



รายงานการวิจัย

การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ในการตรวจ

กับระเบิด

Feasibility Study of Using Nuclear Techniques in Landmine
Detection

ผู้วิจัย

หัวหน้าโครงการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. วรศิษย์ อุษัย

สาขาวิชาฟิสิกส์

สำนักวิชาวิทยาศาสตร์

ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ พ.ศ. 2549

ผลงานวิจัยเป็นความรับผิดชอบของหัวหน้าโครงการวิจัยแต่เพียงผู้เดียว

มิถุนายน 2552

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่อง การศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ในการตรวจกับระเบิด ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีงบประมาณ 2549 การวิจัยนี้สำเร็จได้ด้วยผลการสนับสนุนจากศูนย์ไทยกริดแห่งชาติ สำนักงานส่งเสริมอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์แห่งชาติ และศูนย์คอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ที่ให้การสนับสนุนเวลาในการใช้คอมพิวเตอร์เพื่อทำการวิจัยในโครงการนี้เป็นอย่างยิ่ง

ผู้วิจัยจึงขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และศูนย์ไทยกริดแห่งชาติ สำนักงานส่งเสริมอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์แห่งชาติ มา ณ ที่นี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พันเอก ดร. วรศิษย์ อุชัย

(หัวหน้าโครงการวิจัย)

มิถุนายน 2552



มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

บทคัดย่อภาษาไทย

ในการวิจัยครั้งนี้ได้ทำการจำลองการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์โดยโปรแกรมมอนติคาร์โล เทคนิคทางนิวเคลียร์ที่ใช้ประกอบด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอนอุณหภาพ เทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอนพลังงานต่ำและเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนอุณหภาพ ส่วนประกอบหลักของชุดหัววัดที่ใช้ในการจำลองคือแหล่งกำเนิดนิวตรอนและหัววัดนิวตรอน โดยแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ใช้คือไอโซโทปปรังสีคาลิฟอร์เนียม-252 และอะเมอริเรียม-241/เบอริลเลียม-9 และหัววัดนิวตรอนที่ใช้คือหัววัด ฮีเลียม-3 และ โบรอน ไตรฟลูออไรด์ กับระเบิดที่ใช้ในการจำลองคือกับระเบิดจำลองซึ่งประกอบด้วยทีเอ็นทีมวล 249 กรัม โดยฝังไว้ใต้ชั้นดิน 3 ชนิดคือ ดินทราย ดินปูนและดินเหนียว นอกจากการฝังกับระเบิดไว้ใต้ชั้นดินแล้วยังได้ฝังวัสดุอื่นๆ ซึ่งอาจมีปะปนอยู่ใต้ชั้นดิน เช่น โพลีเอทิลีน รากไม้ หินแกรนิตและคอนกรีต เพื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและจากวัสดุดังกล่าว นอกจากนี้ยังได้ทำการจำลองผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงของความชื้นในดินและมวลของกับระเบิดต่อประสิทธิภาพของการตรวจกับระเบิด

ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอนอุณหภาพพบว่า คาลิฟอร์เนียม-252 เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีประสิทธิภาพในการก่อให้เกิดฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพใต้ชั้นดินสูงกว่าอะเมอริเรียม-241/เบอริลเลียม-9 ประมาณ 1.3 และ 2.9 เท่า เมื่อใช้ ฮีเลียม-3 และ โบรอน ไตรฟลูออไรด์ เป็นหัววัดนิวตรอนตามลำดับ หัววัดนิวตรอน BF_3 มีประสิทธิภาพในการวัดฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดสูงกว่าหัววัด ^3He ประมาณ 70 และ 110 เท่า เมื่อใช้ ^{252}Cf และ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนตามลำดับ เมื่อประกอบแหล่งกำเนิดนิวตรอนและหัววัดนิวตรอนเป็นชุดหัววัด 4 ชนิด พบว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ มีประสิทธิภาพในการวัดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับสูงเป็นอันดับ 1 และ 2 ตามลำดับ แอมพลิจูดของค่าพารามิเตอร์แบ่งแยกสำหรับชุดหัววัดทั้ง 2 แตกต่างกันประมาณ 20% ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ มีขีดความสามารถสูงสุดในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุอื่นๆ โดยอัตราส่วนของค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากโพลีเอทิลีนเทียบกับค่าจากกับระเบิด และค่าจากกับระเบิดเทียบกับค่าจากวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น 20 และ 300 ตามลำดับ ถ้าใช้ค่าพารามิเตอร์แบ่งแยก S เพื่อวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากโพลีเอทิลีนเทียบกับกับระเบิด พบว่าอัตราส่วนของแอมพลิจูดของค่า S มีค่าเป็น 3 ในขณะที่ค่าอัตราส่วนดังกล่าวสำหรับกรณีที่เกิดจากกับระเบิดเทียบกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น 8

ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยเทคนิคการกระเจิงกลับด้วยนิวตรอนพลังงานต่ำพบว่าช่วงพลังงานที่เหมาะสมสำหรับการตรวจกับระเบิดคือ 0-12.7 keV ในการวิเคราะห์ขีดความสามารถด้าน

ความลึกของการตรวจกับระเบิดพบว่า ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ สามารถตรวจกับระเบิดขนาด 249 g ที่ฝังใต้ดินทราย ดินปูนและดินเหนียวได้ลึก 20 cm โดยฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดที่ฝังใต้ดินปูนมีค่าสูงสุดซึ่งสูงกว่าค่าในดินทรายและดินเหนียวประมาณ 1.5 เท่า ในการตรวจกับระเบิดที่ฝังใต้ดินทรายที่มีความชื้น 5% โดยมวลด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ พบว่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับมีค่าสูงกว่าค่าในดินแห้งถึง 180% ซึ่งทำให้มีผลกระทบต่อขีดความสามารถของการตรวจกับระเบิด ผลกระทบดังกล่าวถูกจำลองโดยใช้ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ทำการตรวจกับระเบิดที่ฝังใต้ดินทรายแห้งและชื้น ผลการจำลองพบว่าแอมพลิจูดของค่าพารามิเตอร์แบ่งแยกมีค่าเป็น 23.0 และ 6.0 ตามลำดับ แต่ถ้านำน้ำในดิน 5% ขึ้นไปแอมพลิจูดดังกล่าวของชุดหัววัดทั้ง 2 จะลดลงเป็น 5.0 และ 0.6 ตามลำดับ ในการจำลองถึงผลกระทบของการแปรผันมวลของกับระเบิดต่อการตรวจกับระเบิด พบว่า เมื่อมวลของกับระเบิดเพิ่มขึ้นจาก 249-3,100 g ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดลดลงประมาณ 5 และ 18% สำหรับเทคนิค TNB และ LNB ตามลำดับ ในการจำลองหาค่าปริมาณรังสีที่ได้รับโดยผู้ปฏิบัติงาน พบว่าถ้าใช้ ^{252}Cf ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพ 10^8 n/s เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ปริมาณรังสีรวมที่ได้รับโดยผู้ปฏิบัติงานตรวจกับระเบิดเมื่อทำงานปีละ 48 สัปดาห์ๆ ละ 5 วันๆ ละ 8 ชั่วโมงมีค่าเป็น 6.61 mSv/y ในกรณีที่ใช้ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนซึ่งมีค่ากัมมันตภาพและช่วงเวลาของทำงานเท่ากัน ปริมาณรังสีรวมจะมีค่าเป็น 5.09 mSv/y

ผลลัพธ์จากการจำลองด้วยเทคนิค TNA แบบออคมคติโดยอาศัย F-4 tally พบว่าในการตรวจกับระเบิดขนาด 249 g ที่ฝังในดินทรายแห้งลึก 5 cm มีรังสีแกมมาจากอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) และ $(n, n' \gamma)$ ระหว่างนิวตรอนและองค์ประกอบทางเคมีของกับระเบิดและดินทรายเกิดขึ้นในสเปกตรัมของรังสีแกมมาครบถ้วน เมื่อชั้นดินทรายมีความชื้น 5% โดยมวลพบว่ามีรังสีแกมมาจากอันตรกิริยาแบบ (n, γ) เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะเกิดนิวตรอนอุณหภาพเนื่องจาก H ซึ่งเป็นนิวเคลียสองค์ประกอบของน้ำมากขึ้น

Abstract

In this research, three nuclear techniques are used to simulate the landmine detection by using Monte Carlo program. The nuclear techniques used are Thermal Neutron Back-scattering (TNB), Low-energy Neutron Back-scattering (LNB) and Thermal Neutron Analysis (TNA). Components of the simulation model are a set of neutron detector head, a dummy landmine and soil formation. The set of detector head consists of a neutron source and a neutron detector, in which, ^{252}Cf or $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ and ^3He or BF_3 are used as its neutron sources and neutron detectors, respectively. The landmine used in the simulation is the dummy landmine which contains TNT of 249 g burying under three types of soil formations, namely, sand, lime stone and clay. To compare the neutron back-scattering fluxes due to landmine and other materials, the high density polyethylene, wood, granite and concrete are also buried under soil formations at the landmine position for inspection. The effects of soil humidity and landmine mass variations are also simulated in this research to study their impact on the landmine detection efficiency.

The simulation results of the TNB technique show that ^{252}Cf has higher efficiency in thermal-neutron production under soil formations than $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ about 1.3 and 2.9 times, when ^3He and BF_3 are used as the neutron detectors, respectively. BF_3 has higher detection efficiency of thermal-neutron back-scattering fluxes than ^3He about 70 and 110 times, when ^{252}Cf and $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ are used as the neutron sources, respectively. It is found that, when the neutron sources and neutron detectors are put together as four sets of detector heads for landmine detection, the sets of $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ and $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}/\text{BF}_3$ have the highest and second highest efficiency in measuring neutron back-scattering fluxes, respectively. The amplitudes of the separation parameters due to using these two sets of detector heads are about 20% different. The set of $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}/\text{BF}_3$ detector head show the highest capability in analyzing the differences between back-scattering neutron fluxes due to landmine and other materials. By using this detector-head, the ratios of neutron back-scattering fluxes resulting from polyethylene relative to that from landmine, and from landmine relative to that from other materials are 20 and 300, respectively. It was found that if using the separation parameter to analyze the difference between the neutron back-scattering fluxes, the ratios of its amplitudes due to the detections of polyethylene relative to landmine is about 3, while that due to the detections of landmine relative to other materials, is about 8.

The simulation results of the TNB technique show that the appropriate energy range of the neutrons back-scattering flux for landmine detection is 0-12.7 keV. It is found that the $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ detector head can detect the landmine up to about 20 - cm depth. The neutron back-scattering flux from the landmine is the highest when the landmine is buried under lime stone. This flux value is higher than those resulting from the landmine buried under sand and clay about 1.5 times. By using the $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ detector head to detect the landmine buried under sand with moisture content of 5% mass, the neutron back-scattering flux increases by about 180%, deteriorating the landmine detection capability. The deterioration effect was simulated by using the $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ and $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ detector heads to detect the landmine buried under dry and wet sands. The amplitudes of the separation parameters resulting from the detections of landmine buried under dry sand for these two detector heads are 23.0 and 6.0 ($\#/\text{cm}^2\text{-s}$)^{-1/2}, respectively. The corresponding amplitudes of the separation parameters from these two detector heads for the case of wet sand with 5% moisture, reduced to 5.0 and 0.6 ($\#/\text{cm}^2\text{-s}$)^{-1/2}, respectively. In the simulation of the impact of the landmine's mass variation on the landmine detection, we found that when landmine's mass increase from 249-3, 100 g, the neutron back-scattering fluxes decrease by 5 and 18% for TNB and LNB techniques, respectively. In the simulation of the radiation dose received by the operator, we found that if using ^{252}Cf with 10^8 n/s activity as the neutron source the total radiation dose received by the operator who works for 48 weeks/y, 5 days/week and 8 hours/day is about 6.61 mSv/y. The corresponding dose due to using $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ with the same source strength and time duration is about 5.09 mSv/y.

The simulation results of the TNA technique show that all respective gamma rays due to the (n, γ) and (n, n' γ) nuclear interactions between neutrons and the chemical compositions of landmine and sand formation appear in the gamma ray spectra. When sand formation has 5% moisture, the resulting gamma rays due to the (n, γ) nuclear interactions increased. This increase indicates that more thermal neutrons are produced under sand formation due to the presence of H from water content.

สารบัญ

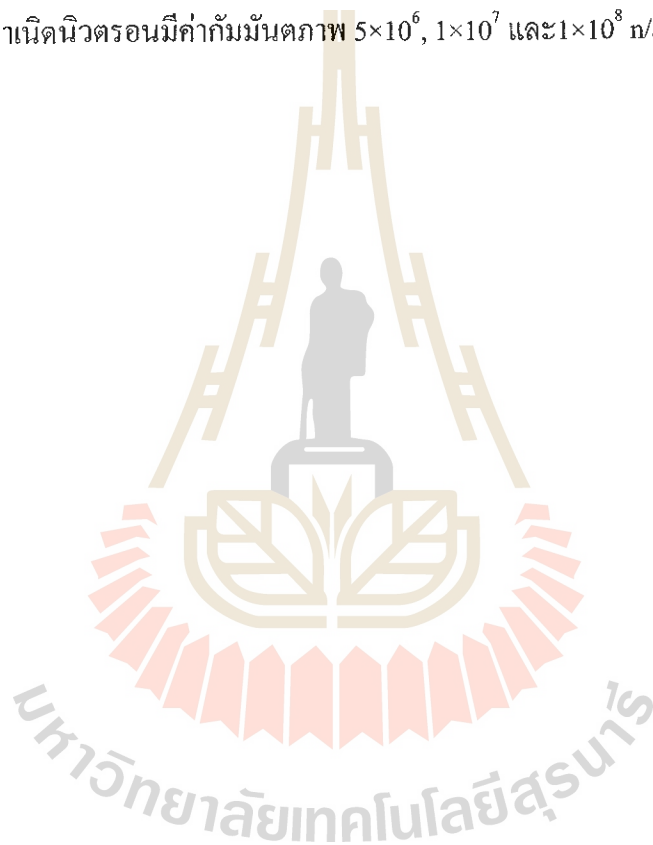
	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
สารบัญ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ฌ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
1.4 ระเบียบวิธีวิจัย	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 วิธีดำเนินการวิจัย	4
2.1 การจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS	4
2.2 การจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNA	7
บทที่ 3 ผลการจำลองด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โล	9
3.1 ผลการจำลองด้วยเทคนิค TNB	9
3.2 ผลการจำลองด้วยเทคนิค LNB	32
3.3 ผลการจำลองด้วยเทคนิค TNA	45
บทที่ 4 การวิเคราะห์ผลการจำลอง	49
4.1 ประสิทธิภาพของชุดหัววัดนิวตรอน ในการวัดฟลักซ์นิวตรอน ที่กระเจิงกลับ	49
4.2 ซีดความสามารถของชุดหัววัดนิวตรอนในการวิเคราะห์ความแตกต่าง ระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ	51
4.3 ซีดความสามารถของชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ในการวิเคราะห์ ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ โดยพารามิเตอร์ S	52

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4 ช่วงพลังงานของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับที่เหมาะสมต่อการตรวจกัมมันตรังสี	53
4.5 ซึ่ดความสามารถด้านความลึกของการตรวจกัมมันตรังสีด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	55
4.6 ผลกระทบของความชื้นในดินต่อการตรวจกัมมันตรังสีด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	56
4.7 ซึ่ดความสามารถของชุดหัววัดนิวตรอนในการตรวจกัมมันตรังสีภายใต้ความชื้นในดิน	57
4.8 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมันตรังสีในฟังก์ชันของมวลของกัมมันตรังสี	58
4.9 ปริมาณรังสีของผู้ปฏิบัติงานตรวจกัมมันตรังสี	59
บทที่ 5 สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ	61
5.1 ประสิทธิภาพและซึ่ดความสามารถขององค์ประกอบของชุดหัววัดนิวตรอน โดยเทคนิค TNB	61
5.2 ประสิทธิภาพและซึ่ดความสามารถขององค์ประกอบของชุดหัววัดนิวตรอน โดยเทคนิค LNB	62
5.3 ซึ่ดความสามารถของเทคนิค TNA	63
5.4 ข้อเสนอแนะ	63
บรรณานุกรม	64
ประวัตินักวิจัย	66

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 พลังงานและค่าภาคตัดขวางของรังสีแกมมาที่เกิดจากการอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) และแบบ $(n, n' \gamma)$ ระหว่างนิวตรอนกับองค์ประกอบของดินทรายและกับระเบิด	45
4.1 ปริมาณรับรังสีนิวตรอนและแกมมาที่ผู้ปฏิบัติงานตรวจกับระเบิดได้รับเมื่อแหล่งกำเนิดนิวตรอนมีค่ากัมมันตภาพ 5×10^6 , 1×10^7 และ 1×10^8 n/s	60



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1 เครื่องตรวจกัมมะเบตที่มีอยู่ในปัจจุบัน (ก) เครื่องตรวจโลหะ (ข) เหล็กแหลม (ค) สุนัขดมกลิ่น	2
2.1 โมเดลของระบบการจำลองการตรวจกัมมะเบตที่ใช้เทคนิค NBS	6
2.2 โมเดลของระบบการจำลองการตรวจกัมมะเบตที่ใช้เทคนิค TNA	8
3.1 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	10
3.2 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	11
3.3 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	11
3.4 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	12
3.5 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 5.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	13
3.6 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	14
3.7 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	14
3.8 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	15
3.9 การเปรียบเทียบฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4, 5.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	15
3.10 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	16
3.11 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกัมมะเบตในดินทรายลึก 2.4 และ 8.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	17

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.12 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	18
3.13 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	18
3.14 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	19
3.15 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	20
3.16 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	20
3.17 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	21
3.18 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	22
3.19 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	22
3.20 ฟลักซ์สุทธิของนิวตรอนพลังงาน 0-1 eV ในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	23
3.21 ฟลักซ์สุทธิของนิวตรอนพลังงาน 0-10 keV ในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	23
3.22 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	24
3.23 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	25
3.24 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	25

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.25, การกระจายฟลักซ์ของนิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	26
3.26 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	27
3.27 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	27
3.28 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	28
3.29 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย $\text{Am-241}/\text{Be-9}/\text{BF}_3$	29
3.30 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4, 5.4 และ 12.4 cm ด้วย $\text{Am-241}/\text{Be-9}/\text{BF}_3$	29
3.31 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$	30
3.32 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$	31
3.33 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4, 5.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$	31
3.34 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	33
3.35 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$	34
3.36 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	35
3.37 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3$	36

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.38	37
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปนุณลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	
3.39	38
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปนุณลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$	
3.40	39
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปนุณลึก 10 cm โดย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	
3.41	40
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปนุณลึก 5 cm โดย $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3$	
3.42	41
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียวลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$	
3.43	42
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียวลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$	
3.44	43
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียวลึก 5 cm โดย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	
3.45	44
สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียวลึก 5 cm โดย $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3$	
3.46	46
สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการจำลองการตรวจกัมมะเบ็ดโดย ไม่มีกัมมะเบ็ดฝังอยู่ใต้ดินทรายหรือเกิดจากการตรวจชั้นดินทรายเท่านั้น	
3.47	47
สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการจำลองการตรวจกัมมะเบ็ด DLM2 ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm	
3.48	48
สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการจำลองการตรวจกัมมะเบ็ด DLM2 ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดยมีน้ำในดิน 5%	
4.1	51
ค่าพารามิเตอร์ S ที่ได้จากการตรวจกัมมะเบ็ดในดินทราย ด้วยชุดหัววัด 4 ชนิด: 1) $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ 2) $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ 3) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$ 4) $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3$	
4.2	52
อัตราส่วนของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบ็ดเทียบกับค่าจากวัสดุอื่นๆ สำหรับชุดหัววัด 4 ชนิด: 1) $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$, 2) $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$, 3) $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3$, 4) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$	

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
4.3 , ค่าพารามิเตอร์ S ที่ได้จากการตรวจกับระเบิด รากไม้ โพลีเอทิลีน และคอนกรีต ที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	53
4.4 ฟลักซ์นิวตรอนช่วงพลังงานต่างๆ ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดที่ฝังในชั้นดินเหนียว ลึก 2.4 -35.4 cm โดยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	54
4.5 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดที่ฝังใต้ดินทราย ดินปูนและดินเหนียว ในฟังก์ชัน ของความลึก โดยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	56
4.6 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดในฟังก์ชันของความชื้นในดิน เมื่อกับระเบิดฝังในดินทรายและดินปูนลึก 2.4 cm .	57
4.7 แอมพลิจูดของพารามิเตอร์ S ในฟังก์ชันของความชื้นในดินสำหรับกับระเบิด ที่ฝังใต้ดินทรายลึก 2.4 cm โดยชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	58
4.8 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดมวล 249, 518, 1,300 และ 3,100 g ที่ฝังใต้ดินทรายลึก 5 cm โดยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$	59

บทที่ 1

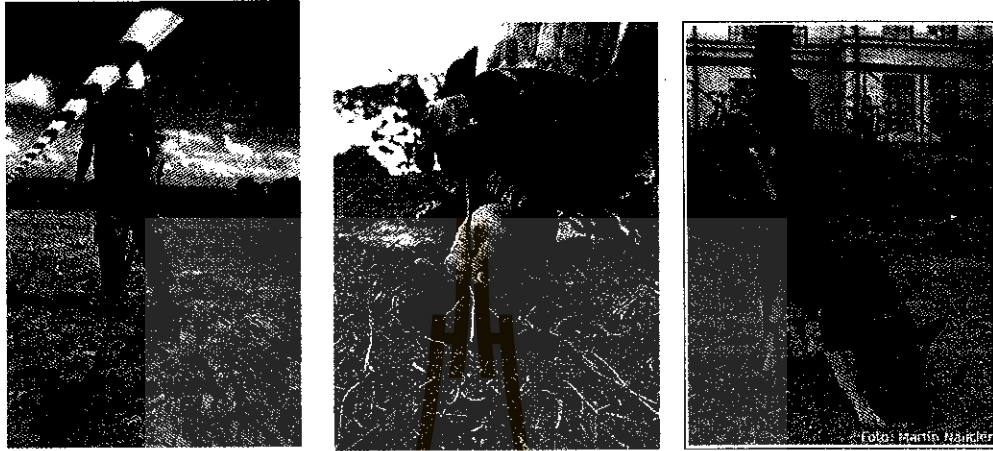
บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาการวิจัย

เนื่องจากการสู้รบระหว่างประเทศต่างๆ ในช่วงสงครามเย็น (พ.ศ. 2528-2534) ทำให้มีกัมระเบิดตกค้างฝังอยู่ตามแนวชายแดนของประเทศคู่สงครามทั่วโลก 62 ประเทศเป็นจำนวนนับ 100 ล้านลูก ถึงแม้ได้มีการเก็บกู้กับระเบิดดังกล่าว ไปบ้างแล้วแต่ยังคงมีกัมระเบิดฝังอยู่ตามท้องไร่ท้องนาหรือพื้นที่ทำกินของประชากรของประเทศเหล่านั้น ไม่ต่ำกว่า 60 ล้านลูก กับระเบิดที่ตกค้างเหล่านี้ก่อให้เกิดความสูญเสียต่อชีวิตหรืออวัยวะบางส่วนประชากรเมื่อเหยียบกับระเบิดโดยบังเอิญ ปัจจุบันมีประชากรทั่วโลกเหยียบกับระเบิดโดยบังเอิญประมาณ 2,6000 คนต่อปี ซึ่งประมาณ 80% เป็นพลเรือน (Csikai, Hussein and Rosengard, 2004) การสูญเสียของประชากรทั่วโลกเนื่องจากการเหยียบกับระเบิดโดยบังเอิญนับเป็นการสูญเสียทรัพยากรมนุษย์ที่เป็นกำลังสำคัญในการพัฒนาประเทศต่างๆ อย่างมหาศาล นอกจากนี้ยังต้องสิ้นเปลืองงบประมาณในการรักษาพยาบาลบุคคลที่ทุพพลภาพอีกด้วย จากปัญหาดังกล่าวองค์การสหประชาชาติได้ทุ่มงบประมาณสนับสนุนประเทศต่างๆ ที่ลงนามในสนธิสัญญาออตตาวา (Ottawa Treaty) ให้ทำการเก็บกู้ระเบิดที่ตกค้างให้แล้วเสร็จภายในเวลาที่กำหนด แต่เนื่องจากขาดแคลนเครื่องตรวจกับระเบิดที่มีประสิทธิภาพทำให้การเก็บกู้กับระเบิดที่ผ่านมาเป็นไปอย่างล่าช้าและเสี่ยงอันตรายจากขีดความสามารถของการเก็บกู้กับระเบิดในปัจจุบัน โดยใช้เครื่องตรวจกับระเบิดที่มีอยู่อาจต้องใช้เวลานานนับพันปีจึงจะสามารถเก็บกู้กับระเบิดในโลกนี้ได้ทั้งหมด

ในช่วงการสู้รบระหว่างเขมร 3 ฝ่ายในประเทศกัมพูชามีการวางกับระเบิดประมาณ 4-6 ล้านลูก โดยส่วนหนึ่งอยู่ตามแนวชายแดนระหว่างประเทศไทยกับประเทศกัมพูชาทำให้ประชาชนชาวไทยที่อาศัยอยู่ตามแนวชายแดนได้รับผลกระทบจากปัญหาของกับระเบิดตกค้างตามแนวชายแดนดังกล่าวซึ่งครอบคลุมพื้นที่หลายร้อยตารางกิโลเมตรตั้งแต่จังหวัดอุบลราชธานี ศรีสะเกษ สุรินทร์และบุรีรัมย์ ดังนั้นประเทศไทยจึงได้ร่วมลงนามในสนธิสัญญาออตตาวาเพื่อทำการเก็บกู้กับระเบิดที่ตกค้างตามแนวชายแดนโดยมีกำหนดการให้แล้วเสร็จภายใน 10 ปี กำหนดการนี้อาจไม่สำเร็จถ้าใช้เครื่องตรวจกับระเบิดที่มีอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งประกอบด้วยเครื่องตรวจโลหะ เหล็กแหลม และสุนัขดมกลิ่น ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เนื่องจากเครื่องตรวจโลหะอาศัยการตรวจหาโลหะที่ห่อหุ้มกับระเบิดหรือเข็มแทงชนวนที่เป็นโลหะ ดังนั้นเครื่องมือดังกล่าวจึงไม่สามารถตรวจพบกับระเบิดที่ห่อหุ้มด้วยไม้หรือพลาสติกได้อย่างมีประสิทธิภาพ การใช้เหล็กแหลมเพื่อยืนยันว่ามีกับระเบิดฝังอยู่ได้ดินจริงก็เสี่ยงอันตรายมากสำหรับ

ผู้ปฏิบัติงาน การใช้สุนัขดมกลิ่นในการตรวจกับระเบิดถึงแม้จะมีความแม่นยำแต่ก็มีข้อจำกัดที่สุนัขไม่สามารถทำงานได้ต่อเนื่องเกิน 1 ชั่วโมงต่อครั้ง ทำให้ต้องหยุดตรวจเป็นระยะๆ



(ก)

(ข)

(ค)

รูปที่ 1.1 เครื่องตรวจกับระเบิดที่มีอยู่ในปัจจุบัน (ก) เครื่องตรวจโลหะ (ข) เหล็กแหลม (ค) สุนัขดมกลิ่น

ด้วยเหตุนี้ องค์การพลังงานปรมาณูระหว่างประเทศ (International Atomic Energy Agency) จึงได้จัดการประชุมนานาชาติเรื่อง “International Conference on Requirements and Technologies for the Detection and Neutralization of Landmine and UXO” ขึ้นระหว่างวันที่ 15-18 กันยายน พ.ศ. 2546 เพื่อให้นักวิจัยทั่วโลกได้ปรึกษาหารือถึงแนวทางที่จะหาเทคนิคที่สามารถนำมาใช้ในการตรวจกับระเบิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Cornelis and Sahli, 2003) ในการประชุมดังกล่าวได้ข้อสรุปว่าเทคนิคทางนิวเคลียร์เป็นเทคนิคหนึ่งที่จะช่วยทำให้การตรวจกับระเบิดมีประสิทธิภาพตามต้องการ

ปัจจุบันมีนักวิจัยหลายกลุ่มทำการศึกษาถึงวิธีการตรวจกับระเบิดโดยใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ชนิดต่างๆ โดยอาศัยอนุภาคนิวตรอนเป็นสื่อในการตรวจ (Csikai, Dóczy and Király, 2004) เทคนิคที่ได้รับความสนใจได้แก่ เทคนิคการลดทอนพลังงานนิวตรอนและการกระเจิงของรังสีแกมมา (Király and Csikai, 2001; Csikai, Király and Buczkó, 2002) เทคนิคการกระเจิงด้วยนิวตรอนพลังงานสูง (Király, Oláh and Csikai, 2001; Csikai, Király and Dóczy, 2001) เทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอนอุณหภาพ (Brooks and Drogg, 2005) และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนอุณหภาพ (Hussein, 1992; Gozani, 1996) เป็นต้น

