การจำลองระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนอุณหภาพโดยโปรแกรมมอนติคาร์โล

วรศิษย์ อุชัย*

Worasit U-Chai, (2005).* **Monte Carlo Simulation of the Explosive Detection System Using Thermal Neutron Activation Technique.** *Suranaree J. Sci. Technol. 12(2):132-142.*

Received: Dec 23, 2004; Revised: Apr 18, 2005; Accepted: Apr 21, 2005

Abstract

In this research, Monte Carlo simulation of the Explosive Detection System (EDS) using Thermal Neutron Activation (TNA) technique was performed. MCNP-4C Monte Carlo program was used for the simulation and the prototype of the EDS is a luggage inspection system using TNA technique with ^{252}Cf as neutron source. Six vertical arrayed-gamma ray detectors were used to detect gamma ray fluxes resulted from thermal neutron activation of nuclei of the interrogated materials. Gamma ray fluxes of the six arrayed-gamma ray detectors are calculated for comparison. Polyethylene is used as the neutron moderator and shielding. Samples used in the simulation include silk, wool, nylon and explosive(C-4) which were put in the luggage both separately and mixed together. The simulation results show that the EDS using TNA technique is able to indicate the existence and positions of explosive.

Keywords: Monte Carlo simulation, MCNP program, explosive detection system, thermal neutron activation techniqu

บทคัดย่อ

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการจำลองระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนโดยการใช้โปรแกรมมอนติคาร์โล โปรแกรมมอนติคาร์โลที่ใช้สำหรับการจำลองครั้งนี้คือ โปรแกรม MCNP-4C และต้นแบบของระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้คือ ระบบตรวจกระเป๋าเดินทางที่ใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนโดยมีแหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็น ^{252}Cf ชุดของหัววัดรังสีแกมมาจำนวน 6 หัววัดซึ่งวางซ้อนกันในแนวดิ่ง ถูกนำมาใช้เพื่อวัดฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากการอันตรกิริยาของการกระตุ้นด้วยนิวตรอนอุณหภาพในนิวเคลียสของวัสดุที่นำมาตรวจสอบ ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาระหว่างหัววัดรังสีทั้ง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี 111 ถนนมหาวิทยาลัย ตำบลสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัดนครราชสีมา 30000 โทรศัพท์ 0-4422-4597 โทรสาร 0-4422-4293

E-mail: uchai@sut.ac.th

**ผู้เขียนที่ให้การติดต่อ*

6 หัววัดได้รับการคำนวณเพื่อการเปรียบเทียบ วัสดุลดทอนพลังงานและวัสดุกำบังรังสีของนิวตรอนที่ใช้ในการจำลองคือ โพลิเอทิลีน สารตัวอย่างที่ใช้ในการจำลองประกอบด้วย ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ ผ้าไนลอน และวัตถุระเบิด (C-4) โดยการบรรจุสารตัวอย่างเหล่านี้ในกระเป๋าเดินทางมีทั้งบรรจุเฉพาะอย่างและบรรจุหลายอย่างไว้ร่วมกัน ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนสามารถตรวจหาวัตถุระเบิดและตำแหน่งของวัตถุระเบิดได้

บทนำ

หลังจากเหตุการณ์การลอบวางระเบิดเครื่องบินของสายการบินแอร์อินเดียที่ประเทศแคนาดา เมื่อปี พ.ศ. 2528 และเครื่องบินของสายการบินแพน แอมที่ประเทศสก๊อตแลนด์ เมื่อปี พ.ศ. 2531 ทำให้รู้ว่าระบบตรวจกระเป๋าเดินทางที่มีอยู่ในขณะนั้นไม่สามารถตรวจวัตถุระเบิดบางชนิดได้ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาเพื่อหาเทคนิคใหม่ ๆ ที่จะสามารถตรวจวัตถุระเบิดได้ทุกชนิด เทคนิคที่ได้รับความสนใจในขณะนั้นก็คือ เทคนิคการกระตุ้นด้วยนิวตรอนอุณหภาพ ซึ่งเรียกชื่อว่า "Thermal Neutron Activation (TNA)" ในเทคนิค TNA (Gozani *et al.*, 1992) นี้ จะใช้อนุภาคนิวตรอนเป็นสื่อในการตรวจ โดยมีหลักการว่าเมื่อยิงนิวตรอนอุณหภาพซึ่งมีพลังงานต่ำ (0.025 eV) ไปกระทบกับนิวเคลียสของวัสดุที่นำมาตรวจสอบนิวตรอนอาจถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียสนั้น แล้วกลายเป็นนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้น เนื่องจากนิวเคลียสที่ถูกกระตุ้นจะไม่มีเสถียรภาพ จึงพยายามกลับสู่สถานะพื้นโดยการปลดปล่อยรังสีแกมมาที่มีพลังงานเฉพาะออกมา พลังงานดังกล่าวจะมีค่าแตกต่างกันสำหรับนิวเคลียสต่างชนิดกัน ดังนั้นเราจึงสามารถใช้ข้อมูลของพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นเป็นข้อมูลในการวินิจฉัยชนิดของวัสดุที่นำมาตรวจสอบได้

บริษัท Science Application International Corporation (SAIC) ซึ่งเป็นบริษัทในประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นบริษัทแรกที่ทำการวิจัยและพัฒนาระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคนิค TNA ซึ่งสามารถทำงานได้เป็นที่น่าพอใจ (Michael and Hoopengardner, 1992) อย่างไรก็ตามระบบดังกล่าวมีราคาสูงและน้ำหนักมากเกินไป ต่อมา Bartko and Ruddy จาก Westinghouse Science & Technology Center (Bartko and Ruddy, 1996) ได้ทำการทดลองเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคนิค TNA นี้ และได้ผลลัพธ์เป็นที่น่าพอใจ จนในเวลาต่อมาองค์การการบินพลเรือนของสหรัฐอเมริกา (The U.S. Federal Aviation Administration) ได้สนับสนุนการสร้างเครื่องต้นแบบของเทคนิค TNA ขึ้นมาและนำไปทดสอบในสนามบินของเมืองชิคาโกและฟิลลาเดลเฟีย ผลการทดสอบพบว่าระบบดังกล่าวสามารถตรวจวัตถุระเบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่าอัตราการตรวจพบ (detection rate) สูงถึง 99.2 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการตรวจผิดพลาด (false alarm rate) ต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์

