

การทดสอบสมบัติการกำบังอนุภาคโปรตอนของแก้วบิสมัทโบโรซิลิเกต

วสุ ชีวสุขานนท์^{1,2}, วุฒิชัย ไชยภักษา^{1,2*} และพฤติพล ลิ่มกิจเจริญภรณ์^{1,2}

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

²ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*wuttichai@npru.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษาคุณสมบัติการกำบังอนุภาคโปรตอนในตัวอย่างแก้วในสูตร $x\text{Bi}_2\text{O}_3:(55-x)\text{SiO}_2:15\text{Na}_2\text{O}:10\text{CaO}:20\text{B}_2\text{O}_3$ โดยที่ $x = 5, 10, 15$, และ 20 โมลต์เปอร์เซ็นต์ของความเข้มข้นบิสมัท โปรแกรม SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) ถูกใช้วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ค่าพลังงานหยุดยั้งมวลรวม TMSP (total mass stopping power) ช่วงคาดการณ์ความลึกเฉลี่ยของอนุภาค PR (projected range) ที่ช่วงพลังงาน 0.01–10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ และช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในเป้าหมายสูงสุด (ion range) และทำการจำลองความสามารถอนุภาคโปรตอนที่ผ่านมาเข้าไปในวัสดุแก้วที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดลองพบว่า ค่าพลังงานหยุดยั้งมวลรวมมีค่าเพิ่มขึ้นที่ช่วงพลังงานต่ำและลดลงตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น ผลการวิเคราะห์ช่วงคาดการณ์ความลึกเฉลี่ยของอนุภาค มีค่าเพิ่มสูงขึ้นตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น และทั้งสองพารามิเตอร์มีแนวโน้มไปในทางเดียวกันโดยมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อเติมอะตอมบิสมัทเพิ่มขึ้น ผลการทดลองช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในเป้าหมายสูงสุดพบว่ามีค่าลดลงตามความเข้มข้นของบิสมัทที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลการจำลองความสามารถอนุภาคโปรตอนที่ผ่านมาเข้าไปในวัสดุแก้ว ที่ความหนา 1 ไมโครเมตรที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์พบว่าสามารถเข้าไปในเนื้อของวัสดุได้ลึกน้อยกว่าที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์.

คำสำคัญ: พลังงานหยุดยั้งมวล อนุภาคที่มีประจุ วัสดุป้องกันอนุภาคที่มีประจุ

Proton Shielding Properties Investigation of Bismuth Borosilicate Glass

Wasu Cheewasukhanont^{1,2}, Wuttichai Chaiphaksa^{1,2*}, and Pruittipol Limkitjaroenporn^{1,2}

¹Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University,
Nakhon Pathom, 73000, Thailand

²Center of Excellence in Glass Technology (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University, Nakhon
Pathom, 73000, Thailand
wuttichai@npru.ac.th

Abstract

Proton shielding properties investigation in the glass compositions $x\text{Bi}_2\text{O}_3 : (55-x)\text{SiO}_2 : 15\text{Na}_2\text{O} : 10\text{CaO} : 20\text{B}_2\text{O}_3$ where $x = 5, 10, 15,$ and 20 mol% of bismuth concentration. The software SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) program was used for the parameters inspection as the total mass stopping power (TMSP), projected range (PR), and ion-range at 0.01 MeV to 10 MeV of the energy ranges and making the particles' ability simulation as it passes through into the materials at 1 μm of the thickness over the energy 5 keV and 10 keV. The result found that TMSP increases at the low energy range, and decreased with the increasing of the higher energy. The PR result found that increases with the increasing of the higher energy, and both parameters are the same trend to decrease with the increasing of bismuth concentration. The ion-range result found also that decrease with the increasing of bismuth contents. In addition, the particles' ability simulation result at 5 keV of the ion-energy can less pass through into the materials than the energy at 10 keV.