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิคทางนิวเคลียร์ในการตรวจกับระเบิดโดยอาศัยการจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โล เทคนิคทางนิวเคลียร์ที่จะนำมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้มี 2 ชนิดคือเทคนิคการกระเจิงกลับของนิวตรอน (Neutron Back-Scattering, NBS) และเทคนิคการวิเคราะห์ด้วยนิวตรอนอุณหภาพ (Thermal Neutron Analysis, TNA)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค NBS ในการตรวจกับระเบิด
- 1.2.2 เพื่อศึกษาถึงองค์ประกอบของระบบตรวจกับระเบิดที่ใช้เทคนิค NBS ที่มีประสิทธิภาพ
- 1.2.3 เพื่อประเมินขีดความสามารถและขีดจำกัดของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS
- 1.2.4 เพื่อศึกษาความเป็นไปได้เบื้องต้นของการใช้เทคนิค TNA ในการตรวจกับระเบิด

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทำการศึกษาความเป็นไปได้โดยการจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS และเทคนิค TNA โดยอาศัยโปรแกรมมอนติคาร์โล
- 1.3.2 ทำการศึกษาความเป็นไปได้โดยการจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS และเทคนิค TNA ที่ใช้ไอโซโทปรังสีเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน

1.4 ระเบียบวิธีวิจัย

ระเบียบวิธีวิจัยสำหรับการศึกษาวิจัยครั้งนี้คือ การจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS และเทคนิค TNA โดยอาศัยโปรแกรมมอนติคาร์โล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้ทราบถึงความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค NBS ในการตรวจกับระเบิด
- 1.5.2 ได้ทราบถึงองค์ประกอบของระบบตรวจกับระเบิดที่ใช้เทคนิค NBS ที่มีประสิทธิภาพ
- 1.5.3 ได้ทราบขีดความสามารถและขีดจำกัดของระบบตรวจกับระเบิดที่ใช้เทคนิค NBS
- 1.5.4 ได้ทราบความเป็นไปได้เบื้องต้นของการใช้เทคนิค TNA ในการตรวจกับระเบิด

บทที่ 2

วิธีดำเนินการวิจัย

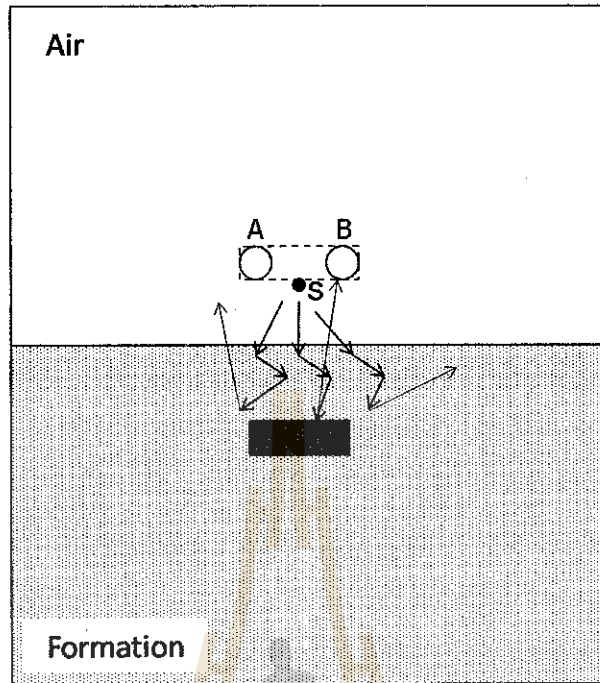
เนื่องจากวิธีการดำเนินการวิจัยสำหรับการศึกษาวิจัยในครั้งนี้คือการจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS และ TNA โดยอาศัยโปรแกรมมอนติคาร์โล ดังนั้นในหัวข้อต่อไปนี้จะทำการอธิบายถึงรายละเอียดของการใช้โปรแกรมมอนติคาร์โลเพื่อจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิคดังกล่าว

2.1 การจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS

เทคนิค NBS อาจแบ่งออกเป็น 2 เทคนิคย่อยโดยแบ่งตามพลังงานของอนุภาคนิวตรอนที่เกี่ยวข้องคือ เทคนิค Thermal Neutron Back-scattering (TNB) และเทคนิค Low-energy Neutron Back-scattering (LNB) รูปที่ 2.1 แสดงโมเดลของระบบการจำลองการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS ซึ่งจะพบว่าระบบการจำลองการตรวจกับระเบิดมีองค์ประกอบหลักๆ เป็นดังนี้ 1) แหล่งกำเนิดนิวตรอน (S) 2) หัววัดนิวตรอน (A/B) 3) กัมระเบิด (DLM) 4) ชั้นดิน (formation) จากรูปจะพบว่าทั้งแหล่งกำเนิดนิวตรอนและหัววัดนิวตรอนวางอยู่ในอากาศ (air) เหนือพื้นดินขณะที่กัมระเบิดฝังอยู่ใต้ชั้นดิน ลูกศรคือทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอน หลักการของการตรวจกับระเบิดที่ใช้เทคนิค TNB คือเมื่อนิวตรอนพลังงานสูงที่ถูกยิงกราด (scan) ออกมาจากแหล่งกำเนิดนิวตรอนเคลื่อนที่ลงสู่พื้นดินในทิศทางตามลูกศรจะตกกระทบกับองค์ประกอบของดินหรือวัสดุอื่นๆ ที่ฝังใต้ดินแล้วเกิดการกระเจิง (scattering) ไปในทิศทางต่างๆ โดยในการกระเจิงแต่ละครั้งนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานทำให้นิวตรอนมีพลังงานลดลงเป็นลำดับจนกลายเป็นนิวตรอนพลังงานต่ำ (low energy neutron) และในที่สุดกลายเป็นนิวตรอนอุณหภาพ (thermal neutron) ซึ่งมีพลังงาน 0.025 อิเล็กตรอน โวลต์ นิวตรอนเหล่านี้อาจตกกระทบกับกัมระเบิดแล้วกระเจิงกลับไปในทิศทางต่างๆ ซึ่งบางครั้งอาจทะลุผ่านดินไปตกกระทบกับหัววัดแต่บางครั้งก็อาจกระเจิงไปที่อื่น ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับไปที่กัมระเบิดจะขึ้นอยู่กับชนิดของนิวเคลียสองค์ประกอบของวัสดุที่นิวตรอนตกกระทบ ถ้าหากวัสดุดังกล่าวเป็นกัมระเบิดซึ่งมีนิวเคลียสองค์ประกอบ 4 ชนิดคือ H, C, N และ O ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงย้อนกลับ ไปตกกระทบกับหัววัดจะแปรผันโดยตรงกับความหนาแน่นของ H ในกัมระเบิด ทั้งนี้เพราะนิวตรอนจะกระเจิงได้ดีเมื่อตกกระทบกับนิวเคลียสขนาดเล็ก เนื่องจากกัมระเบิดมีความหนาแน่นของ H แตกต่างจากวัสดุอื่นๆ ซึ่งโดยทั่วไปจะสูงกว่าค่าของวัสดุต่างๆ ที่อาจฝังอยู่ใต้ดิน ดังนั้นค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงย้อนกลับ ไปตกกระทบกับ

ห้วงหลังการตกกระทบกับกัมมะเบตจึงมีค่ามากกว่าค่าของการตกกระทบกับวัสดุอื่นๆ ถ้าทำการตรวจกัมมะเบตในบริเวณหนึ่งแล้วพบว่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงย้อนกลับไปตกกระทบกับห้วงมีค่าสูง ย่อมแสดงว่าบริเวณนั้นน่าจะมีกัมมะเบตฝังอยู่ใต้ดิน เนื่องจากมีวัสดุบางอย่างที่มี H สูงกว่ากัมมะเบต เช่น โพลีเอธิลีน ดังนั้นการตรวจพบฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับด้วยค่าที่สูง ไม่อาจรับประกันได้ว่าวัสดุที่นิวตรอนตกกระทบเป็นกัมมะเบตเสมอไป อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากการตกกระทบกับวัสดุที่ต่างกันมีค่าต่างกันเราสามารถให้ความแตกต่างของค่าดังกล่าวเป็นดัชนีในการตรวจกัมมะเบต ในการจำลองด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โลจึงมีจุดมุ่งหมายเพื่อหาค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงย้อนกลับจากการตกกระทบกับวัสดุชนิดต่างๆ

โปรแกรมมอนติคาร์โลที่จะใช้ในการจำลองในครั้งนี้คือ MCNP5 (X-5 Monte Carlo Team, 2003) ซึ่งเป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่อาศัยหลักการทางสถิติในการจำลองอันตรกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคนิวตรอน อิเล็กตรอน และโฟตอน กับนิวเคลียสองค์ประกอบของวัสดุที่อนุภาคตกกระทบ ในการจำลองการตรวจกัมมะเบต โปรแกรมจะติดตามการเคลื่อนที่ของนิวตรอนแต่ละอนุภาคที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิดนิวตรอน ไปตลอดช่วงชีวิตของอนุภาคในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นดิน ในแต่ละครั้งที่นิวตรอนตกกระทบกับนิวเคลียสองค์ประกอบของชั้นดินและวัสดุที่ฝังอยู่ใต้ชั้นดิน โปรแกรมจะทำการสุ่มถึงชนิดของอันตรกิริยานิวเคลียร์ที่เกิดขึ้นในลักษณะเดียวกับการทอดลูกเต๋าในบ่อนการพนัน เนื่องจากเมืองมอนติคาร์โลเป็นเมืองท่องเที่ยวที่มีบ่อนการพนันที่มีชื่อเสียง ชื่อของโปรแกรมมอนติคาร์โลจึงถูกตั้งขึ้นตามชื่อเมืองดังกล่าว ผลของการสุ่มจะถูกบันทึกไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์โดยผลดังกล่าวจะถูกกำหนดโดยค่าภาคตัดขวาง (cross section) ของอันตรกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสองค์ประกอบของวัสดุ ในระหว่างการจำลองโปรแกรมจะเลือกใช้ค่าภาคตัดขวาง ENDF B-VI ที่เหมาะสมซึ่งมีอยู่ในฐานข้อมูลของโปรแกรมเพื่อคำนวณหาค่าโอกาสของอันตรกิริยานิวเคลียร์ชนิดต่างๆ ที่เกิดขึ้นหลังการตกกระทบ เมื่อสิ้นสุดชีวิตของแต่ละอนุภาค โปรแกรมจะทำการรวบรวมประวัติของอนุภาคเหล่านั้นพร้อมทั้งอนุภาคหรือรังสีผลผลิตที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสองค์ประกอบของวัสดุ และเมื่อชีวิตของอนุภาคนิวตรอนตัวสุดท้ายจากแหล่งกำเนิดสิ้นสุดลง โปรแกรมจะสรุปประวัติของทุกอนุภาคว่าก่อให้เกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์ชนิดใดและมีอนุภาคหรือรังสีผลผลิตจำนวนเท่าใดเพื่อเขียนเป็นข้อมูลผลลัพธ์ของการจำลอง



รูปที่ 2.1 โมเดลของระบบการจำลองการตรวจกับระเบิดที่ใช้เทคนิค NBS

ในการจำลองการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค NBS โดยอาศัยโปรแกรม MCNP5 ในครั้งนี้จะทำการแปรผันพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เกี่ยวกับชนิดและสมบัติขององค์ประกอบของระบบการตรวจกับระเบิดสำหรับกรณีศึกษาต่างๆ เพื่อหาขีดความสามารถและขีดจำกัดของเทคนิค ระบบการจำลองในแต่ละกรณีศึกษาจะประกอบด้วยชนิดของแหล่งกำเนิดนิวตรอน หัววัดนิวตรอน ชั้นดินและวัสดุที่ฝังใต้ชั้นดินตามรายการข้างล่างนี้

- 1) ชนิดของแหล่งกำเนิดนิวตรอน : ^{252}Cf หรือ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$
- 2) ชนิดของหัววัดนิวตรอน: ^3He หรือ BF_3 (รูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 cm ยาว 12 cm)
- 3) ชนิดของชั้นดิน: ดินทราย (sand) หรือ ดินปูน (lime stone) หรือ ดินเหนียว (clay)
- 4) ชนิดของวัสดุที่ฝังอยู่ใต้ดิน: กับระเบิดรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm ยาว 3.4 cm (TNT) โพลีเอทิลีน (HDPE) ราวไม้ (wood) คอนกรีต (concrete) หินแกรนิต (granite)

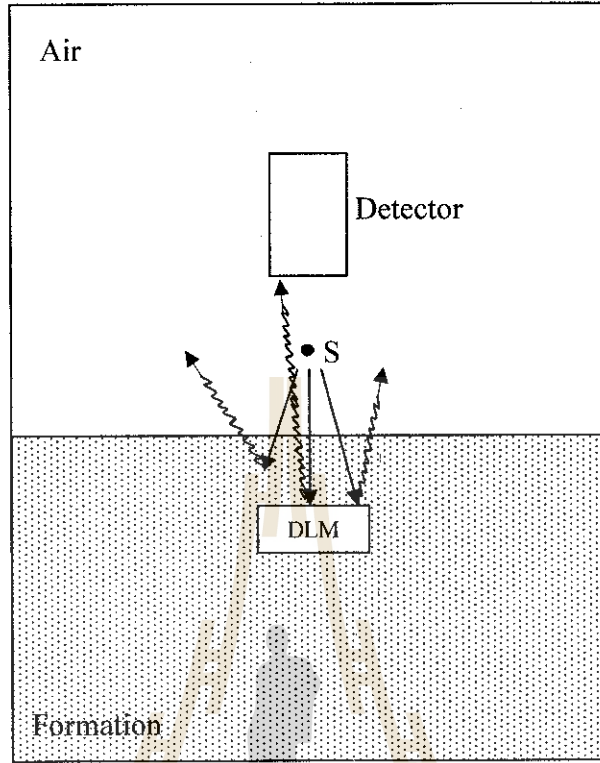
2.2 การจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNA

หลักการในการตรวจกับระเบิดของเทคนิค TNA จะมีลักษณะคล้ายกับเทคนิค NBS คือจะทำการยิงกราดอนุภาคนิวตรอนลงไปในดินแล้ววัดจำนวนรังสีผลผลิตที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสองค์ประกอบของกับระเบิด รูปที่ 2.2 แสดงโมเดลของระบบตรวจกับระเบิดที่ใช้เทคนิค TNA ซึ่งประกอบด้วยแหล่งกำเนิดนิวตรอน(S) หัววัดรังสีแกมมา NaI ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7.62 cm (detector) กับระเบิดรูปทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 cm ยาว 3.4 cm (DLM) และชั้นดิน (formation) ลูกศรตรงคือทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคนิวตรอน ส่วนลูกศรเกี้ยวคือรังสีแกมมา จากรูปจะพบว่าทั้งแหล่งกำเนิดนิวตรอนและหัววัดรังสีแกมมาวางอยู่ในอากาศ (air) เหนือชั้นดินขณะที่กับระเบิดฝังอยู่ใต้ผิวดิน เมื่อยิงกราดนิวตรอนพลังงานสูงจากแหล่งกำเนิดลงสู่พื้นดินนิวตรอนจะสูญเสียพลังงานจนกลายเป็นนิวตรอนอุณหภาพเช่นเดียวกับกรณี TNB นิวตรอนเหล่านี้ อาจถูกจับด้วยนิวเคลียสองค์ประกอบของกับระเบิดแล้วปลดปล่อยรังสีแกมมาโดยอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ radiative capture หรือ (n, γ) ในกรณีที่นิวตรอนอุณหภาพทำอันตรกิริยาแบบ (n, γ) กับ H และ N จะก่อให้เกิดรังสีแกมมาพลังงาน 2.2 และ 10.8 MeV ตามลำดับ ดังแสดงในสมการ(1) และ (2) (Hussein, 1992; Gozani, 1996)



ค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยาทั้ง 2 คือ 330 และ 11 mb ตามลำดับ ดังนั้นถ้าทำการตรวจกับระเบิดในบริเวณหนึ่งแล้วพบว่ารังสีแกมมาพลังงาน 2.2 และ 10.8 MeV เกิดขึ้นย่อมแสดงว่าอาจมีกับระเบิดฝังอยู่ใต้ดินในบริเวณนั้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากในดินอาจมี H และ N ซึ่งเป็นองค์ประกอบของวัสดุอย่างอื่นปะปนอยู่ ดังนั้นจะต้องใช้พารามิเตอร์อื่นในการร่วมวิเคราะห์ว่ามีกับระเบิดฝังอยู่ใต้ดินจริงหรือไม่ เช่น ความหนาแน่นของนิวเคลียสองค์ประกอบของกับระเบิดหรือสัดส่วนของค่าดังกล่าว เป็นต้น

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะทำการจำลองการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNA โดยอาศัยโปรแกรม MCNP5 ในลักษณะเดียวกับเทคนิค NBS เพื่อตรวจสอบในขั้นต้นว่าจะสามารถตรวจพบรังสีแกมมาที่เกิดจาก H และ N ของกับระเบิดที่ฝังใต้ดินได้หรือไม่ ถ้าผลการตรวจสอบเป็นไปในทางบวกย่อมแสดงว่ามีความเป็นไปได้เบื้องต้นที่จะสามารถตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNA



รูปที่ 2.2 โมเดลของระบบการจำลองการตรวจกับระเบิดที่ใช้เทคนิค TNA



บทที่ 3

ผลการจำลองด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โล

3.1 ผลการจำลองด้วยเทคนิค TNB

ในหัวข้อต่อไปนี้จะแสดงผลลัพธ์จากการจำลองการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNB โดยอาศัยฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงาน 0-1 eV ที่กระเจิงกลับไปตกกระทบกับหัววัดในฟังก์ชันของระยะทางจากจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดไปยังตำแหน่งของกับระเบิด ผลลัพธ์จากการจำลองดังกล่าวจะเป็นผลลัพธ์สำหรับกรณีศึกษาต่างๆ ซึ่งมีชนิดขององค์ประกอบของระบบตรวจกับระเบิดที่แตกต่างกันดังกล่าวแล้ว ในบทที่ 2 ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในแต่ละกรณีศึกษาคือฟลักซ์ของนิวตรอนพลังงาน 0-1 eV ที่กระเจิงกลับไปตกกระทบกับหัววัด ต่อ 1 อนุภาคนิวตรอนที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิด

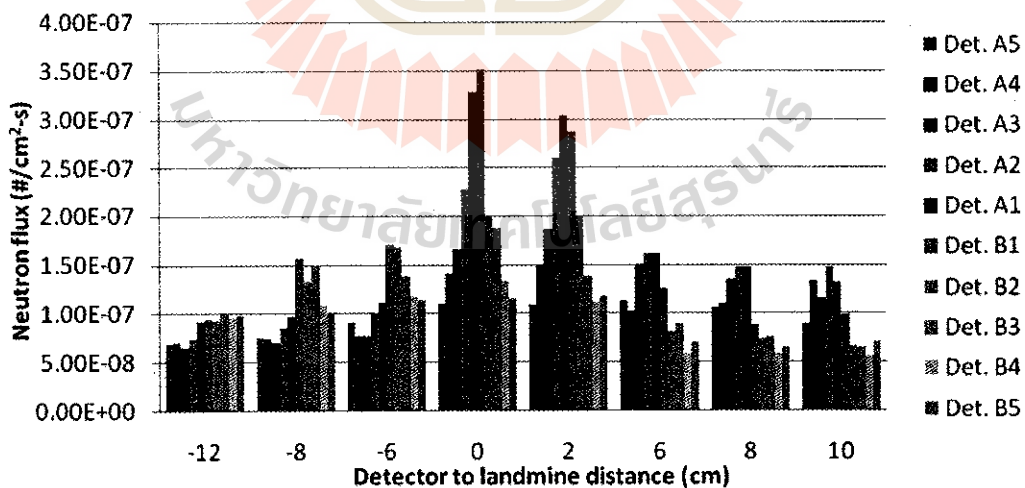
3.1.1 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}/\text{Sand}/\text{TNT}$ (10 หัววัด)

รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายฟลักซ์นิวตรอนในหัววัดในฟังก์ชันของระยะทางจากจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดถึงตำแหน่งของกับระเบิดสำหรับกรณีศึกษาที่ใช้ ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^3He เป็นหัววัดนิวตรอน ดินทราย (มีสัดส่วนอะตอมของ Si และ O เป็น 1 และ 2 ตามลำดับ) เป็นชั้นดินและ TNT มวล 249 g เป็นกับระเบิดที่ฝังลึก 2.4 cm กรณีศึกษานี้มีชุดหัววัดนิวตรอน 2 ชุด (ชุด A และ B) ชุดละ 5 หัววัดวางติดกันเป็นแพ โดยมีแหล่งกำเนิดนิวตรอนแบบจุด (point source) อยู่ระหว่างกลาง (ชุด A อยู่ทางซ้าย ชุด B อยู่ทางขวาของแหล่งกำเนิดนิวตรอน) จากรูปที่ 3.1 จะพบว่าเมื่อชุดหัววัดเคลื่อนเข้าหาตำแหน่งของกับระเบิดจากทางขวามือ ค่าฟลักซ์นิวตรอนในทุกหัววัดจะเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดเมื่อจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดล้อมอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิดและลดลงสู่ค่าเดิมเมื่อเคลื่อนไปทางซ้ายออกจากตำแหน่งของกับระเบิด เป็นที่น่าสังเกตว่าในขณะที่ชุดหัววัดเคลื่อนที่เข้าหาตำแหน่งของกับระเบิดนั้น ค่าฟลักซ์นิวตรอนในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด A จะสูงกว่าค่าในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด B แต่เมื่อชุดหัววัดเคลื่อนห่างออกไปจากตำแหน่งของกับระเบิด ค่าฟลักซ์ในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด A จะต่ำกว่าค่าในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด B นอกจากนี้จะพบว่าค่าฟลักซ์นิวตรอนในหัววัดที่อยู่ด้านในหรืออยู่ใกล้แหล่งกำเนิดนิวตรอนมากกว่าของแต่ละชุดหัววัดจะสูงกว่าค่าในหัววัดที่อยู่ไกลกว่า เช่น หัววัด A1 และ B1 จะมีฟลักซ์สูงกว่าหัววัดอื่นๆ

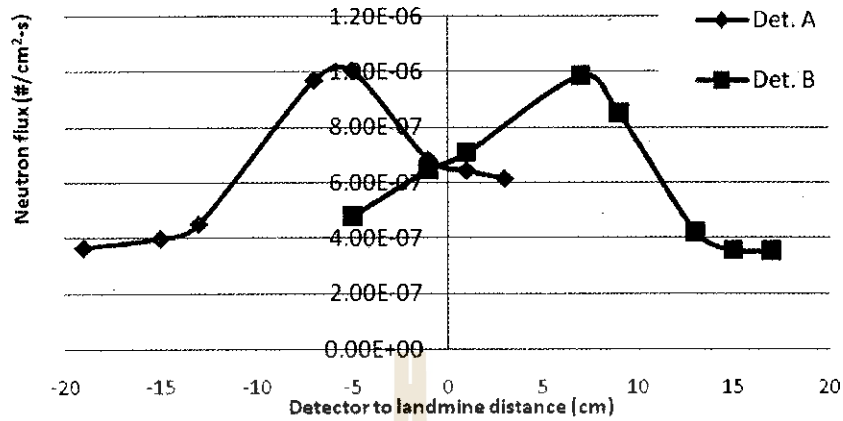
รูปที่ 3.2 แสดง ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ในฟังก์ชันของระยะทางจากจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดถึงตำแหน่งของกับระเบิด เมื่อชุดหัววัดอยู่ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในขณะที่เคลื่อนผ่านตำแหน่งของกับ

ระเบิดจากขวาไปซ้าย (จาก +20 ถึง -20 cm) จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าฟลักซ์รวมในแต่ละชุดหัววัดมีค่าเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุด ณ ตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางของชุดหัววัดคร่อมอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิดและลดลงสู่ค่าเดิมเมื่อเคลื่อนห่างออกไป รูปที่ 3.3 แสดงฟลักซ์สุทธิหรือผลต่างของค่าฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A เทียบกับค่าในชุดหัววัด B ในฟังก์ชันของระยะทางจากจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดถึงตำแหน่งของกับระเบิด จากรูปที่ 3.3 จะพบว่าเมื่อชุดหัววัดเคลื่อนเข้าหาตำแหน่งของกับระเบิดจากทางขวามือ ค่าฟลักซ์สุทธิจะเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดแล้วลดลงเป็นศูนย์ ณ ตำแหน่งที่จุดกึ่งกลางของชุดหัววัดอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิด เมื่อชุดหัววัดเคลื่อนห่างออกจากตำแหน่งของกับระเบิดไปทางซ้ายค่าฟลักซ์สุทธิจะมีค่าเป็นลบ โดยเป็นลบเพิ่มขึ้นสู่ค่าลบสูงสุดแล้วจึงลดลงอย่างสม่ำเสมอ การเพิ่มขึ้นและลดลงของฟลักซ์สุทธิในลักษณะดังกล่าวเมื่อชุดหัววัดเคลื่อนผ่านตำแหน่งของกับระเบิดชี้ให้เห็นว่า ชุดหัววัดตรวจพบวัสดุที่มี H เป็นองค์ประกอบเป็นจำนวนมากฝังในดิน ณ ตำแหน่งที่ค่าฟลักซ์สุทธิเป็นศูนย์ วัสดุดังกล่าวอาจเป็นกับระเบิดหรือวัสดุอื่นๆ ที่มี H เป็นองค์ประกอบเป็นจำนวนมาก ผลลัพธ์จากการจำลองดังแสดงในรูปทั้ง 3 ชี้ให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค TNB ในการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm

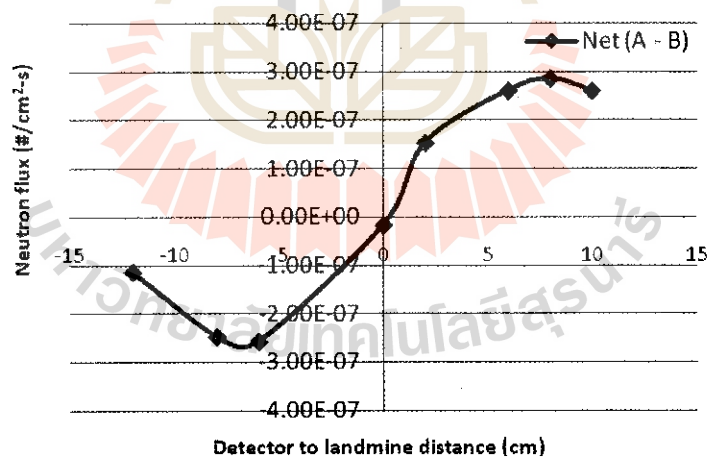
ในกรณีที่ฝังกับระเบิดลึก 5.4 cm ก็ได้ผลลัพธ์คล้ายกัน (ไม่ได้แสดงกราฟ) อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B กับค่าในกรณีของความลึก 2.4 cm พบว่ามีค่าต่ำกว่าประมาณ 4 เท่า ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อความลึกของกับระเบิดมากขึ้นฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจะน้อยลง ทั้งนี้เพราะส่วนหนึ่งของฟลักซ์ดังกล่าวถูกดูดกลืน (absorb) โดยองค์ประกอบของชั้นดิน



รูปที่ 3.1 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$



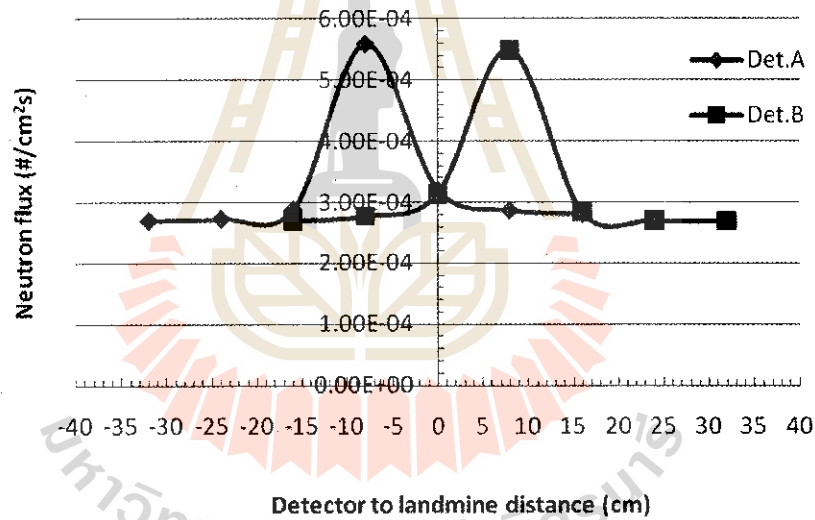
รูปที่ 3.2 พลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$