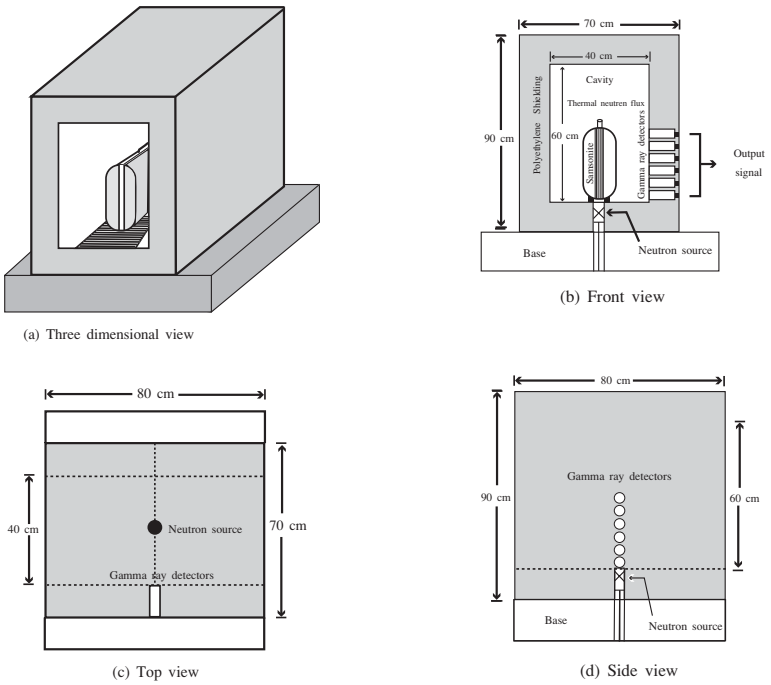
ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการจำลองการทำงานของระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคนิค TNA โดยใช้โปรแกรมมอนติคาร์โล MCNP ซึ่งย่อมาจากคำว่า "A General Monte Carlo N-Particle Transport Code" โปรแกรมนี้เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองการเคลื่อนที่ของอนุภาคผ่านสสาร ซึ่งเริ่มต้นพัฒนาขึ้นมาสมัยสงครามโลกครั้งที่ 2 ที่ห้องทดลองแห่งชาติของสหรัฐอเมริกาที่เมืองลอสอลามอส โปรแกรมดังกล่าวได้รับการพัฒนามาหลายรุ่นแล้วและรุ่นที่ใช้ในการจำลองครั้งนี้คือรุ่น MCNP-4C (Radiation Shielding Information Center, 1993) โดยใช้ข้อมูลของ cross section สำหรับอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนและรังสีแกมมากับสสารจาก "The Evaluated Nuclear data File B-VI" เนื่องจากโปรแกรม MCNP เป็นที่รู้จักและใช้กันอย่างแพร่หลาย ผู้เขียนจึงไม่ได้อธิบายถึง

วิธีการใช้โปรแกรมในครั้งนี้ อย่างไรก็ตามผู้อ่านที่ไม่คุ้นเคยอาจศึกษาถึงวิธีการใช้โปรแกรมได้จากเอกสารอ้างอิงข้างต้น

ระบบตรวจวัตถุระเบิดต้นแบบสำหรับการจำลอง

ระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เป็นต้นแบบของการจำลองในครั้งนี้ คือระบบตรวจกระเป๋าเดินทางที่ใช้เทคนิค TNA ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับระบบตรวจกระเป๋าเดินทางที่ใช้ในการทดลองของ Bartko and Ruddy (1996) ระบบต้นแบบดังกล่าวมีลักษณะและขนาดดังรูปที่ 1 โดยรูปที่ 1(a) แสดงภาพสามมิติของระบบฯ ส่วนรูปที่ 1(b) 1(c) และ 1(d) แสดงรูปของภาคตัดขวางของระบบฯ เมื่อมองทางด้านหน้า ด้านบน และด้านข้างตามลำดับ

หลักการทำงานของระบบจะเริ่มต้นที่กระเป๋าเดินทางเคลื่อนผ่านระบบไปบนสายพาน ในระหว่างที่กระเป๋าเคลื่อนผ่านอุโมงค์ของการตรวจนั้น วัสดุที่อยู่ภายในกระเป๋าจะถูกอาบด้วยอนุภาคนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่อยู่ด้านล่างของอุโมงค์ใต้สายพาน อนุภาคนิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมาจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนนั้นจะเป็นนิวตรอนพลังงานสูง แต่จะลดพลังงานลงเมื่อชนกับวัสดุลดทอนพลังงานจนกลายเป็นนิวตรอนอุณหภาพซึ่งมีโอกาสสะท้อนกลับเข้ามาสู่บริเวณของอุโมงค์ ดังนั้นภายในอุโมงค์จะเต็มไปด้วยนิวตรอนอุณหภาพ ถ้าธาตุองค์ประกอบของวัสดุภายในกระเป๋าเดินทางดูดกลืนอนุภาคนิวตรอนอุณหภาพจะทำให้เกิดรังสีแกมมาที่มีพลังงานเฉพาะขึ้นมา รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกตรวจจับโดยหัววัดรังสีแกมมาซึ่งฝังอยู่กับผนังด้านข้างของอุโมงค์ที่กระเป๋าเคลื่อนผ่าน ข้อมูลของจำนวนและพลังงานของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นนี้จะถูกนำไปใช้ในการวินิจฉัยชนิดของวัสดุที่นำมาตรวจสอบ ถ้ารังสีแกมมาที่ตรวจพบเป็นรังสีที่เกิดจากไนโตรเจนซึ่งมีพลังงาน 10.83 MeV