Keywords: mass stopping power, charged particle, charged particle shielding materials

1. บทนำ

ความรู้เกี่ยวกับพารามิเตอร์อันตรกิริยาด้านรังสีเป็นส่วนหนึ่งที่ถูกใช้ในขั้นตอนการประกันคุณภาพและการควบคุมปริมาณรังสีในส่วนของภาครัฐเอกชนหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง วัตถุประสงค์สำคัญในการใช้งานด้านรังสีนั้นถูกใช้ในหลายหน่วยงานเช่น โรงไฟฟ้านิวเคลียร์ ฟิสิกส์พลังงานสูง การถนอมอาหาร ภาพถ่ายทางการแพทย์ การรักษาทางการแพทย์ และด้านอื่น ๆ รวมถึงนำมาทดสอบถึงปริมาณรังสีที่มีผลต่อสิ่งมีชีวิตเพื่อการป้องกันอันตรายจากผู้ปฏิบัติงานด้านรังสี หากปราศจากความรู้และค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการเกิดอันตรกิริยาของรังสี ผลที่ได้รับเนื่องจากการรับรังสีเกินขนาดจะส่งผลอันตรายถึงเนื้อเยื่อและอวัยวะภายในของผู้ที่ได้สัมผัสกับรังสี (Rammah Y.S., and et al., 2020) ด้วยเหตุนี้การรักษาความปลอดภัยแก่ผู้ปฏิบัติงานที่เกี่ยวข้องกับรังสีเช่นบุคลากรด้านการแพทย์ที่จำเป็นต้องใช้รังสีวินิจฉัยจึงต้องมีวัสดุกำบังรังสีเพื่อป้องกันอันตราย

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมาวัสดุที่ถูกใช้ในการกำบังรังสีเช่น คอนกรีต และตะกั่ว ได้ถูกนำมาใช้ (Al-Hadeethi Y., and Tijani S.A., 2019) และพัฒนาให้มีประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น (Taha A., and El-Sayed., 2021), (Santhosh M., and et al., 2021), (Balamurugan J., and et al., 2021), (UmarKhan M., and et al., 2020), (Singh S., and Singh K., 2021), (Aygün B., and et al., 2021) ถึงแม้ว่าจะพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเพียงใด ขอบเขตการใช้งานของคอนกรีตและตะกั่ววันนั้นก็ยังคงมีข้อจำกัดในการใช้งานบางสายงานที่ต้องการวัสดุกำบังรังสีที่มีความโปร่งแสง และสามารถมองผ่านเพื่อดูการปฏิบัติงานด้านในได้ เช่นการฉายรังสีแก่ผู้ป่วยจำเป็นต้องสังเกตอาการระหว่างการฉายรังสีไปด้วย ซึ่งข้อจำกัดของวัสดุคอนกรีตและตะกั่ววันนั้นคือเป็นวัสดุทึบแสง มีน้ำหนักมาก เคลื่อนย้ายไปในเฉพาะจุดได้ลำบาก อีกทั้งตะกั่วก็ยังเป็นพิษในขั้นตอนการผลิตก่อนนำมาเป็นวัสดุกำบังรังสี อย่างไรก็ตามวัสดุกำบังรังสีที่มีคุณสมบัติพิเศษดังกล่าวเช่นแก้ว จึงถูกนำมาใช้และพัฒนาเป็นวัสดุกำบังรังสีเพื่อเป็นทางเลือกแก่ผู้ใช้งาน

วัสดุแก้วนั้นเป็นกลุ่มของวัสดุที่ได้รับความสนใจมากขึ้นเนื่องจากมีข้อดีคือมีวิธีการเตรียมที่ง่าย และยังสามารถใส่สารเคมีลงไปเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติตามต้องการ เป้าหมายหลักในวัสดุแก้วกำบังรังสีนั้นคือการปรับปรุงให้แก้วนั้นมีความหนาแน่นสูง เพื่อเพิ่มโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสารและนำไปสู่การลดทอนความเข้มรังสีเมื่อรังสีเคลื่อนผ่านวัสดุ ปัจจุบันได้มีงานวิจัยเกี่ยวกับวัสดุแก้วกำบังรังสีเพิ่มขึ้น (Cheewasukhanont W., and et al., 2020), (Zaid M.H.M., Matori K.A., Sidek H.A.A., Ibrahim I.R., 2020), (Al-Hadeethi Y., Sayyed M.I., Rammah Y.S., 2019), (Vani P., and et al., 2019), (Singh R., and et al., 2019). และค่าพารามิเตอร์กำบังรังสีที่สำคัญที่ถูกใช้คำนวณเช่น ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient), ค่าเลขอะตอมยังผล (effective atomic number), ค่าความหนาแน่นอิเล็กตรอน (effective electron density) ค่าพารามิเตอร์เหล่านี้เป็นค่ามาตรฐานที่ใช้รายงานถึงประสิทธิภาพของวัสดุกำบังรังสี

การอธิบายถึงกลไกของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีนั้นมีความสำคัญอย่างมาก เพื่อที่ต้องการจะวัดรังสีเมื่อผ่านวัสดุกำบังรังสี ซึ่งกลไกการลดทอนรังสีทั้งหมดจะผ่านการเกิดอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสารในวัสดุ อย่างไรก็ตามเราสามารถจำแนกประเภทของรังสีได้โดยประเภทที่ 1 อนุภาคที่มีประจุเช่น อิเล็กตรอน โพซิตรอน โปรตอน ดิวเทรียม แอลฟา ประเภทที่ 2 อนุภาคที่ไม่มีประจุเช่น แกมมา หรือ เอกซเรย์ และประเภทที่ 3 คือ นิวตรอน ซึ่งในปัจจุบันการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการกำบังรังสีแกมมาหรือเอกซเรย์นั้นมีเพิ่มสูงขึ้น แต่กับการกำบังอนุภาคที่มีประจุนั้นมีน้อยกว่ามากซึ่งงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาหลักของพลังงานหยุดยั้งมวล (mass stopping power) ที่มีประจุเช่น พลังงานของโปรตอน ช่วงความลึกที่ไอออนเข้าไปในสสารของวัสดุ โดยการนำตัวอย่างแก้วทดลองไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์เช่น พลังงานการหยุดยั้งมวล (mass stopping power) ช่วงของไอออนที่สามารถผ่านเข้าไปในวัสดุ (ion range) ช่วงความลึกของไอออนที่สามารถเข้าไปในสสาร (target depth) ผ่านซอฟต์แวร์ที่ชื่อว่า SRIM (The Stopping and Range of Ions in Matter) ซึ่งโปรแกรมนี้ถูกพัฒนาโดย James F. Ziegler และ Jochen P. Biersack ในปี 1983 และได้รับการพัฒนาจากที่ทำงานบนระบบ DOS จนปัจจุบันสามารถทำงานได้ในระบบปฏิบัติการ Window บนพื้นฐานวิธีการแบบ Monte Carlo simulation method ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำบังโปรตอนของระบบแก้วโบโรซิลิเกตที่เติมอะตอมของธาตุบิสมัทจากสูตรแก้ว $x\text{Bi}_2\text{O}_3 \cdot (55-x)\text{SiO}_2 \cdot 15\text{Na}_2\text{O} \cdot 10\text{CaO} \cdot 20\text{B}_2\text{O}_3$ โดย $x = 5, 10, 15$, และ 20 โมลเปอร์เซ็นต์โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ผ่านโปรแกรม SRIM คือ ค่าพลังงานหยุดยั้งมวล (mass stopping power) ช่วงของไอออนที่สามารถผ่านเข้าไปในวัสดุ (ion range) และช่วงความลึกของไอออนที่สามารถเข้าไปในสสาร (target depth)