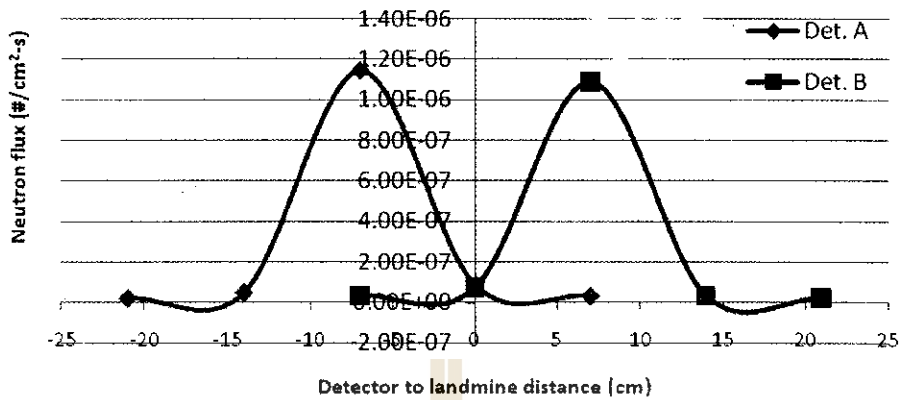
รูปที่ 3.3 พลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$

3.1.2 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3/\text{Sand}/\text{TNT}$ (10 หัววัด)

วัตถุประสงค์ของการจำลองในหัวข้อนี้คือเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของหัววัด BF_3 กับหัววัด ^3He โดยใช้ ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอนทำการตรวจกับระเบิด TNT ที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm รูปที่ 3.4 แสดงพลักรวมที่ได้จากการจำลองในกรณีศึกษาซึ่งพบว่าค่าพลักรวมสูงสุดในชุดหัววัด A มีค่า $5.6 \times 10^{-4} / \text{cm}^2\text{-s}$ เมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าที่ได้จากการจำลองด้วยหัววัด ^3He ซึ่งมีค่า $1.1 \times 10^{-6} / \text{cm}^2\text{-s}$ (จากรูปที่ 3.2) พบว่าหัววัด BF_3 มีประสิทธิภาพสูงกว่าหัววัด ^3He ประมาณ 100 เท่าต่อ 1 หัววัด รูปที่ 3.5 แสดงพลักรวมในชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ เมื่อตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินทรายลึก 5.4 cm โดยพลักรวมสูงสุดสำหรับกรณีศึกษานี้มีค่า $1.2 \times 10^{-6} / \text{cm}^2\text{-s}$ ดังนั้นแสดงว่าค่าพลักรวมสูงสุด ณ ความลึก 5.4 cm ต่ำกว่าค่าที่ความลึก 2.4 cm ประมาณ 460 เท่า



รูปที่ 3.4 พลักรวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$



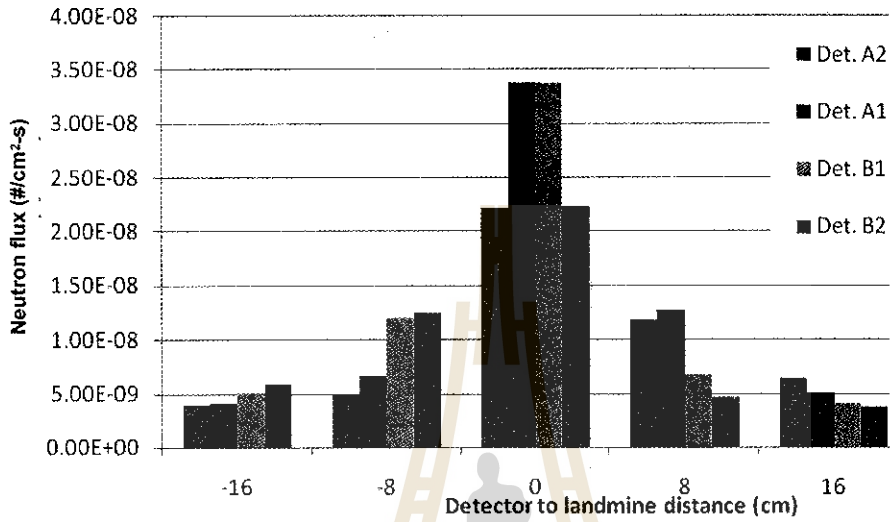
รูปที่ 3.5 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 5.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$

3.1.3 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/^3\text{H}/\text{Sand}/\text{TNT}$ (4 หัววัด)

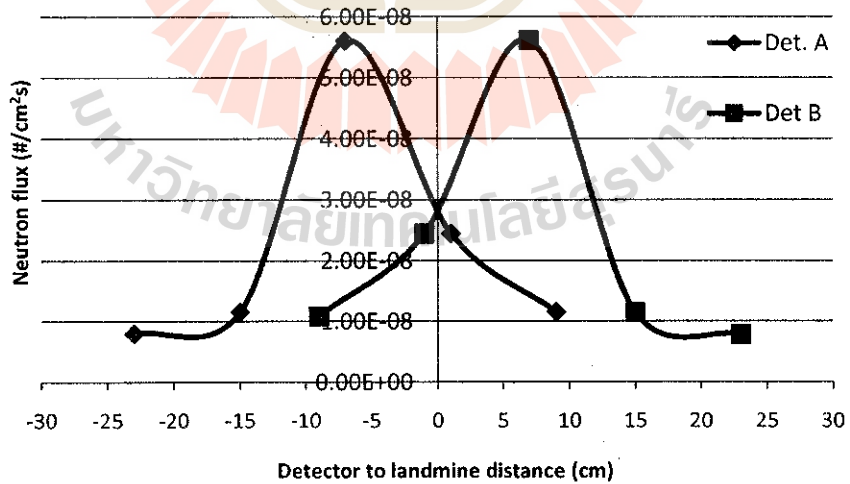
กรณีศึกษานี้เป็นการจำลองโดยใช้ ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^3H เป็นหัววัดนิวตรอน ดินทรายเป็นชั้นดิน และ TNT เป็นกับระเบิดโดยมีหัววัดนิวตรอนในแต่ละชุดหัววัดเพียง 2 หัววัด รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายฟลักซ์นิวตรอนในแต่ละหัววัดในฟังก์ชันของระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางชุดหัววัดกับตำแหน่งของกับระเบิดซึ่งฝังลึก 2.4 cm จากรูปที่ 3.6 พบว่าลักษณะของการกระจายฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับคล้ายกับกรณีของหัวข้อ 3.1.1 คือมีค่าฟลักซ์สูงสุดเมื่อจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดคร่อมอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิดพอดีและลดลงเป็นลำดับเมื่อเคลื่อนออกห่างจากตำแหน่งของกับระเบิด รูปที่ 3.7 แสดงฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อชุดหัววัดทั้งสองคร่อมอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิด เนื่องจากฟลักซ์รวมสูงสุดในชุดหัววัดสำหรับกรณี 10 และ 4 หัววัดมีค่าเป็น 1.0×10^{-6} และ $5.7 \times 10^{-8} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ ค่าฟลักซ์เฉลี่ยใน 1 หัววัดของกรณี 10 หัววัดจะสูงกว่าค่าเฉลี่ยของกรณี 4 หัววัดประมาณ 7 เท่า ข้อมูลนี้แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีจำนวนหัววัดในชุดหัววัดมากกว่าจะทำให้ประสิทธิภาพในการวัดมีค่าสูงกว่า อย่างไรก็ตามน้ำหนักของชุดหัววัดก็สูงกว่าเช่นกัน

รูปที่ 3.8 แสดงฟลักซ์สุทธิของนิวตรอนที่กระเจิงกลับในชุดหัววัด A และ B ซึ่งพบว่ามีลักษณะของการเปลี่ยนค่าฟลักซ์คล้ายกับรูปที่ 3.3 ลักษณะดังกล่าวเป็นดัชนีบ่งชี้ว่าชุดหัววัดตรวจพบกับระเบิดที่ฝังในดิน ในหัวข้อนี้ยังได้ทำการจำลองหาค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับในฟังก์ชันของความลึกของกับระเบิดใต้ชั้นดินทราย รูปที่ 3.9 แสดงฟลักซ์สุทธิสำหรับกรณีการฝังกับระเบิดลึก 2.4, 5.4, 8.4 และ 12.4 cm จากรูปจะพบว่าฟลักซ์สุทธิมีลักษณะเช่นเดียวกับรูปที่ 3.8 โดยแอมพลิจูดของค่าฟลักซ์สุทธิจะลดลง

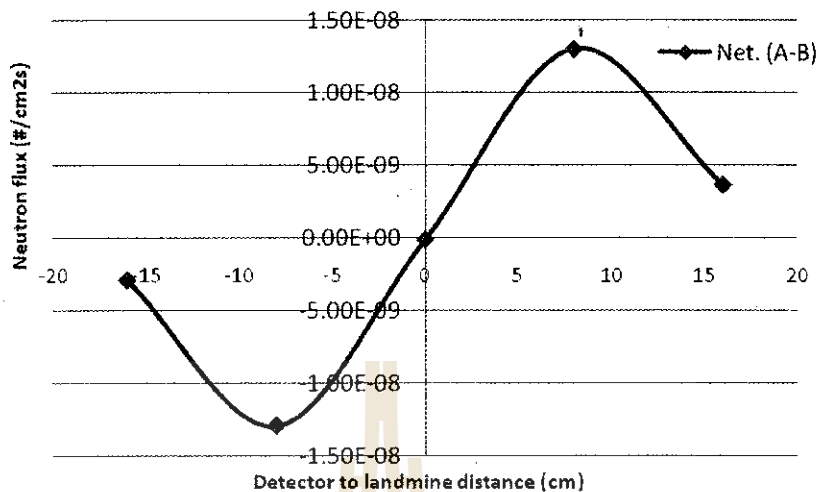
เมื่อความลึกเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถึงแม้ค่าแอมพลิจูดดังกล่าวจะลดลงแต่ยังมีค่ามากกว่าศูนย์ ดังนั้นแสดงว่าชุดหัววัดยังสามารถตรวจพบกับระเบิด ณ ความลึก 12.4 cm



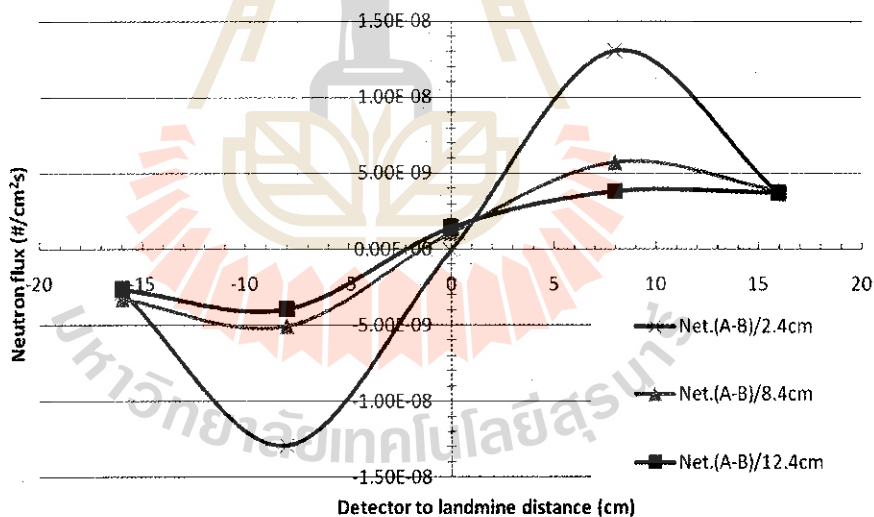
รูปที่ 3.6 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$



รูปที่ 3.7 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$



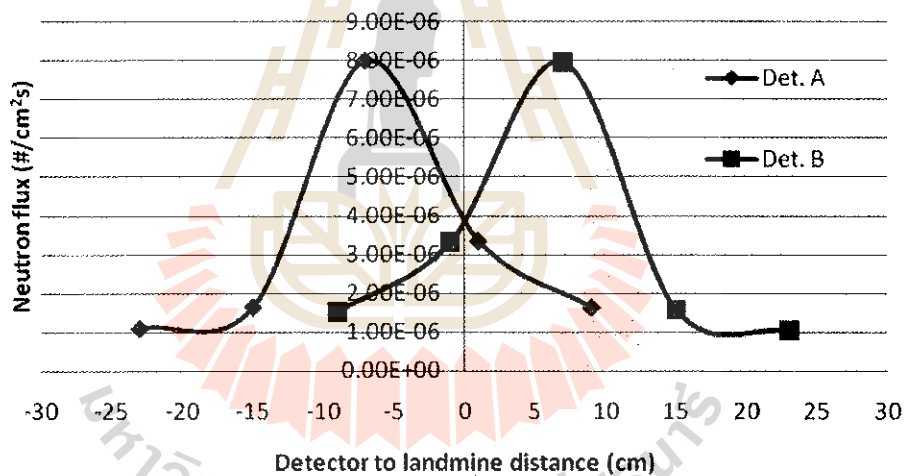
รูปที่ 3.8 ฟลักซ์สุทธิในจุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย ²⁵²Cf/³He



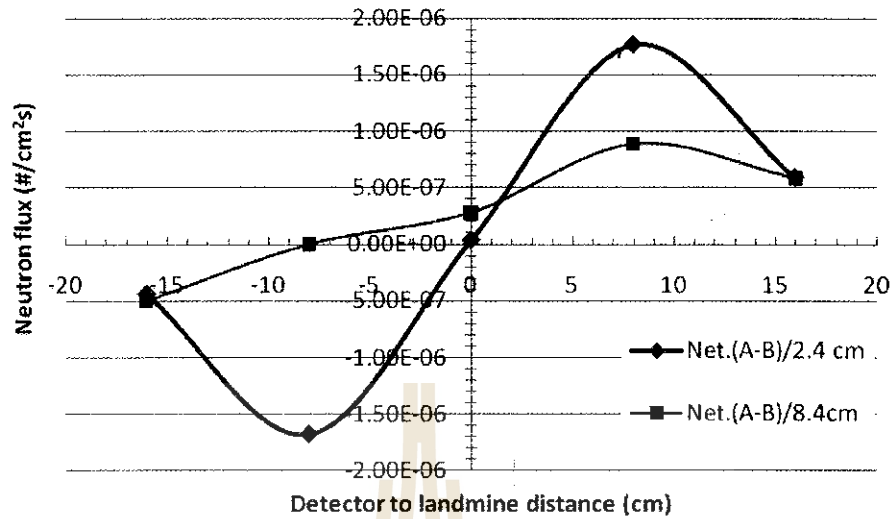
รูปที่ 3.9 การเปรียบเทียบฟลักซ์สุทธิในจุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4, 5.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย ²⁵²Cf/³He

3.1.4 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3/\text{Sand}/\text{TNT}$

กรณีศึกษานี้คล้ายกับกรณีศึกษาในหัวข้อ 3.1.3 แต่ใช้หัววัด BF_3 แทนหัววัด He-3 รูปที่ 3.10 แสดงฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ในฟังก์ชันของระยะห่างระหว่างจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดกับตำแหน่งของกับระเบิดเมื่อฝังระเบิดใต้ดินทรายลึก 2.4 cm จากรูปพบว่าค่าฟลักซ์รวมสูงสุดมีค่าเป็น $8.0 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$ เมื่อเปรียบเทียบค่าดังกล่าวกับค่าที่ได้จากหัววัด ^3He ซึ่งมีค่าเป็น $5.7 \times 10^{-8}/\text{cm}^2\text{-s}$ (จากรูปที่ 3.7) จะพบว่าหัววัด BF_3 มีประสิทธิภาพในการวัดสูงกว่าหัววัด ^3He ประมาณ 70 เท่าต่อ 1 หัววัด ในกรณีที่ฝังกับระเบิดลึก 8.4 cm จะได้ค่าฟลักซ์รวมสูงสุดลดลง รูปที่ 3.11 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์สุทธิของกรณีนี้กับค่าของกรณี 2.4 cm จากรูปจะพบว่าค่าฟลักซ์สุทธิมีลักษณะคล้ายกับกรณีอื่นๆ ที่กล่าวมาแล้วคือมีค่าเป็นศูนย์เมื่อจุดกึ่งกลางชุดหัววัดอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิดโดยมีแอมพลิจูดของฟลักซ์สุทธิลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ สามารถตรวจกับระเบิดในดินทรายได้ลึกไม่ต่ำกว่า 8.4 cm



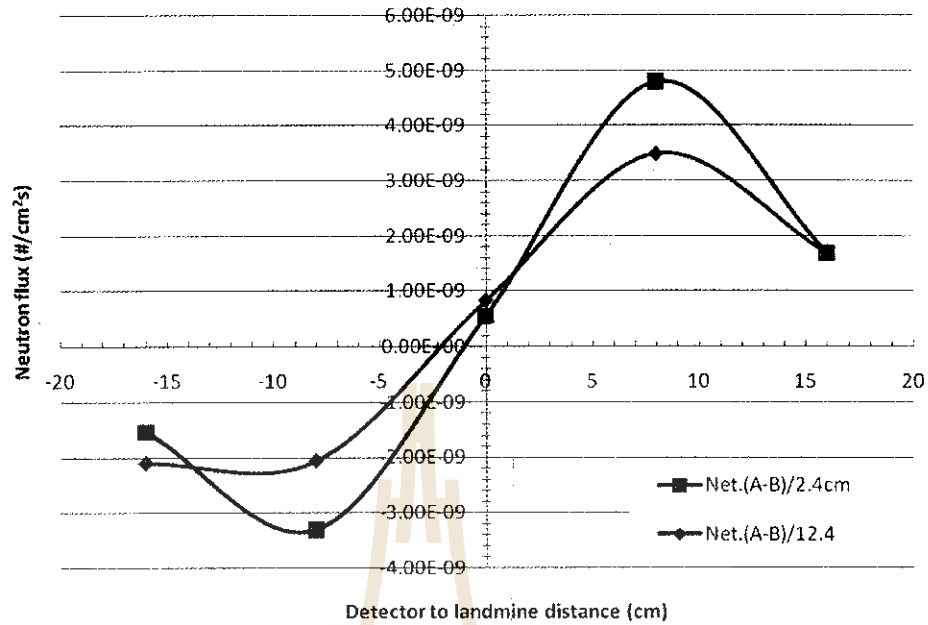
รูปที่ 3.10 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$



รูปที่ 3.11 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 และ 8.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$

3.1.5 กรณีศึกษา $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}/\text{Sand}/\text{TNT}$

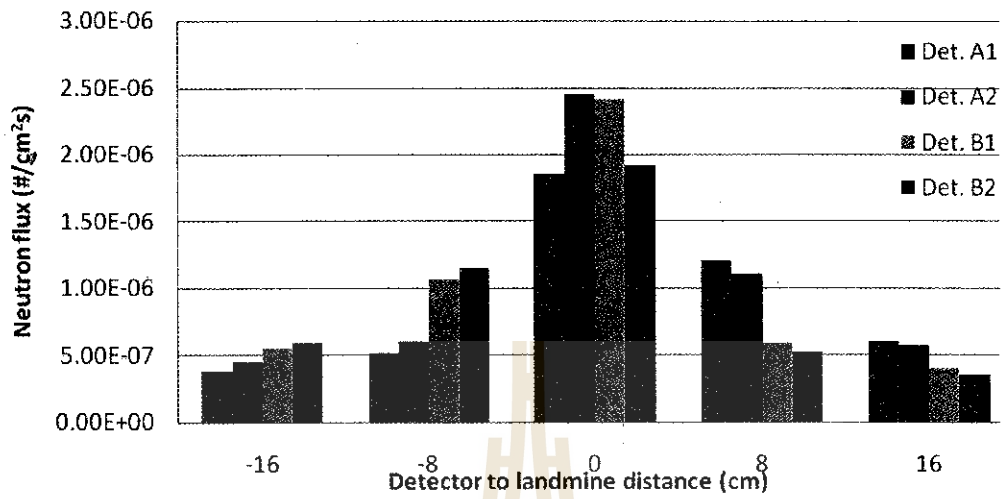
กรณีศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$ กับชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ ดังนั้นจึงใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$ (ชุดละ 2 หัววัด) ทำการตรวจกับระเบิด TNT ที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm รูปที่ 3.12 แสดงการกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในฟังก์ชันของระยะทางระหว่างจุดกึ่งกลางชุดหัววัดกับตำแหน่งของกับระเบิด รูปที่ 3.13 แสดงฟลักซ์รวมของนิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B ซึ่งมีค่าฟลักซ์รวมสูงสุดเป็น $2.0 \times 10^{-8}/\text{cm}^2\text{-s}$ ถ้าเปรียบเทียบกับค่านี้กับค่าที่เกิดจากการใช้ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ ซึ่งมีค่าฟลักซ์รวมสูงสุดเป็น $5.7 \times 10^{-8}/\text{cm}^2\text{-s}$ (จากรูปที่ 3.7) จะพบว่าแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf ก่อให้เกิดฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพสูงกว่า $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ ประมาณ 2.9 เท่า รูปที่ 3.14 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับกรณีที่ฝังกับระเบิดลึก 2.4 และ 12.4 cm ซึ่งพบว่าทั้งคู่มีการเปลี่ยนค่าของฟลักซ์สุทธิในลักษณะเดียวกับกรณีอื่นๆ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$ สามารถตรวจกับระเบิดในดินทรายได้ลึกไม่ต่ำกว่า 12.4 cm



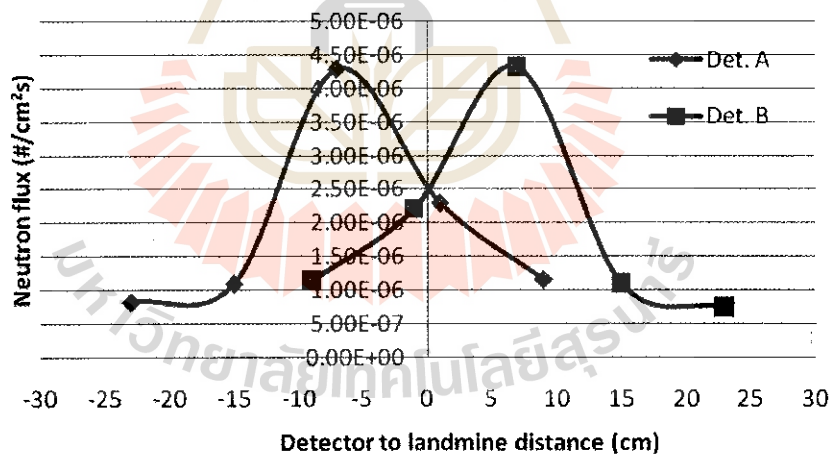
รูปที่ 3.14 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$

3.1.6 กรณีศึกษา $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3/\text{Sand}/\text{TNT}$

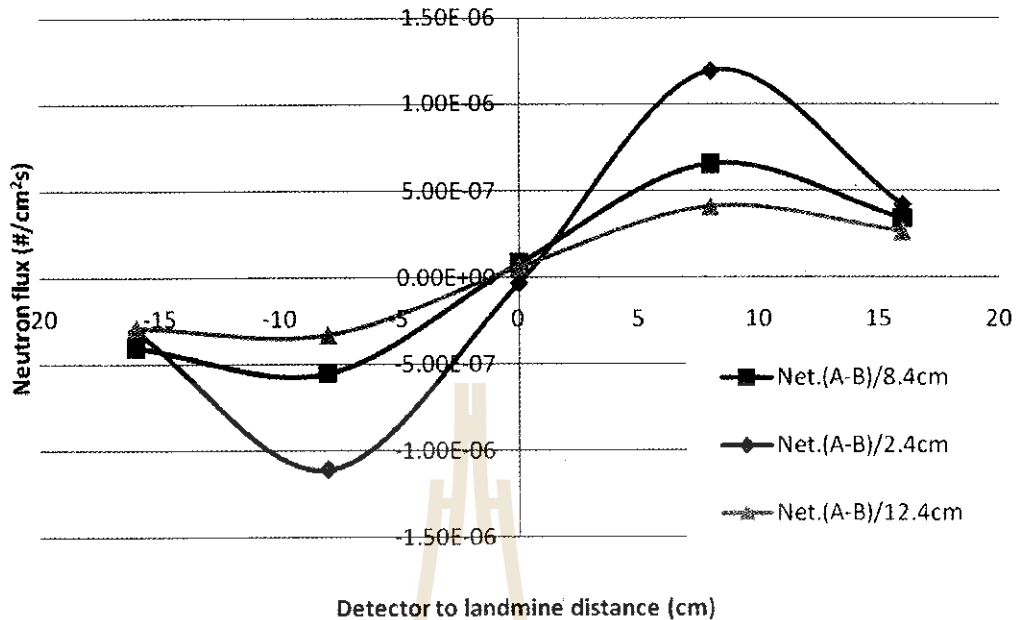
กรณีศึกษานี้มีองค์ประกอบของระบบตรวจกับระเบิดคล้ายกับหัวข้อ 3.1.5 เพียงแต่เปลี่ยนหัววัดนิวตรอนเป็น BF_3 รูปที่ 3.15 แสดงการกระจายฟลักซ์นิวตรอนในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด A และ B รูปที่ 3.16 แสดงฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ซึ่งพบว่าฟลักซ์รวมในชุดหัววัดทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิด ค่าสูงสุดของฟลักซ์รวมคือ $4.4 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับค่าของกรณีที่ใช้หัววัด He-3 ที่มีค่าฟลักซ์รวมสูงสุดเป็น $2.0 \times 10^{-8}/\text{cm}^2\text{-s}$ จะพบว่าหัววัด BF_3 มีประสิทธิภาพสูงกว่าหัววัด He-3 ประมาณ 110 เท่าต่อ 1 หัววัด เนื่องจากฟลักซ์รวมที่เกิดจากชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ (ตามหัวข้อ 3.1.4) มีค่าเป็น $8.0 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$ แสดงว่าแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf ก่อให้เกิดฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพสูงกว่า $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ ประมาณ 1.8 เท่า รูปที่ 3.17 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์สุทธิของกรณีศึกษานี้เมื่อฝังกับระเบิดลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ตามลำดับ ซึ่งพบว่าฟลักซ์สุทธิของทุกกรณีมีค่าเป็นศูนย์เมื่อชุดหัววัดอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิดและมีแอมพลิจูดลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ สามารถตรวจกับระเบิดในดินทรายได้ลึกไม่ต่ำกว่า 12.4 cm



รูปที่ 3.15 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$



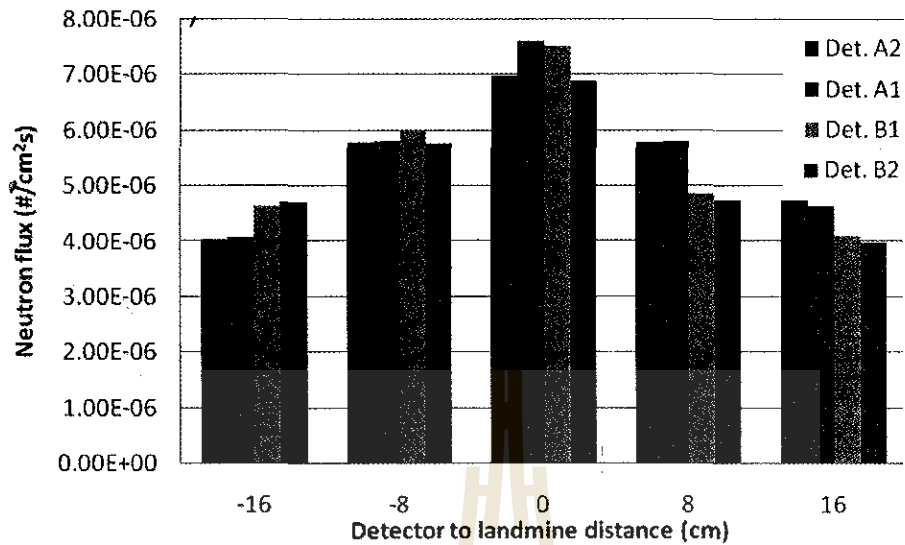
รูปที่ 3.16 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$



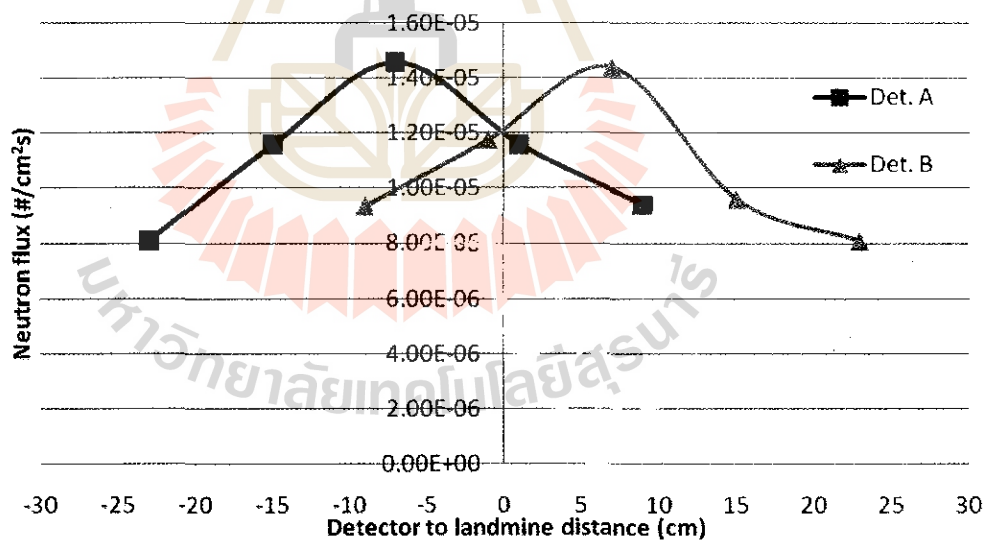
รูปที่ 3.17 ฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินทรายลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

