

การจำลองระบบแก้ว Gd_2O_3 - TeO_2 - B_2O_3 เพื่อศึกษาสมบัติการกำบังรังสีแกมมาไอออน

Simulation of Gd_2O_3 - TeO_2 - B_2O_3 Glass System to investigate the Ionizing Radiation Shielding Properties

กิตติศักดิ์ ศรีวงศ์ษา^{1*}, พันธุ์ศักดิ์ กล้ากลมจิตร², รัฐนันท์ ลิ้มเกียรติเชิดชู³, อภิขญา คัญชกวัฒน์⁴,
อัยริน ต้นติวัชรกุลธร⁵, สุนันทศักดิ์ ระว่างวงศ์⁶, จุมพล ขอบขำ⁷

Kittisak Sriwongsa^{1,2*}, Punsak Glumglomchit³, Ratthanant Limkiatcherdchoo³, Apichaya
Kinchokawat³, Iyarin Tantiwatcharakultorn³, Sunantasak Ravangvong⁴, Chumphon Khobkham⁵

¹หลักสูตรพลศึกษาศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร นครปฐม

โรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยศิลปากร (มัธยมศึกษา) นครปฐม

^{2,3,4,5}โรงเรียนหัวหินวิทยาลัย ประจวบคีรีขันธ์

⁶สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี

⁷คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธนบุรี

¹Lecturers responsible for Bachelor of Education Program in Physics, Faculty of Education, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand

¹The demonstration school of Silpakorn University (secondary), Nakhon Pathom, Thailand

^{2,3,4,5} Huahin Vitthayalai School, Prachuapkhirikhan, Thailand

⁶Division of Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Phetchaburi Rajabhat University, Thailand

⁷Faculty of Engineering, Thonburi University, Thailand

Corresponding Author. Tel: 08 5215 8754, E-mail: Sriwongsa_k@silpakorn.edu

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อจำลองระบบแก้ว xGd_2O_3 - $(80-x)TeO_2$ - $20B_2O_3$ สำหรับศึกษาสมบัติการกำบังรังสีแกมมาไอออน (มีประจุและไม่มีประจุ) ที่มีค่าการเปลี่ยนแปลงค่าของแกมมาไอออนที่ความเข้มข้น 0, 5, 10, 15, และ 20 เปอร์เซ็นต์โมล ตามลำดับ โดยรังสีชนิดที่มีประจุที่ดำเนินการพิจารณาได้แก่ ไฮโดรเจนไอออนและคาร์บอนไอออน ในขณะที่รังสีประเภทที่ไม่มีประจุที่พิจารณาได้แก่ รังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ซึ่งรังสีชนิดที่มีประจุได้ดำเนินการศึกษาค่าการหยุดอิเล็กตรอน (Electronic stopping) การหยุดนิวเคลียร์ (Nuclear stopping) และช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range, PR) ที่ช่วงพลังงาน 70 ถึง 250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ด้วยโปรแกรม SRIM ขณะที่รังสีชนิดที่ไม่มีประจุได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล

Received 14-10-2021

Revised 29-11-2021

Accepted 11-12-2021

(Mass attenuation coefficient, μ_m) และเลขอะตอมยังผล (Effective atomic number: Z_{eff}) ที่ช่วงพลังงาน 10^{-5} ถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ โดยใช้โปรแกรม Phy-X/PSD ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความน่าเชื่อถืออยู่ในปัจจุบัน จากผลการวิจัยทำให้ทราบว่า การเพิ่มปริมาณของแกโดลิเนียมออกไซด์ในแก้วตัวอย่างจะทำให้สมบัติในการกำบังรังสีทั้งประเภทที่มีประจุและไม่มีประจุดีขึ้น ซึ่งตัวอย่างที่ดีที่สุดในการวิจัยก็คือ $20\text{Gd}_2\text{O}_3-60\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ (Gd5) ทั้งนี้เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของแกโดลิเนียมทำให้เกิดโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับประจุกับตัวกลางเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

คำสำคัญ : รังสีแกมมา ไอออน ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย สมบัติการลดทอนเชิงมวล แก้ว

Abstract

The objectives of this research is to simulate $x\text{Gd}_2\text{O}_3-(80-x)\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ glass system for investigation of the ionizing radiation (charged and uncharged radiation) shielding properties which varies the concentration of Gadolinium (III) oxide (Gd_2O_3) at 0, 5, 10, 15 and 20 mol% respectively. The charged particles such as hydrogen ions and carbon ions while uncharged particles such as X-ray and gamma ray were used to investigate the properties. The theoretical parameters of charged particles such as electronic stopping, nuclear stopping and projected range (PR) were estimated by using the SRIM program in the energy range of 70–250 MeV. The values of uncharged particles such as mass attenuation coefficient (μ_m) and effective atomic number (Z_{eff}) were also determined at energy ranging $10^{-3}-10^5$ MeV by using the Phy-X/PSD program. This program is widely used and reliable at present. The results indicated that the increasing concentration of Gadolinium (III) oxide in glass samples provided excellent charged particles and uncharged particles radiation shielding which resulted in this $20\text{Gd}_2\text{O}_3-60\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ (Gd5) glass sample. This was due to the increasing Gadolinium (III) oxide content in glass which increased the probability of interaction between ionizing radiation with matter.