2. ทฤษฎี

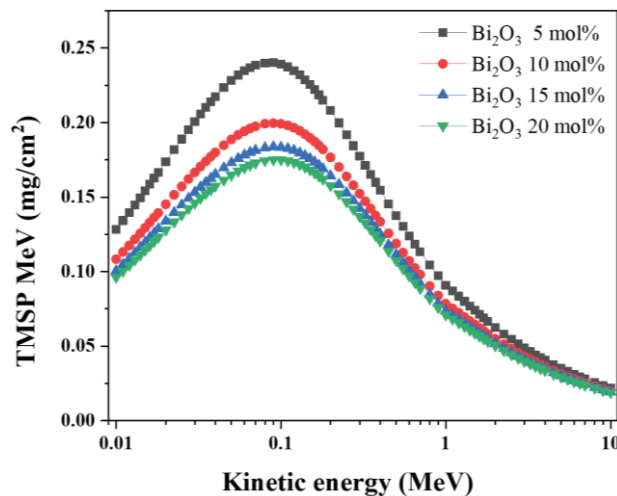
พลังงานหยุดยั้งมวล (Mass stopping power)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าไปในสสาร โดยจะพบกับแรงคูลอมบ์บนอะตอม ในทุกๆอะตอมจะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากเกิดอันตรกิริยาที่แตกต่างกันไป โดยแต่ละอันตรกิริยาจะขึ้นอยู่กับโอกาสของแต่ละตัวสำหรับการเกิดอันตรกิริยานั้นๆและการสูญเสียพลังงาน ในการที่จะหยุดมวลที่เคลื่อนที่นั้นจำเป็นต้องอาศัยหลักการชน (collision) เพื่อที่จะลดความเร็วมวลที่มีประจุอย่างโปรตอน ดิวเทอรอน และแอลฟา สมการที่ถูกใช้คำนวณเพื่อหยุดยั้งมวล (Tsoulfanidis N., 2015)

$$\frac{dE}{dx} (MeV / m) = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ \left[\ln \left(\frac{2mc^2}{I} \beta^2 \gamma^2 \right) - \beta^2 \right]$$

ซึ่ง m = อนุภาคมวลนิ่ง, $\beta = v / c$, c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ 3×10^8 m/s, N = จำนวนอะตอม/ตารางเมตรที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน, Z = เลขอะตอมของวัสดุ, z = ประจุของอนุภาค ($z=1$ สำหรับ อิเล็กตรอน โพซิตรอน โปรตอน และดิวเทอรอน, $z = 2$ สำหรับแอลฟา)

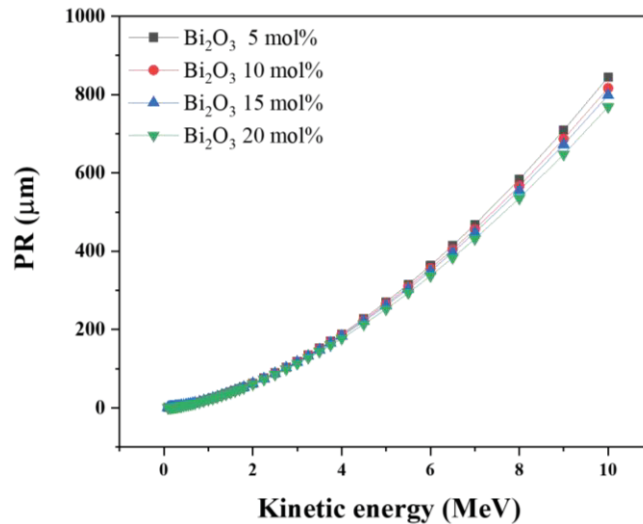
3. ผลการทดลองและการอภิปรายผล



ภาพที่ 1 ค่าพลังงานหยุดยั้งมวลของอนุภาคโปรตอนในช่วงพลังงานจลน์ของอนุภาค 0.01–10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์

