



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS  
MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

**Laurynas Gilys**

**FOTONUS SLOPINANČIO SKYSTOS FAZĖS UŽPILDO  
KOLIMATORIAUS KONSTRUKCIJAI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas

**Vadovė**  
Prof. dr. Diana Adlienė

**KAUNAS, 2017**

**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**  
**MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS**

**FOTONUS SLOPINANČIO SKYSTOS FAZĖS UŽPILDO  
KOLIMATORIAUS KONSTRUKCIJAI TYRIMAS**

Baigiamasis magistro projektas  
**Medicinos fizika (621B92002)**

**Vadovė**

(parašas) Prof. dr. Diana Adlienė

(data)

**Konsultantas**

(parašas) Doc. dr. Egidijus Griškonis

(data)

**Recenzentas**

(parašas) Prof. dr. Liutauras Marcinauskas

(data)

**Projektą atliko**

(parašas) Laurynas Gilys

(data)

**KAUNAS, 2017**



**KAUNO TECHNOLOGIJOS UNIVERSITETAS**

MATEMATIKOS IR GAMTOS MOKSLŲ FAKULTETAS

(Fakultetas)

**LAURYNAS GILYS**

(Studento vardas, pavardė)

MEDICINOS FIZIKA (621B92002)

(Studijų programos pavadinimas, kodas)

„Fotonus slopinančio skystos fazės užpildo kolimatoriaus konstrukcijai tyrimas“

**AKADEMINIO SAŽINGUMO DEKLARACIJA**

20 \_\_\_\_ . \_\_\_\_\_ . \_\_\_\_ .  
Kaunas

Patvirtinu, kad mano, **Lauryno Gilio**, baigiamasis projektas tema „Fotonus slopinančio skystos fazės užpildo kolimatoriaus konstrukcijai tyrimas“ yra parašytas visiškai savarankiškai ir visi pateikti duomenys ar tyrimų rezultatai yra teisingi ir gauti sąžiningai. Šiame darbe nei viena dalis nėra plagijuota nuo jokių spausdintinių ar internetinių šaltinių, visos kitų šaltinių tiesioginės ir netiesioginės citatos nurodytos literatūros nuorodose. Įstatymų nenumatytų piniginių sumų už šį darbą niekam nesu mokėjęs.

Aš suprantu, kad išaiškėjus nesąžiningumo faktui, man bus taikomos nuobaudos, remiantis Kauno technologijos universitete galiojančia tvarka.

\_\_\_\_\_  
(vardą ir pavardę įrašyti ranka)

\_\_\_\_\_  
(parašas)

## TURINYS

SANTRAUKA.....	5
SUMMARY.....	6
SANTRUMPOS .....	7
IŽANGA.....	8
1. LITERATŪROS APŽVALGA .....	9
2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI.....	19
2.1 Užpildo medžiaga .....	19
2.1.1 Silicio volframo rūgštis.....	19
2.2 Keggin'o struktūros heteropolirūgšys ir jų dariniai. ....	19
2.3 Švino ekvivalento nustatymas .....	22
2.4 Rentgeno terapijos įrenginys .....	24
2.4.1 Kolimatoriaus konstrukcijos apšvita.....	24
2.5 Radiacinei spinduliuotei jautri plėvelė .....	25
2.6 GafChromic filmų analizė naudojant ImageJ programą.....	26
2.7 Eksperimentinės kolimatoriaus maketo konstrukcijos .....	26
2.8 Kolimatoriaus maketo užpildas .....	28
3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS .....	29
3.1 Kolimatoriaus užpildo rentgeno absorbcinės savybės.....	29
3.2 Radiacinei spinduliuotei jautrios plėvelės kalibravimas.....	30
3.3 Kolimatoriaus maketo charakterizavimas.....	32
3.4 Konstrukcijos skiriamoji geba .....	37
IŠVADOS .....	39
PADĖKA .....	40
LITERATŪROS SĄRAŠAS .....	41

Gilys, Laurynas. Fotonus slopinančio skystos fazės užpildo kolimatoriaus konstrukcijai tyrimas. *Magistro* baigiamasis projektas / vadovė prof. dr. Diana Adlienė; Kauno technologijos universitetas, Matematikos ir gamtos mokslų fakultetas.

Mokslų kryptis ir sritis: biomedicinos mokslai, medicina ir sveikata.

Reikšminiai žodžiai: kolimatorius, skystos fazės medžiaga, silicio volframo rūgštis, švino ekvivalentas, rentgeno absorbcinė medžiaga.

Kaunas, 2017. 42 p.

## **SANTRAUKA**

Kolimatorius yra vienas pagrindinių gama kameros komponentų. Nuo jo priklauso gaunamų vaizdų kokybė. Kolimatoriai dažniausiai gaminami iš švino. Kitos medžiagos, tokios kaip volframas, tantalas ar auksas, dėl savo kainos riboja komercinę kolimatorių gamybą. Remiantis Europos komisijos direktyva, rekomenduojama atsisakyti švino ir jo junginių naudojimo elektronikos prietaisuose, tame tarpe ir medicininiuose, dėl didelio švino toksiškumo. Todėl naujų alternatyvių medžiagų, kurios pakeistų šviną bei pasižymėtų geromis rentgeno absorbcinėmis savybėmis, paieška tampa vis aktualesnė ir labai svarbi. Šiame darbe pristatoma nauja, skystos fazės medžiaga pasižyminti geromis rentgeno absorbcinėmis savybėmis, kuri galėtų būti panaudota, kaip užpildas naujo tipo kolimatoriaus konstrukcijai.

Buvo pagaminti skirtingos koncentracijos (15 %, 30 %, 45 %, 60 %, 79,69 % (sotus tirpalas)) silicio volframo rūgšties tirpalai, ištirtos jų rentgeno absorbcinės savybės, apskaičiuoti jų švino ekvivalentai, kurie buvo 0,164 mmPb, 0,185 mmPb, 0,251 mmPb, 0,362 mmPb, 0,576 mmPb, atitinkamai. Pasirinktas 45 % koncentracijos tirpalas kaip užpildas konstrukcijoms. Pagamintos dvi eksperimentinės konstrukcijos: vieno vamzdelio ir skirtingo skersmens vamzdelių rinkinio. Naudojantis rentgeno terapijos įrenginiu, konstrukcijos buvo apšvitintos 1 Gy doze. Dozės pasiskirstymo vaizdinimui buvo naudojamas savaryškis GafChromic tipo filmas (plėvelė). Ištyrus dozių pasiskirstymą, gautą fotonams perėjus per kolimatoriaus konstrukciją, nustatyta, jog esant mažesniai vamzdelių skersmeniui praėjusios spinduliuotės intensyvumas beveik nekinta. Nustatyta, kad po konstrukcija, užpildyta rentgeno absorbcine medžiaga, dozės vidutinė vertė siekia 0,03 Gy. Taip pat apskaičiuota skiriamoji geba naudojant skirtingo skersmens kolimatoriaus vamzdelius. Ji kito nuo 5,93 cm iki 1,78 cm, kintant vamzdelio skersmeniui nuo 5,0 mm iki 1,5 mm atitinkamai.

Gilys, Laurynas. *Investigation of Liquid Phase Photon Attenuating Filler for Collimator Construction: Master's thesis in Medical physics / supervisor prof. Diana Adlienė. The Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Kaunas University of Technology.*

Research area and field: biomedicine science, medicine and health

Key words: collimator, liquid phase material, silicotungstic acid, lead equivalent, x-ray absorption material.

Kaunas, 2017. 42 p.

## **SUMMARY**

Collimator is a major component of the gamma camera. The quality of obtained images depends on collimator. The most common material for collimators is lead. Due to the high price, commercial application of other materials, like tungsten, tantalum or gold is limited. Following the recommendations of the European Commission directive 2011/65/EU, application of toxic lead in electronic devices including medical devices was limited. Due to this there is a need to find new alternative materials that are characterized by good X-ray absorption characteristics and may replace toxic lead. In this work, we present a new liquid phase material which has good X-ray absorption properties and could be used as a filler for a new type of collimator construction. Five different concentrations of silicotungstic acid solution (15 %, 30 %, 45 %, 60 %, 79.69% (a saturated solution)) have been produced to investigate their x-ray absorption properties. Calculated lead equivalent was 0.164 mmPb, 0.185 mmPb, 0.251 mmPb, 0.362 mmPb, 0.576 mmPb, respectively. It was found that the most suitable solution for the collimator filler was 45 % concentrated silicotungstic acid. Two different experimental collimator constructions have been produced: one with integrated single tube and another one with different diameter tubes. Constructions were irradiated to 1 Gy in X-ray therapy unit. Dose distribution under collimator construction was recorded in GafChromic film. It was found that the reduction of the tube diameter causes decrease of dose. The average dose under collimator was 0.03 Gy. Spatial resolution of tubes having different diameters was also calculated and it was found that they varied from 5.93 cm to 1.78 cm.

## **SANTRUMPOS**

EK – Europos Komisija

FOV – matymo laukas

FWHR – pusaukščio plotis

HPR – heteropolirūgštis

HVL – pusinės sugerties sluoksnis

LEHR – mažos energijos didelės skiriamosios gebos

MK – Monte Karlo

MP – daugiaskylis

PMMA – Polimetilmetakrilatas

SEM – skenuojanti elektroninė mikroskopija

SPECT – vieno fotono emisijos kompiuterinė tomografija

SVR – silicio volframo rūgštis

TEM – elektroninė peršvietimo mikroskopija

## IŽANGA

Branduolinėje medicinoje yra naudojamos kelios diagnostinės procedūros. Viena iš tokių yra vieno fotono emisijos kompiuterinė tomografija (*SPECT, angl. Single Photon Emission Computed Tomography*). Tai radionuklidinis tyrimas naudojantis gama spindulius, norint gauti tiriamo objekto dvimatį (arba trimatį) atvaizdą. Atvaizdams gauti SPECT naudojamos gama kameros. Vienas iš pagrindinių šių kamerų elementų yra kolimatorius, kurio paskirtis yra suformuoti lygiagretų fotonų pluoštelį, eliminuojant sklaidos fotonus. Nuo kolimatoriaus efektyvumo priklauso gaunamų medicininių vaizdų kokybė. Dažniausiai gaminant kolimatorius naudojama švino folija iš kurios lankstoma bičių korį primenanti struktūra. Naudojamuose standartiniuose mažos energijos didelės skiriamosios gebos kolimatoriuose korio „akučių“ skersmuo yra 1,40 mm, kolimatoriaus aukštis 32,80 mm, pertvaros storis 0,16 mm. Švinas naudojamas dėl savo sąlyginai gerų rentgeno apsauginių savybių, kainos, gamybos paprastumo, tačiau remiantis Europos komisijos direktyva (EK Direktyva 2011/65/EU) jis pripažintas kaip toksiška medžiaga ir imta mažinti jo naudojimą įvairių prietaisų, tame tarpe ir medicininių, konstrukcijose. Kitos alternatyvios medžiagos galinčios pakeisti šviną, tokios kaip volframas, auksas, tantalas yra brangios ir gamybos kaštai limituoja komercinę gamybą, dėl to yra ieškoma kitų alternatyvių medžiagų, kurios pasižymėtų geromis rentgeno absorbcinėmis savybėmis. Dažnai siūlomos alternatyvios medžiagos savo sudėtyje turi švino arba susideda iš sudėtingų junginių, tačiau jos visada yra kietos būsenos.

Šio darbo tikslas buvo sukurti ir charakterizuoti naujo tipo kolimatoriaus konstrukciją, užpildytą skystos fazės rentgeno absorbcine medžiaga

Šiam tikslui įgyvendinti buvo keliami tokie uždaviniai:

1. Pagaminti eksperimentinius kolimatoriaus konstrukcijos užpildus silicio volframo rūgšties pagrindu ir charakterizuoti jų rentgeno absorbcines savybes.
2. Pagaminti naujo tipo kolimatoriaus konstrukcijas.
3. Ištirti dozių pasiskirstymus, gautus fotonams perėjus naujo tipo kolimatoriaus konstrukcijas.
4. Nustatyti kolimatoriaus skiriamosios gebos priklausomybę nuo konstrukcijoje naudojamo vamzdelio skersmens.

Kolimatoriaus konstrukcijų apšvita bei švino ekvivalento matavimai buvo atlikti Lietuvos sveikatos mokslų universiteto ligoninės Kauno klinikos filiale Onkologijos ligoninėje.



## 1. LITERATŪROS APŽVALGA

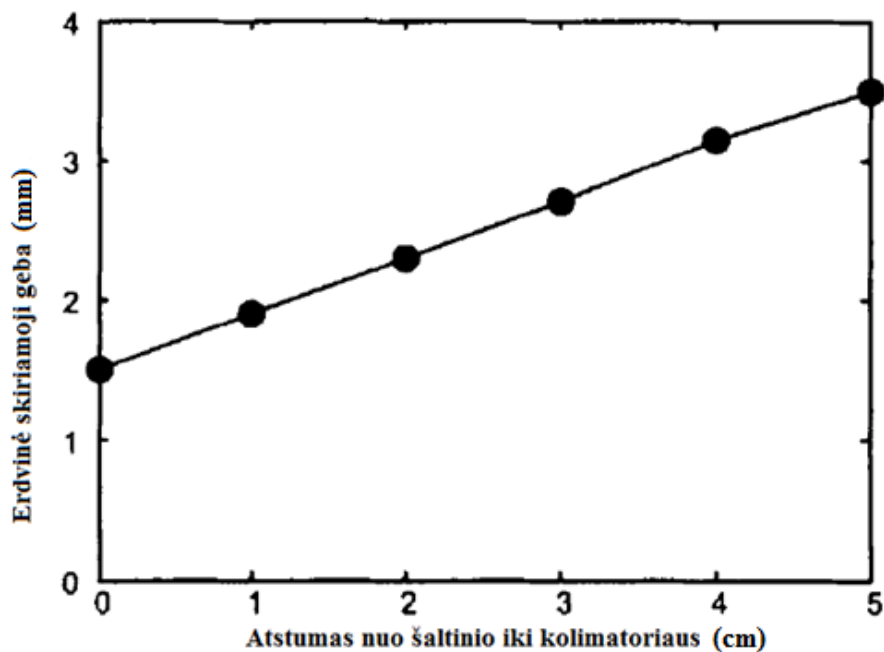
Kaip lęšiai vaizdo kameroms, taip kolimatorius turi svarbią reikšmę gaunant vaizdus. Jis apibrėžia stebėjimo vaizdą ir turi didžiulę įtaką erdviniai skiriamajai gebai, jautrumui ir visos vaizdinimo sistemos iškraipymams. Kadangi sistemos erdvinė skiriamoji geba priklauso nuo kolimatoriaus ir detektoriaus skiriamosios gebos komponentų, kolimatoriaus įtaka erdvinei skiriamajai gebai turi būti sumažinta.

Lygiagrečių vamzdelių ir vienos skylės kolimatoriai dažniausiai naudojami kompaktiškose gama kamerose. Lygiagrečių vamzdelių kolimatoriaus erdvinė skiriamoji geba apskaičiuojama:

$$R_C = \frac{d(l+b)}{l}; \quad (1)$$

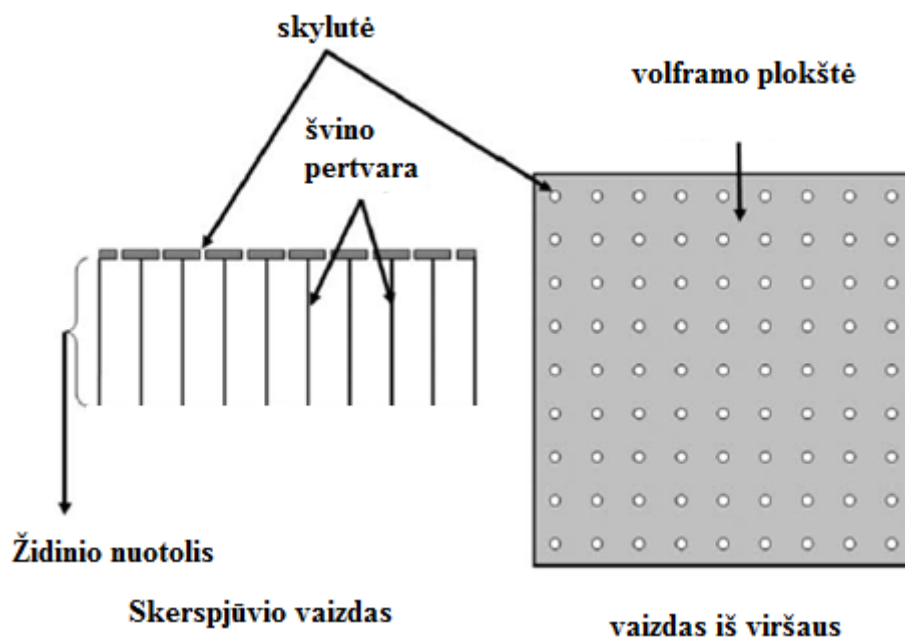
čia  $R_C$  – kolimatoriaus erdvinė skiriamoji geba,  $d$  – kolimatoriaus skylės skersmuo,  $l$  – kolimatoriaus skylės ilgis (kolimatoriaus aukštis),  $b$  – atstumas nuo šaltinio iki išorinio kolimatoriaus paviršiaus.

Priartinus gama kamerą su lygiagrečių vamzdelių kolimatoriumi prie objekto, ji kitaip nei vienos skylės kolimatoriaus atveju atvaizduoja nepakeistus vaizdus. Tai pagerina jautrumą ir vaizdų signalo ir triukšmo santykį, neprarandant skiriamosios gebos. Erdvinę skiriamąją gebą galima pagerinti mažinant vamzdelių skersmenį. Zhu Jie ir kt<sup>1</sup>, gama kamera buvo sukurta dirbti labai mažu atstumu arba esant fiziniam kontaktui su organu. Toks gama kameros naudojimas sumažina atstumą  $b$  ir padidina kolimatoriaus skiriamąją gebą, kuri savo ruožtu pagerina visos sistemos skiriamąją gebą. Naudojantis Monte Karlo (MK) simuliacija buvo studijuojamos kolimatoriaus savybės. Remiantis MK simuliacija, lygiagrečių vamzdelių kolimatorius buvo pritaikytas vaizdų gavimui naudojant <sup>99m</sup>Tc su NaI(Tl) kristalo matricą. Kolimatoriaus, pagaminto iš gryno švino, skylių skersmuo buvo 1,5 mm, ilgis – 40,0 mm, pertvarų storis tarp skylių 0,2 mm. 1.1 pav. pateikta optimizuoto lygiagrečių vamzdelių kolimatoriaus erdvinės skiriamosios gebos priklausomybė nuo atstumo tarp šaltinio iki kolimatoriaus.



