การประเมินอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร

นางสาวฝนแก้ว เทพสุต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3525-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ASSESSMENT OF X-RAY DOSE RATE AROUND A MOBILE CARGO CONTAINER INSPECTION SYSTEM OF THE THAI CUSTOMS DEPARTMENT

Miss Fonkaew Thepphasut

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2005
ISBN 974-17-3525-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร
โดย	นางสาวฝนแก้ว เทพสุต
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

.... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

.... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

.... กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นางสาวฝนแก้ว เทพสุต: การประเมินอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร (ASSESSMENT OF X-RAY DOSE RATE AROUND A MOBILE CARGO CONTAINER INSPECTION SYSTEM OF THE THAI CUSTOMS DEPARTMENT) อ.ที่ปรึกษา: รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์, 93 หน้า. ISBN 974-17-3525-1.

ได้ใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP-4A คำนวณหาค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี และหรือเทอร์โมลูมิเนสเซนโดสิมิเตอร์ และผลจากการคำนวณโดยผู้ผลิต ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ได้แก่ ไม่มีตู้บรรจุสินค้า มีตู้บรรจุสินค้า และมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้าต่างชนิดกัน ผลการวิจัยพบว่า ผลจากการคำนวณกับการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีนั้น มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน และค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นรอบระบบตรวจสอบ มีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานเมื่อประเมินตามเกณฑ์ความปลอดภัยทางด้านรังสีตามคำแนะนำของ ICRP 60 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคำนวณโดยวิธีนี้สามารถใช้ประมาณค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา....นิวเคลียร์เทคโนโลยี...... ลายมือชื่อนิสิต ....

สาขาวิชา..นิวเคลียร์เทคโนโลยี....... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ....

ปีการศึกษา...2548..................... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..

##4670633421 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: MCNP / Monte Carlo Method / X-ray Dose Rate

FONKAEW THEPPHASUT: ASSESSMENT OF X-RAY DOSE RATE AROUND A MOBILE CARGO CONTAINER INSPECTION SYSTEM OF THE THAI CUSTOMS DEPARTMENT. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.NARES CHANKOW, THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF ATTAPORN PATTARASUMANT, 93 PP. ISBN 974-17-3525-1.

The x-ray dose rates around a mobile cargo container inspection system of the Thai Customs Department were calculated by the MCNP-4A computer code. The results were compared with the measured absorbed dose rate obtained from the experiments by a survey meter, the thermoluminesent dosimeter (TLD) and from the analytical calculation supplied by the manufacture. The comparisons were done for various conditions,i.e. the inspection system with cargo container, the inspection system without cargo container and the inspection system with cargo container fully filled with goods. The results obtained from the MCNP calculations were found to conform with the actual measurement of the x-ray dose rate. The results showed that the workers can safely operate, according to the value recommended by the International Commission on Radiology Protection Recommendation number 60 (ICRP 60). It was suggested that the Monte Carlo calculation could be used in estimating the x-ray dose rate around an inspection system.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department ....Nuclear Technology......	Student's signature..
Field of study...Nuclear Technology......	Advisor's signature..
Academic year......2005.....................	Co-advisor's signature..................................

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีทุกท่าน

ขอขอบพระคุณกรมศุลกากรที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ และเจ้าหน้าที่ศูนย์ปฏิบัติการตรวจสอบตู้คอนเทนเนอร์ด้วยเอกซ์เรย์ทุกท่านที่อำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน และ ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ศิริ ศรีมโนรถ กองรังสี และเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ ที่ให้คำแนะนำ และความอนุเคราะห์เทอร์โมลูมิเนสเซนต์โดสิมิเตอร์และเครื่องอ่านที่ใช้สำหรับทำการทดลอง

ขอขอบคุณ คุณธนัญชัย พิรุณพันธ์ ที่ให้ความรู้ และคำแนะนำ เกี่ยวกับการใช้โปรแกรม MCNP-4A และคุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี้ สำหรับความช่วยเหลือทุกอย่างที่เป็นประโยชน์ในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และ น้องๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ และบุคลากรในภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและคำแนะนำที่มีประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนให้ทุนสำหรับอุดหนุนงานวิจัย ในการทำวิจัยมา ณ ที่นี้

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฌ
สารบัญภาพ	ญ

บทที่

1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2 ทฤษฎี	5
2.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์	5
2.2 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์	5
2.3 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน	7
2.4 ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้	8
2.5 หลักการคำนวณด้วยวิธีมอลติคาร์โล	11
2.6 Monte Carlo N-Particle Transport Code System Version 4A (MCNP-4A)	16
2.7 เครื่องสำรวจรังสี (survey meter)	32
2.8 สารวัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนต์ (Thermoluminesence dosimeter:TLD)	33
2.9 การป้องกันอันตรายจากรังสี	34

บทที่ หน้า
3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.. 35
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.. 36
3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP-4A.............................. 36
3.3 การทดลองวัดปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A 45

4 ผลการจำลองและผลการวิจัยเปรียบเทียบ.. 51
4.1 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้า แบบเคลื่อนย้ายได้.. 51
4.2 ผลการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสีเปรียบเทียบกับ แบบจำลองระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้.................................. 58
4.3 การประเมินความปลอดภัยด้านรังสีของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบ เคลื่อนย้ายได้.. 71

5 สรุป และข้อเสนอแนะ.. 75
5.2 สรุป.. 75
5.3 ข้อเสนอแนะ.. 76

รายการอ้างอิง.. 77
ภาคผนวก.. 79
ภาคผนวก ก 80
ภาคผนวก ข 91
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.. 93

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

3.1 พารามิเตอร์ในคำสั่งนิยามพื้นผิว.. 40

4.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MCNP-4A กับการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากวัดรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า…………………………………………………………………….. 59

4.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MCNP-4A กับการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า.. 62

4.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MCNP-4A เมื่อสินค้าที่อยู่ในตู้บรรจุสินค้าต่างชนิดกัน ………………………………………………………………… 65

4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MCNP-4A กับการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า ในบริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยตามที่ประเทศผู้ผลิตกำหนด....................... 69

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	แผนภาพการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง..	5
2.2	การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว และสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์	6
2.3	การกระเจิงแบบคอมป์ตัน……………………………..……...............................	7
2.4	ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้รุ่น THSCAN MT 1213 LT..................	8
2.5	ส่วนประกอบในการเกิดภาพดิจิตอลของรังสีเอกซ์………………………………………	9
2.6	ภาพที่ได้จากระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้....................................	9
2.7	ลักษณะของรังสีเอกซ์รูปพัดและการเรียงตัวของหัววัดรังสี...	10
2.8	การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์………………………………………………………………..	11
2.9	ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ………………………..	12
2.10	ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของการแจกแจงปกติ………………………….	13
2.11	ภาคตัดขวางของเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณ..	22
2.12	เครื่องสำรวจรังสีแบบ Geiger Muller counter………………………………………	32
2.13	เครื่องสำรวจรังสีที่มีหัววัดรังสีแบบ scintillation counter (NaI(Tl))……………………	32
2.14	แสดงขบวนการเกิดแสงเมื่อผลึก TLD ได้รับรังสี..	33
3.1	รูปแบบการจัดวางระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ โดยไม่มีตู้บรรจุสินค้า ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A……………………………………...	37
3.2	รูปแบบการจัดวางระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้โดยมีตู้บรรจุสินค้าเปล่า ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A……………………………………	37
3.3	รูปแบบการจัดวางระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้โดยมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A ……………………………	38
3.4	พารามิเตอร์นิยามเซลล์ดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A…………………………..	39
3.5	ระบบแกนพิกัดฉาก X Y Z ที่กำหนดในการสร้างแบบจำลองของ MCNP-4A...…………	41
3.6	ตัวอย่างคำสั่งนิยามพื้นผิวดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A………………………	41
3.7	ตัวอย่างคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสีดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A………………	42
3.8	ตัวอย่างคำสั่งนิยามตัวประมาณค่าดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A……………..	44
3.9	ตัวอย่างคำสั่งนิยามชนิดของวัสดุดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A………………..	44
3.10	ตัวอย่างคำสั่งนิยามหยุดการทำงานดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A…………	45
3.11	เครื่องสำรวจรังสี (survey meter) Model GH-102A ของประเทศผู้ผลิต……………	46

รูปที่ หน้า

3.12 สาร Thermoluminesence dosimeter หรือ TLD ชนิด 700.................................. 47
3.13 เครื่องฉายรังสีโคบอลต์ 60 Eldorado model G…………………………..………… 47
3.14 เครื่องอ่าน TLD รุ่น M 3500……………………………………………………….... 48
3.15 การแบ่งพลังงานจากสเปกตรัมของรังสีเอกซ์………………………………………… 50
4.1 ภาพแสดงผลการทดลองจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของประเทศผู้ผลิต……………………………………….. 51
4.2 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 1 μGy/h ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า……………………………………………………………………………… 52
4.3 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 2.5 μGy/h ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า ……………………………………………………………………………. 53
4.4 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 1 μGy/h ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า.. 54
4.5 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 2.5 μGy/h ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า….. 55
4.6 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ทำการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยแบบจำลอง MCNP-4A….. 56
4.7 กราฟเปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ในกรณีที่มีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า โดย MCNP-4A ………………….. 57
4.8 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในกรณีไม่มีตู้บรรจุสินค้า................ 58
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต เครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า.......................... 60
4.10 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในกรณีมีตู้บรรจุสินค้าเปล่า........... 61
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดลองของประเทศผู้ผลิต เครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า.......................... 63
4.12 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ใช้วัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี.......................... 64

รูปที่ หน้า

4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในกรณีไม่มีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้าเปล่า.. 66
4.14กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าพลาสติกภายในตู้บรรจุสินค้า.. 66
4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าอลูมิเนียมภายในตู้บรรจุสินค้า.................................... 67
4.16 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณ และวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี.. 68
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในบริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยตามที่ประเทศผู้ผลิตกำหนด........................ 70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

นับเป็นครั้งแรกของประเทศไทยที่ได้นำเอาเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์พลังงานสูงเข้ามาใช้ในการตรวจสอบ โดยมุ่งหวังว่าจะเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้การทำงานด้านการตรวจสอบสินค้าที่ผ่านเข้าออกภายในประเทศ ซึ่งการตรวจสอบโดยวิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก ผู้ปฏิบัติงานไม่ต้องเปิดตู้บรรจุสินค้าซึ่งใช้เวลามาก ระยะเวลาที่ใช้ในการตรวจสอบนั้นสั้นเพียง 1-2 นาทีต่อตู้สินค้า 1 ตู้ และที่สำคัญสามารถตรวจสอบสินค้าผิดกฎหมายที่ลักลอบเข้าประเทศได้ ทำให้การทำงานด้านนี้เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพเกิดประโยชน์สูงสุดในการป้องปรามการกระทำผิดกฎหมายและรักษาผลประโยชน์ของรัฐอย่างเต็มที่

อย่างไรก็ตาม ในการตรวจสอบด้วยระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้นั้นจะมีอัตราปริมาณรังสีเอกซ์พลังงานสูงในบริเวณรอบ ๆ ระบบการตรวจสอบ ซึ่งทางหน่วยงานด้านความปลอดภัยทางรังสีของประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งเป็นประเทศผู้ผลิตได้ทำการตรวจวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบบริเวณไว้แล้ว แต่ก็เป็นเฉพาะกรณีไม่มีตู้บรรจุสินค้า และกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่าเท่านั้น จึงไม่มีข้อมูลสำหรับกรณีสินค้าต่างชนิดกันภายในตู้บรรจุสินค้า ซึ่งจะมีการกระเจิงของรังสีเอกซ์แตกต่างกันตามชนิดของสินค้า วิทยานิพนธ์นี้จึงได้เกิดขึ้นเพื่อตอบคำถามว่าทำอย่างไรจึงจะใช้เครื่องมือที่รัฐสั่งซื้อเข้ามาด้วยราคาที่สูงมากนี้อย่างปลอดภัย หรือมีอันตรายน้อยที่สุดต่อผู้ปฏิบัติงาน และผู้เกี่ยวข้องทุกคน และที่สำคัญบุคคลากรสามารถทำงานด้วยความมั่นใจว่าจะปลอดภัยจากอันตรายของรังสีโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ The International Commission on Radiology Protection Recommendation number 60 (ICRP 60) ซึ่งจะส่งผลให้การปฏิบัติงานเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ และรัฐเองก็เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้เครื่องมือนี้อย่างคุ้มค่า

การเกิดอันตรกิริยาของอนุภาครังสี เช่น โฟตอน, อิเล็กตรอน, นิวตรอน กับสสารต่าง ๆ สามารถทำการจำลองได้ด้วยคอมพิวเตอร์ โดยใช้เทคนิคการจำลองแบบมอนติคาร์โล ซึ่งได้มีการตรวจสอบ และเป็นที่ยอมรับในความถูกต้องของการคำนวณโดยการจำลองดังกล่าวนี้สามารถนำมาประยุกต์ใช้กับระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ผลที่ได้จากการจำลองนั้นสามารถนำมาใช้เป็นแนวทางในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีของระบบอื่น ๆ เช่น ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบติดตั้งประจำที่ (fixed system) ในการวัดหาอัตราปริมาณรังสี

รอบระบบการตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้นั้นต้องสิ้นเปลืองเวลา และต้องอาศัยความชำนาญในการปฏิบัติงาน การจำลองด้วยคอมพิวเตอร์จะสามารถลดปัญหาดังกล่าว รวมทั้งยังลดการใช้งานของเครื่องมือวัดปริมาณรังสีอีกด้วย

ในการทำวิทยานิพนธ์นี้ ได้ใช้การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) ซึ่งการคำนวณด้วยวิธีนี้สามารถช่วยในการประเมินหาค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าที่เกิดขึ้นได้ กล่าวคือ จะทำการจำลองระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ และทำการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ โดยกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายและจะมีความแม่นยำถูกต้องค่อนข้างสูงสำหรับระบบจำลองที่สร้างขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร โดยใช้โปรแกรม MCNP-4A ในการสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยเครื่องวัดรังสี

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในบริเวณรอบ ๆ ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้รุ่น THSCAN MT 1213 LT ของกรมศุลกากร โดยใช้โปรแกรม MCNP-4A ในการสร้างแบบจำลอง

1.3.2 ศึกษาผลของชนิดสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้าที่มีต่ออัตราปริมาณรังสี

1.3.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการวัด โดยใช้เครื่องวัดรังสี ได้แก่ Thermoluminesent dosimeter (TLD) และ หรือ เครื่องสำรวจรังสี (survey meter)

1.4 วิธีการดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 สร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยใช้โปรแกรม MCNP-4A

1.4.3 คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าเมื่อไม่มีสินค้า และมีสินค้าชนิดต่าง ๆ บรรจุอยู่ในตู้บรรจุสินค้า

1.4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากเครื่องวัดปริมาณรังสี

1.4.5 นำผลที่ได้ไปประเมินความปลอดภัยด้านรังสีตามคำแนะนำของ ICRP 60

1.4.6 สรุปผลงานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

1.5.1 ข้อมูลที่ได้มีประโยชน์ในด้านการดูแล และควบคุมความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของบุคคลากรผู้ปฏิบัติงาน และผู้ที่เกี่ยวข้องของกรมศุลกากร

1.5.2 รูปแบบการสร้างแบบจำลองที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีของระบบอื่น ๆ ได้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ปี 2542 ทรงศักดิ์ องค์วัฒนกุล[1] แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการวิจัยเรื่อง การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อหาความแรงรังสีของสารรังสีติดตามสำหรับฉีดเข้าไปในระบบของเหลว ได้ให้การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล โดยใช้โปรแกรม MCNP-4A ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการนับรังสีแกมมาพลังงาน 143 keV จากสารละลาย Tc-99m ในน้ำซึ่งบรรจุในถังและท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ถึง 25 ซม.โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อใช้หัววัด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว X 2 นิ้ว ปรากฏว่าการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลหาประสิทธิภาพการนับรังสีนั้นเป็นสัดส่วนกับประสิทธิภาพการนับรังสีซึ่งได้จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าการคำนวณด้วยวิธีนี้สามารถใช้ในการประมาณความแรงของรังสีที่ต้องการฉีดเข้าไปในระบบเพื่อหาอัตราการไหล ระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบ และระยะเวลาในการผสมของสาร

1.6.2 ปี 2543 กานต์พงศ์ ชูพันธ์[2] ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการวิจัยเรื่อง การจำลองการกระเจิงแบบคอมป์ตันของรังสีแกมมาในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีมอนติคาร์โล โดยทำการศึกษาเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโตรสโคปีในการหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้การจำลองการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน โดยใช้คอมพิวเตอร์โค้ด MCNP-4A การประเมินผลการจำลองทำโดยพิจารณาค่าความเปรียบต่าง สำหรับแบบจำลอง

พบว่าค่าความเปรียบต่างเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเส้น และลดลงตามความลึก นอกจากนี้ค่าความเปรียบต่างเพิ่มขึ้น เมื่อสอดเหล็กเส้นเข้าไปยังลำรังสีที่ตกกระทบ จนถึงค่าประมาณ 0.173 ซม. ที่ระยะ 2.914 ซม. จากนั้นความเปรียบต่างเริ่มลดลงแล้วคงที่

1.6.3 ปี 2545 ธนัญชัย พิรุณพันธ์[3] ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาด้วย MCNP-4A. ได้ทำการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล โดยใช้คอมพิวเตอร์โค้ด MCNP-4A ในการคำนวณประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจากต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาตรที่มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก และกล่อง รวมทั้งที่เป็นเส้น และจุด โดยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเชื่อมประสานกับผู้ใช้เพื่อให้ผู้สามารถป้อนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับโค้ดคอมพิวเตอร์ได้โดยง่าย ผลที่ได้จากการคำนวณกับวิธีวิเคราะห์เมื่อต้นกำเนิดรังสีมีลักษณะแบบง่าย ๆ คือ แบบจุด และแบบเส้น ซึ่งก็พบว่าได้ผลตรงกัน ต่อจากนั้นได้ตรวจสอบผลการคำนวณจากต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาตร คือ แบบทรงกลม ทรงกระบอก และกล่อง กับผลจากการทดลองโดยใช้ไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ตะกั่ว-214 บิสมัท-214 โปแตสเซียม-40 และ ทัลเลียม-208 ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพของพีคที่ได้จากโค้ด MCNP-4A มีค่าสูงกว่าที่ได้จากผลการทดลองประมาณ 10 – 20 % ความแตกต่างนี้เกิดขึ้นจากประสิทธิภาพทั้งหมดและการปรับตั้งค่าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้

1.6.4 ปี 2545 M.Sohrabpour และคณะ[11] แห่ง Gamma Irradiation Center Atomic Energy Organization of Iran ได้วิจัยเรื่อง Gamma irradiator dose mapping simulation using the MCNP code and benchmarking with dosimetry ได้ทำการสร้างแบบจำลองการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีในระบบต้นกำเนิดรังสีแกมมา IR-136 โดยใช้พื้นฐานการคำนวณด้วยวิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โล สามารถคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีโดยแสดงผลเป็น isodose curves และปริมาณรังสีสะสม (cumulative dose) ทำการตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองวัดปริมาณรังสีด้วย reference standard dosimeters ได้แก่ polymethyle-methacrylate, Fricke, ethanol-chlorobenzene และ potassium dichromate dosimeter

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์ [10]

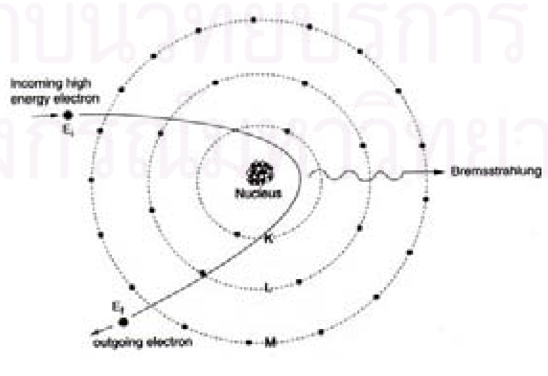
รังสีเอกซ์เป็นรังสีที่มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีมวล เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง มีช่วงความยาวคลื่นประมาณ 0.01-100 °A (อังสตรอม) เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง และไม่ถูกทำให้เบี่ยงเบนโดยสนามแม่เหล็กและไฟฟ้า สามารถทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆได้ดี เมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางแตกตัวเป็นประจุได้จากการชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา

2.2 กระบวนการเกิดรังสีเอกซ์

2.2.1 **รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง** (continuous x-ray)

เป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่อง กระจายจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุด (บางครั้งเรียกว่า polychromatic หรือ white x-ray) เกิดจากอนุภาคพลังงานสูง เช่น โปรตอน อิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงระหว่างนิวเคลียสกับวงโคจรชั้นในของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาปรากฏการณ์นี้เรียกว่า “Bremsstrahlung” หรือ “braking radiation” ดังแสดงในรูปที่ 2.1 การสูญเสียพลังงานของอนุภาคเป็นไปแบบสุ่ม (random) รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจึงมีพลังงานแบบต่อเนื่อง

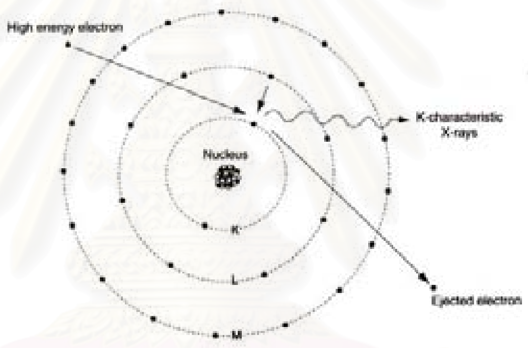
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



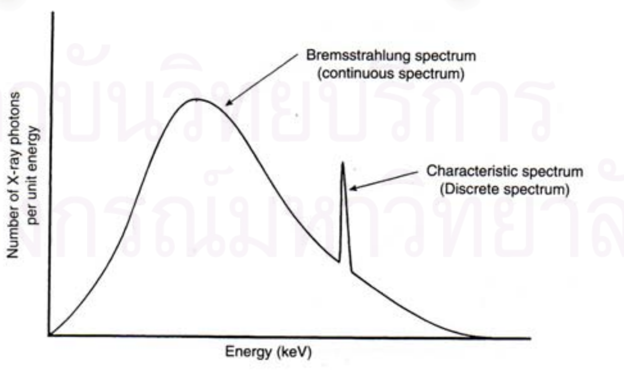
รูปที่ 2.1 แผนภาพการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

2.2.2 รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic X-ray)

