

การศึกษาอันตรกิริยาของอนุภาคที่มีประจุกับพอลิไธรีนพลาสติกซินทิลเลเตอร์ ด้วยการจำลองแบบมอนติคาร์โล

เฉลิมพล มุธุวงศ์¹, วุฒิชัย ไชยภักษา^{2,3*}, วสุ ชิวสุขานนท์^{2,3} และ เชิดศักดิ์ บุตรจอมชัย¹

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี วารินชำราบ

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

³ศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม

*wuttichai@npru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอันตรกิริยาของอนุภาค แอลฟา และ โปรตอน กับพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิไธรีน โดยการจำลองแบบมอนติคาร์โล กำลังหยุดยั้งมวล ค่าระยะความลึกเฉลี่ย และการกระจายไอออนของอนุภาค แอลฟา (${}^4\text{He}$) และ โปรตอน (${}^1\text{H}$) ถูกคำนวณโดยโปรแกรม SRIM และ FLUKA ที่ช่วงพลังงาน 0.01 MeV – 10,000 MeV ผลการจำลองพบว่ากำลังหยุดยั้งมวลของพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิไธรีนที่คำนวณด้วยของทั้งสองโปรแกรมให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี ค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟาและโปรตอนในพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิไธรีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ภาพการกระจายตัวของไอออนใน 2 มิติและช่วงความลึกของไอออนสำหรับอนุภาคแอลฟาและโปรตอนถูกรายงานผล

คำสำคัญ: พลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิไธรีน การจำลองแบบมอนติคาร์โล รังสีไอออนไนซ์



The study of charged particles interaction with polystyrene plastic scintillators by Monte Carlo simulation

Chalermpon Mutuwong¹, Wuttichai Chaiphaksa^{2,3*}, Wasu Cheewasukhanont^{2,3}
and Cherdasak Bootjomchai¹

¹Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Warin Chamrap

²Physics Program, Faculty of Science and Technology, Nakhon Pathom Rajabhat University

³Center of Excellence in Glass Technology (CEGM), Nakhon Pathom Rajabhat University

*wuttichai@npru.ac.th

Abstract

This work aims to investigate the interaction of charged particles (Alpha and Proton) with polystyrene plastic scintillators by Monte Carlo simulation. The mass stopping power, projected range, and the ion distributions in the polystyrene plastic scintillator at an energy range of 0.01 MeV - 10,000 MeV, were computed by SRIM and FLUKA programs. The simulation results show that the mass stopping power of polystyrene plastic scintillators obtained by both programs are in good agreement. The projected range of alpha and protons particles penetrating in polystyrene increases with increasing energy. Finally, the 2D visualization of ion distributions and ion ranges for alpha and proton particles were reported.

Keywords: Polystyrene plastic scintillator, Monte Carlo simulation, Ionizing radiation

1 บทนำ

วัสดุซินทิลเลชัน (Scintillation materials) คือวัสดุที่สามารถเปล่งแสงในย่านตามองเห็นได้เมื่อเกิดอันตรกิริยากับรังสี (ย่านที่ตามองไม่เห็น) ดังนั้นวัสดุซินทิลเลชันจึงถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการวัดปริมาณรังสี พลาสติกซินทิลเลเตอร์ (Plastic scintillators) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์วัดรังสีแบบเปล่งแสงชนิดอินทรีย์ (Organic scintillation detectors) ซึ่งถูกพัฒนาขึ้นตั้งแต่ต้นปี ค.ศ.1950 [1] ปัจจุบันพลาสติกซินทิลเลเตอร์ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในด้าน ฟิสิกส์พลังงานสูง (high-energy physics) ฟิสิกส์อนุภาค (particles physics) การถ่ายภาพด้วยมิวออน (muon tomography) [2] รังสีรักษา (hadron therapy) รวมถึงการตรวจจ็บริ่งสีสำหรับคัดกรองบุคคล ยานพาหนะ สินค้าหรือยานพาหนะอื่นๆ เพื่อตรวจจ็บริ่งสี (Radiation Portal Monitors) [3] พลาสติกซินทิลเลเตอร์ประกอบด้วยส่วนผสมของโมเลกุลที่มีคาร์บอน (C) และไฮโดรเจน (H) เป็นส่วนประกอบหลัก