1.1 pav. Optimizuoto lygiagrečių vamzdelių kolimatoriaus erdvinės skiriamosios gebos priklausomybė nuo šaltinio iki kolimatoriaus atstumo<sup>1</sup>

Byung Jun Min ir kt.<sup>2</sup> pateikia kitokį mažos energijos didelės skiriamosios gebos (*LEHR*, ang. *Low energy high resolution*) daugiaskylio (*MP*, angl. *multipinhole*) kolimatoriaus modelį (1.2 pav.). Šiame paveiksle parodytas kolimatoriaus skerspjūvis ir vaizdas iš viršaus. Detektorius po kolimatoriumi sukonstruotas taip, jog turėtų 10 x 10 cm<sup>2</sup> aktyvų plotą.



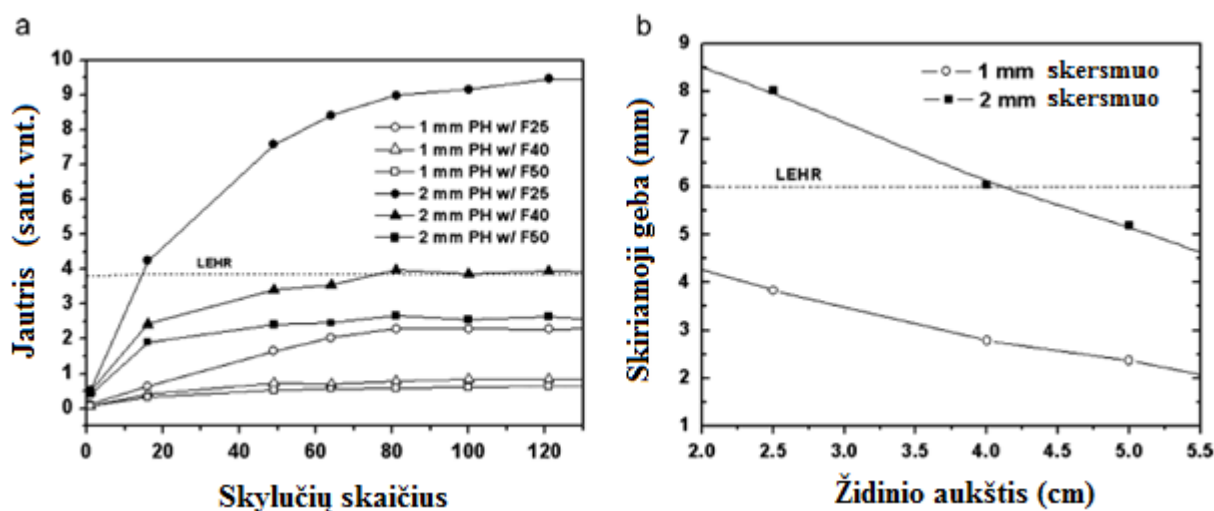
1.2 pav. Daugiaskylio kolimatoriaus su detektoriumi skerspjūvis bei vaizdas iš viršaus. MP kolimatorius su švino pertvaromis ir volframo plokštė su 9 x 9 skylučių masyvu<sup>2</sup>

Statmenos švino pertvaros buvo naudojamos sudaryti nepersiklojančias projekcijas per skirtingas skylutes pagerinti rekonstruoto vaizdo kokybę. Spinduliuotės kritimo kampas buvo kontroliuojamas naudojantis švino pertvaromis ir židinio nuotoliu (atstumas nuo scintiliatoriaus

iki skylutės). Skylutės orientuotos statmenai volframo plokštei, o gama spinduliai registruojami plačiame kampų intervale. Tačiau, MP kolimatorius, kuriame didinimas yra  $<1$ , leidžia aprėpti didelį matymo lauką (*FOV*, angl. *Field of view*), lyginant su LEHR kolimatoriais, naudojančiais tokio pat dydžio detektorius.

MP kolimatoriaus skylių skaičius, skersmuo ir židinio nuotolis buvo parinkti taip, kad sistemos skiriamoji geba ir jautrumas galėtų būti palyginti su standartiniais LEHR kolimatoriais (skylės skersmuo 1,40 mm, pertvaros storis 0,16 mm, vamzdelio ilgis 32,80 mm). Skylių skaičius 3 mm storio volframo plokštėje svyravo nuo 1 iki 121. Skylių skersmuo ir židinio nuotolis kito nuo 1,0 iki 2,0 mm ir nuo 25 iki 50 mm, atitinkamai. Taškinis ir sferinis 10 cm skersmens šaltiniai užpildyti  $^{99m}\text{Tc}$ , patalpinti 10 cm atstumu nuo kolimatoriaus, buvo naudojami skiriamajai gebai ir jautrumui vertinti. Bandymai buvo atlikti naudojant 100  $\mu\text{Ci}$   $^{99m}\text{Tc}$  aktyvumo šaltinį 10 minučių.

1.3 pav. pateikiama apskaičiuota jautrio (a) ir erdvinės skiriamosios gebos (b) priklausomybė nuo skylių skaičiaus ir židinio nuotolio, atitinkamai.



1.3 pav. Apskaičiuota jautrio (a) ir erdvinės skiriamosios gebos (b) priklausomybė nuo skylių skaičiaus ir židinio nuotolio, atitinkamai<sup>2</sup>

Kaip matyti iš grafiko, didinant skylių skaičių, jautris didėja ir stabilizuojasi, kai skylių skaičius tampa  $> 40-80$  skylių, priklausomai nuo skylių skersmens ir židinio nuotolio. 81 skylutė buvo pasirinkta siekiant pasiekti didesnę jautrį įvairių skylių skersmenims ir esant įvairiems židinio nuotoliams (1.3 pav. a). 2,0 mm skersmens skylutės su 25,0 mm židinio nuotoliu parodė didelį jautrį, tačiau skiriamoji geba buvo mažesnė nei LEHR kolimatoriaus. Buvo nustatyta, kad LEHR kolimatoriaus jautris ir sistemos skiriamoji geba, esant 10,0 cm atstumui yra 3,8 sant. vnt. ir 5,9 mm FWHM, atitinkamai. 1,0 mm skersmens skylutės parodė geriausią erdvinę skiriamąją gebą, tačiau jautris buvo prastesnis negu LEHR kolimatoriaus. Nustatyta, kad MP kolimatorius pasiekia tokį patį jautrį ir skiriamąją gebą, kaip LEHR

kolimatorius, esant 9 x 9 skilučių masyvui su 2 mm skylučių skersmeniu ir 40,0 mm židinio nuotoliu. Esant 10 cm atstumui, kolimatoriaus jautris buvo 3,9 sant. vnt., o skiriamoji geba – 6,0 mm FWHM.

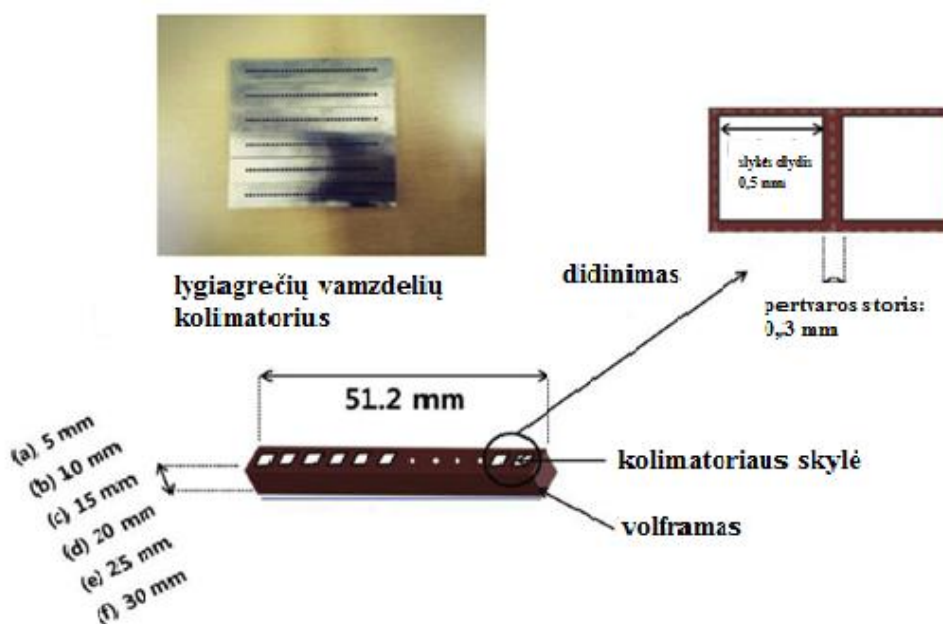
Seungwan Lee ir kt.<sup>3</sup>, pristatė lengvai kontroliuojamą, ypač didelės skiriamosios gebos, volframo lygiagrečių vamzdelių kolimatorių, naudojamą kartu su taškine gama kameros sistema. Iš visų kolimatorių, lygiagrečių vamzdelių kolimatorius yra naudojamas plačiausiai, dėl savo tinkamų sistemos charakteristikų. Visiems lygiagrečių vamzdelių kolimatoriams, erdvinė skiriamoji geba yra geriausia prie pat kolimatoriaus paviršiaus ir tiesiškai mažėja didinant atstumą tarp šaltinio ir kolimatoriaus. Taip pat, lygiagrečių vamzdelių kolimatorių efektyvumas yra beveik pastovus, nepriklausomai nuo atstumo tarp šaltinio ir kolimatoriaus. Lygiagrečių vamzdelių kolimatoriaus skiriamoji geba apskaičiuojama pagal (1) formulę paminėtą anksčiau, o efektyvumas apskaičiuojamas:

$$\varepsilon = K^2 \left(\frac{d}{l}\right)^2 \frac{d^2}{(d+t)^2}; \quad (2)$$

čia K yra konstanta (priklausanti nuo skylės formos (~0,24 apvalioms skylėms išdėstytoms šešiakampiais masyvais, ~0,26 šešiakampėms skylėms išdėstytoms šešiakampiais masyvais, ~0,28 keturkampėms skylėms išdėstytoms keturkampiais masyvais)), d – skylės skersmuo, t – pertvaros storis, l – kolimatoriaus aukštis.

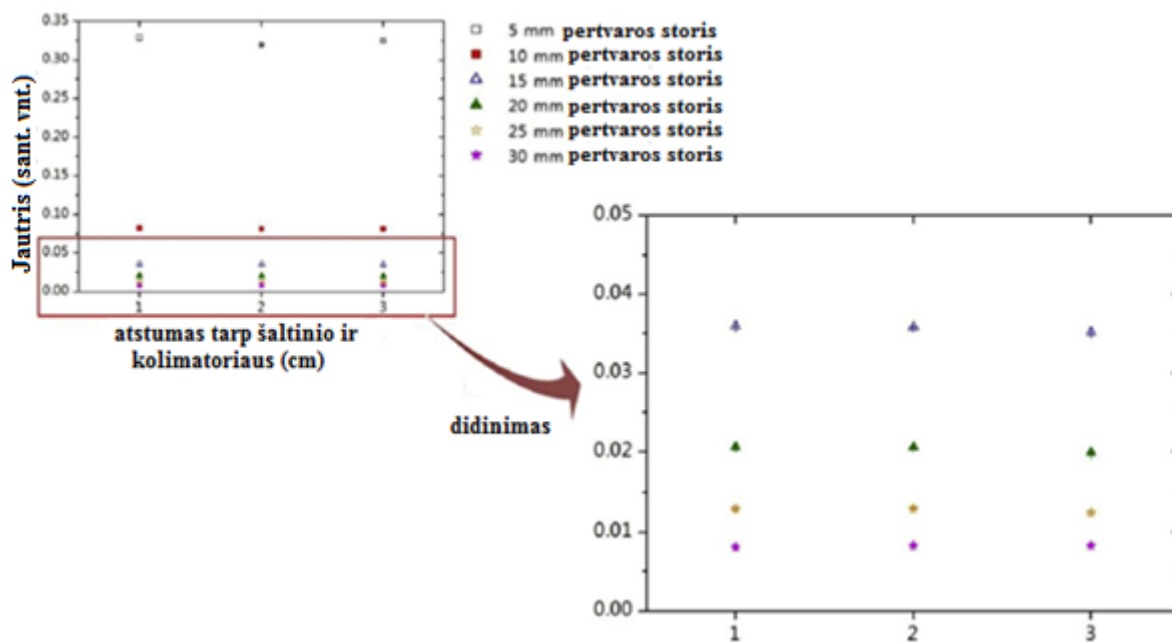
Šiame tyrime buvo naudota 6 volframo plokštelės (po 5 mm), kurių kiekvienoje buvo 1 x 64 kvadratinių skylių, tarp kurių pertvaros storis 0,3 mm. Dedant vieną plokštelę ant kitos, buvo gaunamas skirtingo aukščio kolimatorius, taip gaunant skirtingą jautrį ir erdvinę skiriamąją gebą.

1.4 pav. pavaizduota 6 kolimatoriaus sluoksniai.



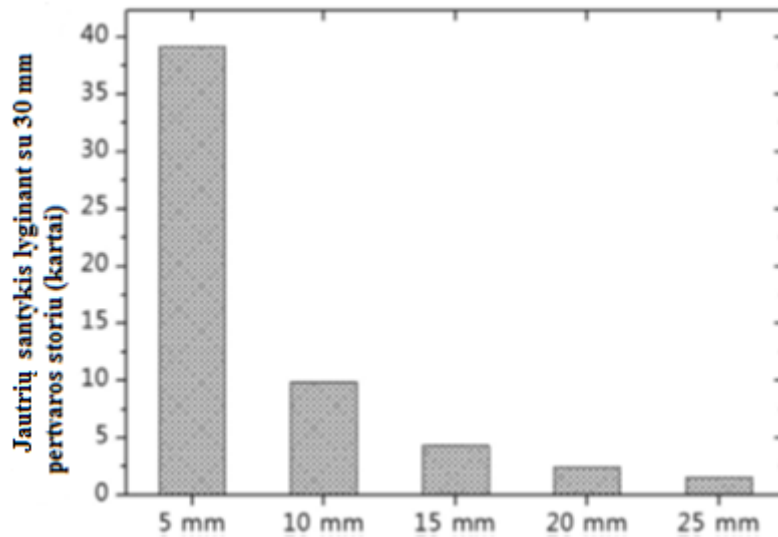
1.4 pav. Lygiagrečių vamzdelių kolimatoriaus sluoksniai bei matmenys<sup>3</sup>

Norint įvertinti kolimatorių, buvo nustatytas jo jautris ir skiriamoji geba. Tiek jautris, tiek erdvinė skiriamoji geba buvo išmatuoti kolimatorių švitinimui naudojant  $^{57}\text{Co}$  taškinį šaltinį. Buvo atlikti 6 bandymai su kolimatoriumi, uždėtu ant detektoriaus paviršiaus, naudojant vieną (5 mm storis) kolimatoriaus sluoksnį, du, tris.. šešis sluoksnius (30 mm storis). Atstumas nuo šaltinio iki kolimatoriaus buvo 1, 2, ir 3 cm. Išmatuotas jautris pateikiamas santykiniais vienetais. Erdvinė skiriamoji geba pateikiama pusaukščio pločiu (FWHM).

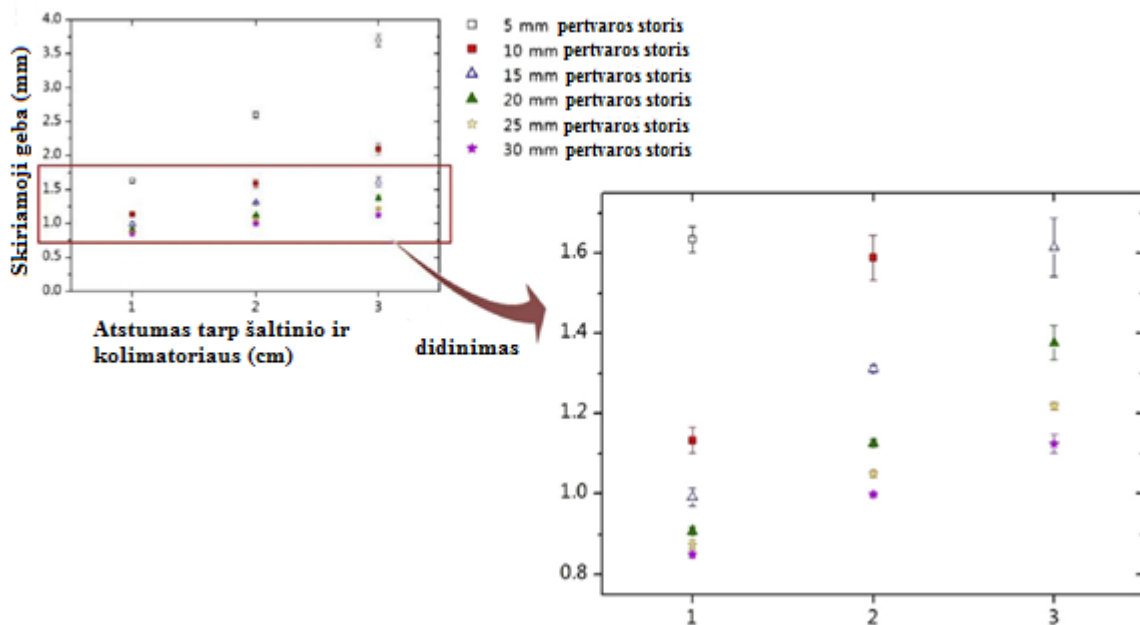


**1.5 pav.** Kolimatorių jautrio priklausomybė nuo kolimatoriaus aukščio ir atstumo tarp kolimatoriaus ir šaltinio<sup>3</sup>

Išmatuotos kolimatorių vidutinio jautrio priklausomybės nuo kolimatorių aukščio ir atstumo tarp kolimatoriaus ir šaltinio pateikiama 1.5 pav. Remiantis pateikiamais duomenimis, jautris didėja, mažinant kolimatoriaus aukštį. Vidutinis jautris naudojant 5, 10, 15, 20 ir 25 mm kolimatorius buvo 39,16, 9,83, 4,31, 2,46 ir 1,55 karto didesnis nei jautris gautas naudojant 30 mm kolimatorių, atitinkamai(1.6 pav.).