เป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเดี่ยว (monochromatic) เกิดจากการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรวงนอกแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนวงในที่หลุดออกไป จึงมีระดับพลังงานที่แน่นอนเฉพาะโครงสร้างอะตอมของธาตุนั้น ๆ มีโอกาสเกิดได้จากอิเล็กตรอนพลังงานสูงทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้นโคจร K, L หรือ M หรือถูกรังสีเอกซ์จากอันตรกิริยา Bremsstrahlung กระตุ้นแล้วอิเล็กตรอนของชั้นโคจรนั้นหลุดออกมา เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร ทำให้อะตอมอยู่ในสภาวะขาดอิเล็กตรอน อะตอมนั้นจะรักษาความสมดุลโดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่าจะเข้าไปแทนที่ว่างจึงลดระดับพลังงานลงมาด้วยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ระดับพลังงานเท่ากับวงโคจรชั้นในก่อนเข้ามาแทนที่ในที่ว่าง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจะมีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของธาตุนั้น ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



ก. แผนภาพการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว



ข. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ที่ประกอบด้วยรังสีเอกซ์ต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

รูปที่ 2.2 การเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว และสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.3 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) [10]

เมื่อรังสีเอกซ์เคลื่อนที่เข้าชนอะตอมของสสารจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร พลังงานบางส่วนอาจสูญเสียให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอมซึ่งเป็นไปตามหลักการคงตัวของโมเมนตัมและพลังงาน พลังงานของรังสีเอกซ์จะกระเจิงทำมุม θ กับแนวการเคลื่อนที่เดิมดังรูปที่ 2.3 โดยพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าชน ($h\nu$) และพลังงานของรังสีเอกซ์ที่สะท้อนออกไปมีความสัมพันธ์กันดังสมการ 2.1 โดยจะเกิดการกระเจิงกลับมากที่สุดเมื่อมุม $\theta = 180^{o}$

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1+\alpha(1-\cos\theta)} \qquad 2.1$$

โดยที่ $\alpha = \frac{h\nu}{m_0c^2}$

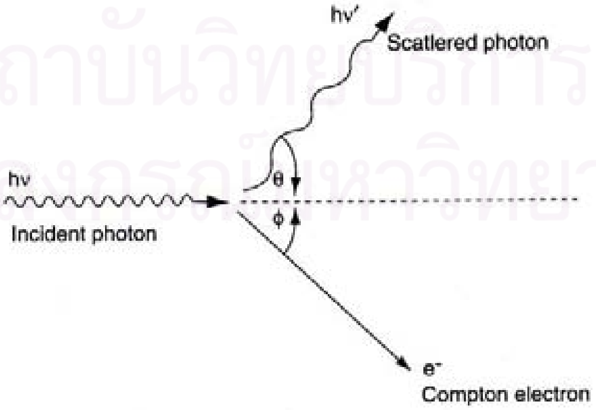
เมื่อ $h\nu$ คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ที่ตกกระทบทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอน

$h\nu'$ คือ พลังงานของรังสีเอกซ์ที่กระเจิงกลับ

c คือ ความเร็วแสง

m_0 คือ มวลที่หยุดนิ่งของอิเล็กตรอน

m_oc^2 มีค่าเท่ากับ 0.511 MeV



รูปที่ 2.3 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

โอกาสของการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันขึ้นอยู่กับสสารที่มีค่าเลขอะตอมสูง และจะลดลงเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้น ซึ่งประมาณได้ดังสมการ

$$\text{โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน} \approx \frac{Z}{E_{\gamma}} \text{ (ค่าคงตัว)} \qquad 2.2$$

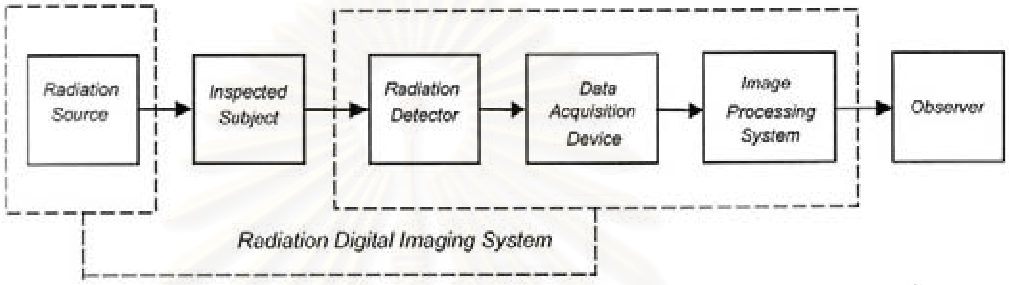
2.4 ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ [5, 6]

ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้รุ่น THSCAN MT 1213 LT มีลักษณะเป็นรถตู้บรรจุสินค้า ทำการหมุน และเคลื่อนตัวต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ทำหน้าที่ผลิตรังสีเอกซ์พลังงานสูงสุด 2.5 MeV โดยใช้หลักการของเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กตรอนตามแนวเส้น (electron linear accelerator,LINAC) คือ แหล่งกำเนิดไฟฟ้าศักย์สูง (power supply) จะป้อนไฟให้กับมอดูเลเตอร์ (modulator) ซึ่งทำหน้าที่แปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC voltage input) เป็นไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงและส่งให้กับแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) และหลอดกำเนิดคลื่นไมโครเวฟชนิดแม็กนีตรอน (magnetron) หลังจากนั้นทั้งอิเล็กตรอน และคลื่นไมโครเวฟจะเข้าสู่ท่อเร่งอนุภาค (accelerating tube) แบบสแตนดิงเวฟ (standing-wave) ภายในท่อเร่งอนุภาคจะเกิดการเสริมกันของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของไมโครเวฟทำให้เกิดความเข้มสนามไฟฟ้าภายในส่งผลให้อิเล็กตรอนที่ถูกเร่งมีพลังงานสูงขึ้นจนมีความเร็วเข้าใกล้ความเร็วแสง หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าชนเป้า (target) ทำให้เกิดรังสีเอกซ์ขึ้น

รูปที่ 2.4 ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้รุ่น THSCAN MT 1213 LT

หลักการในการเกิดภาพดิจิตอลของรังสีเอกซ์ (x-ray digital image) มีหลักการทำงานดังแผนภาพรูปที่ 2.5 ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนดังนี้

1. ต้นกำเนิดรังสี (Radiation source)
2. หัววัดรังสี (Radiation detector)
3. ระบบการเก็บข้อมูลเพื่อบันทึกภาพ (Data acquisition system)
4. ระบบการประมวลผลภาพ (Image processing system)



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบในการเกิดภาพดิจิตอลของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่ถูกผลิตขึ้นจะทะลุผ่านตู้บรรจุสินค้า และสินค้าที่อยู่ภายใน เมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าสู่หัววัดรังสี หัววัดรังสีจะทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีเอกซ์ไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า (electrical signals) ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มของรังสี ต่อจากนั้นสัญญาณทางไฟฟ้าจะถูกขยายเป็นแรงดันกระแสไฟฟ้า (voltage signal)โดยภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier) จากนั้นจะเข้าสู่ระบบการเก็บข้อมูลเพื่อบันทึกภาพ ทำการเลือกสัญญาณและจะเปลี่ยนสัญญาณอนาล็อก(analog signal) ไปเป็นสัญญาณดิจิตอล โดยคอนเวอร์เตอร์ (A/D converter) หลังจากนั้นนำสัญญาณที่ได้เข้าสู่ระบบการประมวลผลภาพ ทำให้ได้ภาพแสดงออกมาบนคอมพิวเตอร์ แสดงดังรูปที่ 2.6

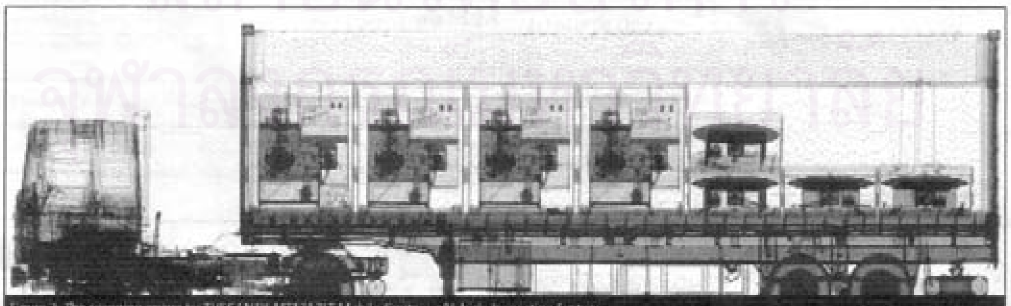
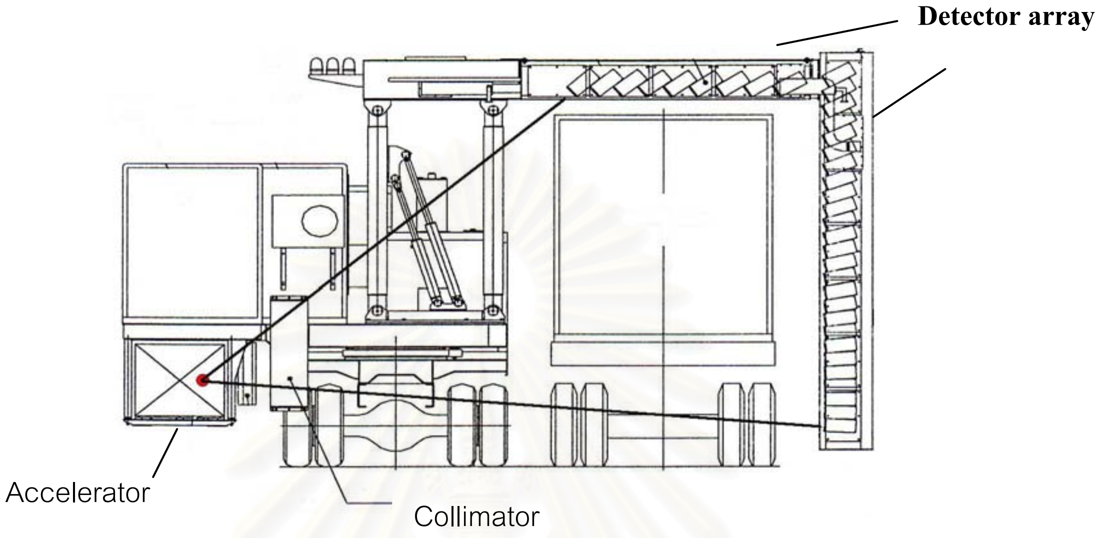


Figure 2. The scanning image by THSCAN™ MT1213LT Mobile Container/Vehicle Inspection System.

รูปที่ 2.6 ภาพที่ได้จากระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้

ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้จะผลิตรังสีเอกซ์ออกมาในลักษณะของรังสีรูปพัด (fan beam) และหัววัดรังสี (detector) ที่ใช้คือไอออนไนเซชันแชมเบอร์ ที่มีลักษณะเป็นรูปปากกา (Pen-shaped) จำนวนทั้งหมด 576 หัว วางเรียงตัวกันเป็นรูปตัวแอล (L-shaped) ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะของรังสีเอกซ์รูปพัดและการเรียงตัวของหัววัดรังสี

เมื่อรังสีเอกซ์ของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ออกมา และผ่านวัสดุที่ต้องการตรวจสอบภายในตู้บรรจุสินค้า รังสีเอกซ์จะถูกลดทอนลง หรือความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลง ซึ่งความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านวัสดุไปได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่อไปนี้ คือ [4]

1. พลังงานของรังสีและความเข้มของรังสีที่ตกกระทบ
2. ชนิดและความหนาของวัสดุ

ที่พลังงานรังสีหนึ่ง ความเข้มรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านไปได้โดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆ กับตัวกลางเลย และมีความสัมพันธ์กับความเข้มรังสีที่ตกกระทบวัสดุ ตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$I = I_0 e^{-(\mu x)} \tag{2.3}$$

โดยที่ I คือ ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ทะลุผ่านวัสดุ

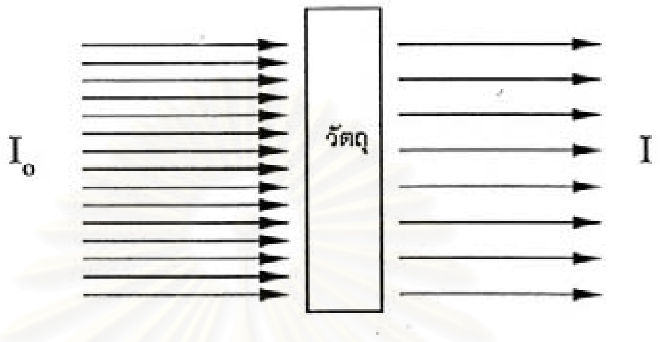
I_0 คือ ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ก่อนการทะลุผ่านวัสดุ

μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเอกซ์เชิงเส้น

x คือ ความหนาของวัสดุ มีหน่วยเป็น ซม.

หรือ $$HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

HVL คือ ความหนาของวัสดุที่ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์ลดลงครึ่งหนึ่ง



รูปที่ 2.8 การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์

2.5 หลักการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล [2, 3, 9]

หากพิจารณาความสัมพันธ์ของการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) ในด้านของเทคโนโลยีนิวเคลียร์ การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) นั้นเป็นวิธีการคำนวณแบบจำเพาะที่ใช้แก้ปัญหาการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งอนุภาคใดๆ มีการเคลื่อนที่แบบสุ่มไม่มีทิศทางแน่นอน และรูปแบบของอนุภาคนั้น ๆ จะขึ้นอยู่กับ 7 มิติ ที่เกี่ยวข้องกันซึ่งได้แก่ มิติของเวลา (Time) 1 มิติ มิติของตำแหน่งที่อยู่ (Position) 3 มิติ คือ ตำแหน่งในพิกัดมุมฉากทั้ง 3 แกนอันได้แก่ ตำแหน่งในแกน X แกน Y และแกน Z มิติของทิศทาง (Direction) 2 มิติ อันได้แก่ เวกเตอร์ (Vector) ที่มีทิศทางการเคลื่อนซึ่งอาจจะระบุได้ด้วยมุมก้ม (มุมเงย) กับ มุมกวาด และมิติสุดท้ายก็คือมิติของพลังงานอีกหนึ่งความสัมพันธ์

หลักการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นจะทำการกำหนดทางเดินสุ่ม (Random Walk) ของอนุภาคที่พิจารณาว่ามีทิศทางและพฤติกรรมอย่างไรโดยอาศัยตัวแปรต่าง ๆ อันได้แก่ ชนิดของอนุภาค (Source Particle) รูปทรงและรูปแบบการจัดวางของระบบวัด (System Geometry) ชนิดและค่าความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุและอนุภาคที่สนใจ (Material and Cross Section) รวมทั้งรูปแบบการประเมินจำนวนครั้งการเกิดอันตรกิริยา (Tallying or Scoring of quantity of Interest) การคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้า

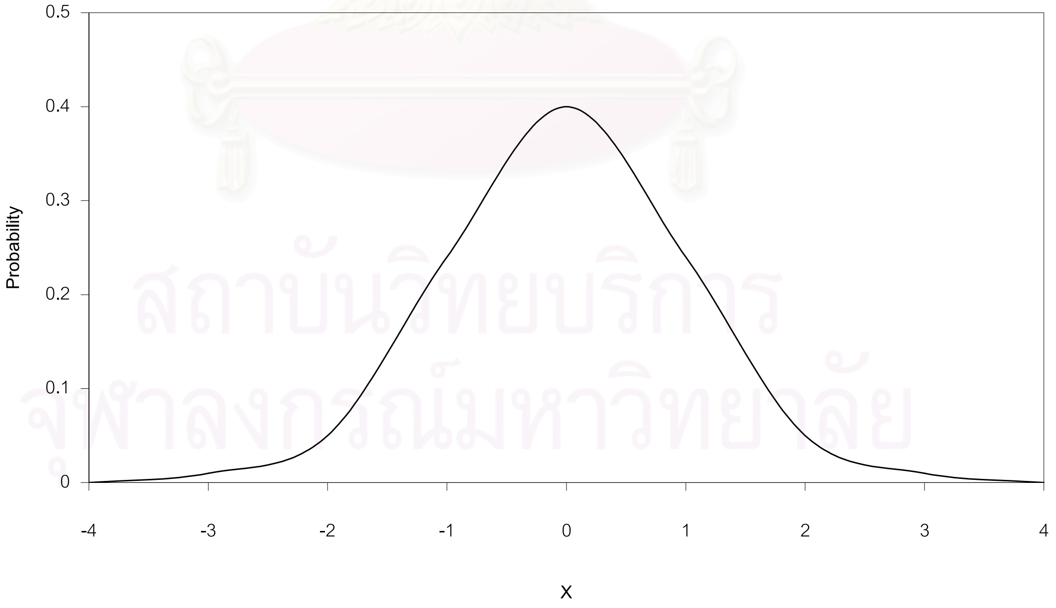
ภายใต้เงื่อนไขและรูปแบบต่าง ๆ ที่กำหนดกระทำได้โดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์การเกิดอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอนุภาคกับวัสดุที่พิจารณานั้นจากทางเดินสุ่มที่ได้จากตัวแปรข้างต้น

การกำหนดทางเดิมสุ่มนั้นจะกำหนดโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการสุ่มตัวเลข (Random Number) และทฤษฎีความน่าจะเป็น (Theory of Probability) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้เมื่อกำหนดให้ X เป็นโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจของอนุภาคที่พิจารณา และ X นั้นจัดเป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง (Continuous Random Variables) เพราะฉะนั้นโอกาสในการที่จะเกิดเหตุการณ์ X ซึ่งจะเกิดอยู่ระหว่างเหตุการณ์ a และเหตุการณ์ b คือ

$$P\{a \leq X \leq b\} \qquad 2.4$$

ทฤษฎีความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้องในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อจะกำหนดทางเดิมสุ่มนั้น อาศัย 2 ฟังก์ชันที่สำคัญคือ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) และ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (The Cumulative Probability Distribution Function)

1. **ฟังก์ชั่นความหนาแน่นของความน่าจะเป็น** (Probability Density Function)



รูปที่ 2.9 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของการแจกแจงปกติ

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น f(X) มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นดังนี้

$$f(X)\Delta X = P\left\{X \le X' \le X + \Delta X\right\} \qquad 2.5$$

ถ้า ΔX เข้าใกล้ศูนย์จะได้ $f(X)\Delta X$ ก็คือโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ X' ซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์อยู่ระหว่าง X และ $X + \Delta X$ จากนิยามดังกล่าวจะได้ว่า

$$\int_a^b f(X)dX = P\{a \le X \le b\} \qquad 2.6$$

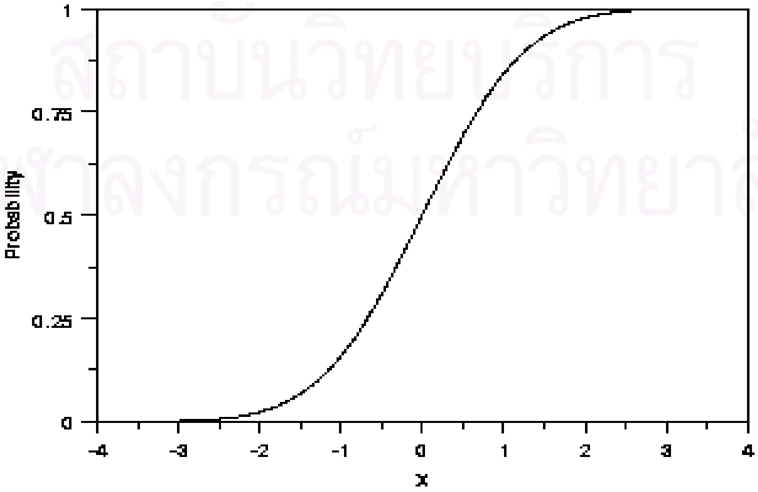
ถ้าค่า X เป็นค่าที่อยู่ระหว่าง ∞ และ $-\infty$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) เพื่อใช้ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลได้ว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(X)dX = 1 \qquad 2.7$$

อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าเหตุการณ์ X ที่เป็นไปได้อยู่ระหว่าง เหตุการณ์ X^+ และเหตุการณ์ X^- แล้ว จากสมการที่ 2.7 จะเขียนได้ว่า

$$\int_{X^-}^{X^+} f(X)dX = 1 \qquad 2.8$$

2. **ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม** (The Cumulative Probability Distribution Function)



รูปที่ 2.10 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของการแจกแจงปกติ

$$F(X) = P\left\{X' \leq X\right\} \qquad 2.9$$

สมการที่ 2.9 คือความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ X' จะเกิดขึ้นโดยที่ X' น้อยกว่าหรือเท่ากับเหตุการณ์ X ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ได้เป็น

$$F(X) = \int_{-\infty}^{X} f(X')dX' \qquad 2.10$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่า

$$\lim_{X\to\infty} F(X) = F(\infty) = 1 \qquad 2.11$$

$$\lim_{X\to\infty} F(X) = F(-\infty) = 0 \qquad 2.12$$

จากสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.10 จะได้

$$P\{a \leq X \leq b\} = F(b) - F(a) \qquad 2.13$$

และจากสมการที่ 2.10 จะได้ความน่าจะเป็นในการที่จะเกิดเหตุการณ์ X ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น และฟังก์ชันการสะสมของความน่าจะเป็นกรณี X มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ คือ

$$\frac{dF(X)}{dX} = f(X) \qquad 2.14$$

เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน จะพิจารณา $0 \leq X \leq 1$ และกำหนดให้

$$f(X) = 0 \qquad 2.15$$

เมื่อ $X < 0$ และ $X > 1$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$F(X) = \int_0^X f(X)dX \qquad 2.16$$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น คือ f(X) และ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม คือ F(X) จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) เพื่อที่จะกำหนดทางเดินสุ่มได้ดังนี้

กำหนดให้ Y เป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ใด ๆ อีกทั้ง Y นั้นยังเป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องและให้ Y เป็นฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์กับ X โดยที่ X เป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ ที่สนใจของอนุภาคที่พิจารณาซึ่งเหตุการณ์ X นั้นจัดเป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องเช่นกันจะได้

$$Y = Y(X) \qquad 2.17$$

เมื่อกำหนดให้ g(Y)dY เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ซึ่งมีความหมายว่า ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ Y ซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์อยู่ระหว่าง Y และ Y+dY และ f(X)dX ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ซึ่งมีความหมายว่า ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ X ที่สนใจของอนุภาคที่พิจารณา ซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์ อยู่ระหว่าง X และ X+dX นอกจากนั้นแล้ว ฟังชัน G(Y) คือ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของ g(Y) และฟังชั่น F(X) ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ของ f(X) ซึ่งสามารถกำหนดความสัมพันธ์ต่างๆ ได้ดังนี้

$$G(Y) = F(X) \qquad 2.18$$

$$\int_0^Y g(Y)dY = \int_0^X f(X)dX \qquad 2.19$$

สำหรับ g(Y) หรือ ตัวเลขสุ่มที่สร้างขึ้นมานั้นกำหนดให้เป็น Rectangular Distribution ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$g(Y) = \begin{cases} 0 & ; Y < 0 \\ 1 & ; 0 \le Y \le 1 \\ 0 & ; Y > 1 \end{cases} \qquad 2.20$$

