dan presisi.

Keseragaman dimensi ini penting dalam dosimetri radiasi karena memengaruhi distribusi dosis radiasi. Berdasarkan (ISO, 2019). Kesesuaian dimensi *phantom* sangat penting untuk menjamin validitas pengukuran dosis radiasi. *Phantom* berbentuk silinder juga lebih representatif dalam mensimulasikan bagian tubuh manusia. Dibandingkan *phantom* full PMMA, *phantom* yang dikembangkan menunjukkan kesesuaian dimensi yang baik sehingga dapat digunakan sebagai alternatif tanpa mengubah karakteristik geometrinya secara signifikan.

Tabel 2 Hasil Uji Geometris pada Parameter Volume, Massa, dan Densitas pada Bagian Tutup dan Tabung Phantom Lengan

Bagian	Material	Volume (cm^3)	Massa (g)	Densitas g/cm^3
Tabung	Air	1.167,14 ±2,64	1.170,00 ±0,01	0, 919±0,002
	Nylon	1.163,62 ±2,39	1.100,00 ±0,01	0,863±0,002
Tutup	Air	41,30 ±0,11	1.185,80 ±0,01	0,40±0,002
	Nylon	41,45 ±0,20	1.115,90 ±0,01	0,40±0,004

Pada Tabel 2 ditampilkan parameter geometris *phantom* meliputi volume, massa, dan densitas yang diperoleh dari rata-rata sepuluh kali pengukuran. Volume kedua media tidak menunjukkan perbedaan signifikan, adapun perbedaan nilai hanya dipengaruhi oleh ketidakpastian pengukuran diameter. Namun, massa dan densitas menunjukkan perbedaan nilai, di mana media air memiliki massa lebih tinggi, yaitu $(1.170{,}00 \pm 0{,}01)$ g untuk tabung dan $(1.185{,}80 \pm 0{,}01)$ g untuk tutup, dibandingkan dengan media nylon sebesar $(1.110{,}00 \pm 0{,}01)$ g dan $(1.115{,}90 \pm 0{,}01)$ g. Perbedaan ini disebabkan oleh densitas material, di mana air dapat mengisi volume secara penuh tanpa rongga, sedangkan *nylon* berpotensi menyisakan rongga udara. Hal ini menyebabkan massa total pada media *nylon* lebih rendah dibandingkan dengan air. Hasil menunjukkan bahwa densitas *phantom* dengan media air mendekati nilai teoritis 1 g/cm³, sedangkan *nylon* lebih rendah akibat karakteristik material dan struktur internalnya (Khallouqi et al., 2025). Perbedaan densitas ini mempengaruhi interaksi radiasi, di mana air sebagai medium acuan memiliki kesetaraan jaringan yang baik (IAEA, 2000). Selain itu, perbedaan densitas juga memengaruhi proses penyerapan dan hamburan radiasi, sebagaimana dilaporkan oleh (Chung et al., 2018) bahwa PMMA memiliki stabilitas mekanik yang baik meskipun tidak sepenuhnya setara secara radiologis dengan air. Oleh karena itu, variasi media dalam *phantom* memberikan pemahaman yang lebih komprehensif terhadap pengaruh sifat fisik material terhadap respons radiasi.

Pada uji radiologis, dilakukan pengukuran dosis serap dan dosis ekuivalen pada *phantom* medium air dan *nylon* menggunakan variasi sudut penyinaran $0°, 40°,$ dan $235°$, masing-masing dengan tiga kali pengulangan. Waktu penyinaran dilakukan selama 7,62 menit ditentukan berdasarkan perhitungan menggunakan persamaan (2) di mana untuk mencapai dosis 1 mSv dengan laju dosis TLD *Hp(10)* sebesar 7,871 mSv/jam. Hasil pengukuran dosis pada setiap variasi sudut sudut penyinaran disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3 Dosis Serap dan Dosis Ekuivalen Pada Phantom PMMA Berisi Air

ID TLD	Sudut Penyinaran	Dosis Serap (μGy)	Dosis Ekuivalen (μSv)
2006296	0°	32,59	32,59
2006300	0°	32,86	32,86
2006306	0°	31,13	31,13
2006298	40°	30,85	30,85
2006301	40°	32,18	32,18
2006317	40°	32,81	32,81
2006287	235°	31,61	31,61
2006299	235°	32,36	32,36
2006303	235°	32,64	32,64

Berdasarkan Tabel 3, nilai dosis serap dan dosis ekuivalen pada studi ini sama dikarenakan nilai faktor bobot radiasi (WR) untuk gamma Cs-137 sebesar 1. Pada media air, pada sudut penyinaran 0° dengan rata-rata sebesar 32,19 μGy dosis serap, 32,19 μSv dosis ekuivalen, dan deviasi standar $\pm 0{,}93$.