3.1.7 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3/\text{Lime stone}/\text{TNT}$

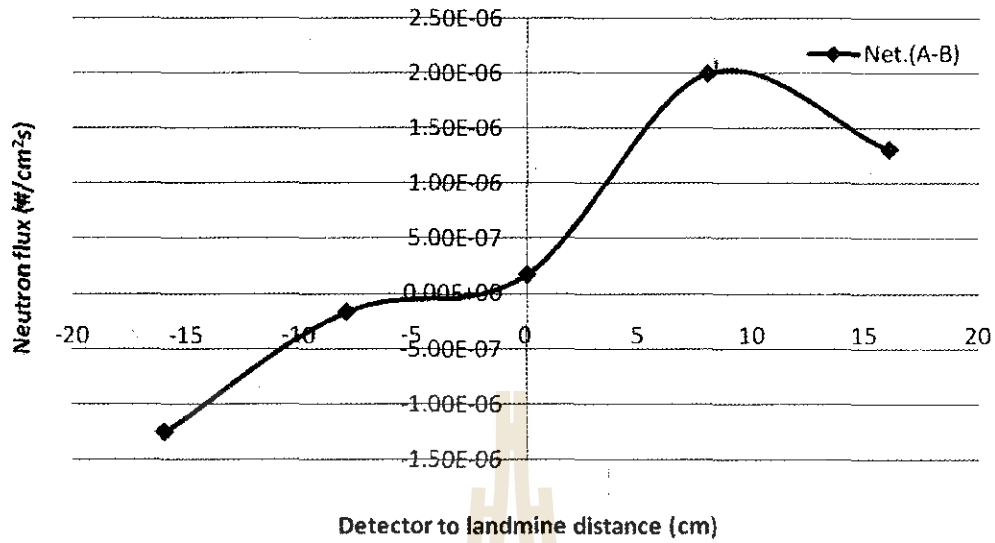
กรณีศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของชั้นดินปูน (CaCO_3) ที่มีต่อการตรวจกับระเบิดโดยใช้ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ ดินปูนมีส่วนอะตอมของ Ca, C และ O เป็น 1, 1 และ 3 ตามลำดับ รูปที่ 3.18 แสดงการกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในหัววัดของชุดหัววัด A และ B สำหรับกรณีที่ฝังกับระเบิดลึก 2.4 cm รูปที่ 3.19 แสดงฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ซึ่งพบว่าเมื่อแหล่งกำเนิดนิวตรอนอยู่เหนือหัววัดได้ฟลักซ์รวมสูงสุดมีค่าเป็น $1.45 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ ค่าดังกล่าวสูงกว่าค่าของกรณีที่ใช้ดินทรายเป็นชั้นดิน ($8.0 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$) ประมาณ 2 เท่า รูปที่ 3.20 แสดงฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B ซึ่งพบว่าเมื่อจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดอยู่ห่างจากตำแหน่งของกับระเบิด -8 cm ค่าฟลักซ์สุทธิมีค่าไม่เป็นศูนย์ อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณานิวตรอนที่กระเจิงกลับในช่วงพลังงาน 0-10 keV แทนช่วงพลังงาน 0-1 eV พบว่าค่าฟลักซ์สุทธิมีลักษณะสอดคล้องกับกรณีอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 ดังนั้นแสดงว่าการเลือกช่วงพลังงานที่เหมาะสมจะทำให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ สามารถตรวจกับระเบิดในดินปูนได้ลึกไม่ต่ำกว่า 2.4 cm



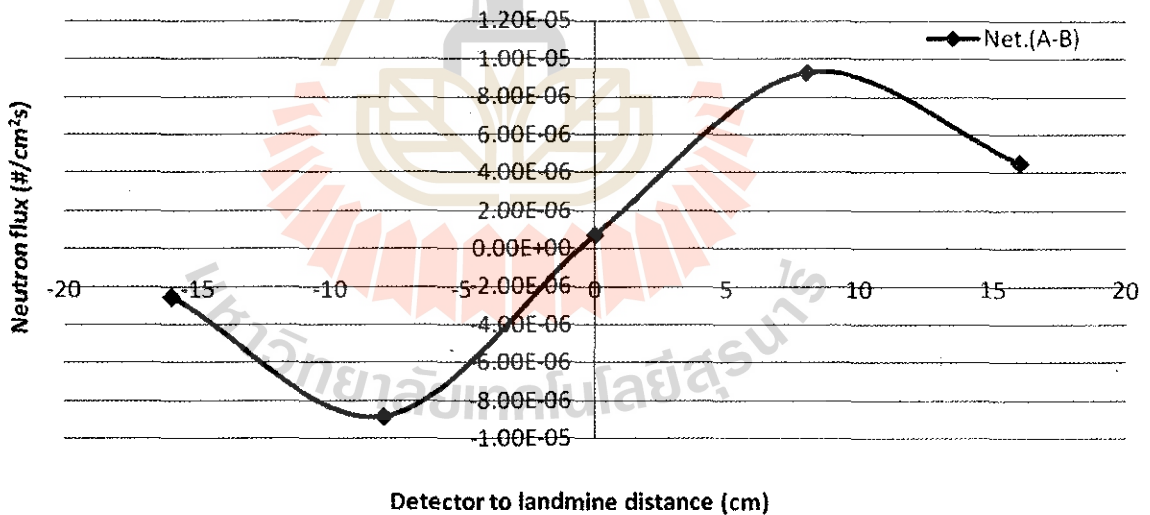
รูปที่ 3.18 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$



รูปที่ 3.19 ฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$



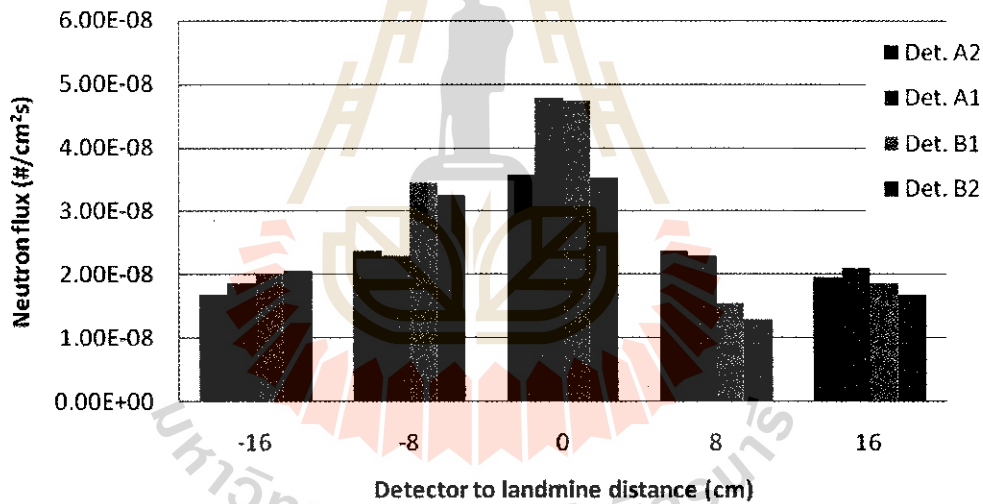
รูปที่ 3.20 พลิกซ์สุทธิของนิวตรอนพลังงาน 0-1 eV ในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิด
ในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย ²⁵²Cf/ BF₃



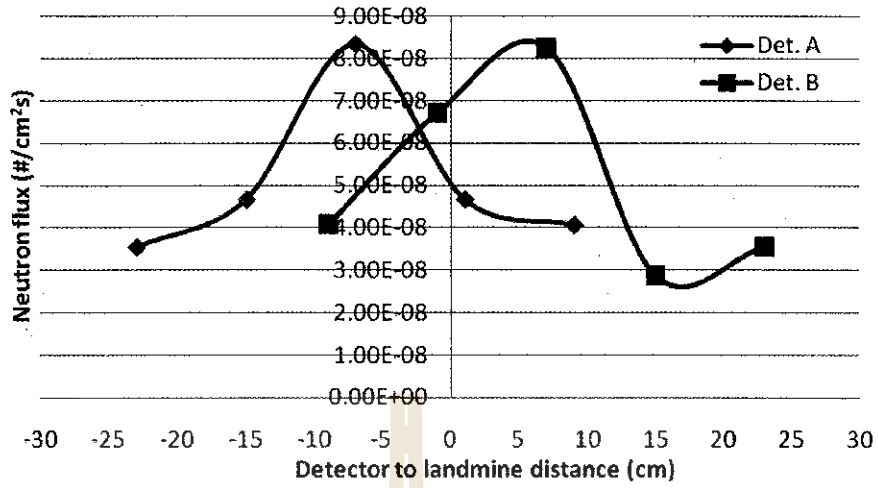
รูปที่ 3.21 พลิกซ์สุทธิของนิวตรอนพลังงาน 0-10 keV ในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิด
ในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย ²⁵²Cf/ BF₃

3.1.8 กรณีศึกษา ^{241}Am - ^9Be / ^3He / Lime stone/ TNT

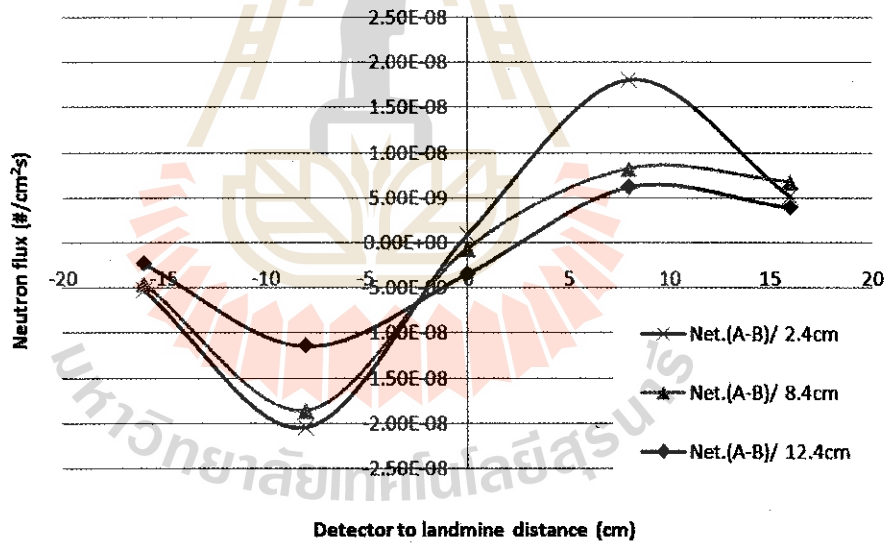
กรณีศึกษาที่ใช้ ^{241}Am - ^9Be เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน He-3 เป็นหัววัดนิวตรอน ดินปูนเป็นชั้นดินและ TNT เป็นกับระเบิด รูปที่ 3.22 แสดงการกระจายฟลักซ์ของนิวตรอนในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด A และ B สำหรับกรณีที่พักกับระเบิดลึก 2.4 cm รูปที่ 3.23 แสดงฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ซึ่งมีค่าสูงสุดเป็น $8.4 \times 10^{-8} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ค่าดังกล่าวสูงกว่าค่าของกรณีที่เกิดในดินทรายตามหัวข้อ 3.1.5 ($2.0 \times 10^{-8} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$) ประมาณ 4.2 เท่า สำหรับกรณีที่พักกับระเบิดลึก 8.4 และ 12.4 cm ได้ค่าฟลักซ์รวมสูงสุดเป็น $3.4 \times 10^{-7} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ และ $3.0 \times 10^{-8} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ (ไม่ได้แสดงกราฟ) รูปที่ 3.24 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินปูนลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ซึ่งพบว่ามีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีอื่นๆ ที่ผ่านมา ผลลัพธ์จากการจำลองในหัวข้อนี้แสดงให้เห็นว่าการตรวจกับระเบิดที่ฝังในชั้นดินปูนจะได้ ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับสูงกว่า



รูปที่ 3.22 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในหัววัดของชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย ^{241}Am - ^9Be / ^3He



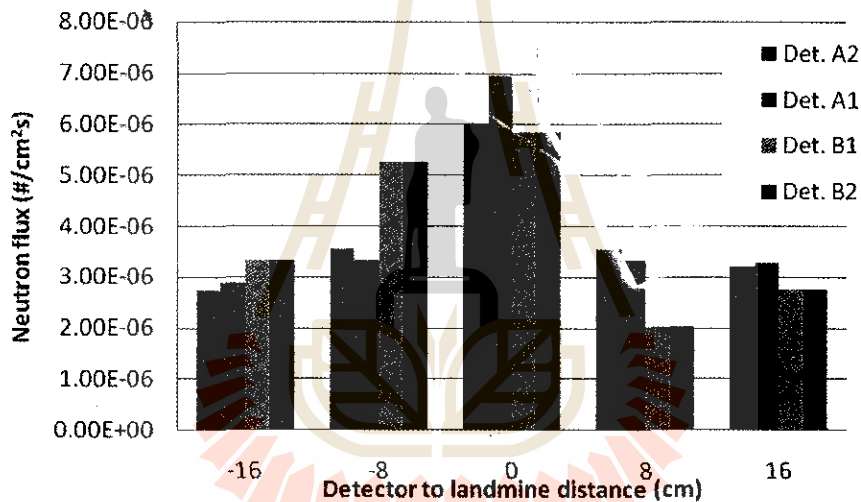
รูปที่ 3.23 ฟลักซ์รวมในจุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$



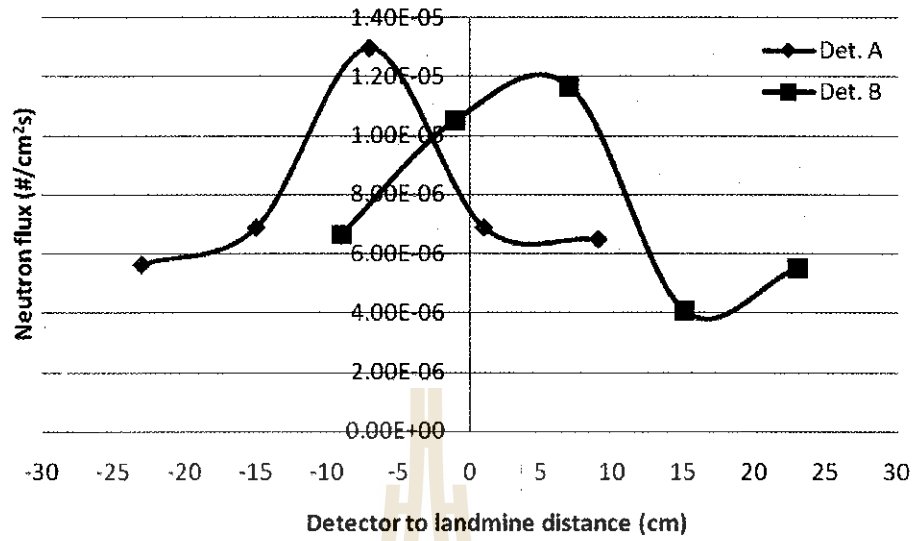
รูปที่ 3.24 ฟลักซ์สุทธิในจุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$

3.1.9 กรณีศึกษา ^{241}Am - ^9Be / BF_3 / Lime stone/ TNT

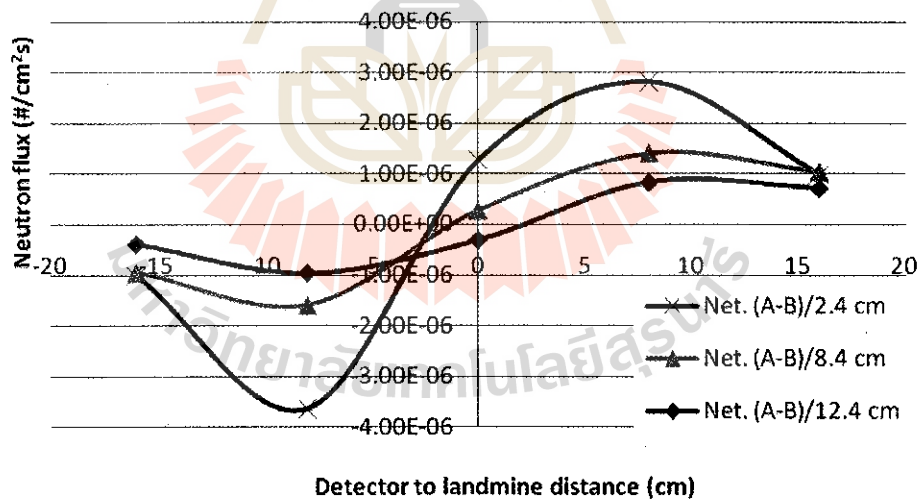
กรณีศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เช่นเดียวกับหัวข้อ 3.1.8 แต่เปลี่ยนหัววัดนิวตรอนเป็น BF_3 รูปที่ 3.25 แสดงการกระจายฟลักซ์ของนิวตรอนอุณหภาพในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด A และ B ที่เกิดจากการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินปูนลึก 2.4 cm รูปที่ 3.26 แสดงฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ซึ่งพบว่ามีค่าสูงสุดเป็น $1.3 \times 10^{-5} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ค่าฟลักซ์ดังกล่าวมีค่าสูงกว่ากรณีที่เกิดในดินทรายประมาณ 2.9 เท่า ในกรณีที่ฝังกับระเบิดในชั้นดินปูนลึก 8.4 และ 12.4 cm ได้ค่าฟลักซ์รวมสูงสุดเป็น $1.0 \times 10^{-5} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ และ $8.0 \times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ (ไม่ได้แสดงกราฟ) รูปที่ 3.27 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B จากการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินปูนลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับกรณีอื่นๆ



รูปที่ 3.25 การกระจายฟลักซ์ของนิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย ^{241}Am - ^9Be / BF_3



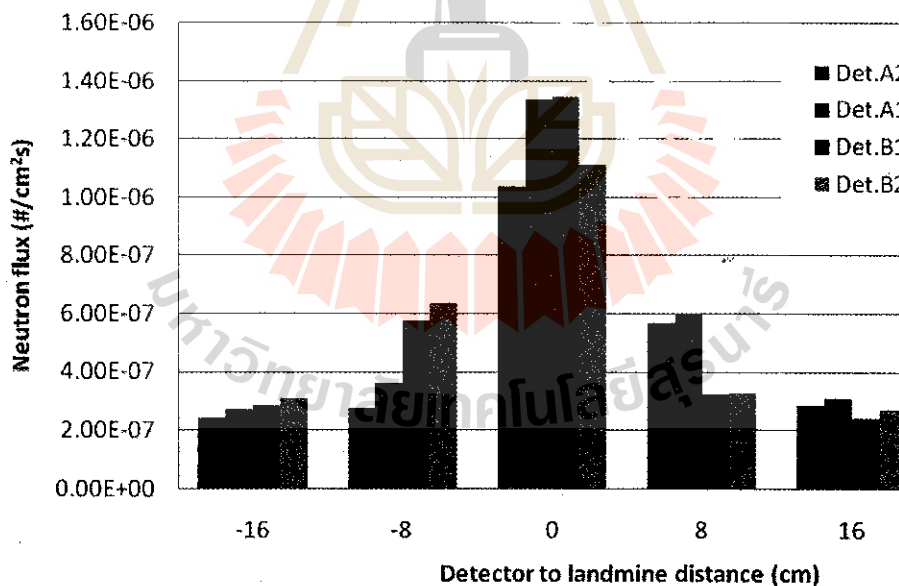
รูปที่ 3.26 พล็อตสรวมในจุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4 cm ด้วย ²⁴¹Am-⁹Be/ BF₃



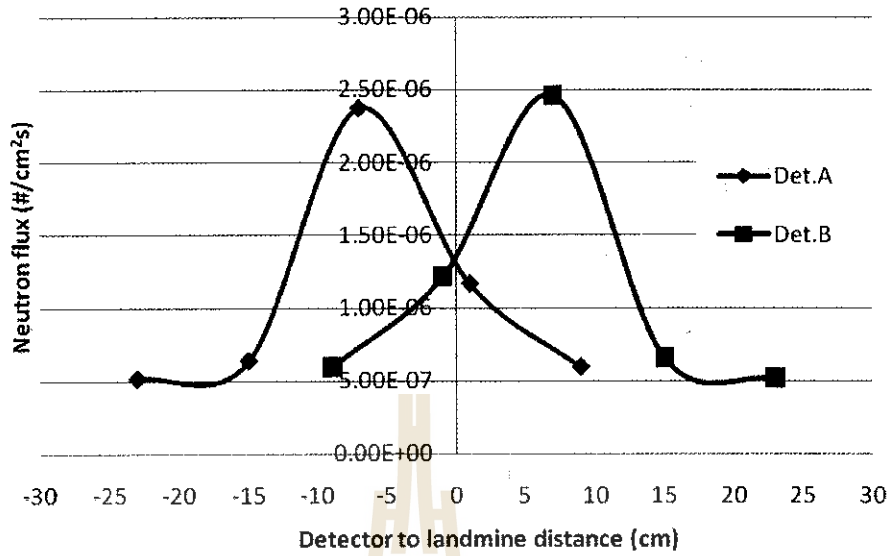
รูปที่ 3.27 พล็อตสุทธิในจุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินปูนลึก 2.4, 8.4 และ 12.4 cm ด้วย ²⁴¹Am-⁹Be/ BF₃

3.1.10 กรณีศึกษา ^{241}Am - ^9Be / BF_3 / Clay/ TNT

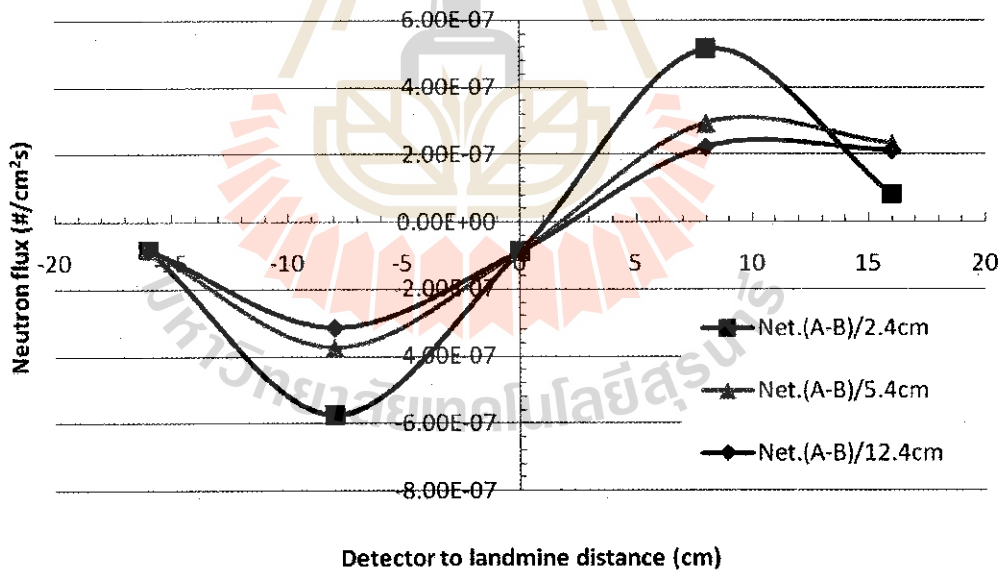
ในหัวข้อนี้ได้ทำการศึกษาดังอิทธิพลของชั้นดินเหนียว (clay) ต่อฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับ ดินเหนียวจะมีองค์ประกอบแตกต่างจากดินทรายและดินปูนโดยประกอบด้วย H, O, Si, Al ด้วยสัดส่วนของมวลเป็น 1.0, 56.0, 36.0, 7.0% ตามลำดับ เนื่องจากดินชนิดนี้มีส่วนผสมคล้ายกับดินในประเทศไทยมากที่สุดดังนั้นผลการจำลองน่าจะเป็นประโยชน์ต่อการตรวจกับระเบิดในชายแดนไทย-กัมพูชา ในหัวข้อนี้ใช้ ^{241}Am - ^9Be เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอนและฝังกับระเบิด TNT ลึก 2.4 cm รูปที่ 3.28 และ 3.29 แสดงการกระจายฟลักซ์ของนิวตรอนในหัววัดของชุดหัววัด A และ B และฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ตามลำดับ จากรูป 3.28 จะพบว่า การกระจายของฟลักซ์มีลักษณะคล้ายกับกรณีอื่นๆ จากรูปที่ 3.29 พบว่าค่าฟลักซ์รวมสูงสุดมีค่าเป็น $2.2 \times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ซึ่งต่ำกว่าค่าสำหรับกรณีดินทราย ($4.4 \times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$) และดินปูน ($1.3 \times 10^{-5} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$) ประมาณ 2 และ 6 เท่าตามลำดับ รูปที่ 3.30 แสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B จากการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินปูนลึก 2.4, 5.4 และ 12.4 cm ซึ่งมีค่าเป็นศูนย์เมื่อชุดหัววัดทั้งสองคร่อมอยู่กับตำแหน่งของกับระเบิดเหมือนกรณีอื่นๆ



รูปที่ 3.28 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย ^{241}Am - ^9Be / BF_3



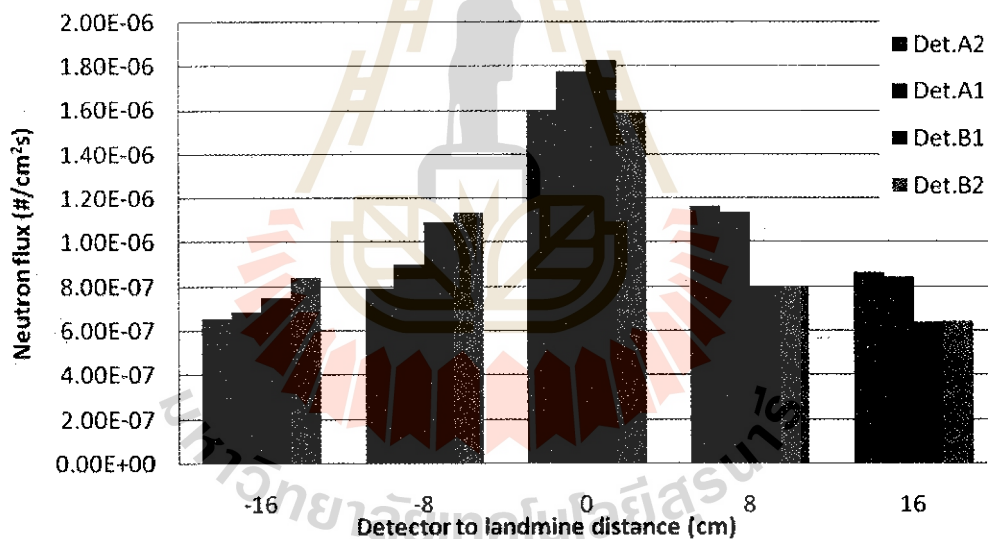
รูปที่ 3.29 พล็อตกราฟรวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$



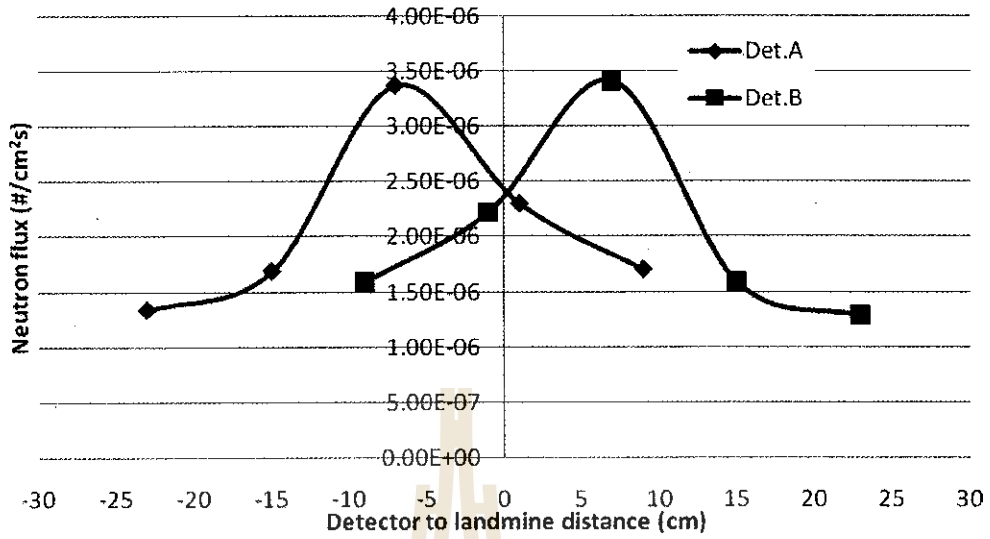
รูปที่ 3.30 พล็อตกราฟสุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4, 5.4 และ 12.4 cm ด้วย $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