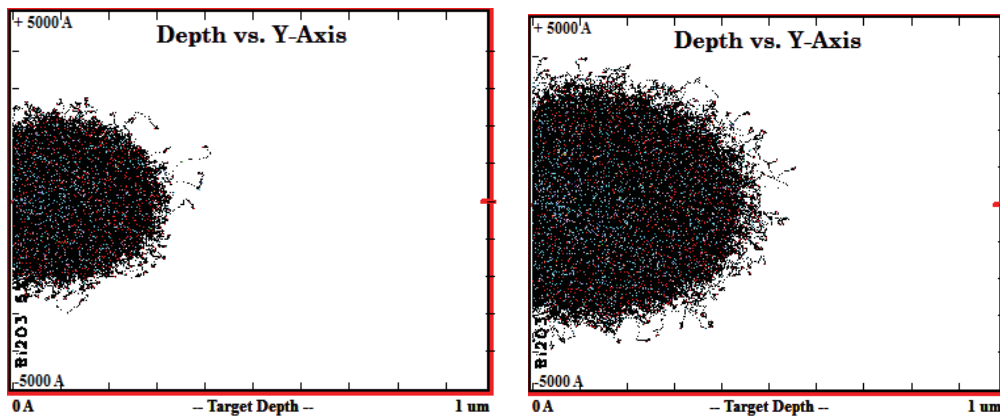
พลังงานหยุดยั้งมวลของอนุภาค คือ พลังงานที่ใช้ในการหยุดอนุภาคที่มีประจุโดยเกิดการชนระหว่างอนุภาคกับความหนาแน่นของวัสดุทำให้อนุภาคที่เคลื่อนที่เข้าไปในสสารหรือเนื้อวัสดุเกิดการสูญเสียพลังงานจนหมด จนในที่สุดอนุภาคที่มีประจุก็จะสูญเสียพลังงานจนหมดซึ่งขึ้นอยู่กับความลึกที่แน่นอนในเนื้อวัสดุที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน ผลการคำนวณค่าพลังงานหยุดยั้งมวลของตัวอย่างแก้วที่เติมอะตอมของธาตุบิสมัทที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, และ 20 โมลเปอร์เซ็นต์ที่พลังงาน 0.01–10 เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งแสดงในภาพที่ 1 พบว่าค่าพลังงานหยุดยั้งมวลของตัวอย่างแก้วทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงพลังงานค่าหนึ่งจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลงตามพลังงานที่เพิ่มขึ้น สำหรับค่าพลังงานหยุดยั้งมวลในแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทที่ความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่ามากที่สุด และลดลงตามการเติมอะตอมบิสมัทที่สูงขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าการเติมอะตอมของบิสมัทนั้น

สามารถใช้พลังงานที่น้อยลงในการหยุดมวลโปรตอนเมื่อเติมอะตอมบิสมัท หากกล่าวอีกนัย การเติมอะตอมบิสมัทที่เพิ่มขึ้นสามารถช่วยหยุดยั้งหรือกำบังอนุภาคโปรตอนได้ดียิ่งขึ้น

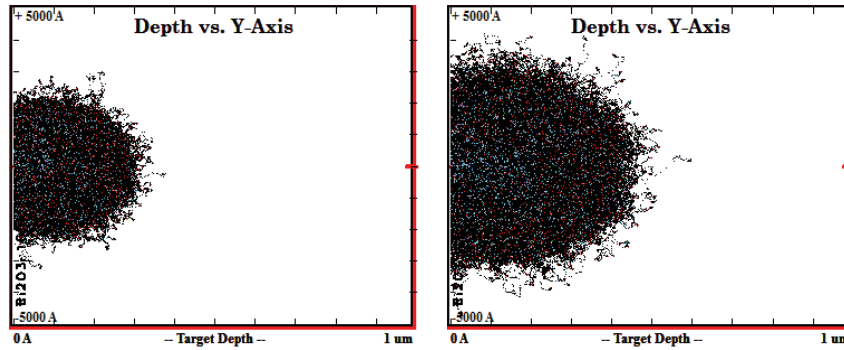


ภาพที่ 2 ช่วงคาดการณ์ความลึกเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนที่ช่วงพลังงานจลน์ของอนุภาค 0.01–10 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์