(a) Three dimensional view

(b) Front view

(c) Top view

(d) Side view

Figure 1. TNA luggage inspection system used in the simulation

แสดงว่าวัสดุที่บรรจุในกระเป๋าอาจเป็นวัตถุระเบิด แต่เนื่องจากสิ่งของอื่น ๆ (เช่น ผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ และผ้าไนลอน) ก็มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบเช่นกัน ดังนั้นการตรวจพบรังสีแกมมาดังกล่าวไม่ใช่หลักประกันว่าสิ่งที่บรรจุในกระเป๋านั้นเป็นวัตถุระเบิด ดังนั้นจึงต้องใช้ข้อมูลของความหนาแน่นของวัสดุที่นำมาตรวจสอบเพื่อช่วยในการวินิจฉัย แต่วัตถุระเบิดจะมีค่าความหนาแน่นของไนโตรเจนสูงกว่าค่าในสิ่งของอื่น ๆ ที่มักจะปรากฏในกระเป๋าเดินทาง ดังนั้นถ้าตรวจพบว่ามีรังสีแกมมาพลังงาน 10.83 MeV เป็นจำนวนมาก ย่อมแสดงว่าในกระเป๋าเดินทางมีสิ่งที่ประกอบด้วยไนโตรเจนเป็นจำนวนมากบรรจุอยู่จึงมีแนวโน้มที่จะเป็นวัตถุระเบิด

องค์ประกอบของระบบตรวจวัตถุระเบิดต้นแบบสำหรับการจำลอง

องค์ประกอบของระบบตรวจวัตถุระเบิดต้นแบบสำหรับการจำลองมีดังต่อไปนี้

แหล่งกำเนิดนิวตรอน

ในการทดลองของ Bartko and Ruddy (1996) นั้นมี ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ทำหน้าที่ปลดปล่อยนิวตรอนพลังงานสูงที่มีพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2.35 MeV นิวตรอนเหล่านี้จะถูกลดพลังงานลงเป็นลำดับจนกระทั่งกลายเป็นนิวตรอนอุณหภาพเมื่อชนกับวัสดุลดทอนพลังงานและวัสดุกำบังรังสีโดยปกติแล้วกระบวนการของการลดพลังงานของนิวตรอนพลังงานสูงเป็นนิวตรอนอุณหภาพนั้น จะใช้เวลาในการคำนวณของระบบประมวลผลกลาง ของคอมพิวเตอร์ค่อนข้างนาน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดเวลาในการคำนวณของระบบประมวลผลกลางของคอมพิวเตอร์ในการจำลองครั้งนี้ เราได้สมมติให้อนุภาคนิวตรอนพลังงานเฉลี่ย 2.35 MeV ที่ปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf ได้ถูกลดทอนพลังงานลงจนกลายเป็นนิวตรอนอุณหภาพที่มีพลังงาน 0.025 eV แล้วเมื่อเข้าสู่อุโมงค์และทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของวัสดุที่นำมาตรวจสอบ แหล่งกำเนิดนิวตรอนดังกล่าวมีลักษณะเป็นแผ่นวงกลมแบนเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.3 เซนติเมตร วางอยู่ด้านล่างของอุโมงค์ใต้สายพานที่ใช้ลำเลียงกระเป๋า และถูกล้อมรอบด้วยวัสดุกำบังรังสี แต่มีช่องเปิดด้านบนเพื่อให้นิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านขึ้นมากระทบกับกระเป๋า ทิศทางของนิวตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนนั้นไม่จำกัดว่าต้องพุ่งตรงออกมาในแนวแกนดิ่ง (แกน z) เท่านั้น แต่สามารถพุ่งไปได้ทุกทิศทาง (ยกเว้นด้านล่าง) หรือสามารถมีการกระจายเชิงมุม (angular distribution) ตั้งแต่ +90° ถึง -90° ในลักษณะเช่นนี้จะเป็นหลักประกันได้ว่าทุก ๆ ส่วนของกระเป๋าเดินทางจะมีโอกาสที่จะถูกอาบด้วยนิวตรอน

หัววัดรังสีแกมมา

ในการจำลองครั้งนี้เราใช้หัววัดรังสีแกมมาจำนวน 6 หัววัดวางซ้อนกันในแนวดิ่งโดยฝังอยู่ในผนังด้านข้างของอุโมงค์เพื่อทำการวัดรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของวัสดุที่นำมาตรวจสอบ หัววัดที่ 1 อยู่ด้านล่างสุดของอุโมงค์และหัววัดที่ 2 - 6 จะเรียงซ้อนกันขึ้นไปตามลำดับในแนวดิ่ง เนื่องจากเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดเหล่านี้คือ 5 เซนติเมตร และกระเป๋าที่ใช้ในการจำลองสูง 35 เซนติเมตร ดังนั้นหัววัดที่ 6 จะอยู่ในแนวเดียวกับขอบกระเป๋าด้านบนพอดี ในการจำลองการทำงานของระบบนั้นเราต้องทำการตรวจทุก ๆ ส่วนของกระเป๋าซึ่งสามารถกระทำได้โดยการเคลื่อนกระเป๋าผ่านแนวของแหล่งกำเนิดนิวตรอนและหัววัดซึ่งยึดติดกันและยึดตรึงอยู่กับที่ เนื่องจากความยาวของกระเป๋าคือ 45 เซนติเมตรและเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดคือ 5 เซนติเมตร ดังนั้นเมื่อต้องการตรวจให้ครอบคลุมตลอดความยาวของกระเป๋าพอดีจะต้องทำการเลื่อนกระเป๋าไป 9 ครั้ง ๆ ละ 5 เซนติเมตร รูปที่ 2 แสดงตำแหน่งของระบบหัววัดรังสีแกมมา 9 ตำแหน่งเมื่อเลื่อนกระเป๋าไป 9 ครั้ง ซึ่งครอบคลุมหน้าตัดของ

