



การศึกษาเปรียบเทียบโปรแกรมฟิทส์และฟลุก้าเพื่อประเมินประสิทธิภาพการกำบัง
รังสีคอสมิกของวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและเลขมวลน้อย
Comparative Study of PHITS and FLUKA for Cosmic Radiation Shielding
Evaluations of Low Density and Small Atomic Mass Number Materials

Dumrongsak Rodphothong ^{1,*} Tanin Nutaro¹ and Alejandro Saiz Rivera ²

¹Department of Physics, Faculty of Science, Ubon Ratchathani University, Ubon Ratchathani, Thailand 34190

²Department of Physics, Faculty of Science, Mahidol University, Bangkok, Thailand 10400

*Correspondent Author, E-mail: dumrongsak.ro.55@ubu.ac.th

Received: 13 November 2018 | Revised: 24 November 2018 | Accepted: 26 November 2018

บทคัดย่อ

โปรแกรมขนส่งแบบมอนติคาร์โลที่รู้จักกันอย่างแพร่หลายคือ FLUKA และ PHITS ได้นำมาใช้ในการศึกษาเปรียบเทียบสมบัติการกำบังรังสี ในวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและมีเลขมวลน้อยที่เป็นวัสดุหลักในยานอวกาศ การศึกษานี้มุ่งไปที่การประเมินประสิทธิภาพในการกำบังรังสีของวัสดุดังกล่าวเมื่ออยู่ภายใต้แหล่งกำเนิดจากเหตุการณ์พายุสุริยะครั้งใหญ่ (Solar Particle Event source) ที่เรารู้ค่า จากนั้นจะเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำบังรังสีเทียบกับอะลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุหลักในการสร้างยานอวกาศ โดยใช้โปรแกรม FLUKA และ PHITS วัสดุกำบังที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้คือ ไฮโดรเจนเหลว น้ำ พอลิเอทิลีนและอะลูมิเนียม การประเมินประสิทธิภาพการกันรังสีทำได้โดยการหาปริมาณรังสีดูดกลืน (absorption dose) ในน้ำซึ่งเป็นเป้า (target) ในการจำลอง การเปรียบเทียบประสิทธิภาพทำได้โดยต้องคงค่าความหนาแน่นพื้นที่ของวัสดุกำบังทุกชนิดให้เท่ากัน และเปรียบเทียบค่าปริมาณรังสีดูดกลืนที่ได้กับวัสดุอะลูมิเนียม จากการศึกษาพบว่า ไฮโดรเจนเหลว พอลิเอทิลีนและน้ำ มีประสิทธิภาพในการกำบังรังสีสูงกว่าอะลูมิเนียมในการกำบังรังสีจากดวงอาทิตย์เมื่อเกิดเหตุการณ์พายุสุริยะครั้งใหญ่ นอกจากนั้นยังพบว่าโปรแกรม FLUKA และ PHITS ให้ผลการจำลองที่สอดคล้องกันสามารถใช้ทดแทนกันได้ในงานการณณ์นี้

ABSTRACT

The two well-known Monte Carlo transport codes called FLUKA and PHITS have been used for comparing the cosmic radiation shielding properties of various low density and small mass number materials that are used for spacecraft constructing materials or components. The work is focused on the evaluation of shielding efficiency of the materials exposed to a known Solar Particle Event sources. Then we compared their effectiveness with aluminum which is the main primary metal used in spacecraft by employing FLUKA and PHITS programs. The shielding materials are liquid hydrogen, water, polyethylene and aluminum. The shielding efficiency of materials is evaluated by comparing the amount of dose absorbed by the water. The absorption doses obtaining from each material are compared with the aluminum. The efficiency comparison is made by fixing the area density of a

shielding material. We found that liquid hydrogen, polyethylene and water all outperform the aluminum for Solar Particle Event Shielding. We also found that FLUKA and PHITS are alternate codes that will be produced a very similar computational results for these circumstances.

คำสำคัญ: การกำบังรังสี โพรแกรมฟลูก้า โพรแกรมฟิทส์ รังสีคอสมิก

Keywords: Radiation Shielding, FLUKA, PHITS, Cosmic Rays

1. บทนำ

สำหรับยานอวกาศที่บินอยู่สูงขึ้นไปจากระดับพื้นดินเหนือโลก ในระดับนั้นมีอวกาศที่ห่อหุ้มโลก และสนามแม่เหล็กของโลกซึ่งเป็นกลไกตามธรรมชาติสำหรับการกำบังรังสีจากอวกาศที่เรารู้จักกันดี คือรังสีคอสมิก (cosmic rays) อย่างไรก็ตาม ในระดับวงโคจรของยานอวกาศ หรือ ตลอดจนสถานีอวกาศบรรยากาศจะเบาบางมากจนแทบไม่มีความสามารถในการกำบังหรือลดทอนอันตรายจากรังสีคอสมิกให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้ ทั้งลูกเรือและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในยานอวกาศจะต้องเผชิญกับอันตรายอย่างมากจากสภาพแวดล้อมการแผ่รังสีนั้นหากไม่มีเกราะกำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพเพียงพอ รังสีคอสมิกเป็นอนุภาคธรรมชาติที่ถูกกลไกบางอย่างเร่งจนมีพลังงานสูงซึ่งประกอบด้วย อนุภาคโปรตอน (นิวเคลียสของไฮโดรเจน) เป็นหลัก รองลงมาจะเป็น อนุภาคแอลฟา (นิวเคลียสของฮีเลียม) และธาตุต่าง ๆ ในตารางธาตุทั้งหมดที่เรารู้จัก รังสีคอสมิกอาจแบ่งแบบคร่าว ๆ ได้เป็นสองประเภท ได้แก่ รังสีคอสมิกที่มาจากกาแลคซี ที่เราเรียกว่า Galactic Cosmic Rays (GCRs) ซึ่งเป็นอนุภาคพลังงานสูงที่มาจากนอกระบบสุริยะ และอนุภาคพลังงานสูงจากดวงอาทิตย์ (Solar Cosmic Rays) แม้ในภายหลังจะนิยมเรียกว่า Solar Energetic Particles (SEPs) ก็ตาม อนุภาคที่ปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์ส่วนใหญ่เกิดจากอนุภาคของดวงอาทิตย์เอง อย่างไรก็ตามคำว่า "รังสีคอสมิก" มักใช้เพื่ออ้างถึงเฉพาะฟลักซ์ของ GCRs เท่านั้น และมีฟลักซ์ค่อนข้างคงที่

รังสีคอสมิกเกิดจากกระบวนการดาราศาสตร์ฟิสิกส์ประกอบด้วยโปรตอน (proton) ประมาณ 90% อนุภาคแอลฟา (alpha) ประมาณ 9% ส่วนที่เหลือเป็นนิวเคลียสที่หนักกว่า (~ 1%) ทั้งนี้จะหมายรวมถึงรังสีแกมมา (gamma ray) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าพลังงานสูงอีกด้วย อย่างไรก็ตามเราเรียกรังสีคอสมิกจากอวกาศก่อนที่จะเข้าชนบรรยากาศของโลกว่า รังสีคอสมิกปฐมภูมิ (primary cosmic rays) และเมื่อเข้าชนบรรยากาศของโลกซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ ไนโตรเจน โดยการ