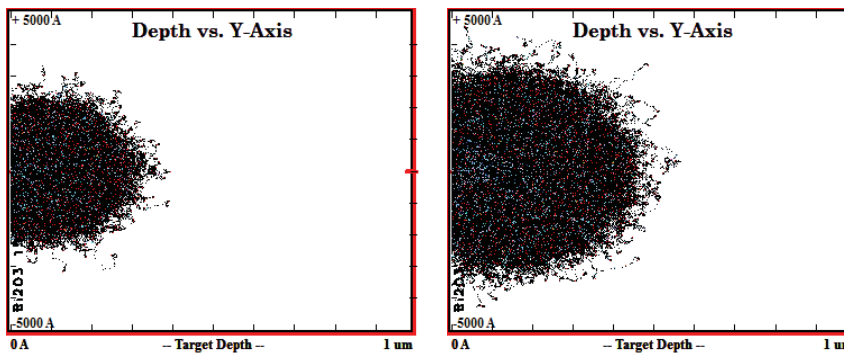
ช่วงคาดการณ์ความลึกเฉลี่ยของอนุภาคที่มีประจุ (projected range) คือระยะที่อนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เข้าไปได้ก่อนที่จะสูญเสียพลังงานจลน์ทั้งหมด ทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ช้าลงอย่างต่อเนื่อง ในภาพที่ 2 ค่าช่วงคาดการณ์ความลึกเฉลี่ยเป็นจะเพิ่มขึ้นตามพลังงานของไอออนที่เพิ่มขึ้น และทั้งหมดจะลดลงตามการเติมอะตอมบิสมัท ซึ่งผลการทดลองพบว่า วัสดุวิจัยแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทมากที่สุดมีค่าช่วงคาดการณ์ความลึกเฉลี่ยต่ำสุดซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติป้องกันอนุภาคได้ดีที่สุด



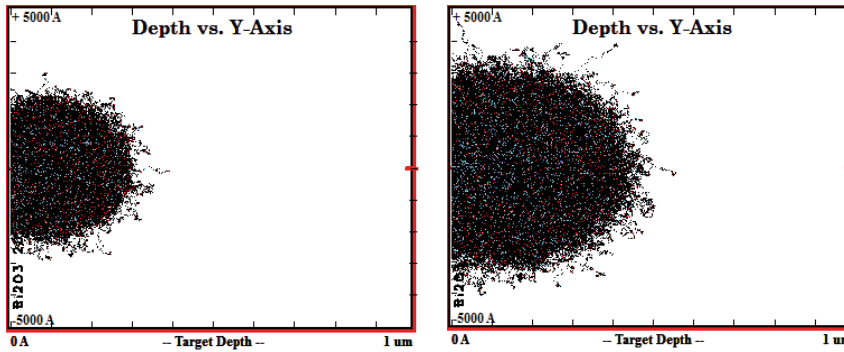
ภาพที่ 3 การจำลองอนุภาคโปรตอนผ่านเข้าไปในวัสดุแก้วที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทที่ความเข้มข้น 5 โมลเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 4 การจำลองอนุภาคโปรตอนผ่านเข้าไปในวัสดุแก้วที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทที่ความเข้มข้น 10 โมลเปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 5 การจำลองอนุภาคโปรตอนผ่านเข้าไปในวัสดุแก้วที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอน และ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทที่ความเข้มข้น 15 โมลเปอร์เซ็นต์

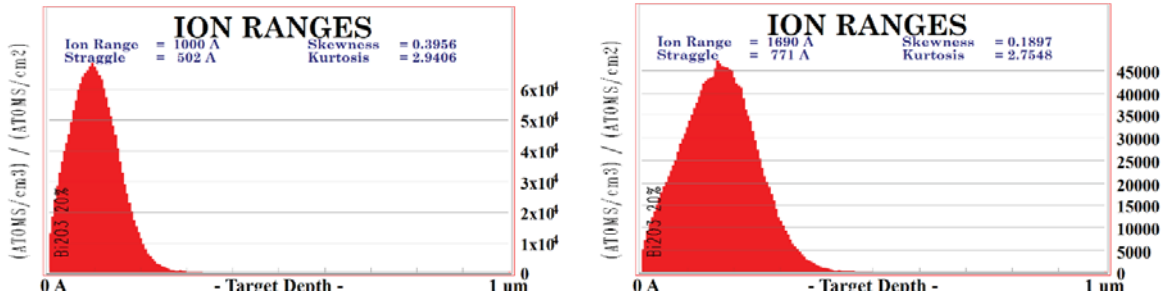


Q (a) (b)