จะได้ความสัมพันธ์เมื่อ $0 \le Y \le 1$ ดังนี้

$$\int_0^Y g(Y)dY = Y \qquad 2.21$$

$$G(Y) = Y \qquad 2.22$$

จากสมการที่ 2.17 จะได้

$$Y = F(X) \qquad 2.23$$

โดย Y เป็นตัวเลขที่สุ่มขึ้นมา หากตัวเลขที่สุ่มได้คือ ξ นั้นมีค่าระหว่าง 0 ถึง1

$$Y = \xi \qquad 2.24$$

$$F(X) = \xi \qquad 2.25$$

$$X = F(\xi)^{-1} \qquad 2.26$$

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าโอกาสในการที่จะเกิดเหตุการณ์ X จะขึ้นอยู่กับ ξ ซึ่งเป็นตัวเลขที่สุ่มขึ้นมา

2.6 Monte Carlo N-Particle Transport Code System Version 4A (MCNP-4A) [1, 2, 9]

Monte Carlo N-Particle Code หรือ MCNP รุ่น 4A เป็นโปรแกรมการคำนวณที่ใช้วิธีการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) เป็นพื้นฐาน ซึ่ง MCNP รุ่น 4A นี้สามารถใช้ในการใช้คำนวณหาประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค นิวตรอน โฟตอน อิเล็กตรอน หรือ คู่ใดคู่หนึ่งของนิวตรอน โฟตอน อิเล็กตรอน กับวัสดุที่สนใจภายใต้เงื่อนไขที่กำหนด ซึ่ง MCNP รุ่น 4A นี้เป็นโปรแกรมการคำนวณที่ได้รับการพัฒนาจากศูนย์วิจัยนิวเคลียร์ Los Alamos National Laboratory ของประเทศสหรัฐอเมริกาโดยใช้ FORTRAN 77 ภายใต้มาตรฐานของ ANSI ในการเขียนโปรแกรมดังกล่าว

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลทางด้านการเดินทางของอนุภาครังสี (Radiation Transport) คือ การสร้างทางเดินสุ่มของอนุภาครังสี เพื่อเก็บข้อมูลจากแต่ละอนุภาคมาหาค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของค่าดังกล่าวโดยใช้วิธีทางสถิติ ในระบบวัดรังสีนั้น อนุภาครังสีจะเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านวัสดุภายในระบบ และเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของวัสดุนั้น ซึ่งจะมีเพียงอนุภาครังสีบางส่วนที่สามารถเข้าสู่หัววัดรังสี เกิดเป็นสัญญาณที่แสดงออกทางเครื่องมือวัดรังสีในรูปของจำนวนนับรังสี พฤติกรรมเหล่านี้ของอนุภาครังสีสามารถทำนายได้โดยใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็น และกฎทางฟิสิกส์รังสีในมุมมองระดับอนุภาค ในการจำลองระบบวัดรังสีนี้การสุ่มตัวอย่างจะทำโดยใช้เครื่องกำเนิดตัวเลขสุ่ม (Random Number Generator) คำนวณชุดของตัวเลขสุ่ม แล้วจึงนำค่าตัวเลขสุ่มแต่ละค่าไปคำนวณตามความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นทำให้เกิดเหตุการณ์สุ่ม แล้วจึงเลือกเฉพาะเหตุการณ์ที่สนใจนำมาคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นเฉลี่ยของเหตุการณ์นั้นตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจต่อหนึ่งอนุภาค กำเนิดจากต้นกำเนิดรังสี

2.6.1 **เครื่องกำเนิดตัวเลขสุ่ม** (Random Number Generator)

โค้ด (Code) คอมพิวเตอร์ MCNP-4A ใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้ในการคำนวณค่าของตัวเลขสุ่ม

$$\xi_{n+1} = \mathrm{mod}(A\xi_n) \qquad 2.27$$

โดย ξ_n คือตัวเลขสุ่มขนาด 64 บิตซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ และ A คือ ค่าตัวคูณที่เป็นตัวเลข 64 บิตสำหรับคูณกับตัวเลขสุ่มค่าเริ่มต้น ทำให้ได้ผลคูณเป็น

ตัวเลขขนาด 128 บิต และ ξ_{n+1} คือตัวเลขสุ่มค่าถัดมาที่มีขนาด 64 บิต ซึ่งได้จากการเลือกค่าตัวเลข 64 บิต ท้ายของผลคูณดังกล่าว ตัวเลขที่ได้นี้เมื่อหารด้วยค่าสูงสุดของตัวเลขขนาด 64 บิต จะทำให้ได้เลขสุ่มเป็นจำนวนจริงระหว่าง ศูนย์ ถึง หนึ่ง

2.6.2.**วิธีสุ่มตัวอย่าง**

การสุ่มตัวอย่างในวิธีการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลมีวิธีพื้นฐานอยู่ 2 วิธี คือ การสุ่มตัวอย่างโดยวิธีการละทิ้งค่าที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข (Rejection Method) และวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยตรง (Direct Sampling Method) ทั้งสองวิธีนี้ประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อคำนวณค่าสุ่มของ

ความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนโดยอาศัยขั้นตอน (Algorithm) และวิธีการคำนวณเฉพาะของความสัมพันธ์นั้นๆ

การสุ่มหาตำแหน่งของอนุภาคที่กำเนิดภายในต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร เป็นตัวอย่างหนึ่งของการใช้วิธีการละทิ้งค่าที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขในการสุ่มตัวอย่าง ในกรณีต้นกำเนิดรังสีที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ค่าพิกัดของตำแหน่ง (x , y , z) ในทรงกลมจะถูกสุ่มโดยใช้ชุดของตัวเลขสุ่มสามค่าซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณสมการ 2.26 ค่าทั้งสามจะนำมาคำนวณค่าพิกัดดังนี้ $x = \xi_1 * r$ $y = \xi_2 * r$ และ $z = \xi_3 * r$ โดยที่ r คือรัศมีของทรงกลม เมื่อ $x^2 + y^2 + z^2 > r^2$ แสดงว่าค่าพิกัดชุดนี้เป็นตำแหน่งที่อยู่นอกปริมาตรทรงกลม ซึ่งจะไม่นำมาใช้ ค่าพิกัดใหม่จะสุ่มจากตัวเลขสุ่มชุดต่อไป

การสุ่มหาระยะทางที่อนุภาครังสีสามารถเคลื่อนผ่านตัวกลางก่อนที่จะชนกับอนุภาคของตัวกลาง เป็นตัวอย่างหนึ่งของวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยตรง โดยการพิจารณาความน่าจะเป็นที่อนุภาคหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทาง X ก่อนจะเกิดการชนเป็นครั้งแรกในระยะทาง dX จะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f(X)dX = \sigma_T e^{-\sigma_T} dX \tag{2.28}$$

โดยที่ค่า σ_T เป็นค่าภาคตัดขวางรวม (total cross section) ของอนุภาคตัวกลาง และ f(X) เป็นความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่อนุภาครังสีจะทำอันตรกิริยากับตัวกลาง เมื่ออนุภาคนี้เคลื่อนที่ในตัวกลางเป็นระยะทาง X จากนิยามของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับตัวแปรชนิดต่อเนื่องมีคุณสมบัติดังนี้คือ

$$\int_0^{\infty} f(X)dX = 1 \tag{2.29}$$

เมื่อกำหนดให้

$$\xi = F(X) = \int_0^{\infty} f(X')dX' \tag{2.30}$$

ดังนั้น F(X) คือความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะเกิดการชนกับตัวกลางในระยะทาง X คำนวณได้ดังนี้

$$\xi = F(X) = \int_0^X \sigma_T e^{-\sigma_T x} dx = 1 - e^{-\sigma_T X} \qquad 2.31$$

ในมุมมองระดับอนุภาค การสุ่มตัวอย่างระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ จะใช้ความสัมพันธ์นี้

$$X = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(1-\xi) \qquad 2.32$$

แต่เนื่องจากค่า ξ เป็นตัวเลขสุ่มซึ่งไม่แตกต่างกับค่า ($1-\xi$) เพราะเป็นค่าตัวเลขสุ่มที่มีค่าระหว่างศูนย์ถึงหนึ่ง ระยะดังกล่าวจึงสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$X = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(\xi) \qquad 2.33$$

ในการสุ่มหาชนิดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชนของอนุภาคกับตัวกลาง สามารถทำโดยใช้ตัวเลขสุ่มหนึ่งค่า ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองหนึ่งมีการพิจารณาเพียง 2 อันตรกิริยา คือ อันตรกิริยาการกระเจิง (Scattering) และอันตรกิริยาการดูดกลืน (Absorption) ซึ่งเป็นผลให้ค่าภาคตัดขวางรวม (Total cross section σ_t) $\sigma_T = \sigma_S + \sigma_a$ เมื่อค่าตัวเลขสุ่ม $\xi_i \le \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น คือ อันตรกิริยาการกระเจิง ในทางกลับกัน เมื่อ $\xi_i \ge \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$ จะเกิดอันตรกิริยาการดูดกลืน

การเริ่มต้นคำนวณของแต่ละอนุภาครังสีโดยใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP-4A จะเริ่มจากการกำหนดตำแหน่งที่จะปลดปล่อยรังสี ในกรณีของต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร (Volumetric Source) พิกัดของจุดกำเนิดรังสี (x , y , z) จะคำนวณจากการใช้ตัวเลขสุ่ม 3 ค่า โดยมีเงื่อนไขว่าจุดดังกล่าวจะต้องอยู่ภายในปริมาตรของเซลล์ที่เป็นต้นกำเนิดรังสี จากนั้นจึงทำการคำนวณสุ่มเพื่อกำหนดทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาครังสี สำหรับต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทปิกการคำนวณสุ่มจะเป็นดังนี้ ค่าของเวกเตอร์บอกทิศทาง (direction cosines) คือ (u ,v, w) จะคำนวณจากพิกัด (x , y , z) เมื่อกำหนดให้ $t = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ จากนั้น u = (x / t), v = (y / t) และ w = (z / t) ส่วนค่าพลังงานของอนุภาคสามารถเลือกสุ่มได้จากสเปกตรัมที่กำหนด แต่ละอนุภาค

ที่ทำการจำลองจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Particle Weight ,W) ณ จุดเริ่มต้น เมื่อไม่มีการปรับแก้ (Bias) ใด ๆ ค่าถ่วงน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับหนึ่งซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคจริงกับจำนวนอนุภาคที่สุ่มตัวอย่างขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนัก ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทุกครั้งจะได้รับการปรับแก้กลับโดย ให้มีค่าเท่ากับผลที่ได้จากหนึ่งอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสี นอกจากนั้นวิธีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักยังสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณในกรณีของแบบจำลอง Non-analog ที่เน้นการปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง โดยไม่เน้นการคำนวณตามกฎทางฟิสิกส์ของรังสี แต่ผู้ใช้จะต้องทำการชดเชยส่วนที่เบี่ยงเบนไปจากการคำนวณด้วยกฎทางฟิสิกส์ เพื่อไม่ให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงหรือบิดเบือนไปจากทฤษฎี แต่การคำนวณจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนการสุ่มระยะทางที่รังสีเคลื่อนในตัวกลางจะใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยตรงที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น

การคำนวณค่ามุม และค่าพลังงานของอนุภาครังสีหลักจากการทำอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลาง อาศัยสูตรของ Klein-Nishina ในกรณีคำนวณด้วยวิธีการที่ซับซ้อน ซึ่งใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างพื้นฐานทั้งสองแบบเพื่อสุ่มตัวอย่างทิศทาง และค่าพลังงานของอนุภาครังสีหลังจากทำอันตรกิริยา ซึ่งกรณีที่เกิดอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary Particle) จากอันตรกิริยา ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคปฐมภูมิจะถูกปรับลดตามสัดส่วนของค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยานั้น อนุภาคทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจึงมีค่าถ่วงน้ำหนักตามค่าที่ถูกปรับลดออกจากอนุภาคปฐมภูมิ เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นทำการคำนวณทีละอนุภาค แต่ละอนุภาคจึงสามารถจำลองได้โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขที่หลากหลาย ซึ่งทำให้การสิ้นสุดการคำนวณของแต่ละอนุภาคจึงเป็นไปได้หลายแบบ เช่น เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ที่ว่าง (Void) ซึ่งทำให้ไม่มีโอกาสเกิดอันตรกิริยาเพื่อหันเหทิศทางการเคลื่อนที่กลับมายังบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (Tally Region) อนุภาคนั้นจะสูญหายจากระบบ (Loss by escape) หรือ กรณีอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยาแล้วทำให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำมาก หรือ ค่าพลังงานของอนุภาคมีค่าต่ำมาก (Particle’s Weight cut off or Particle’s Energy cut off) การคำนวณจะสิ้นสุดลง สำหรับโค้ด MCNP ผู้ใช้สามารถกำหนดเงื่อนไขเหล่านั้นได้

2.6.3 **ตัวประมาณค่า** (Estimators)

ตัวประมาณค่าจะทำหน้าที่คำนวณปริมาณที่กำหนดเงื่อนไขไว้ เมื่ออนุภาคเคลื่อนเข้ามายังบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (Tally Region) สำหรับการคำนวณการเดินทางของอนุภาครังสีด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นมีตัวประมาณค่าอยู่ 5 ประเภท คือ ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว (Surface Estimator) ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์ (Event Estimator) ตัวประมาณค่าจากความยาวของ

เส้นทาง (Track Length Estimate) ตัวประมาณค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย (Next-event Estimator) และการคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (Pulse Height Tally)

- ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว

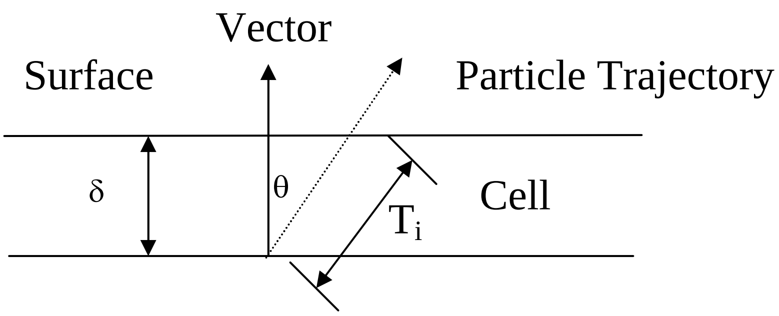
(Surface estimator: F1, F2 Tallies)

ตัวประมาณค่าประเภทนี้ จะทำการคำนวณตามเงื่อนไขเมื่ออนุภาครังสีเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวที่กำหนดในความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุของระบบหนึ่ง ๆ ตัวอย่างของตัวประมาณค่าประเภทนี้ คือ การคำนวณนับค่ากระแสที่ผ่านพื้นผิว (Surface Current Tally: F1) สำหรับการประมาณค่ากระแสของอนุภาคเคลื่อนผ่านพื้นผิวในแนวของเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น (Surface Current) นิยามของ F1 เป็นดังนี้

$$F1 = \int_A \int_\mu \int_t \int_E J(\vec{r},E,t,\mu)dEdtd\mu dA \qquad 2.34$$

เมื่อ $J(\vec{r},E,t,\mu) = |\mu|\Phi(\vec{r},E,t)A$ เป็นกระแสของอนุภาคเคลื่อนที่ในแนวที่ขนานกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิว A ขณะที่ค่า $\mu(\mu = \cos\theta)$ นั้นคำนวณจากมุมที่เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำมุมกับเวกเตอร์ซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิว A และค่า ϕ คือค่าฟลักซ์ที่คำนวณได้ ณ พิกัดตำแหน่งที่กำหนดขึ้น

อีกตัวอย่างหนึ่งของตัวประมาณค่าบนพื้นผิวคือ การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิว (Surface Flux Tally: F2) เป็นวิธีการคำนวณที่เกี่ยวโยงกับการคำนวณนับค่าฟลักซ์ภายในเซลล์ (Cell Flux or Track Length Estimator: F4) ซึ่งเซลล์หมายถึงรูปทรงที่มีปริมาตรและประกอบขึ้นจากพื้นผิวจนได้รูปทรงปิดที่มีขอบเขตที่แน่นอน เมื่อพิจารณาปริมาตรหนึ่งซึ่งมีลักษณะบางมาก โดยปริมาตรดังกล่าวมีความหนาเท่ากับ δ การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิว (F2) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้



รูปที่ 2.11 ภาคตัดขวางของเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณ

$$F2 = \lim_{\delta \to \infty} \frac{WT_l}{V} \quad 2.35$$

$$F2 = \frac{\left[\frac{W\delta}{|\cos\theta|}\right]}{A\delta} \quad 2.36$$

$$F2 = \frac{W}{A|\mu|} \quad 2.37$$

เมื่อความหนาของเซลล์ δ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ปริมาตรของเซลล์จะมีค่าเข้าใกล้ $A\delta$ และความยาวเส้นทางการเคลื่อนของอนุภาค (Track length) จะมีค่าเข้าใกล้ $A|\delta|$ โดยที่ค่า $\mu(\mu = \cos\theta)$ คำนวณจากค่ามุมระหว่างเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวกับวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค ค่า W เป็นค่าถ่วงน้ำหนักซึ่งใช้แทนจำนวนอนุภาคที่จำลอง ผลลัพธ์จากทางเดินสุ่มทุกครั้งจะคำนวณให้เทียบกับอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสีหนึ่งอนุภาค วิธีการคำนวณนี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ของพื้นผิวโดยอาศัยการคำนวณสุ่ม (Stochastic calculation of surface areas) เมื่อวิธีการปกติไม่สามารถทำได้

- ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์

(Event estimator: F6,F7 Tallies)

ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์ เป็นตัวประมาณค่าที่จะทำการคำนวณเฉพาะเมื่อเกิดเหตุการณ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ซึ่งค่าผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยาที่กำหนด จะเป็นข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณอัตราการเกิดอันตรกิริยานั้น ตัวอย่างเช่น การประมาณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว ตัวประมาณค่าจากการชนของ

อนุภาคกับตัวกลาง (Collision Estimator) จะคำนวณนับเฉพาะค่าผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) กับค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission cross section) เพื่อประมาณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission rate)

- ตัวประมาณค่าจากความยาวของเส้นทาง

(Track Length Estimation: F4 Tally)

ตัวประมาณค่าชนิดนี้ ใช้ในการคำนวณค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์ที่กำหนด โดยค่าฟลักซ์นิยามจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Phi = \eta \upsilon \qquad 2.38$$

โดยที่ค่า η เป็นค่าความหนาแน่นของอนุภาคในปริมาตรใด ๆ และค่า υ คือค่าความเร็วของอนุภาค ค่าฟลักซ์ที่ไม่ขึ้นกับเวลา (Time-integrated Flux or Fluence) จะมีค่าดังนี้

$$\int \Phi dt = \eta \upsilon dt = \left[\frac{W}{V}\right]\left[\frac{dl}{dt}\right] dt = W\frac{dl}{V} \qquad 2.39$$

โดยที่ค่า dl คือค่าความยาวของเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ก่อนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในเซลล์ หรือก่อนที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ข้ามผ่านพื้นผิวของเซลล์ ค่า W เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค ค่า V คือปริมาตรของเซลล์ ค่า ฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์จึงคำนวณจากความยาวของเส้นทางเดินของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเซลล์

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า การคำนวณนับค่าบนพื้นผิว F2 เป็นกรณีพิเศษของการคำนวณกับค่าแบบ F4 เมื่อพิจารณาเซลล์ในรูปที่ 2.3 ดังนี้ เซลล์หนึ่งมีปริมาตรเท่ากับ V ซึ่งมีลักษณะบางมาก ปริมาตรจึงคำนวณได้จากผลคูณ $A\delta$ โดยที่ δ เป็นความหนาของเซลล์และ A เป็นพื้นที่ผิวของเซลล์ เมื่อกำหนดให้ความยาวของเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในเซลล์ (track length) มีค่าเท่ากับ dl (ซึ่งก็คือ T_1 ในรูปที่ 2.3) ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ค่า δ/μ โดยที่ค่า μ เป็นค่าโคไซน์ของมุมระหว่างเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของเซลล์กับวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค การประมาณค่าดังกล่าวมาทั้งหมดเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้

$$W\frac{dl}{V} \rightarrow \frac{W}{A\mu}$$

- ตัวประมาณค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย

(Next-event estimators: F5 Tally)

ตัวประมาณค่านี้ จะทำการคำนวณนับคาทุกครั้งที่อนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในระบบ โดยการคำนวณอนุภาคเสมือน (Pseudo Particle) ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยาตรงไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ให้เป็นหัววัดรังสี (Point Detector) การประมาณค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสีจะคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{We^{-\sigma_T x}2f(\mu)}{4\pi R^2} \qquad 2.40$$

โดยที่ค่า $e^{-\sigma_T x}$ เป็นค่าที่แสดงถึงการลดทอนของรังสีผ่านวัสดุต่าง ๆ ก่อนที่อนุภาคเสมือนจะเคลื่อนที่ตรงไปยังตำแหน่งที่เป็นหัววัดรังสี ส่วนค่า $2f(\mu)$ เป็นความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่อนุภาคเสมือนนี้จะกระเจิงไปในทิศทางที่ตรงไปสู่ตำแหน่งของหัววัดรังสี ซึ่งค่า μ เป็นค่าโคไซน์ของมุมระหว่างวิถีของอนุภาคที่เข้าทำอันตรกิริยากับวิถีของอนุภาคเสมือนที่มุ่งตรงไปยังจุดที่เป็นตำแหน่งของหัววัดรังสี และค่า $4\pi R^2$ ที่นำไปหารเพื่อแสดงผลของการลดทอนเนื่องจากมุมตัน (Solid angle attenuation) โดยมีค่า R คือระยะทางจากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยากับตำแหน่งของหัววัดรังสี ซึ่งเป็นเหตุการณ์ถัดมา (Next-event) จากวิธีการคำนวณดังกล่าวทำให้ตัวประมาณค่าชนิดนี้ สามารถทำให้เกิดการคำนวณนับค่า ณ ตำแหน่งที่เป็นหัววัดรังสีทุกครั้งที่อนุภาครังสีเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลางที่ตำแหน่งใด ๆ ในระบบ การคำนวณนับค่าจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ คือจะได้ผลลัพธ์ทุกครั้งที่อนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง

- การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน

(Pulse Height Tally : F8 Tally)

การคำนวณนับค่าประเภทนี้ จะแสดงผลลัพธ์เป็นการแจกแจงพลังงานของอนุภาคภายในเซลล์ที่กำหนด ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในหัววัดรังสี ปริมาณของพลังงานที่ถูกดูดกลืนภายในเซลล์สามารถคำนวณได้โดยการคูณผลลัพธ์ของแต่ละอนุภาคกับค่า

พลังงานของอนุภาคนั้นเอง การคำนวณนับค่านี้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี และการคำนวณจะดำเนินต่อไปเมื่ออนุภาครังสีเคลื่อนข้ามพื้นผิวของเซลล์ใด ๆ

การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน เซลล์ที่เป็นต้นกำเนิดรังสีจะเก็บค่าผลคูณของค่าพลังงานกับค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นของอนุภาครังสีไว้ เมื่ออนุภาคนี้เคลื่อนข้ามพื้นผิวของเซลล์ใด ๆ ผลคูณของค่าที่คำนวณ ณ ตำแหน่งก่อนออกจากเซลล์จะนำไปลบออกจากค่าผลคูณที่เก็บไว้ครั้งแรก และหลังจากที่อนุภาคข้ามพื้นผิวดังกล่าวเข้าสู่เซลล์ใหม่ ค่าผลคูณ ณ ตำแหน่งใหม่จะนำไปบวกกับค่าผลคูณที่เหลืออยู่ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ที่กำหนด ผลหารระหว่างค่าผลคูณที่เหลือสุทธิที่เก็บไว้ในเซลล์ต้นกำเนิดรังสีกับค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นของอนุภาค จะใช้เป็นค่าที่ระบุตำแหน่งของช่วงพลังงานที่อนุภาคนั้นถ่ายทอดให้กับเซลล์ที่กำหนด และค่าผลลัพธ์ที่ได้คือค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสี หรืออีกนัยหนึ่งคือจำนวนอนุภาคเฉลี่ยจากต้นกำเนิดรังสี ที่สามารถเคลื่อนที่ไปยังเซลล์ที่เป็นหัววัดรังสี ค่าผลลัพธ์ดังกล่าวจะเป็นศูนย์เมื่อไม่มีอนุภาคใดสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัดรังสี

2.6.4 **การประมาณค่าความผิดพลาด** (Estimation of Error)

ข้อด้อยประการสำคัญของวิธีมอนติคาร์โล คือการลู่เข้าของคำตอบที่มีช่วงของความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้นั้นต้องอาศัยการคำนวณข้อมูลเป็นจำนวนมาก เพื่อสุ่มตัวอย่างให้ได้จำนวนข้อมูลมากพอที่จะคำนวณให้ได้ผลลัพธ์เป็นค่าสถิติที่มีคุณภาพ การประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) จึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งทำได้โดยการพิจารณาทฤษฎีความน่าจะเป็นของตัวแปรชนิดต่อเนื่องต่อไปนี้

$$\int f(X)dX = 1 \qquad 2.41$$

ค่า f(X) .เป็นความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของปัญหาที่ใช้วิธีมอนติคาร์โลในการคำนวณ ซึ่งค่าอินทิกรัล หรือค่าความน่าจะเป็นนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง ในที่นี้ค่า f(X) เป็นตัวแทนความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นทั้งหมดในระบบวัดรังสีเข้าไว้ได้ด้วยกัน

การคำนวณนับค่าด้วยวิธีมอนติคาร์โลจะประเมินค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เป็นปัญหาซึ่งในทางทฤษฎีใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$M_1 = \int Xf(X)dX \qquad 2.42$$

ค่า M_1 เรียกว่าค่าคาดหมาย (Expected Value) หรือค่าเฉลี่ยของการคำนวณนับค่า (Tally Mean) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณจากโมเมนต์อันดับที่หนึ่งของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าและเป็น ในการจำลองระบบวัดรังสีด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้น ค่าคาดหมาย $\bar{X}$ เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากผลลัพธ์ของแต่ละค่าของการคำนวณนับค่า X_i จากแต่ละอนุภาคเป็นจำนวนทั้งสิ้น N อนุภาค ดังนั้น

$$\bar{X} = \frac{1}{N}\Sigma X_i \qquad 2.43$$

ในทางทฤษฎีโมเมนต์อันดับสองของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งจะนำไปใช้ประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์คำนวณได้ดังนี้

$$M_2 = \int x^2 f(x)dx \qquad 2.44$$

ในขณะที่ วิธีมอนติคาร์โลคำนวณค่าดังกล่าวจากกลุ่มอนุภาคตัวอย่างโดย

$$\overline{X^2} = \frac{1}{N}\Sigma X_i^2 \qquad 2.45$$

ทฤษฎีลิมิตสู่ศูนย์กลางกล่าวว่า การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง (Estimated mean) $\bar{X}$ ซึ่งคำนวณจากการสุ่มตัวอย่าง X_i ที่เป็นอิสระต่อกัน จะเป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) เมื่อจำนวนตัวอย่าง N ที่ทำการสุ่มเลือกมีค่ามาก หรือ

$$\lim_{N\to\infty} P\left\{M_1 - aS \le \bar{x} \le M_1 + bS\right\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_a^b e^{-(\overline{x^2})/2}dt \qquad 2.46$$

โดยที่ $\bar{X}$ เป็นค่าประมาณของค่าเฉลี่ย ซึ่งคำนวณได้จากการสุ่มตัวอย่าง ค่า S เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้ ค่า M_1 เป็นค่าเฉลี่ยที่แท้จริงของประชากร ซึ่งมีค่าความแปรปรวนของประชากรเท่ากับ σ^2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คำนวณได้นี้ จะใช้เพื่อประมาณค่าของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่แท้จริง ในทางทฤษฎีค่าความแปรปรวนคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_1)^2 f(x)dx \qquad 2.47$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x)dx - 2M_1 \int_{-\infty}^{\infty} xf(x)dx + M_1^2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = M_2 - M_1^2 \qquad 2.48$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง สัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากร ดังนี้

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \qquad 2.49$$

วิธีมอนติคาร์โลประมาณค่าของความแปรปรวนของประชากรโดย

$$\sigma^2 = \overline{x^2} - (\bar{x})^2 \qquad 2.50$$

ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) นิยามโดยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{N}} \qquad 2.51$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์แปรผกผันกับค่ารากที่สองของจำนวนอนุภาคที่สุ่มตัวอย่าง N ซึ่งความสัมพันธ์ที่จะพิสูจน์ต่อไปนี้จะแสดงถึงผลของผลลัพธ์ X_i แต่ละค่า ที่มีต่อค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์

$$R = \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{\overline{x^2} - (\bar{x})^2}}{\bar{x}\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{\overline{x^2}}{(\bar{x})^2 N} - \frac{1}{N}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{(\sum x_i)^2} - \frac{1}{N}} \qquad 2.52$$

2.6.5 **การลดค่าความแปรปรวน** (Variance Reduction)

การลดความแปรปรวนของผลลัพธ์จากการคำนวณทำได้ 4 วิธี คือ การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญ (Problem truncation) การควบคุมจำนวนอนุภาคในแต่ละเซลล์ (Population control) การปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง (Modified sampling) และการเพิ่มการสุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณโดยตรง (Pseudo-deterministic methods)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.6.5.1 การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญ

(Problem truncation)

การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ในการคำนวณเป็นวิธีการที่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากการละทิ้งบางส่วนของปัญหาโดยไม่นำมาพิจารณา จะส่งผลให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ตัวอย่างของวิธีการนี้ ได้แก่ การตัดทิ้งบางส่วนของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบ (Geometry truncation) การกำหนดเวลาสิ้นสุดที่จะทำการคำนวณของแต่ละอนุภาค (Time cutoff) และการกำหนดค่าพลังงานต่ำสุดของอนุภาคที่จะจำลอง (Energy cutoff) ทั้งสองวิธีหลังนั้น เมื่อค่าที่กำหนดของอนุภาคใดอยู่นอกเงื่อนไขที่พิจารณา การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลง

2.6.5.2 การควบคุมจำนวนอนุภาคในแต่ละเซลล์

(Population control)

วิธีการนี้ใช้ประโยชน์จากค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค โดยค่าดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขที่กำหนดโดย ขอบเขตของเซลล์ในระบบ ค่าพลังงาน หรือระยะเวลาที่ใช้คำนวณ เป็นต้น เป้าหมายหลักก็เพื่อเพิ่มจำนวนหรือเน้นการคำนวณกับอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไข หรืออยู่ในบริเวณที่ให้ความสำคัญ ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะปรับเปลี่ยนไปเพื่อให้ค่าผลลัพธ์โดยรวมจากการคำนวณยังคงเดิม ตัวอย่างเช่น การกำหนด ให้อนุภาคเดี่ยวที่ค่าถ่วงน้ำหนัก W แยกเป็นอนุภาคคู่ โดยใช้ขั้นตอนการแยกคำนวณอนุภาค (Particle splitting procedures) ในบริเวณที่ต้องการเพิ่มจำนวนอนุภาคที่จะสุ่มตัวอย่าง ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละอนุภาคจะถูกลดทอนลงเหลือ W/2

ในทางตรงกันข้ามเงื่อนไขของรัสเซียนรูเลตต์ (Russian Roulette) ซึ่งกำหนดเงื่อนไขเพื่อลดจำนวนอนุภาคให้น้อยลงแต่อนุภาคที่เหลือจะได้รับการปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้มากขึ้นเพื่อชดเชยกันมีตัวอย่างดัง อนุภาคที่อยู่ในบริเวณที่มีการกำหนดค่าความสำคัญ (Important) ให้ลดลงสองเท่าจากค่าปกติ ความน่าจะเป็นที่การคำนวณของอนุภาคนี้จะสิ้นสุดลงจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคจะเพิ่มเป็นสองเท่าจากค่าเดิม ซึ่งในที่สุดผลลัพธ์จากการคำนวณนับจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่จำนวนอนุภาคที่ต้องคำนวณในบริเวณที่ไม่สำคัญจะลดลง

ตัวอย่างของวิธีนี้ เช่น การแบ่งแยกเซลล์เพื่อกำหนดค่าความสำคัญ (Geometric Splitting or Important sampling) การกำหนดช่วงเพื่อการปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค (Weight windows) การกำหนดค่าขอบเขตของค่าถ่วงน้ำหนักที่จะคำนวณ (Weight cutoff) และการแบ่งช่วงการสุ่มตัวอย่างโดยการกำหนดช่วงของค่าพลังงาน หรือเวลา (Energy or time splitting/ roulette)

2.6.5.3 การปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง

(Modified sampling)

เป้าหมายของวิธีการนี้คือการปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง จากนั้นจึงปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อชดเชยให้ค่าผลลัพธ์คงเดิม ตัวอย่างเช่น การสุ่มตัวอย่างโดยเพิ่มระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ (Path length stretching sampling) ซึ่ง ค่าภาคตัดขวางรวมที่ปรับแก้แล้ว (Modified total cross section σ'_T) จะนำมาใช้แทนค่าจริง σ_T ทำให้ระยะการเคลื่อนที่เดิมที่คำนวณจากความสัมพันธ์

$$x = -\frac{1}{\sigma_T}\ln(\xi) \qquad 2.53$$

สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าภาคตัดขวางรวมที่ปรับแก้แล้วได้ดังนี้

$$X = -\frac{1}{\sigma'_T}\ln(\xi) \qquad 2.54$$

ซึ่งระยะทาง X นั้นเปลี่ยนแปลงในอัตราส่วน $\frac{\sigma_T}{\sigma'_T}$ ค่าถ่วงน้ำหนักจึงต้องปรับแก้ตาม ดังต่อไปนี้

$$W' = W\frac{P(x)}{P'(x)}$$

$$W' = W\frac{\sigma_T e^{-\sigma_T X}}{\sigma'_T e^{-\sigma'_T x}}$$

$$W' = W\frac{\sigma_T}{\sigma'_T} e^{(\sigma'_T - \sigma_T)x}$$

$$W' = \frac{We^{-\sigma_T X} 2p(\mu)}{4\pi R^2} \qquad 2.55$$

ตัวอย่างอื่น ๆ ของวิธีการนี้มีดังนี้ คือ การเพิ่มโอกาสของการชนกันของอนุภาค (Forced collision) การปรับเงื่อนไขการชนด้วยค่าพลังงาน (Collision energy bias) การปรับเงื่อนไขการชนด้วยค่ามุมที่อนุภาคทำอันตรกิริยา (Collision angle bias) และการปรับเงื่อนไขเพื่อเน้นให้เกิดการเลือกทำปฏิกิริยา (Reaction selection bias)

2.6.5.4 การเพิ่มการสุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณโดยตรง

(Pseudo-deterministic method)

วิธีการนี้จะใช้เพื่อเน้นให้เกิดการสุ่มตัวอย่างของอนุภาคในบริเวณที่มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเซลล์อื่น ๆ ในระบบ ตัวอย่างของวิธีการนี้ คือการใช้วิธีการคำนวณการเดินทางของรังสีโดยตรง (Deterministic transport or “DXTRAN”) ซึ่งจะมีการสร้างเซลล์ที่เป็นทรงกลมขนาดเล็ก (“DXTRAN” sphere) ห่อหุ้มบริเวณดังกล่าวไว้ เมื่อใดก็ตามที่อนุภาครังสีทำอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลางภายนอกทรงกลมนี้ จะเกิดอนุภาค “DXTRAN” เคลื่อนที่โดยปราศจากการชนตรงยังพื้นผิวของทรงกลม ซึ่งหลังจากเข้าสู่ทรงกลมการสุ่มเส้นทางเดินของอนุภาครังสีภายในทรงกลมจะดำเนินไปโดยปกติ แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคที่บริเวณผิวทรงกลมจะคำนวณจากสูตรของวิธีคำนวณนับค่าแบบกำหนดเป้าหมาย (F5) ดังนี้

$$W' = \frac{We^{-\sigma_T X} 2p(\mu)}{4\pi R^2} \qquad 2.56$$

เมื่ออนุภาคใดเคลื่อนที่ด้วยเส้นทางเดินสุ่มตรงไปยังภายในทรงกลมที่กำหนดไว้การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลง เพื่อทำให้ค่าถ่วงน้ำหนักรวมของอนุภาคไม่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เปลี่ยนแปลงวิธีการนี้จึงทำให้เกิดทางเดินสุ่มภายในบริเวณที่กำหนด โดยมีการสุ่มตัวอย่างในบริเวณดังกล่าวทุกครั้งที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาครังสีกับอนุภาคของตัวกลาง

2.6.6. **ดรรชนีแสดงคุณภาพของการคำนวณ** (MCNP Figure of Merit : FOM)

โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP นิยามตัวเลขที่แสดงถึงคุณภาพในการคำนวณดังนี้

$$FOM = \frac{1}{R^2 T} \qquad 2.57$$

โดยที่ค่า R เป็นค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ ซึ่งค่ายกกำลังสองของค่า R จะแปรผกผันกับจำนวนอนุภาคที่ทำการสุ่มตัวอย่าง N ส่วนค่า T เป็นเวลาที่เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณมีหน่วยเป็นนาที ค่า T นี้จะแปรผันตรงกับค่า N ดังนั้นในการคำนวณแต่ละครั้ง ค่าดรรชนีแสดงคุณภาพของการคำนวณควรจะมีค่าคงที่

ค่า FOM เป็นตัวบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนับค่า ซึ่งค่า FOM ควรจะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ ยกเว้นในช่วงต้นของการคำนวณที่ค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากจำนวนข้อมูลยังน้อย และใช้เป็นตัวเลขบ่งชี้ถึง คุณภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณโดยการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อช่วยลดค่าความแปรปรวน (Variance reduction techniques) ของผลลัพธ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการนั้น เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum) ในทางปฏิบัติการทดสอบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ทำได้โดยการคำนวณด้วยช่วงสั้น ๆ เพื่อนำค่า FOM ที่มีค่ามากจะเป็นการคำนวณที่มีคุณภาพดี นอกจากนี้ ค่า FOM ยังนำมาใช้ประมาณเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ตามที่ต้องการ โดยใช้สมการ 2.56 ในการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.7 เครื่องสำรวจรังสี (Survey meter)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดอัตราปริมาณรังสี เพื่อตรวจสอบความปลอดภัยกับผู้ที่ปฏิบัติงานในบริเวณที่เกี่ยวข้องกับรังสี ซึ่งเครื่องสำรวจรังสีที่นิยมใช้โดยทั่วไปจะเป็นแบบ Geiger Muller counter และ Scintillation counter (ผลึก NaI(TI)) การเลือกใช้งานขึ้นอยู่กับชนิดของรังสี และพลังงานของรังสีที่ต้องการตรวจสอบ เครื่องสำรวจรังสีแบบ Geiger Muller counter แสดงดังรูปที่ 2.12 จะอาศัยการแตกตัวของคู่ไอออนอย่างต่อเนื่องเมื่อรังสีผ่านเข้ามายังหัววัดรังสี เหมาะสำหรับใช้วัดรังสีเบตา และรังสีแกมมา รังสีเอกซ์ ที่มีพลังงานต่ำ

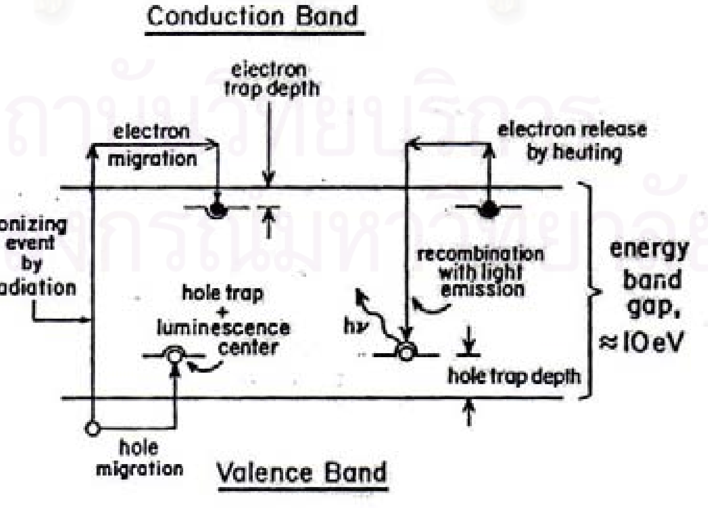
รูปที่ 2.12 เครื่องสำรวจรังสีแบบ Geiger Muller counter

เครื่องสำรวจรังสีที่ใช้หัววัดรังสีเป็นผลึก NaI(TI) แสดงดังรูปที่ 2.13 ส่วนประกอบภายในหัววัดรังสีนอกจากผลึกแล้วยังประกอบด้วย optical window, photocathode, photomultiplier tube และ amplifier หลักการคือ เมื่อรังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมาผ่านมายังหัววัดรังสี ผลึกจะทำหน้าเปลี่ยนพลังงานของรังสีให้เป็นโฟตอนแสง (visible light) ซึ่งโฟตอนแสงเหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดย photomutiplier tube และ amplifier จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้เหมาะสม และนำไปแสดงผล โดยเครื่องสำรวจรังสีชนิดนี้เหมาะสำหรับใช้วัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงได้

รูปที่ 2.13 เครื่องสำรวจรังสีที่มีหัววัดรังสีแบบ Scintillation counter (NaI(TI))

2.8 สารวัดรังสีเทอร์โมลูมิเนสเซนต์ (Thermoluminesent dosimeter : TLD)

TLD เป็นผลึกของสารประกอบบางชนิดเมื่อใส่สารเจือปน (impurities) หรือเรียกว่า การโดป (dope) เข้าไปในโครงสร้างของสารประกอบเหล่านี้ เช่น LiF (Mg,TI), CaF_2 (Dy), CaF_2 (Mn) $Li_2B_4O_7$ (Mn) หรือ $CaSO_4$ (Dy) เป็นต้น โดยธาตุที่อยู่ในวงเล็บเป็นสารเจือปนในสารประกอบนั้นๆ สารเจือปนเหล่านี้จะทำให้เกิดภาวะกึ่งเสถียร (Metastable state) ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เกิดอยู่ระหว่างระหว่างระดับพลังงานแถบวาเลนซ์ (Valance Band) และแถบคอนดักชัน (Conduction band) ของโครงสร้างผลึก ระดับพลังงานกึ่งเสถียรนี้อาจเรียกว่า กับดัก (Trap) ระดับพลังงานและจำนวนของกับดักขึ้นกับชนิดและจำนวนของสารเจือปนที่โดปเข้าไป เมื่อผลึกเหล่านี้ได้รับรังสีจะทำให้เกิดคู่ของ อิเล็กตรอน-โฮลที่เหนี่ยวนำกันและกันขึ้น อิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่ไปจนถูกกักอยู่ในกับดัก เวลาของการถูกกักขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของกับดักอาจกินเวลาสั้นๆเป็นนาทีหรืออาจใช้เวลาเป็นสิบปีหรือเป็นร้อยปีที่อิเล็กตรอนจำนวนครึ่งหนึ่งจะหลุดจากกับดักได้ เวลาเหล่านี้เรียกครึ่งชีวิต (Half life) เช่นกัน แต่หากผลึกที่ถูกฉายรังสีแล้วได้รับพลังงานจากภายนอกเช่นพลังงานความร้อน อิเล็กตรอนและโฮลจะหลุดจากกับดักเข้ามารวมกันใหม่พร้อมกับคายพลังงานที่ได้รับตั้งแต่ต้นออกมาในรูปของแสงที่มองเห็นด้วยตาเปล่าซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในช่วงของแสงสีแดงหรือน้ำเงิน ดังรูป 2.12 หากใช้หลอดทวีคูณแสง(Photomultiplier tube : PMT) จับแสงเหล่านั้น แล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าพบว่า ปริมาณสัญญาณไฟฟ้าที่ได้จะแปรผันตามปริมาณรังสีที่ผลึกได้รับ กระบวนการที่ผลึกได้รับความร้อนแล้วปล่อยแสงออกมานี้เรียกว่าเทอร์โมลูมิเนสเซนต์ นิยมใช้ตัวย่อว่า ทีแอลดี (TLD)



รูปที่ 2.14 แสดงขบวนการเกิดแสงเมื่อผลึก TLD ได้รับรังสี

TLD เป็นที่นิยมใช้ในการวัดรังสีเนื่องจากสามารถผลิตได้หลายชนิดและหลายรูปแบบเพื่อให้มีความเหมาะสมกับงานที่จะปฏิบัติ เช่น LiF เหมาะสำหรับการวัดรังสีทั่วไป $Li_2B_4O_7$ มีลักษณะสมมูลกับเนื้อเยื่อ จึงเหมาะสำหรับการใช้เป็นเครื่องวัดรังสีประจำบุคคล CaF_2 หรือ $CaSO_4$ เป็นทีแอลดีที่มีความไวต่อรังสีสูงจึงเหมาะที่จะนำมาใช้ในการวัดรังสีในสิ่งแวดล้อมเป็นต้น ทีแอลดีสามารถผลิตออกมาได้หลายรูปแบบ เช่น เป็นผง (Powder) อัดเป็นเม็ดสี่เหลี่ยม (Chip) เป็นแท่งกลม (Rod) หรือเป็นแผ่นกลม (Disc) ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างกว้างขวาง

2.9 การป้องกันอันตรายจากรังสี [8]

ในการทำงานทางด้านรังสีจำเป็นที่จะต้องคำนึงถึงความปลอดภัยในการปฏิบัติงานของบุคคลากรที่ทำงานเกี่ยวข้องกับรังสี และบุคคลที่ไม่เกี่ยวข้องกับรังสี ตามคำแนะนำของ The International Commission on Radiology Protection (ICRP) ซึ่งเป็นองค์กรที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการป้องกันอันตรายจากรังสี ให้คำแนะนำ และข้อปฏิบัติในการทำงานทางด้านรังสีแก่เจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน โดยมีเป้าหมายเพื่อความปลอดภัยของเจ้าหน้าที่ผู้ปฏิบัติงาน และบุคคลอื่นซึ่งไม่เกี่ยวข้องกับงาน