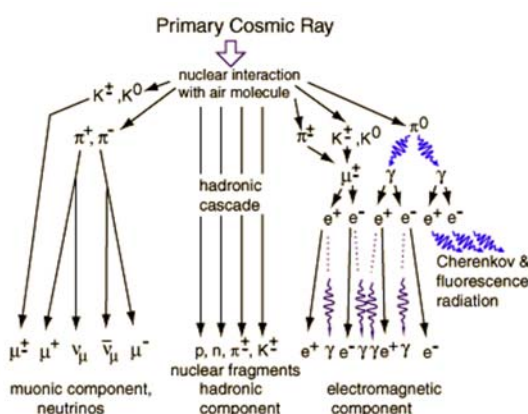
ชนเริ่มจากระดับความสูงประมาณ 70 กิโลเมตรเหนือระดับน้ำทะเล ผลของการชนจะเกิดกระบวนการฟิสิกส์นิวเคลียร์ก่อให้เกิดอนุภาคใหม่จำนวนมากมีลักษณะเหมือนฝักบัวอาบน้ำ เรียกว่า cascade air shower และเรียกรังสีที่เกิดขึ้นนี้ว่า รังสีคอสมิกทุติยภูมิ (secondary cosmic rays) รูปที่ 1 แสดงการเกิดรังสีคอสมิกทุติยภูมิจากการเข้าชนของรังสีปฐมภูมิซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็น GCRs กับโมเลกุลของบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลก การชนแต่ละครั้งพลังงานจะลดลงเรื่อย ๆ ตามความสูงจากพื้นดิน จนอนุภาคที่เข้าชนไม่เหลือพลังงานขีดเริ่มเพียงพอในอันตรกิริยา ด้วยเหตุนี้ที่ระดับภาคพื้นดินจึงมีสภาพแวดล้อมทางรังสีจากรังสีคอสมิกที่เหมาะสมและปลอดภัยเพียงพอสำหรับการอยู่อาศัย และการดำรงชีวิตของสิ่งที่มีชีวิตในโลก โดยมีบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกเป็นเกราะกำบังรังสี

รังสีคอสมิกที่มาจากดวงอาทิตย์ประกอบด้วยอนุภาคที่มีพลังงานต่ำซึ่งถูกปล่อยออกมาจากดวงอาทิตย์อย่างต่อเนื่องตลอดเวลา (โดยทั่วไปถือว่าเป็นอันตราย) แต่ในบางช่วงเวลาดวงอาทิตย์อาจมีความแปรปรวนของเส้นสนามแม่เหล็กสูง โดยสามารถสังเกตได้จากการปรากฏของจุดมืด (sun spot) ซึ่งจะเกิดขึ้นตามรอบวัฏจักรสุริยะ (solar cycle) โดยมีรอบประมาณ 11 ปี ในช่วงที่มีจุดมืดมาก (solar maximum) จะมีโอกาสที่จะเกิดความรุนแรงขึ้นที่ดวงอาทิตย์ เช่น การลุกจ้า (flare) และการปล่อยก้อนมวลโคโรนา (Coronal Mass Ejection: CME) การปลดปล่อยอนุภาคปริมาณมหาศาลออกจากดวงอาทิตย์ในช่วงระยะเวลานี้ส่งผลให้ความหนาแน่นของอนุภาคในบริเวณรอบโลกเพิ่มขึ้นจากช่วงปกติ เหตุการณ์นี้เราเรียกว่า พายุสุริยะ (solar storm) ซึ่งเหตุการณ์สำคัญที่มีผลกระทบชัดเจนและมีขนาดใหญ่เท่าที่มีการบันทึกไว้ในช่วงที่เกิดพายุสุริยะ เราจะเรียกว่า Solar Particle Events (SPEs) การกระเจิงของอนุภาคพลังงานสูงเหล่านี้จะส่งผลต่อพื้นที่ขนาดเล็กและอยู่สูงขึ้นไปจากพื้นดินที่มีความหนาแน่นของอากาศต่ำมาก ๆ และอาจเป็นอันตรายต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ซับซ้อนและละเอียดอ่อน ส่งผล

กระทบมนุษย์อวกาศที่ปฏิบัติงานในสถานีอวกาศในวงโคจรรอบโลก หรือตลอดจน นักบินและลูกเรือเครื่องบินโดยสารพาณิชย์ที่บินอยู่ในระดับเพดานบินที่ค่อนข้างสูงและอยู่ใกล้บริเวณขั้วโลก

ในอนาคตอันใกล้มนุษย์อาจมีความจำเป็นที่จะต้องขึ้นไปทำกิจกรรมต่าง ๆ นอกบรรยากาศของโลกมากขึ้น อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ และที่ระดับความสูงต่าง ๆ จากพื้นโลกนั้นความเข้มของระดับรังสีคอสมิกก็จะเพิ่มขึ้นเป็นเงาตามตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อเกิดเหตุการณ์รุนแรงทางรังสีบางอย่าง เช่น SPEs

ระดับของรังสีก็จะเพิ่มมากขึ้นจนอาจถึงระดับที่เป็นอันตราย ทั้งต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์ของอากาศยาน ตลอดจนนักบินและลูกเรือได้ อย่างไรก็ตามการลดระดับการได้รับรังสีให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย สามารถทำได้โดยการใช้วัสดุกำบังรังสี (radiation shielding materials) เป็นเกราะกำบังเพื่อลดทอนความหนาแน่น ตลอดจนระดับพลังงานให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยภายในห้องโดยสาร



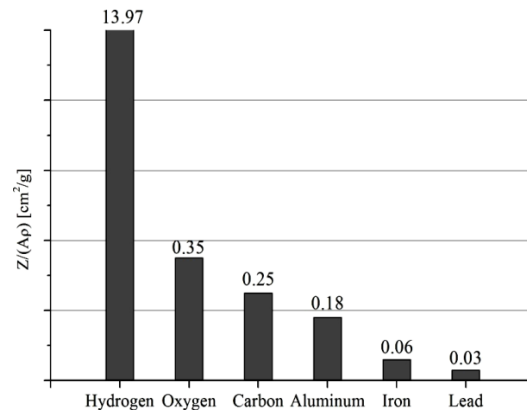
รูปที่ 1 แสดงให้เห็นกระบวนการฟิสิกส์นิวเคลียร์การเกิดรังสีคอสมิกทุติยภูมิ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะมีองค์ประกอบหลัก 3 อย่างคือ มิวออนและนิวตริโน เฮดรอน และ ส่วนที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Nave, 2005)

งานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายที่จะทำการจำลองเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังรังสีของวัสดุหลายอย่างเป็นโครงสร้างของยานอวกาศ หรือวัสดุที่ไม่ใช่โครงสร้างของยาน แต่ถูกนำขึ้นไปกับยาน โดยเปรียบเทียบกับอะลูมิเนียม ซึ่งเป็นวัสดุหลักของตัวยานที่นิยมใช้กันทั่วไป โดยจะเน้นไปที่วัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและมีเลขอะตอมน้อย ระเบียบวิธีเชิงตัวเลขที่ใช้จะเป็นระเบียบวิธีแบบมอนติคาร์โล (Monte Carlo method) ซึ่งเป็นกระบวนการแบบสุ่มโดยเลือกใช้โปรแกรม FLUKA และ PHITS จากนั้นจะเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองด้วยโปรแกรมทั้งสองนี้ สำหรับวัสดุกำบังรังสีแต่ละตัว โดยหลักการแล้ววัสดุที่มีความหนาแน่นและมวลอะตอมเฉลี่ยน้อยที่สุดมักเป็นโล่กำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับทั้ง SPEs และ GCRs (Cucinotta et al., 2012) เมื่ออนุภาคลังงานสูงเคลื่อนผ่านโครงสร้างวัสดุกำบังจะเกิดปฏิสัมพันธ์กับนิวเคลียสของวัสดุนั้นและสูญเสียพลังงาน อีกประการหนึ่งคือการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของรังสีหรืออนุภาคทุติยภูมิหลังจากเคลื่อนผ่านวัสดุกำบัง การเปลี่ยนแปลงพลังงานและอนุภาคทุติยภูมินี้ขึ้นกับ