Pada sudut penyinaran 40° diperoleh rata-rata dosis serap sebesar 31,95 μGy dosis serap, 31,95 μSv dosis ekuivalen, dengan deviasi standar $\pm 1{,}00$. Selanjutnya, pada sudut penyinaran 235°, diperoleh rata-rata dosis sebesar 32,20 μGy dosis serap, 32,20 μSv dosis ekuivalen, dengan deviasi standar $\pm 0{,}53$. Perbedaan standar deviasi menunjukkan bahwa distribusi dosis dipengaruhi oleh arah radiasi, dengan variasi terbesar pada sudut 40°, yang mengindikasikan distribusi radiasi yang kurang homogen dibandingkan dengan sudut lainnya. Sebaliknya, nilai standar deviasi yang relatif kecil terjadi pada sudut 235°, menunjukkan distribusi dosis dalam media air bersifat homogen dan stabil. Hal ini menunjukkan bahwa media air memiliki distribusi dosis yang relatif stabil, sehingga banyak digunakan sebagai acuan dalam dosimetri radiasi karena kesetaraan jaringan yang baik dengan jaringan biologis (IAEA, 2000).

Berdasarkan Tabel 4, Pada sudut penyinaran 0° dengan rata-rata sebesar 33,03 μGy dosis serap, 33,03 μSv dosis ekuivalen, dan deviasi standar $\pm 0{,}72$. Pada sudut penyinaran 40° diperoleh rata-rata dosis serap sebesar 33,19 μGy dosis serap, 3,19 μSv dosis ekuivalen, dengan deviasi standar $\pm 0{,}83$. Selanjutnya pada sudut penyinaran 235° diperoleh rata-rata dosis sebesar 33,45 μGy dosis serap, 33,45 μSv dosis ekuivalen, dengan deviasi standar $\pm 1{,}46$. Perbedaan standar deviasi menunjukkan bahwa distribusi dosis dipengaruhi oleh arah radiasi. Sudut 0° memiliki standar deviasi yang lebih kecil dibandingkan sudut penyinaran lain, sebaliknya pada sudut 235° memiliki sudut dengan variasi terbesar, yang mengindikasikan distribusi dosis yang kurang homogen dibandingkan dengan sudut lainnya. Secara keseluruhan, *phantom* media *nylon* menunjukkan hasil dosimetri yang berbeda, dengan variasi sudut penyinaran yang lebih besar, mengindikasikan tingkat sensitivitas yang lebih tinggi terhadap perubahan arah penyinaran. Hal ini ditunjukkan oleh perubahan nilai dosis yang signifikan pada setiap sudut.

Tabel 4 Dosis Serap dan Dosis Ekuivalen Pada Phantom PMMA Berisi *Nylon*

ID TLD	Sudut Penyinaran	Dosis Serap (μGy)	Dosis Ekuivalen (μSv)
2006296	0°	33,86	33,86
2006300	0°	32,61	32,61
2006306	0°	32,61	32,61
2006298	40°	34,14	34,14
2006301	40°	32,68	32,68
2006317	40°	32,74	32,74
2006287	235°	34,92	34,92
2006299	235°	33,44	33,44
2006303	235°	32,00	32,00

Material PMMA telah secara luas digunakan sebagai alternatif air karena memiliki sifat mekanik yang baik serta karakteristik radiologis yang mendekati jaringan biologis. Namun, ketika dipadukan dengan *nylon*, respons radiologis *phantom* dipengaruhi oleh kedua material tersebut. PMMA tidak sepenuhnya setara dengan air dan dapat menunjukkan deviasi tergantung pada kondisi interaksi radiasi (Vishwakarma et al., 2013). Meskipun demikian, bahan *phantom* padat masih dapat digunakan dalam dosimetri selama deviasi terhadap air berada dalam batas toleransi sekitar ±(1%–3%) (Gargett et al., 2020). Yang sesuai dengan hasil penelitian ini menunjukkan perbedaan dosis relatif kecil.