การจำกัดปริมาณรังสีให้อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ (Dose limit) ตามคำแนะนำของ ICRP 60 สำหรับบุคคลากรที่ทำงานเกี่ยวข้องกับรังสี ปริมาณรังสีที่ได้รับไม่ควรเกิน 20 mSv/year โดยเฉลี่ยภายใน 5 ปี ถ้าในปีหนึ่งปีใดได้รับปริมาณรังสีเกิน 20 mSv ในปีนั้นก็ไม่ควรได้รับปริมาณรังสีเกิน 50 mSv และอวัยวะอื่น ๆ ได้แก่ เลนส์ตา ปริมาณรังสีที่ได้รับไม่ควรเกิน 150 mSv/year ผิวหนัง ปริมาณรังสีที่ได้รับไม่ควรเกิน 500 mSv/year และกระดูกระยางค์ (แขน ขา ข้อมือ ข้อเท้า) ปริมาณรังสีที่ได้รับไม่ควรเกิน 500 mSv/year บุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับงานด้านรังสี ปริมาณรังสีที่ได้รับไม่ควรเกิน 1 mSv/year และอวัยวะอื่น ๆ ได้แก่ เลนส์ตา ปริมาณรังสีที่ได้รับไม่ควรเกิน 15 mSv/year และผิวหนังปริมาณรังสีที่ได้รับไม่ควรเกิน 50 mSv/พื้นที่ผิวหนัง 1 cm^2

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการสร้างแบบจำลองด้วย MCNP-4A ตามเงื่อนไขต่าง ๆ ส่วนที่สองจะเป็นการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองนั้น ๆ ด้วยผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากการวัด โดยใช้เครื่องวัดรังสี ได้แก่ Thermoluminesent dosimeter (TLD) และเครื่องสำรวจรังสี (survey meter) และส่วนที่สามผลที่ได้จากการวัดปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้จะนำไปประเมินความปลอดภัยด้านรังสีตามคำแนะนำของ ICRP 60

การวิจัยนี้เริ่มต้นโดยการศึกษาผลการคำนวณจาก MCNP-4A เพื่อเก็บข้อมูลอัตราปริมาณรังสีของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ โดยใช้วิธีการ**ประมาณค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย** จะทำการคำนวณนับค่าทุกครั้งที่อนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในระบบและเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยาตรงไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ให้เป็นหัววัดรังสี เพื่อศึกษาอัตราปริมาณรังสีรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้เมื่อไม่มีสินค้าและมีสินค้าชนิดต่าง ๆ บรรจุอยู่ในตู้บรรจุสินค้า

ในส่วนที่สองนั้นจะเป็นการตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A กับผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากการวัดโดยใช้เครื่องวัดรังสี ในส่วนนี้จะสร้างเงื่อนไขของการทดลองที่เป็นไปได้โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขจากส่วนแรก เพื่อสะดวกในการปฏิบัติงาน แล้วใช้ MCNP-4A สร้างแบบจำลองของการทดลองนั้นๆ และทำการเปรียบเทียบค่าอัตราปริมาณรังสีระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งแนวโน้มของค่าอัตราปริมาณรังสีจากการวัดโดยใช้เครื่องวัดรังสี และจากการคำนวณนั้นต้องมีทิศทางเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

และในส่วนที่สาม จะนำค่าที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A และการวัดอัตราปริมาณรังสีโดยใช้เครื่องวัดรังสีของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ มาประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีตามคำแนะนำของ ICRP 60

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.1.1 คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าเมื่อไม่มีสินค้าและมีสินค้าชนิดต่าง ๆ บรรจุอยู่ในตู้บรรจุสินค้า โดยใช้ MCNP-4A ซึ่งกำหนดให้เงื่อนไขการคำนวณโดยใช้การบันทึกของ MCNP-4A เป็นแบบ F5 Tally หรือการบันทึกค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย เมื่ออนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในระบบ และเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยาตรงไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ให้เป็นหัววัดรังสี

3.1.2 ตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ MCNP-4A กับผลที่ได้จากเครื่องวัดรังสี และผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต เพื่อตรวจสอบผลที่ได้ว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด

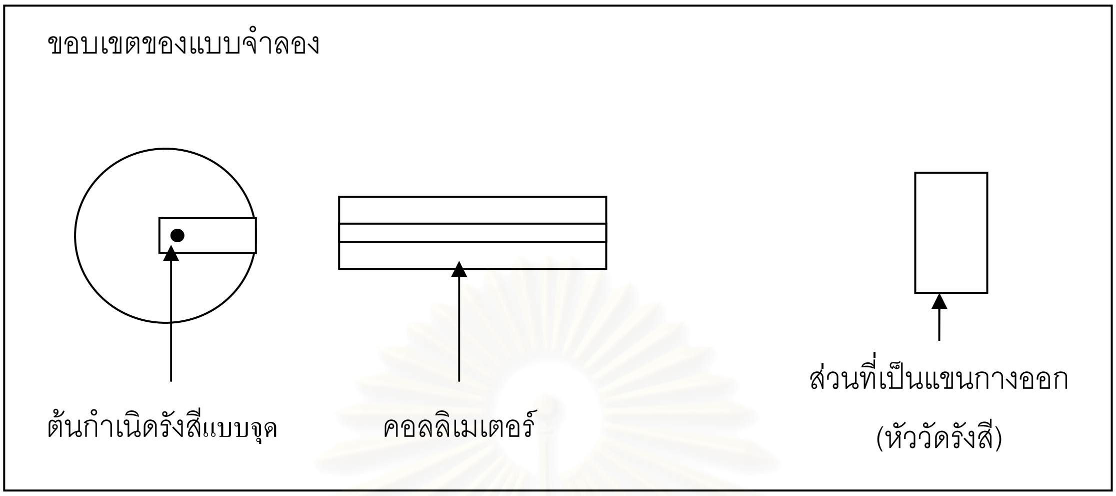
3.1.3 ผลที่ได้จากการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้จะนำไปประเมินความปลอดภัยด้านรังสีตามคำแนะนำของ ICRP 60

3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP-4A

3.2.1 แบบจำลองของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ กำหนดให้ต้นกำเนิดรังสีมีขนาดเล็กมากจนถือว่าเป็นแบบจุด (point source)และมีการกำบังรังสีด้วยตะกั่วรูปทรงกระบอก

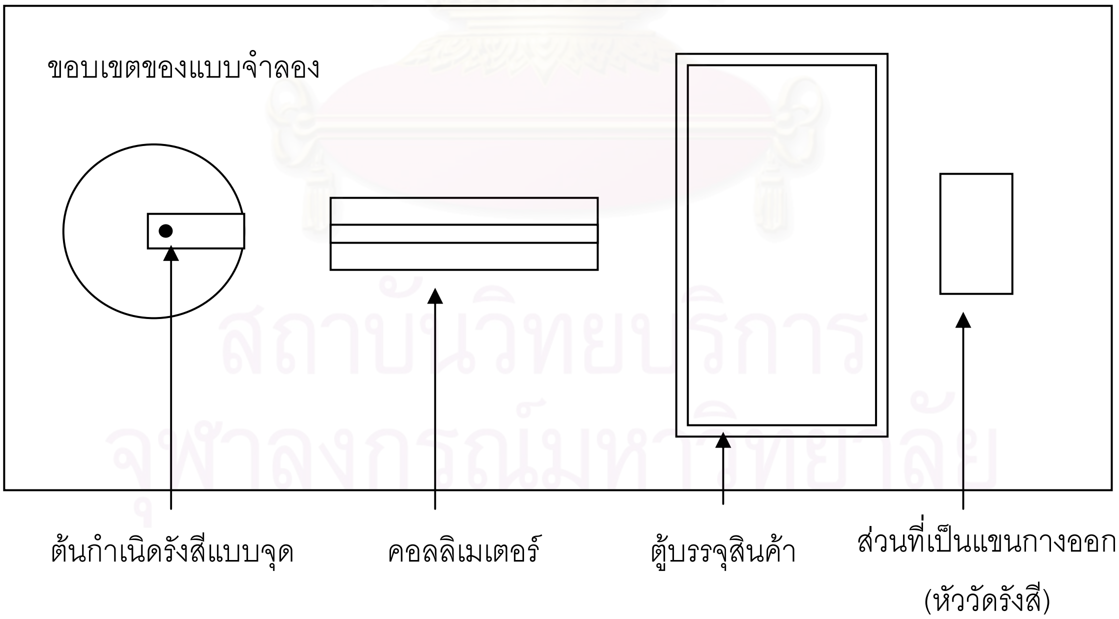
3.2.2 เงื่อนไข รูปแบบการจัดวางในการสร้างแบบจำลองและการคำนวณ นั้นมีขอบเขตของการคำนวณซึ่งจะถูกกำหนดภายใต้เงื่อนไขของ MCNP-4A เองให้เป็นรูปกล่อง มีขนาด 2000 ซม. X 2000 ซม. X 2000 ซม. ซึ่งขนาดขอบเขตนี้จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้ว่าจะกำหนดให้มีขนาดเป็นเช่นไร ให้ครอบคลุมระบบของแบบจำลองทั้งหมด หากกำหนดขนาดใหญ่เกินไปก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น และหากเล็กเกินไปขอบเขตอาจจะไม่ครอบคลุมระบบแบบจำลองตามต้องการ เพราะฉะนั้นควรจะกำหนดขอบเขตให้เหมาะสมกับขนาดของแบบจำลอง นอกจากนั้นรูปแบบการจัดวางและระบบวัดนั้นสามารถแสดงให้ได้ดังนี้

พิจารณา ระนาบ XZ



รูปที่ 3.1 รูปแบบการจัดวางระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าเคลื่อนย้ายได้ โดย
ไม่มีตู้บรรจุสินค้า ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A

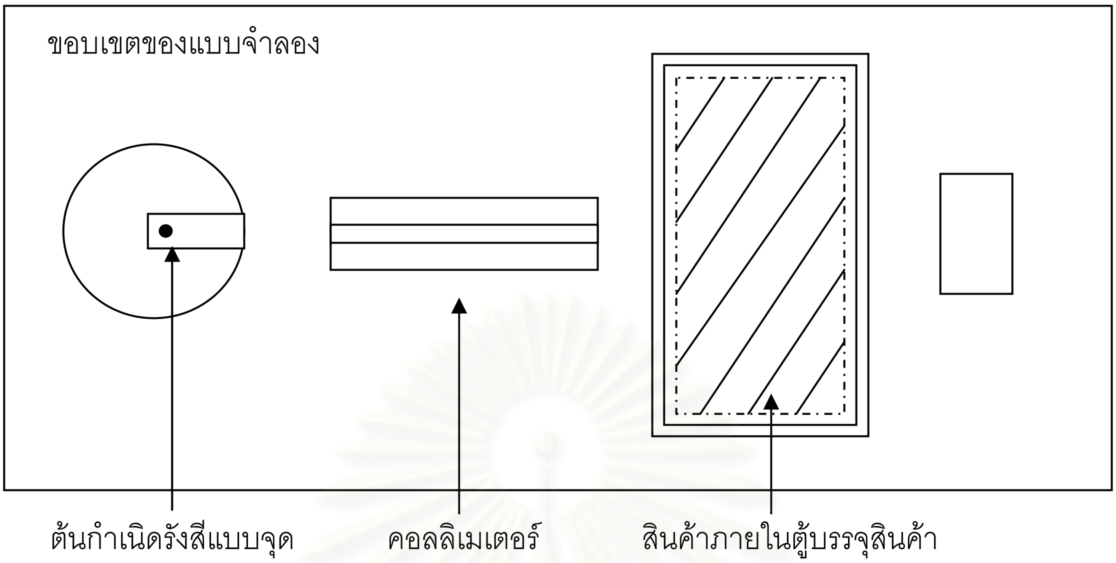
พิจารณา ระนาบ XZ



รูปที่ 3.2 รูปแบบการจัดวางระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าเคลื่อนย้ายได้ โดย
มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิจารณา ระนาบ XZ



รูปที่ 3.3 รูปแบบการจัดวางระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าเคลื่อนย้ายได้ โดยมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A

3.2.3 การสร้างแบบจำลอง ของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ จากแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า (Input File) ใน MCNP-4A มีข้อกำหนดค่าคงที่และหน่วยต่าง ๆ ดังนี้

- ความยาวหน่วยเป็นเซนติเมตร (cm)
- พลังงานหน่วยเป็น เมกกะอิเล็กตรอนโวลต์
- เวลามีหน่วยเป็น Shark (10^{-8} วินาที)
- ความหนาแน่นของอะตอมมีหน่วยเป็น Atom / barn-cm
- ความหนาแน่นของวัสดุ หน่วยเป็น กรัม / ลูกบาศก์เซนติเมตร
- ค่าภาคตัดขวาง มีหน่วยเป็น barn

การใช้งาน MCNP-4A จะต้องมี แฟ้มข้อมูลป้อนเข้าเพื่อกำหนด เงื่อนไข และลักษณะต่าง ๆ ของแบบจำลองตามต้องการ โดยโครงสร้างของแฟ้มข้อมูลป้อนเข้านี้ เป็นแฟ้มข้อมูลแบบอักขระ (Text File) ซึ่งข้อความในหนึ่งบรรทัดจะบรรจุตัวอักษรได้ 80 ตัว แต่ละ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรทัดจะบรรจุคำสั่ง และค่าพารามิเตอร์ต่างกันไปเพื่อสร้างแบบจำลองให้ได้ตามเงื่อนไขและลักษณะตามต้องการ

แฟ้มข้อมูลป้อนเข้าสามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

- ส่วนที่เป็นคำสั่งนิยามเซลล์ (Cell Card) ในส่วนแรกนี้จะเป็นการกำหนดเซลล์ ซึ่งแต่ละบรรทัดจะใช้นิยามแต่ละเซลล์ตามหมายเลขที่กำกับอยู่ ในคอลัมน์แรกของบรรทัด ซึ่งเซลล์นั้นหมายถึงปริมาตรที่ห่อหุ้มด้วยพื้นผิวปิดใด ๆ ข้อมูล ตัวเลขในหลักถัดมาคือหมายเลขของวัสดุตรงกับค่าในคอลัมน์แรกของบรรทัดที่ใช้นิยามวัสดุข้อมูลตัวเลขหลักที่สาม ซึ่งถ้าค่าดังกล่าวเป็นบวกจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงอะตอมในหน่วยอะตอมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าที่เป็นลบจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงมวลในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชุดตัวเลขที่ถัดจากค่าความหนาแน่นของวัสดุคือ พื้นผิวที่ประกอบกันขึ้นเป็นเซลล์ จะมีค่าได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งหมายถึงการเลือกใช้ด้านที่เป็นบวกหรือลบของพื้นผิวหนึ่ง ๆ เพื่อนำมาประกอบเป็นเซลล์ ด้วยการใช้ตัวปฏิบัติการของเซตได้แก่ อินเตอร์เซกชัน ซึ่งใช้การเว้นวรรค ( ) ยูเนียนซึ่งใช้เครื่องหมายมหัพภาคคู่ (:) และคอมพลีเมนต์ใช้ชาร์ป (#) คำสั่งอื่นๆ เช่น FILL ใช้ในกรณีที่จำนวนเซลล์ในระบบมีมากทำให้การจำลองไม่สามารถคำนวณได้เนื่องจากค่าที่ใช้เกินจากที่กำหนด จึงจำเป็นต้องสร้างขอบเขตขึ้นอีกส่วนหนึ่งโดยส่วนนี้ต้องอยู่ในขอบเขตใหญ่ที่กำหนดให้ในตอนแรก, U เป็นคำสั่งที่ต้องการเอาเซลล์ที่ต้องการใส่เข้าไปไว้ในขอบเขตของ FILL อีกทีหนึ่ง ตัวอย่างของพารามิเตอร์ที่ใช้นิยามเซลล์แสดงดังรูปที่ 3.4

```
C   Cell Cards
1   1  -11.34  -1 -2  3   #2  IMP:P=1$SHIELD
2   0            4 -5 6 -7 8 -9 IMP:P=1$SOURCE
3   1 -11.34  10 -11 12 -13 14 -15 #4 IMP:P=1$COLLIMATE
4   0            10 -11 12 -13 16 -17 IMP:P=1$HOLE COLLIMATE
5   0            18 -19 20 -21 22 -23 #1 #2 #3 #4 #7 #10 IMP:P=1$BOX
6   0           -18:19:-20:21:-22:23 IMP:P=0$UNIVERSE
7   1  -11.34  24 -25 26 -27 28 -29 IMP:P=1$DETECTOR ARM
8   2  -7.87   30 -31 32 -33 34 -35 #9 U=1 IMP:P=1$CONTAINER
```

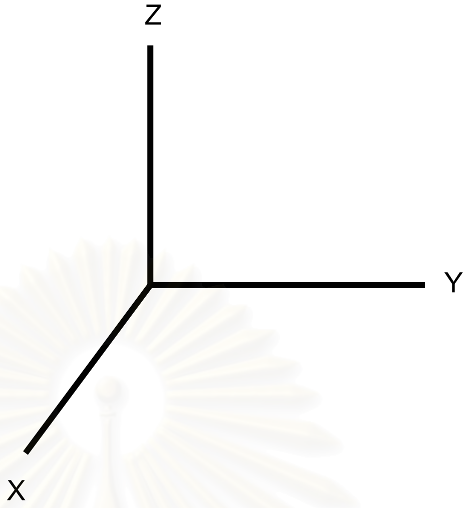
รูปที่ 3.4 พารามิเตอร์นิยามเซลล์ดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A

- คำสั่งนิยามพื้นผิว (Surface Cards) ในส่วนที่สองจะเป็นการกำหนดพื้นผิวของเซลล์เพื่อประกอบกันเป็นส่วนต่างของเซลล์ ซึ่ง MCNP-4A ได้นิยามพื้นผิวของเซลล์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และใช้คำสั่งย่อในการกำหนดชนิดและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพื้นผิวดังนี้

ตารางที่ 3.1 พารามิเตอร์ในคำสั่งนิยามพื้นผิว

สมการ	รูปร่าง	คำอธิบาย	คำสั่งย่อ ที่ใช้ใน MCNP	ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ใน MCNP
$Ax + By + Cz - D = 0$	ระนาบ	ระนาบทั่วไป	P	A B C D
$X - D = 0$		ระนาบตั้งฉากแกน X	PX	D
$Y - D = 0$		ระนาบตั้งฉากแกน Y	PY	D
$Z - D = 0$		ระนาบตั้งฉากแกน Z	PZ	D
$X^2 + Y^2 + Z^2 - R^2 = 0$	ทรงกลม	จุดศูนย์กลางอยู่ที่จุดกำเนิด	SO	R
$(X - A)^2 + (Y - B)^2 + (Z - C)^2 - R^2 = 0$		ทรงกลมทั่วไป	S	A B C R
$(X - A)^2 + Y^2 + Z^2 - R^2 = 0$		จุดศูนย์กลางอยู่บนแกน x	SX	A R
$X^2 + (Y - B)^2 + Z^2 - R^2 = 0$		จุดศูนย์กลางอยู่บนแกน Y	SY	B R
$X^2 + Y^2 + (Z - C)^2 - R^2 = 0$		จุดศูนย์กลางอยู่บนแกน Z	SZ	C R
$(Y - B)^2 + (Z - C)^2 - R^2 = 0$	ทรงกระบอก	ทรงกระบอกขนานแกน x	C/X	B C R
$(X - A)^2 + (Z - C)^2 - R^2 = 0$		ทรงกระบอกขนานแกน Y	C/Y	A C R
$(X - A)^2 + (Y - B)^2 - R^2 = 0$		ทรงกระบอกขนานแกน Z	C/Z	A B R
$Y^2 + Z^2 - R^2 = 0$		ทรงกระบอกอยู่บนแกน x	CX	R
$X^2 + Z^2 - R^2 = 0$		ทรงกระบอกอยู่บนแกน Y	CY	R
$X^2 + Y^2 - R^2 = 0$		ทรงกระบอกอยู่บนแกน Z	CZ	R

โดยกำหนดแกนในระบบแกนพิกัดฉาก X Y Zดังนี้



รูปที่ 3.5 ระบบแกนพิกัดฉาก X Y Z ที่กำหนดในการสร้างแบบจำลองของ MCNP-4A

การกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ต่าง ๆ เพื่อนิยามพื้นผิวนั้น ในคอลัมน์แรกของบรรทัดจะเป็นการกำหนดลำดับของพื้นผิวเพื่อใช้อ้างอิงในการนิยามเซลล์ ส่วนในคอลัมน์ที่สองของแต่ละบรรทัดจะเป็นคำสั่งอย่างย่อของสมการทางคณิตศาสตร์ ส่วนคอลัมน์สุดท้ายนั้นเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับสมการ และตัวอย่างของคำสั่งนิยามพื้นผิวนั้นสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.6

```
C Surface cards
1   CZ 15
2   PZ  37
3   PZ -37
4   PZ -22
5   PZ  22
6   PX  0
7   PX  4
```

รูป 3.6 ตัวอย่างคำสั่งนิยามพื้นผิวดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในพื้นผิวที่ 1 เป็นพื้นผิวทรงกระบอกจุดศูนย์กลางอยู่ที่พิกัด X = 0, Y = 0, Z = 0 ซึ่งมีรัศมี 15 เซนติเมตร ส่วนในพื้นผิวที่ 3 เป็นระนาบ XY ตัดแกน Z ที่จุด Z = -37

- คำสั่งกำหนดข้อมูลหลัก แบ่งเป็นส่วนย่อย ได้ 4 ส่วน ดังนี้

-คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี Source Specification Cards คำสั่งนี้ใช้กำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของต้นกำเนิดรังสี เช่น ค่าพลังงาน วิธีการสุ่มตัวอย่าง รวมทั้งกำหนดเงื่อนไขในการปรับแก้ค่าการสุ่มตัวอย่างตามที่ผู้ใช้กำหนด โดยผู้ใช้กำหนด เงื่อนไขการทำงานในตอนต้นว่าให้ทำการคำนวณด้วยวิธีการใดโดยใช้คำสั่ง MODE และ ตามด้วยอักษรต่าง ๆ เป็น P เมื่อต้องการคำนวณอนุภาคโฟตอน (Photon) N (Neutron) แทนอนุภาคนิวตรอน และ B (Beta) แทนอนุภาคบีตา

คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี ใช้ SDEF ค่าพลังงานกำหนดโดยคำสั่ง ERG ชนิดของอนุภาคกำหนดโดยคำสั่ง PAR โดยที่ 1 คือ นิวตรอน N (Neutron) 2 คือ โฟตอน (Photon) 3 คือ บีตา (Beta) และกำหนดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) ด้วยคำสั่ง POS และตามด้วยพิกัด XYZ นอกจากนั้นจะทำการกำหนดการกระจายตำแหน่งของการสุ่มตัวอย่างซึ่งการจำแนกการกระจายการสุ่มตัวอย่างนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของต้นกำเนิดรังสี และสามารถกำหนดให้มีการกระจายการสุ่มตัวอย่างโดยกำหนดพลังงานให้ออกในลักษณะต่อเนื่อง และให้โอกาสในการออกของแต่ละพลังงานโดยใช้ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นเป็นตัวกำหนด ตัวอย่างของคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสีแสดงได้ดังรูปที่ 3.7

```
C   Source  Specification  Cards
MODE P
SDEF ERG=D1 PAR=2 POS 1 0 0
 SI1 H 0  0.5  1  1.5  2  2.5
SP1 D 0 0.11138195 0.044136765 0.022035881 0.010335413 0.000650026
PHYS:P 2 0 0
```