พลาสติกซินทิลเลเตอร์สามารถถูกใช้สำหรับการติดตามอนุภาค [4] ซินทิลเลเตอร์ดังกล่าวสามารถเข้าถึงความละเอียดเชิงความลึกได้ดีในระดับ 100 μm [5] และซินทิลเลเตอร์ดังกล่าวยังสามารถวัดแคลอริเมตริก (calorimetric

measurements) ได้อย่างแม่นยำอีกด้วยหากถูกวางสลับกับเลเยอร์ของวัสดุที่หนักกว่า เช่น เหล็กหรือตะกั่ว [6] ยิ่งไปกว่านั้น การมีอยู่ของนิวเคลียสที่มีมวลอะตอมต่ำของพลาสติกซินทิลเลเตอร์เป็นลักษณะเฉพาะตัวที่ทำให้มีประสิทธิภาพการตรวจจับ นิวตรอนที่สูงมาก นิวตรอนเร็ว (Fast neutrons) ที่มีพลังงานภายในช่วงเมกะอิเล็กตรอนโวลต์สามารถถ่ายเทพลังงานได้ค่อนข้างมากเมื่อชนกับนิวเคลียสที่มีมวลอะตอมต่ำของพลาสติกซินทิลเลเตอร์ซึ่งมีมวลใกล้เคียงมวลของนิวตรอน มากไปกว่านั้นซินทิลเลเตอร์นี้ยังมีความสามารถในการเปล่งแสงเมื่อถูกอนุภาคที่มีประจุ (อนุภาคแอลฟา เบตา และโปรตอน เป็นต้น) เคลื่อนที่ผ่านทำให้มีความเหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับการระบุชนิดของอนุภาค (Particle identification) และช่วยให้สามารถวัดเวลาอันตรกิริยาของอนุภาคด้วยความแม่นยำ

คุณลักษณะทั้งหมดของพลาสติกซินทิลเลเตอร์ที่อธิบายไว้ข้างต้นมีส่วนสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ดังนั้น การออกแบบ พัฒนาและศึกษาอันตรกิริยาระหว่างพลาสติกซินทิลเลเตอร์และรังสีไอออนใดก่อนที่ผลผลิตมาใช้งานจริงจึงมีความสำคัญ ในงานนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอันตรกิริยาระหว่างพลาสติกซินทิลเลเตอร์กับอนุภาคที่มีประจุ เช่น แอลฟา (${}^4\text{He}$) และโปรตอน (${}^1\text{H}$) เป็นต้น ด้วยโปรแกรม SRIM และ FLUKA

2 ทฤษฎี

2.1 อันตรกิริยาของอนุภาคที่มีประจุกับสสาร

อนุภาคที่มีประจุ z มวล M และมีความเร็ว v เคลื่อนที่ในสสารตัวกลางที่มีเลขอะตอม Z และมีความหนาแน่น ρ มันจะถูกล้อมรอบด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าคูลอมบ์ (Coulomb electric field) ทำให้สูญเสียพลังงานเกือบตลอดเวลา และเบี่ยงเบนไปจากทิศทางเริ่มต้นเล็กน้อย ผลกระทบทั้งสองนี้เป็นผลมาจากการชนสองประเภท:

1. การชนแบบไม่ยืดหยุ่นกับอิเล็กตรอนอะตอมของตัวกลาง โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอิเล็กตรอนวงนอก การชนกันเหล่านี้ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) หรือการกระตุ้น (Excitation) อะตอมของตัวกลาง การชนเหล่านี้เป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียพลังงานของอนุภาคที่มีประจุ
2. การชนแบบยืดหยุ่นกับนิวเคลียส การชนเหล่านี้เกิดขึ้นไม่บ่อยนัก ในทางปฏิบัติพวกมันไม่ก่อให้เกิดการสูญเสียพลังงาน แต่เพียงเป็นการเปลี่ยนแปลงในทิศทางของอนุภาคที่ตกกระทบ

การชนกันทั้งสองแบบที่กล่าวมาข้างต้นนั้นอนุภาคไม่จำเป็นต้องชนกันโดยตรง เพียงแต่เป็นการชนกันแบบไม่สัมผัสหรือการชนกันด้วยแรงคูลอมบ์เท่านั้น [7] คุณสมบัติของสสารตัวกลางที่ทำให้อนุภาคที่มีประจุเกิดการสูญเสียพลังงานต่อความลึกต่อความหนาแน่น ถูกเรียกว่า “กำลังหยุดยั้งมวล” (Mass stopping power) ดังอธิบายด้วยสมการในรูปทั่วไปของ Bethe-Bloch [8]

$$-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = 2\pi N_A m_e r_e^2 c^2 \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 - \delta - 2\frac{C}{Z} \right] \quad (1)$$

เมื่อ $-\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx}$ กำลังหยุดยั้งมวล เครื่องหมาย ลบ แสดงถึงการสูญเสียพลังงานของอนุภาคในสสาร

$$r_e = e^2/m_e c^2 = 2.818 \cdot 10^{-13} \text{ cm} \text{ คือ รัศมีของอิเล็กตรอน}$$

$$2\pi N_A m_e r_e^2 c^2 = 0.1535 \text{ MeV g}^{-1} \text{ cm}^2$$



$m_e = 0.55110 \text{ MeV}/c^2 = 9.110 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ คือ มวลของอิเล็กตรอน

$N_A = 6.022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ คือ เลขอาโวกาโดร

I คือ ศักยภาพในการแตกตัวเป็นไอออนของวัสดุเป้าหมาย

z คือ ประจุของอนุภาคที่ตกกระทบ

$$\beta = v/c, \quad \gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$$

δ คือ density effect correction (สำคัญเมื่อต้องใช้พลังงานสูง)