1.6 pav. Jautrių santykis lyginant 30 mm aukščio kolimatorių su kitais skirtingo aukščio kolimatoriais<sup>3</sup>



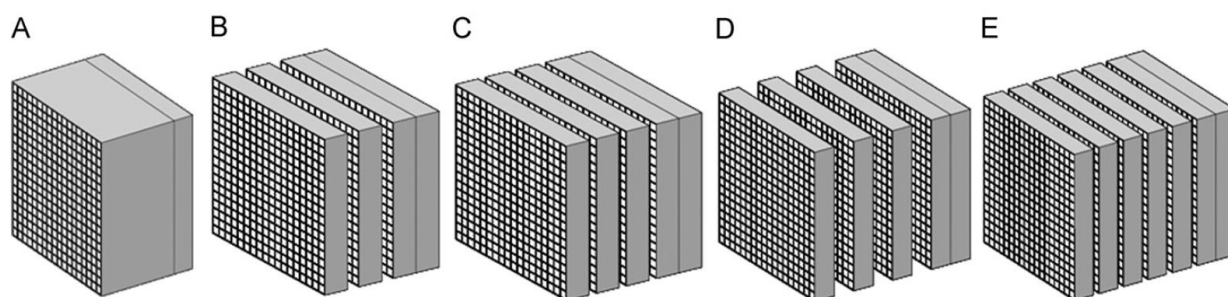
1.7 pav. Kolimatorių su skirtinga geometrija erdvinės skiriamosios gebos priklausomybė nuo atstumo nuo šaltinio iki kolimatoriaus<sup>3</sup>

Jautris ir erdvinė skiriamoji geba išlieka pagrindiniai aspektai kuriant kolimatorių geometriją. Dėl šių priežasčių, buvo sukurti labai aukštos skiriamosios gebos reguliuojami (1-6 sluoksniai), lygiagrečių vamzdelių kolimatoriai. Gama kameros sistema gali pasiekti geresnį jautrį naudojant mažesnį kolimatoriaus aukštį (1.7 pav.). Su šiuo kolimatoriumi pasiektas didesnis jautris ypač svarbus įvairiems branduolinės medicinos vaizdinimo metodams, tačiau geresnė erdvinė skiriamoji geba pasiekama padidinus kolimatoriaus aukštį. Visi gauti rezultatai pateikiami 1.1 lentelėje.

**1.1 lentelė.** Kolimatoriaus efektyvumo ir erdvinės skiriamosios gebos teoriniai ir eksperimentiniai rezultatai

Aukštis (mm)	Atstumas nuo šaltinio iki kolimatoriaus (cm)	Kolimatoriaus efektyvumas(praėjęs pro kolimatorių intensyvumas/pradinis spinduliuotės intensyvumas)		Erdvinė skiriamoji geba (mm, FWHM)	
		Teorinis	Eksperimentinis	Teorinis	Eksperimentinis
5	1	0,003906	0,003835	1,581	1,634
	2			2,550	2,602
	3			3,536	3,701
10	1	0,000977	0,000957	1,118	1,133
	2			1,581	1,589
	3			2,062	2,099
15	1	0,000434	0,000420	0,972	0,992
	2			1,269	1,312
	3			1,581	1,615
20	1	0,000244	0,000240	0,901	0,908
	2			1,118	1,126
	3			1,346	1,377
25	1	0,000156	0,000151	0,860	0,875
	2			1,030	1,050
	3			1,208	1,218
30	1	0,000109	0,000095	0,833	0,850
	2			0,972	0,998
	3			1,118	1,124

G. Trinci ir kt. <sup>4</sup> sukūrė ir užpatentavo kolimatorių sistemą, kuri atliekant vaizdinimą išlaiko pastovią erdvinę skiriamąją gebą nepriklausomai nuo šaltinio-detektoriaus atstumo. Naujoje sistemoje standartinis 24 mm aukščio, kvadratinių skylių volframo kolimatorius, buvo pakeistas nauju reguliuojamo aukščio kolimatoriumi. Aukštis keičiamas naudojant atskirus 6 mm kolimatoriaus blokus, kurie taip pat turi kvadratinės skylės bei privalo būti sulygiuoti vienas su kitu. Bendras naujo kolimatoriaus aukštis priklauso ne tik nuo blokų aukščio, bet ir nuo jų skaičiaus ir atstumų tarp jų. Autorius savo darbe išnagrinėjo penkias skirtingas konstrukcijas (1.8 pav.), naudodamas skirtingą 6 mm aukščio blokų skaičių bei skirtingus atstumus tarp jų. Tyrimai atlikti kolimatoriaus apšvitai naudojant <sup>57</sup>Co taškinį šaltinį 5 mm atstumu nuo kolimatoriaus.



**1.8 pav.** Penkios skirtingos kolimatorių sistemos: A) 3 blokai (6 mm aukščio) su 3 mm tarpais. Visas kolimatoriaus aukštis: 24 mm; B) 4 blokai (6 mm aukščio) su 2 mm tarpais. Visas kolimatoriaus aukštis: 30 mm; C) 4 blokai (6 mm aukščio) su 4 mm tarpais. Visas kolimatoriaus aukštis: 36 mm; D) 4 blokai (6 mm aukščio) su 6 mm tarpais. Visas kolimatoriaus aukštis: 42 mm; E) 6 blokai (6 mm aukščio) su 2 mm tarpais. Visas kolimatoriaus aukštis: 46 mm<sup>4</sup>

1.2, 1.3 ir 1.4 lentelėje pateikiami erdvinės skiriamosios gebos teoriniai, praktiniai bei Monte Karlo modeliavimo rezultatai<sup>4</sup>.

**1.2 lentelė.** Erdvinės skiriamosios gebos teorinės vertės  $R_c$  apskaičiuotos įvairiems kolimatorių aukščiams

Kolimatoriaus aukštis (mm)	$R_c$ (mm)
24	2,60
30	2,57
36	2,52
42	2,49
46	2,46

**1.3 lentelė.** Skirtingos konfigūracijos kolimatorių ir tokio pat aukščio vientisų kolimatorių erdvinės skiriamosios gebos išmatuotųjų verčių palyginimas

Vientiso kolimatoriaus aukštis(mm)	FWHM(mm)	Skirtingos konfigūracijos kolimatorių bendras aukštis (mm) (1.8 pav.)	FWHM(mm)
24	2,60	24 <sup>A</sup>	3,11
30	2,57	30 <sup>B</sup>	2,67
36	2,55	36 <sup>C</sup>	2,80
42	2,55	42 <sup>D</sup>	3,01
46	2,55	46 <sup>E</sup>	2,11

**1.4 lentelė.** Skirtingos konfigūracijos kolimatorių ir tokio pat aukščio vientisų kolimatorių erdvinės skiriamosios gebos vertės gautos naudojant Monte Karlo metodą

Vientiso kolimatoriaus aukštis(mm)	FWHM(mm)	Skirtingos konfigūracijos kolimatorių bendras aukštis (mm)	FWHM(mm)
24	2,55	24 <sup>A</sup>	2,91
30	2,55	30 <sup>B</sup>	2,55
36	2,52	36 <sup>C</sup>	2,79
42	2,50	42 <sup>D</sup>	2,94
46	2,47	46 <sup>E</sup>	2,50

Kaip matyti iš rezultatų, 24 mm ir 42 mm aukščio sistemų erdvinė skiriamoji geba buvo apytiksliai perpus mažesnė, nei vientisų kolimatorių. 30 mm ir 36 mm aukščio sistemos išlaikė geras erdvinės skiriamosios gebos vertes, o 46 mm aukščio sistemos skiriamoji geba buvo tokia pati kaip ir 46 mm aukščio vientiso kolimatoriaus.

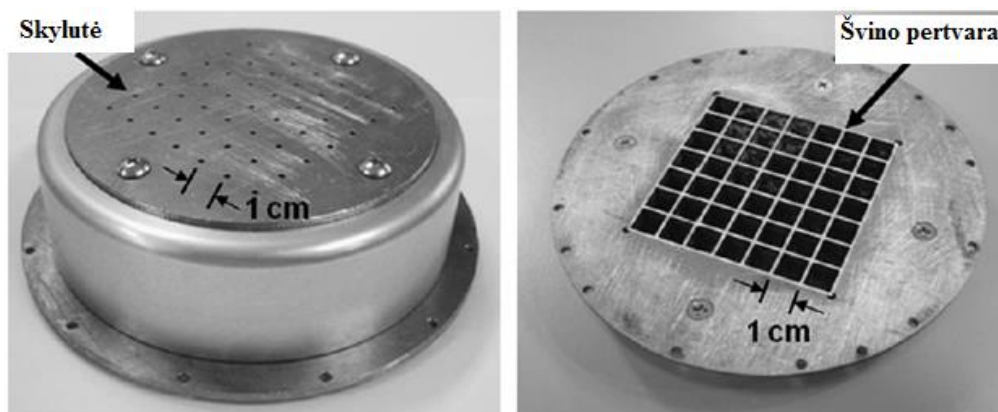
24 mm konstrukcija, kurios aukštis yra mažiausiais iš bandinių, bei 42 mm konstrukcija, kurios atstumas tarp blokų yra didžiausiais, parodė, kad bendras aukštis bei tarpai tarp plokštelių yra svarbūs kolimatoriaus parametrai.

Iš 1.4 lentelės, kurioje pateikiami rezultatai gauti modeliuojant Monte Karlo metodu, matyti, jog naujos technologijos kintamo aukščio kolimatorių erdvinė skiriamoji geba nedaug skiriasi nuo teorinių, jei atstumai tarp kolimatoriaus blokų yra maži. Tai parodo, jog erdvinės skiriamosios gebos vertės ir bendras kolimatoriaus aukštis gali būti susieti teorine formule. 24



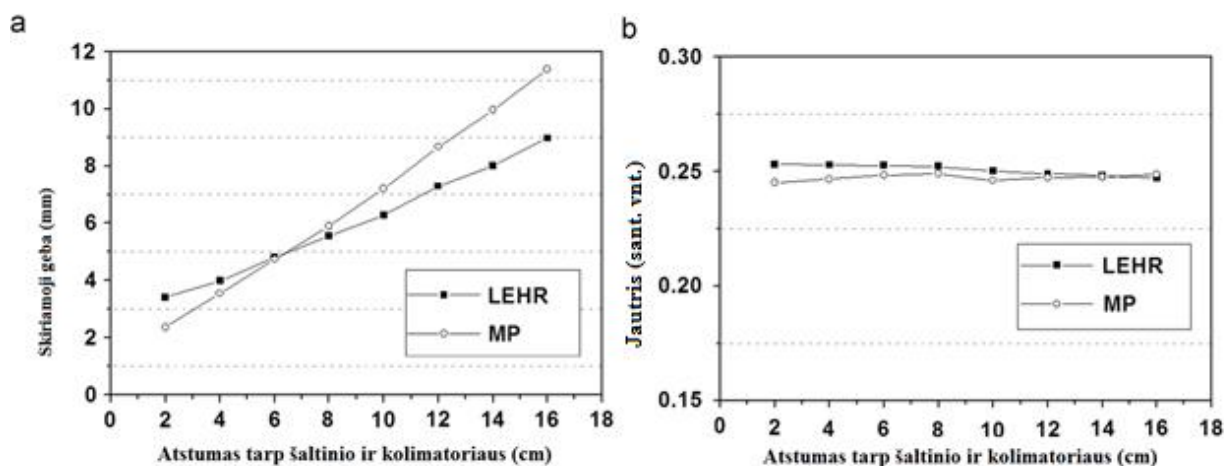
mm ir 42 mm aukščio konfigūracijose, erdvinė skiriamoji geba didėja, bet padidėjimas yra mažesnis nei 0,5 mm, todėl priimta prielaida, jog šiems atvejams galioja teorinės vertės.

Byung Jun Min<sup>5</sup> ir kt., MP kolimatorius su panašiais parametrais, aptartame straipsnyje<sup>2</sup>, buvo sukurtas ir pasiūlytas, kaip konceptas. (7 x 7) 2 mm skersmens skylučių masyvus, kurio židinio nuotolis 40 mm, buvo naudojamas, kaip parodyta 1.9 pav. Skylutės buvo išpjautos 3 mm storio volframo plokštelėje.



1.9 pav. 7 x 7 skylučių kolimatorius: kairėje – viršus, dešinėje – apačia<sup>5</sup>

Švininės pertvaros naudojamos riboti gama spindulių priėmimo kampą ( $16^\circ$ ) tam, kad spinduliai praėję skirtingas skylutes nepersiklotų ir nesukeltų problemų, tokių kaip artefaktai vizualizavimo metu. Erdvinės skiriamosios gebos bei jautrumo priklausomybės nuo šaltinio iki kolimatoriaus atstumo rezultatai buvo lyginami su standartiniu LEHR kolimatoriumi (skylės skersmuo: 1,40 mm, pertvaros storis: 0,16 mm, kolimatoriaus aukštis: 32,80 mm) naudojant toki patį aktyvų plotą  $70 \times 70 \text{ mm}^2$ . Jautrio nustatymui buvo naudota  $420 \mu\text{Ci } ^{99\text{m}}\text{Tc}$  šaltinis.

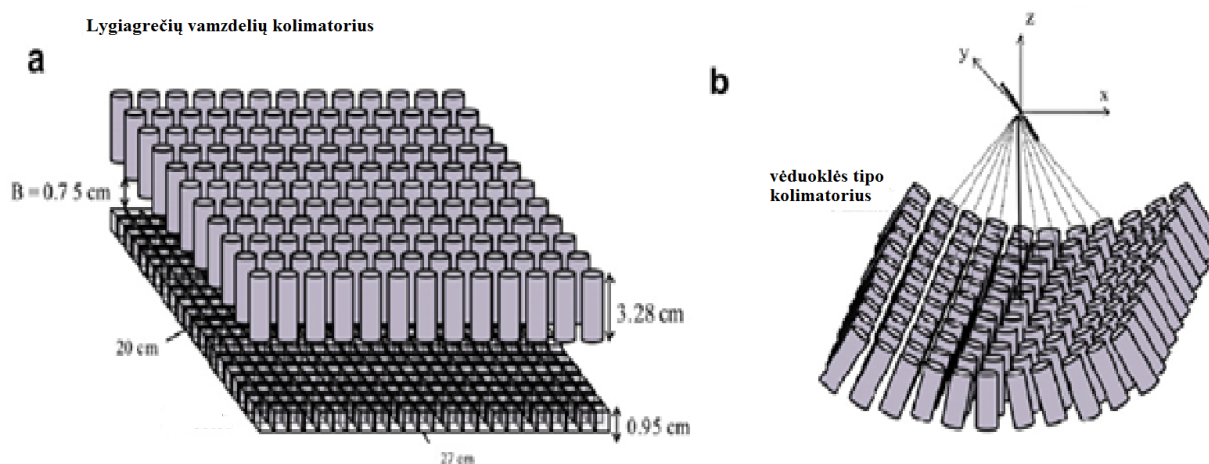


1.10 pav. a) erdvinės skiriamosios gebos, b) jautrio, grafikai gauti naudojant 7 x 7 MP ir LEHR kolimatorius, priklausomybės nuo šaltinio iki kolimatoriaus atstumo<sup>5</sup>

Kaip matyti iš erdvinės skiriamosios gebos grafiko (1.10 a pav.), MP kolimatoriaus skiriamoji geba buvo lygi LEHR kolimatoriaus skiriamajai gebai esant 6 cm atstumui nuo šaltinio iki kolimatoriaus. Iš jautrio priklausomybės nuo šaltinio iki kolimatoriaus atstumo

matyti, jog rezultatai buvo gana panašūs. Erdvinė skiriamoji geba ir jautris gauti naudojant 7 x 7 MP ir LEHR kolimatorius esant 6 cm atstumui nuo šaltinio iki kolimatoriaus atitinkamai buvo 4,7 mm FWHM ir 0,25 sant. vnt..

Kadangi branduolinėje medicinoje naudojami įvairių formų kolimatoriai su skirtinga skylių geometrija, Abdollah Khorshidi ir kt.<sup>6</sup>, naudodami Monte Karlo metodą ištyrė ir palygino skiriamąją gebą, lygiagrečių vamzdelių ir vėduoklės tipo (*angl. fan beam*) kolimatorius su apvaliais ir šešiakampiais vamzdeliais (1.11 pav.).



1.11 pav. Kolimatoriai: a) lygiagrečių vamzdelių, b) vėduoklės tipo<sup>6</sup>

Atlikus tyrimus nustatyta, jog didinant atstumą tarp šaltinio ir kolimatoriaus pusaukščio plotis (FWHM) didėja. Taip pat nustatyta, kad vėduoklės tipo kolimatoriaus skiriamoji geba yra geresnė nei lygiagrečių vamzdelių kolimatoriaus. Naudojant skirtingo tipo vamzdelius (apvalius ir šešiakampius), skiriamosios gebos skirtumas buvo lygus 7,6 % lygiagrečių vamzdelių ir 1 % vėduoklės tipo kolimatoriams, atitinkamai.