กระเป๋าได้พอดี

วัสดุลดทอนพลังงานนิวตรอนและวัสดุกำบังรังสี

ในการจำลองครั้งนี้เราใช้โพลิเอทิลีนเป็นทั้งวัสดุลดทอนพลังงานและวัสดุกำบังรังสี แต่เนื่องจากเราสมมติให้นิวตรอนที่ผ่านเข้าสู่อุโมงค์ของการตรวจนั้นได้กลายเป็นนิวตรอนอุณหภาพเท่านั้น ดังนั้นโพลิเอทิลีนซึ่งล้อมรอบอุโมงค์ของระบบอยู่นั้นจึงทำหน้าที่เป็นเพียงวัสดุกำบังรังสีป้องกันการรั่วไหลของนิวตรอนอุณหภาพออกจากอุโมงค์และสะท้อนนิวตรอนดังกล่าวกลับสู่อุโมงค์ ในรูปที่ 1(a) จะเห็นว่าวัสดุกำบังรังสีมีลักษณะเป็นกล่องสี่เหลี่ยมมีความหนา 15 เซนติเมตรในแต่ละด้าน โดยอุโมงค์ซึ่งอยู่ตรงกลางมีความกว้าง 40 เซนติเมตร และสูง 60 เซนติเมตร ในบริเวณภายในอุโมงค์นี้จะเต็มไปด้วยนิวตรอนอุณหภาพในขณะที่ระบบทำงาน ในการจำลองครั้งนี้เนื่องจากเป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้เบื้องต้นของการใช้เทคนิค TNA ว่าจะสามารถตรวจพบรังสีแกมมาพลังงาน 10.83 MeV หรือไม่ เราจึงไม่ได้คำนึงถึงการป้องกันการรั่วไหลของรังสีแกมมาออกจากระบบ ดังนั้นจึงไม่มีการใช้ตะกั่วเพื่อเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาของระบบ

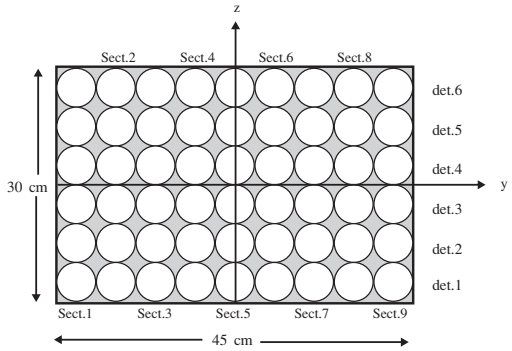


Figure 2. Positions of six arrayed-gamma ray detectors at 9 different sections of the inspected luggage

การบรรจุสารตัวอย่างในกระเป๋าเดินทาง

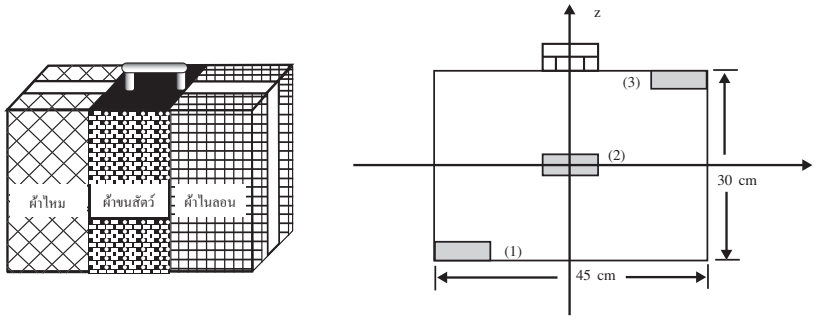
สารตัวอย่างที่บรรจุในกระเป๋าเดินทางมีทั้งสารที่มีองค์ประกอบเหมือนของใช้ประจำวันและวัตถุระเบิด ในกรณีของสารที่มีองค์ประกอบเหมือนของใช้ประจำวันนั้นมี 3 ชนิด คือ ผ้าไหม ($C_3H_{11}O_6N_3$) ผ้าขนสัตว์ ($C_{4.0}H_{6.69}N_{1.11}O_{1.65}S_{0.104}$) และผ้าไนลอน ($C_{11}H_{26}O_4N_2$) ส่วนวัตถุระเบิดคือ C-4 ($C_4H_6O_6N_6$) ซึ่งมี 2 ขนาด คือ ขนาดใหญ่ (10 x 15 x 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร หนัก 4,117.5 กรัม) และขนาดเล็ก (3 x 5 x 8 ลูกบาศก์เซนติเมตร หนัก 219.6 กรัม) วัตถุระเบิดเหล่านี้มีความหนาแน่น 1.83 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ลักษณะของการบรรจุสารตัวอย่างเหล่านี้มีทั้งการบรรจุสารตัวอย่างเพียงชนิดเดียวและหลายชนิดร่วมกัน โดยมี 5 ลักษณะ คือ

1. บรรจุผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ และผ้าไนลอนในกระเป๋าเดินทาง ดังแสดงในรูปที่ 3(a)
2. บรรจุวัตถุระเบิดขนาดใหญ่ที่ตำแหน่งล่างซ้าย และผ้าไหมในส่วนที่เหลือของกระเป๋า
3. บรรจุเฉพาะวัตถุระเบิดขนาดเล็กที่ตำแหน่งขอบล่างซ้ายของกระเป๋า
4. บรรจุเฉพาะวัตถุระเบิดขนาดเล็กที่ตำแหน่งกึ่งกลางของกระเป๋า
5. บรรจุเฉพาะวัตถุระเบิดขนาดเล็กที่ตำแหน่งขอบขวาบนของกระเป๋า

รูปที่ 3(b) แสดงตำแหน่งของการบรรจุวัตถุระเบิดในกระเป๋าเดินทาง โดยหมายเลข (1) คือตำแหน่งขอบล่างซ้ายของกระเป๋า หมายเลข (2) คือตำแหน่งกึ่งกลางของกระเป๋า และหมายเลข (3) คือตำแหน่งขอบขวาบนของกระเป๋า