C คือ shell correction (สำคัญเมื่อต้องใช้พลังงานต่ำ)

$W_{max} \simeq 2m_e c^2 (\beta\gamma)^2$, for $M \gg m_e$ คือ พลังงานจลน์สูงสุดที่จ่ายให้กับอิเล็กตรอนในการชนหนึ่ง

ครั้ง

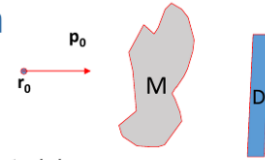
2.2 การจำลองมอนติคาร์โล

การจำลองแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo simulation) เป็นหนึ่งในกระบวนการทางสถิติที่เก่าแก่และใช้กันอย่างแพร่หลาย วิธีการแบบมอนติคาร์โลอาศัยการสร้างตัวเลขขึ้นแบบสุ่มเพื่อแก้ปัญหาที่ซับซ้อนด้วยการประมาณค่าแบบระเบียบวิธีคำนวณเชิงตัวเลข (Numerical method) ยิ่งไปกว่านั้นวิธีการแบบมอนติคาร์โลยังถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการจำลองระบบทาง ฟิสิกส์ เคมี และชีวภาพ รวมถึงทางด้านวิศวกรรมการเงินเพื่อเป็นวิธีการประเมินระดับความเสี่ยงและการทำนายราคาของตลาดหุ้น เป็นต้น วิธีการแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo method) ถือกำเนิดขึ้นในลอสอลามอส (Los Alamos) ในปี ค.ศ. 1940 [9] เมื่อนักฟิสิกส์ที่ทำงานวิจัยด้านฟิสิกส์อนุภาคพลังงานสูงได้นำวิธีการแบบมอนติคาร์โลเพื่อแก้สมการการขนส่งอนุภาค (Transport equation) ในปัจจุบัน โปรแกรมที่ตั้งอยู่บนพื้นฐานของวิธีดังกล่าวถูกใช้อย่างแพร่หลายเพื่อจำลองการขนส่งและอันตรกิริยาของอนุภาคกับสสาร เช่น GEANT4 [10], FLUKA [11], [12] MCNPX [13] PHITS [14] และ SRIM [15] เป็นต้น อย่างไรก็ตามวิธีการแบบมอนติคาร์โลจำเป็นต้องใช้ทรัพยากรคอมพิวเตอร์มหาศาล เนื่องจากวิธีนี้ต้องสุ่มตัวเลขเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ของอันตรกิริยาของอนุภาคกับสสารเพื่อให้ค่าความผิดพลาดทางสถิติ (Statistical error) มีค่าน้อยลง แผนภาพอธิบายอัลกอริทึมพื้นฐานของการจำลองมอนติคาร์โลถูกแสดงภาพที่ 1

Basic Monte Carlo simulation algorithm

Loop over n_p primary events:

1. Initialize source particle position and momentum.
2. If particle is in vacuum, advance it to next material boundary.
3. Determine total interaction cross section at present energy and material: σ
4. Evaluate the mean free path to the next interaction: $\lambda = 1/(N\sigma)$
5. Sample step length to next interaction from $p(s) = (1/\lambda) e^{-s/\lambda}$
6. Decide nature of interaction: $P_i = \sigma_i / \sigma$, $i=1,2,\dots,n$
7. Sample energy loss (and/or change of direction) from differential cross section for the selected interaction mechanism i . Update energy and direction of motion.
8. Add generated secondary particles to the stack if any.
9. Score contribution of the track/event to the desired physical observables.
10. Go to 2 unless:
 - Particle energy drops below user preset threshold
 - Particle exits the geometry