ภาพที่ 6 การจำลองอนุภาคโปรตอนผ่านเข้าไปในวัสดุแก้วที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่ (a) พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ (b) 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทที่ความเข้มข้น 20 โมลเปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 3 ถึงภาพที่ 6 เป็นภาพการจำลองอนุภาคโปรตอนผ่านเข้าไปในวัสดุแก้วที่ความหนา 1 ไมโครเมตร ที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทแต่ละความเข้มข้น ประเภทของไอออนที่ใช้ยิงเข้าไปในเนื้อแก้วนี้เป็นอะตอมไฮโดรเจนและเป็นไอออนที่มีมวลเท่ากับ 1.008 amu และผลการทดลองพบว่าที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วแต่ละความเข้มข้น ไอออนที่เข้าไปในเนื้อของวัสดุแก้วนั้นเข้าไปได้ลึกน้อยกว่าไอออนที่พลังงาน

10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ในการทดลองจะพบว่าในแต่ละพลังงานและในแต่ละความเข้มข้นของบิสมัทในตัวอย่างแก้วจะเกิดจุดสีแดงในเป้า นั้นแสดงให้เห็นถึงไอออนหนึ่งตัวชนกับอะตอมของบิสมัทและตามด้วยการเกิดพื้นที่ว่าง (vacancy) เกิดขึ้นหลังการชนจุดสีฟ้าแสดงถึงการสะท้อนกลับของอะตอมบิสมัทต่อไอออนที่เข้าไปชนซึ่งกลไกนี้ถูกเรียกว่า recoil cascade



ภาพที่ 7 ช่วงของไอออนที่สามารถผ่านเข้าไปในวัสดุที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ และ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของตัวอย่างแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทที่ความเข้มข้น 20 โมลเปอร์เซ็นต์

ภาพที่ 7 เป็นตัวอย่างแสดงช่วงของไอออนที่สามารถผ่านเข้าไปในตัวอย่างแก้วของความเข้มข้นบิสมัทที่ 20 โมลเปอร์เซ็นต์ ในการทดลองนี้ได้จำลองความหนาของวัสดุแก้วที่ 1 ไมโครเมตร เพื่อให้สามารถมองเห็นช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในตัวอย่างแก้วสูงสุด ผลจากการทดลองพบว่า ช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในเป้าหมายสูงสุดที่เข้าไปได้ที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของแก้วบิสมัทที่ความเข้มข้น 20 โมลเปอร์เซ็นต์ มีค่าช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในเป้าหมายสูงสุดน้อยกว่าของแก้วที่พลังงาน 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งค่าช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในเป้าหมายสูงสุดที่พลังงาน 5 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ของแก้วที่เติมอะตอมบิสมัทที่ 20 โมลเปอร์เซ็นต์คือ 0.1000 ไมโครเมตร และช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในเป้าหมายสูงสุดที่พลังงานไอออนที่ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์คือ 0.1690 ไมโครเมตรตามลำดับ และผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อเติมอะตอมบิสมัทเพิ่มขึ้นจะทำให้ช่วงที่ไอออนสามารถเข้าไปได้ในเป้าหมายสูงสุดลดลง กล่าวอีกนัยได้ว่า เมื่อเพิ่มอะตอมของบิสมัทจะทำให้กำบังอนุภาคได้ดียิ่งขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์ผลของการกำบังโปรตอนของแก้วในสูตร $x\text{Bi}_2\text{O}_3:(55-x)\text{SiO}_2:15\text{Na}_2\text{O}:10\text{CaO}:20\text{B}_2\text{O}_3$ โดย $x = 5, 10, 15,$ และ 20 โมลเปอร์เซ็นต์โดยค่าพารามิเตอร์ที่ใช้วิเคราะห์ผ่านโปรแกรม SRIM คือ ค่าพลังงานหยุดยั้งมวล (mass stopping power) ช่วงคาดการณ์ความลึกเฉลี่ยของไอออนที่สามารถเข้าไปในสสาร (projected range) และช่วงที่ไอออนสามารถเดินทางเข้าไปในสสารได้ (ion range) ผลการทดลองพบว่า เมื่อเพิ่มอะตอมของบิสมัทลงในแก้วมากขึ้นจะทำให้สามารถลดพลังงานจลน์ของมวลโปรตอนได้ และส่งผลถึงการลดระยะในการที่อนุภาคสามารถเข้าไปในเนื้อวัสดุได้ ซึ่งสามารถบ่งบอกได้ว่าเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติกำบังอนุภาคโปรตอนได้ดี