Didžiausia problema gaminant kolimatorius yra labai ribotas medžiagų pasirinkimas. Viena iš pagrindinių ir labiausiai naudojamų medžiagų yra švinas. Remiantis EK Direktyva 2011/65/EU imta riboti toksiško švino naudojimą. Dėl šios priežasties tokios medžiagos kaip volframas, tantalas ar auksas yra siūlomos kaip alternatyva švininiams kolimatoriams. Tačiau dėl šių medžiagų brangumo ir apdirbimo, labai išauga gamybos kaštai ir pramoniniu būdu kolimatoriai nėra gaminami. Mokslinių straipsnių apie skystos fazės rentgeno absorbcines medžiagas beveik nėra, tad darbai šia tematika yra ne tik reikalingi, bet ir būtini.

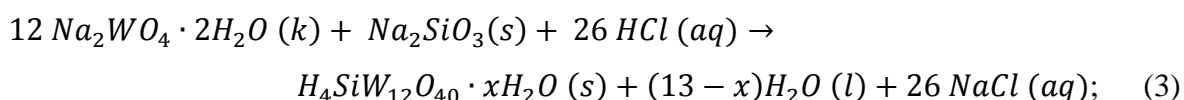
Todėl šio darbo tikslas yra pasiūlyti naują medžiagą, kuri slopintų fotonus ir galėtų būti panaudota kaip skystos fazės užpildas, naujo tipo kolimatoriaus konstrukcijai. Šiam tikslui įgyvendinti buvo charakterizuotas skystos fazės užpildas, pagaminta naujo tipo kolimatoriaus konstrukcija bei įvertintos jos charakteristikos.

## 2. MEDŽIAGOS IR TYRIMŲ METODAI

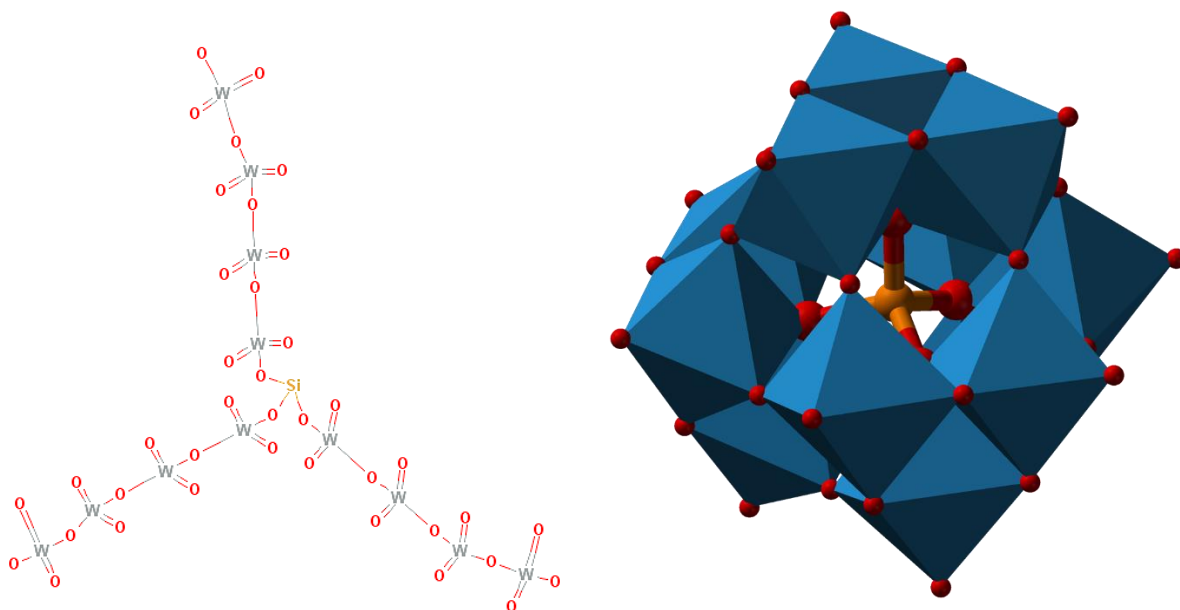
### 2.1 Užpildo medžiaga

#### 2.1.1 Silicio volframo rūgštis

Silicio volframo rūgštis, ( $H_4SiW_{12}O_{40}$ ) (SVR) yra viena iš heteropolirugščių (HPR) pasižyminčių Kegino struktūra. Kietoje būsenoje SVR yra baltos spalvos milteliai, ištirpusi vandenyje būna bespalvė. Dažniausiai sutinkama kaip silicio volframo rūgšties hidratas ( $H_4SiW_{12}O_{40} \cdot xH_2O$ ), kur  $x = 6, 14, 24$  yra stabilios būsenos<sup>7</sup>. Vienas iš SVR sintezės metodų gali būti:



Natrio silikato ( $Na_2SiO_3$ ) ir natrio volframato ( $Na_2WO_4$ ) medžiagos kaitinamos iki virimo temperatūros ir tada įdedama druskos rūgšties ( $HCl$ ). Priemaišos yra ekstrahuojamos ir galutinis produktas gaunamas išgarinant vandenį.

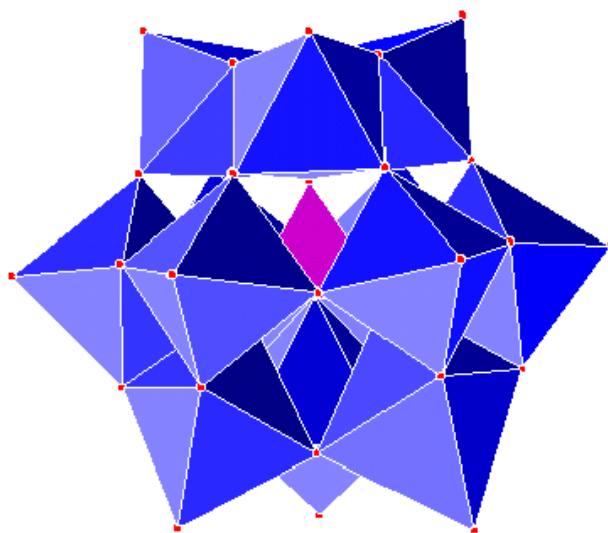


2.1 pav. 2-D ir 3-D silicio volframo rūgšties molekulinė struktūra<sup>7</sup>

#### 2.2 Keggin'o struktūros heteropolirugštys ir jų dariniai.

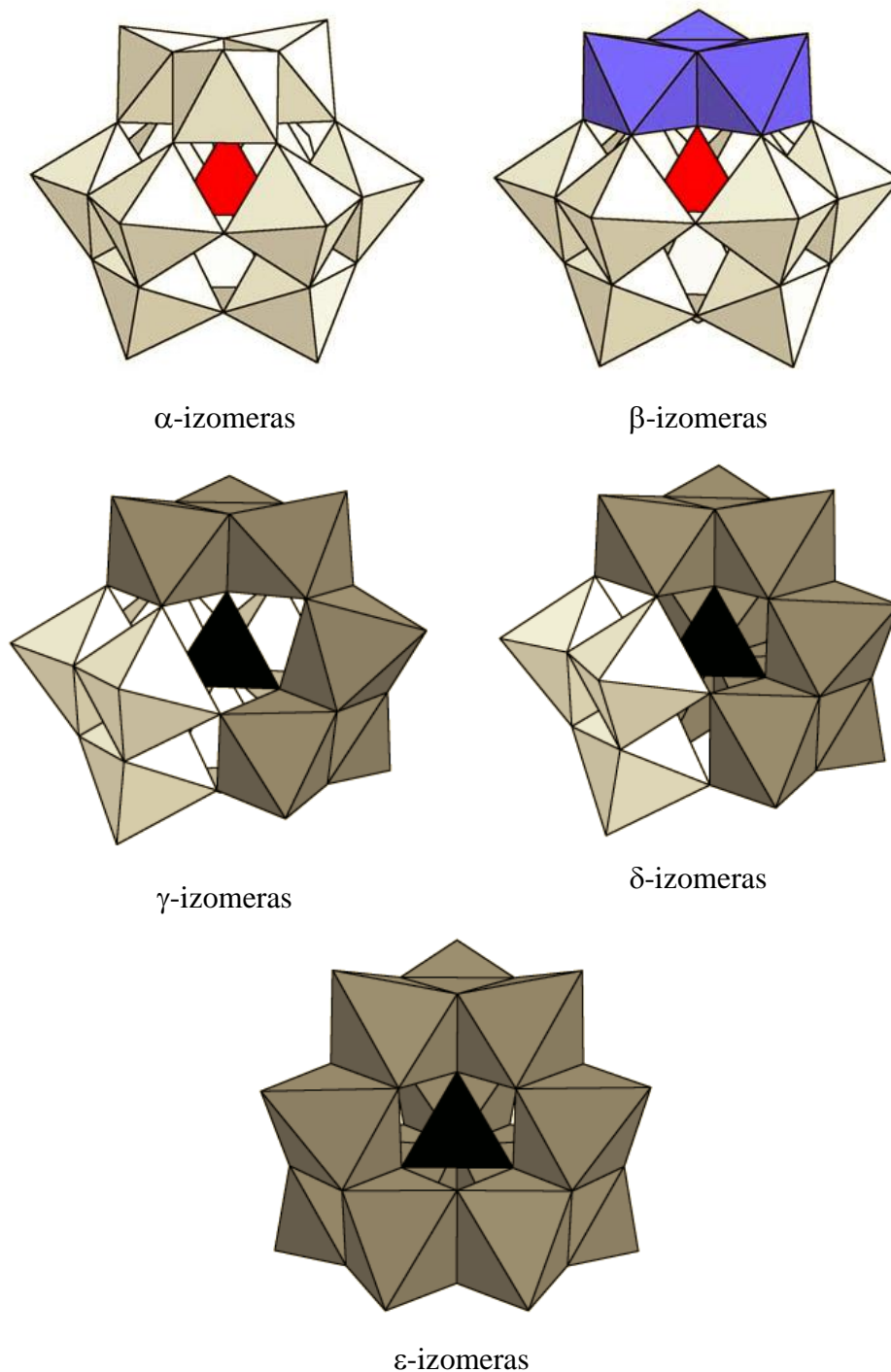
Heteropolinės rūgštys (HPR) priklauso rūgščių klasei, į kurių sudėtį be vandenilio ir deguonies atomų dar įeina pereinamųjų metalų ir kai kurių kitų metalų ir nemetalų atomų. HPR liekanos yra polioksoanijonai, kurie susidaro, kai polikondensuojasi pereinamųjų V B ir VI B grupių metalų, tokių kaip volframas (W), molibdenas (Mo), vanadis (V), niobis (Nb), tantalas (Ta), nuo kelių iki keliolikos oksoanijonų su  $p$ -elementų, tokių kaip fosforas (P), silicis (Si),

boras (B), arsenas (As), aliuminis (Al) ir kt., heteroatomą turinčiu oksoanijonu<sup>8</sup>. Pereinamųjų metalų oksoanijonai sudaro sudėtingą erdvinę struktūrą, kurios centre yra heteroatomą turintis oksoanijonas, ir kurioje visi oksoanijonai tarpusavyje jungiasi per kaimyninius (bendrus) deguonies atomus. HPR rūgštines savybes lemia prie šios sudėtingos struktūros išorėje esančių deguonies atomų prisijungę ir lengvai atskylantys H<sup>+</sup> jonai. HPR struktūra yra vadinama Keggin'o struktūra<sup>9</sup>. Bendroji Keggin'o struktūros HPR formulė yra H<sub>8-n</sub>XM<sub>12</sub>O<sub>40</sub>, kur X yra centrinis *n* valentingumo heteroatomas (Si, P, As, B, Al ar kt.), o M yra pereinamasis metalas (dažniausiai Mo arba W)<sup>10</sup>. HPR anijonų Keggin'o struktūrą sudaro centre esantis tetraedro formos heteroatomo oksianijonas [XO<sub>4</sub>]<sup>(8-n)-</sup>, simetriškai iš visų pusių apsupta dvylikos oktaedro formos grupių MO<sub>6</sub>, kurių kiekviena yra sudaryta iš pereinamojo metalo ir šešių deguonies atomų. Oktaedro formos MO<sub>6</sub> grupės bendromis briaunomis tarpusavyje yra susijungusios į keturias stambesnes grupes [M<sub>3</sub>O<sub>13</sub>], o pastarosios per kampinius deguonies atomus tarpusavyje yra susijungusios į bendrą sudėtingą struktūrą [XM<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]<sup>(8-n)-</sup> (2.2 pav.).



**2.2 pav.** HPR polioksoanijono [XM<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]<sup>(8-n)-</sup> Keggin'o struktūros modelis<sup>11</sup>

Keggin'o struktūros HPR polioksoanijonams yra būdinga izomerija. Iš viso yra žinomi penki Keggin'o struktūros polioksoanijonų izomerai, kuriems priskiriami priešdėliai α-, β-, γ-, γ- ir ε-. Simetrinei Keggin'o struktūrai priskiriamas priešdėlis α-. Kiti izomerai kartais vadinami Baker, Baker-Figgis arba posūkio izomerais - konformeriais. Jie susidaro dėl oktaedro formos struktūrinių vienetų MO<sub>6</sub> pasisukimo vienas kito atžvilgiu susidarant sudėtingesniems struktūriniams vienetams M<sub>3</sub>O<sub>13</sub>. Dėl posūkio izomerų susidarymo sumažėja bendra polioksoanijono [XM<sub>12</sub>O<sub>40</sub>]<sup>(8-n)-</sup> struktūros simetrija (2.3 pav.)<sup>11</sup>.



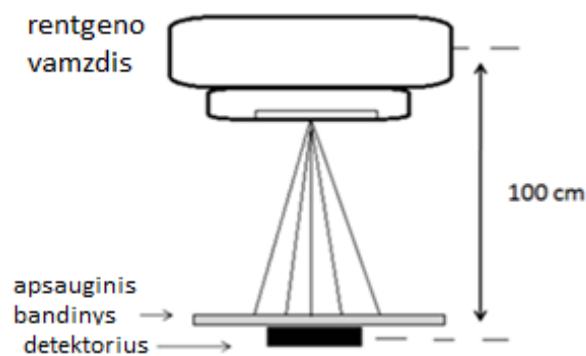
**2.3 pav.** Penki Keggin'o poliedrinės struktūros polioksoanijono posūkio izomerai – konformerai<sup>11</sup>

Kadangi Keggin'o struktūros HPR polioksoanijonuose yra labai didelis elektronų tankis (daugiaelektronė struktūra), todėl yra „neskaidrios“ elektronams. Didžioji dalis visų elektronų tenka oktaedro formos grupės  $MO_6$  sudarantiems didelės santykinės atominės masės pereinamųjų metalų atomams (W, Mo, Ta, Nb). Dėl šios savybės kai kurios HPR, pvz.  $H_3PW_{12}O_{40}$ , yra naudojamos kaip pagalbiniė medžiaga transmisinėje elektroninėje mikroskopijoje.  $H_3PW_{12}O_{40}$  kaip negatyvinis dažiklis arba foninė medžiaga leidžia matyti virusus, nervų ląsteles, polisacharidus, kitų biologinių audinių medžiagas SEM ir TEM analizės

metu<sup>12</sup>. HPR yra taip pat tyrinėjamos kaip kompozitinės medžiagos protonams laidžių membranų gamyboje<sup>13</sup>. HPR vandeninių tirpalų fizikinės ir cheminės savybės nuodugniai tyrinėtos siekiant panaudoti jas žemos temperatūros H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> kuro elementuose kaip elektrolitą<sup>14</sup>. Dėl savo ypatingos Keggin'o struktūros HPR bei jų druskos yra tyrinėjamos kaip hibridinių organinių-neorganinių nanokompozitinių medžiagų prekursoriai, joninės paviršinio aktyvumo medžiagos bei kaip nanometrinių matmenų klasterių, turinčių lamelinę, sferinę ar žiedo pavidalo struktūras, statybiniai „blokai“<sup>15,16</sup>. Literatūroje<sup>17</sup> yra nurodoma, jog taikant mikroemulsinį procesą ir prekursoriumi naudojant siliciovolframato rūgštį H<sub>4</sub>SiW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>·nH<sub>2</sub>O yra susintetintos ~8 nm skersmens ir iki 10 μm ilgio Ag<sub>4</sub>SiW<sub>12</sub>O<sub>40</sub> nanovielos.

### 2.3 Švino ekvivalento nustatymas

Bandinių švino ekvivalento nustatymas buvo atliekamas naudojantis eksperimentine įranga parodyta (2.4 pav.) bei remiantis tarptautinėse rekomendacijose pateikta metodika<sup>18</sup>.



2.4 pav. švino ekvivalento nustatymo schema<sup>18</sup>

Bandinių apšvitai buvo naudojamas skaitmeninis rentgeno aparatas AXIOM MULTIX MP (2.5 pav.). Maksimali prietaiso įtampa – 150 kV, maksimali srovė - 550 mA.



2.5 pav. Skaitmeninis rentgeno aparatas AXIOM Multix MP

Rentgeno apšvitos parametrams registruoti buvo naudojamas daugiafunkcinis multimetras „Barracuda“ (RTI Electronics) su detektoriumi įtampai matuoti ir detektoriumi R100B – dozės matavimui, kuris gali užfiksuoti dozę nuo 1 nGy iki 100 kGy (2.6 pav.).





**2.6 pav.** „Barracuda“ (RTI Electronics) multimetras ir R100B dozimetras

Pirmiausiai išmatuojama Rentgeno spinduliuotės oro KERMA  $K(0)$ . KERMA yra dozė, susijusi su visų į standartinį oro tūrį patenkančių dalelių sąveikos produktų kinetine energija. Jos dydis prilyginamas rentgeno fotonų dozei apsauginio elemento (bandinio) paviršiuje. Po to išmatuojama dozė  $D(x)$ , užfiksuota Rentgeno spinduliuotei praėjus pro tam tikro storio  $x$  bandinį.