ชนิดของวัสดุที่ใช้กำบัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งจำนวนอะตอมต่อหน่วยมวลในวัสดุ อีกอย่างคือการสูญเสียพลังงานโดยกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน (ionization loss) (Groom and Klein, 2000) ขององค์ประกอบหนึ่งของวัสดุป้องกันที่มีเลขอะตอม (atomic number: Z) เป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนอิเล็กตรอนต่ออะตอม และยังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า Z/A โดยที่ A คือเลขมวลอะตอม (atomic mass number) ของแต่ละองค์ประกอบของวัสดุ การสูญเสียพลังงานของอนุภาคที่เข้ามาชนในวัสดุกำบังสามารถวัดได้เป็นพลังงานที่สูญเสียต่อกรัมของวัสดุ หรืออนุภาคต่อพื้นที่ภาคตัดขวาง (ในหน่วย อนุภาคต่อ cm^2) อย่างไรก็ตามเราอาจเรียกความสามารถในการกำบังรังสีในหน่วยมวลนั้นว่า อำนาจหยุดยั้งเชิงมวล (mass stopping power) และพบว่าอำนาจหยุดยั้งเชิงมวล ยังเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาแน่น (ρ) ของวัสดุ เพราะฉะนั้นพลังงานที่สูญเสียโดยอนุภาคที่เกิดขึ้นต่อหนึ่งตารางเซนติเมตรต่อหน่วยมวล จึงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า $Z/\rho(A)$ โดยจะเห็นว่าอัตราส่วนนี้ประกอบด้วยสององค์ประกอบที่สำคัญ องค์ประกอบแรก คือ

อัตราส่วน Z/A ซึ่งเป็นสัดส่วนกับจำนวนอิเล็กตรอนต่อนิวคลีออน (nucleon) วัสดุที่มีมวลอะตอมน้อยและมีจำนวนอิเล็กตรอนมาก จะมีค่าอัตราส่วนนี้สูง (เช่น ไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 1 คาร์บอนมีค่าเท่ากับ 0.5 อะลูมิเนียมมีค่าเท่ากับ 0.48 เหล็กมีค่าเท่ากับ 0.46 และตะกั่วมีค่าเท่ากับ 0.4 เป็นต้น) ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวัสดุที่มีปริมาณไฮโดรเจนสูงจะมีความสามารถในการกำบังรังสีคอสมิกได้ดี องค์ประกอบที่สองคือความหนาแน่น (ρ) พบว่า

วัสดุที่มีความหนาแน่นที่น้อยจะมีความสามารถในการกำบังรังสีสูง รูปที่ 2 แสดงค่า $Z/\rho(A)$ สำหรับวัสดุที่แตกต่างกัน ไฮโดรเจนเหลวเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ดังนั้นในการศึกษานี้จึงได้เลือกใช้ไฮโดรเจนเหลว น้ำ และพอลิเอทิลีนซึ่งเป็นวัสดุที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบหลักมาใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี โดยจะเทียบประสิทธิภาพการกำบังรังสีของวัสดุแต่ละชนิดกับอะลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะหลักในการสร้างยานอวกาศ



รูปที่ 2 แสดงอัตราส่วน $Z/\rho(A)$ ของไฮโดรเจน(ของเหลว) ออกซิเจน คาร์บอน อะลูมิเนียม เหล็ก และตะกั่ว

FLUKA และ PHITS เป็นโปรแกรมการจำลองการขนส่งอนุภาค (particle transport simulation) โดยใช้ระเบียบวิธีแบบมอนติคาร์โล เป็นทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพสูงในการประเมินการป้องกันรังสี เนื่องจากโปรแกรมดังกล่าวได้ถูกใช้ในการจำลองทางด้านฟิสิกส์อนุภาค และได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวาง โดยกระบวนการทางฟิสิกส์อนุภาคที่เกิดขึ้นในเหตุการณ์จริงตัวโปรแกรมได้ถูกปรับปรุงให้สอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้มั่นใจได้ระดับหนึ่งว่าการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ด้วยวิธีการแบบนี้จะมีความแม่นยำสูงและเชื่อถือได้ นอกจากนี้แล้วโปรแกรมดังกล่าว ยังถูกนำไปใช้ในการจำลองด้านอื่น ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การจำลองทางรังสีบำบัด (radiotherapy) การออกแบบเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และตลอดจนการทำงานของเครื่องเร่งอนุภาคแบบต่าง ๆ อีกด้วย ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากความยืดหยุ่นในการกำหนดแหล่งกำเนิดของรังสีเป็น 3 มิติและรูปทรงที่ซับซ้อน ตลอดจนสามารถกำหนดสเปกตรัมของพลังงานของอนุภาคได้ตามต้องการ และเพื่อให้เกิดความเชื่อมั่นได้สูงขึ้นคณะผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรมทั้งสองชนิดนี้ในการจำลองเปรียบเทียบกัน เพื่อศึกษาผลการประเมินดังกล่าว

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

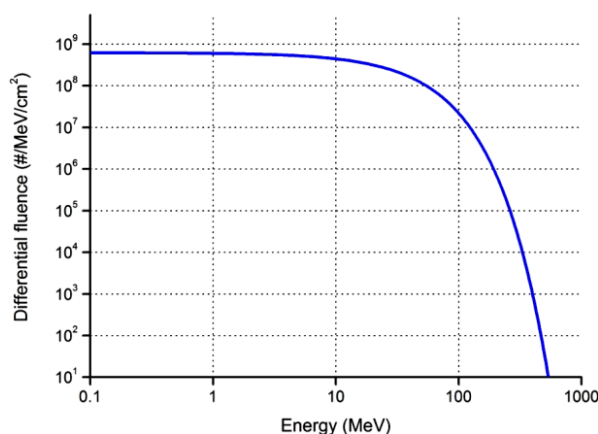
ในงานวิจัยนี้เราได้ทำการจำลองการนำยานอวกาศที่มีวัสดุกำบังดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ไปไว้ ณ ตำแหน่งหนึ่งในอวกาศที่อยู่ในวงโคจรรอบโลก เมื่อเกิด SPE ที่เรารู้ค่าสเปกตรัมของพลังงานแล้วประเมินค่าปริมาณรังสีดูดกลืนของวัสดุแต่ละชนิดเทียบกับอะลูมิเนียม โดยใช้โปรแกรมจำลองแบบมอนติคาร์โลสองชนิดคือ FLUKA และ PHITS

2.1 การสร้างแหล่งกำเนิดอนุภาค SPEs

Solar Particle Events (SPEs) (NOAA, 2018.) เป็นเหตุการณ์บางช่วงเวลาโดยมีโปรไฟล์พลังงานของอนุภาคซึ่งส่วนใหญ่เป็นโปรตอนที่มีพลังงานอยู่ในระดับที่มากกว่า 10 MeV และมีค่าฟลักซ์ที่มากกว่า $10 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-2}$ เหตุการณ์ SPE ส่วนใหญ่จะเกิดจากการปะทุของเปลวสุริยะ (solar flares) ในวัฏจักรสุริยะซึ่งจะมีความเข้มและพลังงานต่ำ ทำให้เกิดความเสียหายต่อสิ่งมีชีวิตและชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ไม่มาก วัสดุกำบังรังสีแบบทั่วไปและการออกแบบที่เหมาะสมจะสามารถให้การป้องกันได้อย่างเพียงพอ (Townsend, 2005; Wilson, 2000) แต่ในบางโอกาสมีการปล่อยอนุภาคขนาดใหญ่ (Coronal Mass Ejection) ที่อยู่ใกล้กับบรรยากาศชั้นโคโรนาของดวงอาทิตย์

เกิดขึ้น จะส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ SPE ขนาดใหญ่ ส่วนหนึ่งของเหตุการณ์ที่น่าสนใจและมีผู้สนใจศึกษาเป็นจำนวนมากได้ถูกบันทึกไว้สามเหตุการณ์ ได้แก่ SPE กุมภาพันธ์ 1956 SPE สิงหาคม 1972 และ SPE ตุลาคม 1989 ซึ่งอยู่ในรอบวัฏจักรสุริยะที่ 19–22 (Wilson et al., 1999; Xapsos, 2000) เหตุการณ์ดังกล่าวได้รับการรายงานระดับความหนาแน่นของอนุภาคโปรตอนที่เกิดขึ้นทั้งหมดมากกว่า $10^9 \text{ particles} \cdot \text{cm}^{-2}$ มีพลังงานมากกว่า 30 MeV ซึ่งความ