Keywords: Ionizing radiation, Projected range, Mass attenuation coefficient, Glass

1. บทนำ

แม้ว่าการนำรังสีแกมมาไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ จะทำให้เกิดการพัฒนาอย่างมากในเทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่นด้านโทรคมนาคม

อุตสาหกรรมเคมี และอวกาศ แต่ก็เป็นอันตรายต่อมนุษย์ อุปกรณ์ และพืช ดังนั้นการสร้างวัสดุป้องกันรังสีที่เหมาะสมจึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อลดการสัมผัสกับรังสีสำหรับสิ่งที่อยู่ใกล้กับบริเวณที่เกี่ยวข้องกับรังสีทั้งหมด จากสมบัติของวัสดุ เช่น ความโปร่งใส

ความแข็งแรง ความคงตัวทางความร้อนสูง ทนต่อการกัดกร่อน การประดิษฐ์ง่าย เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และปลอดภัย แก้วจึงถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในวัสดุกำบังรังสีเมื่อเทียบกับวัสดุอื่น ๆ เช่น ตะกั่ว โพลีเมอร์ คอนกรีต และดินเหนียว [1-4] แก้วเทลลูไรต์มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าแก้วประเภทอื่น ๆ เนื่องจากแก้วเทลลูไรต์มีพลังงานโฟนอนสัมพัทธ์ (Relatively phonon energy) ต่ำ ($\sim 700 \text{ cm}^{-1}$) ดัชนีการหักเหของแสงสูง (~ 2.0) ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกสูง ความต้านทานการกัดกร่อนที่ดี สามารถให้แสงผ่านได้ทั้งช่วงที่ตามองเห็นและใกล้อินฟราเรด ($\sim 360\text{--}6500 \text{ nm}$) มีความสามารถในการละลายธาตุหายาก (RE) ดี มีความเสถียรทางความร้อนและสารเคมีสูง [5] ดัชนีการหักเหของแสงแบบไม่เป็นเชิงเส้นสูงและพลังงานโฟนอนต่ำ (Low phonon energy) ทำให้แก้วเทลลูไรต์เป็นตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับงานด้านเลเซอร์ [6] ความเสถียรสูงต่อการคายน้ำ ปลอดภัย และทนต่อความชื้นเป็นเวลานานเป็นสมบัติที่โดดเด่นเพิ่มเติม นอกจากนี้ อุณหภูมิการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างต่ำและสมบัติความหนาแน่นสูงยังเอื้อต่อการใช้งานที่หลากหลายเมื่อเปรียบเทียบกับแก้วแบบเดิมอื่น ๆ แก้วเทลลูไรต์ใช้งานได้ดีกว่าแก้วฟอสเฟตและบอเรต เนื่องจากไม่มีสมบัติดูดความชื้น [7] ดังนั้นในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ความต้านทานการกัดกร่อนจึงมีความสำคัญทางเทคโนโลยีอย่างมาก การพัฒนาวัสดุที่สามารถกำบังรังสีสำหรับห้องรังสีวินิจฉัยมีความสำคัญอย่างมากต่ออนาคตของสาขารังสีวิทยา สมบัติที่สำคัญที่สุดของวัสดุที่จะใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี

คือ การลดทอนโฟตอนของรังสีแกมมา และสามารถทำได้โดยการใช้วัสดุที่มีองค์ประกอบเลขอะตอมสูงซึ่งมีค่าความหนาแน่นสูง สมบัติที่สำคัญอื่น ๆ ของวัสดุกำบังรังสีแบบใหม่คือง่ายในการขึ้นรูปและการผลิตตัวอย่างตามที่ต้องการของแต่ละสถานที่ที่จะนำไปใช้งาน สมบัติเหล่านี้สามารถพบได้ในระบบแก้วหลายระบบที่มีความสามารถดังกล่าว [10,11,13–15] แก้วที่มีองค์ประกอบของเลขอะตอมที่สูง ได้แก่ เทลลูไรต์ ($Z = 52$) นิยมนำมาเป็นโครงสร้างหลักของแก้วเพื่อประยุกต์ใช้งานด้านแก้วกำบังรังสี เนื่องจากสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และนิวตรอนพลังงานสูง [8,9,12,16–19] การจำลองสมบัติการกำบังรังสีของแก้วเทลลูไรต์บอเรต โดยใช้ Geant4, โปรแกรมคอมพิวเตอร์ Phy-X, XCOM, การจำลอง FLUKA, โปรแกรม Phy-X/PSD และ Phy-X/ZEXTRAa ที่พัฒนาขึ้นใหม่ แสดงให้เห็นว่าแก้วเทลลูไรต์บอเรตเหล่านี้มีประโยชน์สำหรับการประยุกต์ใช้ในการกำบังรังสีแกมมา อิเล็กตรอน และนิวตรอน [20–24] แกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) มีผลอย่างมากต่อสมบัติทางแสงของแก้วเทลลูไรต์ เนื่องจากมีเส้นสเปกตรัมที่คมชัด ดัชนีการหักเหของแสงสูง และมีศักยภาพสูงในการผลิตการปล่อยเลเซอร์ [25] จากการศึกษาค่าความหนาครึ่งค่า (Half value layer) และเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วเมื่อเพิ่มปริมาณของ Gd_2O_3 ในแก้ว ค่าความหนาครึ่งค่าจะลดลงและค่าเลขอะตอมยังผลจะเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้น Gd_2O_3 ช่วยทำให้แก้วมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่สูงขึ้น ส่งผลทำให้แก้วมีสมบัติต่อการกำบังรังสีที่ดีขึ้น [26–28] ในปัจจุบันประเทศไทยได้นำรังสี

ก่อไอออนมาใช้ในการรักษาและบำบัดโรค โดยเฉพาะโรคมะเร็ง เช่น การนำรังสีก่อไอออนประเภทที่มีประจุไฟฟ้ามาใช้ คือ การใช้อนุภาคบำบัด แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลัก ได้แก่ การรักษาด้วยอนุภาคโปรตอน (Proton beam therapy) ได้มาจากการแยกไฮโดรเจนไอออน และ การรักษาด้วยอนุภาคไอออนหนัก (Heavy-ion beam therapy) ซึ่งจะใช้ธาตุคาร์บอนในการรักษา และการนำรังสีก่อไอออนประเภทที่ไม่มีประจุไฟฟ้ามาใช้ ได้แก่ รังสีแกมมา ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของธาตุบางชนิด ได้แก่ ธาตุเรเดียม ธาตุซีเซียม และธาตุโคบอลต์ เป็นต้น และรังสีเอกซ์ที่เกิดจากเครื่องผลิตรังสี ซึ่งรังสีก่อไอออนทั้งสองประเภทต่างก็มีอันตรายต่อผู้ที่ใช้งานและผู้ป่วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องสร้างวัสดุกำบังรังสีเพื่อนำมาใช้งานร่วมกับเครื่องมือและใช้ป้องกันผู้ที่มีส่วนร่วมในการใช้งาน