Rentgeno spinduliuotės pralaidumas  $B(x)$  apskaičiuojamas pagal formulę:

$$B(x) = \frac{D(x)}{K(0)}; \quad (4)$$

Apskaičiavus rentgeno pralaidumą, švino storio ekvivalentas skaičiuojamas pagal formulę:

$$x = \frac{1}{\alpha\gamma} \ln \left( \frac{B^{-\gamma} + \frac{\beta}{\alpha}}{1 + \frac{\beta}{\alpha}} \right). \quad (5)$$

Čia  $\alpha$ ,  $\beta$  ir  $\gamma$  yra koeficientai, priklausantys nuo naudojamos įtampos.

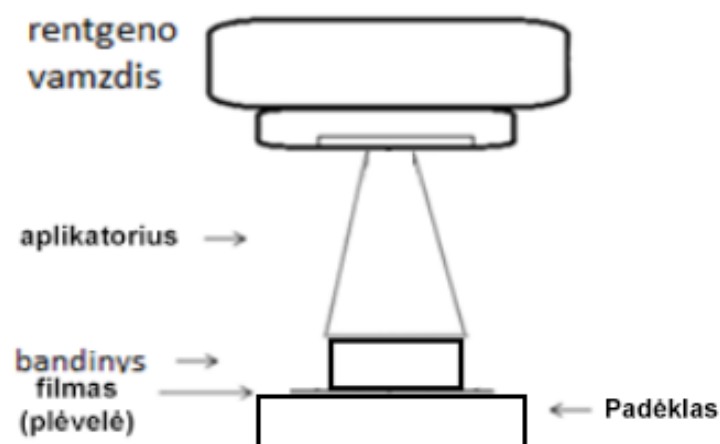
Kadangi visų tiriamųjų bandinių švino ekvivalentas buvo nustatomas tos pačios apšvitos sesijos metu, apšvitos parametrai nustatant oro KERMOS reikšmę nekito: buvo pasirinktas standartinis 100 cm atstumas tarp rentgeno spindulių šaltinio ir bandinio paviršiaus, bei apšvitos lauko dydis  $10 \times 10 \text{ cm}^2$ . Apšvita buvo vykdoma esant 124,3 kV įtampai ir 100mA katodinės grandinės srovei, apšvitos trukmė – 200 ms. Esant tokiems parametrams, atitinkamų koeficientų, reikalingų švino ekvivalentui skaičiuoti, vertės buvo (2.1 lentelė):

**2.1 lentelė.** Koeficientų vertės esant 124,3 kV įtampai

$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
2,230	7,974	0,544

## 2.4 Rentgeno terapijos įrenginys

### 2.4.1 Kolimatoriaus konstrukcijos apšvita



2.7 pav. Eksperimentinių bandinių apšvitos schema

Bandinių apšvita buvo naudojama 2.7 paveikslėlyje pateikta schema. Spindulių generavimui naudotas rentgeno terapijos įrenginys Gulmay D3225. Apšvitinimo metu, dėl aparatūros techninių galimybių, buvo pasirinkta 150 kV įtampa, kuri buvo nutaikyta į filmą, tai yra, tiek pirmajai konstrukcijai, tiek antrajai, maksimali dozė sukoncentruota į plėvelės paviršių, praėjus per kolimatorių. Priklausomai nuo norimos įtampos parenkamas vienas iš devynių aplikatorių. Šiuo atveju naudotas H aplikatorius, kurio aukštis lygus 50 cm, apšvitos laukas 10 cm x 10 cm (2.8 pav. b). Taip pat naudojant H aplikatorių reikalingas vario 0,33 mm (HVL) filtras (2.8 pav. b). Pasirinkus kūginį aplikatorių ir filtrą, programinės įrangos pagalba pasirenkama apšvitos dozė, kuri abejais atvejais buvo 1,0 Gy ir kuri baigus procedūrą neviršijo  $\pm 3\%$  paklaidos<sup>19,20</sup>.

a)



b)

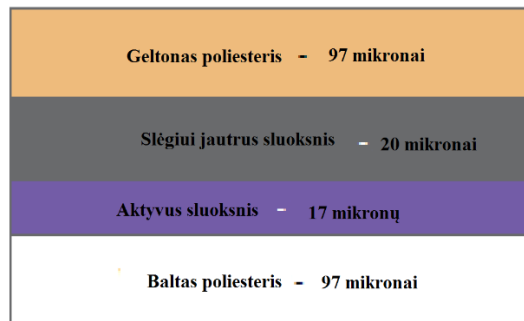


2.8 pav. a) Rentgeno terapijos įrenginys GULMAY D3225; b) filtrai ir kūginiai aplikatoriai<sup>19</sup>



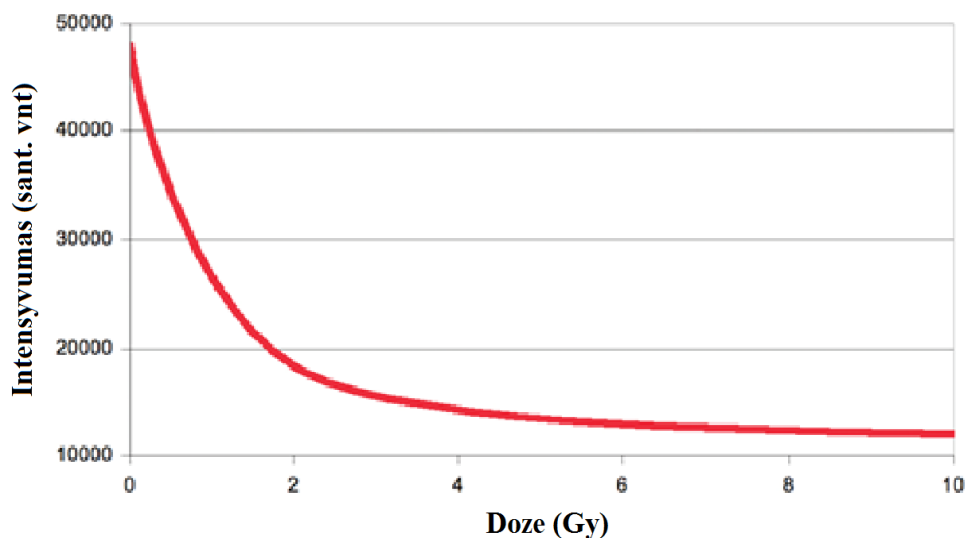
## 2.5 Radiacinei spinduliuotei jautri plėvelė

Šiame darbe buvo naudota GafChromic RTQA2<sup>21</sup> savaryškis filmas jautrus rentgeno spinduliuotei. Gamintojas pateikia filmus (plėveles) 254 x 254 mm<sup>2</sup> lakštais, todėl dozių pasiskirstymą galima registruoti dideliame plote. Plėvelė yra jautri įbrėžimams, todėl net išimant iš pakuotės su ja reikia elgtis atsargiai, nors ne visi įbrėžimai matydavosi ją nuskenavus. Plėvelė yra mažai jautri dienos šviesai, todėl nereikia padidintos apsaugos. Apšvitos rezultatai (įvairaus pilkumo segmentai plėvelėje) matomi realiu laiku, plėvelės nereikia papildomai apdoroti. Plėvelė jautri rentgeno spinduliuotei nuo 0,02 Gy iki 8,00 Gy, pasižymi aukšta skiriamąja geba. 2.9 paveikslėlyje pateikiamas plėvelės skerspjūvis.



2.9 pav. GafChromic RTQA2 plėvelės skerspjūvis su apytiksliais sudedamųjų sluoksnių storiais<sup>21</sup>

Plėvelė pagaminta aktyvų sluoksnį įlaminojant tarp dviejų poliesterio sluoksnių, kas padaro ją itin tvirtą, atsparią vandeniui bei galinčią atlaikyti iki 70°C temperatūrą.



2.10 pav. Plėvelės jautrio priklausomybė nuo dozės<sup>21</sup>

Gamintojas pateikia plėvelės jautrio dozei grafiką (2.10 pav.) ir pabrėžia, jog plėvelės jautris priklauso nuo kelių faktorių, tokių kaip radiacinio šaltinio energijos spektro, densitometro

charakteristikų, skenerio ar kitų matavimo priemonių. Taip pat svarbus yra ir laikas tarp ekspozicijos ir matavimų. Kuo plėvelė tamsesnė, tuo sugerta dozė yra didesnė.

## 2.6 GafChromic filmų analizė naudojant ImageJ programą

Nuskenuoti vaizdai buvo RGB tipo, dar vadinami grynujų spalvų (*angl. – true colour*) vaizdai. Šių vaizdų kiekvieną pikselį tiesiogiai aprašo raudonos, žalios ir mėlynos spalvos dedamosios. Atliekant GafChromic filmo kalibravimą buvo naudojama „ImageJ“ programa. Ši programa konvertuoja RGB vertes į pilkumo tono vertes (0 balta spalva, 255 - juoda) pagal formulę:

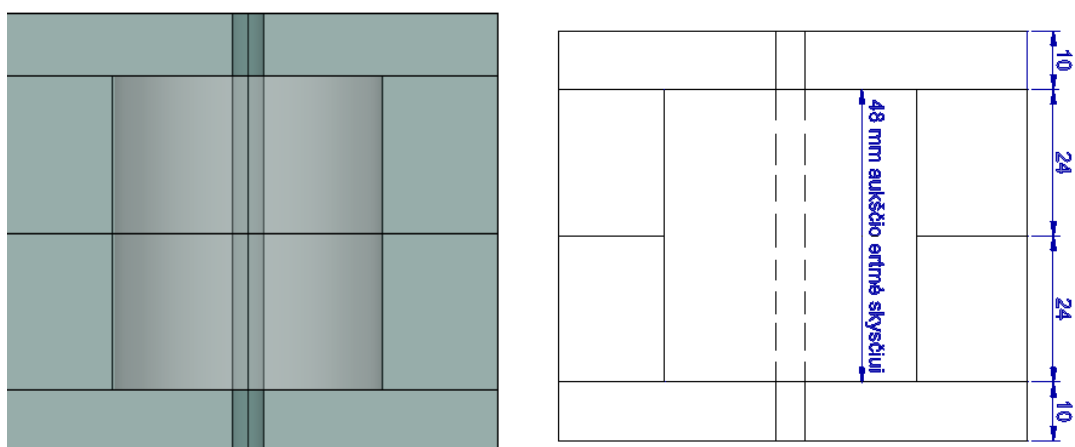
$$\text{pilkumo tonas} = \frac{R+G+B}{3} \quad (6)$$

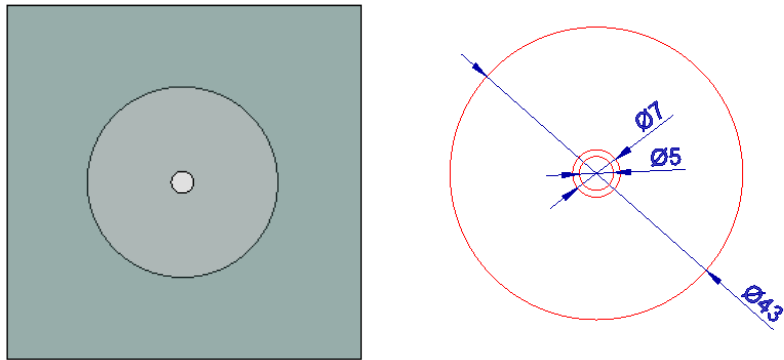
čia R – raudonos spalvos dedamoji, G – žalios spalvos dedamoji, B – mėlynos spalvos dedamoji.

Gautos pilkumo tono vertės buvo prilyginamos žinomoms dozių vertėms. Žinant skirtingomis dozėmis apšvitintų bandinių pilkumo tono vertes, nubrėžiamas grafikas (kalibracinė kreivė). Jos pagalba bus nustatomos nežinomos dozės vertės gautos po konstrukcijos apšvitos.

## 2.7 Eksperimentinės kolimatoriaus maketo konstrukcijos

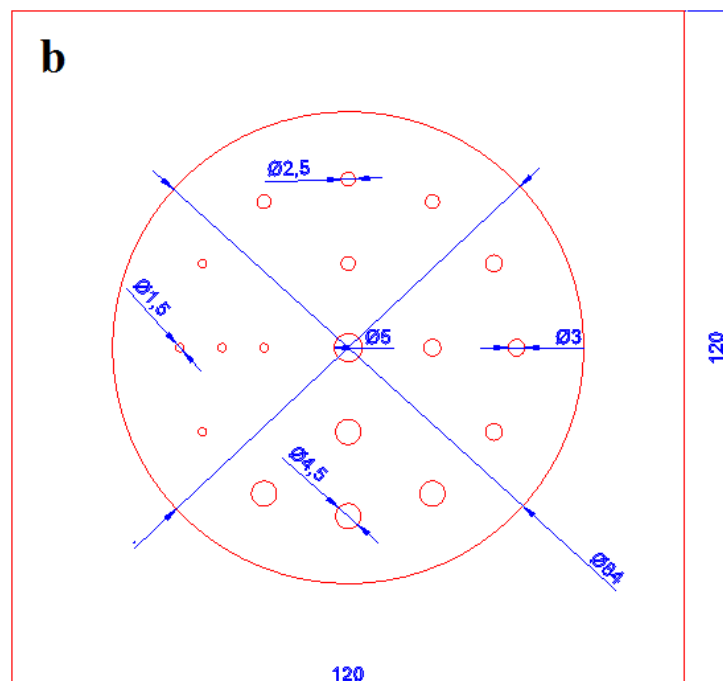
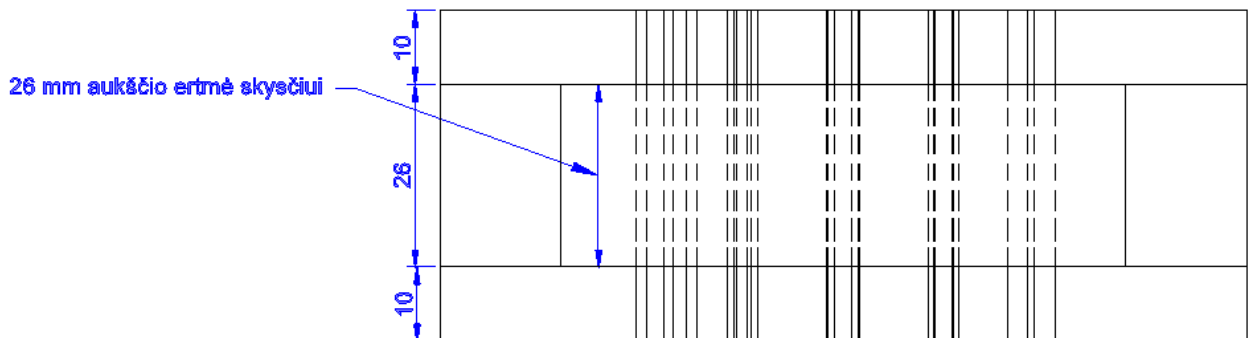
Gaminant eksperimentinę kolimatoriaus maketo konstrukciją buvo panaudotas polimetilmetakrilatas (PMMA) bei skirtingo skersmens stikliniai vamzdeliai. Pirmoji konstrukcija buvo pagaminta pasirenkant dvi 2,4 cm storio organinio stiklo plokštes, o iš kraštų po 1 cm storio plokštes. Per storąsias plokštes išgręžta 4,3 cm skersmens skylė užpildui (2.11 pav.). Šios konstrukcijos centre, per visas plokštes įklijuotas stiklinis vamzdelis. Bendras konstrukcijos aukštis 6,8 cm, užpildo – 4,8 cm, vamzdelio skersmuo: išorinis 0,7 cm, vidinis – 0,5 cm.





**2.11 pav.** Kolimatoriaus su vienu vamzdeliu konstrukcija

Antroji konstrukcija buvo sudaryta iš trijų sluoksnių (2.12 pav. a). Iš viršaus ir apačios panaudotos 1 cm storio organinio stiklo plokštės, per vidurį – 2,6 cm. Vidurinėje plokštėje išgręžta 8,4 cm skersmens skylė užpildui. Bendras konstrukcijos aukštis 4,6 cm, užpildo 2,6 cm. Skylėms panaudota 5 skirtingų vidinių skersmenų vamzdeliai (2.12 pav. b): centre – 0,5 cm, į viršų nuo centro – 0,25 cm, į dešinę nuo centro – 0,3 cm, į apačią nuo centro – 0,45 cm ir kairėje nuo centro – 0,15 cm.



**2.12 pav.** Konstrukcija su 5 skirtingų skersmenų vamzdeliais

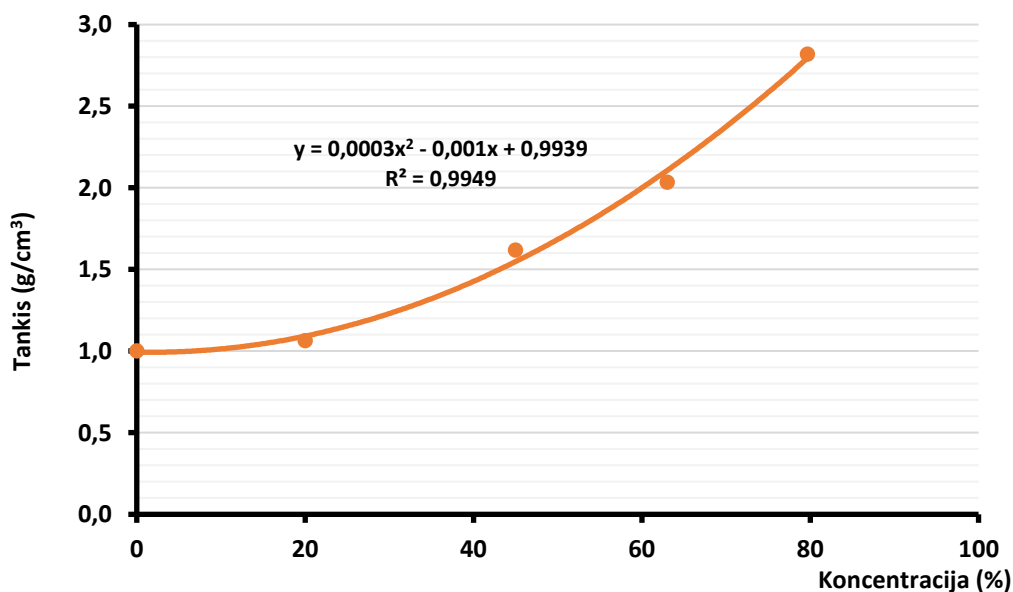
Pirmosios ir antrosios konstrukcijos organinio stiklo sluoksniai buvo suklijuoti akrilinais klijais „#16“ („SciGrip“, JAV). Vamzdeliai prie organinio stiklo priklijuoti epoksidiniais klijais „Titan“ (Rusija), kurie atliko tiek klijų, tiek hermetiko vaidmenį.