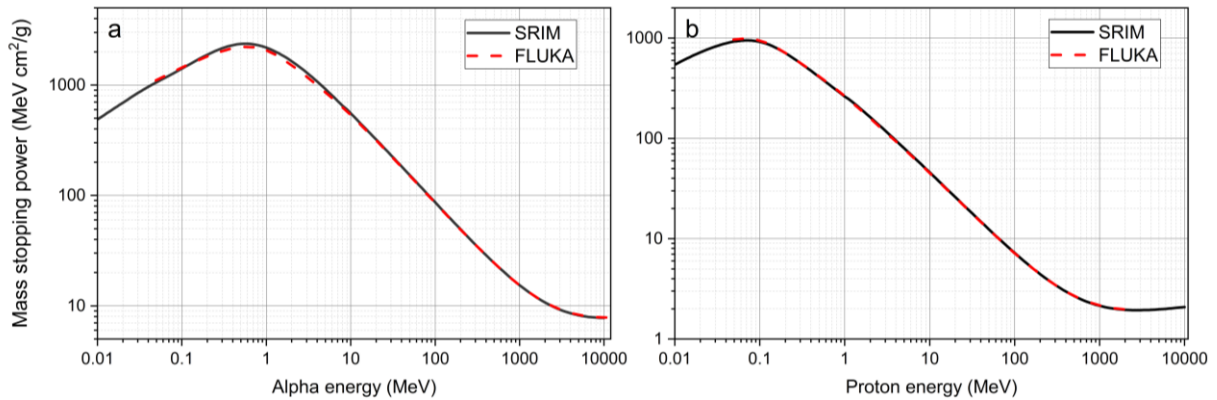
Introduction to Monte Carlo

ภาพที่ 1 อัลกอริทึมพื้นฐานของการจำลองมอนติคาร์โล

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอันตรกิริยาระหว่าง พลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีน (Polystyrene plastic scintillator) กับอนุภาคที่มีประจุ แอลฟา และ โปรตอน องค์ประกอบทางเคมีของพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีนคือ C_8H_8 และมีความหนาแน่น 1.06 g/cm^3 ยิ่งไปกว่านั้น ค่ากำลังหยุดยั้งมวลของพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีนและค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาค (Projected range) ที่ช่วงพลังงาน $0.01 \text{ MeV} - 10,000 \text{ MeV}$ ถูกคำนวณโดยโปรแกรม SRIM และ FLUKA มากกว่านั้นการกระจายไอออน (Ion distribution) ของอนุภาคแอลฟาและโปรตอนที่มีพลังงาน 0.01 MeV และ 0.05 MeV ตามลำดับ ถูกจำลองโดยมอนติคาร์โล SRIM โดยกำหนดจำนวนอนุภาคในการสุ่มเหตุการณ์ $10,000$ ไอออน

3 ผลการทดลองและการอภิปรายผล

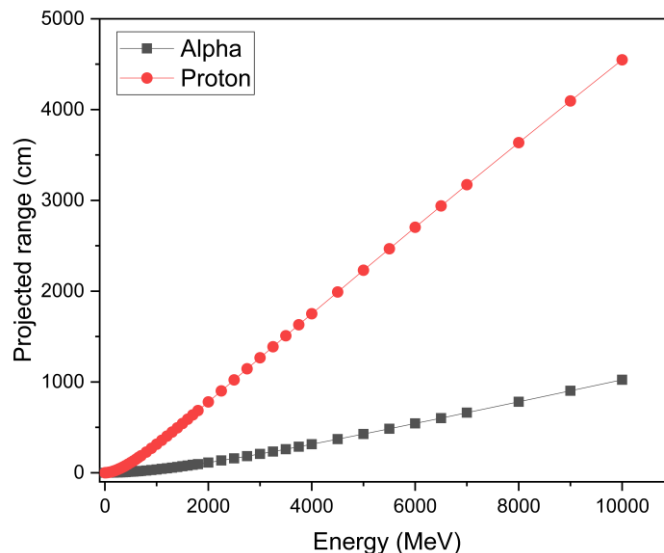
ในงานวิจัยนี้ กำลังหยุดยั้งมวล ค่าระยะความลึกเฉลี่ย และการกระจายไอออนของอนุภาค แอลฟา และ โปรตอน ในพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีน ถูกคำนวณโดยโปรแกรม SRIM และ FLUKA ค่ากำลังหยุดยั้งมวลของพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีนที่ช่วงพลังงาน $0.01 \text{ MeV} - 10,000 \text{ MeV}$ สำหรับอนุภาค a) แอลฟา และ b) โปรตอน ถูกแสดงในภาพที่ 2 ผลการจำลองพบว่าค่ากำลังหยุดยั้งโดยมวลของพอลิสไตรีนที่คำนวณด้วยโปรแกรม SRIM และ FLUKA ให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี กำลังหยุดยั้งมวลสำหรับอนุภาคแอลฟามีค่ามากที่สุดประมาณ $2,372 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$ ที่พลังงาน 0.55 MeV และสำหรับอนุภาคโปรตอนมีค่ามากที่สุดประมาณ $950.2 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$ ที่พลังงาน 0.07 MeV ยิ่งไปกว่านั้นกำลังหยุดยั้งมวลสำหรับอนุภาคแอลฟามีค่ามากกว่าอนุภาคโปรตอนเมื่อเปรียบเทียบที่พลังงานเท่ากัน ผลที่เกิดขึ้นนี้เพราะอำนาจการทะลุทะลวง (Penetration power) ของอนุภาคแอลฟามีค่าน้อยกว่าโปรตอน