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสีดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A

จากตัวอย่างข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่าต้นกำเนิดรังสีเป็นต้นกำเนิดโฟตอนมีลักษณะเป็นต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) โดยมีจุดศูนย์กลางการสุ่มตัวอย่างอยู่ที่พิกัดตำแหน่ง (1,0,0) อนุภาครังสีจะสุ่มตัวอย่างทิศทางการเคลื่อนที่แบบไอโซโทปิก และค่าพลังงานจะกำหนดโดยคำสั่ง ERG=D1 ซึ่งระบุในบรรทัดของ SI1 (Source Information) ให้มีพลังงานตั้งแต่ 0 ถึง 2.5 MeV มีการกระจายแบบต่อเนื่อง ส่วน SP1 เป็นการกำหนดให้แต่ละพลังงานมีโอกาสในการปลดปล่อยโดยกำหนดค่าความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของแต่ละพลังงานนั้น

-คำสั่งนิยามตัวประมาณค่า ในส่วนนี้จะใช้ในการคำนวณและบันทึกอนุภาคที่สนใจและอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างที่ต้องการซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการบันทึกได้ดังนี้

1. ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว

(Surface Estimator: F1, F2 Tallies)

2. ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์

(Event Estimator: F6, F7 Tallies)

3. ตัวประมาณค่าจากความยาวของเส้นทาง

(Track Length Estimator: F4 Tally)

4. ตัวประมาณค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย

(Next-event estimators: F5 Tally)

5. การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน

(Pulse Height Tally: F8 Tally)

ส่วนในการคำนวณที่เลือกใช้ในแบบจำลองนี้นั้นใช้การบันทึกของ MCNP-4A เป็นแบบ F5 Tally หรือ การบันทึกค่าเมื่ออนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในระบบ และเคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยาตรงไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ให้เป็นหัววัดรังสีซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
C   Tally Specification   Cards
F5:P  750  0  0  0.5
E5    0  0.5  1  1.5  2  2.5
```

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างคำสั่งนิยามตัวประมาณค่าดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A

จากตัวอย่างข้างต้นใช้การบันทึกแบบกำหนดเป้าหมายที่ตำแหน่ง X=750, Y=0, Z=0 และมีการแจกแจงพลังงานในช่วง 0 ถึง 0.5, 0.5 ถึง 1, 1 ถึง 1.5, 2 ถึง 2.5 จากกำหนดช่วงการแจกแจงพลังงานดังกล่าวนั้นจะครอบคลุมพลังงานที่ต้องการพอดี และทำการบันทึกอนุภาคโฟตอนที่เกิดอันตรกิริยาขึ้นในเซลล์ที่หัววัดรังสี

- คำสั่งนิยามชนิดของวัสดุ (Materials Specification Cards) ซึ่งภายในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองนี้ในได้กำหนดชนิดของธาตุนั้นๆ ให้อยู่ในเลข 5 หลัก 2 หลักแรกแทนเลขอะตอม (Z) และ 3 หลักหลังจะเป็นเลขมวล (A) แต่ถ้ากำหนด เป็น 000 นั้นจะกำหนดให้เป็นเลขมวลรวมในธรรมชาติซึ่งเป็นค่ามาตรฐานอยู่แล้ว ส่วนการกำหนดสัดส่วนของสารประกอบหรือของผสมนั้นสามารถกำหนดได้ ทั้งสัดสวนของอะตอมจะกำหนดเป็นเลขค่าบวก และสัดส่วนของน้ำหนักจะเป็นเลขค่าลบ สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังรูปที่ 3.9

```
C   Materials  Specification  Cards
M1 82000 -1
M2 26000 -1
```

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างคำสั่งนิยามชนิดของวัสดุดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A

จากตัวอย่างข้างต้น มีวัสดุ 2 ชนิด ชนิดแรก เป็นตะกั่วบริสุทธิ์ 100% วัสดุที่ 2 เป็นเหล็กบริสุทธิ์ 100%

- คำสั่งนิยามหยุดการทำงาน (Problem Cut off) เป็นคำสั่งที่ใช้ในการหยุดการคำนวณโดยกำหนดเงื่อนไขการหยุดการคำนวณไม่ว่าจะเป็นการหยุดเมื่ออนุภาคที่สุ่มออกมาได้ตามจำนวนต้องการหรือ กำหนดเป็นเวลาก็ได้