หนาแน่นและระดับพลังงานนี้อยู่ในระดับที่เป็นอันตรายและส่งผลกระทบต่อระบบอิเล็กทรอนิกส์ของอากาศยาน และตลอดจนลูกเรือในระหว่างการปฏิบัติงานประจำในอวกาศ (Parsons and Townsend, 2000) ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้เหตุการณ์ SPE ในเดือนสิงหาคม ค.ศ. 1972 ซึ่งมีลักษณะสเปกตรัมชัดเจนโดดเด่นและได้รับความสนใจศึกษาจากนักวิจัยอย่างกว้างขวาง รูปแบบโปรไฟล์ของสเปกตรัมพลังงานถูกศึกษาโดย Langley Research Center (Aghara et al., 2015) แสดงใน รูปที่ 3



รูปที่ 3 แสดงสเปกตรัมพลังงานของอนุภาคในเหตุการณ์ SPE 1972

จากการศึกษาพบว่าเหตุการณ์นี้มีช่วงพลังงานของอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.1–1000 MeV โดยสามารถเขียนเป็นสมการความสัมพันธ์ได้คือ:

$$\frac{d\phi}{dE} = 2.2 \times 10^7 \exp\left(-\left(\frac{E - 100}{30}\right)\right) \quad (1)$$

เมื่อ ϕ เป็นกระแสของอนุภาคโปรตอนหรือฟลักซ์ในหน่วย cm^{-3} และ E คือพลังงานจลน์ ในหน่วย MeV

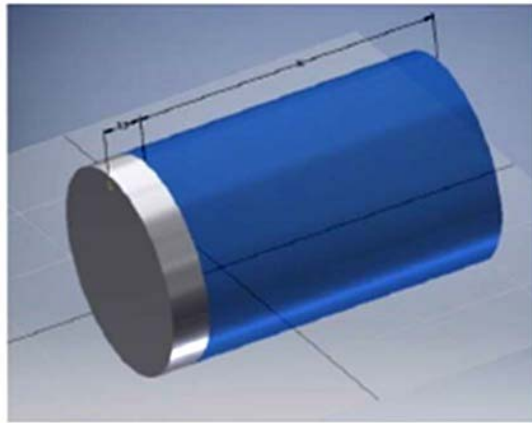
2.2 ภาพลักษณ์ของปัญหาและรูปทรงของแบบจำลอง

ในการจำลองนี้เราได้ตัดส่วนหนึ่งของยานอวกาศออกเป็นรูปทรงกระบอกมีรัศมี 10 cm ดังรูปที่ 4 โดยด้านซ้ายมือส่วนที่เป็นรูปทรงกระบอกสีขาวเป็นวัสดุที่ใช้ในการกำบังรังสี (shielding material) ที่เราจะใช้ศึกษา สีนํ้าเงินถัดออกมาด้านขวามือจะเป็นน้ำซึ่งใช้เป็นเป้า (target) ซึ่งสมมุติว่าเป็นห้องโดยสารและมีมนุษย์ปฏิบัติงานอยู่ อนุภาคจาก SPE จะถูกยิงเป็นลำทรงกระบอกมาจากทางด้านซ้ายมือเป็นแบบทิศทางเดียว (monodirectional) โดยมีทิศตั้งฉากกับภาคตัดขวางของวัสดุกำบัง มีพลังงานตั้งแต่ 0.01 MeV – 2.47 GeV และกำหนด

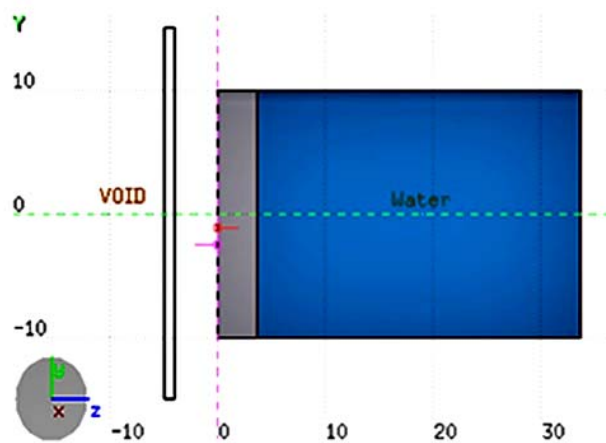
เงื่อนไขที่ขอบของพื้นผิวกระบอกเป็นขอบเขตการสะท้อน เพื่อป้องกันการรั่วไหลด้านข้าง เป้าหมายคือเพื่อประเมินการกระจายตัวของปริมาณรังสีภายในรูปทรงกระบอก ในการวิจัยนี้เราใช้ค่าความหนาแน่นพื้นที่ (area density) ของวัสดุกำบัง เป็น 10 และ 20 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นพื้นที่เฉลี่ยที่พบบนสถานีอวกาศนานาชาติ ISS (International Space Station) ตลอดจนระบบขนส่งทางอวกาศหรือกระสวยอวกาศ และใช้ค่าความหนาแน่นพื้นที่สำหรับน้ำที่เป็นเป้าคือ 30 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ซึ่งเป็นค่าความหนาแน่นพื้นที่อ้างอิงของค่าเฉลี่ยของมนุษย์ที่ได้จากการวิเคราะห์เชิงรังสี (Aghara et al., 2015) สำหรับน้ำที่ใช้แทนเนื้อเยื่อของมนุษย์เนื่องจากมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อยในการคำนวณพลังงานหยุดยั้งทางรังสีและในการจำลองทางรังสีบำบัดต่อมนุษย์นิยมใช้น้ำแทนเนื้อเยื่อมนุษย์จริงซึ่งสามารถทำได้ง่ายกว่าแต่ให้ผลใกล้เคียงกัน ส่วนวัสดุที่ใช้ในการจำลองเพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของการป้องกันรังสีจะเลือกใช้วัสดุที่มีไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบมากและเป็นวัสดุที่มีความหนาแน่น

ต่ำโดยมีมวลอะตอมน้อย เนื่องจากมีประสิทธิภาพมากที่สุดสำหรับการกำบังรังสีจากอวกาศ ดังนั้นในการวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ไฮโดรเจนเหลว น้ำ และพอลิเอทิลีนในการจำลอง โดยจะเปรียบเทียบประสิทธิผลกับอะลูมิเนียม และเพื่อให้สามารถ

เปรียบเทียบผลจากการจำลองได้ เราต้องกำหนดค่าความหนาแน่นพื้นที่ของวัสดุให้เท่ากัน ซึ่งหมายความว่าวัสดุแต่ละชนิดจะมีความหนาแน่นต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1



(a)



(b)

รูปที่ 4 แสดงรูปเรขาคณิตของระบบที่ใช้ในการจำลอง (a) เป็นแบบจำลอง 3 มิติ (b) เป็นมุมมองของ FLUKA และ PHITS

ตารางที่ 1 แสดงค่าความหนาแน่นและความหนาของวัสดุกำบังรังสีที่ใช้ในการจำลอง

Material	Density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	Thickness $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (cm)	Thickness $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (cm)
Aluminum	2.7	3.7	7.4
Polyethylene	0.94	10.7	21.27
Water	1.0	10	20
Liquid hydrogen	0.07	143	285.7