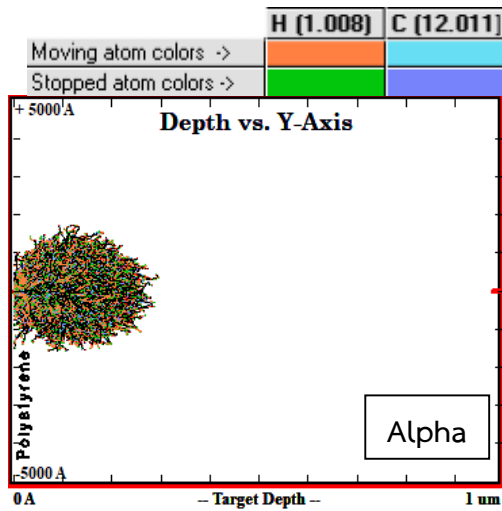
ภาพที่ 2 กำลังหยุดยั้งมวลของพอลิสไตรีนสำหรับอนุภาค a) แอลฟา และ b) โปรตอน ช่วงพลังงานตั้งแต่ 0.01 MeV – 10,000 MeV ที่ถูกคำนวณโดยโปรแกรม SRIM (เส้นทึบ) และ FLUKA (เส้นประ)

กำลังหยุดยั้งมวลบ่งบอกถึงความสามารถของตัววัสดุที่ทำให้อนุภาคที่ผ่านเข้ามาเกิดการสูญเสียพลังงานจนอย่าง ต่อเนื่องจากการทำให้โมเลกุลของวัสดุแตกตัวเป็นไอออนจนอนุภาคนั้นหยุดนิ่งระยะหนึ่งในตัววัสดุ ซึ่งระยะนี้เรียกว่า ค่าระยะ ความลึกเฉลี่ย (Projected range)

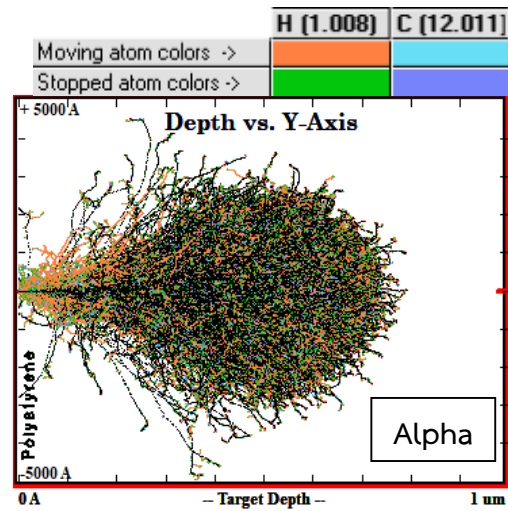
ค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟาและโปรตอนที่สามารถเจาะทะลุทะลวงเข้าไปในพอลิสไตรีนเป็นฟังก์ชัน ของพลังงานจลน์ถูกแสดงในภาพที่ 3 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟาและโปรตอนที่เจาะทะลุ ทะลวงเข้าไปในพอลิสไตรีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนมีค่า มากกว่าอนุภาคแอลฟาเมื่อเปรียบเทียบที่พลังงานเท่ากัน เนื่องจากอนุภาคโปรตอนมีอำนาจการทะลุทะลวงมากกว่าอนุภาค แอลฟา



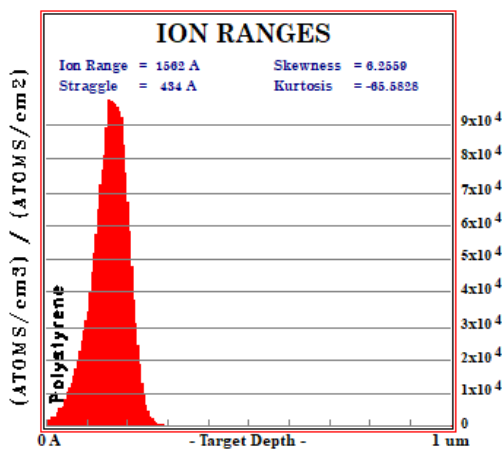
ภาพที่ 3 ค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟาและโปรตอนในพอลิสไตรีนในช่วงพลังงาน 0.01 MeV – 10,000 MeV