```
C    Problem Cut off
NPS 10000000
PRINT
```

รูปที่ 3.10 ตัวอย่างคำสั่งนิยามหยุดการทำงานดังแสดงในแฟ้มข้อมูลของ MCNP-4A

จากตัวอย่างข้างต้นกำหนดเป็นจำนวนอนุภาคที่สุ่มออกมา และจะหยุดการทำงานเมื่ออนุภาคที่สุ่มออกมามีจำนวนทั้งสิ้น 10,000,000 อนุภาค

3.3 การทดลองวัดปริมาณรังสีเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A

การทดลองเพื่อหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้จะทำการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์เพื่อเปรียบเทียบความถูกต้องและแม่นยำของการคำนวณด้วย MCNP-4A โดยในการวัดอัตราปริมาณรังสีนั้นจะทำการกำหนดเงื่อนไข และรูปแบบการจัดวางตามต้องการแล้วนำเงื่อนไขของระบบนั้น ไปทำการสร้างแบบจำลองและคำนวณเพื่อหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบดังกล่าว

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

3.3.1.1 ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร ผลิตโดย NUCTECH COMPANY LIMITED จากประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน

3.3.1.2 เครื่องสำรวจรังสี (survey meter) หัววัดรังสีแบบ Scintillation counter (NaI(Tl)) Model GH-102A ของประเทศผู้ผลิต แสดงดังรูปที่ 3.5

รูปที่ 3.11 เครื่องสำรวจรังสี (survey meter) Model GH-102A ของประเทศผู้ผลิต

3.3.1.3 อุปกรณ์วัดปริมาณรังสี Thermoluminesent dosimeter หรือ TLD ชนิด 700 มีสูตรทางเคมีคือ LiF (Mg,Ti) คุณสมบัติที่สำคัญมีดังนี้

- Glow curve ประกอบด้วย 5 พีค (Peak) โดยพีคที่ 1 และ 2 ไม่คงตัวโดยจะสลายตัวอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง จึงไม่นำมาใช้งานในการวัดรังสี พีคที่ 3,4 และ 5 เป็นพีคที่นำมาใช้งานในการวัดรังสี โดยพีคที่ 1 ถึง 3 จะเกิดเมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิระหว่าง $50\,^{\circ}C$ ถึง $150\,^{\circ}C$ ส่วนพีคที่ 5 จะเกิดเมื่อให้ความร้อนประมาณ $230\,^{\circ}C$

- ใช้วัดโฟตอนและรังสีบีตา นิยมนำมาใช้เป็นอุปกรณ์วัดรังสีประจำบุคคล

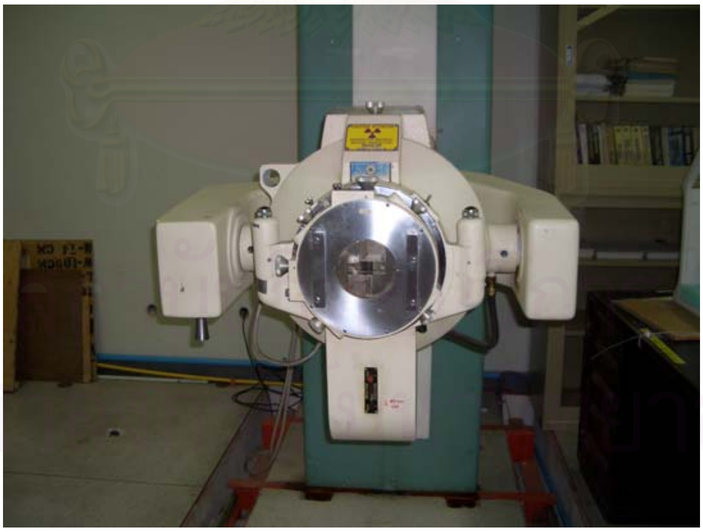
- ก่อนใช้งานต้องนำไปทำการอบก่อนการฉายรังสีที่อุณหภูมิ $400\,^{\circ}C$ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยอบที่อุณหภูมิ $100\,^{\circ}C$ อีก 2 ชั่วโมง

- การทำการอบหลังการฉายรังสีควรอบที่อุณหภูมิ $100\,^{\circ}C$ เป็นเวลา 10 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.12 Thermoluminesent dosimeter หรือ TLD ชนิด 700

3.3.1.4 เครื่องฉายรังสีโคบอลต์ 60 Eldorado model G ใช้ในการสอบเทียบเพื่อหาค่าแก้เนื่องจากความไว (sensitivity) ที่แตกต่างของ TLD



รูปที่ 3.13 เครื่องฉายรังสีโคบอลต์ 60 Eldorado model G

3.3.1.5 เครื่องอ่าน TLD ในงานวิจัยครั้งนี้ใช้เครื่องอ่าน TLD รุ่น M 3500 ของบริษัท Harshaw เป็นเครื่องอ่าน TLD ได้ทั้งชนิดชิพ ชนิดแท่งและชนิดผงโดยการเปลี่ยนจานให้ความร้อนที่เหมาะสม เครื่องอ่านต้องเชื่อมโยงกับระบบคอมพิวเตอร์ที่มีโปรแกรมควบคุมการทำงานซึ่งสามารถควบคุมตัวประกอบที่สำคัญในการอ่านได้แก่ เวลาที่ใช้อ่าน อัตราการให้ความร้อนและอุณหภูมิสูงสุดที่ใช้การอ่าน ตัวประกอบหลัก 3 ตัวนี้เรียกว่า Time temperature profile (TTP) และมีค่าแตกต่างกันออกไปสำหรับการอ่าน TLD แต่ละชนิด ต้องดูจากคู่มือของบริษัทหรือทดลองปรับเปลี่ยนค่าตัวประกอบเหล่านี้จนกว่าจะได้รูปร่างของ Glow curve ที่เป็นไปตามมาตรฐาน นอกจากนั้นโปรแกรมควบคุมการทำงานยังสามารถเก็บค่าแก้เนื่องจากความไวที่แตกต่างกัน หรือค่า ECC (element correction coefficient) ของ TLD แต่ละชิพ ซึ่งมีคำสั่งที่เรียกมาใช้ได้ในขณะอ่าน

รูปที่ 3.14 เครื่องอ่าน TLD รุ่น M 3500

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การเตรียม TLD เพื่อนำมาใช้งาน

- นำ TLD 700 มาอบก่อนการใช้งานในเตาอบที่สามารถตั้งอุณหภูมิได้หรืออาจใช้เตาอบเฉพาะงานของบริษัท Harshaw ที่มีโปรแกรมการอบก่อนการฉายรังสีโดยจะอบที่อุณหภูมิ 400 $^{\circ}$C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตามด้วยการอบหลังการฉายรังสีที่อุณหภูมิ

$100^{\circ}C$ อีก 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำ TLD ไปฉายรังสีด้วยเครื่องโคบอลต์ 60 เมื่อฉายเสร็จนำ TLD ไป การอบหลังการฉายรังสีเพื่อกำจัดพีคที่พลังงานต่ำออกไป แล้วนำมาอ่านโดยใช้เครื่องอ่านของบริษัท Harshaw รุ่น M3500 โดยการตั้ง TTP ดังนี้

อัตราการให้ความร้อน $10^{\circ}C$ ต่อวินาที

อุณหภูมิสูงสุดในการอ่าน $280^{\circ}C$

เวลาที่ใช้ในการอ่าน 16 2/3 วินาที

ก่อนนำ TLD มาใช้งานจะต้องมีการเตรียม TLD ให้พร้อมสำหรับการใช้งานโดยการนำ TLD ทั้งหมดมาทำการอบแล้วนำฉายไปรังสี จากนั้นนำมาอ่านค่าด้วยเครื่องอ่าน TLD ทำเช่นนี้อย่างน้อย 3 ครั้ง เพื่อเป็นการจัดโครงสร้างของ TLD ให้คงที่ เมื่อเสร็จเรียบร้อยแล้วจึงนำ TLD ทั้งหมดมาหาค่าแก้เนื่องจากความไวที่แตกต่างกัน หรือการหาค่า ECC โดยนำ TLD ไปทำการอบก่อนการฉายรังสีจากนั้นนำไปฉายรังสีแกมมาด้วยเครื่องโคบอลต์ 60 นำ TLD ไปทำการอบหลังการฉายรังสีแล้วนำมาอ่านด้วยเครื่องอ่าน TLD เมื่ออ่านเสร็จเรียบร้อยใช้โปรแกรมคำนวณค่า ECC โดย TLD แต่ละตัวจะถูกตั้งชื่อไว้และจัดเก็บอยู่ในฐานข้อมูลของคอมพิวเตอร์ที่ควบคุมการทำงานเครื่องอ่าน TLD ซึ่งสามารถเรียกมาใช้งานได้โดยอัตโนมัติทุกครั้งที่อ่าน TLD โดยใช้เครื่องอ่านนี้

3.3.2 ขั้นตอนการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ (Absorbed dose rate)

อัตราปริมาณรังสีเอกซ์ (Absorbed dose rate) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ [12]

$$D = \frac{\sum_{n=0}^{i} \Phi \left[photon/cm^2 - \sec\right] \times E_i \left[MeV/photon\right] \times 1.6 \times 10^{-13} \left[J/MeV\right] \times \mu_m \left[cm^{-1}\right]}{\rho \left[kg/cm^3\right] \times 1 \left[J/kg/Gy\right]}$$

โดยที่

D คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง, kg/cm^3

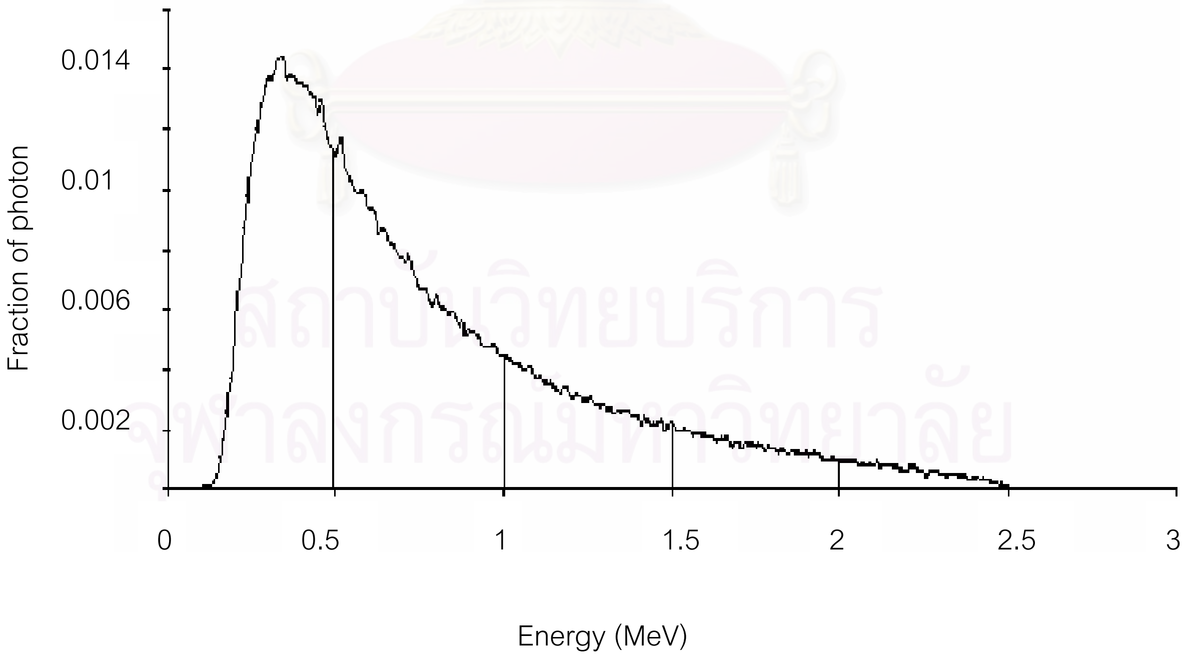
Φ คือ จำนวนโฟตอนที่ปลดปล่อยผ่านพื้นที่ต่อเวลา

E คือ พลังงาน มีหน่วยเป็น MeV

μ_m คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นของตัวกลาง, cm^{-1}

ρ คือ ความหนาแน่นของตัวกลาง, kg/cm^3

เมื่อคำนวณนับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสี (F5 Tally) และนำค่าฟลักซ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากสมการข้างต้น ซึ่งจากการที่ทราบค่าอัตราปริมาณรังสีโดยใช้ TLD วัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งด้านหน้าของคอลลิเมเตอร์ (ระยะ 1 เมตรจากต้นกำเนิดรังสี) ได้ค่าเท่ากับ 1.77×10^{-4} Gy/min ทำให้ได้ค่าฟลักซ์ ณ จุดมาตรฐาน เพื่อที่จะนำไปคำนวณค่าฟลักซ์ที่ระยะต่าง ๆ โดยทำการแยกพลังงานออกเป็นช่วง ๆ ตั้งแต่ 0 ถึง 2.5 MeV แสดงได้ดังรูปที่ 3.15 ค่าฟลักซ์แต่ละพลังงานนำไปคำนวณค่าอัตราปริมาณรังสี และค่าเฉลี่ยของอัตราปริมาณรังสี คือ ค่าอัตราปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งนั้น ๆ



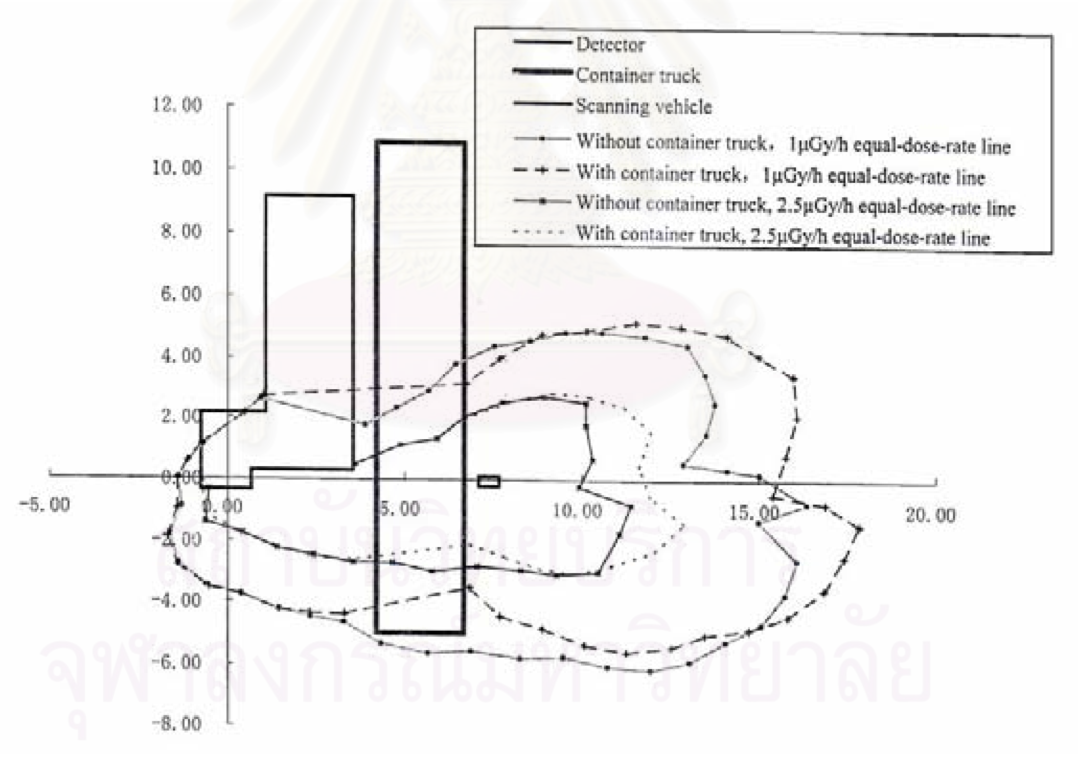
รูปที่ 3.15 การแบ่งพลังงานจากสเปกตรัมของรังสีเอกซ์

บทที่ 4

ผลการจำลอง และผลการวิจัยเปรียบเทียบ

4.1 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้

ได้คำนวณนับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสี (F5 Tally) จากแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของ MCNP-4A และค่าฟลักซ์ที่ได้นี้จะนำไปคำนวณด้วยสมการทำให้ได้ค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบ ซึ่งจะนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากการวัดรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี (survey meter)

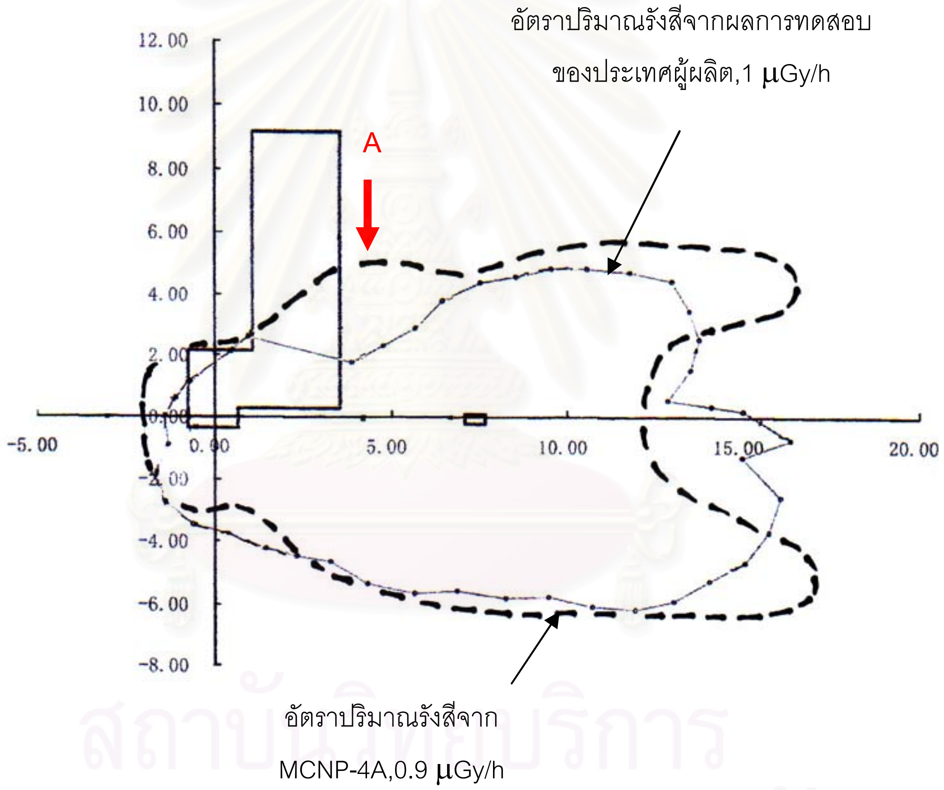


รูปที่ 4.1 ภาพแสดงผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของประเทศผู้ผลิต

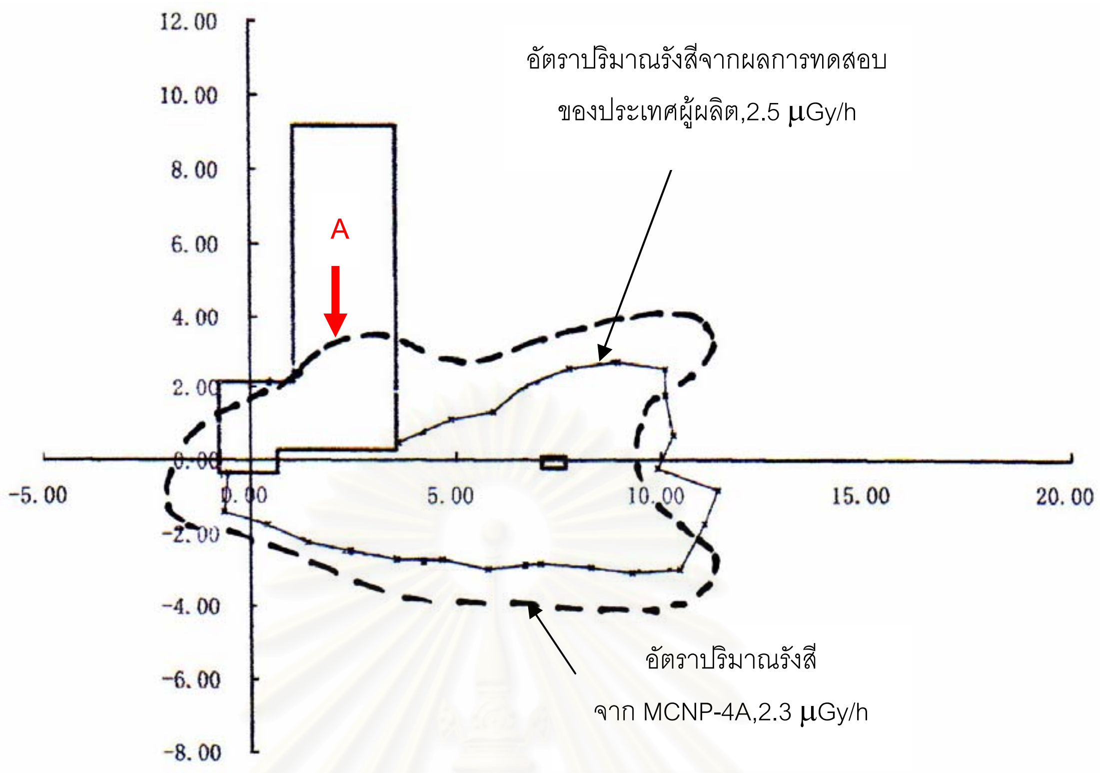
สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.1 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

การคำนวณของแบบจำลอง ของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ทำการจำลองระบบในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า และทำการวัดโดยเลือกพิกัดตำแหน่งต่าง ๆ ตามผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.1 แสดงผลออกมาในรูปของการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตในอัตราปริมาณรังสีที่ใกล้เคียงกัน ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.2 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 1 μGy/h ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

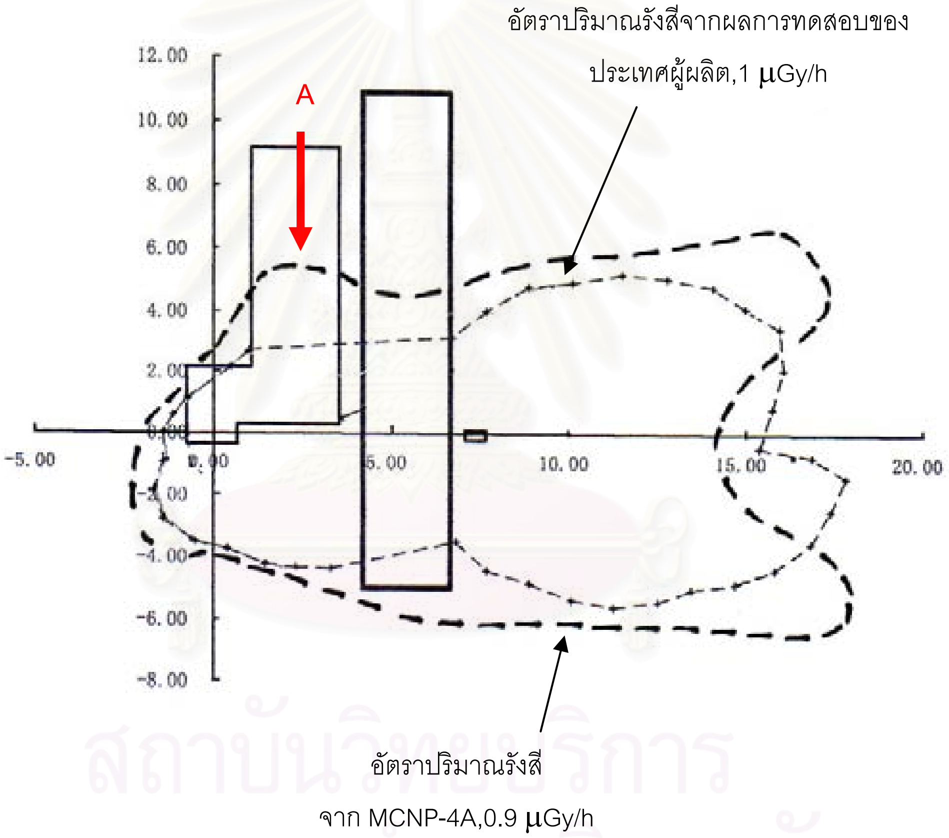


รูปที่ 4.3 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 2.5 μGy/h ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

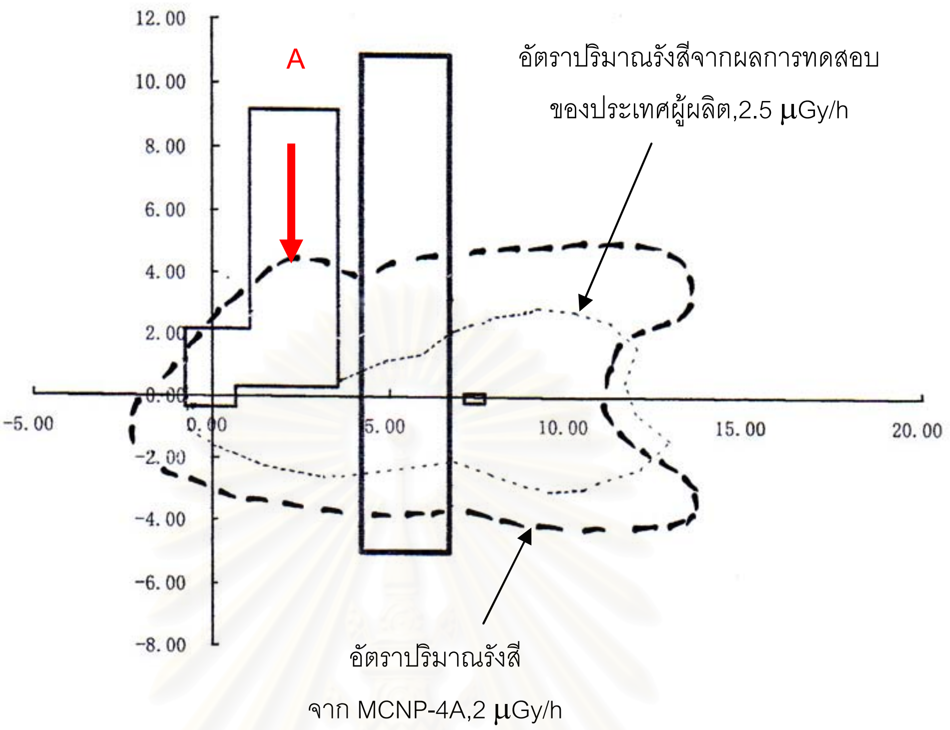
จากรูปที่ 4.2 และ 4.3 แสดงผลการจำลองโดยนับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสี (F5 Tally) และนำค่าฟลักซ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ จะพบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเทียบกับอัตราปริมาณรังสีที่ใกล้เคียงกันกับผลการทดสอบการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต คือ 0.9, 2.3 μGy/h ตามลำดับ โดย ณ ตำแหน่งด้านหลังแขนของหัววัดรังสี (detector arm) จะมีค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ลดลงกว่าผลการทดสอบการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต เนื่องจากในการจำลองวัสดุที่ใช้ทำ detector arm เป็นเหล็กตัน จึงทำให้เกิดการลดทอนของรังสีเอกซ์ภายในตัววัตถุมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำ detector arm นั้นไม่ใช่เหล็กตันทั้งหมด อาจมีส่วนช่องว่างของอากาศภายในด้วย และในส่วนของตำแหน่ง A การกระจายอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างจากผลการทดสอบการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต เนื่องจากในการจำลองไม่มีข้อมูลที่จะใส่พารามิเตอร์ของห้องควบคุมที่มีการกำบังรังสีด้วยตะกั่ว

4.1.2 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า

การคำนวณของแบบจำลอง ของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ทำการจำลองระบบในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าโดยใช้ขนาดมาตรฐาน 20 ฟุต ทำด้วยเหล็ก ภายในไม่มีสินค้า และทำการวัดโดยเลือกพิกัดตำแหน่งต่าง ๆ ตามผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ดังแสดงได้จากรูปที่ 4.1 แสดงผลออกมาในรูปของการกระจายตัวของรังสีเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตในอัตราปริมาณรังสีที่ใกล้เคียงกัน ได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.4 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 1 μGy/h ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า



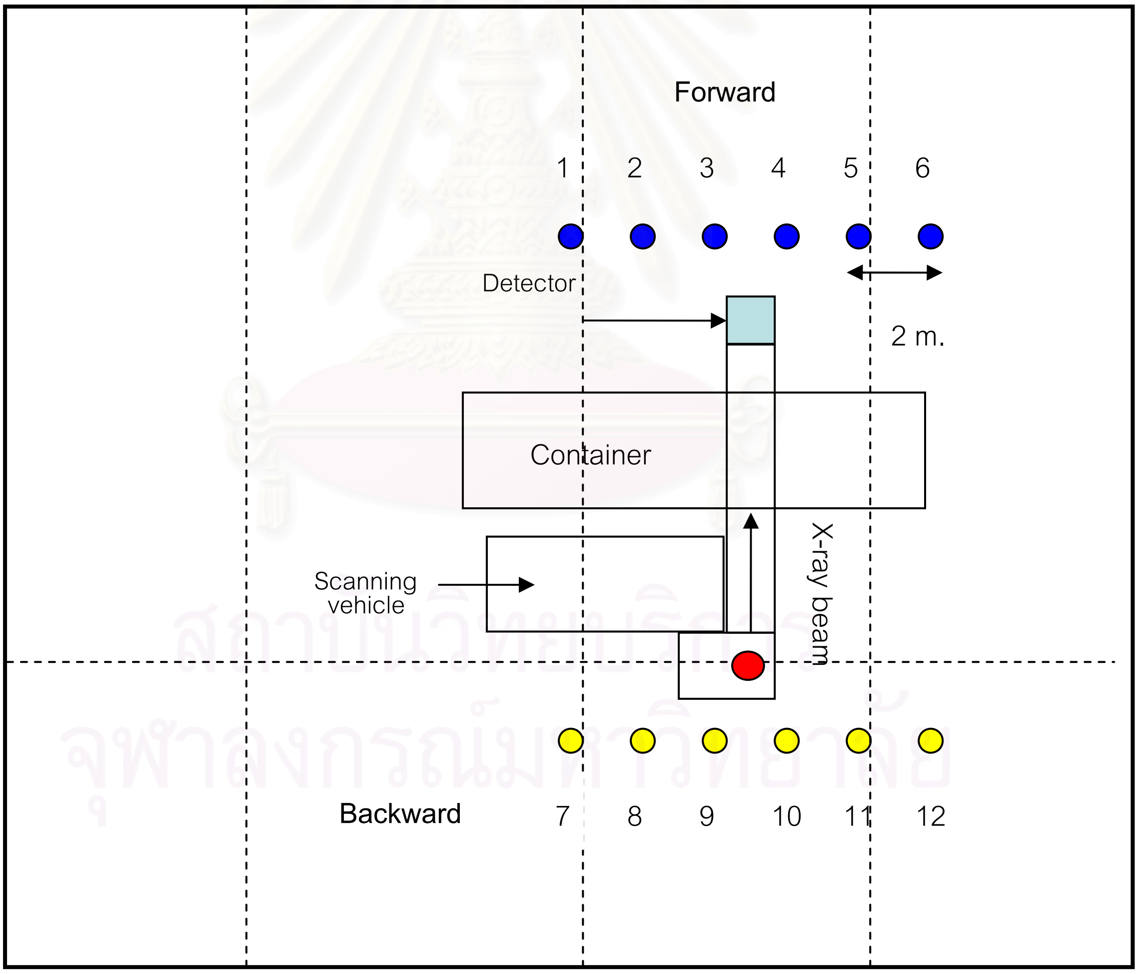
รูปที่ 4.5 แสดงการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดยการคำนวณของ MCNP-4A เปรียบเทียบกับผลการทดสอบของผู้ผลิตที่วัดอัตราปริมาณรังสีได้ 2.5 µGy/h ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า