2.2 แหล่งกำเนิดและการตรวจนับจำนวนอนุภาคใน โปรแกรม PHITS

ในโปรแกรม PHITS (Sato et al., 2013a) ข้อมูลของแหล่งกำเนิดจะได้รับการกำหนดไว้ในส่วน [source] ซึ่งรวมถึงลักษณะเฉพาะของแหล่งกำเนิดที่จะระบุไว้ในค่าพารามิเตอร์ที่ชื่อว่า "s-type" และประเภทพลังงานระบุไว้ในพารามิเตอร์ที่ชื่อว่า "e-type" ค่าพารามิเตอร์ "s-type" ได้แสดงไว้ในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงแหล่งกำเนิดอนุภาคทรงกระบอกที่มีการกระจายพลังงานที่ระบุไว้ในพารามิเตอร์ "e-type" โดยระบุเป็นฟังก์ชัน $f(x)$ และจำนวนอนุภาคที่สร้างขึ้นในแต่ละระดับพลังงานสามารถระบุได้ในพารามิเตอร์ "p-type" ส่วนการตั้งค่าปริมาณ [source] จะสามารถตั้งค่าได้ในตอนเริ่มต้นตามระเบียบวิธี

มอนติคาร์โล ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นค่าปกติ (normalized) มีหน่วยเป็น $\text{particles} \cdot \text{cm}^{-2}$ หรือ $\text{particles} \cdot \text{MeV}^{-2} \cdot \text{cm}^{-2}$

นอกจากนี้โปรแกรม PHITS ยังมีแพ็คเกจที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะที่ช่วยให้ผู้วิจัยสามารถระบุแหล่งกำเนิดและการกระจายพลังงานในรูปแบบของฟังก์ชันการวิเคราะห์ $f(x)$ ที่มีค่า C คงที่ในรูปแบบของภาษาฟอร์แทรน ซึ่งสามารถทำได้โดยเลือก "e-type = 6" หลักการนี้ใช้สำหรับผลของ PHITS ที่แสดงในงานวิจัยนี้ โปรแกรม PHITS ยังมีการตั้งค่าพารามิเตอร์ที่หลากหลายเพื่ออธิบายถึงแหล่งกำเนิด สิ่งสำคัญคือการตั้งค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นให้สอดคล้องกับโปรแกรมจำลองอื่น เพื่อการเปรียบเทียบผลที่ได้เมื่อใช้โปรแกรมจำลองที่แตกต่างกัน

ในโปรแกรม PHITS ยังมีการใช้ตัวตรวจนับที่เรียกว่า [t-track] และ [t-cross] เพื่อนับจำนวนอนุภาคที่วิ่งผ่านปริภูมิที่ใช้ในการจำลอง โดยที่ [t-track] จะคำนวณปริมาณฟลักซ์เฉลี่ยของอนุภาคในพื้นที่ที่กำหนด ($\text{particles} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{source}^{-1}$) เป็น

ผลรวมของความยาวทางวิ่งของอนุภาค (track length) (cm)หารด้วยปริมาตร ของพื้นที่ (cm^3) ในทางกลับกัน [t-cross] สามารถหากระแสวนอนุภาคที่เคลื่อนผ่านพื้นที่ ซึ่งก็คือฟลักซ์บนพื้นผิวที่ระบุหรือจำนวนสุทธิของอนุภาคที่ผ่านพื้นผิว

```
[ Source ]
s-type = 4          # source spectra file
totfact = 5.46e+12  # weight factor
proj = proton       # kind of incident particle
dir = 1            # z-direction of beam [cosine]
r0 = 10.           # radius [cm]
z0 = -5.0          # minimum position of z-axis [cm]
z1 = -5.0          # maximum position of z-axis [cm]
e-type = 6
nm = -100
eg1 = 1.00E-02
eg2 = 2.47E+03
set: c10[2.2E+07]
set: c20[100]
set: c30[30]
f(x) = c10*exp(-(x-c20)/c30)
```

รูปที่ 5 แสดงการกำหนดลักษณะแหล่งกำเนิดของอนุภาคที่ใช้ในการจำลองในโปรแกรม PHITS เพื่อให้ได้สเปกตรัมของพลังงานที่สอดคล้องกับเหตุการณ์ SPE สิงหาคม 1972

2.3 แหล่งกำเนิดและการตรวจนับจำนวนอนุภาคใน โปรแกรม FLUKA

สำหรับโปรแกรม FLUKA (Ferrari et al., 2005) ข้อมูลอินพุตจะเป็นไฟล์ข้อความที่มีรายการบรรทัดที่เรียกว่า “CARDS” ซึ่งประกอบด้วยชุดข้อมูลตัวเลขของพารามิเตอร์เริ่มต้น (เช่น สเปกตรัมพลังงาน พิกัด ชนิดอนุภาค ฯลฯ) ที่เรียกว่า “WHATs” ซึ่งเป็นที่เก็บสารสนเทศและข้อมูลที่จำเป็นสำหรับ CARDS เพื่อให้สอดคล้องกับการตั้งค่าของการจำลอง ข้อมูลดังกล่าวอาจเป็นข้อมูลเชิงตัวเลข เช่น ช่วงพลังงานหรือตำแหน่ง ข้อมูลของ CARDS จะเป็นข้อมูลเฉพาะเจาะจงของบางหมวดหมู่ ตัวอย่างเช่น รูปทรงทางเรขาคณิตของวัตถุ (geometry) ตัวตรวจนับ (scoring) โดยตัวตรวจนับแต่ละตัวจะถูกกำหนดเพื่อตรวจนับปริมาณเฉพาะขึ้นอยู่กับปัญหาที่จะศึกษา โดยในงานวิจัยนี้ใช้ตัวตรวจนับ 2 แบบ คือ:

USRBDX: ถูกใช้เพื่อตรวจจับค่ากระแสอนุภาคที่ผ่านขอบรอยต่อของวัสดุ เพื่อนับจำนวนอนุภาคตั้งต้นและอนุภาคทุติยภูมิซึ่งเป็นอนุภาคที่เกิดขึ้นในวัสดุที่เป็นเกราะกำบังรังสีมีหน่วยเป็น $\text{ions} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{GeV}^{-1} \cdot \text{pr}^{-1}$

USRBIN: ถูกใช้คำนวณปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) โดยค่าเอาท์พุทจากโปรแกรม FLUKA จะมีหน่วยเป็น

$\text{GeV} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{pr}^{-1}$ หมายความว่าพลังงานถูกดูดกลืนต่อหน่วยน้ำหนัก

ค่าเอาท์พุทในโปรแกรม FLUKA จะใช้หน่วยย่อว่า “pr” ซึ่งมาจาก “per primary particles” ความหมายทางกายภาพจะแตกต่างกันไปตามประเภทของแหล่งกำเนิดที่ถูกนำมาทำการจำลอง ในกรณีของแหล่งกำเนิด SPE ค่า “pr” หมายถึงค่าของอนุภาคตั้งต้นที่ถูกทำให้ปกติ (normalized) (Savinov, 2016) สามารถหาได้จาก:

$$\phi_{total} = \phi(E_{max}) - \phi(E_{min}) \quad (2)$$

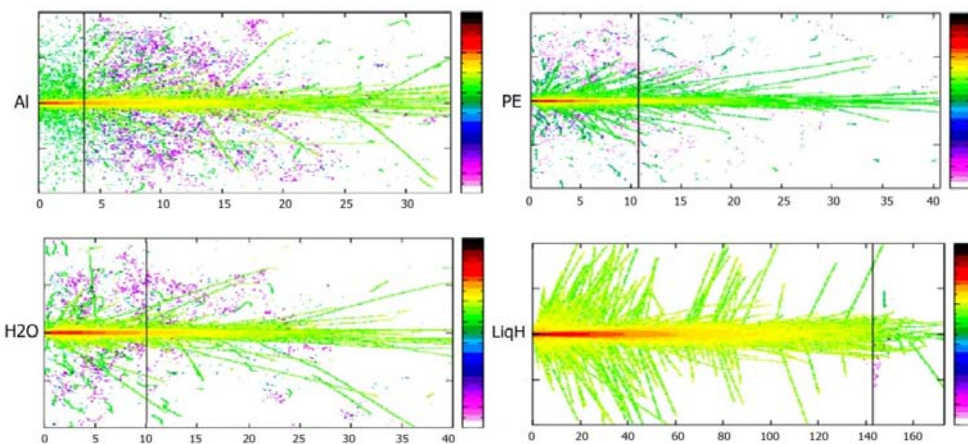
เมื่อ ϕ คือค่าอินทิกรัลของพลังงานของกระแสอนุภาคทั้งหมดในหน่วย cm^{-2} (หรือ $\text{primary} \cdot \text{cm}^{-2}$) จากนั้นค่านี้ก็สามารถนำไปใช้ใน USRBIN และ USRBDX ได้