ระบบแก้ว $x\text{Gd}_2\text{O}_3-(80-x)\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ โดย $x = 0, 5, 10, 15,$ และ 20 เปอร์เซ็นต์โมล จะนำมาวิเคราะห์สมบัติต่อการกำบังรังสีก่อไอออนประเภทที่มีประจุ (ไฮโดรเจนไอออนและคาร์บอนไอออน) และประเภทที่ไม่มีประจุ (รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์) เพื่อให้ครอบคลุมด้านการนำไปประยุกต์ใช้งานจริง กรณีสมบัตินี้ด้านการกำบังรังสีก่อไอออนประเภทที่มีประจุจะศึกษาในช่วงพลังงาน 70 ถึง 250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่ใช้ในการบำบัดรักษาโรคมะเร็งโดยการรักษาด้วยอนุภาคโปรตอน [29] โดยใช้โปรแกรม SRIM [30] ขณะที่รังสีก่อไอออนประเภทที่ไม่มีประจุจะศึกษาในช่วงพลังงาน 10^{-5} ถึง 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงพลังงานที่มากพอสำหรับนำมาประยุกต์ใช้

งานกับรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม Phy-X/PSD [31] พารามิเตอร์ที่นำมาวิเคราะห์ ได้แก่ การหยุดอิเล็กตรอนิกส์ (Electronic stopping) การหยุดนิวเคลียร์ (Nuclear stopping) ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range: PR) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient: μ_m) และเลขอะตอมยังผล (Effective atomic number: Z_{eff})

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การกำบังรังสีก่อไอออนประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน)

อัตราการสูญเสียพลังงานของไอออนในระบบแก้วตัวอย่างแบ่งออกเป็นสองกลไกที่ต่างกันของการสูญเสียพลังงาน ได้แก่ พลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังนิวเคลียสของระบบแก้วตัวอย่าง (เรียกว่าการหยุดนิวเคลียร์) และพลังงานที่ถ่ายโอนโดยไอออนไปยังอิเล็กตรอนของระบบแก้วตัวอย่าง (เรียกว่า การหยุดแบบอิเล็กตรอนิกส์) ความสำคัญสัมพัทธ์ของกระบวนการของอันตรกิริยาต่าง ๆ ระหว่างไอออนกับตัวกลางของระบบแก้วตัวอย่างจะขึ้นอยู่กับความเร็วของไอออนเป็นส่วนใหญ่ รวมถึงจะขึ้นอยู่กับประจุของไอออน และเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วตัวอย่าง สำหรับอัตราการสูญเสียพลังงาน ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range) คือระยะห่างเฉลี่ยจากพื้นผิวของระบบแก้วตัวอย่างที่ไอออนฝังตัวเข้าไปอย่างเข้มข้น เป็นอีกหนึ่งพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงความเสียหายที่เกิดขึ้นจากการชนกันระหว่างไอออนกับอะตอมแลตทิซ (Lattice atom) ของระบบแก้วตัวอย่าง

การหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์ เกิดจากการชนทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งไอออนทั้งสองที่เคลื่อนที่นั้นจะไปกระตุ้นหรือ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากอะตอมในระบบแก้วตัวอย่าง การหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์สำหรับไอออนช้าจะแปรผันตรงกับความเร็วยของไอออน ในขณะที่ไอออนเร็วการหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์จะลดลงเมื่อพลังงานจลน์เพิ่มขึ้น กรณีที่พลังงานไอออนสูง อัตราการสูญเสียพลังงานที่เกิดจากการหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์ สามารถคำนวณได้จาก [32]

$$-\frac{dE}{dx}\bigg|_e = \frac{2\pi Z_1^2 e^4}{E} N Z_2 \left(\frac{M_1}{m_e}\right) \ln\left(\frac{2m_e v^2}{I}\right) \quad (1)$$

โดย $-\frac{dE}{dx}\bigg|_e$ คือ อัตราการสูญเสียพลังงานที่เกิด

จากการหยุดแบบอิเล็กทรอนิกส์

Z_1 คือ ประจุของไอออน

E คือ พลังงานของไอออนที่เคลื่อนที่

N คือ ความหนาแน่นของอะตอมในตัวกลางหยุด

Z_2 คือ เลขอะตอมของอะตอมหยุด

M_1 คือ มวลของไอออน

m_e คือ มวลของอิเล็กตรอนในตัวกลางหยุด

v คือ ความเร็วของไอออนที่ผ่านอิเล็กตรอนในตัวกลางหยุด

I คือ พลังงานไอออนไนซ์เฉลี่ย

ในการหยุดนิวเคลียร์ จะกล่าวถึงการสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยที่เกิดจากการชนกัน

แบบยืดหยุ่นระหว่างไอออนกับอะตอมเป้าหมาย อำนาจหยุดนิวเคลียร์หรืออัตราการสูญเสียพลังงานนิวเคลียร์คือพลังงานที่สูญเสียไปโดยอนุภาคเคลื่อนที่เนื่องจากการชนกันแบบยืดหยุ่นต่อความยาวหน่วยที่เคลื่อนที่เข้าไปในเป้าหมาย ความน่าจะเป็นของอนุภาคที่มีพลังงาน E เกิดการชนขณะเดินทางเป็นระยะทาง dx ซึ่งส่งผลให้สูญเสียพลังงานระหว่าง T และ $T + dT$ การสูญเสียพลังงานเฉลี่ยโดยอนุภาคเคลื่อนที่ในระยะทาง dx หาได้จาก [33]

$$-\frac{dE}{dx}\bigg|_n = N \int_{T_{\min}}^{T_{\max}} T \frac{d\sigma(E)}{dT} dT \quad (2)$$

โดย $-\frac{dE}{dx}\bigg|_n$, $\frac{d\sigma(E)}{dT}$ คือ อำนาจหยุด

นิวเคลียร์ และภาคตัดขวางอนุพันธ์ของการส่งผ่านพลังงาน

T_{\min} และ T_{\max} คือ ค่าต่ำสุด และค่าสูงสุด

ในการถ่ายโอนพลังงาน กล่าวคือเป็นพลังงานที่จำเป็นสำหรับการแทนที่อะตอมจากตำแหน่งแลตทิซมีค่าประมาณ 20–30 อิเล็กตรอนโวลต์