ข้อมูลผลลัพธ์จากการจำลองด้วยโปรแกรม MCNP

เนื่องจากในการจำลองครั้งนี้มีสารตัวอย่างหลายชนิด บางชนิดก็มีหลายขนาดและตำแหน่งของการบรรจุของแต่ละขนาดแตกต่างกัน ดังนั้นจึงมีข้อมูล



(a) (b)

Figure 3. Positions of samples in the inspected luggage
(a) positions of silk, wool and nylon
(b) Positions of explosive (1: bottom left 2: middle 3: top right)

ผลลัพธ์เป็นจำนวนมากซึ่งไม่สามารถแสดงให้ดูได้ทั้งหมดแต่ได้เลือกแสดงเพียงกรณีเดียวเท่านั้นคือกรณีที่บรรจุผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ และผ้าไนลอนในกระเป๋าเดินทาง ตารางที่ 1 เป็นข้อมูลผลลัพธ์จากการจำลองในกรณีดังกล่าว โดยข้อมูลในตารางนี้คือค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมา พลังงาน 10.83 MeV ที่วัดได้ตลอดทั้งปริมาตรของหัววัด (volume flux) ข้อมูลผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 1 ก็คือค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาดังกล่าวที่วัดได้โดยหัววัด (Detector) หมายเลข 6 เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งของตอน (Section) ที่ 1 - 9 ส่วนข้อมูลผลลัพธ์ในบรรทัดที่ 2 - 6 คือค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่วัดได้โดยหัววัดหมายเลข 5 - 1 เมื่อวางอยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 1 - 9 ค่าฟลักซ์ในแต่ละหัววัดเหล่านี้คือค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นต่อการจำลองด้วยนิวตรอนอุณหภาพ 1 อนุภาค โดยที่จำนวนอนุภาคนิวตรอนทั้งหมดที่ใช้ในการจำลองคือ 100 ล้านอนุภาค เวลาที่ใช้ในการจำลองในแต่ละกรณีอยู่ระหว่าง 12-15 ชั่วโมง ด้วยคอมพิวเตอร์บุคคลที่มีหน่วยประมวลผลกลาง (central processing unit) เป็น Pentium III ซึ่งมีความเร็ว 866 เมกะเฮิรตซ์ และ มีหน่วยความจำ (RAM) ขนาด 512 เมกะไบต์ ค่าความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์จากการจำลองในทุกกรณีต่ำกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่เชื่อถือได้

การวิเคราะห์และการอภิปรายผลการจำลอง

กรณีที่บรรจุผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ และผ้าไนลอนไว้ในกระเป๋าเดินทาง

จากตารางที่ 1 เมื่อทำการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์หรือจำนวนของรังสีแกมมาที่วัดได้โดยหัววัดแต่ละหัววัดกับค่าในหัววัดที่มีค่าต่ำสุด (หารด้วยค่าต่ำสุด) จะได้ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบของแต่ละหัววัดดังแสดงในตารางที่ 2 และถ้าทำการเขียนกราฟระหว่างค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบของแต่ละหัววัดกับตำแหน่งของหัววัดในตอนต่าง ๆ จะได้ดังรูปที่ 4 จะเห็นได้ว่าสำหรับหัววัดเดียวกัน (เช่น หัววัดที่ 1) ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่วัดได้เมื่อหัววัดเหล่านั้นอยู่ในตำแหน่งของตอนต่าง ๆ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ยกเว้นค่าในตำแหน่งของตอนที่ 1 และ 9 ซึ่งอยู่ที่ขอบของกระเป๋า ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาในตำแหน่งทั้งสองนี้จะต่ำกว่าค่าในตำแหน่งของตอนที่อยู่บริเวณกลางกระเป๋าประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าพิจารณาค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบในหัววัดที่ 1 - 6 ซึ่งอยู่ในตำแหน่งของตอนเดียวกันจะเห็นว่ามีค่าแตกต่างกันโดยจะมีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอจากหัววัดที่ 1

Table 1. Gamma ray fluxes (per 1 neutron) resulted from the simulation when silk, wool and nylon were put in the luggage

Detector	Section								
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
6	1.12E-08	1.52E-08	1.88E-08	1.78E-08	1.74E-08	1.75E-08	9.10E-09	8.25E-09	6.63E-09
5	1.52E-08	2.13E-08	2.15E-08	2.23E-08	2.29E-08	2.34E-08	1.28E-08	1.23E-08	8.81E-09
4	2.21E-08	2.73E-08	2.50E-08	2.84E-08	2.64E-08	3.12E-08	1.81E-08	1.52E-08	1.02E-08
3	2.84E-08	3.25E-08	3.27E-08	3.10E-08	3.10E-08	3.06E-08	2.04E-08	1.61E-08	1.04E-08
2	2.77E-08	3.48E-08	3.50E-08	3.86E-08	3.77E-08	3.72E-08	2.29E-08	1.92E-08	1.56E-08
1	3.07E-08	3.59E-08	3.69E-08	3.99E-08	3.82E-08	3.63E-08	1.97E-08	1.80E-08	1.35E-08

Table 2. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when silk, wool and nylon were put in the luggage

Detector	Section								
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
6	37	53	57	57	55	56	57	52	42
5	50	67	67	71	67	65	68	66	56
4	62	78	83	88	86	83	83	85	72
3	69	86	88	91	94	94	92	88	75
2	83	98	114	116	112	110	107	104	87
1	90	110	111	118	117	118	113	114	87

Table 3. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when large explosive was put in the bottom left of the luggage and silk at the remaining of the luggage

Detector	Section								
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
6	84	107	99	69	49	47	45	43	42
5	131	159	138	84	65	62	61	60	56
4	179	208	184	111	93	89	86	83	72
3	202	231	221	139	101	98	96	95	75
2	225	271	252	160	116	111	105	99	87
1	235	268	246	160	124	115	111	111	87