3. ผลการวิจัย

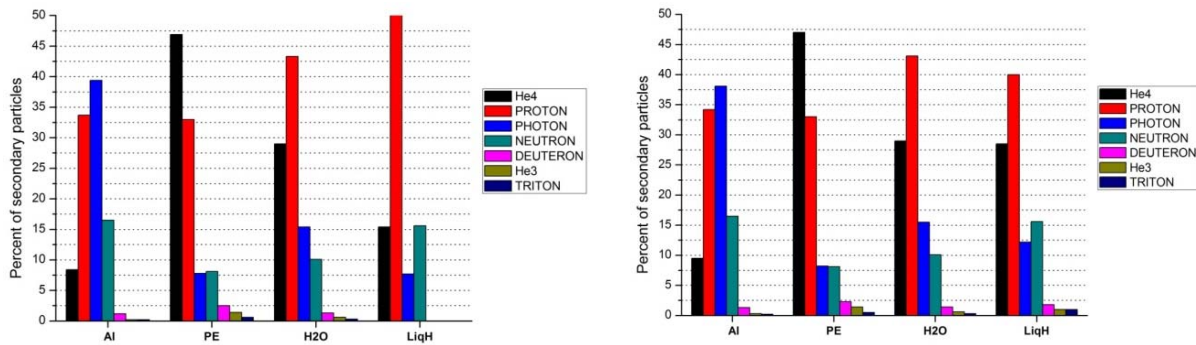
ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกเหตุการณ์ SPE 1972 ซึ่งเกิดขึ้นในเดือนสิงหาคม ค.ศ. 1972 เพื่อจำลองการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุกำบังรังสี โดยกำหนดให้ระยะห่างของแหล่งกำเนิดอนุภาคจากเป้าเท่ากับ 50 cm และได้ใช้จำนวนของเหตุการณ์เป็น 5×10^7 เหตุการณ์ของการจำลองแต่ละรอบ และทำการคำนวณซ้ำ 15 รอบเพื่อให้ผลการจำลองเกิดความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุดตามหลักวิธีการมอนติคาร์โล

การจำลองในขั้นแรกเป็นการศึกษาสมบัติการกำบังรังสีของวัสดุที่แตกต่างกัน เมื่อถูกอนุภาคจาก SPE 1972 วิ่งเข้าชนวัสดุกำบังและเป้า ดังรายละเอียดในรูปที่ 4 เป้าของการเข้าชนนี้เป็นรูปทรงกระบอก ที่ประกอบด้วยสองส่วน คือ วัสดุกำบังรังสีซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายมือ ตามด้วยแผ่นพื้นน้ำซึ่งสมมุติว่าเป็นห้องโดยสารในยานอวกาศและมีมนุษย์อยู่ เพื่อให้สามารถเปรียบเทียบสมบัติการดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิดได้นั้น เราต้องกำหนดให้วัสดุกำบังรังสีมีความหนาแน่นพื้นที่ที่เท่ากันคือ $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ สำหรับทั้งอะลูมิเนียม พอลิเอทิลีน น้ำ และไฮโดรเจนเหลว และความหนาแน่นพื้นที่ของน้ำที่ใช้เป็นเป้าเท่ากับ $30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (ดังตารางที่ 1) ในรูปที่ 6 เป็นผลที่ได้จากการจำลองโดยโปรแกรม FLUKA แสดงปริมาณรังสีดูดกลืน (absorbed dose) ทั้งในวัสดุกำบังและเป้า (น้ำ) สำหรับ SPE 1972 เส้นทึบที่ลากตามแนวตั้งในภาพจะแสดงรอยต่อระหว่างวัสดุกำบังกับเป้า (น้ำ) ซึ่งจะเห็นว่าสำหรับวัสดุแต่ละชนิดจะใช้ความหนาไม่เท่ากันเพื่อให้มีความหนาแน่นพื้นที่เท่ากัน ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนจากลำโปรตอนของ SPE ถูกคำนวณหาและแสดงผลด้วยสี โดยที่ปริมาณรังสีดูดกลืนจากต่ำไปสูงจะแสดงด้วยสีจากเขียวถึงสีดำตามลำดับ การ

พิจารณาสมบัติการกำบังรังสีสามารถดูได้จากระยะความลึกในน้ำ (ดูถัดจากแนวเส้นทึบแนวตั้ง) ปริมาณรังสีดูดกลืนที่เกิดขึ้นหลังวัสดุป้องกันรังสีจะแตกต่างกัน (สังเกตจากสีที่ต่างกัน) ทั้งนี้เนื่องจากองค์ประกอบวัสดุที่แตกต่างกันทำให้เกิดอนุภาคทุติยภูมิในปริมาณแตกต่างกัน ปริมาณรังสีดูดกลืนในเป้าที่แสดงเป็นค่ารวมที่ได้อาจอนุภาคทุติยภูมิที่เกิดขึ้นทั้งหมด ซึ่งพบว่าสำหรับวัสดุกำบังรังสีแต่ละชนิดจะสร้างปริมาณและชนิดของอนุภาคทุติยภูมิแตกต่างกัน FLUKA ช่วยให้สามารถวัดปริมาณเฉพาะจากอนุภาคแต่ละชนิดที่เกิดขึ้นและยังมีขีดความสามารถรวมถึงการแจกแจงเปอร์เซ็นต์สำหรับอนุภาคทุติยภูมิแต่ละชนิดอีกด้วย ซึ่งอนุภาคที่เราสนใจคือโปรตอนนิวตรอน โฟตอน (แสง) และอนุภาคแอลฟา ($\text{He}4$) และเราต้องไม่ลืมว่าสำหรับเหตุการณ์ SPE นั้น เราจะสนใจเฉพาะโปรตอนเท่านั้น ซึ่งเป็นรังสีปฐมภูมิที่เข้าชนวัสดุ รูปที่ 7 แสดงเปอร์เซ็นต์ของอนุภาคทุติยภูมิที่เกิดขึ้นในเป้าจากวัสดุกำบังชนิดต่าง ๆ ใช้ความหนาของวัสดุกำบังเป็น 10 และ $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ตามลำดับ



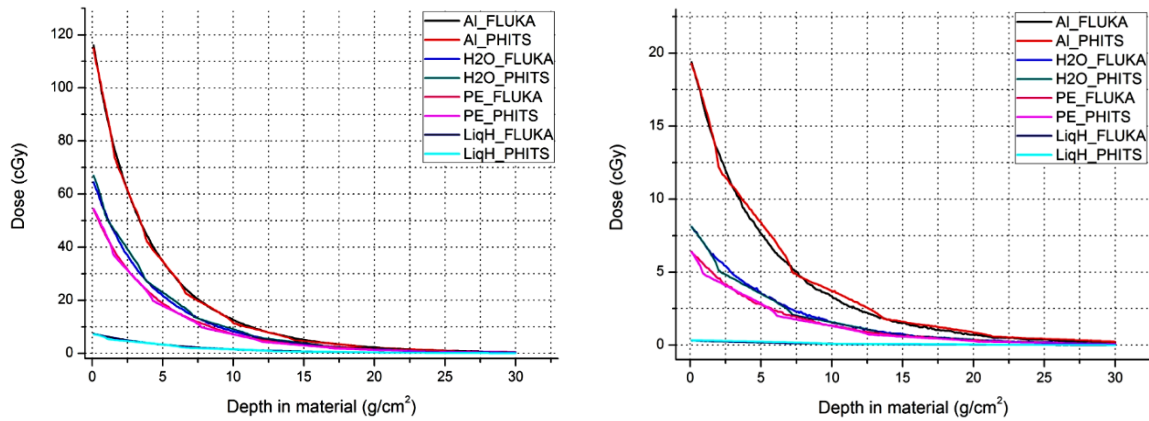
รูปที่ 6 แสดงผลค่ารังสีดูดกลืนในวัสดุกำบังชนิดต่าง ๆ ของเหตุการณ์ SPE 1972 จากการจำลองด้วยโปรแกรม FLUKA โดยมีเส้นทึบแนวตั้งเป็นขอบเขตรอยต่อระหว่างวัสดุกำบังและเป้าซึ่งในที่นี้คือน้ำ โดยกำหนดความหนาแน่นพื้นที่ให้วัสดุกำบังและเป้า (น้ำ) มีความหนาแน่นพื้นที่เป็น $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ และ $30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ ตามลำดับ