ช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range, PR) คือ ความยาวเส้นทางเฉลี่ยทั้งหมดของโปรเจกไทล์ไอออนที่วัดตามทิศทางของเหตุการณ์ ที่เกิดขึ้นในระหว่างที่โปรเจกไทล์ไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางเป้าหมาย โดยสัมพันธ์กับช่วง R ที่เป็นระยะทางทั้งหมดที่โปรเจกไทล์เคลื่อนที่ในตัวกลางเป้าหมายจนหยุดนิ่ง หาได้จาก [34]

$$PR \cong \frac{R}{1+(M_2/3M_1)} \quad (3)$$

โดย M_2 คือ มวลของเป้าหมาย
พารามิเตอร์ทั้งสามนี้สามารถคำนวณได้

โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ The Stopping and
Ion Ranges in Matter (SRIM) [33]

**การกำบังรังสีกัมมาไอออนประเภทที่ไม่มีประจุ
ไฟฟ้า (รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์)**

ในการศึกษาทางทฤษฎีของค่าต่าง ๆ ที่
เกี่ยวข้องกับการกำบังรังสีกัมมาไอออนประเภทที่ไม่มี
ประจุไฟฟ้า (รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์) ได้แก่ ค่า
สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (μ_m) และค่าเลข
อะตอมยังผล (Z_{eff}) ได้รับมาจากซอฟต์แวร์ Phy-
X/PSD ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลคำนวณ
ได้จาก “กฎการผสม (Mixture rule)” ดังสมการที่
(4) [35-37]

$$\mu_m = \sum_i w_i (\mu_m)_i \quad (4)$$

เมื่อ w_i คือ สัดส่วนโดยน้ำหนักของแต่ละธาตุ
($\mu_m)_i$ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของ
แต่ละธาตุ

การคำนวณหาค่าเลขอะตอมยังผล ซึ่ง
นิยามของค่าเลขอะตอมยังผลคือ ค่าเฉลี่ยของเลข
อะตอมในสารที่เป็นสารประกอบหรือของผสม
ซึ่งอาจมีค่าไม่คงที่ขึ้นกับอันตรกิริยาระหว่างโฟตอน
ของรังสีตกกระทบกับสารนั้น นิยามโดยจากสมการ
ที่ (5)

$$Z_{eff} = \frac{\sigma_{t,a}}{\sigma_{t,el}} \quad (5)$$

โดย $\sigma_{t,a}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยาทั้งหมด
ต่ออะตอมซึ่งมีสมการที่ (6)

$$\sigma_{t,a} = \frac{1}{N_A} \sum f_i A_i (\mu_m)_i \quad (6)$$

และ $\sigma_{t,el}$ คือ ภาคตัดขวางรวมของอันตรกิริยา
ทั้งหมดต่ออิเล็กตรอนซึ่งมีสมการที่ (7)

$$\sigma_{t,el} = \frac{1}{N_A} \sum \frac{f_i A_i}{Z_i} (\mu_m)_i \quad (7)$$

เมื่อ N_A คือ ค่าคงที่อวอกาโดร 6.02×10^{23}
 A_i คือ เลขมวลของธาตุแต่ละชนิดในสาร
 Z_i คือ เลขอะตอมของธาตุแต่ละชนิดใน
สาร

f_i คือ อัตราส่วนของจำนวนอะตอมของ
ธาตุแต่ละชนิดในสารต่อมวล 1 กรัม กับจำนวน
อะตอมทั้งหมดของสารต่อมวล 1 กรัม

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการศึกษาทางทฤษฎีของการจำลองระบบ
แก้ว $xGd_2O_3-(80-x)TeO_2-20B_2O_3$ โดย x คือ
ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10, 15, และ 20
เปอร์เซ็นต์โมล ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของระบบ
แก้วตัวอย่างนี้เพื่อนำไปวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ
สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีกัมมาไอออนแสดง
ดังตารางที่ 1

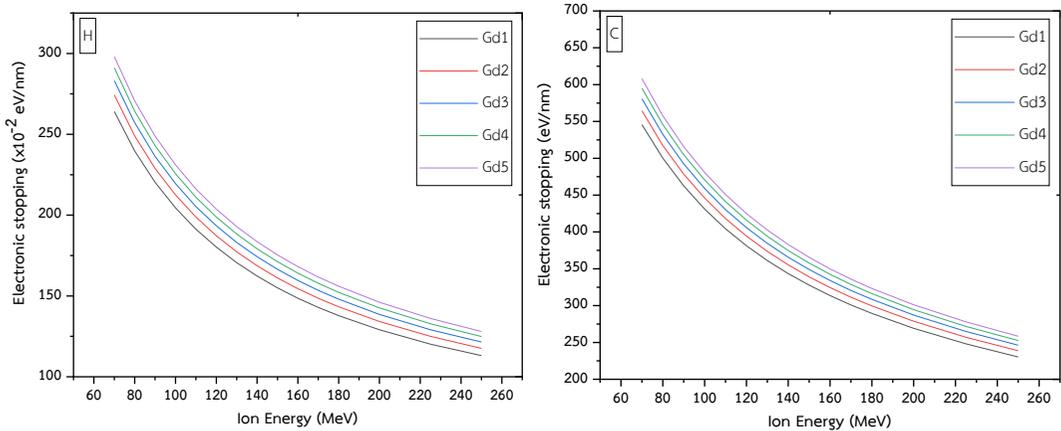
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โมล) ของระบบแก้วตัวอย่าง

รหัสระบบแก้ว	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์โมล)		
	Gd ₂ O ₃	TeO ₂	B ₂ O ₃
Gd1	0	80	20
Gd2	5	75	20
Gd3	10	70	20
Gd4	15	65	20
Gd5	20	60	20

การกำบังรังสีแกมมาไอออนประเภทที่มีประจุไฟฟ้า (ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน)