## 2.8 Kolimatoriaus maketo užpildas

Pagamintas maketas buvo užpildytas specialiu tirpalu, pagamintu silicio volframo rūgšties  $\text{H}_4\text{SiW}_{12}\text{O}_{40} \cdot x\text{H}_2\text{O}$  (Sigma-Aldrich) pagrindu. Norint atlikti bet kokius tyrimus, siejamus su medžiagos tankiu tokio tipo hidratuotose medžiagose būtina įvertinti vandens kiekį ir įtaką.

Vandens kiekiui (x reikšmė silicio volframato formulėje) nustatyti buvo pagamintas sotusis tirpalas. Remiantis F.J. Berry<sup>7</sup> galimos stabilios x vertės silicio volframo rūgštyje yra 24, 14, 6 arba 0. Pagaminus sotųjį tirpalą buvo išmatuota 5 ml tirpalo masė ( $m=14,1649$  g) ir apskaičiuotas sotaus tirpalo tankis  $2,819$  g/cm<sup>3</sup>. Toliau medžiaga buvo 3 val. kaitinama krosnyje  $110^\circ\text{C}$  temperatūroje vandeniui išgarinti. Remiantis F.J. Berry<sup>7</sup>, tokioje temperatūroje silicio volframo rūgštis lieka hidratuotoje būsenoje su 6 vandens molekulėmis. Po iškaitinimo medžiagos masė sumažėjo iki  $11,7139$  g. Remiantis šiais duomenimis buvo apskaičiuota maksimali silicio volframo rūgšties koncentracija, kurioje grynos medžiagos masės dalis sudarė 79,69 %. Gautas rezultatas leido nustatyti vandens kiekį komercinėje silicio volframato rūgštyje:  $x=24$ .

Įvertinus grynos medžiagos koncentraciją sočiajame tirpale, buvo pagaminti kelių koncentracijų silicio volframo rūgšties vandeniniai tirpalai. Taikant tą pačią metodiką išmatuota 5 ml tūrio tirpalų masė bei suskaičiuotas tankis. Gauti rezultatai pateikiami 2.13 paveikslėlyje.



2.13 pav. Silicio volframo rūgšties tirpalo tankio priklausomybė nuo koncentracijos

Priešingai, negu manyta, buvo nustatyta netiesinė tankio priklausomybė nuo koncentracijos.

### 3. TYRIMŲ REZULTATAI IR JŲ APTARIMAS

#### 3.1 Kolimatoriaus užpildo rentgeno absorbcinės savybės

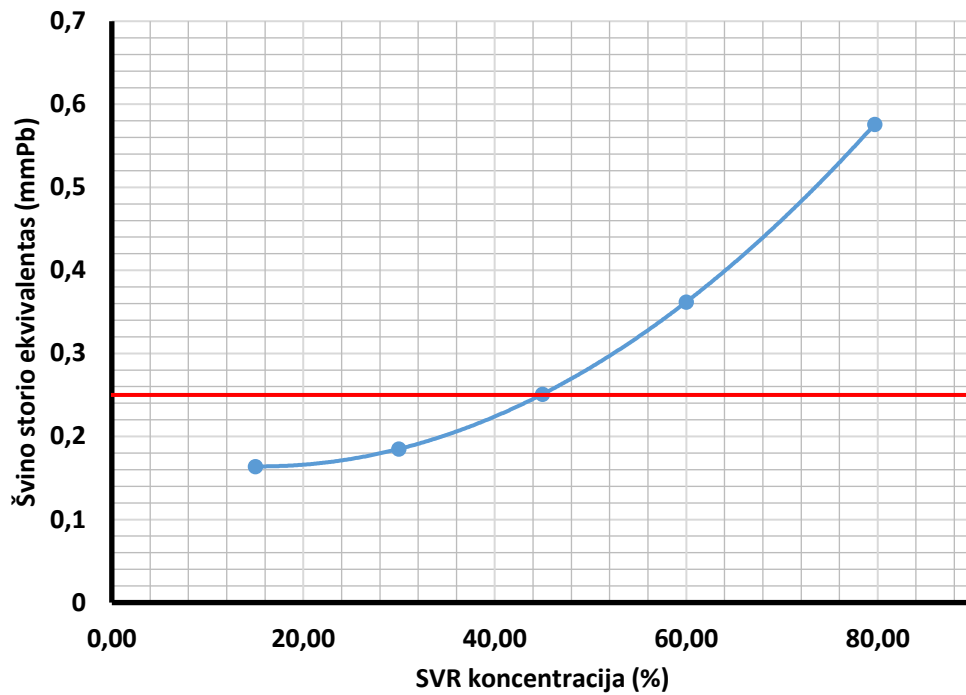
Nustatant kolimatoriaus užpildo rentgeno absorbcines savybes pirmiausia buvo pagaminta skirtingų koncentracijų (15 %, 30 %, 45 %, 60 % ir sotus 76,69 %) bandiniai, skiedžiant sotų tirpalą. Atliekant švino ekvivalento skaičiavimus, pirmiausia pasinaudojant rentgeno diagnostiniu aparatu AXIOM ir detektoriumi „barracuda“ buvo išmatuota oro KERMA  $K(0)$ , kuri buvo lygi 2,074 mGy. Vėliau, pasinaudojant jau anksčiau aprašyta metodika (15 pav.), buvo išmatuota spinduliuotės dozės silpimas bandiniuose (kiuvetė su užpildu ~1,0 cm).

Pro bandinį praėjusios rentgeno spinduliuotės dozės buvo matuojamos mažiausiai dvejuose taškuose, esant tiems paties apšvitos parametrams. Iš gautų duomenų pasinaudojant 4, 5 formule bei 2.1 lentelėje pateiktais koeficientais buvo apskaičiuotas skirtingų koncentracijų SVR vandeninių tirpalų (kartu su kiuvete kompleksiskai) švino ekvivalentai, kurie pateikiami 3.1 lentelėje.

**3.1 lentelė.** SVR rentgeno spinduliuotės pralaidumo bei švino ekvivalento reikšmės

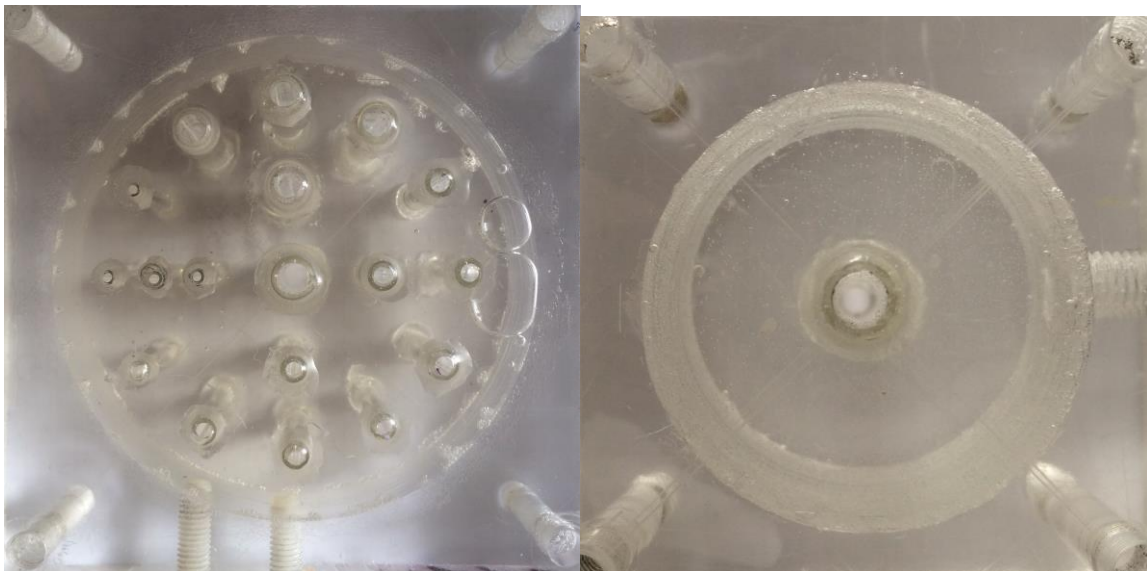
SVR koncentracija, %	Praėjusios rentgeno spinduliuotės dozė, $\mu\text{Gy}$		Vidurkis $\mu\text{Gy}$	Rentgeno spinduliuotės pralaidumas $B(x)$	Švino ekvivalentas, mm Pb
	Serija 1	Serija 2			
15	294,78	298,78	593,57	0,2862	0,164
30	243,19	247,19	490,37	0,2364	0,185
45	170,40	180,40	350,80	0,1691	0,251
60	109,01	97,01	206,01	0,0993	0,362
79,69	38,75	44,75	83,50	0,0403	0,576

Atlikus skaičiavimus buvo nubrėžta švino ekvivalento priklausomybė nuo SVR koncentracijos tirpale (3.1 pav.). Raudona punktyrinė linija žymi minimalią švino ekvivalento reikšmę (0,25mm Pb).



3.1 pav. Švino ekvivalento reikšmės nuo SVR koncentracijos

Iš 3.1 lentelės ir 3.1 paveikslėlio duomenų matyti, jog 45 % koncentracijos SVR tirpalo švino ekvivalentas atitinka minimalias rekomendacijas (>0,25 mmPb). Todėl buvo pasirinkta ši koncentracija, kaip konstrukcijos užpildas.



3.2 pav. Naujo tipo konstrukcijos užpildytos 45 % koncentracijos SVR vandeniniu tirpalu

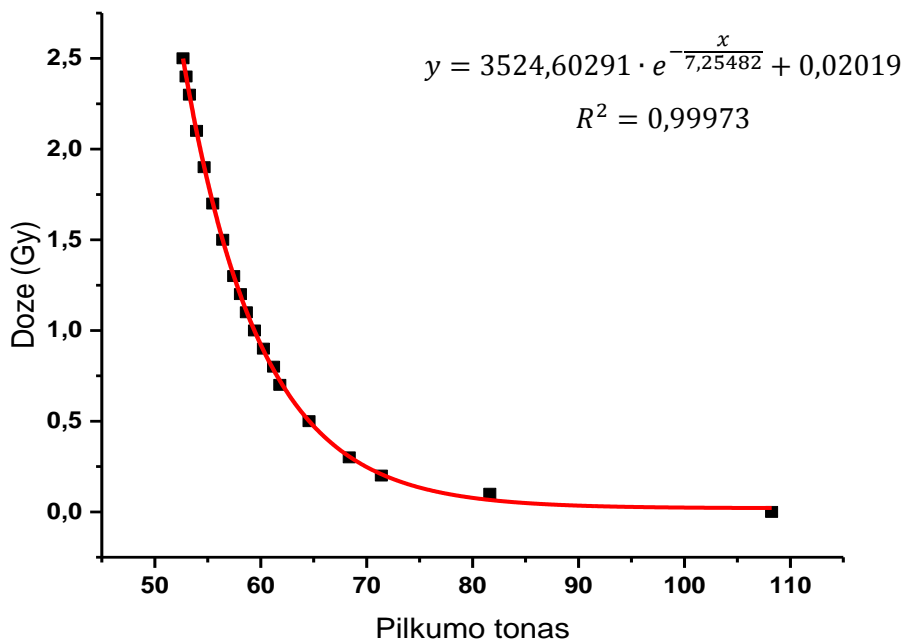
### 3.2 Radiacinei spinduliutei jautrios plėvelės kalibravimas

GafChromic filmo (plėvelės) kalibravimas buvo vykdomas sukarplant plėvelę 1 cm x 1 cm kvadratėliais ir apšvitinant juos skirtingomis dozėmis (3.3 pav.) naudojant rentgeno terapijos įrenginį Gulmay D3225.



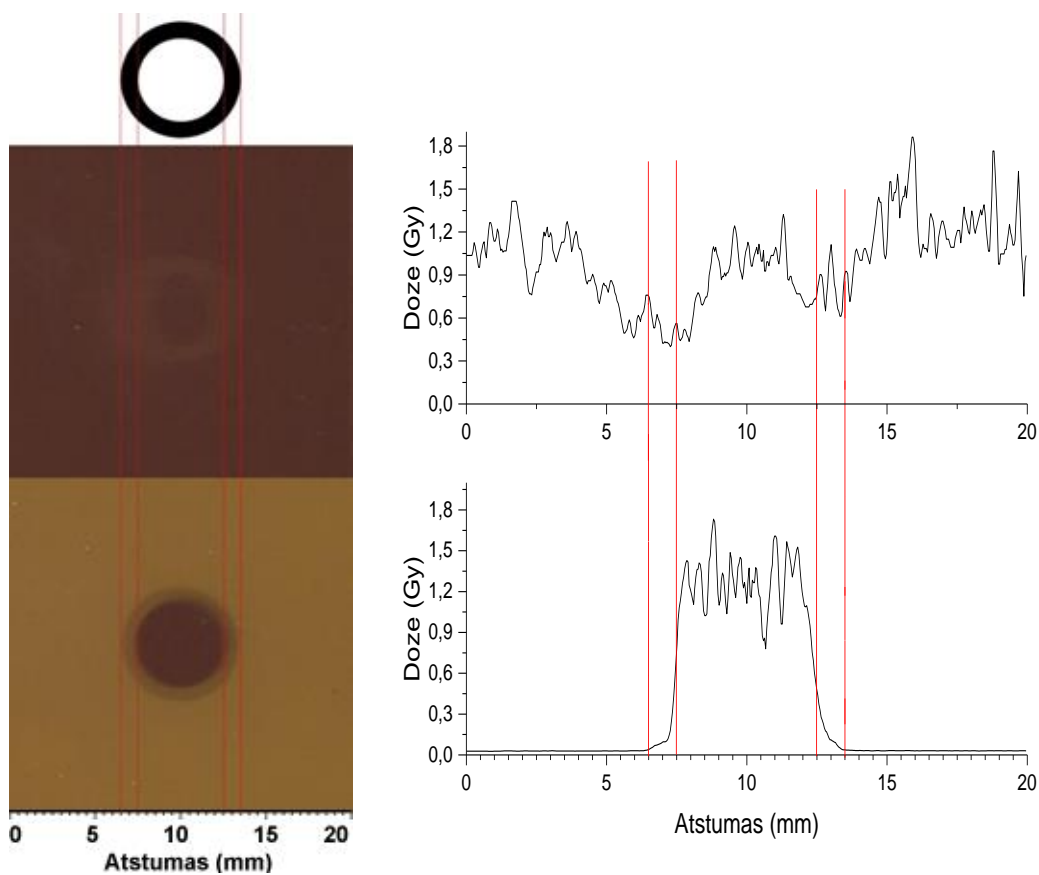
**3.3 pav.** Kalibracinė GafChromic filmų, apšvitintų skirtingomis dozėmis, juostelė

Apšvitintos plėvelės buvo nuskenuotos naudojantis KTU fizikos katedroje esančiu skeneriu HP Scanjet G3010. 3.3 paveikslėlyje esantys skaičiai reiškia dozę (Gy), kuria buvo apšvitinta plėvelė. Visi nuskenuoti vaizdai buvo apdorojami naudojantis „ImageJ“ programa. Šios programos pagalba buvo nustatytos kiekvieno kvadratėlio pilkumo tono vertės. Naudojant šias vertes bei „OriginPro“ programą buvo nubrėžta kalibracinė, dozės priklausomybė nuo pilkumo tono, kreivė (3.4 pav.) Išvesta lygtis, kuri pateikta 3.4 paveikslėlyje, kurios pagalba buvo apskaičiuojamos dozės vertės po konstrukcijų apšvitos.