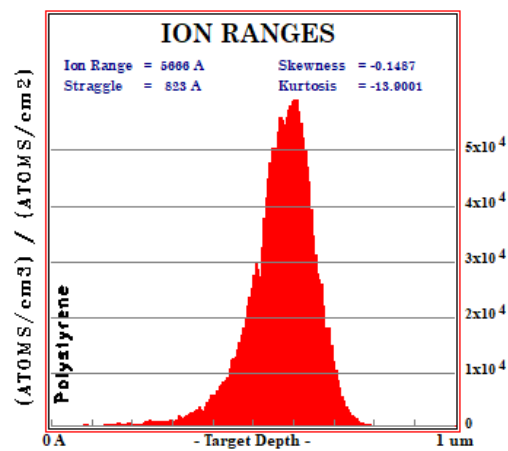
a) 0.01 MeV



b) 0.05 MeV

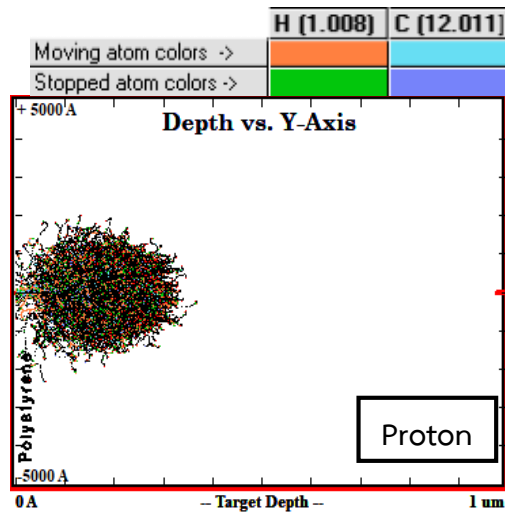


c) 0.01 MeV

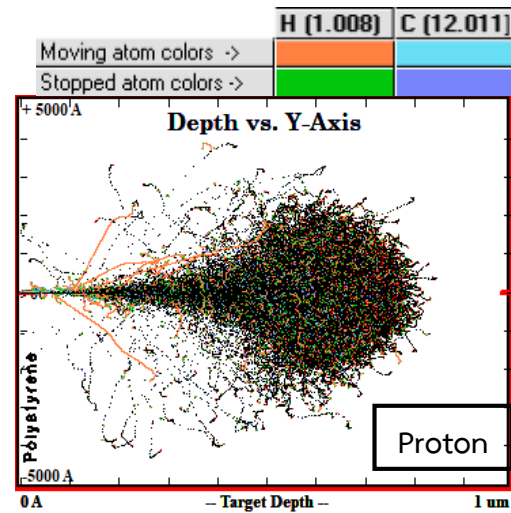


d) 0.05 MeV

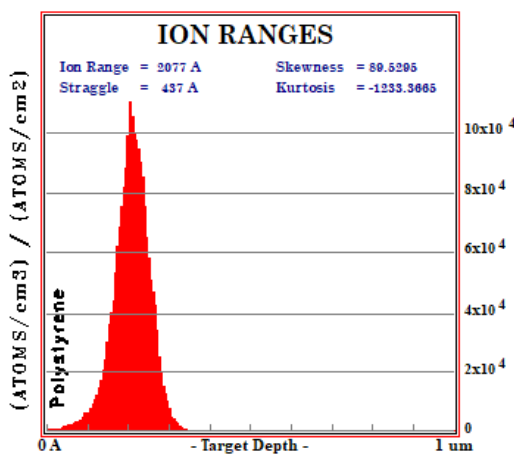
ภาพที่ 4 การจำลองเหตุการณ์ 2 มิติแบบวิถีการทางมอนติคาร์โล เมื่ออนุภาคแอลฟาเกิดอันตรกิริยากับพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีนที่พลังงาน a) 0.01 MeV b) 0.05 MeV c) การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 0.01 MeV และ d) การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟาที่พลังงาน 0.05 MeV



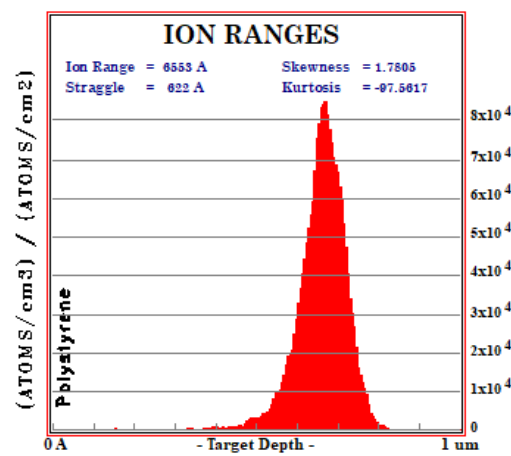
a) 0.01 MeV



b) 0.05 MeV



c) 0.01 MeV



d) 0.05 MeV

ภาพที่ 5 การจำลองเหตุการณ์ 2 มิติแบบวิธีการทางมอนติคาร์โล เมื่ออนุภาคโปรตอนเกิดอันตรกิริยากับพลาสติกซินทิลเลเตอร์ที่พอลิสไตรีนพลังงาน a) 0.01 MeV b) 0.05 MeV c) การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 0.01 MeV และ d) การแจกแจงความน่าจะเป็นของค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนที่พลังงาน 0.05 MeV