เมื่อไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนทะลุผ่านเข้าไปภายในระบบแก้วตัวอย่างทั้งห้า ทั้งสองไอออนจะเกิดการชนกันเป็นชุดกับอะตอมและอิเล็กตรอนในระบบแก้วตัวอย่าง ในการชนกันเหล่านี้ไอออนที่ตกกระทบจะสูญเสียพลังงานไป ขึ้นอยู่กับพลังงาน มวล และเลขอะตอมของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน รวมทั้งมวล เลขอะตอม และความหนาแน่นของระบบแก้วตัวอย่าง ภาพที่ 1 แสดงการหยุดอิเล็กตรอนของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนในช่วงพลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอน-โวลต์ ตัวอย่างแก้ว Gd5 > Gd4 > Gd3 > Gd2 > Gd1 ตามลำดับ ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าระบบแก้วตัวอย่าง Gd5 ส่งผลทำให้ไอออนที่ตกกระทบสูญเสีย

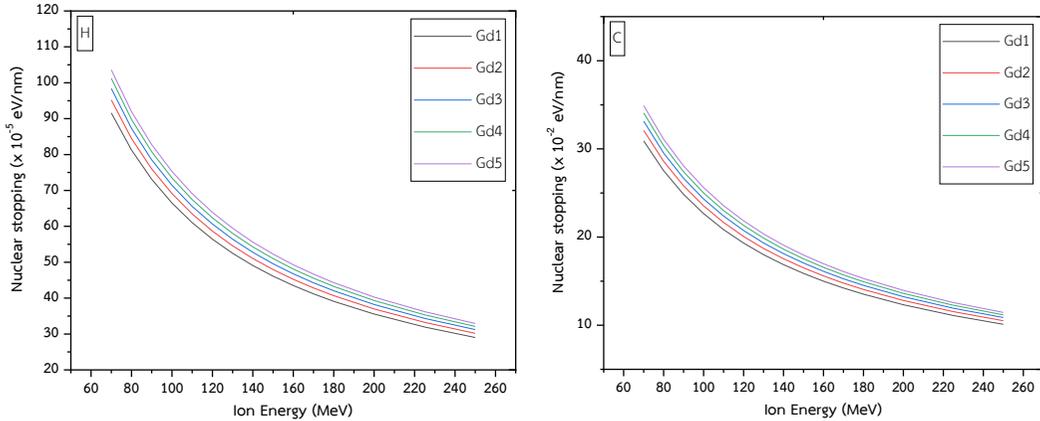
พลังงานมากที่สุด สิ่งนี้เกิดจากการเพิ่มปริมาณเปอร์เซ็นต์โมลของแกดโกลิเนียมซึ่งจะทำให้ค่าของเลขอะตอมยังผลของระบบแก้วเพิ่มมากขึ้นโดยสอดคล้องกับภาพที่ 5 ดังนั้นจึงทำให้แก้ว Gd5 มีโอกาสในการหยุดอิเล็กตรอนมากขึ้น และกรณีที่มีการหยุดอิเล็กตรอนจากคาร์บอนไอออนมีค่ามากกว่าการหยุดอิเล็กตรอนจากไฮโดรเจน-ไอออน เนื่องจากคาร์บอนไอออนมีมวลและเลขอะตอมสูงกว่าไฮโดรเจนไอออน ยิ่งไปกว่านั้นจะเห็นว่าแนวโน้มพลังงานของไอออนเพิ่มมากขึ้นค่าการหยุดอิเล็กตรอนก็จะลดลง เหตุผลเนื่องจากเกิดการถ่ายโอนพลังงานของไอออนเนื่องจากการชนกันระหว่างไอออนกับอิเล็กตรอน โดยเป็นการชนกันแบบไบนารี (Binary collisions) [38]



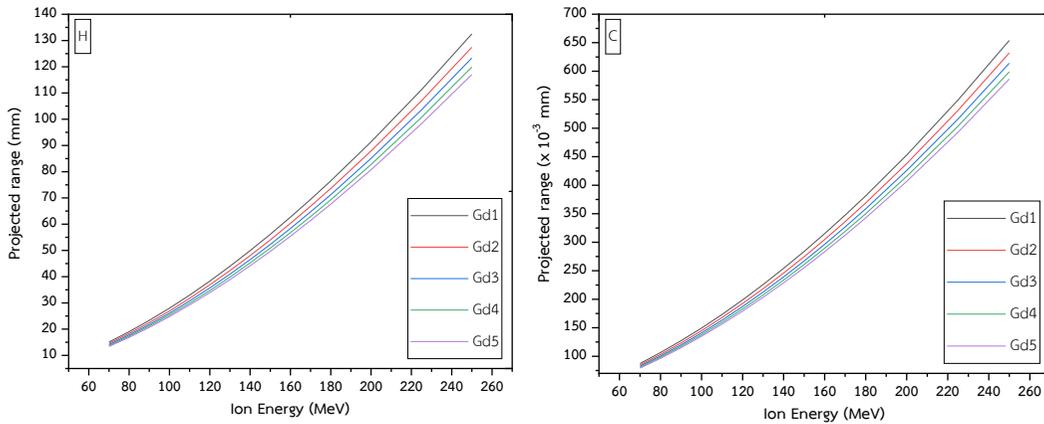
ภาพที่ 1 การหยุดอิเล็กตรอนของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

เมื่อไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในบริเวณผิวเนื้อของระบบแก้ว ตัวอย่าง ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนจะเกิดการชนกับอะตอมของระบบแก้วตัวอย่างที่อยู่เบื้องหน้าทำให้เกิดการเบี่ยงเบนทิศทางเคลื่อนที่ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนจากทิศทางเดิม อิทธิพลหลักที่ส่งผลทำให้ไอออนเปลี่ยนทิศทางของการกระเจิงเกิดจากการชนของไอออนกับอะตอมในแลตทิซแต่ละตัว โดยจะเกิดการชนแบบไบนารี เหตุการณ์การชนกันที่ง่ายที่สุดคือการชนกันระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนกับนิวเคลียสของอะตอม โดยมีเงื่อนไขว่าค่าเส้นทางอิสระเฉลี่ย (Mean free path) ระหว่างการชนกันนั้นจะต้องมากกว่าระยะห่างระหว่างอะตอม โมเมนตัมของอะตอมของระบบแก้วที่หดรตัวเป็นพาราเมเตอร์ที่กำหนดจำนวนความเสียหายที่เกิดขึ้นในระบบแก้วตัวอย่าง โมเมนตัมที่ถ่ายโอนไปยังอะตอมที่หดรตัวยัง

เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการสูญเสียพลังงานของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออน เนื่องจากการชนกันของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนกับนิวเคลียสในอะตอมของระบบแก้วตัวอย่าง ภาพที่ 2 แสดงการหยุดนิวเคลียร์ ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนในช่วงพลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ตัวอย่าง แก้ว Gd5 > Gd4 > Gd3 > Gd2 > Gd1 ตามลำดับ ในการหยุดนิวเคลียร์จะต้องคำนึงถึงการสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยที่เกิดจากการชนกันแบบยืดหยุ่นกับอะตอมของระบบแก้วตัวอย่าง โดยอำนาจหยุดนิวเคลียร์หรืออัตราการสูญเสียพลังงานนิวเคลียร์คือพลังงานที่สูญเสียไปโดยอนุภาคเคลื่อนที่เนื่องจากการชนกันแบบยืดหยุ่นต่อหน่วยความยาวที่เคลื่อนที่ภายในระบบแก้วตัวอย่าง ผลที่ได้นี้แสดงให้เห็นว่าแก้วตัวอย่าง Gd5 ส่งผลทำให้ไอออนที่ตกกระทบสูญเสียพลังงานมากที่สุด [38]



ภาพที่ 2 การหยุดนิวเคลียร์ของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์



ภาพที่ 3 ช่วงคาดการณ์เฉลี่ยของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

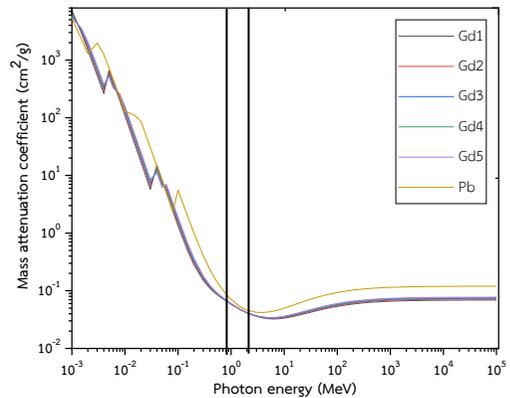
ภาพที่ 3 แสดงค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ย (Projected range, PR) ของระบบแก้วทั้งห้า ที่ช่วงพลังงานไอออน 70–250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ผลที่ได้สอดคล้องกับค่าการหยุดอิเล็กตรอนิกส์และนิวเคลียร์ ดังภาพที่ 1 และ 2 นั่นคือ แก้วตัวอย่าง Gd1 > Gd2 > Gd3 > Gd4 > Gd5 ตามลำดับ โดยผลที่ได้แสดงให้เห็นถึงระยะห่างเฉลี่ยจากพื้นผิวของระบบแก้วตัวอย่างที่ไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนทะลุทะลวงผ่านเข้าไป ผลที่ตามมาจะทำให้ระบบแก้วเกิดการเสียหายที่ความลึกต่าง ๆ ความเสียหาย

นี้เกิดจากการยุบตัวของอะตอมในแลตทิซในบริเวณผิวของระบบแก้ว ทำให้แก้วมีอายุการใช้งานที่ต่างกันขึ้นกับแหล่งกำเนิดไอออน ดังงานวิจัยนี้จะเห็นได้ว่าไฮโดรเจนไอออนจะส่งผลทำให้ระบบแก้วเกิดความเสียหายได้มากกว่าคาร์บอนไอออน เนื่องจากมีค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ยที่มากกว่า อย่างไรก็ตามจะเห็นว่าระบบแก้ว Gd5 มีค่าช่วงคาดการณ์เฉลี่ยที่น้อยที่สุด ผลที่ได้สะท้อนให้เห็นว่าระบบแก้ว Gd5 สามารถป้องกันไอออนทั้งสองได้ดีที่สุด [40]

การกำบังรังสีกัมมันตภาพที่ไม่มีประจุไฟฟ้า (รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลแสดงได้ดังภาพที่ 4 โดยค่านี้สามารถอธิบายได้ด้วยการเกิดอันตรกิริยาของรังสีกับวัสดุตัวกลางในแต่ละช่วงพลังงาน จากภาพแบ่งออกเป็น 3 ปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ที่พลังงานต่ำกว่า 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ การกระเจิงแบบคอมป์ตันจะเกิดที่พลังงาน 200 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และการผลิตคู่จะเกิดที่พลังงานตั้งแต่ 1.02 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นต้นไป จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในช่วงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อระดับพลังงานเพิ่มมากขึ้นโดยค่านี้จะแปรผันตรงกับ $E^{7/2}$ ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในช่วงการกระเจิงแบบคอมป์ตันมีค่าลดลงอย่างช้า ๆ โดยในช่วงนี้จะแปรผัน E^{-1} และลักษณะการเปลี่ยนแปลงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในช่วงการผลิตคู่พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นถึงระดับพลังงาน 300 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หลังจากนั้นจะมีค่าเกือบคงที่โดยในช่วงนี้จะแปรผันตรงกับ $\log E$ และจากภาพยังจะเห็นได้อีกว่ากราฟมีลักษณะไม่ต่อเนื่องมีรอยหยักซึ่งลักษณะของกราฟแบบนี้เกิดจากค่าขอบเขตการดูดกลืนของธาตุ Gd Te และ B โดยแก๊วตัวอย่าง Gd5 มีค่าสูงที่สุดนั่นหมายความว่าแก๊วตัวอย่างนี้มีความสามารถในการกำบังรังสีได้ดีที่สุด [40] และยังสามารถสังเกตได้ว่าในบางช่วงพลังงานค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของแก๊วตัวอย่างมีค่าสูงกว่าค่า

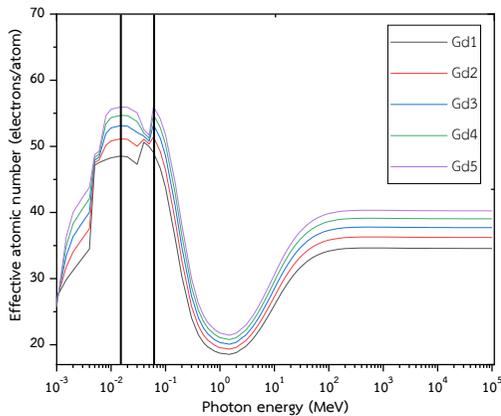
สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตะกั่ว เช่นที่ช่วงพลังงานน้อยกว่า 0.001 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ช่วงพลังงาน 0.004 – 0.01 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และที่ช่วงพลังงาน 0.03 – 0.08 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งนั่นหมายความว่าในช่วงพลังงานดังกล่าวแก๊วตัวอย่างนี้มีสมบัติในการกำบังรังสีดีกว่าตะกั่ว