**3.4 pav.** Dozės priklausomybė nuo pilkumo tono

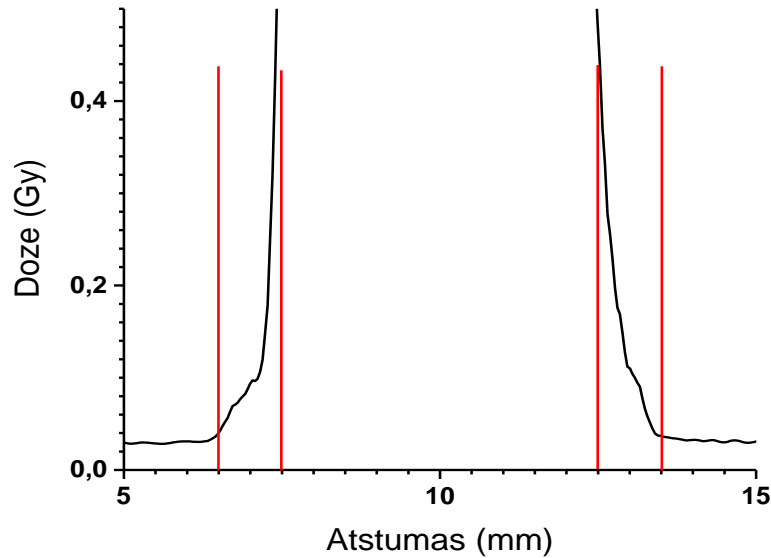
### 3.3 Kolimatoriaus maketo charakterizavimas



**3.5 pav.** Kairėje - tuščios ir užpildytos konstrukcijos vaizdai gauti plėvelėje po 1 Gy apšvitos, dešinėje – tuščios ir užpildytos konstrukcijų dozių priklausomybė. Raudonos linijos žymi sienelių storį, grafike atidėti atstumai atitinka realius paveikslėlių duomenis (20 mm)

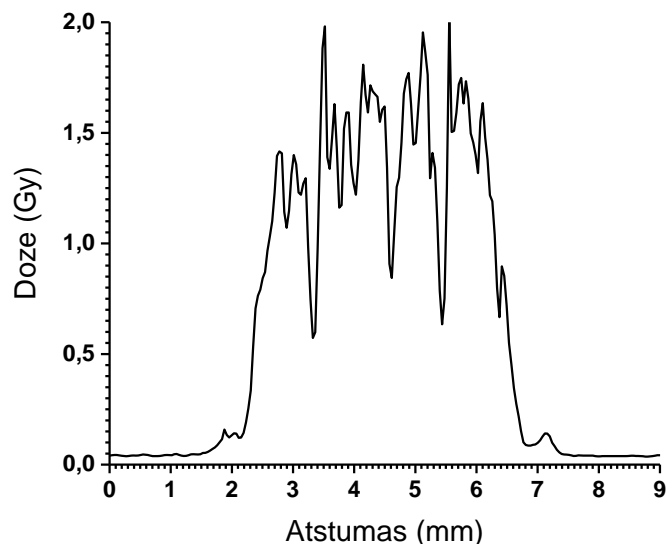
3.5 paveikslėlyje pateikiama realių išmatavimų vamzdelis, kurio sienelė atitinka 1 mm, vidinis skersmuo yra 5 mm, o išorinis yra 7 mm. Žemiau vamzdelio pateikiami neužpildytos ir užpildytos konstrukcijos vaizdai gauti GafChromic plėvelėje po apšvitos 1,0 Gy. Paveikslėlių realus dydis yra 20 mm x 20 mm. Raudonos linijos tiek paveikslėlyje, tiek grafikuose žymi vamzdelio sienelių kraštus





**3.6 pav.** Detalizuota užpildytos konstrukcijos (5 mm vidinis stiklinio vamzdelio skersmuo, išorinis - 7 mm) dozės priklausomybė, užregistruota GafChromic filme

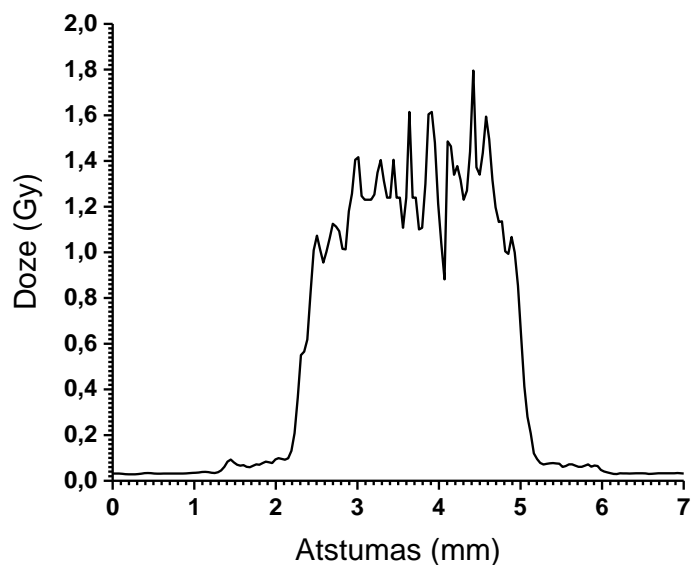
Detalesniame dozių pasiskirstyme po kolimatoriaus konstrukcija matyti aiškus laiptelis tarp užpildytos konstrukcijos dalies ir stiklinio vamzdelio sienelės. Vidutinė dozė po užpildytos konstrukcijos dalimi yra 0,03 Gy. Vamzdelio centre dozė yra apie 1,3 Gy. Vamzdelio sienelėse (raudonos linijos 3.6 pav.) stebimas netiesinis dozės sumažėjimas pereinant iš centre esančios tuščios ertmės (oro) į užpildytą konstrukciją. Tokį dozių pasiskirstymą sąlygoja skirtingas nei užpildo fotonų silpimo koeficientas ir galima fotonų sklaida.



**3.7 pav.** Dozių pasiskirstymas fotonams perėjus 4,5 mm vidinio skersmens vamzdelį

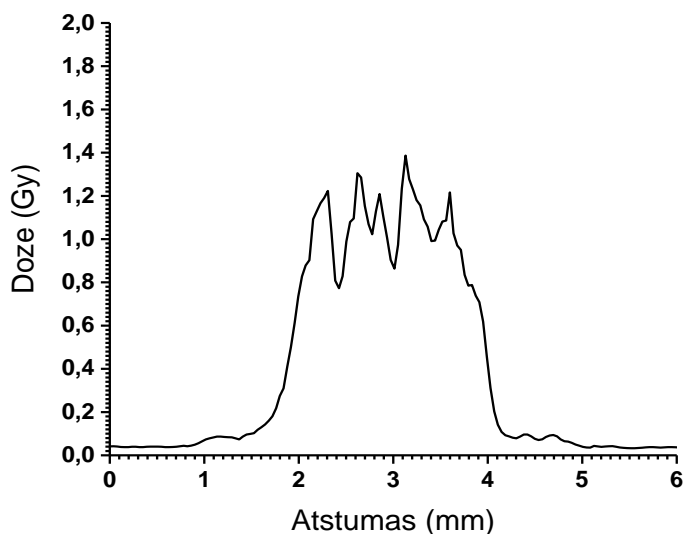
Mažinant vamzdelių skersmenį, vidutinė dozės vertės (intensyvumas) mažėja. 3.7 pav. pavaizduotas dozės pasiskirstymas fotonams pasiekus 4,5 mm vidinio skersmens vamzdelio

apačią. Grafike taip pat matomas aiškus dozių pokytis tarp užpildytos srities, stikliuko sienelių ir oro. Dozės vertė ties laipteliu yra 0,1 Gy. Vidutinė dozės vertė, sąlygota pro vamzdelio centre esančią ertmę praėjusių fotonų, yra apie 1,2 Gy.



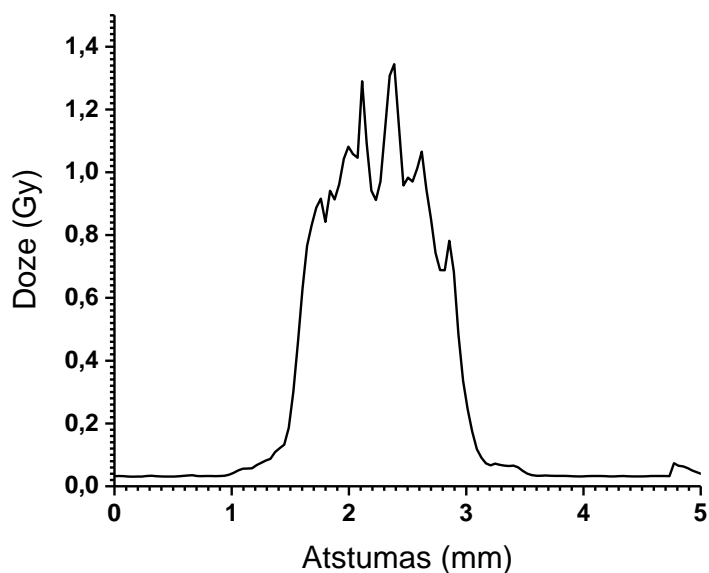
**3.8 pav.** Dozių pasiskirstymas fotonams perėjus 3 mm vidinio skersmens vamzdelį

Lyginant su doze, kurią sukelia per 5 mm skersmens vamzdelį praėję fotonai, fotonų sukelta dozė praėjus 3 mm skersmens vamzdelį yra apie 23 % mažesnė – vidutiniškai 1,0 Gy. Aiškiai matyti perėjimas tarp užpildytos konstrukcijos, vamzdelio sienelės ir tuščios ertmės (oro). Dėl fotonų sklaidos taip pat matyti netiesinis dozės sumažėjimas po vamzdelio sienelės. Kitoje vamzdelio pusėje stebima tokia pati situacija. Kadangi vamzdelių galų skersmenys nėra vienodi, vienas galas nuo kito gali skirtis per kelias dešimtąsias milimetro, todėl perėjimai tarp stiklinės sienelės ir oro nėra simetriški.



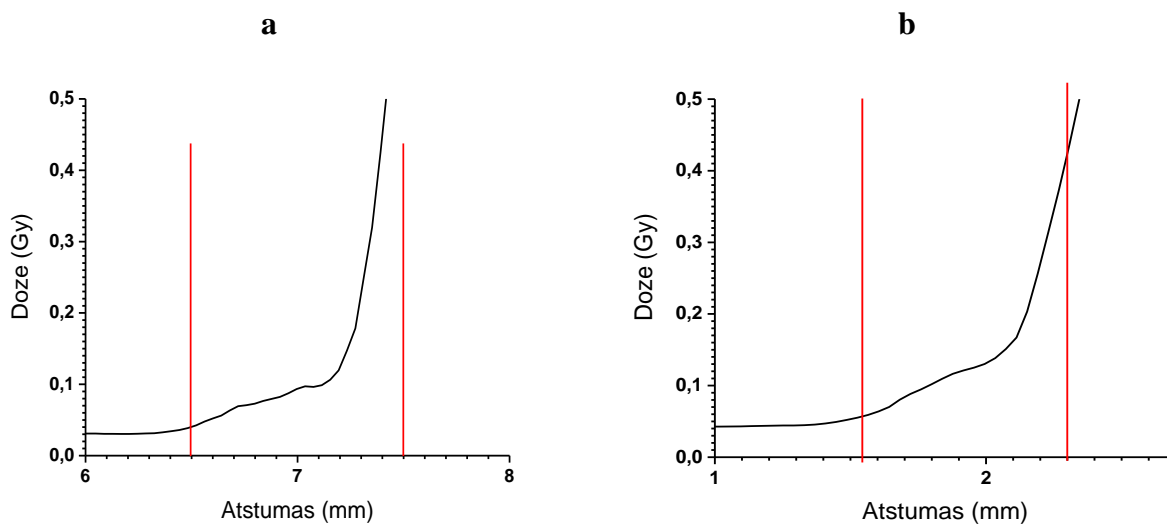
**3.9 pav.** Dozių pasiskirstymas fotonams perėjus 2,5 mm vidinio skersmens vamzdelį

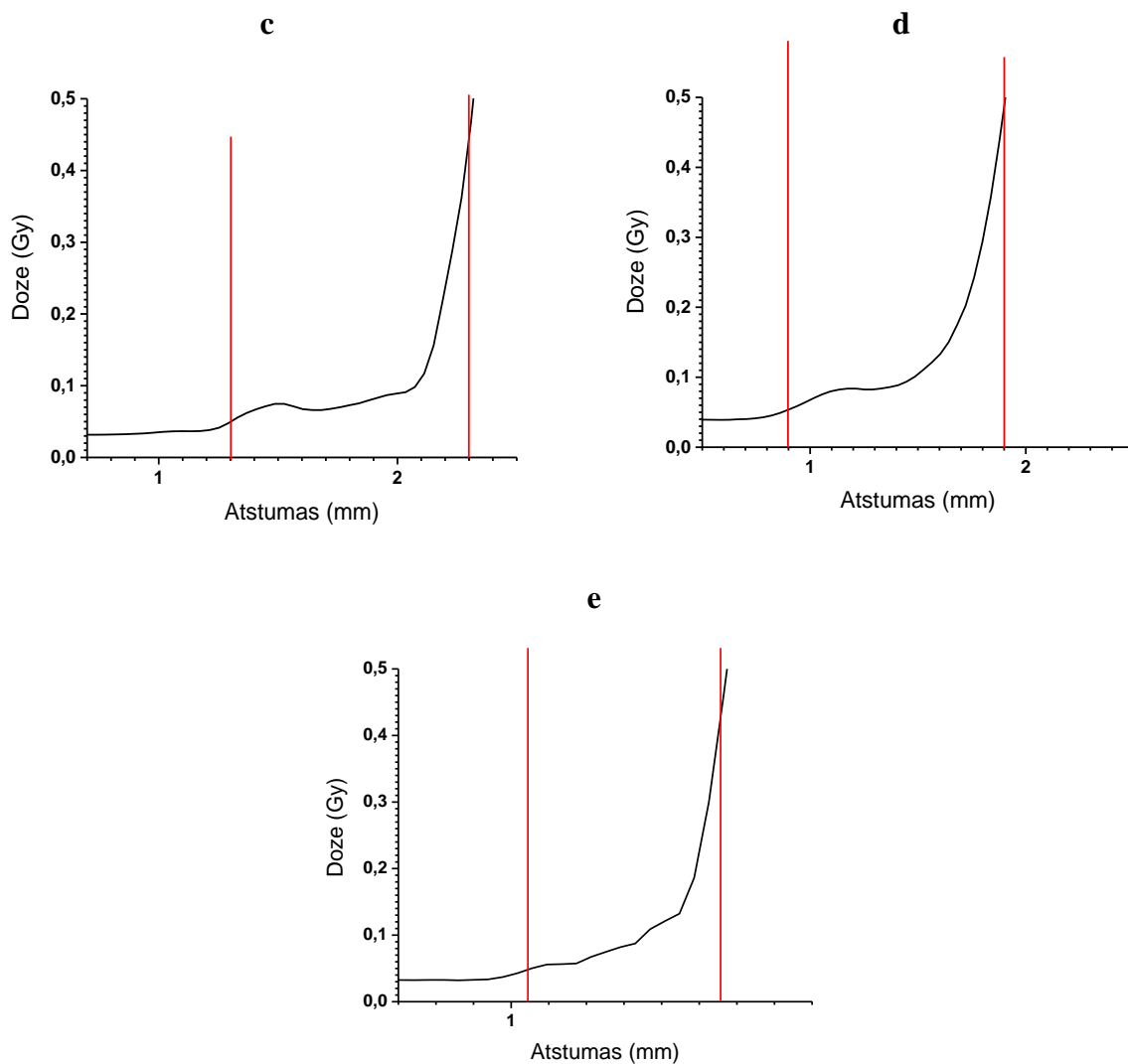
Dozės vertė, sąlygota fotonų, praėjusių per 2,5 mm vidinio skersmens vamzdelį, buvo vidutiniškai lygi 0,9 Gy. Tai yra apie 30 % mažiau, nei 5 mm skersmens vamzdelio atveju. Kaip ir praeituose grafikuose, taip ir šiame aiškiai matomas dozių pokytis dėl fotonų slopinimo stiklinėje vamzdelio sienelėje, po kuria dozė vertė svyruoja tarp 0,03 Gy ir 0,10 Gy.



**3.10 pav.** Dozių pasiskirstymas fotonams perėjus 1,5 mm vidinio skersmens vamzdelį

Pačių mažiausių vamzdelių, kurių vidinis skersmuo siekia 1,5 mm, o išorinis skersmuo 2,5 mm, atveju vidutinė dozė fotonams perėjus vamzdelį yra lygi 0,8 Gy. Tai yra apie 38% mažiau nei centriniame vamzdelyje, kurios vidinis skersmuo lygus 5 mm.





**3.11 pav.** Užpildytos konstrukcijos vamzdelių dozės priklausomybė, per centrą, išilgai x ašies: a) išorinis vamzdelio skersmuo 7 mm, vidinis 5 mm; b) išorinis vamzdelio skersmuo 6 mm, vidinis 4,5 mm; c) išorinis vamzdelio skersmuo 5 mm, vidinis 3 mm; d) išorinis vamzdelio skersmuo 4,5 mm, vidinis 2,5 mm; e) išorinis vamzdelio skersmuo 2,5 mm, vidinis 1,5 mm. Priartintas vaizdas rodo dozės didėjimą pereinant iš užpildytos konstrukcijos dalies į stiklinio vamzdelio sienelę ir perėjimą iš sienelės į orą

Visuose grafikuose matyti, jog nėra staigaus dozės sumažėjimo tarp tuščios ertmės vamzdyje ir užpildytos konstrukcijos dalies. 3.11 paveikslėlio a dalyje pavaizduotas detalizuotas dozių pasiskirstymas X ašies atžvilgiu fotonams perėjus išilgai vamzdelio, kurio išorinis skersmuo 7 mm, vidinis – 5 mm. Dozė po užpildytos konstrukcijos dalimi lygi 0,03 Gy. Artėjant prie stiklinės sienelės (maždaug 0,2 mm iki sienelės) matyti nežymus dozės padidėjimas nuo 0,03 Gy iki 0,04 Gy ties stiklinės sienelės riba. Ties vamzdelio sienelės viduriu, maždaug 0,5 mm nuo išorinės sienelės, dozės vertė lygi 0,1 Gy. Einant nuo sienelės centro link vamzdelio vidinės sienelės krašto matomas staigus dozės didėjimas. Dozė ties vamzdelio vidinės sienelės verte lygi 0,8 Gy. Apie 0,2 mm nuo vidinės sienelės dozė pasiekia vidutinę 1,3 Gy dozę. Analogiška situacija matoma ir 3.11 paveikslėlio b, c, d, ir e dalyse, kuomet likus apie 0,2 mm iki vamzdelių išorinės sienelės stebimas nedidelis dozės padidėjimas (apie 0,01 Gy). Pasiekus vamzdelių sienelės centrą dozė pradeda staigiai didėti ir perėjus vidinės sienelės ribą, apie 0,2

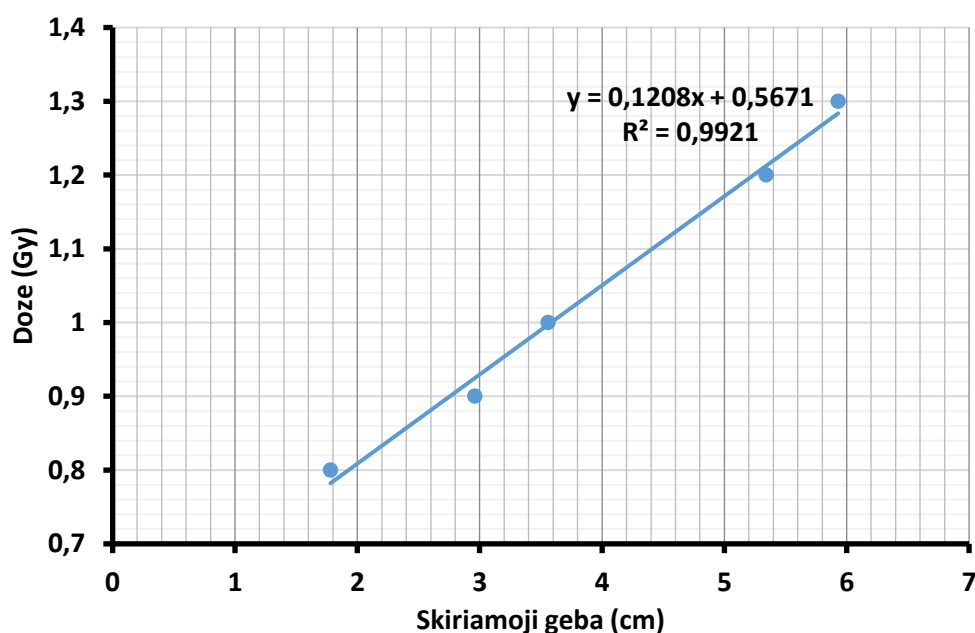
mm nuo sienelės, pasiekia vidutinę dozę: vamzdeliai su 4,5 mm vidiniu skersmeniu – 1,2 Gy, vamzdeliai su 3 mm vidiniu skersmeniu – 1 Gy, vamzdeliai su 2,5 mm vidiniu skersmeniu – 0,9 Gy ir vamzdeliai su 1,5 mm vidiniu skersmeniu 0,8 Gy. Tokio tipo dozių pasiskirstymas stebimas dėl skirtingų stiklo ir kolimatoriaus užpildo rentgeno absorbcinių savybių ir galimos fotonų sklaidos iš vamzdelio per sienelės.