ภาพการจำลองเหตุการณ์ 2 มิติของการแตกตัวเป็นไอออนของพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีนเมื่ออนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานเท่ากับ 0.01 MeV และ 0.05 MeV เคลื่อนที่ผ่านจำนวน 10,000 ไอออน ถูกแสดงในภาพที่ 4a และ 4b ตามลำดับ อนุภาคแอลฟาจะสูญเสียพลังงานจากการถ่ายเทโมเมนตัมและพลังงานไปยังพอลิสไตรีนจนแตกตัวเป็นไอออน H และ C ซึ่งไอออนเหล่านั้นจะเคลื่อนที่จนกว่าจะหยุดในพอลิสไตรีน เส้นสีส้มร่องรอยเส้นทางการเคลื่อนที่ของ H ไอออนจนหยุดที่จุดสีเขียว และเส้นสีฟ้าร่องรอยเส้นทางการเคลื่อนที่ของ C ไอออนจนหยุดที่จุดสีน้ำเงิน เส้นสีดำคือเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาจนหยุดนิ่งในพอลิสไตรีน ผลการจำลองพบว่าในการสุ่มยิงอนุภาคแอลฟา 10,000 ตัว โดยใน 10,000 เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นนั้นพบว่าสำหรับอนุภาคแอลฟาพลังงาน 0.01 MeV ค่าระยะความลึกของอนุภาคแอลฟาที่สามารถเจาะทะลุเข้าไปในพอลิสไตรีนก่อนหยุดนิ่งอยู่ระหว่าง 0 อังสตรอม จนถึง 0.30 ไมโครเมตร โอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นได้มากที่สุดคือระยะความลึกประมาณ 1562 อังสตรอม หรือ 1.562 ไมโครเมตร ดังถูกแสดงในภาพที่ 4c และสำหรับอนุภาคแอลฟาพลังงาน 0.05 MeV ค่าระยะความลึกของอนุภาคแอลฟาที่สามารถเจาะทะลุเข้าไปในพอลิสไตรีนก่อนหยุดนิ่งอยู่ระหว่าง 0.10

ไมโครเมตร จนถึง 0.80 ไมโครเมตร โอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นได้มากที่สุดคือระยะความลึกประมาณ 5666 อังสตรอม หรือ 5.666 ไมโครเมตร ดังถูกแสดงในภาพที่ 4d

ภาพการจำลองเหตุการณ์ 2 มิติของการแตกตัวเป็นไอออนของพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีนเมื่ออนุภาคโปรตอนที่มีพลังงานเท่ากับ 0.01 MeV และ 0.05 MeV เคลื่อนที่ผ่านจำนวน 10,000 ไอออน ถูกแสดงใน ภาพที่ 5a และ 5b ตามลำดับ ผลการจำลองพบว่า สำหรับอนุภาคโปรตอนพลังงาน 0.01 MeV ค่าระยะความลึกของอนุภาคโปรตอนที่สามารถเจาะทะลุเข้าไปในพอลิสไตรีนก่อนหยุดนิ่งอยู่ระหว่าง 0 อังสตรอม จนถึง 0.35 ไมโครเมตร โอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นได้มากที่สุดคือระยะความลึกประมาณ 2077 อังสตรอม หรือ 2.077 ไมโครเมตร ดังถูกแสดงในภาพที่ 5c และสำหรับอนุภาคโปรตอนพลังงาน 0.05 MeV ค่าระยะความลึกของอนุภาคแอลฟาที่สามารถเจาะทะลุเข้าไปในพอลิสไตรีนก่อนหยุดนิ่งอยู่ระหว่าง 0.32 ไมโครเมตร จนถึง 0.83 ไมโครเมตร โอกาสความน่าจะเป็นที่จะเกิดขึ้นได้มากที่สุดคือระยะความลึกประมาณ 6553 อังสตรอม หรือ 6.553 ไมโครเมตร ดังถูกแสดงในภาพที่ 5d

4 สรุปผลการทดลอง

กำลังหยุดยั้งมวล ค่าระยะความลึกเฉลี่ย และภาพการจำลองเหตุการณ์ 2 มิติการกระจายไอออนของอนุภาคแอลฟา และ โปรตอน ในพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีน (C_8H_8) ถูกคำนวณโดยโปรแกรม SRIM และ FLUKA ที่ช่วงพลังงาน 0.01 MeV ถึง 10,000 MeV ผลการจำลองพบว่ากำลังหยุดยั้งมวลของพอลิสไตรีนที่คำนวณด้วยโปรแกรม SRIM และ FLUKA ให้ผลสอดคล้องกันเป็นอย่างดี กำลังหยุดยั้งมวลสำหรับอนุภาคแอลฟามีค่ามากกว่าอนุภาคโปรตอนเมื่อเปรียบเทียบที่พลังงานเท่ากัน ค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคแอลฟาและโปรตอนที่เจาะทะลุทะลวงเข้าไปในพลาสติกซินทิลเลเตอร์พอลิสไตรีนมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานเพิ่มขึ้น ค่าระยะความลึกเฉลี่ยของอนุภาคโปรตอนมีค่ามากกว่าอนุภาคแอลฟาเมื่อเปรียบเทียบที่พลังงานเท่ากัน นอกจากนี้การจำลองมอนติคาร์โลสามารถอธิบายการกระจายตัวของไอออน 2 มิติของการเกิดอันตรกิริยากับพอลิสไตรีนสำหรับอนุภาคแอลฟาและโปรตอนได้อย่างชัดเจน

5 กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐมที่ให้ความอนุเคราะห์และอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยเป็นอย่างดี