ภาพที่ 4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลที่พลังงานในช่วง 10^{-3} – 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

ผลการศึกษาละเอียดต่อมัยผล (Z_{eff}) ของระบบแก๊วตัวอย่างกับระดับพลังงานในช่วง 1 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ถึง 100 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ พบว่าค่านี้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยพบว่าค่าเลขอะตอมยังผลมีจุดยอดสองจุด ที่พลังงาน 0.01 และ 0.06 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ และจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วจนถึงจุดต่ำสุดที่พลังงาน 1.5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งเป็นช่วงอันตรกิริยาการกระเจิงแบบคอมป์ตัน หลังจากนั้นค่านี้จะเพิ่มขึ้นเมื่อระดับพลังงานสูงขึ้นและเริ่มคงที่จากช่วงระดับพลังงานมากกว่า 100 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ เป็นต้นไป ดังแสดงในภาพที่ 5 และพบว่าแก๊วตัวอย่าง Gd5 มีค่าเลขอะตอมยังผล

สูงสุดนั้นแสดงให้เห็นว่าแก้วตัวอย่างนี้มีโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัสดุตัวกลางสูงสุด [39]



ภาพที่ 5 เลขอะตอมยังผลของระบบแก้วตัวอย่างที่พลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาสมบัติต่อการกำบังรังสีแกมมาของระบบแก้ว $x\text{Gd}_2\text{O}_3-(80-x)\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ โดย x คือ ปริมาณความเข้มข้นเท่ากับ 0, 5, 10, 15, และ 20 เปอร์เซ็นต์โมล โดยแบ่งออกเป็นการศึกษาสมบัติการกำบังรังสีประเภทที่มีประจุและไม่มีประจุ ด้วยโปรแกรม SRIM และ โปรแกรม Phy-X/PSD ซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและมีความน่าเชื่อถืออยู่ในปัจจุบัน ตามลำดับ ซึ่งพารามิเตอร์ของประเภทที่มีประจุได้ทำการศึกษาค่าการหยุดอิเล็กตรอนิกส์ การหยุดนิวเคลียร์ และช่วงคาบการแผ่รังสีของไฮโดรเจนและคาร์บอนไอออนที่พลังงาน 70-250 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ ประเภทไม่มีประจุได้ศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลและค่าเลขอะตอมยังผล ที่พลังงานในช่วง 10^{-3} - 10^5 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ จากการศึกษาพบว่าแก้วตัวอย่าง $20\text{Gd}_2\text{O}_3-$

$60\text{TeO}_2-20\text{B}_2\text{O}_3$ (Gd5) มีสมบัติในการกำบังรังสีทั้งประเภทที่มีประจุและไม่มีประจุที่ดีที่สุด

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ Thailand Science Research and Innovation (TSRI) ที่สนับสนุนงานวิจัยนี้

6. อ้างอิง

- [1] Issa SAM, Hamdalla TA, Darwish AAA. Effect of ErCl_3 in gamma and neutron parameters for different concentration of $\text{ErCl}_3 - \text{SiO}_2$ (EDFA) for the signal protection from nuclear radiation. J Alloys Compd. 2017;698:234-40.
- [2] Gaikwad DK, Obaid SS, Sayyed MI et al. Comparative study of gamma ray shielding competence of $\text{WO}_3\text{-TeO}_2\text{-PbO}$ glass system to different glasses and concretes. Mater Chem Phys. 2018; 213:508-17.
- [3] Rammah YS, El-Agawany FI, Mahmoud KA et al. FTIR, UV-Vis-NIR spectroscopy, and gamma rays shielding competence of novel ZnO-doped vanadium borophosphate glass. J Mater Sci: Mater Electron. 2020;31:9099-113.
- [4] Al-Buriah MS, Bakhsh EM, Tonguc B et al. Mechanical and radiation shielding

- properties of tellurite glasses doped with ZnO and NiO. *Ceram Int.* 2020; 46(11):19078-83.
- [5] Mark F, George FB. Optical properties of solids. *Am J Phys.* 2002;70(12):1269-70.
- [6] Wang JS, Vogel EM, Snitzer E. Tellurite glass: a new candidate for fiber devices. *Opt Mater.* 1994;3(3):187-203.
- [7] Sidek, HAA, Halimah MK, Faizal MN et al. Synthesis and elastic behaviour of borate glass doped with high tellurite content. *J Appl Sci.* 2006;6(2):274-9.
- [8] Tijani SA, Kamal SM, Al-Hadeethi Y et al. Radiation shielding properties of transparent erbium zinc tellurite glass system determined at medical diagnostic energies. *J Alloy Compd.* 2018;741:293-9.
- [9] El-Mallawany R, Sayyed MI. Condensed matter comparative shielding properties of some tellurite glasses: Part 1. *Physica B.* 2018;539:133-40.
- [10] Sayyed MI, Khattari ZY, Kumar A et al. Radiation shielding parameters of BaO-Nb₂O₅-P₂O₅ glass system using MCNP5code and XCOM software. *Mater Res Express.* 2018;5:115203.
- [11] Sayyed MI, Kaky KM, Gaikwad DK et al. Physical, structural, optical and gamma radiation shielding properties of borate glasses containing heavymetals (Bi₂O₃/MoO₃). *J Non-Cryst Solids.* 2019; 507:30-7.
- [12] Tekin HO, Sayyed MI, Manici T et al. Photon shielding characterizations of bismuth modified borate-silicate-tellurite glasses using MCNPX Monte Carlo code. *Mater Chem Phys.* 2018; 211:9-16.
- [13] Kurudirek M. Heavy metal borate glasses: Potential use for radiation shielding. *J Alloy Compd.* 2017; 727(36):1227-36.
- [14] Waly EA, Al-Qous GS, Bourham MA. Shielding properties of glasses with different heavy elements additives for radiation shielding in the energy range 15-300 keV. *Radiat Phys Chem.* 2018; 150:120-124.
- [15] Chanthima N, Kaewkhao J, Limkitjaroenporn P et al. Development of BaO-ZnO-B₂O₃ glasses as a radiation shielding material. *Radiat Phys Chem.* 2017;137: 72-7.
- [16] Gaikwad DK, Sayyed MI, Obaid SS et al. Gamma ray shielding properties of TeO₂-ZnF₂-As₂O₃-Sm₂O₃ glasses. *J Alloy Compd.* 2018; 765:451-8.
- [17] Kaky KM, Sayyed MI, Laariedh F et al. Stuctural, optical and radiation shielding