3.1.11 กรณีศึกษา ^{252}Cf / BF_3 / Clay/ TNT

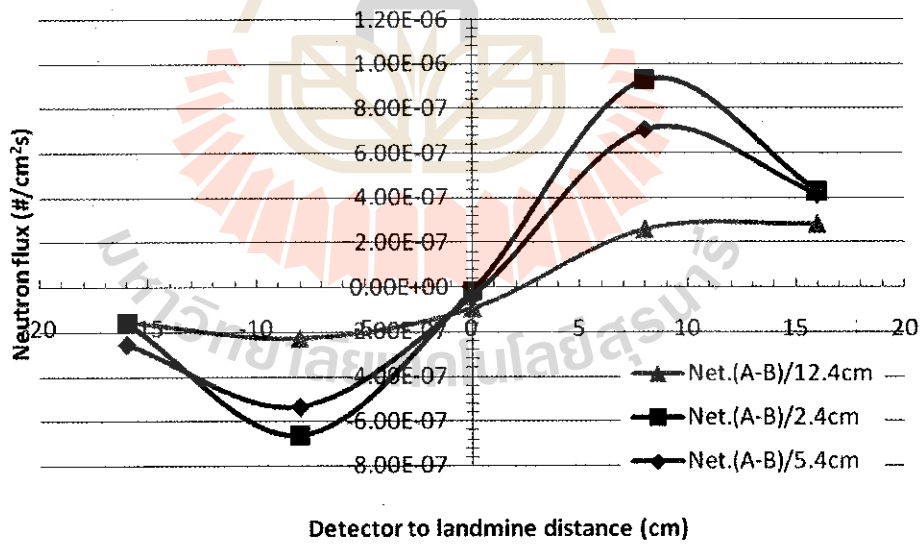
ในกรณีศึกษานี้ได้ทำการจำลองการตรวจกับระเบิดโดยใช้ ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอนและดินเหนียวเป็นชั้นดิน กับระเบิดฝังลึก 2.4 cm รูปที่ 3.31 และ 3.32 แสดงการกระจายฟลักซ์ของนิวตรอนอุณหภาพในแต่ละหัววัดของชุดหัววัด A และ B และฟลักซ์รวมในชุดหัววัด A และ B ตามลำดับ จากรูป 3.31 จะพบว่าการกระจายของฟลักซ์มีลักษณะคล้ายกรณีอื่นๆ ที่ผ่านมา จากรูปที่ 3.32 จะพบว่าฟลักซ์รวมสูงสุดมีค่าเป็น $2.7 \times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ซึ่งมีค่าต่ำกว่าค่าสำหรับกรณีที่ใช้ชุดหัววัดชนิดเดียวกันตรวจกับระเบิดใต้ดินทรายและดินปูนประมาณ 1.6 และ 4.8 เท่าตามลำดับ รูปที่ 3.33 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์สุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินปูนลึก 2.4, 5.4 และ 12.4 cm ซึ่งพบว่าค่าฟลักซ์สุทธิเป็นศูนย์เมื่อชุดหัววัดทั้งสองคร่อมอยู่กับตำแหน่งของกับระเบิดเหมือนกรณีอื่นๆ และมีแอมพลิจูดของฟลักซ์สุทธิลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น



รูปที่ 3.31 การกระจายฟลักซ์นิวตรอนอุณหภาพในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย ^{252}Cf / BF_3



รูปที่ 3.32 พลักรวมในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4 cm ด้วย ²⁵²Cf/ BF₃



รูปที่ 3.33 พลักรสุทธิในชุดหัววัด A และ B สำหรับการตรวจกับระเบิดในดินเหนียวลึก 2.4, 5.4 และ 12.4 cm ด้วย ²⁵²Cf/ BF₃

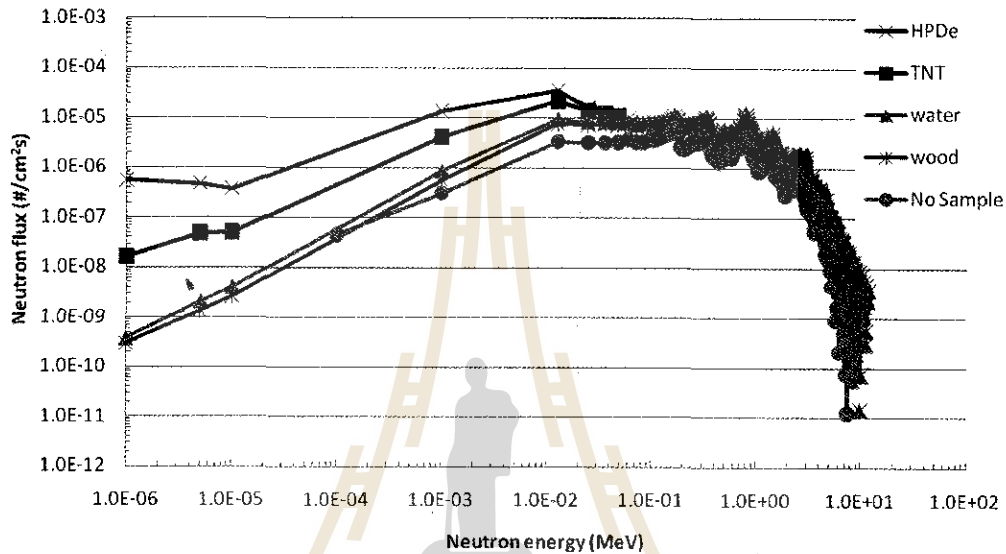
3.2 ผลการจำลองด้วยเทคนิค LNB

ผลการจำลองในหัวข้อ 3.1 อาศัยค่าฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงาน 0-1 eV ที่กระเจิงกลับเป็นดัชนีกำหนดความเป็นไปได้ของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNB ข้อเสียอย่างหนึ่งของการใช้ช่วงพลังงานดังกล่าวคือค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับมีค่าค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องใช้เวลานานในการตรวจกับระเบิด การแก้ปัญหานี้อาจกระทำได้โดยอาศัยฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานที่กว้างขึ้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงได้ทำการจำลองการตรวจกับระเบิดโดยอาศัยเทคนิค LNB ซึ่งอาศัยฟลักซ์นิวตรอนพลังงานที่สูงขึ้นเป็นดัชนีกำหนดความเป็นไปได้ของการตรวจกับระเบิด ในการนี้ได้ใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนและหัววัดนิวตรอนเช่นเดียวกับกรณีในหัวข้อ 3.1 ประกอบกันเป็นชุดหัววัดเพื่อทำการตรวจกับระเบิด ชุดหัววัดจะอยู่กับที่เหนือตำแหน่งของกับระเบิดโดยไม่มีการเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งของกับระเบิด เนื่องจากในบริเวณที่ทำการตรวจกับระเบิดบางครั้งอาจมีวัสดุชนิดอื่นๆ เช่น โพลีเอทิลีน (HDPE) รางไม้ (wood) คอนกรีต (concrete) และหินแกรนิต (granite) และน้ำ (water) ฝังในดิน และในบางครั้งอาจไม่มีวัสดุอื่นใด รวมทั้งกับระเบิดฝังในดิน กรณีเช่นนี้ถือว่าชั้นดิน (no sample) เป็นวัสดุที่ฝังในตำแหน่งของกับระเบิด ดังนั้นจึงได้ทำการจำลองวัดค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากวัสดุเหล่านี้เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่เกิดจากกับระเบิด ในการนี้ได้ฝังวัสดุดังกล่าว ณ ตำแหน่งของกับระเบิดได้ดินทราย ดินปูนและดินเหนียวที่มีความลึก 5 cm ความแตกต่างระหว่างค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและจากวัสดุดังกล่าวจะเป็นดัชนีในการกำหนดความเป็นไปได้ในการตรวจกับระเบิดของเทคนิค LNB ผลลัพธ์จากการจำลองสำหรับกรณีศึกษาต่างๆ ในหัวข้อต่อไปนี้จะแสดงค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับต่ออนุภาคนิวตรอน 1 อนุภาคที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิด

3.2.1 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}/\text{Sand}$

การจำลองในกรณีศึกษาที่ใช้ ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ^3He เป็นหัววัดนิวตรอนและดินทรายเป็นชั้นดิน รูปที่ 3.34 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด น้ำ โพลีเอทิลีน รางไม้ และชั้นดินทรายที่ฝังในดินทราย จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานสูงตั้งแต่ 0.02 MeV ขึ้นไปฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะซ้อนทับกันหรือไม่สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า ค่าดังกล่าว ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดจะแตกต่างจากค่าของวัสดุอื่นๆ โดยความแตกต่างจะเพิ่มขึ้นเมื่อพลังงานของนิวตรอนต่ำลง เมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีค่าความแตกต่างกันชัดเจน ขนาดของค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวจะระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น

ประมาณ $2.7 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ และ $2.4 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลิเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 27 และ $24/\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินทรายได้

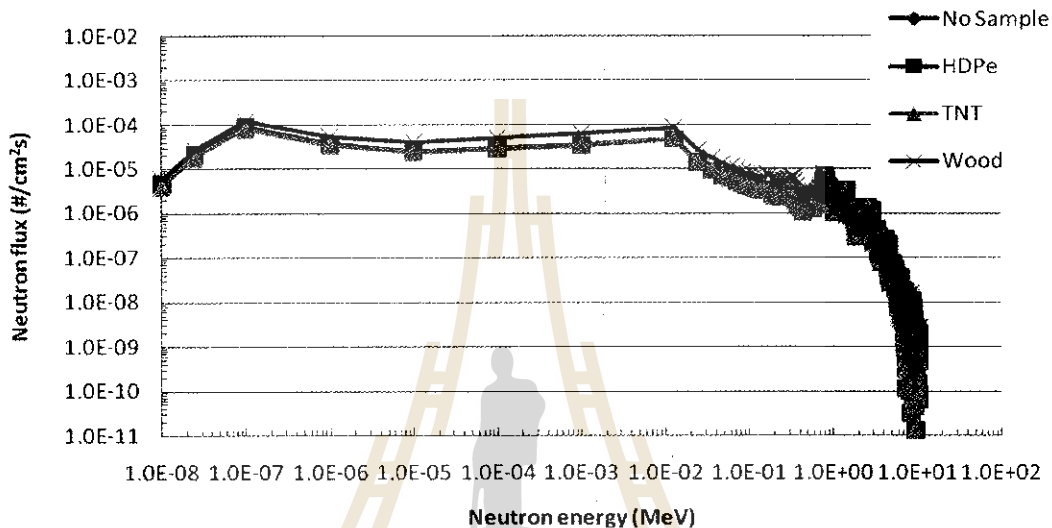


รูปที่ 3.34 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$

3.2.2 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3/\text{Sand}$

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.1 แต่ใช้ BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอน รูปที่ 3.35 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด ชั้นดินทราย โพลิเอทิลีน และรากไม้ ที่ฝังในดินทราย จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ 0.02 MeV ขึ้นไป ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุอื่นๆ ซ้อนทับกัน ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานตั้งแต่ 0.1 eV - 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงจากกับระเบิดและโพลิเอทิลีนจะซ้อนทับแต่แยกออกจากค่าของรากไม้และชั้นดิน อย่างไรก็ตามเมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีค่าความแตกต่างกันชัดเจน ขนาดของค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวระหว่างกับระเบิดกับโพลิเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น $6.3 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ และ $0.8 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่

มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 μ /s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับ โพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 62 และ 8 / cm^2 -s ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด Cf-252/ ^3He ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินทรายได้

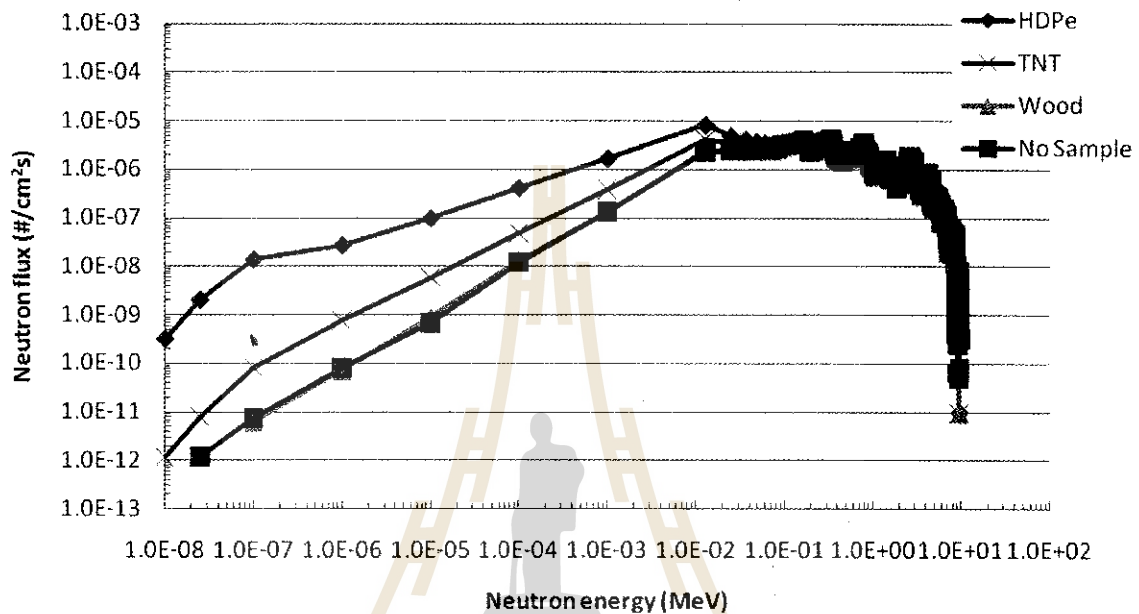


รูปที่ 3.35 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$

3.2.3 กรณีศึกษา $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/^3\text{He}/\text{Sand}$

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.1 ยกเว้นใช้ $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน รูปที่ 3.36 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด ชั้นดินทราย โพลีเอทิลีน และรากไม้ที่ฝังในดินทราย จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ 0.02 MeV ขึ้นไปฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดจะแตกต่างจากค่าของโพลีเอทิลีนและรากไม้อย่างชัดเจน เมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีความแตกต่างกัน ขนาดของค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวระหว่างกับระเบิดกับ โพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น 6.0×10^{-6} / cm^2 -s และ 2.0×10^{-6} / cm^2 -s ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^7 n/s ค่า

ความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับ โพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 60 และ 20 /cm²-s ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด ²⁴¹Am-⁹Be/ ³He สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินทรายได้

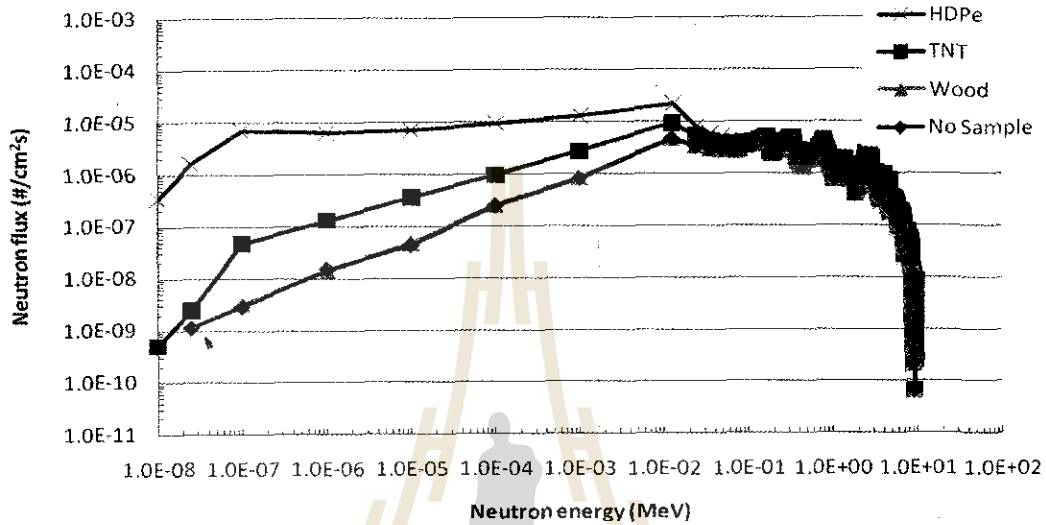


รูปที่ 3.36 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย ²⁴¹Am/⁹Be/³He

3.2.4 กรณีศึกษา ²⁴¹Am / ⁹Be / BF₃ / Sand

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.3 ยกเว้นใช้ BF₃ เป็นหัววัดนิวตรอน รูปที่ 3.37 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด ชั้นดินทราย รากไม้และโพลีเอทิลีน ที่ฝังในดินทราย จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ 0.02 MeV ขึ้นไป ฟลักซ์ของนิวตรอนที่เกิดจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.1 eV- 0.02 MeV ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดจะแตกต่างจากค่าของวัสดุอื่นๆ เมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีความแตกต่างกันชัดเจน ขนาดของค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวระหว่างกับระเบิดกับ โพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น $5.3 \times 10^{-5} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ และ $0.8 \times 10^{-5} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอน

ระหว่างกับระเบิดกับโพลิเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ, จะนับว่าเป็น 53 และ 8 /cm²-s ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด ²⁴¹Am/ ⁹Be/ BF₃ สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินทรายได้

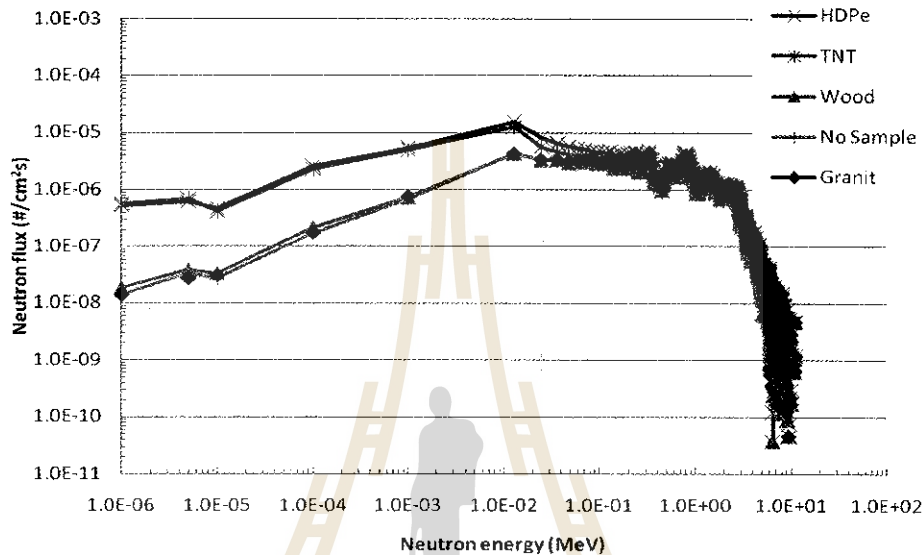


รูปที่ 3.37 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดย ²⁴¹Am/ ⁹Be/ BF₃

3.2.5 กรณีศึกษา ²⁵²Cf/ ³He/ Lime stone

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.1 แต่ใช้ดินปูนเป็นชั้นดิน รูปที่ 3.38 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด ชั้นดินปูน หินแกรนิต รากไม้ และโพลิเอทิลีนที่ฝังในดินปูนลึก 5 cm จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ 0.02 MeV ขึ้นไป ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและโพลิเอทิลีนจะซ้อนทับกันแต่แยกออกจากค่าของวัสดุอื่นๆ อย่างไรก็ตามเมื่อคิดผลรวมของ ฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีความแตกต่างกันชัดเจน ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับ โพลิเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่น ๆ มีค่าเป็นประมาณ $4.0 \times 10^6 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ และ $1.6 \times 10^5 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีครึ่งชีวิต 10^6 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับ โพลิเอทิลีนและกับระเบิด

กับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 4 และ $16 / \text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินปูนได้

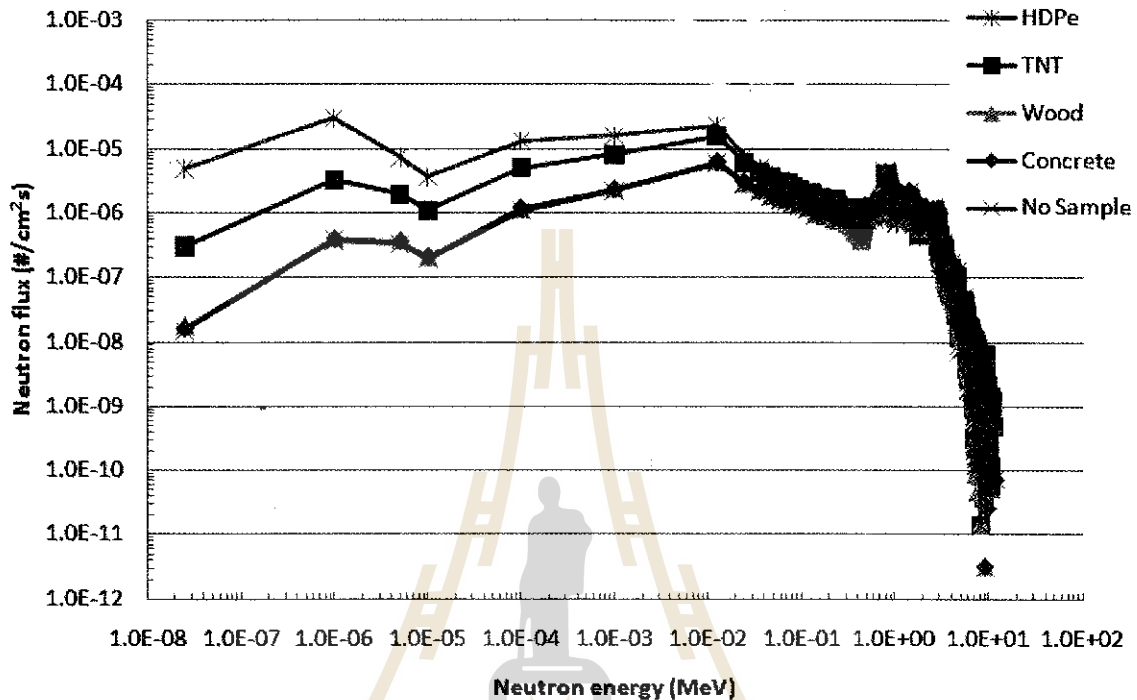


รูปที่ 3.38 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปูนลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$

3.2.6 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3/\text{Lime stone}$

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.5 แต่ใช้ BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอน รูปที่ 3.39 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด โพลีเอทิลีน คอนกรีต และรากไม้ที่ฝังในดินปูน จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ 0.02 MeV ขึ้นไปฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.02 MeV ค่าฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดจะแตกต่างจากค่าของวัสดุอื่นๆ เมื่อคิดผลรวมของ ฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบที่มีความแตกต่างกัน ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็นประมาณ $0.6 \times 10^6 / \text{cm}^2\text{-s}$ และ $1.4 \times 10^6 / \text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^7 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 6 และ $14 / \text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่า

โดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^7 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินปนได้

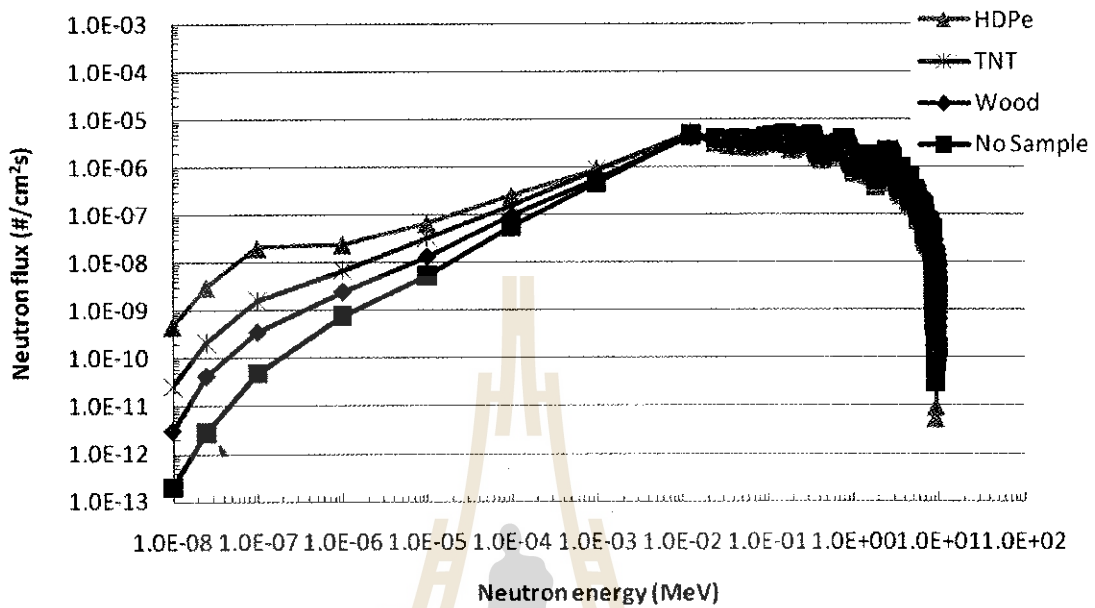


รูปที่ 3.39 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปนลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$

3.2.7 กรณีศึกษา $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/^3\text{He}$ /Lime stone

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.5 ยกเว้นใช้ $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}$ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน รูปที่ 3.40 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด รากไม้ ชั้นดินปน และโพสิเอทิลีนที่ฝังในดินปน จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ 0.01 MeV ขึ้นไป ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.01 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดจะแตกต่างจากค่าของวัสดุอื่น เมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่าจะมีความแตกต่างกัน ขนาดของค่าความแตกต่างของ ฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวระหว่างกับระเบิดกับโพสิเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น $0.6 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$ และ $1.4 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^7 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพสิเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 6 และ $14 /\text{cm}^2\text{-s}$

ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/^3\text{He}$ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^7 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินปูนได้

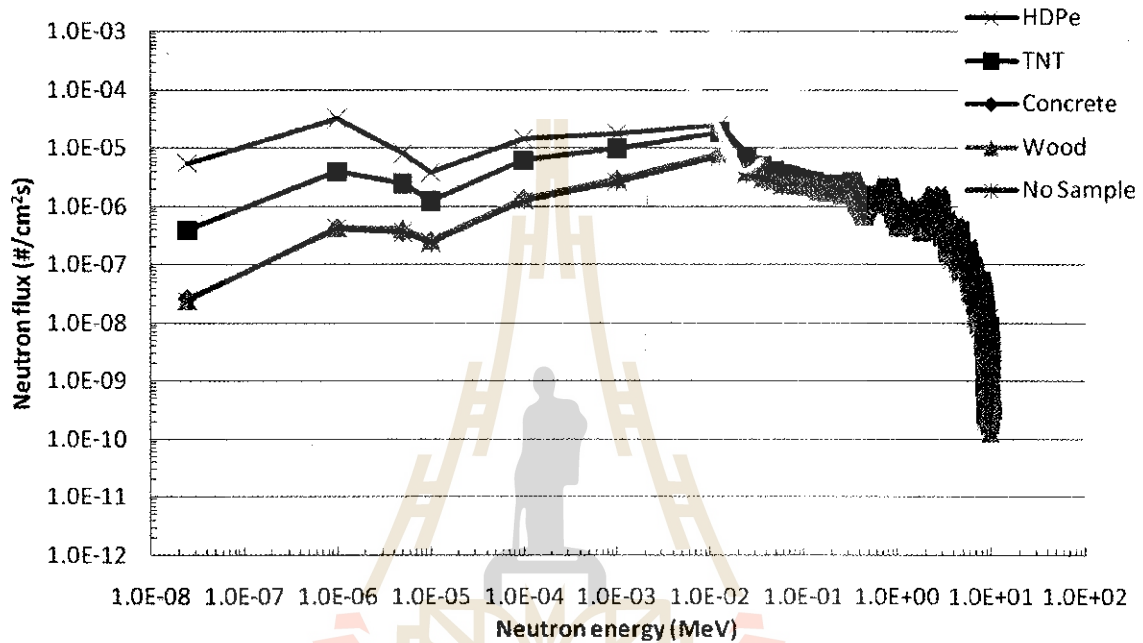


รูปที่ 3.40 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปูนลึก 10 cm โดย $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/^3\text{He}$

3.2.8 กรณีศึกษา $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3/\text{Lime stone}$

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.7 แต่ใช้ BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอน รูปที่ 3.41 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด โพลีเอทิลีน คอนกรีต และรากไม้ที่ฝังในดินปูน จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ประมาณ 0.01 MeV ขึ้นไปฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.01 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและโพลีเอทิลีนจะซ้อนทับกันแต่แยกออกจากค่าของวัสดุอื่นๆ อย่างไรก็ตามเมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีค่าความแตกต่างกันชัดเจน ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น $6.6 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ และ $2.9 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่า

เป็น 66 และ 29 /cm²-s ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด ²⁴¹Am/ ⁹Be/F₃ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10⁶ n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินปนได้