รูปที่ 7 แสดงให้เห็นเปอร์เซ็นต์การเกิดอนุภาคทุติยภูมิจากเหตุการณ์ SPE 1972 ในเป้าเมื่อผ่านวัสดุกำบังชนิดต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นพื้นที่ $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (รูปซ้าย) และ $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (รูปขวา)

ในขั้นแรกของการประเมินประสิทธิภาพของการกำบังรังสีเราจะพิจารณาจากปริมาณรังสีดูดกลืนที่เกิดขึ้นในเป้า (น้ำ) รูปที่ 8 แสดงปริมาณรังสีดูดกลืนที่ระดับความหนาแน่นพื้นที่ต่าง ๆ ในน้ำหลังวัสดุกำบังรังสีชนิดต่าง ๆ ที่มีความหนาแน่นพื้นที่ $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ และ $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ โดยการเทียบผลที่ได้จากโปรแกรม PHITS และ FLUKA ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่า PHITS และ FLUKA ให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกัน ในการจำลองค่าการดูดกลืนรังสีในน้ำที่อยู่เบื้องหลังวัสดุกำบังโดยวัดระยะความลึกของน้ำเริ่มต้นจากผิวรอยต่อระหว่างวัสดุกำบังและเป้า จะเห็นว่ากราฟที่ได้จากโปรแกรมทั้งสองไม่ทับกันสนิท มีความแตกต่างกันเล็กน้อย แต่ก็อยู่ในแนวทางเดียวกัน ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากความแตกต่างในการใช้ระเบียบทางคณิตศาสตร์ในกระบวนการขนส่งอนุภาค และแบบจำลองทางฟิสิกส์ที่แตกต่างกัน จากกราฟจะพบว่าค่าการดูดกลืนรังสีหลังไฮโดรเจนเหลวมีค่าน้อยกว่าพอลิเอทิลีน น้ำ และอะลูมิเนียมตามลำดับ จึงสรุปได้ว่าสำหรับแหล่งกำเนิด SPE 1972 ประสิทธิภาพของการกำบังรังสีของวัสดุจะเป็นไปตามค่า $Z/p(A)$ ของวัสดุกำบัง วัสดุความหนาแน่นต่ำที่มีมวลอะตอมน้อย ๆ ควรเป็นวัสดุป้องกันที่มีประสิทธิภาพที่สุด ดังนั้นไฮโดรเจนเหลวจึงเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการ

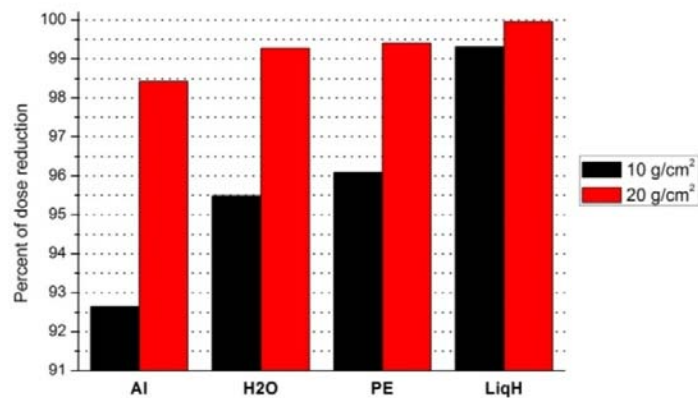
กำบังรังสีที่เกิดขึ้นจากดวงอาทิตย์ของเหตุการณ์ SPE ในขั้นที่สองเพื่อประเมินประสิทธิภาพของวัสดุกำบังรังสี เราใช้เปอร์เซ็นต์การลดของค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในเป้า(น้ำ) โดยเทียบสัดส่วนระหว่างสองกรณี คือมีวัสดุกำบังและไม่มีวัสดุกำบัง ถ้าเปอร์เซ็นต์เท่ากับศูนย์จะหมายความว่าวัสดุกำบังไม่ได้ทำให้เกิดการลดทอนรังสีลงแต่อย่างใด ซึ่งอาจหมายความว่าได้ว่าถ้าเปอร์เซ็นต์การลดของค่าปริมาณรังสีดูดกลืนมากจะเป็นวัสดุที่กำบังรังสีที่มีประสิทธิภาพดี ตารางที่ 2 และ รูปที่ 9 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดของค่าปริมาณรังสีดูดกลืน จากรูปที่ 9 เราสามารถสรุปได้ว่าการกำบังรังสีจากเหตุการณ์ SPE จากดวงอาทิตย์ ไฮโดรเจนเหลว พอลิเอทิลีน และตลอดจนน้ำเป็นวัสดุกำบังรังสีได้ดีกว่าอะลูมิเนียมในทุกกรณี โดยพบว่าที่ความหนาแน่นพื้นที่วัสดุกำบัง $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ มีเปอร์เซ็นต์การลดของค่าปริมาณรังสีดูดกลืน 99.31% สำหรับไฮโดรเจนเหลว 96.09% สำหรับพอลิเอทิลีน 95.49% สำหรับน้ำ และ 92.65% สำหรับอะลูมิเนียม ส่วนเปอร์เซ็นต์การลดของค่าปริมาณรังสีดูดกลืนสำหรับความหนาแน่นพื้นที่ $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ คือ 99.96% 99.41% 99.28% และ 98.43% สำหรับไฮโดรเจนเหลว พอลิเอทิลีน น้ำ และอะลูมิเนียมตามลำดับ



รูปที่ 8 แสดงค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในเป้า (น้ำ) ที่ความลึกต่าง ๆ หลังจากผ่านวัสดุกำบังรังสีชนิดต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นพื้นที่ $10 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (รูปซ้าย) และ $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ (รูปขวา) ของเหตุการณ์ SPE 1972 โดย PHITS และ FLUKA

ตารางที่ 2 แสดงปริมาณรังสีดูดกลืนและเปอร์เซ็นต์การลดของค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในเป้าที่อยู่หลังวัสดุกำบังแต่ละชนิด

Shielding material	No shielding	Aluminum		Water		Polyethylene		Liquid Hydrogen	
Area density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$)	-	10	20	10	20	10	20	10	20
Absorbed dose (cGy)	292	21.44	4.58	13.16	2.10	11.41	1.70	2.00	0.10
Percent of dose reductions (%)	0	92.65	98.43	95.49	99.28	96.09	99.41	99.31	99.96



รูปที่ 9 แสดงเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่าปริมาณรังสีดูดกลืนในเป้าหลังวัสดุกำบังชนิดต่าง ๆ ที่ความหนาแน่นพื้นที่ 10 และ $20 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2}$ สำหรับเหตุการณ์ SPE 1972