6 เอกสารอ้างอิง

- [1] Schorr, M. G., & Torney, F. L. (1950). Solid Non-Crystalline Scintillation Phosphors. *Phys. Rev.*, 80(3), 474. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.80.474>
- [2] Park, C., Kim, K. B., Baek, M. K., Kang, I. soo, Lee, S., Chung, Y. S., Chung, H., & Chung, Y. H. (2022). Development of a muon detector based on a plastic scintillator and WLS fibers to be used for muon tomography system. *Nuclear Engineering and Technology*, 55(3), 1009–1014. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.11.016>
- [3] Koo, B. T., Lee, H. C., Bae, K., Kim, Y., Jung, J., Park, C. S., Kim, H. S., & Min, C. H. (2021). Development of a radionuclide identification algorithm based on a convolutional neural network for radiation portal monitoring system. *Radiation Physics and Chemistry*, 180, 109300. <https://doi.org/10.1016/J.RADPHYSICHEM.2020.109300>
- [4] Amaudruz, P. A., Barbi, M., Bishop, D., Braam, N., Brook-Roberge, D. G., Giffin, S., Gomi, S., Gumplinger, P., Hamano, K., Hastings, N. C., Hastings, S., Helmer, R. L., Henderson, R., Ieki, K., Jamieson, B.,



- Kato, I., Khan, N., Kim, J., Kirby, B., ... Yokoyama, M. (2012). The T2K fine-grained detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 696, 1–31. <https://doi.org/10.1016/J.NIMA.2012.08.020>
- [5] Joram, C., Uwer, U., Leverington, B. D., Kirn, T., Bachmann, S., Ekelhof, R. J., & Müller, J. (2015). *LHCb Scintillating Fibre Tracker Engineering Design Review Report: Fibres, Mats and Modules*. <https://cds.cern.ch/record/2004811>
- [6] Andreev, V., Cvach, J., Danilov, M., Devitsin, E., Dodonov, V., Eigen, G., Garutti, E., Gilitzky, Y., Groll, M., Heuer, R. D., Janata, M., Kacl, I., Korbel, V., Kozlov, V., Meyer, H., Morgunov, V., NĚmeĉek, S., Pöschl, R., Polák, I., ... Zálešák, J. (2006). A high-granularity plastic scintillator tile hadronic calorimeter with APD readout for a linear collider detector. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 564(1), 144–154. <https://doi.org/10.1016/J.NIMA.2006.04.044>
- [7] Longair, M. S. (2011). Ionisation losses. In *High Energy Astrophysics* (pp. 131–153). Cambridge University Press.
- [8] Sylvie Braibant, Giorgio Giacomelli, M. S. (2012). *Particles and Fundamental Interactions* (1st ed.). Springer Dordrecht. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-94-007-2464-8>
- [9] Metropolis, N. (1987). The beginning. Los Alamos Science, 1987 Special Issue dedicated to Stanislaw Ulam, 125–130.
- [10] Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Asai, M., Axen, D., Banerjee, S., Barrand, G., Behner, F., Bellagamba, L., Boudreau, J., Broglia, L., Brunengo, A., Burkhardt, H., Chauvie, S., Chuma, J., Chytracsek, R., ... Zschesche, D. (2003). GEANT4 - A simulation toolkit. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 506(3), 250–303. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(03\)01368-8](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(03)01368-8)
- [11] Ahdida, C., Bozzato, D., Calzolari, D., Cerutti, F., Charitonidis, N., Cimmino, A., Coronetti, A., D’Alessandro, G. L., Donadon Servelle, A., Esposito, L. S., Froeschl, R., Garcia Alia, R., Gerbershagen, A., Gilardoni, S., Horváth, D., Hugo, G., Infantino, A., Kouskoura, V., Lechner, A., ... Widorski, M. (2022). New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Frontiers in Physics*, 9. <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.788253>
- [12] Battistoni, G., Boehlen, T., Cerutti, F., Chin, P. W., Esposito, L. S., Fassò, A., Ferrari, A., Lechner, A., Empl, A., Mairani, A., Mereghetti, A., Ortega, P. G., Ranft, J., Roesler, S., Sala, P. R., Vlachoudis, V., & Smirnov, G. (2015). Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, 82, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.11.007>
- [13] Waters, L. S., McKinney, G. W., Durkee, J. W., Fensin, M. L., Hendricks, J. S., James, M. R., Johns, R. C., & Pelowitz, D. B. (2007). The MCNPX Monte Carlo radiation transport code. *AIP Conference Proceedings*, 896, 81–90. <https://doi.org/10.1063/1.2720459>
- [14] Sato, T., Iwamoto, Y., Hashimoto, S., Ogawa, T., Furuta, T., Abe, S. ichiro, Kai, T., Tsai, P. E., Matsuda, N.,



Iwase, H., Shigyo, N., Sihver, L., & Niita, K. (2018). Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55(6), 684–690. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1419890>

- [15] Ziegler, J. F., Ziegler, M. D., & Biersack, J. P. (2010). SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010). *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 268(11–12), 1818–1823. <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2010.02.091>