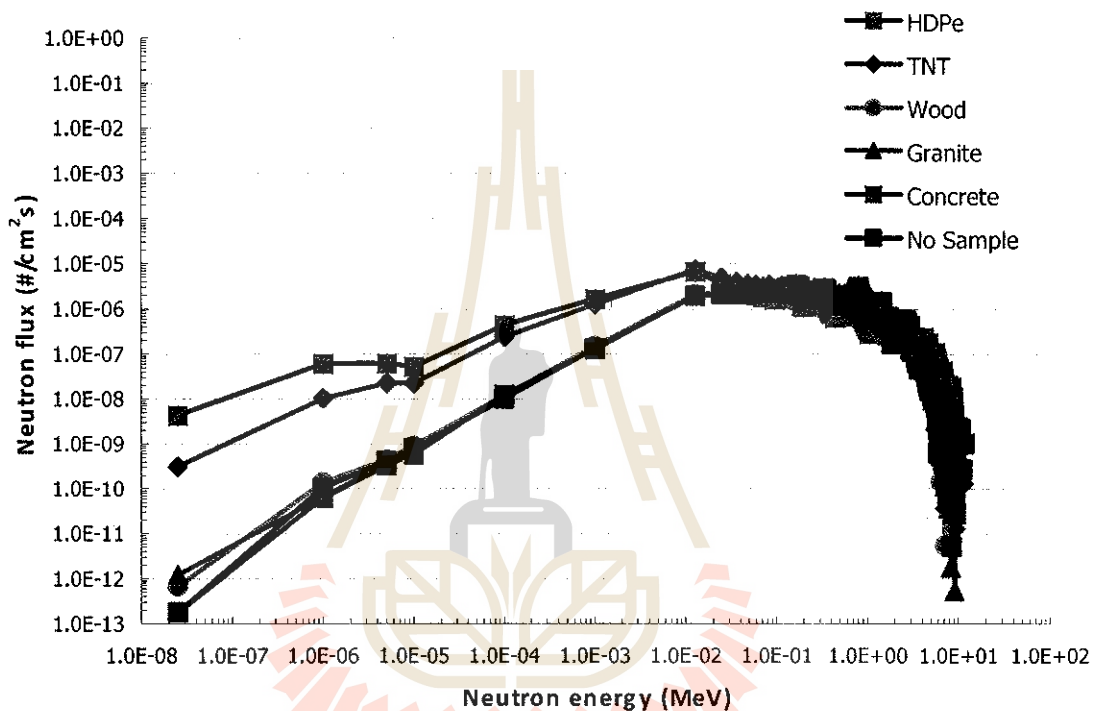


รูปที่ 3.41 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินปนลึก 5 cm โดย ²⁴¹Am/ ⁹Be/ BF₃

3.2.9 กรณีศึกษา ²⁵²Cf/ ³He/ Clay

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.1 แต่เปลี่ยนชั้นดินเป็นดินเหนียว (clay) รูปที่ 3.42 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด ชั้นดินเหนียว หินแกรนิต คอนกรีต โพลีเอทิลีนและรากไม้ที่ฝังในดินเหนียว จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ประมาณ 0.02 MeV ขึ้นไปค่าฟลักซ์ของนิวตรอนจะซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและโพลีเอทิลีนจะใกล้เคียงกันแต่แตกต่างจากค่าของวัสดุอื่นๆ ค่าฟลักซ์ของกับระเบิดจะแตกต่างจากค่าของโพลีเอทิลีนเมื่อพลังงานต่ำกว่าประมาณ 0.001 MeV เมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีความแตกต่างกันชัดเจน ขนาดของค่าความแตกต่าง

ของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่น ๆ มีค่าเป็น $0.13 \times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ และ $6.8 \times 10^{-6} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^8 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่น ๆ จะมีค่าเป็น 13 และ 68 $/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและวัสดุอื่น ๆ ที่ฝังในดินเหนียวได้

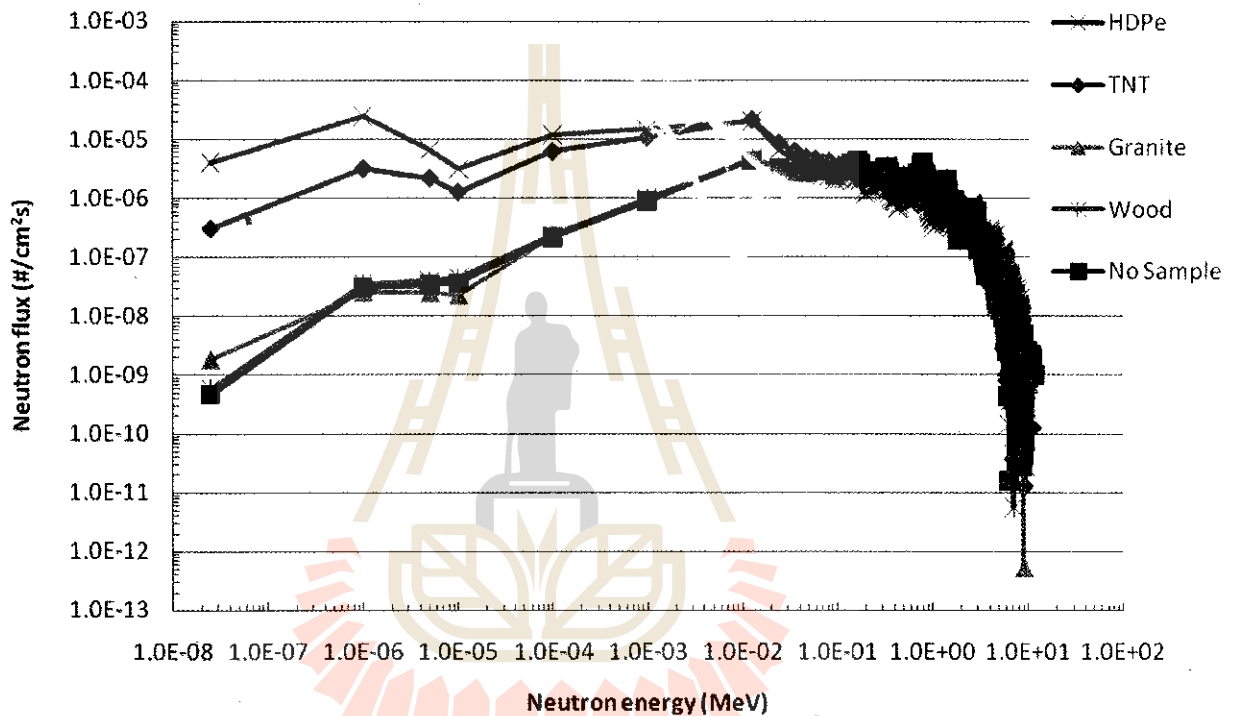


รูปที่ 3.42 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียวลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$

3.2.10 กรณีศึกษา $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3/\text{Clay}$

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.9 แต่ใช้ BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอน รูปที่ 3.43 แสดงสเปกตรัมของ ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด โพลีเอทิลีน ชั้นดินเหนียว หินแกรนิต และ รากไม้ที่ฝังในดินเหนียว จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนที่กระเจิงกลับมีพลังงานตั้งแต่ประมาณ 0.02 MeV ขึ้นไปฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะซ้อนทับกัน ไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด จะแตกต่างจากค่าของวัสดุอื่น ๆ เมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่

กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีค่าความแตกต่างกันชัดเจน ขนาดของค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น $3.1 \times 10^5 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ และ $0.7 \times 10^5 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 31 และ $7 / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$ ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินเหนียวได้

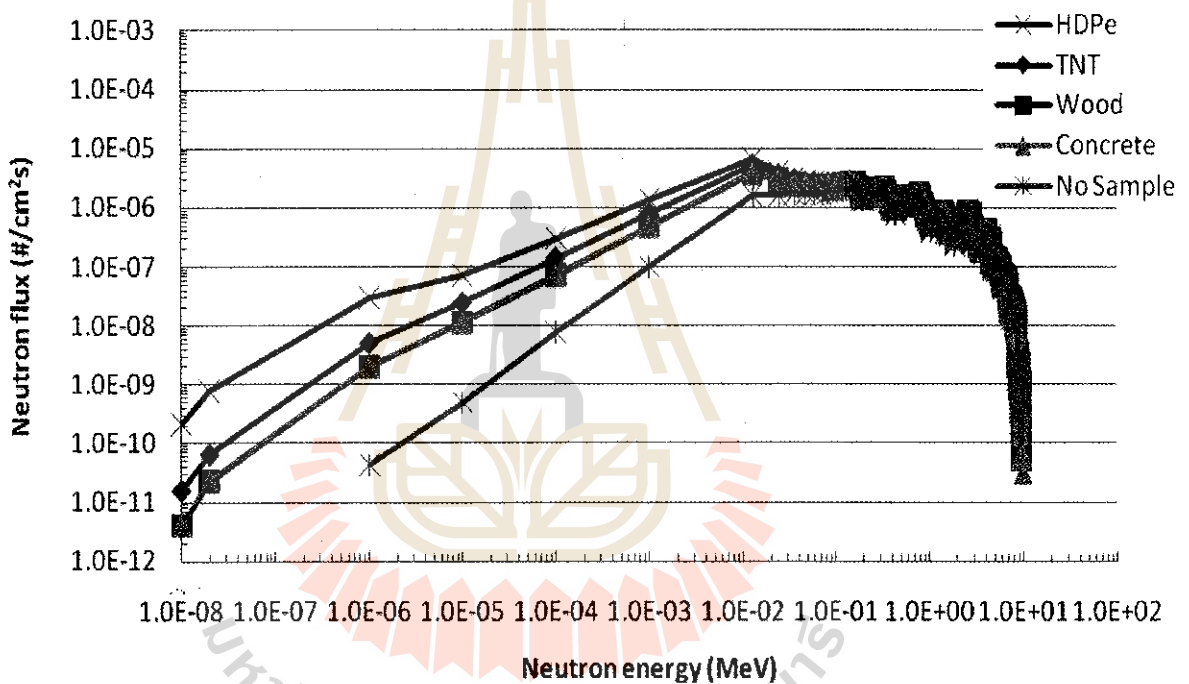


รูปที่ 3.43 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียวลึก 5 cm โดย $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$

3.2.11 กรณีศึกษา $^{241}\text{Am} / ^9\text{Be} / ^3\text{He} / \text{Clay}$

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.9 แต่ใช้ $^{241}\text{Am} / ^9\text{Be}$ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน รูปที่ 3.44 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด คอนกรีต ชั้นดินเหนียว รากไม้ และโพลีเอทิลีนที่ฝังในดินเหนียว จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนมีพลังงานตั้งแต่ประมาณ 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงจากกับระเบิดและวัสดุอื่นๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่าประมาณ 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดจะ

แตกต่างจากค่าของวัสดุอื่นๆ เมื่อคิดผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีค่าแตกต่างกันชัดเจน ขนาดของค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่น ๆ มีค่าเป็น $4.5 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$ และ $1.9 \times 10^{-6}/\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^7 n/s ค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่น ๆ จะมีค่าเป็น 45 และ 19 / $\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าโดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^7 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและวัสดุอื่น ๆ ที่ฝังในดินเหนียวได้

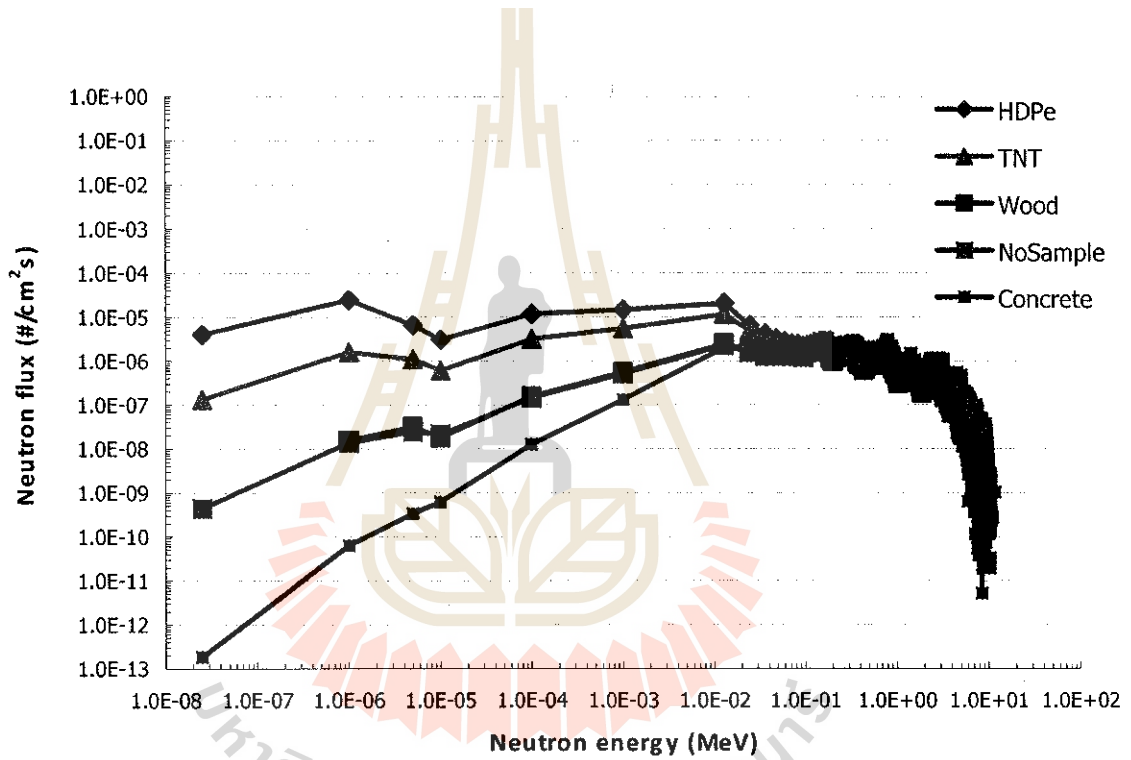


รูปที่ 3.44 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียวลึก 5 cm โดย $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/^3\text{He}$

3.2.12 กรณีศึกษา $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3/\text{Clay}$

การจำลองในกรณีศึกษานี้คล้ายกับหัวข้อ 3.2.11 แต่ใช้ BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอน รูปที่ 3.45 แสดงสเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด รากไม้ ชั้นดินเหนียว โพลีเอทิลีนและคอนกรีตที่ฝังในดินเหนียว จากรูปจะพบว่าเมื่อนิวตรอนมีพลังงานตั้งแต่ประมาณ 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ซ้อนทับกันไม่สามารถแยกออกจากกันได้ แต่เมื่อนิวตรอนมีพลังงานต่ำกว่า 0.02 MeV ฟลักซ์ของนิวตรอนที่กระเจิงจากกับระเบิดจะแตกต่างจากค่าของวัสดุอื่น ๆ เมื่อคิด

ผลรวมของฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงานตั้งแต่ 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ จะพบว่ามีค่าแตกต่างกันชัดเจน ขนาดของค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ มีค่าเป็น $6.1 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ และ $2.0 \times 10^{-5}/\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s ค่าความแตกต่างของ ฟลักซ์นิวตรอนระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ จะมีค่าเป็น 61 และ 20 / $\text{cm}^2\text{-s}$ ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่า โดยอาศัยเทคนิค LNB ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^6 n/s สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและวัสดุอื่นๆ ที่ฝังในดินเหนียวได้



รูปที่ 3.45 สเปกตรัมของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ที่ฝังในดินเหนียว ลึก 5 cm โดย $^{241}\text{Am}/^9\text{Be}/\text{BF}_3$

3.3 ผลการจำลองด้วยเทคนิค TNA

ในหัวข้อนี้ได้ทำการจำลองการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNA โดยใช้โปรแกรม MCNP5 การจำลองดังกล่าวอาศัยผลลัพธ์ (output) แบบอุดมคติ (F-4 tally) ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบเบื้องต้นว่าจะสามารถใช้เทคนิค TNA ในการตรวจกับระเบิดได้หรือไม่ ความเป็นไปได้ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ การตรวจพบรังสีแกมมาที่เกิดจากอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) ระหว่างนิวตรอนอุณหภูมิกับ H และ N ซึ่งเป็นนิวเคลียสสององค์ประกอบของกับระเบิดที่ฝังในดิน ในการจำลองครั้งนี้ได้ใช้ ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน NaI เป็นหัววัดรังสีแกมมาและ DLM2 ซึ่งประกอบด้วย TNT 249 g เป็นกับระเบิดโดยค่าผลลัพธ์จากการจำลองเป็นค่าต่อ 1 อนุภาคนิวตรอนจากแหล่งกำเนิด ตารางที่ 3.1 แสดงพลังงาน (E_γ) และค่าภาคตัดขวาง (σ_γ) ของรังสีแกมมาที่เกิดจากอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) และแบบ (n, n' γ) ระหว่างนิวตรอนอุณหภูมิกับนิวเคลียสสององค์ประกอบของดินทราย (Si และ O) และของกับระเบิด (H, C, N, O)

รูปที่ 3.46 แสดงสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการจำลองการตรวจกับระเบิดโดยไม่มีกับระเบิดฝังในดินหรือเป็นการตรวจชั้นดินทราย (sand) เพียงอย่างเดียว จากรูปจะพบว่ารังสีแกมมาพลังงานต่างๆ ที่เกิดจากองค์ประกอบของดินทราย (Si และ O) ที่ปรากฏในสเปกตรัมสอดคล้องกับตารางที่ 3.1 ยกเว้นไม่มีรังสีแกมมาพลังงาน 3.55, 7.21 และ 8.48 MeV จาก Si ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) ปรากฏอยู่ในสเปกตรัม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะรังสีแกมมาดังกล่าวมีค่าภาคตัดขวางค่อนข้างต่ำ

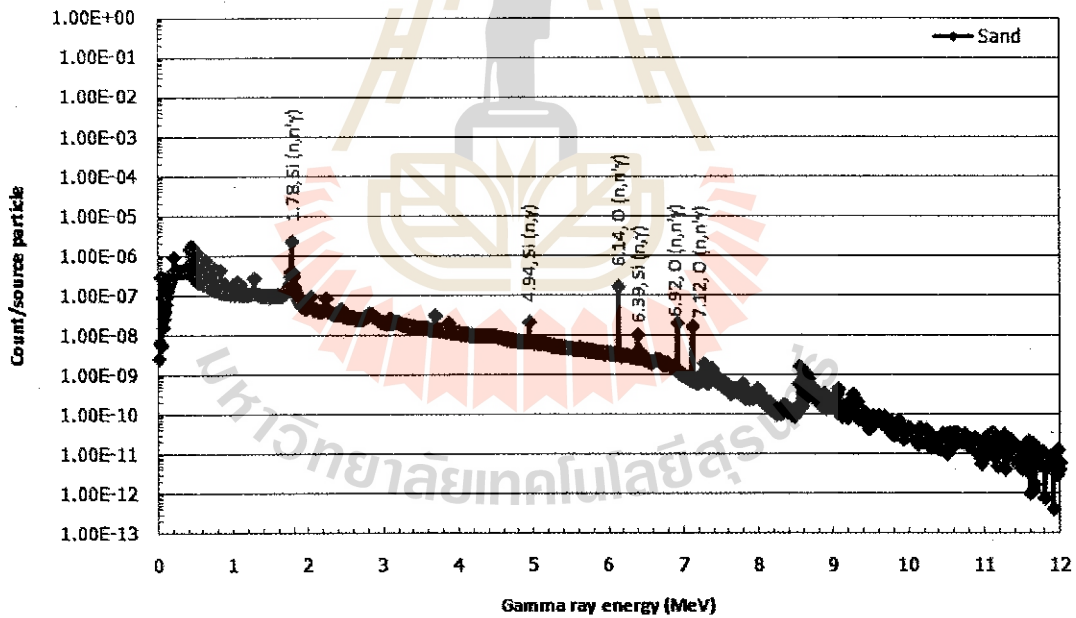
ตารางที่ 3.1 พลังงานและค่าภาคตัดขวางของรังสีแกมมาที่เกิดจากการอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) และแบบ (n, n' γ) ระหว่างนิวตรอนกับองค์ประกอบของดินทรายและกับระเบิด

Element	E_γ (MeV)	σ_γ (mb)
Si (n,n' γ)	1.78	524
H (n, γ)	2.22	332
Si (n, γ)	3.55	119
C (n,n' γ)	4.44	425
Si (n, γ)	4.94	112
O (n,n' γ)	6.14	180
Si (n, γ)	6.39	20.7
O (n,n' γ)	6.92	474

ตารางที่ 3.1 (ต่อ)

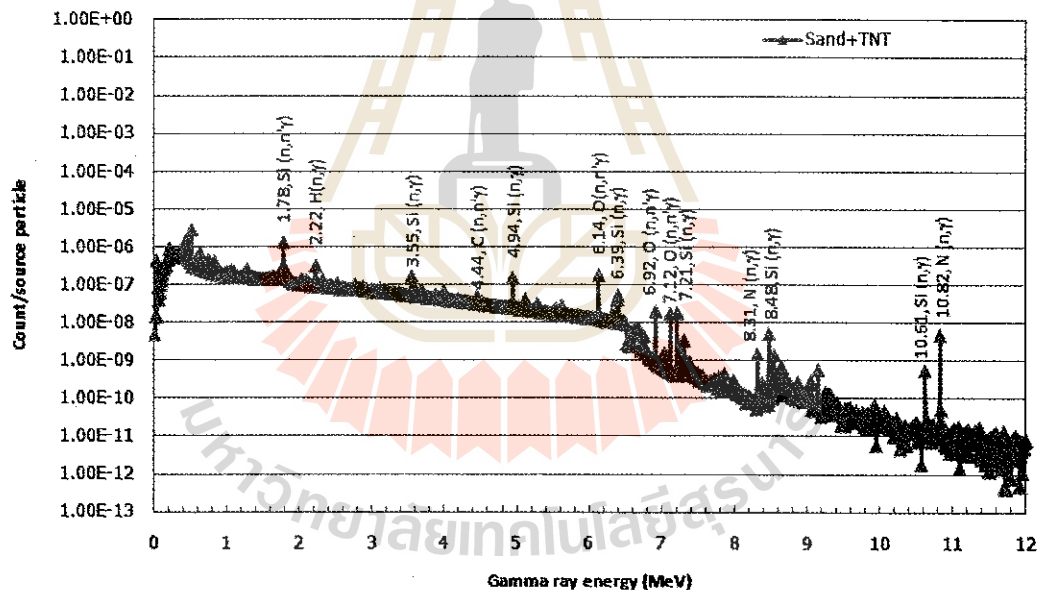
Element	E_γ (MeV)	σ_γ (mb)
O (n,n' γ)	7.12	474
Si (n, γ)	7.21	12.5
N (n, γ)	8.31	3.3
Si (n, γ)	8.48	3.8
Si (n, γ)	10.61	280
N (n, γ)	10.82	11.3

ที่มา : IAEA, n.d.; IAEA, 1986; Spits, 1970



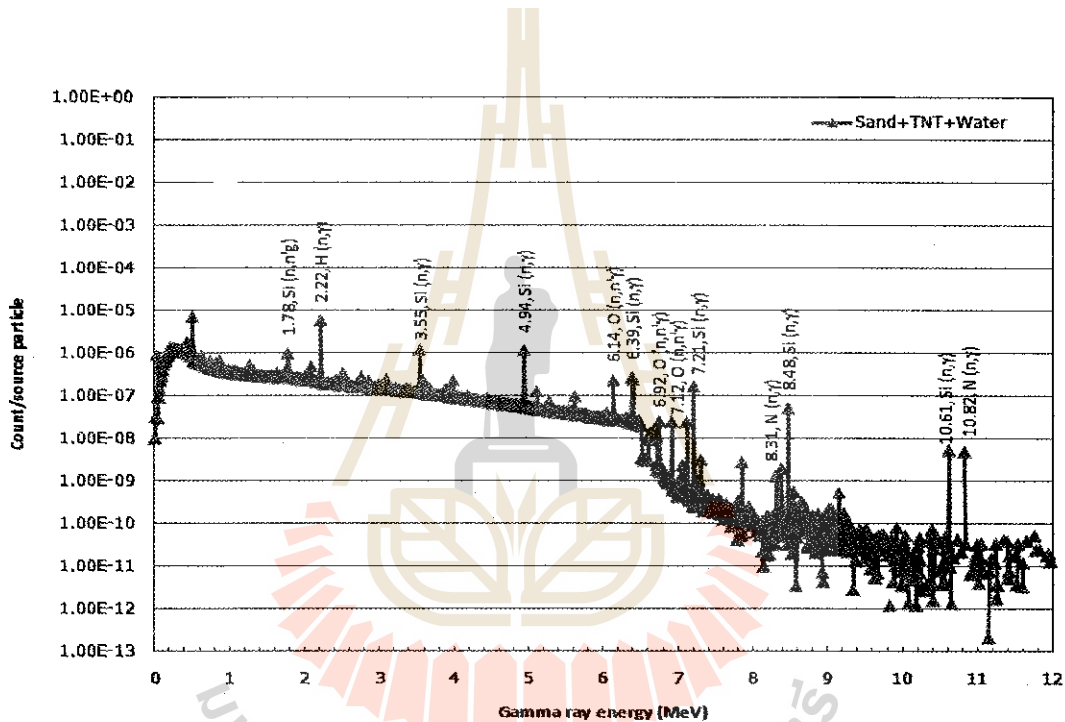
รูปที่ 3.46 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการจำลองการตรวจกับระเบิด โดยไม่มีกับระเบิดฝังในดินทรายหรือเกิดจากการตรวจชั้นดินทรายเท่านั้น

ถ้าทำการจำลองการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm จะได้สเปกตรัมของรังสีแกมมาดังแสดงในรูปที่ 3.47 จากรูปจะพบว่ารังสีแกมมาพลังงานต่างๆ ปรากฏในสเปกตรัมมากกว่ารูปที่ 3.46 โดยรังสีแกมมาที่เกิดเพิ่มขึ้นเป็นรังสีแกมมาที่เกิดจากนิวเคลียสองค์ประกอบของกับระเบิด (H, C, N, O) เช่นรังสีแกมมาพลังงาน 2.22, 4.44, 6.14 และ 10.82 MeV จาก H, C, O และ N ตามลำดับ นอกจากนี้จะพบว่ารังสีแกมมาพลังงาน 3.55, 7.21, 8.48 และ 10.61 MeV จาก Si และ 8.32 MeV จาก N ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) ปรากฏในสเปกตรัมดังกล่าวโดยรังสีแกมมาเหล่านี้ไม่ปรากฏในสเปกตรัมของรูปที่ 3.46 ปรากฏการณ์เช่นนี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อฝังกับระเบิดซึ่งมี H เป็นองค์ประกอบเป็นจำนวนมากใต้ดินทราย จะทำให้เกิดนิวตรอนอุณหภูมิต่ำเพิ่มขึ้นทั้งนี้เพราะ H สามารถลดพลังงานของนิวตรอนได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาแบบ (n, γ) ทำให้รังสีแกมมาพลังงานดังกล่าวมีจำนวนเพิ่มขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนรังสีแกมมาพลังงาน 10.61 MeV มีค่าต่ำกว่ารังสีแกมมาพลังงาน 10.82 MeV ประมาณ 10 เท่า



รูปที่ 3.47 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการจำลองการตรวจกับระเบิด DLM2 ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm

ถ้าทำการจำลองการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดยมีน้ำในดิน 5% โดยมวล จะได้สเปกตรัมรังสีแกมมาดังแสดงในรูปที่ 3.48 ชนิดของรังสีแกมมาที่ปรากฏในรูปนี้จะเหมือนกับรังสีแกมมาที่ปรากฏในรูปที่ 3.47 อย่างไรก็ตามจำนวนของรังสีแกมมาที่เกิดจากอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) ในรูปที่ 3.48 จะมีค่ามากกว่าในรูปที่ 3.47 ทั้งนี้เพราะเกิดนิวตรอนอุณหภาพเพิ่มขึ้น จำนวนนิวตรอนอุณหภาพที่เพิ่มขึ้นดังกล่าวเกิดจากการเติมน้ำลงไปในดินทำให้มี H มากขึ้นและมีโอกาสเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์แบบ (n, γ) มากขึ้น เป็นที่น่าสังเกตว่าจำนวนรังสีแกมมาพลังงาน 10.6 MeV มีค่าใกล้เคียงกับรังสีแกมมาพลังงาน 10.82 MeV



รูปที่ 3.48 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากการจำลองการตรวจกับระเบิด DLM2 ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดยมีน้ำในดิน 5%

ผลลัพธ์จากการจำลองดังปรากฏในรูปที่ 3.46-3.48 แสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค TNA ในการตรวจกับระเบิด เนื่องจากในการศึกษาวิจัยครั้งนี้อาศัยผลลัพธ์แบบ F-4 tally ซึ่งเป็นผลลัพธ์แบบอุดมคติ หรือไม่มีการใส่ผลึกของหัววัดรังสีแกมมาในโปรแกรม ดังนั้นความเป็นไปได้นี้ดังกล่าวจึงเป็นความเป็นไปได้เบื้องต้น การศึกษาวิจัยในลักษณะที่สมจริงโดยอาศัยผลลัพธ์แบบ F-8 tally จึงควรได้รับการดำเนินการในโอกาสต่อไปเพื่อยืนยันความเป็นไปได้อย่างแท้จริง