- properties of zinc boro-tellurite alumina glasses. *Appl Phys A Mater.* 2019; 125(32):1-12.
- [18] Issa SAM, Kumar A, Sayyed MI et al. Mechanical and gamma-ray shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-NiO}$ glasses. *Mater Chem Phys.* 2018;212:12-20.
- [19] Singh VP, Badiger NM, Chanthima N et al. Evaluation of gamma-ray exposure buildup factors and neutron shielding for bismuth borosilicate glasses. *Radiat Phys Chem.* 2014; 98:14-21.
- [20] Al-Buriah MS, Bakhsh EM, Tonguc B et al. Mechanical and radiation shielding properties of tellurite glasses doped with ZnO and NiO. *Ceram Int.* 2020; 46(11):19078-83.
- [21] Olarinoye IO, Alomairy S, Sriwunkum C et al. Effect of $\text{Ag}_2\text{O/V}_2\text{O}_5$ substitution on the radiation shielding ability of tellurite glass system via XCOM approach and FLUKA simulations. *Phys Scr.* 2021; 96(6):065308.
- [22] Al-Buriah MS, Somaily HH, Alalawi A et al. Polarizability Optical basicity, and photon attenuation properties of $\text{Ag}_2\text{O-MoO}_3\text{-V}_2\text{O}_5\text{-TeO}_2$ glasses: the role of silver oxide. *J Inorg Organomet P.* 2021; 31:1047-56.
- [23] Al-Buriah MS, Alajerami YSM, Abouhaswa AS et al. Effect of chromium oxide on the physical, optical, and radiation shielding properties of lead sodium borate glasses. *J Non-Cryst Solids.* 2020; 544:120171.
- [24] Alshahrani B, Olarinoye IO, Mutuwong C et al. Amorphous alloys with high Fe content for radiation shielding applications. *Radiat Phys Chem.* 2021; 183:109386.
- [25] Azlan MN, Eevon C, Halimah MK et al. Effect of Gd^{3+} on optical and thermal properties of tellurite glass. *J Theor Appl Phys.* 2020; 14(2):137-47.
- [26] Bektasoglu M. Mohammad MA. Investigation of radiation shielding properties of $\text{TeO}_2\text{-ZnO-Nb}_2\text{O}_5\text{-Gd}_2\text{O}_3$ glasses at medical diagnostic energies. *Ceram Int.* 2020; 46(10):16217-23.
- [27] Al-Hadeethi Y, Sayyed MI. Effect of Gd_2O_3 on the radiation shielding characteristics of $\text{Sb}_2\text{O}_3\text{-PbO-B}_2\text{O}_3\text{-Gd}_2\text{O}_3$ glass system. *Ceram Int.* 2020; 46(9):13768-73.
- [28] Kaewjaeng S, Wantana N, Kothan S et al. Effect of Gd_2O_3 on the radiation shielding, physical, optical and luminescence behaviors of $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{-La}_2\text{O}_3\text{-}$

- ZnO-B₂O₃-Dy₂O₃ glasses. *Radiat Phys Chem.* 2021; 185:109500.
- [29] Mohan R, Grosshans D, Proton Therapy- Present and Future. *Adv Drug Deliv Rev.* 2017; 109:26-44.
- [30] Andrievskii RA. Effect of irradiation on the properties of nanomaterials. *The Phys Metals Metallogr.* 2010; 110(3):229-40.
- [31] Şakar E, Özpolat ÖF, Alim B et al. Phy-X/PSD: Development of a user friendly online software for calculation of parameters relevant to radiation shielding and dosimetry. *Radiat Phys Chem.* 2020; 166:108496.
- [32] Nastasi M, Mayer JW, Hirvonen JK. *Ion-Solid Interactions: Fundamentals and Applications.* Cambridge: Cambridge University Press; 1996.
- [33] Ziegler JF, Biersack JP, Littmark U. *The Stopping and Range of Ions in Solids.* New York: Pergamon Press; 1985.
- [34] Winterbon KB, Sigmund P, Sanders JB. Spatial distribution of energy deposited by atomic particles in elastic collisions. *Kgl Dan Vidensk Mat-Fys Medd.* 1970; 37(14):1-12.
- [35] Sriwongsa K, Rimdusit T, Jirayut Phothawilkiat J et al. Photon Interaction, Buildup Factors and Fast Neutron Removal of Some Scintillators Used X-Ray and CT Imaging. *Jmsae.* 2021; 10(2):58-69.
- [36] Sriwongsa K, Laopoonphol N, Ariyalerdchai S, et al. Comparative study of mass attenuation coefficient, effective atomic numbers, and effective electron densities of EU-Doped CsCaBr₂, CsSrBr, and CsSrClBr₂ scintillators. *Suranaree J Sci Technol.* 2020;27(4):010023-7.
- [37] Sriwongsa K, Laopoonphol N, Ariyalerdchai S et al. The comparative study of photon shielding's properties of MoNbCrVTi and MoNbCrZrTi alloy materials. *Suranaree J Sci Technol.* 2020;27(4):010023-6.
- [38] Nastasi M. & Mayer J.W. *Ion Implantation and Synthesis of Materials.* Springer Berlin Heidelberg New York. 2006:49–58.
- [39] Sriwongsa K, Glimglomchit P, Sualuang B et al. Shielding of uncharged and charged radiation of PbO-B₂O₃-SiO₂-Na₂O glass system. *NUJST.* 2021; 30(1):109-119.