Tabel 5 Perbandingan Dosis Antar Media

Parameter	Sudut Penyinaran	Air	Nylon
Rata-rata Dosis Serap (μGy)	0°	32,19	33,03
	40°	31,95	33,19
	235°	32,20	33,45
Rata-rata Dosis Ekuivalen (μSv)	0°	32,19	33,03
	40°	31,95	33,19
	235°	32,20	33,45
Standar Deviasi	0°	$\pm 0{,}93$	$\pm 0{,}72$
	40°	± 1.00	$\pm 0{,}83$
	235°	$\pm 0{,}53$	$\pm 0{,}1{,}46$

Berdasarkan Tabel 5, *phantom* yang terbuat dari PMMA dan diisi dengan *nylon* menghasilkan dosis yang sedikit lebih tinggi dibandingkan dengan *phantom* yang berisi air pada semua sudut penyinaran. Pada sudut 0°, rata-rata dosis pada media air sebesar 32,19 µGy untuk dosis serap, 32,19 µSv dosis ekuivalen. Sedangkan pada *nylon* sebesar 33,03 µGy untuk dosis serap, 33,03 µSv dosis ekuivalen dengan selisih 2,61%. Pada sudut 40°, rata-rata dosis pada air sebesar 31,95 µGy untuk dosis serap, 31,95 µSv dosis ekuivalen. Pada *nylon* sebesar 33,19 µGy untuk dosis serap, 33,19 µSv dosis ekuivalen dengan selisih 3,88%. Sementara itu, pada sudut 235°, dosis pada air sebesar 32,20 µGy untuk dosis serap, 32,20 µSv dosis ekuivalen, dan pada *nylon* sebesar 33,45 µGy untuk dosis serap, serta 33,45 µSv dosis ekuivalen dengan selisih 3,88%. Perbedaan dosis pada setiap sudut menunjukkan bahwa respons dosimetri tidak hanya dipengaruhi oleh jenis material, tetapi juga oleh arah datang radiasi. Nilai selisih yang lebih besar pada sudut 40° dan 235° mengindikasikan bahwa variasi geometri penyinaran berkontribusi terhadap peningkatan interaksi radiasi dalam material *nylon*. Kenaikan dosis tersebut disebabkan oleh kepadatan *nylon* yang lebih tinggi daripada air, sehingga meningkatkan kemungkinan interaksi radiasi, khususnya melalui mekanisme hamburan Compton pada energi 662 keV dari Cs-137 (Arib et al., 2006). Interaksi ini menghasilkan elektron sekunder yang berkontribusi pada peningkatan deposisi energi lokal pada material. Hal tersebut menunjukkan bahwa kedua material memiliki respons dosimetri yang memengaruhi peluang interaksi foton dengan elektron pada medium air dan *nylon* (IAEA, 2024).

Seluruh nilai persentase selisih dosis berada dalam kisaran 2,61%-3,88%, persentase dosis tersebut masih dalam batas toleransi dosimetri yang ditetapkan oleh IAEA yaitu 5% sehingga perbedaan yang ada masih dapat diterima (IAEA, 2024). Hal ini menunjukkan bahwa *nylon* memiliki sifat radiologis yang cukup mendekati air. Namun, perbedaan densitas dan struktur atom *nylon* meningkatkan probabilitas interaksi radiasi, terutama hamburan Compton pada energi Cs-137, yang menghasilkan deposisi energi lebih tinggi (Khallouqi et al., 2025). Interaksi radiasi seperti efek Compton dan efek fotolistrik berperan dalam proses penyerapan energi, yang dimana pada efek Compton mendominasi pada energi seperti sumber Cs-137, sedangkan efek fotolistrik berkontribusi pada energi yang lebih rendah (Parks & Cheney, 2015). Di samping itu, struktur material *nylon* yang lebih padat dibandingkan dengan air dapat meningkatkan kemungkinan terjadinya interaksi radiasi, sehingga menghasilkan respons dosimetri yang lebih signifikan. Nilai deviasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan air juga menandakan bahwa homogenitas material padat seperti *nylon* tidak sebaik media cair, tetapi masih dalam batas toleransi untuk percobaan (Khallouqi et al., 2025).