การที่ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบมีลักษณะเป็นเช่นนี้เพราะความหนาแน่นของไนโตรเจนในผ้าไหม ผ้าขนสัตว์ และผ้าไนลอนมีค่าใกล้เคียงกัน ทำให้จำนวนนิวเคลียสของธาตุไนโตรเจนที่มีโอกาสเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์กับนิวตรอนอุณหภาพมีจำนวนใกล้เคียงกัน จึงเกิดรังสีแกมมาในจำนวนที่ใกล้เคียงกันและทำให้ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่วัดได้ในหัววัดต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกัน การที่ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบในหัววัดต่าง ๆ ของตอนที่ 1 และ 9 น้อยกว่าค่าในตอนอื่น ๆ นั้น เป็นเพราะตำแหน่งของตอนทั้งสองอยู่ที่ขอบของกระเป๋า ซึ่งทำให้หัววัดมองเห็นรังสีแกมมาที่มาจากด้านข้างของหัววัดเพียงข้างเดียว ส่วนค่าฟลักซ์ที่ลดลงอย่างสม่ำเสมอจากหัววัดที่ 1 - 6 นั้น เป็นเพราะจำนวนนิวตรอนอุณหภาพมีค่าสูงสุดในบริเวณที่อยู่ใกล้

กับตำแหน่งของแหล่งกำเนิดนิวตรอน (ด้านล่างของอุโมงค์) และลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่ออยู่ห่างจากตำแหน่งของแหล่งกำเนิดนิวตรอนมากขึ้น การกระจายของค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาในลักษณะนี้ชี้ให้เห็นว่าวัสดุที่อยู่ในกระเป๋าเดินทางนั้นไม่ใช่วัตถุระเบิด

กรณีที่บรรจุวัตถุระเบิดขนาดใหญ่และผ้าไหมในกระเป๋าเดินทาง

กรณีนี้เป็นกรณีของการบรรจุวัตถุระเบิดขนาดใหญ่ไว้ที่ขอบซ้ายล่างและบรรจุผ้าไหมในส่วนที่เหลือของกระเป๋าเดินทาง ตารางที่ 3 และรูปที่ 5 แสดงค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบสำหรับกรณีนี้ซึ่งจะสังเกตเห็นว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่วัดได้โดยหัววัดที่ 1 - 3 เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 1 - 3 มีค่าสูงกว่าฟลักซ์ในหัววัดเดียวกันเมื่ออยู่ในตอนอื่น ๆ อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะเหตุว่าวัตถุระเบิดวางอยู่ในตำแหน่งขอบล่างซ้ายของกระเป๋าซึ่งตรงกับตำแหน่งของหัววัดที่ 1 - 3 (วัตถุระเบิดมีความยาวเท่ากับระยะระหว่างของหัววัดจากตอนที่ 1 - 3) ดังนั้นในตำแหน่งของตอนที่ 1 - 3 ซึ่งมีความหนาแน่นของไนโตรเจนสูงกว่าตำแหน่งอื่น ๆ จึงทำให้เกิดรังสีแกมมามากกว่าตำแหน่งอื่น ๆ แต่ถ้าพิจารณาค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาในหัววัดที่ 4 - 6 เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 1 - 3 จะพบว่ามีค่าน้อยกว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาในหัววัดที่ 1 - 3 เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนเดียวกัน ทั้งนี้เพราะหัววัดที่ 4 - 6 อยู่ห่างจากตำแหน่งของวัตถุระเบิดมากกว่าหัววัดที่ 1 - 3 ส่วนเมื่อทำการพิจารณาค่าการกระจาย ของฟลักซ์ในแนวดิ่งจะพบว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาในหัววัดที่ 1 ของแต่ละตอนจะมีค่าสูงสุดและลดลงอย่างสม่ำเสมอในหัววัดที่ 2 - 6 ทั้งนี้เพราะจำนวนนิวตรอนอุณหภาพมีค่าสูงสุดในด้านล่างของอุโมงค์และลดลงอย่างสม่ำเสมอเมื่ออยู่ห่างจากด้านล่างของอุโมงค์มากขึ้น ลักษณะของค่าฟลักซ์เปรียบเทียบเช่นนี้ ชี้ให้เห็นว่าระบบสามารถวินิจฉัยได้ว่ามีวัสดุที่น่าจะเป็นวัตถุระเบิดอยู่จริง และสามารถบอกตำแหน่งของวัสดุนั้นได้ ถึงแม้จะบรรจุสิ่งของอื่น ๆ ไว้ร่วมกับวัตถุระเบิดในกระเป๋าเดินทาง

กรณีที่บรรจุเฉพาะวัตถุระเบิดในกระเป๋าเดินทาง

ในกรณีที่บรรจุเฉพาะวัตถุระเบิดไว้ในกระเป๋าเดินทางนั้นเราได้ทำการบรรจุวัตถุระเบิดขนาดเล็กไว้ในตำแหน่งต่าง ๆ ของกระเป๋าเดินทาง 3 ตำแหน่ง คือ 1) ตำแหน่งขอบล่างซ้ายกระเป๋า 2) ตำแหน่งกึ่งกลางกระเป๋า และ 3) ตำแหน่งขอบขวาบนกระเป๋า

ตารางที่ 4 และรูปที่ 6 แสดงค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบที่วัดได้โดยหัววัดรังสีที่ 1 - 6 ในกรณีที่บรรจุวัตถุระเบิดอยู่ในตำแหน่งขอบล่างซ้ายของกระเป๋าเดินทาง จะเห็นได้ว่าค่าฟลักซ์ของ

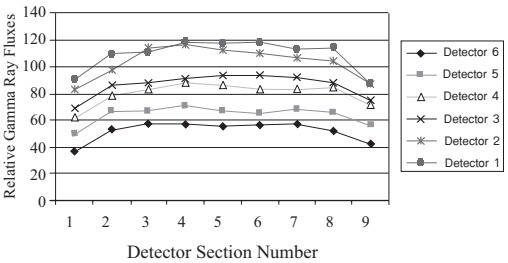


Figure 4. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when silk, wool and nylon were put in the luggage