5. เอกสารอ้างอิง

Al-Hadeethi Y., Tijani S.A., (2019). The use of lead-free transparent 50BaO - (50-x)borosilicate - $x\text{Bi}_2\text{O}_3$ glass system as radiation shields in nuclear medicine. *Journal of Alloys and Compounds*, 803, 625-630.

Al-Hadeethi Y., Sayyed M.I., Rammah Y.S., (2019). Investigations of the physical, structural, optical and gamma-rays shielding features of $B_2O_3 - Bi_2O_3 - ZnO - CaO$ glasses. **Ceramics International**, 45, 20724–20732.

Aygün B., Şakar E., Ağar O., Sayyed M.I., Karabulutb A., Singh V.P., (2021). Development of new heavy concretes containing chrome-ore for nuclear radiation shielding applications. **Progress in Nuclear Energy**, 133, 103645.

Baalamurugan J., GaneshKumar V., Chandrasekaran S., Balasundar S., Venkatraman B., Padmapriya R., Bupesh Raja V.K., (2021). Recycling of steel slag aggregates for the development of high-density concrete: Alternative & environment-friendly radiation shielding composite. **Composites Part B: Engineering**, 216, 108885.

Cheewasukhanont W., Limkitjaroenporn P., Kothan S., Kedkaew C., Kaewkhao J., (2020). The effect of particle size on radiation shielding properties for bismuth borosilicate glass. **Radiation Physics and Chemistry**, 172, 108791.

Rammah Y.S., Olarinoy I.O., El-Agawany F.I., El-Adawy A., El Sayed Yousef. (2020). The f-factor, neutron, gamma radiation and proton shielding competences of glasses with Pb or Pb/Bi heavy elements for nuclear protection applications. **Ceramics International**, 46(17), 27163-27174.

Santhosh M., Shobha S., Sujatha P.N., Singh Y., Shivakumar K.S., Sen M., Mattur C., Abhishek V., (2021). Waste-polymer incorporated concrete mixes for neutron and gamma radiation shielding. **Progress in Nuclear Energy**, 135, 103694.

Singh R., Singh A., Singh D., Tyagi M., (2019). Studies of photon interaction and shielding parameters of lead alumino borophosphate glass system. **Radiation Physics and Chemistry**, 161, 60–65.

Singh S., Singh K., (2021). On the use of green concrete composite as a nuclear radiation shielding material. **Progress in Nuclear Energy**, 136, 103730.

Taha A., El-Sayed., (2021). Performance of heavy weight concrete incorporating recycled rice straw ash as radiation shielding material. **Progress in Nuclear Energy**, 135, 103693.

Tsoufanidis, N. (2015). **MEASUREMENT & DETECTION of RADIATION**, CRC Press Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300 Boca Raton, FL 33487-2742.

UmarKhan M., Ahmad S., AbbasNaqvi A., JubranAl-Gahtani H., (2020). Shielding performance of heavy-weight ultra-high-performance concrete against nuclear radiation. **Progress in Nuclear Energy**, 130, 103550.

Vani P., Vinith G., Sayyed M.I., Elbashir B.O., Manikandan N., (2019). Investigation on structural, optical, thermal and gamma photon shielding properties of zinc and barium doped fluorotellurite glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 511, 194–200.

Zaid M.H.M., Matori K.A., Sidek H.A.A., Ibrahim I.R., (2020). Bismuth modified gamma radiation shielding properties of titanium vanadium sodium tellurite glasses as a potent transparent radiation- resistant glass applications. **Nuclear Engineering and Technology**, 53(4), 1323-1330.