Oleh karena itu, *nylon* dapat digunakan sebagai alternatif dalam pembuatan *phantom*, khususnya pada situasi di mana penggunaan air tidak memungkinkan. Namun, air masih menjadi acuan utama dalam bidang dosimetri sebab memiliki tingkat homogenitas yang lebih baik dan nilai deviasi yang lebih rendah. Hal ini sangat penting untuk menjamin akurasi serta konsistensi dalam pengukuran dosis radiasi.

IV. KESIMPULAN

Analisis uji geometris yang terdiri dari diameter dan densitas menunjukkan bahwa media air dan nylon memiliki karakteristik yang setara. Perbedaan volume media air $1.167{,}14\ \mathrm{cm}^3$ dan *nylon* $1.163{,}62\ \mathrm{cm}^3$ Massa $1.170{,}00 \pm 0{,}00$ g pada media air dan nylon $1.110{,}00 \pm 0{,}00$ g menunjukkan perbedaan, namun masih dalam rentang mendekati. Nilai densitas yang dihasilkan $0{,}919\ \mathrm{g/cm}^3$ media air dan *nylon* $0{,}863\ \mathrm{g/cm}^3$, sehingga masih sesuai. Berdasarkan analisis uji radiologis yang dilakukan, diperoleh rata-rata dosis dalam air mencapai 32,33 µGy dosis serap, 32,33 µSv dosis ekuivalen dan pada media *nylon* sebesar 33,22 µGy dosis serap, 33,22 µSv, dengan perbedaan relatif mencapai 2,75% di mana masih berada di bawah batas ambang IAEA yaitu 5% dan masih bisa diterima. Hasil ini menunjukkan bahwa media *nylon* memberikan respons dosis yang lebih tinggi dibandingkan dengan air.Dengan demikian, model yang berbasis PMMA dengan variasi penggunaan media *nylon* dapat dimanfaatkan sebagai solusi alternatif untuk pengukuran dosimetri, tetap mengacu pada air sebagai standar yang berlaku.

UCAPAN TERIMA KASIH

Tidak ada.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan tidak terdapat konflik kepentingan.

PERNYATAAN PENDANAAN

Penelitian ini tidak memperoleh pendanaan khusus.

PERNYATAAN PENGGUNAAN AI GENERATIF DAN TEKNOLOGI BERBASIS AI

GPT hanya digunakan untuk mengoreksi kesalahan tata bahasa dan tipografi. Penulis bertanggung jawab penuh atas isi dan integritas publikasi.

DAFTAR PUSTAKA

Adhillaksa, S. F., Choirul Anam, Heri Sutanto, Ariij Naufal, Riska Amilia, Ilham Alkian, & Adiwasono M. B. Setiawan. (2024). Fabrication of an In-house Phantom for Evaluation of Metal Artifact Reduction in Computed Tomography. International Journal of Scientific Research in Science and Technology, 11(6), 531–538. https://doi.org/10.32628/IJSRST24114131

Arib, M., Medjadj, T., & Boudouma, Y. (2006). Study of the influence of phantom material and size on the calibration of ionization chambers in terms of absorbed dose to water. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 7(3), 55–64. https://doi.org/10.1120/jacmp.v7i3.2264

Artikah, F. D., Sandi, E., & Oktaviani, V. (2024). DEVELOPMENT OF A 5.8 GHz MICROSTRIP TEXTILE ANTENNA BASED ON CORDURA D1682 LAYER SUBSTRATE. JURNAL PENDIDIKAN VOKASIONAL TEKNIK ELEKTRONIKA (JVoTE), 7(1), 1–9. https://doi.org/10.21009/jvote.v7i1.49212

BAPETEN. (2020). Peraturan Badan Pengawas Tenaga Nuklir No 4 Tahun 2020 Tentang Keselamatan Radiasi pada Penggunaan Pesawat Sinar-X dalam Radiologi Diagnostik dan Intervensional. https://jdih.bapeten.go.id/unggah/dokumen/peraturan/1028-full.pdf