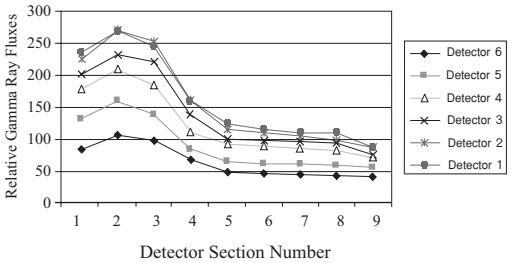


Figure 5. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when large explosive was put in the bottom left of the luggage and silk at the re maining of the luggage

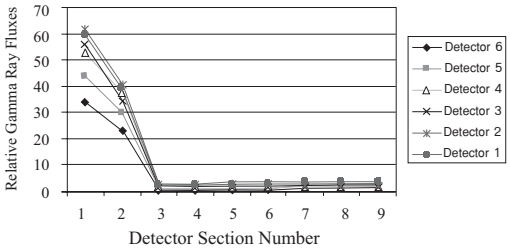


Figure 6. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when small explosive was put at the bottom left of the luggage.

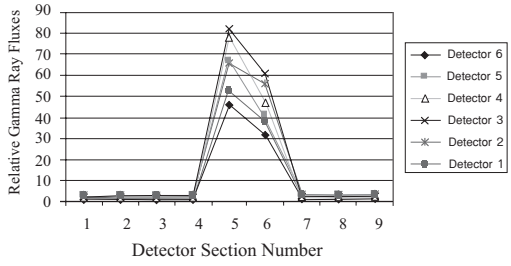


Figure 7. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when small explosive was put in the middle of the luggage.

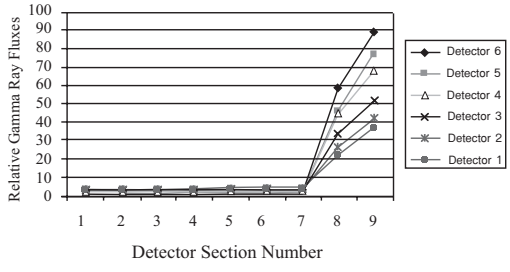


Figure 8. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when small explosive was put at the top right of the luggage

รังสีแกมมาเปรียบเทียบในทุกหัววัดจะมีค่าสูงสุดเมื่อหัววัดอยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 1 และ 2 ทั้งนี้เพราะว่าตำแหน่งของหัววัดและแหล่งกำเนิดนิวตรอนอยู่ใกล้กับตำแหน่งของวัตถุระเบิดมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อหัววัดอยู่ในตำแหน่งของตอนทั้งสองนี้ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบในหัววัดที่ 1 และ 2 จะมีค่าสูงกว่าค่าในหัววัดที่ 3 - 6 อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เพราะว่าตำแหน่งของหัววัดที่ 3 - 6 อยู่ห่างจากตำแหน่งของแหล่งกำเนิดนิวตรอนมากกว่าหัววัดที่ 1 และ 2 จึงมีนิวตรอนอุณหภาพที่จะทำให้เกิดรังสีแกมมาน้อยกว่า ส่วนค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบของหัววัดต่างๆ เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 3 - 9 นั้นจะมีค่าใกล้เคียงกันและน้อยมากเมื่อเทียบกับค่าในหัววัดเดียวกันเมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 1 และ 2 ทั้งนี้เพราะตำแหน่งของหัววัดทุกหัววัดเมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 3 - 9 นั้นอยู่ไกลจากตำแหน่งของวัตถุระเบิดมากกว่า เป็นที่น่าสังเกตว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมา ในหัววัดต่าง ๆ เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 2 จะต่ำกว่าค่าในหัววัดเดียวกันเมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 1 ทั้งนี้เป็นเพราะว่าวัตถุระเบิดขนาดเล็กซึ่งมีความยาว 8 เซนติเมตร หรือยาวเท่ากับประมาณ 1.5 เท่าของเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดจะทอดยาวเต็มตำแหน่งของตอนที่ 1 และสิ้นสุดที่ตำแหน่งกึ่งกลางของตอนที่ 2 ดังนั้นปริมาณของวัตถุระเบิดจะสูงกว่าในตำแหน่งของตอนที่ 1 เมื่อเทียบกับค่าในตำแหน่งของตอนที่ 2 ค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่วัดได้โดยหัววัดต่าง ๆ เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 2 จึงน้อยกว่าค่าในตำแหน่งของตอนที่ 1

ในกรณีที่บรรจุวัตถุระเบิดขนาดเล็กไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางและขอบขวาบนของกระเป๋าจะพบว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบในหัววัดต่าง ๆ จะมีลักษณะคล้ายกับกรณีที่บรรจุวัตถุระเบิดไว้ที่ตำแหน่งขอบล่างซ้ายของกระเป๋า ตารางที่ 5 และรูปที่ 7 แสดงค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบในกรณีที่บรรจุวัตถุระเบิดไว้ที่ตำแหน่งกึ่งกลางกระเป๋า ส่วนตารางที่ 6 และรูปที่ 8 แสดงค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบในกรณีที่บรรจุวัตถุระเบิดไว้ที่ตำแหน่งขอบขวาบนของกระเป๋า ในตารางที่ 5 และรูปที่ 7 จะพบว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบจะมีค่าสูงสุดในหัววัดที่ 3 และ 4 เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 5 และ 6 ส่วนในตารางที่ 6 และรูปที่ 8 นั้นจะพบว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบมีค่าสูงสุด

Table 4. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when small explosive was put at the bottom left of the luggage

Detector	Section								
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
6	34	23	1	1	1	1	2	2	2
5	44	30	2	2	2	2	2	2	2
4	53	38	2	2	2	2	2	2	2
3	56	35	2	2	2	2	2	2	2
2	62	41	3	3	3	3	3	3	3
1	60	39	3	3	4	4	4	4	4

Table 5. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when small explosive was put at the middle of the luggage