บทที่ 4

การวิเคราะห์ผลการจำลอง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองในบทที่ 3 ซึ่งให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค NBS ในการตรวจกับระเบิด ดังนั้นในบทนี้จะทำการวิเคราะห์ผลลัพธ์ดังกล่าวในรายละเอียดในประเด็นต่างๆ ดังต่อไปนี้

4.1 ประสิทธิภาพของชุดหัววัดนิวตรอน ในการวัดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับ

ในการจำลองการตรวจกับระเบิดในบทที่ 3 ได้ใช้ชุดหัววัดนิวตรอน 4 ชนิดคือ 1) $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ 2) $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ 3) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$ และ 4) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ การวิเคราะห์ประสิทธิภาพของชุดหัววัดดังกล่าวในการวัดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดหรือวัสดุต่างๆ อาจกระทำได้โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์แบ่งแยก (separation parameter) S ซึ่งมีค่าตามสมการข้างล่าง (Brooks and Drogs, 2005):

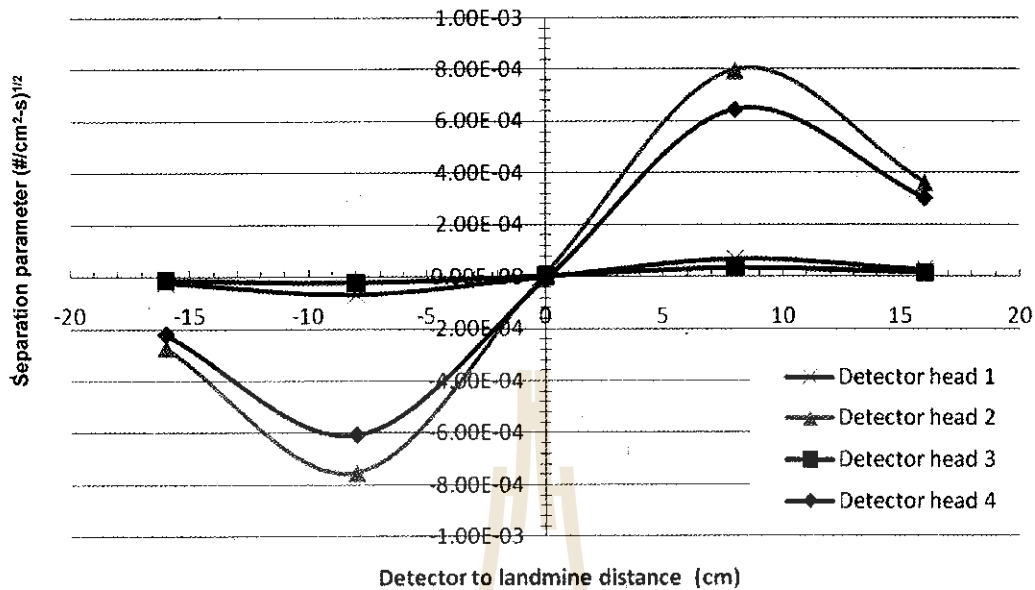
$$S(x) = \frac{A(x) - B(x)}{\sqrt{A(x) + B(x)}} \quad (3)$$

เมื่อ $A(x)$ และ $B(x)$ คือ ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดหรือวัสดุซึ่งวัดได้โดยหัววัด A และ B ตามลำดับ x คือระยะทางในแนวราบจากจุดกึ่งกลางชุดหัววัดถึงตำแหน่งของกับระเบิด จากสมการ (3) จะพบว่า S เป็นค่าผลต่างของฟลักซ์นิวตรอนที่วัดได้โดยหัววัด A และ B หรือค่าสุทธาระหว่างฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับไปตกกระทบกับหัววัด A และ B ในหน่วยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

เมื่อทำการตรวจกับระเบิดโดยการเคลื่อนชุดหัววัดเหนือพื้นดินเข้าหาตำแหน่งของกับระเบิดจากทางขวามือ ในขณะที่ชุดหัววัดอยู่ห่างไกลจากตำแหน่งของกับระเบิด ค่าฟลักซ์นิวตรอนที่วัดได้โดยหัววัด A และ B จะมีค่าใกล้เคียงกัน ทั้งนี้เพราะค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับส่วนใหญ่เกิดจากการตกกระทบกับองค์ประกอบของชั้นดินที่กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ดังนั้นค่าพารามิเตอร์แบ่งแยก S จะมีค่าน้อยๆ เมื่อชุดหัววัดอยู่ห่างไกลจากตำแหน่งของกับระเบิด แต่เมื่อชุดหัววัดเคลื่อนเข้าใกล้ตำแหน่งของกับระเบิด ค่าฟลักซ์นิวตรอนที่วัดได้โดยหัววัด A และ B จะสูงขึ้น โดยค่าในหัววัด A จะสูงกว่าค่าในหัววัด B อย่างต่อเนื่อง ทำให้ S มีค่าเพิ่มขึ้นสู่ค่าสูงสุดแล้วจึงลดลงสู่ศูนย์เมื่อจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดล้อมอยู่เหนือตำแหน่งของกับระเบิดพอดี ในทางกลับกันเมื่อเคลื่อนชุดหัววัดออกจากตำแหน่งของกับระเบิดไปทางซ้าย ค่าฟลักซ์นิวตรอนที่วัดได้โดยหัววัด A จะต่ำกว่าค่าในหัววัด B ทำให้ S มีค่าเป็นลบ

โดยจะเป็นลบมากขึ้นสู่ค่าลบสูงสุดแล้วกลับสู่ศูนย์อีกครั้งเมื่อจุดกึ่งกลางของชุดหัววัดอยู่ห่างจากตำแหน่งของกัมมะเบตเท่ากับตำแหน่งทางขวามือในตอนเริ่มต้น การเปลี่ยนแปลงของค่าพารามิเตอร์แบ่งแยก S จะมีลักษณะคล้ายรูปตัวอักษร S (ในแนวนอน) ซึ่งมีขนาดของแอมพลิจูดเป็นดัชนีบ่งบอกถึงสถานะการตรวจพบกัมมะเบต ถ้าแอมพลิจูดของพารามิเตอร์แบ่งแยก S มีขนาดสูงแสดงว่าชุดหัววัดนิวตรอนตรวจพบกัมมะเบตฝังอยู่ใต้ดิน ณ ตำแหน่งที่ S มีค่าเท่ากับศูนย์ ตำแหน่งดังกล่าวจะเป็นตำแหน่งที่ $x=0$ ในทางตรงกันข้ามถ้าแอมพลิจูดของพารามิเตอร์แบ่งแยก S มีขนาดต่ำแสดงว่าไม่มีกัมมะเบตฝังอยู่ใต้ดินในบริเวณที่ทำการตรวจกัมมะเบต อย่างไรก็ตามหากมีวัสดุชนิดอื่นๆ ที่มี H เป็นองค์ประกอบเป็นจำนวนมากฝังอยู่ใต้ดิน ลักษณะการเปลี่ยนแปลงของค่า S จะคล้ายคลึงกับค่า S ของกัมมะเบตแต่มีขนาดของแอมพลิจูดแตกต่างกัน ถ้าวัสดุชนิดนั้นมี H เป็นองค์ประกอบมากกว่ากัมมะเบตขนาดของแอมพลิจูดของ S จะสูงกว่ากรณีของกัมมะเบต ในทางตรงกันข้ามถ้าวัสดุชนิดนั้นมี H เป็นองค์ประกอบน้อยกว่ากัมมะเบต ขนาดของแอมพลิจูดของ S จะต่ำกว่ากรณีของกัมมะเบต

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชุดหัววัดนิวตรอนทั้ง 4 ชนิดดังกล่าวแล้วโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์แบ่งแยก S ในการนี้ได้ใช้ชุดหัววัดทั้ง 4 ทำการตรวจกัมมะเบต TNT ที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm แล้วแทนค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับซึ่งวัดได้โดยหัววัดแต่ละชนิดในสมการ (3) รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์แบ่งแยก S ในหน่วยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของชุดหัววัดชนิดต่างๆ ซึ่งพบว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ มีค่าแอมพลิจูดของค่า S สูงเป็นอันดับ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยค่าทั้ง 2 แตกต่างกันประมาณ 20% ดังนั้นแสดงว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ มีประสิทธิภาพในการวัดฟลักซ์ที่กระเจิงกลับจากกัมมะเบตสูงสุด อย่างไรก็ตามในการเลือกชุดหัววัดที่เหมาะสมสำหรับการตรวจกัมมะเบตต้องพิจารณาถึงขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกัมมะเบตกับวัสดุอื่นๆ ที่อาจฝังในดินร่วมด้วย



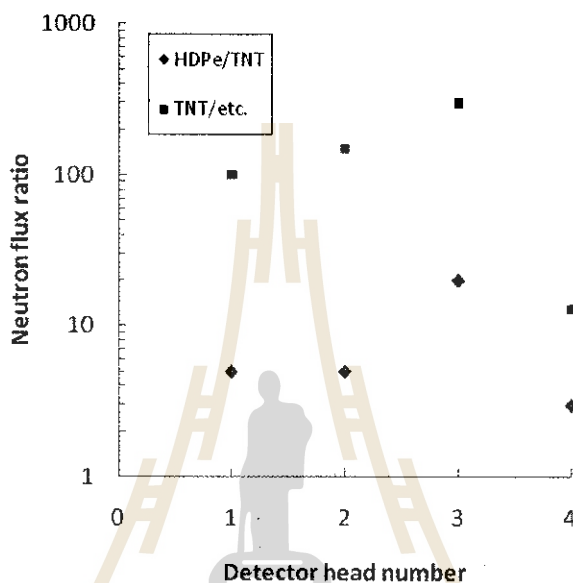
รูปที่ 4.1 ค่าพารามิเตอร์ S ที่ได้จากการตรวจกับระเบิดในดินทราย ด้วยชุดหัววัด 4 ชนิด :

- 1) $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ 2) $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ 3) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$ 4) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

4.2 ซีดความสามารถของชุดหัววัดนิวตรอนในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ

การวิเคราะห์ขีดความสามารถของชุดหัววัดนิวตรอนในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ อาจกระทำได้โดยอาศัยค่าอัตราส่วนระหว่างฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดเทียบกับค่าฟลักซ์ที่กระเจิงกลับจากวัสดุอื่นๆ ในการนี้จะอาศัยค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับที่ได้จากผลลัพท์ของการจำลองในหัวข้อ 3.2.9-3.2.12 ซึ่งเป็นผลจากการตรวจกับระเบิด TNT ที่ฝังในดินเหนียวลึก 2.4 cm โดยใช้ชุดหัววัด 4 ชนิดตามหมายเลขเช่นเดียวกับหัวข้อ 4.1 รูปที่ 4.2 แสดงอัตราส่วนของค่าฟลักซ์นิวตรอนพลังงาน 0-1 eV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดเทียบกับค่าจากวัสดุอื่นๆ เช่น รากไม้ หินแกรนิต และคอนกรีต (TNT/etc.) และที่กระเจิงกลับจากโพลีเอทิลีนเทียบกับค่าจากกับระเบิด (HDPe/TNT) จากรูปจะพบว่าชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ และ $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ มีอัตราส่วนของค่าฟลักซ์นิวตรอนสูงสุดเป็นอันดับ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดเทียบกับค่าจากวัสดุอื่นๆ ของชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ และ $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ มีค่าเป็น 300 และ 150 เท่าตามลำดับ ขณะที่อัตราส่วนของค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากโพลีเอทิลีนเทียบกับค่าจากกับระเบิดของชุดหัววัดทั้ง 2 มีค่าเป็น 20 และ 5 เท่าตามลำดับ ผลลัพท์นี้แสดงให้เห็นว่าชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับโพลีเอทิลีนและกับระเบิดกับวัสดุ

อื่นๆ ได้ดีกว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ ดังนั้นถ้าพิจารณาทั้งประสิทธิภาพในการวัดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับและขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ร่วมกัน จะสรุปได้ว่าชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ มีประสิทธิภาพในการตรวจกับระเบิดได้ดีกว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$

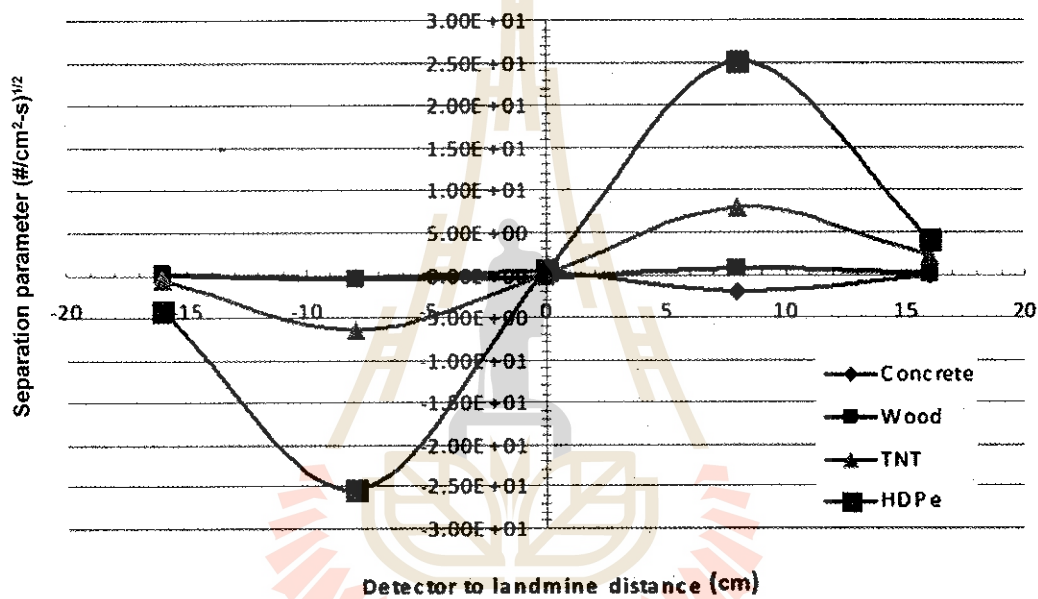


รูปที่ 4.2 อัตราส่วนของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดเทียบกับค่าจากวัสดุอื่นๆ สำหรับชุดหัววัด 4 ชนิด : 1) $^{252}\text{Cf}/^3\text{He}$ 2) $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ 3) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ 4) $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/^3\text{He}$

4.3 ขีดความสามารถของชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ โดยพารามิเตอร์ S

จากหัวข้อ 4.2 พบว่าชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ได้ดีที่สุด ดังนั้นในหัวข้อนี้จะใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ทำการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ โดยอาศัยค่าพารามิเตอร์แบ่งแยก S ตามสมการ (3) ทั้งนี้เพื่อตรวจสอบว่าชุดหัววัดดังกล่าวมีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ได้ดีเพียงใด ในการนี้เราได้ใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ซึ่งมีค่ากัมมันตภาพ 10^8 n/s ทำการตรวจกับระเบิดและวัสดุอื่นๆ (โพลีเอทิลีน รากไม้ หินแกรนิตและคอนกรีต) ที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm จากการแทนค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ ในสมการ (3) จะได้ผลลัพธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งพบว่าค่า S ของกับ

ระเบิดและวัสดุชนิดต่างๆ มีลักษณะคล้ายตัวอักษร S เช่นเดียวกับรูป 4.1 ดังได้กล่าวแล้วในหัวข้อ 4.1 วัสดุที่มี H เป็นจำนวนมากกว่าจะมีขนาดของแอมพลิจูดของค่า S สูงกว่า จากรูปที่ 4.3 จะพบว่าขนาดของแอมพลิจูดของค่า S ของโพลีเอทิลีนสูงกว่าค่าของกับระเบิดประมาณ 3 เท่า ขณะที่ขนาดของแอมพลิจูดของค่า S ของกับระเบิดสูงกว่าค่าของรากไม้และคอนกรีตประมาณ 8 เท่า ขนาดของแอมพลิจูดของค่า S ที่แตกต่างกันดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดและวัสดุต่างๆ แตกต่างกันอย่างชัดเจน ดังนั้นแสดงว่าชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ สามารถวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

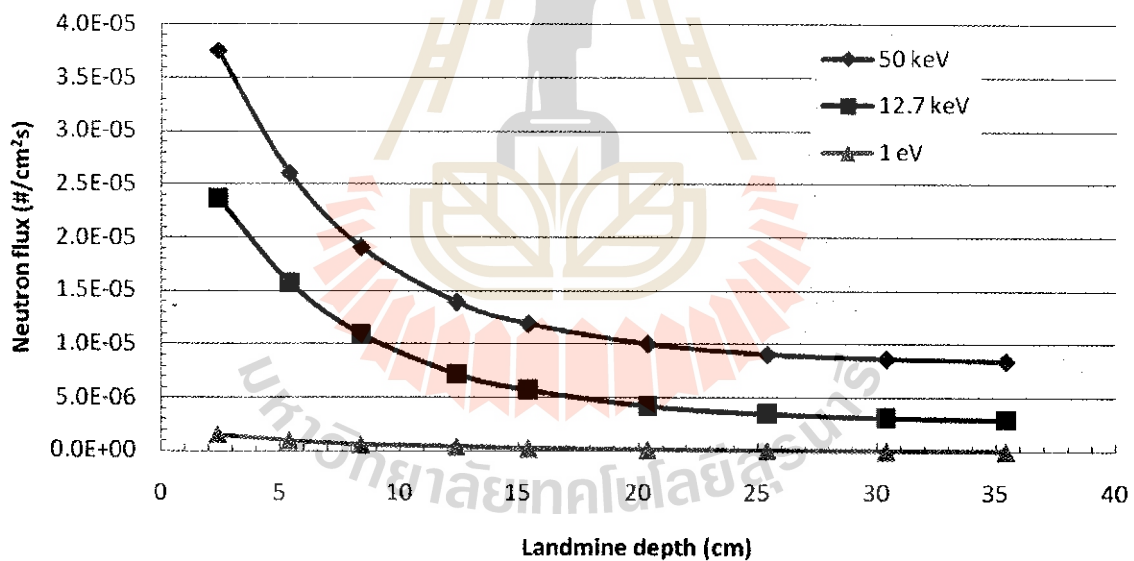


รูปที่ 4.3 ค่าพารามิเตอร์ S ที่ได้จากการตรวจกับระเบิด รากไม้ โพลีเอทิลีนและคอนกรีต ในดินทรายลึก 2.4 cm ด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

4.4 ช่วงพลังงานของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับที่เหมาะสมต่อการตรวจกับระเบิด

วัตถุประสงค์ของหัวข้อนี้คือการวิเคราะห์ช่วงพลังงานของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับที่เหมาะสมต่อการตรวจกับระเบิด ในกรณีนี้ได้ใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ทำการตรวจกับระเบิด TNT ซึ่งฝังในดินปนลึก 2.4 - 35.4 cm รูปที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดในช่วงพลังงาน 3 ช่วงคือ 1) 0-1.0 eV 2) 0-12.7 keV และ 3) 0-50.0 keV จากรูปจะพบว่า ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับในช่วงพลังงานที่ 2 และ 3 มีลักษณะคล้ายกัน โดยมีค่าลดลงในสัดส่วนที่เท่าๆ กันเมื่อความลึกเพิ่มขึ้นหรือมีความชื้นคล้ายกัน อย่างไรก็ตามค่าฟลักซ์นิวตรอนในช่วงพลังงาน 0-50.0 keV

มีค่าสูงกว่าค่าในช่วงพลังงาน 0-12.7 keV ค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับในช่วงพลังงานที่ 1 นั้น นอกจากจะมีค่าต่ำกว่าค่าในช่วงพลังงานที่ 2 และ 3 แล้วยังมีค่าไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ลักษณะของฟลักซ์นิวตรอนที่ปรากฏดังแสดงในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งการฝังกับระเบิดที่ลึกกว่าจะทำให้เกิดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับน้อยกว่า ดังนั้นควรเลือกใช้ช่วงพลังงานที่สูงกว่าในการตรวจกับระเบิดเพื่อชดเชยฟลักซ์นิวตรอนที่ลดลง ทั้งนี้เพราะความยากง่ายในการตรวจกับระเบิดจะขึ้นอยู่กับขนาดของฟลักซ์นิวตรอนที่วัดได้ ขนาดของฟลักซ์ยิ่งสูงยิ่งตรวจได้ง่าย อย่างไรก็ตาม การเลือกช่วงพลังงานที่เหมาะสมนั้นอาจต้องพิจารณาถึงขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดจากวัสดุอื่น ๆ ร่วมด้วย จากหัวข้อ 3.2 จะพบว่าช่วงพลังงานที่ต่ำกว่ามีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างได้ดีกว่า ดังนั้นช่วงพลังงาน 0-12.7 keV จึงน่าจะเหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจกับระเบิด ทั้งนี้เพราะช่วงพลังงานดังกล่าวมีส่วนผสมของขีดความสามารถในการวิเคราะห์และขนาดของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับดีที่สุด การทดลองในห้องปฏิบัติการเท่านั้นจะสามารถให้ข้อสรุปนี้ชัดเจน



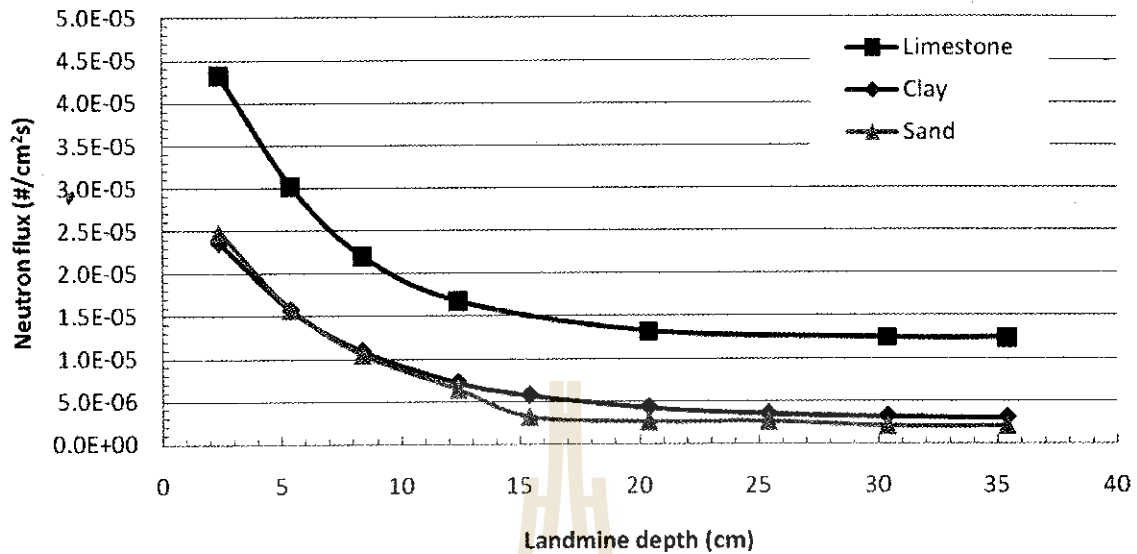
รูปที่ 4.4 ฟลักซ์นิวตรอนช่วงพลังงานต่างๆ ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดที่ฝังในชั้นดินเหนียวลึก

2.4 -35.4 cm โดยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

4.5 ซีดความสามารถด้านความลึกของการตรวจกับระเบิดด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ขีดความสามารถด้านความลึกของการตรวจกับระเบิดด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ในการนี้ได้ทำการตรวจกับระเบิด TNT มวล 249 g ที่ฝังในดินทราย ดินปูนและดินเหนียวลึก 2.4 - 35.4 cm รูปที่ 4.5 แสดงฟลักซ์นิวตรอนช่วงพลังงาน 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด ซึ่งพบว่าสำหรับชั้นดินทุกชนิดฟลักซ์นิวตรอนมีค่าลดลงเมื่อความลึกเพิ่มขึ้น ค่าฟลักซ์ดังกล่าวจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งถึงความลึกประมาณ 20 cm จึงมีค่าคงตัว ลักษณะการลดลงของค่าฟลักซ์เช่นนี้แสดงให้เห็นว่าชุดหัววัดสามารถตรวจกับระเบิดที่ฝังในชั้นดินทุกชนิดได้ลึกประมาณ 20 cm ทั้งนี้เพราะในขณะที่ความลึกเพิ่มขึ้นจาก 0-20 cm ชุดหัววัดยังคงสามารถวัดความเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับ ความสามารถในการวัดความเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นดัชนีที่บ่งชี้ว่าชุดหัววัดยังคงตรวจพบกับระเบิดฝังอยู่ใต้ดิน ณ ความลึกนั้น ในทางตรงกันข้ามถ้าความลึกเปลี่ยนไปแต่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับ ย่อมแสดงว่าชุดหัววัดไม่สามารถตรวจพบกับระเบิด ณ ความลึกนั้น ทั้งนี้เพราะฟลักซ์นิวตรอนที่วัดได้โดยชุดหัววัดเป็นเพียงฟลักซ์ที่เกิดจากการกระเจิงกลับจากองค์ประกอบของชั้นดิน ดังนั้นแสดงว่าขีดความสามารถด้านความลึกของการตรวจกับระเบิดของชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ก็คือ 20 cm

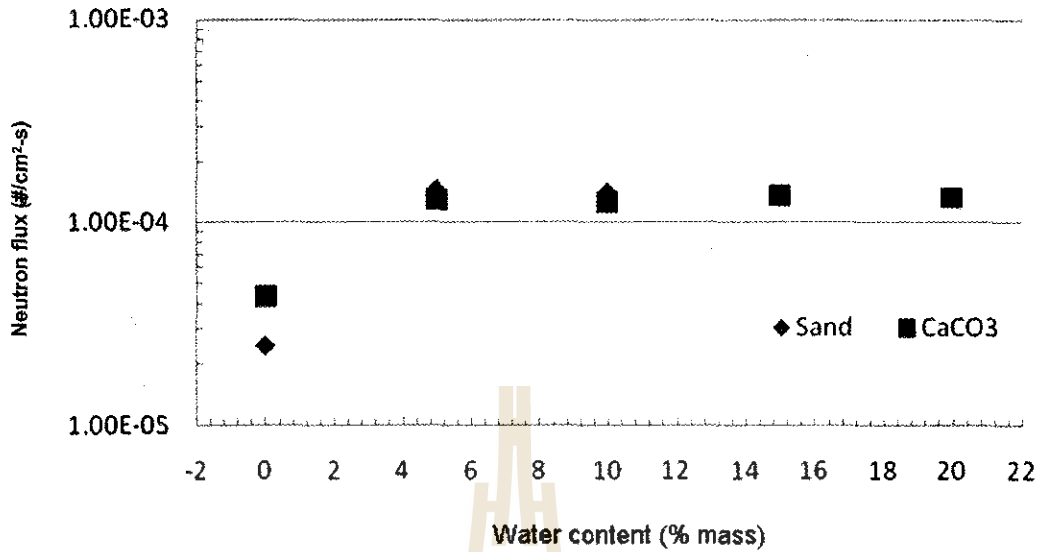
จากรูปที่ 4.5 จะพบว่าค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดซึ่งฝังในดินปูนสูงกว่าค่าในดินทรายและดินเหนียวประมาณ 1.5 เท่าในทุกความลึก ดังนั้นแสดงว่าในการตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินปูนจะมีค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับไปตกกระทบกับหัววัดสูงกว่าค่าของชั้นดินชนิดอื่น อย่างไรก็ตามเนื่องจากค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับดังกล่าว ส่วนหนึ่งเกิดจากการกระเจิงจากชั้นดินซึ่งมีค่าแตกต่างกันสำหรับชนิดของชั้นดินที่แตกต่างกัน ดังนั้นเราไม่อาจสรุปได้ว่าการตรวจกับระเบิดที่ฝังในชั้นดินปูนจะง่ายกว่าการตรวจในชั้นดินชนิดอื่น การทดลองในห้องปฏิบัติการอาจยืนยันข้อสรุปนี้



รูปที่ 4.5 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดที่ฝังในดินทราย ดินปูนและดินเหนียวในฟังก์ชันของความลึกโดยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

4.6 ผลกระทบของความชื้นในดินต่อการตรวจกับระเบิดด้วยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์ถึงผลกระทบของความชื้นในดินต่อการตรวจกับระเบิดด้วยชุดหัววัดนิวตรอน ในการนี้ได้ทำการวัดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด TNT ที่ฝังในดินทรายและดินปูนลึก 5 cm โดยใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ รูปที่ 4.6 แสดงฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดต่ออนุภาคนิวตรอนที่ปล่อยจากแหล่งกำเนิด 1 อนุภาคในฟังก์ชันของความชื้นในดิน 0-20% โดยมวล จากรูปจะพบว่าเมื่อความชื้นในดินสูงขึ้นค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระทั่งความชื้นเป็น 5% จึงคงตัว การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์นิวตรอนดังกล่าวมีค่าเป็นประมาณ 180% ผลลัพธ์นี้สอดคล้องกับความเป็นจริงเพราะเมื่อมีปริมาณน้ำในดินมากขึ้นจะมี H มากขึ้นทำให้การกระเจิงกลับของนิวตรอนมากขึ้น ทั้งนี้เพราะ H เป็นนิวไคลด์ขนาดเล็กซึ่งมีค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงสูงจึงทำให้เกิดกระเจิงได้ดี การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ดังกล่าวอาจมีผลกระทบในทางลบต่อการตรวจกับระเบิด เพราะถ้าบริเวณเหนือตำแหน่งของกับระเบิดมีน้ำเป็นจำนวนมากอาจทำให้ฟลักซ์ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดถูกรบกวนด้วยฟลักซ์จาก H ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำ การรบกวนดังกล่าวอาจมีผลกระทบต่อความแม่นยำในการตรวจกับระเบิด