### 3.4 Konstrukcijos skiriamoji geba

Naudojantis 1 formule buvo apskaičiuotos skirtingų skersmenų konstrukcijos skiriamosios gebos. Rezultatai pateikia 3.2 lentelėje.

**3.2 lentelė.** Konstrukcijoje naudotų skirtingo skersmens vamzdelių skiriamoji geba

Skylės vidinis skersmuo (cm)	Vamzdelio aukštis (cm)	Atstumas tarp šaltinio ir konstrukcijos (cm)	Skiriamoji geba (FWHM) (cm)
0,5	4,6	50	5,93
0,45			5,34
0,3			3,56
0,25			2,96
0,15			1,78

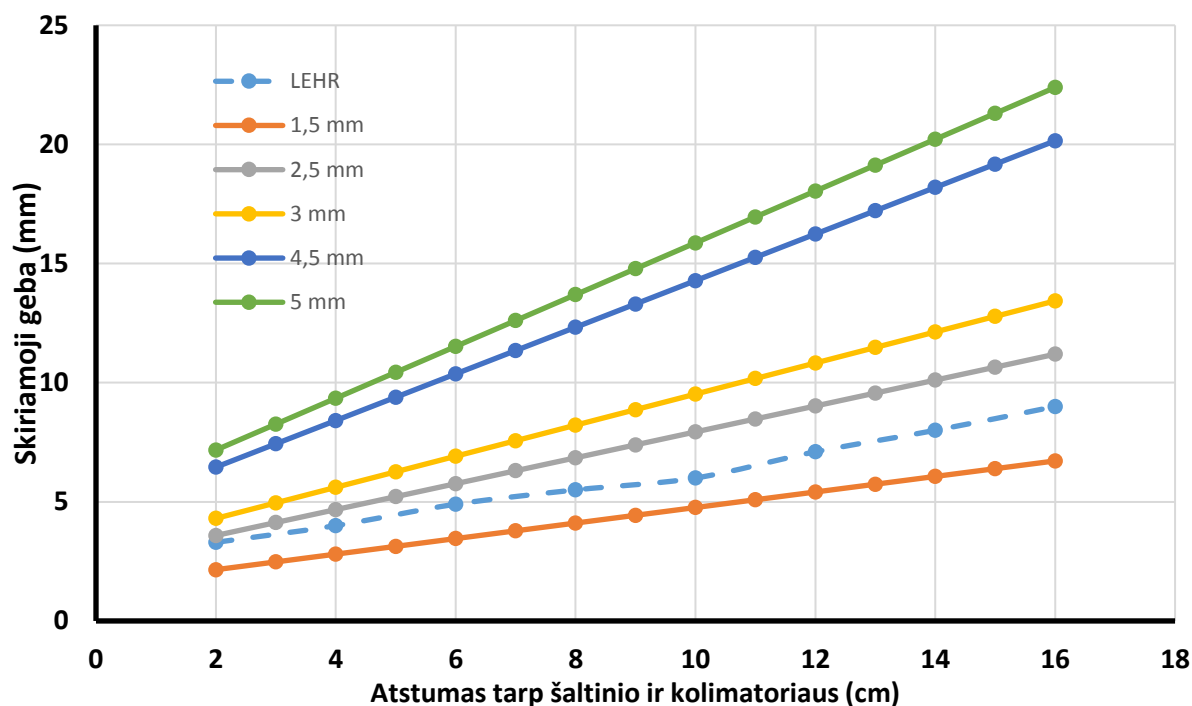


**3.12 pav.** Dozės priklausomybė nuo vamzdelių skersmens skiriamosios gebos

3.12 pav. Grafike pateikiama dozės priklausomybė nuo vamzdelių vidinio skersmens skiriamosios gebos. Sumažinus vamzdelių skersmenį nuo 5 mm iki 1,5 mm dozė sumažėja nuo 1,3 Gy iki 0,8 Gy.

Pagal 1 formulę kolimatoriaus skiriamoji geba priklauso nuo skylės skersmens, kolimatoriaus aukščio bei atstumo nuo šaltinio iki kolimatoriaus. Jei atstumas nuo šaltinio iki

kolimatoriaus lygus 0, tuomet kolimatoriaus skiriamoji geba priklauso tik nuo skylės skersmens. Kuomet atstumas nuo šaltinio iki kolimatoriaus nelygus 0, skiriamosios gebos vertės didėja, gaunamas prastesnis vaizdas. Šio darbo metu konstrukcijos apšvitai buvo naudotas rentgeno terapijos įrenginys Gulmay D3225. Apšvitos metu naudota 150 kV įtampa, apšvitos plotas 10 cm x 10 cm. Šiems parametrms gauti ant rentgeno terapijos įrenginio montuojamas H aplikatorius, kurio aukštis 50 cm. Dėl didelio atstumo nuo šaltinio iki kolimatoriaus, skiriamosios gebos vertės yra didelės. 3.13 paveikslėlyje pateikiama šiame darbe tirtos konstrukcijos skirtingu skersmens vamzdelių teorinės skiriamosios gebos vertės, apskaičiuotos remiantis 1 formule, bei LEHR kolimatoriaus skiriamosios gebos vertės, nustatytos remiantis 1.10 pav.



**3.13 pav.** Skirtingų skersmenų vamzdelių ir LEHR skiriamosios gebos vertės nuo atstumo tarp šaltinio ir kolimatoriaus

Brūkšnine linija pažymėta B. J. Min ir kt.<sup>5</sup> tirtu standartinio mažos energijos didelės skiriamosios gebos kolimatoriaus skiriamosios gebos vertės didinant atstumą tarp šaltinio ir kolimatoriaus. Kaip matyti iš 3.13 pav. apskaičiuotos teorinės 1,5 mm vidinio skersmens vamzdelio skiriamosios gebos vertės yra mažesnės nei LEHR kolimatoriaus. Naudojant 2,5 mm skersmens vamzdelius skiriamoji geba mažinant atstumą tarp šaltinio ir kolimatoriaus artėja prie LEHR kolimatoriaus skiriamosios gebos verčių. Taip pat iš gautų rezultatų (3.13 pav.) galima pastebėti, jog skiriamosios gebos vertės didėja sparčiau, kuomet didinamas vamzdelių skersmuo bei atstumas tarp šaltinio ir kolimatoriaus.

## IŠVADOS

1. Charakterizuota silicio volframo rūgštis. Nustatytas vandens molekulių kiekis gamintojo pateikiamoje silicio volframo rūgšties hidrato junginyje, kuris buvo lygus  $x = 24$ . Tiksli medžiagos formulė yra  $H_4SiW_{12}O_{40} \cdot 24H_2O$ . Nustatyta maksimali silicio volframo rūgšties vandeninio tirpalo koncentracija, kuri yra 79,69 % (masės dalis). Nustatyta, jog silicio volframo rūgšties tankio priklausomybė nuo koncentracijos nėra tiesinė.

2. Pagaminti penki skirtingos koncentracijos (15 %, 30 %, 45 %, 60 % ir 79,69 %) silicio volframo rūgšties vandeniniai tirpalai, išmatuotos jų pralaidumo vertės, apskaičiuotos švino ekvivalento vertės, kurios buvo 0,164 mmPb, 0,185 mmPb, 0,251 mmPb, 0,362 mmPb, 0,576 mmPb, atitinkamai. Nustatyta, jog 45 % koncentracijos silicio volframo rūgšties tirpalas atitinka rekomenduojamą 0,25 mmPb švino ekvivalento vertę.

3. Pagamintos dvi skirtingos konstrukcijos. Pirmoji konstrukcija pagaminta iš keturių sluoksnių organinio stiklo su centre integruotu stikliniu vamzdeliu, kurio vidinis skersmuo 5 mm. Bendras konstrukcijos aukštis 68 mm, užpildytos sluoksnio storis – 48 mm. Antroji konstrukcija buvo sudaryta iš trijų sluoksnių. Bendras konstrukcijos aukštis 46 mm, užpildo sluoksnio storis – 26 mm. Konstrukcijai panaudota 5 skirtingų skersmenų vamzdeliai, kurių vidiniai skersmenys buvo: 5 mm, 4,5 mm, 3 mm, 2,5 mm ir 1,5 mm.

4. Naudojantis rentgeno terapijos įrenginiu konstrukcijos buvo apšvitintos 1,0 Gy doze. Dozių pasiskirstymas buvo vizualizuotas rentgeno spinduliuotei jautraus savaryškio filmo plėvelėje. Iš gautų duomenų nustatyta, jog praėjusios pro konstrukciją su užpildu dozės vertės buvo vidutiniškai lygios 0,03 Gy. Nustatyta, jog mažėjant vamzdelio skersmeniui, mažėja praėjusių fotonų sąlygotos dozės vertės. Sumažinus vamzdelio skersmenį nuo 5,0 mm iki 1,5 mm dozė sumažėjo nuo 1,3 Gy iki 0,8 Gy.

5. Apskaičiuota kolimatoriaus vamzdelių skiriamoji geba panaudojant parametrus. Palyginus apskaičiuotas skirtingo skersmens vamzdelių skiriamosios gebos vertes su kitų autorių nurodytomis skiriamosios gebos vertėmis nustatyta, jog naudojant 1,5 mm vidinio skersmens vamzdelius, skiriamosios gebos vertės yra ~ 1,3 karto geresnės, nei standartinio mažos energijos didelės skiriamosios gebos kolimatoriaus.

## **PADĖKA**

Nuoširdžiai dėkoju vadovei prof. dr. Dianai Adlienei už pagalbą bei palaikymą viso darbo metu. Konsultantui, fizikinės ir neorganinės chemijos katedros doc. dr. Egidijui Griškoniui už konsultacijas ir pagalbą gaminant konstrukciją ir tiriant užpildo medžiagą. LSMU ligoninės Kauno klinikos filialo Onkologijos ligoninės, spindulinės terapijos skyriaus personalui už galimybę tirti ir testuoti bandinius realiomis sąlygomis klinikinėje aplinkoje.



## LITERATŪROS SARAŠAS

1. JIE, Z. H. U., et al. A compact gamma camera with scintillation array and parallel-hole collimator. *Nuclear Science and Techniques*, [interaktyvus] 2008, 19.5: 297-301. Prieiga per: doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-8042\(09\)60007-5](https://doi.org/10.1016/S1001-8042(09)60007-5)
2. MIN, B. J., et al. Design consideration of a multipinhole collimator with septa for ultra high-resolution silicon drift detector modules. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, [interaktyvus] 2009, 606.3: 755-761. Prieiga per: doi: [10.1016/j.nima.2009.05.019](https://doi.org/10.1016/j.nima.2009.05.019)
3. LEE, Seungwan, et al. Experimental Study of an Easily Controlled Ultra-High-Resolution Pixel-Matched Parallel-Hole Collimator with a Small Cadmium Zinc Telluride Pixelated Gamma Camera System. *Journal of Medical Imaging and Radiation Sciences*, [interaktyvus] 2016, 47.3: 276-282. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmir.2016.06.001>
4. TRINCI, G., et al. A new variable parallel holes collimator for scintigraphic device with validation method based on Monte Carlo simulations. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, [interaktyvus] 2010, 621.1: 406-412. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.05.023>
5. MIN, B. J., et al. Performance evaluation of a multi-pinhole collimator with vertical septa. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, [interaktyvus] 2011, 633.1: 61-65. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.nima.2010.12.144>
6. KHORSHIDI, Abdollah, et al. Evaluation of collimators' response: Round and hexagonal holes in parallel and fan beam. *Progress in biophysics and molecular biology*, [interaktyvus] 2012, 109.3: 59-66. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2012.03.003>
7. BERRY, F. J.; DERRICK, G. R.; MORTIMER, M. Identification and characterisation of stable phases of silicotungstic acid, H<sub>4</sub>SiW<sub>12</sub>O<sub>40</sub>·nH<sub>2</sub>O. *Polyhedron*, [interaktyvus] 2014, 68: 17-22. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.poly.2013.10.014>
8. KEGGIN, J. F. The Structure and Formula of 12-Phosphotungstic Acid. *Proc. R. Soc. Lond. A*, [interaktyvus] 1934, 144, 75-100. Prieiga per: doi: [10.1098/rspa.1934.0035](https://doi.org/10.1098/rspa.1934.0035)
9. *Polyoxometalate Molecular Science* (Eds. J.J. Borrás-Almenar, E. Coronado, A. Müller, M.T. Pope). NATO Science Series II., [interaktyvus] 2003, Vol 98, 475 p. [žiūrėta 2017-05-19]. ISBN 978-94-010-0091-8
10. LIM, S. H.; YOSHITAKE, H.; TATSUMI, T. Phase transition of SBA-1 induced by embedded heteropoly acids. *Studies in Surface Science and Catalysis*, [interaktyvus] 2003, 146, 125-128. Prieiga per: doi: [https://doi.org/10.1016/S0167-2991\(03\)80343-9](https://doi.org/10.1016/S0167-2991(03)80343-9)
11. LÓPEZ, F. X. Theoretical Study of the Basicity and the Redox Properties of Heteropolyanions. PhD thesis, [interaktyvus] 2003. [žiūrėta 2017-05-19]. ISBN 8468874272. Prieiga per: <http://hdl.handle.net/10803/9069>.
12. J. A. KERNAN. Dyes and other colorants in microtechnique and biomedical research. *Coloration Technology*, [interaktyvus] 2006, 122, 1-21. Prieiga per: doi: [10.1111/j.1478-4408.2006.00009.x](https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2006.00009.x)

13. ALBERTI, G.; CASCIOLA, M.. Composite Membranes for Medium-Temperature PEM Fuel Cells. *Annual Review of Materials Research.*, [interaktyvus] 2005, 33. 129-154. Prieiga per: doi: 10.1146/annurev.matsci.33.022702.154702
14. STAITI, P.; ARICO, A.S.; HOCEVAR, S.; ANTONUCCI, V. Physico-chemical characteristic of phosphotungstic acid solutions and electrolyte evaluation for application in fuel cells. *J. New Materials for Electrochemical Systems.*, [interaktyvus] 1998, 1, 1-6. [http://www.groupe.polymtl.ca/jnmes/archives/1998\\_01/v01n01a01\\_p001-006.pdf](http://www.groupe.polymtl.ca/jnmes/archives/1998_01/v01n01a01_p001-006.pdf)
15. TSUNASHIMA, R.; RICHMOND, C.; CRONIN, L. Exploring the mobility of nanoscale polyoxometalates using gel electrophoresis. *Chem. Sci.*, [interaktyvus] 2012, 3, 343–348 Prieiga per: doi: 10.1039/C1SC00542A
16. RAO, K. N.; DINGWALL, L. D.; GAI, P. L.; LEE, A. F.; TAVENER, S. J.; YOUNG, N. A.; WILSON, K. Synthesis and characterization of nanoporous phospho-tungstate organic–inorganic hybrid materials. *J. Mater. Chem.*, [interaktyvus] 2008, 18, 868-874. DOI:10.1039/B715826B
17. KANG, Z.; WANG, E.; JIANG, M.; LIAN, S. Synthesis and characterization of polyoxometalate nanowires based on a novel microemulsion process, *Nanotechnology*, [interaktyvus] 2004, 15, 55-58. Prieiga per: doi: 10.1088/0957-4484/15/1/010
18. KAEWJANG, S., et al. New Gadolinium Based Glasses for Gamma-Rays Shielding Materials. *Nuclear Engineering and Design*, [interaktyvus] 2014, vol. 280. pp. 21-26. Prieiga per: doi: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2014.08.030>
19. D3225 orthovoltage x-ray therapy system [interaktyvus], 2011 [žiūrėta 2017 05 09]. Prieiga per internetą: [http://www.medicalservicesrl.com/radiotherapy-equipment/flash/\\_upload/original/allegati000003\\_d3225-web.pdf](http://www.medicalservicesrl.com/radiotherapy-equipment/flash/_upload/original/allegati000003_d3225-web.pdf).
20. MEDINA, Luis-Alberto, et al. Use of an orthovoltage X-ray treatment unit as a radiation research system in a small-animal cancer model. *Journal of Experimental & Clinical Cancer Research*, [interaktyvus] 2008, 27.1: 57. Prieiga per: doi: 10.1186/1756-9966-27-57
21. THOMAS, M. D. R.; WARRINGTON, A. P. GafChromic® RTQA film for routine quality assurance of high-energy photon beams. *Physics in medicine and biology*, [interaktyvus] 2006, 51.6: 1439. Prieiga per: doi: 10.1088/0031-9155/51/6/005