Detector	Section								
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
6	2	1	1	1	46	32	2	2	2
5	2	2	2	2	67	39	2	2	2
4	2	2	2	2	78	47	2	2	2
3	2	2	2	2	82	61	2	2	2
2	3	3	3	3	66	56	3	3	3
1	3	3	3	3	53	38	4	4	4

Table 6. Relative gamma ray fluxes resulted from the simulation when small explosive was put at the top of the luggage

Detector	Section								
	No. 1	No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9
6	2	1	1	2	2	1	2	59	89
5	2	2	2	2	2	2	2	46	77
4	2	2	2	2	2	2	2	45	68
3	2	2	2	2	2	2	2	34	52
2	3	3	3	3	3	3	3	26	42
1	3	3	3	3	4	4	4	22	37

ในหัววัดที่ 5 และ 6 เมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนที่ 8 และ 9

ลักษณะการกระจายของฟลักซ์ของรังสีแกมมาดังปรากฏในตารางที่ 4 - 6 และรูปที่ 4 - 8 นี้แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถตรวจหาวัสดุที่อาจเป็นวัตถุระเบิดและตำแหน่งของวัสดุนั้นอย่างเห็นได้ชัด

บทสรุป

จากลักษณะของค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบตามตารางที่ 2 - 6 และรูปที่ 4 - 8 นั้น เราสามารถสรุปได้ว่าระบบตรวจวัตถุระเบิดที่ใช้เทคนิค TNA สามารถตรวจหาวัสดุที่อาจเป็นวัตถุระเบิด

และบอกตำแหน่งของวัสดุนั้นในกระเป๋าเดินทางได้

จะเห็นได้ว่าเมื่อบรรจุเฉพาะผ้าไหมผ้าขนสัตว์และผ้าไนลอนโดยไม่มีวัตถุระเบิดในกระเป๋าเดินทางค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบของแต่ละหัววัดเมื่ออยู่ในตำแหน่งของตอนต่าง ๆ จะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เพราะความหนาแน่นของไนโตรเจนของวัสดุดังกล่าวมีค่าใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตามระบบตรวจวัตถุระเบิดได้แสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาในหัววัดที่ 1 - 6 ของแต่ละตอนจะลดลงอย่างสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นการสะท้อนว่าจำนวนนิวตรอนอุณหภาพในตำแหน่งต่าง ๆ ของกระเป๋าเดินทางในแนวดิ่งมีค่าลดลงอย่างสม่ำเสมอจากด้านล่าง ในกรณีที่บรรจุวัตถุระเบิดร่วมกับผ้าไหมในกระเป๋าเดินทางลักษณะของค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบจะมีค่าสูงสุดเมื่อหัววัดอยู่ใกล้กับตำแหน่งของวัตถุระเบิด ส่วนที่ตำแหน่งอื่น ๆ จะมีค่าน้อยกว่าอย่างเห็นได้ชัด ส่วนกรณีที่บรรจุเฉพาะวัตถุระเบิดไว้ในกระเป๋าเดินทางลักษณะของค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบยิ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าเมื่อหัววัดอยู่ใกล้กับตำแหน่งของวัตถุระเบิดค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบจะแตกต่างจากค่าในตำแหน่งอื่น ๆ อย่างมาก

อย่างไรก็ตามในการจำลองครั้งนี้เราใช้สมมติฐานที่แตกต่างจากการทดลองของ Bartko and Ruddy 2 ข้อคือ

1) เราสมมติให้อนุภาคนิวตรอนพลังงานเฉลี่ย 2.35 MeV ที่ปลดปล่อยจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf ได้ถูกลดทอนพลังงานลงจนกลายเป็นนิวตรอนอุณหภาพที่มีพลังงาน 0.025 eV แล้วเมื่อเข้าสู่อุโมงค์และทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของวัสดุที่นำมาตรวจสอบ ขณะที่ในการทดลองของ Bartko and Ruddy นั้นใช้สเปกตรัมของนิวตรอนที่มีพลังงานเฉลี่ย 2.35 MeV การใช้สมมติฐานดังกล่าวก็เพื่อลดเวลาของการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ลงให้อยู่ในระดับที่ไม่ใช้เวลานานเกินไป เหตุผลอีกประการหนึ่งของการใช้สมมติฐานนี้คือเนื่องจากการจำลองครั้งนี้ เป็นเพียงการศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของระบบตรวจวัตถุระบบที่ใช้เทคนิค TNA โดยยังไม่เกี่ยวข้องกับการออกแบบระบบตรวจวัตถุระเบิด
2) เราไม่ได้ระบุชนิดของหัววัดรังสีแกมมาที่ใช้ในการจำลองในขณะที่ Bartko and Ruddy ซึ่งต้องการความรวดเร็วของหัววัดสามารถดัดแปลงรูปทรงได้ง่าย และราคาถูกจึงใช้หัววัดพลาสติก ทั้งนี้เพราะเราสนใจเพียงการหาค่าฟลักซ์ของรังสีแกมมาเปรียบเทียบเท่านั้น และค่าดังกล่าวไม่ขึ้นกับชนิดของหัววัดรังสี

ดังนั้นจึงอาจเป็นประโยชน์ถ้าจะทำการจำลองโดยใช้นิวตรอนพลังงานเฉลี่ย 2.35 MeV จากแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf และกำหนดชนิดของหัววัดรังสีแกมมา เช่น NaI(Tl) หรือ BGO ในโอกาสต่อไป

References

Gozani, T. (1992). Advanced technology or contraband detection. Science Applications International Corporation. Santa Clara, California, p. D-1 - D-16.

Michael, C.S., and Hoopengardner, R.L. (1992). Advanced technology for contraband detection. Science Applications International Corporation.Santa Clara, California, p. 31-43.

Bartko, J., and Ruddy, F.H. (1996). Review of the development of the luggage explosive detection system. Westinghouse Science and Technology Center. Pittsburgh, PA 15235-5098, USA, p. 56-65.

Radiation Shielding Information Center. (1993). MCNP 4A Monte Carlo N-particle Transport Code System. RSIC Computer Code Collection. Oak Ridge National Laboratory.