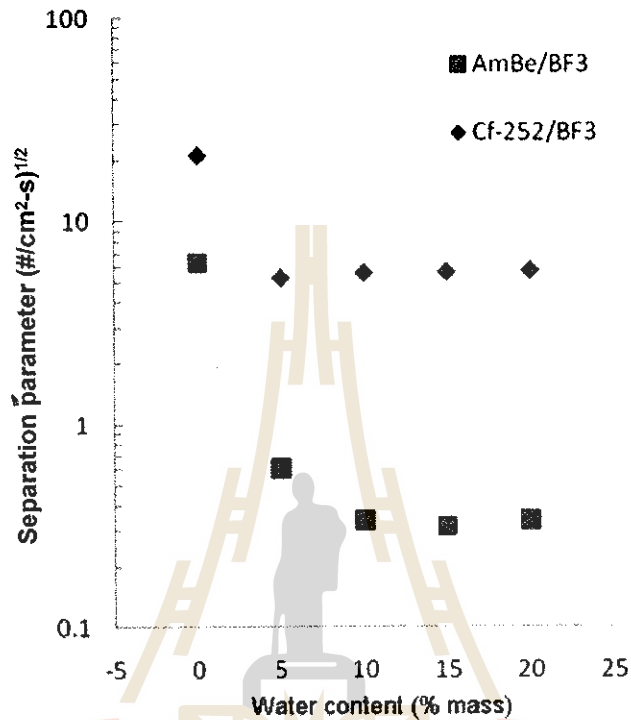


รูปที่ 4.6 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดในฟังก์ชันของความชื้นในดินเมื่อกับระเบิดฝังในดินทรายและดินปูนลึกลง 2.4 cm

4.7 ซีดความสามารถของชุดหัววัดนิวตรอนในการตรวจกับระเบิดภายใต้ความชื้นในดิน

เนื่องจากในหัวข้อ 4.5 พบว่าความชื้นในดินมีผลกระทบต่อการทำงานของชุดหัววัดนิวตรอน ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงทำการวิเคราะห์ถึงขีดความสามารถของชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ ในการตรวจกับระเบิดภายใต้ความชื้นในดินโดยอาศัยค่าพารามิเตอร์แบ่งแยกตามสมการ (3) ในกรณีนี้ได้ใช้ชุดหัววัดดังกล่าวซึ่งมีค่ากัมมันตภาพ 10^8 n/s ทำการตรวจกับระเบิด TNT ที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm รูปที่ 4.7 แสดงค่าแอมพลิจูดของพารามิเตอร์แบ่งแยก S ในฟังก์ชันของความชื้นในดิน 0- 20% โดยมวล จากรูปจะพบว่าเมื่อตรวจกับระเบิดในดินทรายแห้ง แอมพลิจูดของ S มีค่าเป็น 23.0 และ 6.0 ($\text{cm}^2\text{-s}$) สำหรับชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ ตามลำดับ ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่าชุดหัววัดทั้ง 2 สามารถตรวจกับระเบิดในชั้นดินทรายแห้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในกรณีที่ความชื้นในดินทรายเป็น 5% แอมพลิจูดของ S จากชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ มีค่าลดลงเป็น 5.0 และ 0.6 ตามลำดับ ดังนั้นแสดงว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ ยังคงสามารถตรวจกับระเบิดเมื่อมีความชื้นในดินเป็น 5% ได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ชุดหัววัด $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ อาจมีปัญหาในด้านความแม่นยำ อย่างไรก็ตามจากรูป 4.7 จะพบว่าถึงแม้ความชื้นในดินจะเกิน 5% ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ ยังคงสามารถตรวจกับระเบิดได้ดีเช่นเดิม แต่ชุดหัววัด $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ จะมีปัญหามากขึ้นเนื่องจากแอมพลิจูดของค่า S สำหรับกรณีดังกล่าวมีค่าค่อนข้างต่ำ (ประมาณ 0.3) ดังนั้นชุดหัววัด $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ อาจไม่สามารถตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินทรายที่มีความชื้นในดินเกิน 5% ได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดลองในห้องปฏิบัติการจะเป็นสิ่ง

ยืนยันว่าจะสามารถใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ตรวจสอบระเบิดในดินทรายที่มีความชื้นเกิน 5% ได้หรือไม่ ผลลัพธ์นี้ใกล้เคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากการศึกษาโดยคณะนักวิจัยอื่นที่พบว่าสามารถตรวจกับระเบิดได้ภายใต้ความชื้นในดินประมาณ 12% (Brooks and Drogs, 2005)

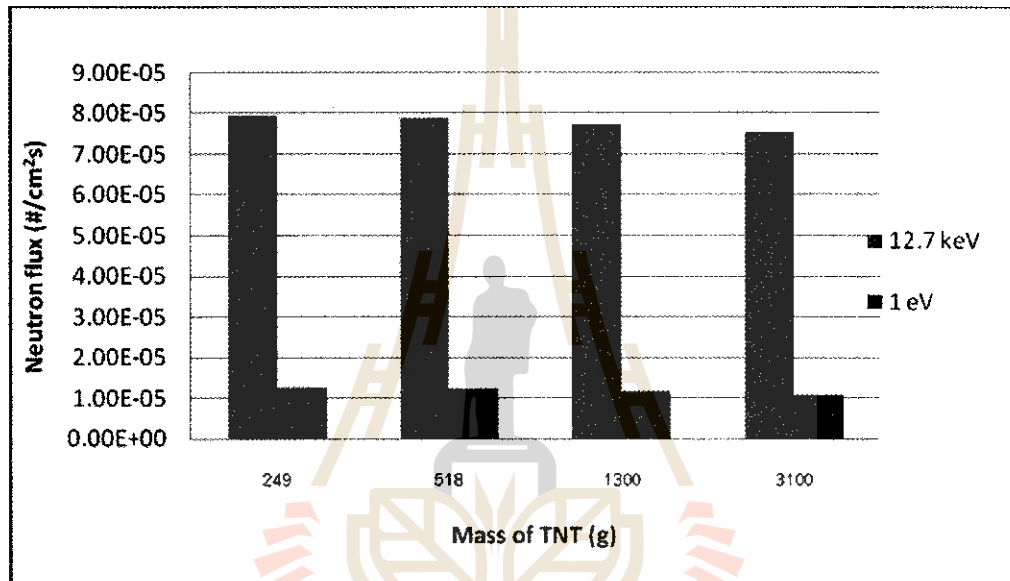


รูปที่ 4.7 แอมพลิจูดของพารามิเตอร์ S ในฟังก์ชันของความชื้นในดินสำหรับกับระเบิดที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm โดยชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

4.8 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดในฟังก์ชันของมวลของกับระเบิด

ในหัวข้อนี้ได้ทำการวิเคราะห์หาค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดในฟังก์ชันของมวลของกับระเบิด ในการนี้ได้ใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ทำการตรวจกับระเบิด TNT มวล 249, 518, 1,300 และ 3,100 g ที่ฝังในดินทรายลึก 2.4 cm รูปที่ 4.8 แสดงค่าฟลักซ์นิวตรอนพลังงานในช่วง 0-12.7 keV ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดต่ออนุภาคนิวตรอนจากแหล่งกำเนิด 1 อนุภาคในฟังก์ชันของมวลของกับระเบิด จากรูปจะพบว่าเมื่อกับระเบิดมีมวลเพิ่มขึ้น ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับมีค่าลดลง โดยค่าสูงสุดและต่ำสุดต่างกันประมาณ 5% ในกรณีที่ใช้นิวตรอนในช่วงพลังงาน 0-1 eV ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดจะมีลักษณะเช่นเดียวกับกรณีของช่วงพลังงาน 0-12.7 keV แต่มีค่า

ต่ำกว่ากรณี ประมาณ 80% สำหรับทุกค่ามวลของกัมมันตรังสี อย่างไรก็ตามสำหรับกรณีนี้ เมื่อกัมมันตรังสีมีมวลเพิ่มขึ้นค่าฟลักซ์นิวตรอนที่ลดลงจะมีค่าสูงสุดและต่ำสุดต่างกันถึง 18% ผลลัพธ์นี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อกัมมันตรังสีมีมวลเพิ่มขึ้นจะเกิดการดูดกลืนนิวตรอนด้วยองค์ประกอบของกัมมันตรังสีหรือเกิด self absorption มากขึ้น ทำให้ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับมีค่าลดลง อย่างไรก็ตามค่าฟลักซ์ที่ลดลงมีค่าเล็กน้อย ดังนั้นอาจสรุปได้ว่ามวลของกัมมันตรังสีไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของกัมมันตรังสีอย่างมีนัยสำคัญ และควรเลือกใช้นิวตรอนที่กระเจิงกลับในช่วงพลังงาน 0-12.7 keV สำหรับการตรวจกัมมันตรังสี



รูปที่ 4.8 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกัมมันตรังสีมวล 249, 518, 1,300 และ 3,100 g ที่ฝังในดินทรายลึก 5 cm โดยชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$

4.9 ปริมาณรังสีของผู้ปฏิบัติงานตรวจกัมมันตรังสี

เนื่องจากความปลอดภัยจากรังสีของผู้ปฏิบัติงานเป็นประเด็นสำคัญอย่างหนึ่งสำหรับการตรวจกัมมันตรังสี ดังนั้นในการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงได้ทำการจำลองหาปริมาณรังสี (dose rate) ที่ผู้ปฏิบัติงานอาจได้รับในระหว่างการตรวจกัมมันตรังสี ในการนี้สมมติให้ผู้ปฏิบัติงานใช้ชุดหัววัดนิวตรอนซึ่งมี Cf-252 หรือ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนทำการตรวจกัมมันตรังสี และสมมติให้ผู้ปฏิบัติงานซึ่งสูง 170 cm กว้าง 45 cm อยู่ห่างชุดหัววัด 150 cm ในขณะที่ทำการตรวจกัมมันตรังสี ระยะเวลาที่ผู้ปฏิบัติงานทำการตรวจกัมมันตรังสีคือปีละ 48 สัปดาห์ๆ ละ 5 วันๆ ละ 8 ชั่วโมง โดยผู้ปฏิบัติงานจะได้รับทั้งรังสีนิวตรอนและแกมมาที่เกิดขึ้นจากอันตรกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนจากแหล่งกำเนิดกับนิวเคลียสองค์ประกอบ

ของชั้นดินและกับระเบิดที่ฝังในชั้นดิน ผลลัพธ์จากการจำลองอยู่ในรูปของ F-2 tally ซึ่งเป็นฟลักซ์นิวตรอนที่ตกกระทบกับพื้นผิวของร่างกายของผู้ปฏิบัติงาน ในการแปลงค่าฟลักซ์ดังกล่าวให้เป็นค่าปริมาณรังสีต้องทำการหาค่าเฉลี่ยของฟลักซ์ของรังสีแกมมาและนิวตรอนที่ได้จากการจำลอง ณ พลังงานที่สอดคล้องกับค่าพลังงานที่ปรากฏในตารางของแฟคเตอร์การแปลง (conversion factor) สำหรับรังสีแกมมาและนิวตรอน (Tsoulfanidis, 1995) เมื่อคูณค่าเฉลี่ยของฟลักซ์กับแฟคเตอร์การแปลง จะได้ค่าปริมาณรังสีรวมของผู้ปฏิบัติงานดังแสดงในตารางที่ 4.1 จากตารางจะพบว่าปริมาณรังสีที่เกิดจากนิวตรอนมีค่าสูงกว่าปริมาณรังสีที่เกิดจากรังสีแกมมา ประมาณ 100 เท่า เมื่อใช้ ^{252}Cf ที่มีค่ากัมมันตภาพ 10^8 n/s เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน ปริมาณรังสีรวมสูงสุดที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับมีค่าเป็น 6.61 mSv/y ในกรณีที่แหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็น ^{241}Am - ^9Be ที่มีค่ากัมมันตภาพเป็น 10^8 n/s ปริมาณรังสีรวมสูงสุดที่ผู้ปฏิบัติงานได้รับจะมีค่าเป็น 5.09 mSv/y ปริมาณรังสีรวมของทั้ง 2 กรณี มีค่าต่ำกว่า 50 mSv/y (ICRP, 1997) ซึ่งเป็นค่าปริมาณรังสีสูงสุดที่ยอมรับได้ประเภททั้งร่างกาย (whole body) ประมาณ 10 เท่า

ตารางที่ 4.1 ปริมาณรังสีนิวตรอนและแกมมาที่ผู้ปฏิบัติงานตรวจกับระเบิดได้รับเมื่อแหล่งกำเนิดนิวตรอนมีค่ากัมมันตภาพ 5×10^6 , 1×10^7 และ 1×10^8 n/s

Source type	Source Activity n/s	Dose rate (mSv/y)		
		Neutron	Gamma	Total
^{252}Cf	5×10^6	3.30×10^{-1}	1.22×10^{-6}	0.33
	1×10^7	6.61×10^{-1}	2.44×10^{-6}	0.66
	1×10^8	6.61	2.44×10^{-5}	6.61
^{241}Am - ^9Be	5×10^6	2.52×10^{-1}	2.26×10^{-3}	0.25
	1×10^7	5.05×10^{-1}	4.53×10^{-6}	0.51
	1×10^8	5.05	4.53×10^{-2}	5.09

บทที่ 5

สรุปผลการจำลองและข้อเสนอแนะ

ในโครงการศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ทำการจำลองหลักการของการตรวจกับระเบิดด้วยเทคนิค TNB, LNB และ TNA โดยอาศัยโปรแกรมมอนติคาร์โล ในการนี้ได้ใช้ชุดหัววัด 4 ชนิดทำการตรวจกับระเบิด TNT มวล 249 g และวัสดุอื่นๆ เช่น โพลีเอทิลีน รากไม้และคอนกรีต ที่ฝังใต้ดินทราย ดินปูนและดินเหนียว ผลลัพธ์จากการจำลองแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิคทั้ง 3 ในการตรวจกับระเบิดจากผลลัพธ์ดังกล่าวพบว่าชนิดขององค์ประกอบของชุดหัววัด เช่น ชนิดแหล่งกำเนิดนิวตรอนและชนิดของหัววัดนิวตรอนมีประสิทธิภาพและขีดความสามารถในการตรวจกับระเบิดแตกต่างกัน หัวข้อต่อไปนี้จะสรุปถึงประสิทธิภาพและขีดความสามารถขององค์ประกอบของชุดหัววัดในแต่ละเทคนิค

5.1 ประสิทธิภาพและขีดความสามารถขององค์ประกอบของชุดหัววัดนิวตรอนโดยเทคนิค TNB

5.1.1 ^{252}Cf เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีประสิทธิภาพในการก่อให้เกิดฟลักซ์นิวตรอนคุณภาพได้ชั้นดินทรายสูงกว่าหัววัด $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ ประมาณ 1.3 และ 2.9 เท่า เมื่อใช้ ^3He และ BF_3 เป็นหัววัดนิวตรอนตามลำดับ

5.1.2 หัววัดนิวตรอน BF_3 มีประสิทธิภาพในการวัดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดที่ฝังใต้ดินทราย สูงกว่าหัววัด ^3He ประมาณ 70 และ 110 เท่า เมื่อใช้ ^{252}Cf และ $^{241}\text{Am-}^9\text{Be}$ เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนตามลำดับ

5.1.3 ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ และ $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ มีประสิทธิภาพในการคัดแยกกับระเบิดได้ดีเป็นอันดับ 1 และ 2 ตามลำดับ โดยค่าพารามิเตอร์คัดแยก S สำหรับการตรวจกับระเบิดของชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ สูงกว่าค่าของชุดหัววัด $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ ประมาณ 20%

5.1.4 ชุดหัววัด $^{241}\text{Am-}^9\text{Be} / \text{BF}_3$ มีขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ได้ดีกว่าชุดหัววัด $\text{Cf-252} / \text{BF}_3$ โดยสามารถวัดอัตราส่วนของค่าฟลักซ์ที่กระเจิงกลับจากโพลีเอทิลีนเทียบกับค่าจากกับระเบิดได้ดีกว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ ประมาณ 4 เท่า ในทำนองเดียวกันชุดหัววัดนี้สามารถวัดอัตราส่วนฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดเทียบกับค่าจากวัสดุอื่นๆ ได้ดีกว่าชุดหัววัด $^{252}\text{Cf} / \text{BF}_3$ ประมาณ 2 เท่า

5.1.5 อัตราส่วนของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดที่ฝังใต้ดินปูน ดินทราย และดินเหนียว มีค่าเป็น 5.4 : 2.9 : 1.0 เมื่อใช้ $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ เป็นชุดหัววัด ในกรณีที่ใช้ $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ เป็นชุดหัววัดอัตราส่วนดังกล่าวจะมีค่าเป็น 5.9 : 2.0 : 1.0

5.1.6 ค่าเฉลี่ยของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด ในชุดหัววัดที่มี 10 หัววัดสูงกว่าค่าในชุดหัววัดที่มี 4 หัววัดประมาณ 7 เท่า ต่อ 1 หัววัด ดังนั้นแสดงว่าจำนวนหัววัดที่มากกว่าจะวัดฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับสูงกว่า

5.2 ประสิทธิภาพและขีดความสามารถขององค์ประกอบของชุดหัววัดนิวตรอนโดยเทคนิค LNB

5.2.1 ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ได้ดีที่สุดในแง่ของค่าความแตกต่างระหว่างกับระเบิดและวัสดุอื่นๆ ที่ฝังใต้ดินเหนียวจะสามารถวัดค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดเทียบกับโพลิเอทิลีนและจากกับระเบิดเทียบกับรากไม้มีค่าเป็น 6,100 และ 2,000/cm²-s ตามลำดับ ในกรณีที่ฝังกับระเบิดและโพลิเอทิลีนหรือรากไม้ในดินทราย ค่าความแตกต่างดังกล่าวจะเป็น 5,300 และ 800/cm²-s ตามลำดับ

5.2.2 ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ มีประสิทธิภาพในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดกับวัสดุอื่นๆ ได้ดีเป็นอันดับ 2 โดยถ้าใช้แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่มีค่ากัมมันตภาพ 10⁸ n/s ตรวจสอบกับระเบิดและวัสดุอื่นๆ ที่ฝังใต้ดินเหนียวจะสามารถวัดค่าความแตกต่างของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากกับระเบิดเทียบกับโพลิเอทิลีนและจากกับระเบิดเทียบกับรากไม้เป็นประมาณ 3,100 และ 700/cm²-s ตามลำดับ ในกรณีที่ฝังกับระเบิดหรือโพลิเอทิลีนหรือรากไม้ในดินทราย ค่าความแตกต่างดังกล่าวจะเป็น 6,200 และ 800/cm²-s ตามลำดับ

5.2.3 ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ สามารถตรวจกับระเบิด TNT ที่ฝังในดินทราย ดินปูนและดินเหนียวได้ลึกประมาณ 20 cm

5.2.4 ในการเลือกช่วงพลังงานของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับที่เหมาะสมสำหรับการตรวจกับระเบิดต้องพิจารณาทั้งขนาดของฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับและขีดความสามารถในการวิเคราะห์ความแตกต่างระหว่างกับระเบิดและวัสดุอื่นร่วมกัน ในการวิจัยครั้งนี้พบว่าช่วงพลังงาน 0-12.7 keV มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจกับระเบิด

5.2.5 เมื่อมีความชื้นในดินสูงขึ้นพบว่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากชั้นดินมีค่ามากขึ้น ซึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนฟลักซ์ที่กระเจิงกลับจากกับระเบิด อย่างไรก็ตามในการวิจัยครั้งนี้พบว่าถ้าใช้ชุดหัววัด $^{252}\text{Cf}/\text{BF}_3$ จะสามารถตรวจกับระเบิด TNT มวล 249 g ที่ฝังใต้ดินทรายลึก 2.4 cm ด้วยความชื้น

ในดินประมาณ 20% ในกรณีที่ใช้ชุดหัววัด $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}/\text{BF}_3$ ความชื้นในดินที่สามารถตรวจได้แน่นอนมีค่าประมาณ 5% อย่างไรก็ตามชุดหัววัดชนิดนี้อาจสามารถตรวจกับระเบิดที่ฝังในดินด้วยความชื้น 10%

5.2.6 ฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจากการตรวจกับระเบิดจะลดลงเมื่อกับระเบิดที่มีมวลมากขึ้น สำหรับกับระเบิดมวล 249 g และ 3,100 g ค่าฟลักซ์นิวตรอนที่กระเจิงกลับจะแตกต่างกันประมาณ 5% เมื่อใช้นิวตรอนในช่วงพลังงาน 0-12.7 keV ในกรณีที่ใช้นิวตรอนช่วงพลังงาน 0-1 eV ค่าดังกล่าวจะแตกต่างกันประมาณ 18% การที่ฟลักซ์นิวตรอนลดลงเมื่อมวลของกับระเบิดเพิ่มขึ้นอาจเป็นเพราะเกิดการดูดกลืนนิวตรอนดังกล่าวด้วยเนื้อของกับระเบิดหรือเกิด self absorption

5.2.7 ปริมาณรังสีรวมที่ผู้ปฏิบัติงานตรวจกับระเบิดได้รับระหว่างการตรวจกับระเบิดมีค่าเป็น 6.61 และ 5.09 mSv/y สำหรับเครื่องตรวจกับระเบิดที่มีแหล่งกำเนิดนิวตรอนเป็น $^{241}\text{Am}-^9\text{Be}$ ตามลำดับ ค่าดังกล่าวต่ำกว่าค่าปริมาณรังสีสูงสุดที่ยอมรับได้ (15 mSv/y) ไม่ต่ำกว่า 50%

5.3 ขีดความสามารถของเทคนิค TNA

ผลการจำลองเบื้องต้นด้วยโปรแกรมมอนติคาร์โลโดยใช้ F-4 tally พบว่าเทคนิค TNA สามารถตรวจพบรังสีแกมมาที่เกิดจากอันตรกิริยานิวเคลียร์ระหว่างนิวตรอนกับ H และ N ซึ่งเป็นนิวเคลียสองค์ประกอบของกับระเบิดที่ฝังใต้ชั้นดินทราย โดยมีพลังงานที่สอดคล้องกับค่าทางทฤษฎี ดังนั้นแสดงว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค TNA ในการตรวจกับระเบิด อย่างไรก็ตามควรทำการจำลองเพิ่มเติมในลักษณะที่สมจริงโดยใช้ F-8 tally เพื่อตรวจสอบความเป็นไปได้ในทางปฏิบัติต่อไป

5.4 ข้อเสนอแนะ

1) เนื่องจากผลการจำลองแสดงให้เห็นว่ามีความเป็นไปได้ที่จะใช้เทคนิค TNB และ LNB ในการตรวจกับระเบิดโดยมีขีดความสามารถขององค์ประกอบของชุดหัววัดที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงควรทำการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อยืนยันผลการจำลองในการวิจัยครั้งนี้ในโอกาสต่อไป

2) จากการจำลองเบื้องต้นพบว่ามีความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิค TNA ในการตรวจกับระเบิด ดังนั้นควรทำการจำลองเพิ่มเติมในลักษณะที่สมจริงเพื่อยืนยันความเป็นไปได้ในทางการปฏิบัติของเทคนิค TNA

บรรณานุกรม

- Brooks, F. D., and Drogg, M. (2005). The HYDAD-D antipersonnel landmine. **Appl. Radiat. and Isot.** 63: 565-574.
- Brooks, F. D., and Drogg, M. (n.d.). **Detection of antipersonnel landmines by measuring backscattered neutrons, Part I: Detection of thermal neutrons** [online]. Available: <http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/meetings/TM29225/prcdngs/papers/B-07-I.pdf>.
- Clifford, E. T. H., McFee, J. E., Ing, H., Andrews, H. R., Tennant, D., Harper, E., and Faust, A. A. (2007). A militarily fielded thermal neutron activation sensor for landmine detection. **Nucl. Instr. and Methods.** 579: 418-425.
- Csikai, J. Hussein, E., and Rosengard, U. (2004). Application of nuclear techniques to antipersonnel landmines identification. **Appl. Radiat. and Isot.** 61: 1.
- Cornelis, J., and Sahli, H. (2003). Trends, Generic conclusion, open questions. VUB, Department ETRO, Pleinlaan2, B-1050 Brussel. (Paper presented at the international conference on Requirements and Technologies for the Detection, Removal and Neutralization of Landmine and UXO, 15-18 September 2003)
- Csikai, J., Dóczy, R., and Király, B. (2004). Investigation on landmine detection by neutron-base techniques. **Appl. Radiat. and Isot.** 61: 11-20.
- Csikai, J., Király, B., and Buczkó, Cs. M. (2002). Targets for bulk hydrogen analysis using thermal neutrons. **Nucl. Instr. and Methods.** 480: 166-170.
- Csikai, J., Király, B., and Dóczy, R. (2001). Application of neutrons to plastic landmines detection. Second RCM on Nuclear Demining Techniques, St. Petersburg, 11-14 September 2001, IAEA/PS/RC-799-2, pp. 46-54.
- Datema, C. P., Bom, V. R., and van Eijk, C. W. E. (2002). **DUNBLUD: the university neutron backscattering landmine detector** [online]. Available: <http://www.demine.org/SCOT/Papers/Dateman.pdf>
- Dóczy, R. Csikai, J. Fayed-Hassen, M. and Ali, A.M. (2003). Determination of average activating thermal neutron flux in bulk sample. In **Fourth conference on Nuclear and Particle Physics 2003** (pp. 11-15). Fayoum, Egypt.
- Gozani, T. (1996). Inspection techniques based on neutron interrogation. Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering conference on Physics-Based

- Technologies for the Detection of Contraband; 19-20 November 1996; Boston, Massachusetts. 2936: 9-20.
- Hussein, E. M. A. (1992). Detection of explosive materials using nuclear radiation: a critical review. In W. H. Makky (ed.). **The Aviation Security Problem and Related Technologies** (pp. 126-136). Critical Reviews of Optical Science and Technology, Vol. CR42.
- IAEA (1986). Gamma, x-ray and neutron techniques for the coal industry. **Proceedings of an Advisory Group Meeting on Gamma, X-ray and Neutron Techniques for the Coal Industry**, (pp. 28-29). Vienna, Austria : IAEA.
- IAEA. (n.d.). **Table II. Energy-ordered table of most intense thermal neutron capture gamma rays** [online]. Available: <http://www-nds.iaea.org/pgaa/data/eodoc.pdf>
- International Commission on Radiological Protection. (1997). **General Principles for the Radiation Protection of Worker**, 75. 27(1).
- Király, B. Csikai, J. (2001). Location and identification of concealed objects using neutrons. In **Proceedings of Seventh International Conference on Applications of Nuclear Techniques 2001** (pp. 1-5). Crete, Greece.
- Király, B. Oláh, L. and Csikai, J. (2001). Neutron-based techniques for detection of explosives and drugs. **Radiat. Phys.** 61: 781-784.
- Maucec, M., and de Meijer, R. J. (2002). Monte carlo simulations as a feasibility tool for non-metallic land-mine detection by thermal-neutron backscattering. **Appl. Radiat. and Isot.** 56: 837-846.
- Spits, A. M. J., Op Den Kamp, A. M. F., and Groupelaar, H. (1970). Gamma rays from thermal-neutron capture in natural and ^{28}Si enriched silicon. **Nuclear Physics**. A145: 449-460.
- Tsoufanidis, N. (1995). **Measurement and detection of radiation** (2nd ed.). Washington, DC : Taylor and Francis. (pp. 550-553)
- X-5 Monte Carlo Team. (2003). **MCNP-A general Monte Carlo N-particle transport code** (5th ed.). Diagnostics Applications Group, Los Alamos National Laboratory; Los Alamos, NM, 912.

ประวัตินักวิจัย

พันเอก ดร. วรศิษย์ อุทัย ตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ เกิดวันที่ 9 กรกฎาคม 2492 ณ จังหวัด นครพนม วุฒิการศึกษา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ทบ.) จากโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า พ.ศ. 2517 Master of Science (Physics) จาก Emory University (U.S.A.) พ.ศ. 2524 Ph.D. (Nuclear Physics) จาก Emory University (U.S.A.) พ.ศ. 2528 ผลงานทางวิชาการ เขียนตำราและเอกสารประกอบการ สอน 7 เรื่อง เขียนบทความทางวิชาการ 7 เรื่อง และรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ 3 ฉบับ สถานที่ ติดต่อ สาขาวิชาฟิสิกส์ สำนักวิชาวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี อำเภอเมือง จังหวัด นครราชสีมา 30000