Chung, J. P., Seong, Y. M., Kim, T. Y., Choi, Y., Kim, T. H., Choi, H. J., Min, C. H., Benmakhlouf, H., Chun, K. J., & Chung, H.-T. (2018). Development of a PMMA phantom as a practical alternative for quality control of gamma knife® dosimetry. Radiation Oncology, 13(1), 176. https://doi.org/10.1186/s13014-018-1117-8

Gargett, M. A., Briggs, A. R., & Booth, J. T. (2020). Water equivalence of a solid phantom material for radiation dosimetry applications. Physics and Imaging in Radiation Oncology, 14, 43–47. https://doi.org/10.1016/j.phro.2020.05.003

Hiswara, E. (2020). Dosis Radiasi Pekerja dan Pasien Pada Tindakan Intervensi Di RSUP Dr. M. Djamil, Padang.

IAEA. (2000). Calibration of radiation protection monitoring instruments. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/P074_scr.pdf

IAEA. (2024). Absorbed Dose Determination in External Beam Radiotherapy (Rev. 1). INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. https://doi.org/10.61092/iaea.ve7q-y94k

ISO, I. O. for S. (2019). ISO 4037-2:2019—Radiation protection—X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy—Part 2: Dosimetry for radiation protection over the energy ranges from 8 keV to 1.3 MeV and 4 MeV to 9 MeV. Geneva: ISO. https://cdn.standards.iteh.ai/samples/66873/10c48476b03d4dbe9e287050c6f22bb7/ISO-4037-2-2019.pdf

Khallouqi, A., Sekkat, H., El Rhazouani, O., & Halimi, A. (2025). Radiation properties and dosimetric insights of Nylon CT phantoms: Advanced computational analysis using Phy-X, XCOM, and

GATE/GEANT4. Nuclear Engineering and Technology, 57(12), 103818. https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103818

Kurniawati, A., Badri, C., & Ardiyanto, J. (2015). Desain Phantom Air Untuk Kalibrasi CT Number dan Keseragaman CT Number Pada Pesawat CT Scan. Jurnal Imejing Diagnostik (JImeD), 1(1), 23–29. https://doi.org/10.31983/jimed.v1i1.3145

Nasir, M. (2020). Pengaruh Diameter Phantom Silinder terhadap Dosis Puncak pada Tabung Sinar-X Menggunakan Simulasi Monte Carlo-EGSnrc. 2.

Parks, J. E., & Cheney, C. P. (2015). Compton Scattering of Cs-137 Gamma Rays. 2015 Conference on Laboratory Instruction Beyond the First Year, 76–79. https://doi.org/10.1119/bfy.2015.pr.019

PTW Dosimetry. (2024). ISO Calibration Phantoms. https://www.ptw-usa.com/en/products-metrology/iso-calibration-phantoms/?utm_source=chatgpt.com

PTW Dosimetry. (2025). ISO Calibration Phantoms [Grafis]. https://www.ptwdosimetry.com/en/products-metrology/iso-calibration-phantoms

Sookpeng, S., Cheebsumon, P., Pengpan, T., & Martin, C. (2016). Comparison of computed tomography dose index in polymethyl methacrylate and nylon dosimetry phantoms. Journal of Medical Physics / Association of Medical Physicists of India, 41(1), 45–51. https://doi.org/10.4103/0971-6203.177287

Vishwakarma, R. S., Selvam, T. P., Sahoo, S., Mishra, S., & Chourasiya, G. (2013). Monte Carlo-based investigation of water-equivalence of solid phantoms at 137Cs energy. Journal of Medical Physics / Association of Medical Physicists of India, 38(4), 158–164. https://doi.org/10.4103/0971-6203.121192

Wegner, M., Gargioni, E., & Krause, D. (2023). Classification of phantoms for medical imaging. Procedia CIRP, The 33rd CIRP Design Conference, 119, 1140–1145. https://doi.org/10.1016/j.procir.2023.03.154

Yohannes, I., Prasetio, H., Kallis, K., & Bert, C. (2016). Dosimetric accuracy of the cone-beam CT-based treatment planning of the Vero system: A phantom study. Journal of Applied Clinical Medical Physics, 17(4), 106–113. https://doi.org/10.1120/jacmp.v17i4.6194