4. สรุปผลการวิจัย

วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือการหาวัสดุที่เป็นประโยชน์ในแง่ของการกำบังรังสีจากเหตุการณ์พายุสุริยะครั้งใหญ่ (SPE) ซึ่งเป็นอุปสรรคและอันตรายทั้งต่อนักบินอวกาศ ตลอดจนระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่ละเอียดอ่อนและซับซ้อนของยานอวกาศเมื่อมีความจำเป็นต้องปฏิบัติงานอยู่ในอวกาศห้วงลึก เพื่อประเมินคุณสมบัติการกำบังรังสี งานวิจัยนี้ได้เลือกวัสดุที่เป็น

สภาพแวดล้อมของยานอวกาศที่ถูกใช้อยู่แล้ว เช่น อะลูมิเนียมที่เป็นโครงสร้างหลัก ไฮโดรเจนเหลว น้ำ รวมทั้งพอลิเอทิลีน (พลาสติก) ก็เป็นวัสดุพื้นฐานที่ถูกนำขึ้นไปบนยานอวกาศ ในงานวิจัยนี้ได้เลือกเหตุการณ์ SPE สิงหาคม ค.ศ. 1972 เป็นแหล่งกำเนิดรังสีในการจำลอง เนื่องจาก SPE ครั้งนี้เป็นหนึ่งในเหตุการณ์ที่ใหญ่ที่สุดที่เกิดขึ้นในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาและมีความรุนแรงมาก มีหลายวิธีในการประเมินประสิทธิภาพของวัสดุที่แตกต่างกันเพื่อลดการแผ่รังสีในอวกาศ ปัจจุบันมีโปรแกรม

จำลองการขนส่งอนุภาคหลายโปรแกรม ที่สามารถประเมินค่าปริมาณรังสีดูดกลืนได้ อย่างไรก็ตามเราได้เลือกใช้โปรแกรมแบบมอนติคาร์โล ที่เรียกว่าโปรแกรม FLUKA และ PHITS เนื่องจากมีความแม่นยำสูง ใช้งานง่ายและถูกใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับวิจัยในด้านนี้ ข้อได้เปรียบของ FLUKA คือการสร้างแบบจำลองวัตถุที่ซับซ้อนโดยใช้โมเดลเรขาคณิตเชิงโครงสร้าง และมีเครื่องมือในตัวเพื่อจำลองสภาพแวดล้อมของรังสีคอสมิก อีกทั้งมีสิ่งแวดล้อมที่ได้ตอบกับผู้ใช้งาน แบบ GUI (graphic user interface) และมีโปรแกรมแสดงผลข้อมูลแบบกราฟิก (Flair) ได้ในตัว จึงทำงานได้สะดวกกว่า PHITS ซึ่งจะเป็นการทำงานแบบโหมดตัวอักษร (text mode) ซึ่งอาจไม่ได้รับความสะดวกเทียบเท่า FLUKA แต่อย่างไรก็ตาม PHITS มีข้อได้เปรียบที่เหนือกว่าคือรองรับการใช้งาน แบบขนาน (parallel processing) ได้โดยตรงทำให้การจำลองระบบที่ซับซ้อนและมีขนาดใหญ่สามารถทำได้เร็วกว่า ถ้ามีระบบคอมพิวเตอร์ที่เร็วและมีจำนวนหน่วยประมวลผล (CPU) มากพอ ซึ่งจะกระทำได้ยากบน FLUKA ความตั้งใจของการศึกษาครั้งนี้ คือการหาวัสดุที่ดีกว่าอะลูมิเนียมซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้แพร่หลายมากที่สุดในยานอวกาศ แบบจำลองถูกทำขึ้นให้คล้ายจริงมากที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ แต่ในเวลาเดียวกันไม่จำเป็นต้องใช้เวลาในการคำนวณมากนัก ผลของการจำลองแสดงให้เห็นว่าโปรแกรม PHITS และ FLUKA ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันมาก จนอาจนำไปใช้ทดแทนกันได้ แต่อย่างไรก็ตามการใช้โปรแกรมต่างชนิดหลายตัว จะเป็นการยืนยันผลการจำลองได้อีกนัยหนึ่ง เพราะในทางปฏิบัติส่วนใหญ่ปัญหาทางฟิสิกส์ หรือ ตลอดจนดาราศาสตร์ฟิสิกส์ ไม่มีผลเฉลยแม่นยำตรงให้เปรียบเทียบได้ นอกจากนี้ยังสามารถสรุปได้ว่าสำหรับเหตุการณ์ SPE ไฮโดรเจนเหลว ตลอดจนวัสดุที่มีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบหลัก มีประสิทธิภาพการกำบังรังสีในกรณีนี้ได้ดีกว่าอะลูมิเนียม ผลลัพธ์เหล่านี้สอดคล้องกับค่า $Z/\rho(A)$ ของวัสดุ ซึ่งพิสูจน์ได้จากการจำลองแล้วว่าวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำและมีเลขมวลอะตอมน้อยควรเป็นวัสดุที่มีประสิทธิภาพที่สุดสำหรับการป้องกันรังสี

เอกสารอ้างอิง

- Aghara, S.K., Sriprisan, S.I., Singleterry, R.C. and Sato, T. (2015). Shielding evaluation for solar particle events using MCNPX, PHITS and OLTARIS codes. Life Sciences in Space Research 4: 79–91.
- Cucinotta, F.A., Kim, Y. and Chappell, L. J. (2012). Evaluating Shielding Approaches to Reduce Space Radiation Cancer Risks. NASA Center for AeroSpace Information. แหล่งข้อมูล : <https://three.jsc.nasa.gov/articles/CucinottaKimChappell0512.pdf>. ค้นเมื่อวันที่ 12 มกราคม 2561.
- Ferrari, A., Fassò, A., Ranft, J. and Sala, P.R. (2005). FLUKA: a multi-particle transport code. European organization for nuclear research, แหล่งข้อมูล: <http://www.fluka.org/content/manuals/FM.pdf>. ค้นเมื่อวันที่ 29 มกราคม 2561.
- Groom, D.E. and Klein, S.R. (2000). Passage of particles through matter. European Physical Journal C 15: 163–173.
- Nave, R. (2005). Cosmic Rays. Georgia State University, แหล่งข้อมูล: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Astro/cosmic.html>. ค้นเมื่อ 20 มกราคม 2561.
- NOAA. (2018). GOES proton flux. แหล่งข้อมูล: <https://www.swpc.noaa.gov/products/goes-proton-flux>. ค้นเมื่อวันที่ 2 มีนาคม 2561.
- Parsons, J.L. and Townsend, L.W. (2000). Interplanetary crew dose rates for the August 1972 solar particle event. Radiation Research 153: 729–733.
- Sato, T., Niita, K., Matsuda, N., Hashimoto, S., Iwamoto, Y., Noda, S., Ogawa, T., Iwase, H., Nakashima, H., Fukahori, K., Okumura, T., Kai, T., Chiba, S., Furuta, T., Sihver, L. (2013a). Particle and heavy ion transport code system PHITS. Journal of Nuclear Science and Technology 50: 913–923.
- Savinov, R. (2016). Evaluation of efficiency of various materials to shield from radiation in space using the monte carlo transport code called fluka. Master of Science in Aerospace Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo: 71 pages.
- Townsend, L.W. (2005). Implications of the space radiation environment for human exploration in deep space. Radiation Protection Dosimetry 115: 44–50.
- Wilson, J.W., Cucinotta, F.A., Shinn, J.L., Simonsen, L.C., Dubey, R.R., Jordan, W.R., Jones, T.D., Chang, C.K. and Kim, M.Y. (1999). Shielding from solar particle event exposures in deep space. Radiation Measurements 30: 361–382.

Wilson, J.W. (2000). Overview of radiation environments and human exposures. *Health Physics: The Radiation Safety Journal* 79: 470-494.

Xapsos, M. A. , Barth, J. L. and Stassinopoulos, E. G. (2000). Characterizing solar proton energy spectra for radiation effects applications. *IEEE Transactions on Nuclear Science* 47: 2218–2223.