จากรูปที่ 4.4 และ 4.5 แสดงผลการจำลองโดยนับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสี (F5 Tally) และนำค่าฟลักซ์ที่ได้ไปคำนวณหาค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ จะพบว่าแนวโน้มการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้จะมีการเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน เมื่อเทียบกับอัตราปริมาณรังสีที่ใกล้เคียงกันกับผลการทดลองการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต คือ 0.9, 2 µGy/h ตามลำดับ โดย ณ ตำแหน่งด้านหลังแขนของหัววัดรังสี (detector arm) จะมีค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ลดลงกว่าผลการทดสอบการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต เนื่องจากในการจำลองวัสดุที่ใช้ทำตู้บรรจุสินค้า และ detector arm เป็นเหล็กตัน จึงทำให้เกิดการลดทอนของรังสีเอกซ์ภายในตัววัตถุมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำตู้บรรจุสินค้าและ detector arm นั้นไม่ใช่เหล็กตันทั้งหมด อาจมีวัสดุอื่น และส่วนช่องว่างของอากาศภายในด้วยและในส่วนของตำแหน่ง A การกระจายอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างจากผลการทดสอบการกระจายอัตรา

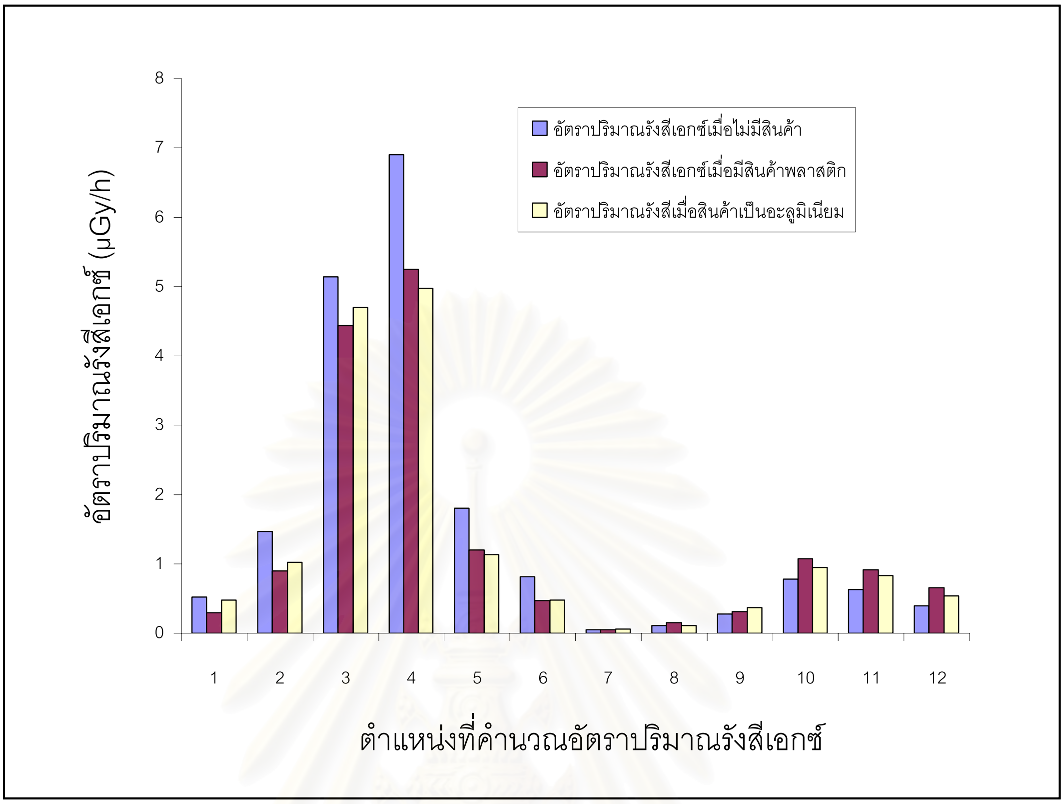
ปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต เนื่องจากในการจำลองไม่มีข้อมูลที่จะใส่พารามิเตอร์ของห้องควบคุมที่มีการกำบังรังสีด้วยตะกั่ว

4.1.3 ผลการคำนวณ อัตราปริมาณรังสีเอกซ์ ในบริเวณรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้า และสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า

ผลจากการคำนวณของแบบจำลอง ของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้า และสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า ได้แก่ พลาสติก และอะลูมิเนียม โดยจะกำหนดตำแหน่งที่ใช้วัด ณ ตำแหน่งเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.4 ผลที่ได้จากการจำลองแสดงผลออกมาในรูปของการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสี



รูปที่ 4.6 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ทำการคำนวณอัตราปริมาณรังสีเอกซ์โดย MCNP-4A



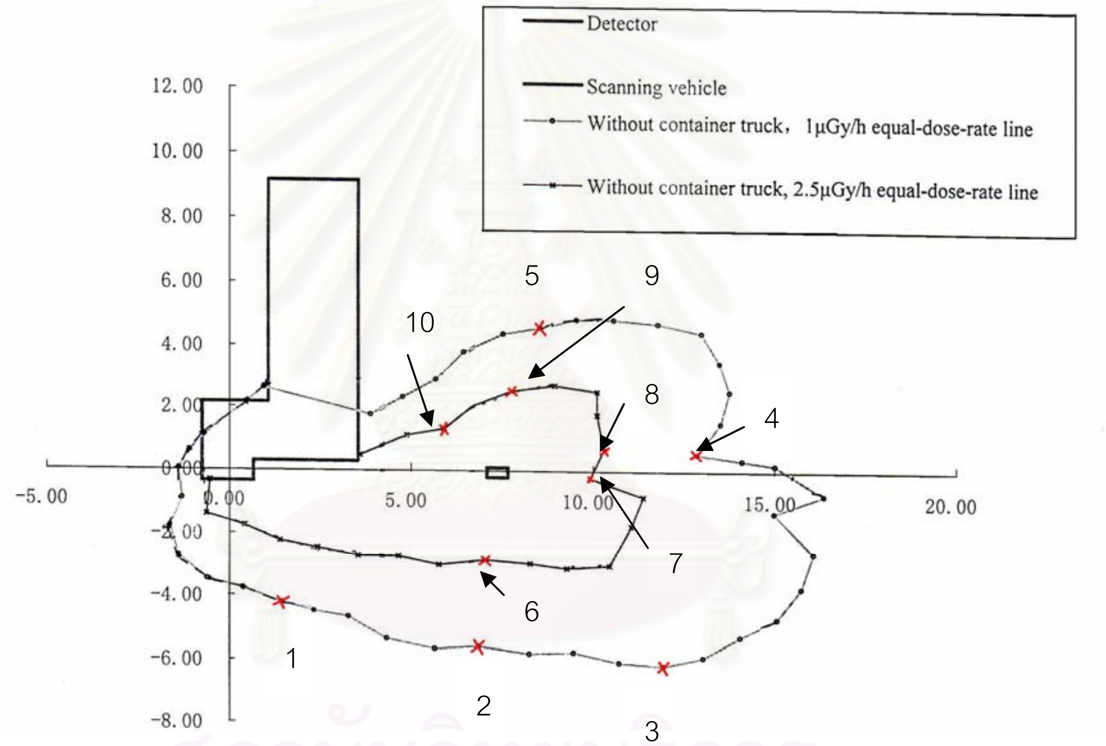
รูปที่ 4.7 กราฟเปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ ในกรณีที่มีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า โดย MCNP-4A

ผลที่ได้จากการจำลองโดย MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าต่างชนิดกันภายในตู้บรรจุสินค้า ได้แก่ ไม่มีสินค้า, พลาสติก และอะลูมิเนียม จะพบว่าในกรณีที่ไม่มีสินค้าค่าอัตราปริมาณรังสีทางด้านหน้าต้นกำเนิดรังสีจะสูง คือ ในตำแหน่งที่ 1 ถึง 6 เนื่องมาจากตู้สินค้าเป็นโลหะเหล็ก มีค่าเลขอะตอมสูง ผลของการกระเจิงรังสีด้านหน้า (forward scattering) และผลที่ได้จากกรณีที่มีสินค้าพลาสติก และอะลูมิเนียม จะมีค่าอัตราปริมาณรังสีจะสูงทางด้านหลังต้นกำเนิดรังสี คือ ในตำแหน่งที่ 7 ถึง 12 เนื่องจากสินค้าทั้ง 2 ชนิดนี้ เป็นวัสดุที่มีค่าเลขอะตอมต่ำกว่าโลหะเหล็ก การกระเจิงกลับของรังสี (backscattering) ของรังสีเอกซ์จะเกิดมากในกรณีที่เลขอะตอมต่ำแสดงความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้จากรูปที่ 4.7

4.2 ผลการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์เปรียบเทียบกับแบบจำลองระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้

4.2.1 ผลการทดลองจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากการวัดรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี (survey meter) ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

ในการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสีจะทำการวัด ณ ตำแหน่งเดียวกับการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต ดังรูปที่ 4.8 โดยทำการวัด 10 ตำแหน่ง

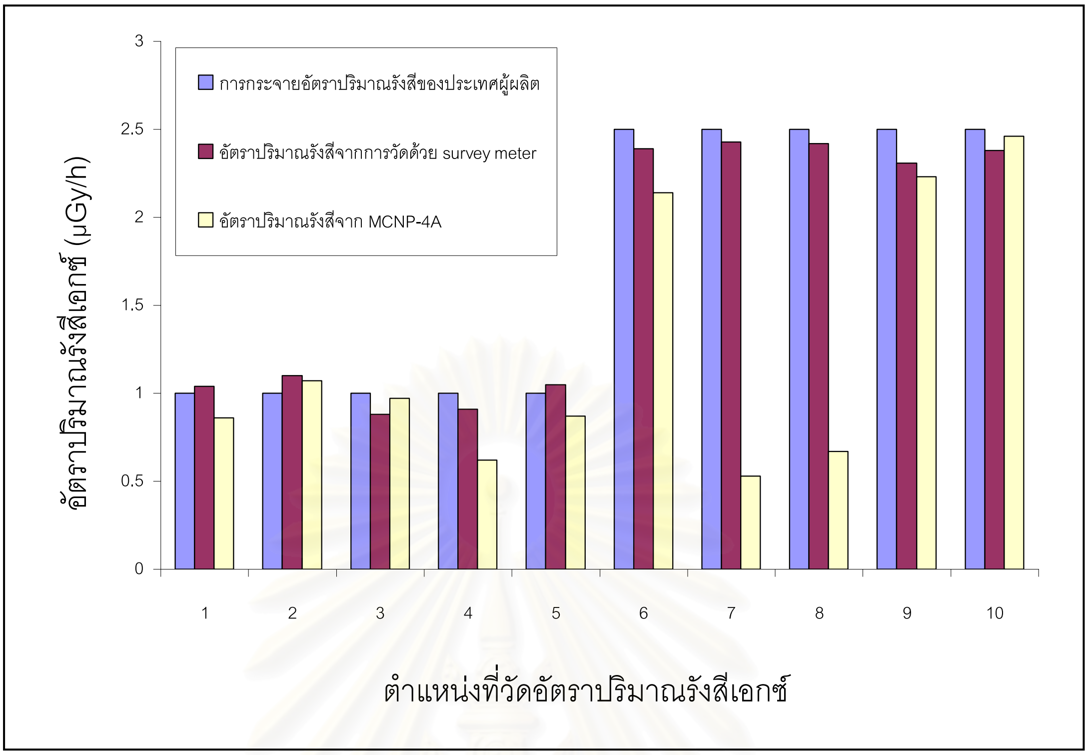


รูปที่ 4.8 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในกรณีไม่มีตู้บรรจุสินค้า

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MCNP-4A กับการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากวัดรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

ตำแหน่งที่	อัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากแบบจำลอง (μGy/h)
1	1	1.04	0.86
2	1	1.1	1.07
3	1	0.88	0.97
4	1	0.91	0.62
5	1	1.05	0.87
6	2.5	2.39	2.14
7	2.5	2.43	0.53
8	2.5	2.42	0.67
9	2.5	2.31	2.23
10	2.5	2.38	2.46

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

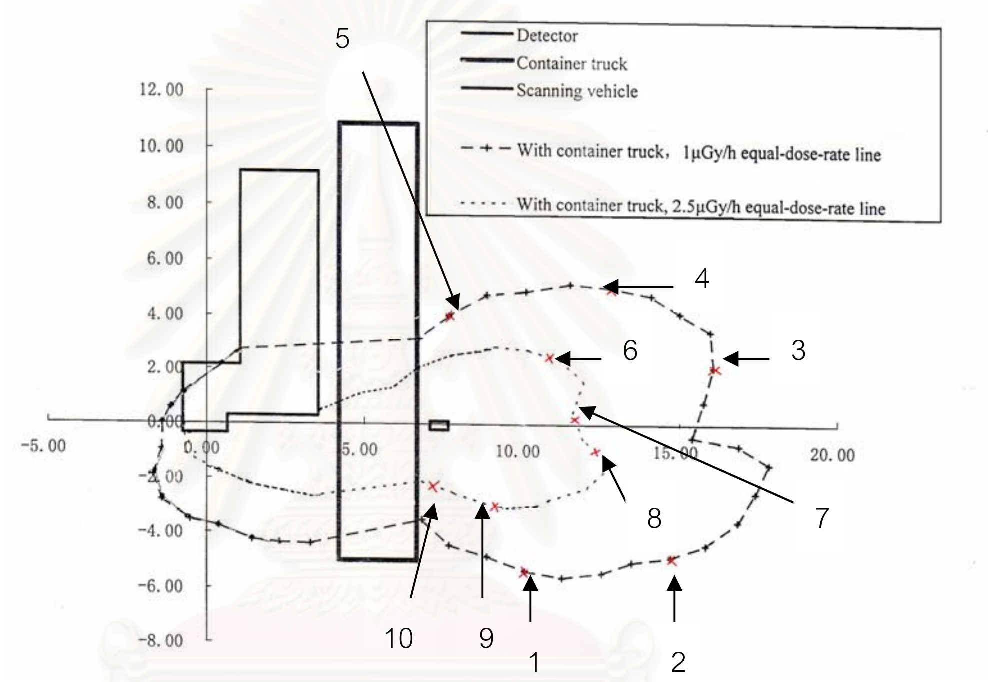


รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต เครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

จากข้อมูลที่แสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นความความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต เครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า พบว่า ค่าที่ได้จากการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี, ผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต และจากการจำลองด้วย MCNP-4A มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่อัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการจำลองด้วย MCNP-4A จะมีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตและเครื่องสำรวจรังสี อีกทั้งบางตำแหน่งมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เพราะ การจำลองระบบไม่นับรวมถึงรังสีที่เกิดในสิ่งแวดล้อม และปัจจัยอื่น ๆ เช่น พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ไม่สามารถหาข้อมูลได้ ในส่วนของตำแหน่งที่ 4, 7, 8 เป็นตำแหน่งที่มีความต่างมาก เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านหลังของ detector arm และวัสดุที่ใช้จำลอง detector arm นั้นเป็นวัสดุเหล็กตัน ซึ่งในความเป็นจริงวัสดุที่ใช้นั้นไม่ใช่เหล็กตันทั้งหมด อาจมีส่วนช่องว่างของอากาศภายในด้วย จึงเป็นเหตุผลทำให้อัตราปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งนี้น้อยกว่าการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี, ผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต

4.2.2 ผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากการวัดรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี (survey meter) **ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า**

ในการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสี จะทำการวัด ณ ตำแหน่งเดียวกับการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต ดังรูปที่ 4.10 โดยทำการวัด 10 ตำแหน่ง

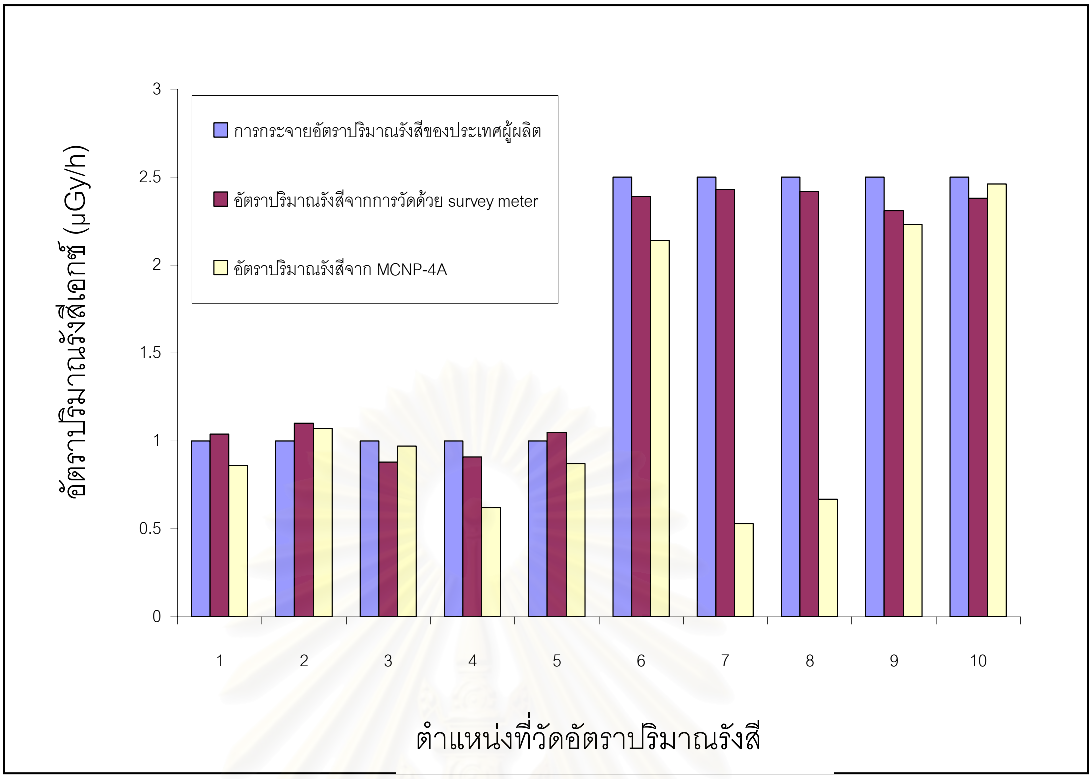


รูปที่ 4.10 แสดงตำแหน่งที่ใช้ในการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ในกรณีมีตู้บรรจุสินค้าเปล่า

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MCNP-4A กับการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของประเทศผู้ผลิต และผลที่ได้จากเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า

ตำแหน่งที่	อัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากแบบจำลอง (μGy/h)
1	1	1.49	0.98
2	1	1.39	0.86
3	1	1.43	0.82
4	1	1.31	1.06
5	1	1.56	1.26
6	2.5	2.39	1.78
7	2.5	3.39	0.41
8	2.5	3.07	0.59
9	2.5	3.23	1.89
10	2.5	3.37	2.06

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

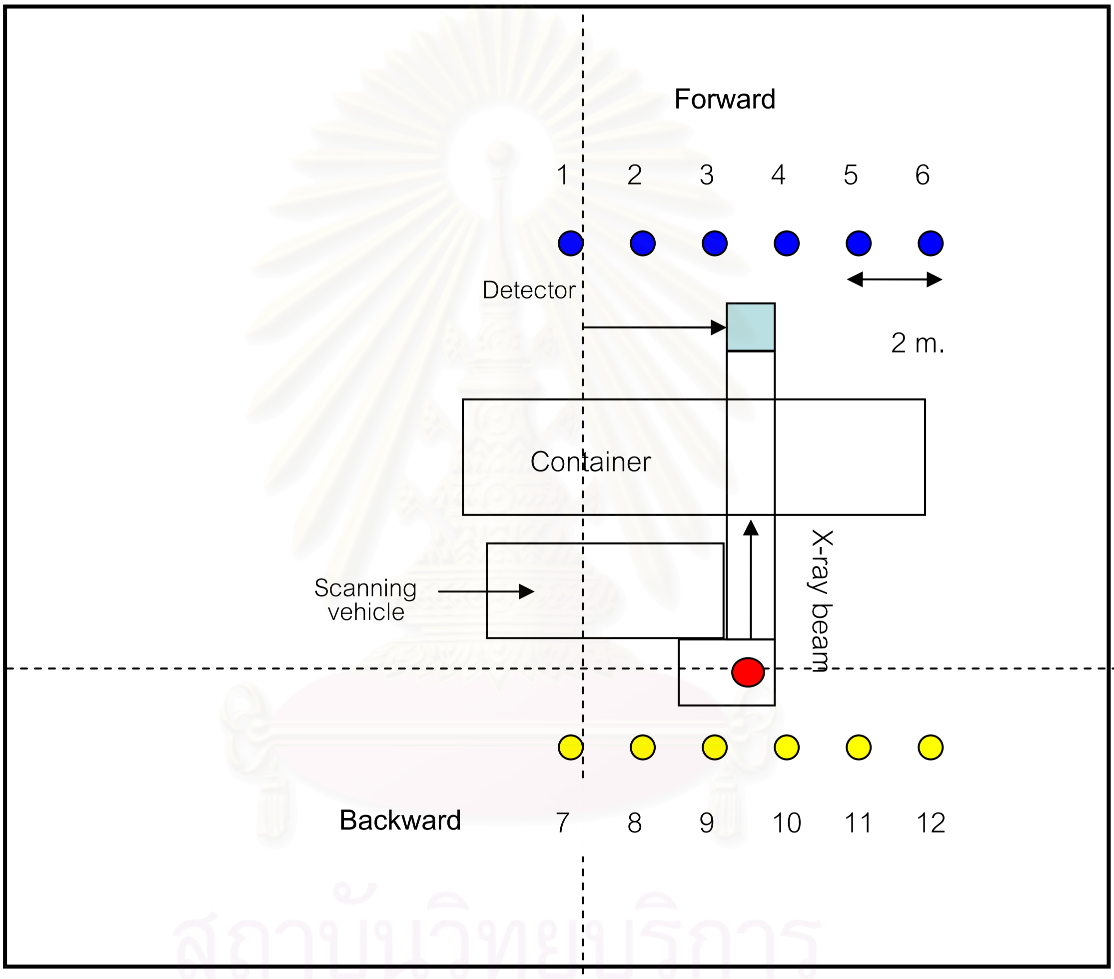


รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต เครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

จากข้อมูลที่แสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นความความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต เครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า พบว่า ค่าที่ได้จากการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี, ผลการทดลองของประเทศผู้ผลิต และจากการจำลองด้วย MCNP-4A มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่อัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการจำลองด้วย MCNP-4A จะมีค่าน้อยกว่าผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตและเครื่องสำรวจรังสี อีกทั้งบางตำแหน่งมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้เพราะ การจำลองระบบไม่นับรวมถึงรังสีที่เกิดในสิ่งแวดล้อม และปัจจัยอื่น ๆ เช่น พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ไม่สามารถหาข้อมูลได้ ในส่วนของตำแหน่งที่ 7, 8 เป็นตำแหน่งที่มีความต่างมาก เนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่ด้านหลังของ detector arm วัสดุที่ใช้จำลอง detector arm นั้นเป็นวัสดุเหล็กตัน ซึ่งในความเป็นจริงวัสดุที่ใช้นั้นไม่ใช่เหล็กตันทั้งหมด อาจมีส่วนช่องว่างของอากาศภายในด้วย จึงเป็นเหตุผลทำให้อัตราปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งนี้น้อยกว่าการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี, ผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต

4.2.3 ผลการทดลองจากการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า มีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้าเมื่อตัวอย่างสินค้าเป็น พลาสติก และอะลูมิเนียม

ในการทดลองจะกำหนดตำแหน่งตามแผนผัง แสดงดังรูปที่ 4.12 ทำการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสี ณ ตำแหน่งดังกล่าว

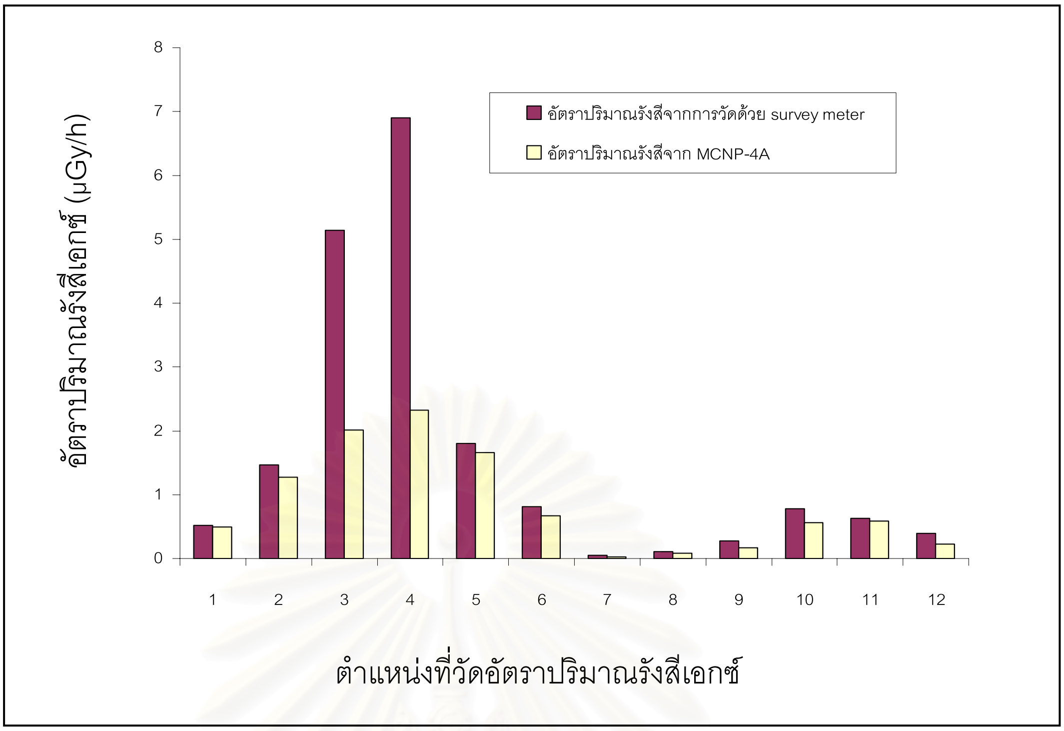


รูปที่ 4.12 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ใช้วัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสี

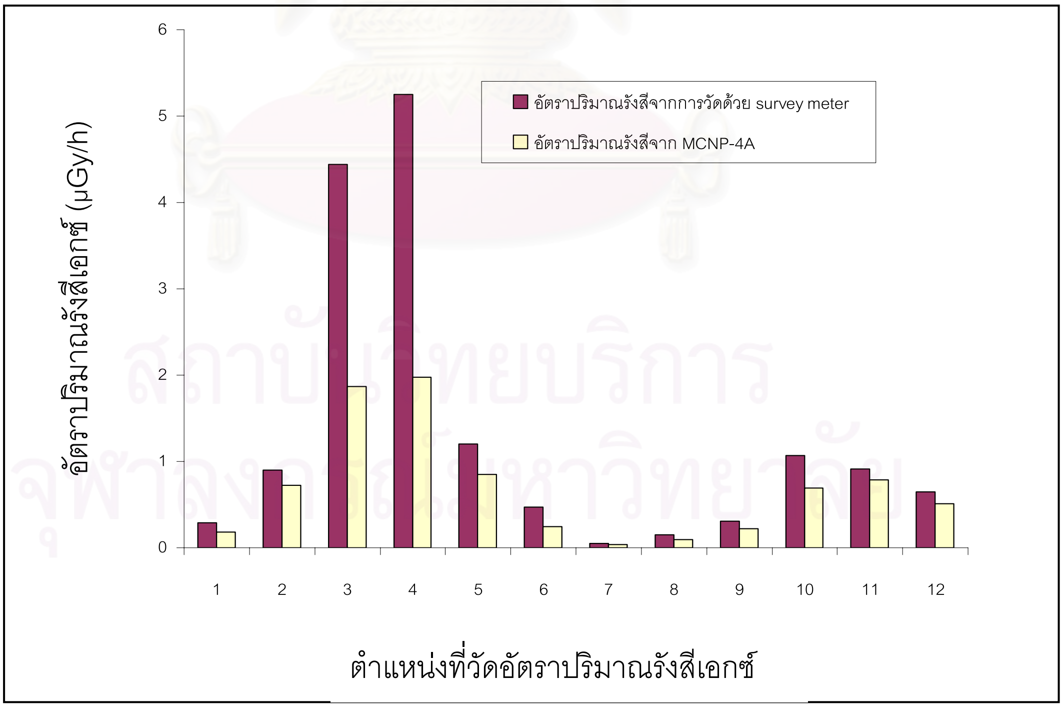
ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบผลการคำนวณด้วย MCNP-4A กับการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีเมื่อสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้าแตกต่างกัน

ตำแหน่ง	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์เมื่อวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีในกรณีที่ไม่มีสินค้า (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์เมื่อคำนวณด้วย MCNP-4Aในกรณีที่ไม่มีสินค้า (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์เมื่อวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่มีสินค้าเป็นพลาสติก(μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์เมื่อคำนวณด้วย MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าเป็นพลาสติก(μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์ เมื่อวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี ในกรณีที่มีสินค้าเป็นอะลูมิเนียม(μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์เมื่อคำนวณด้วย MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าเป็นอะลูมิเนียม(μGy/h)
1	0.52	0.492	0.29	0.18	0.48	0.352
2	1.47	1.271	0.9	0.721	1.02	0.811
3	5.14	2.016	4.44	1.865	4.7	1.76
4	6.9	2.32	5.25	1.973	4.97	1.882
5	1.8	1.66	1.2	0.85	1.13	0.74
6	0.81	0.67	0.47	0.246	0.48	0.316
7	0.05	0.024	0.05	0.038	0.06	0.031
8	0.11	0.082	0.15	0.093	0.11	0.087
9	0.28	0.17	0.31	0.218	0.37	0.28
10	0.78	0.56	1.07	0.691	0.95	0.634
11	0.63	0.59	0.91	0.786	0.83	0.79
12	0.39	0.23	0.65	0.51	0.54	0.461

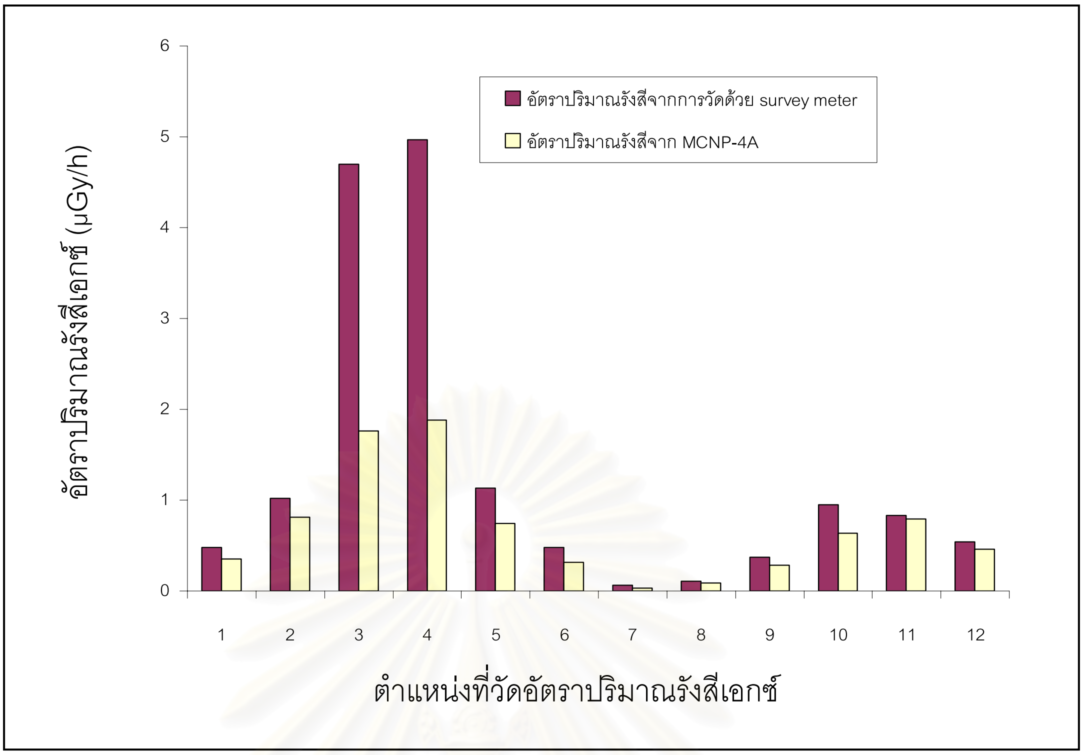
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าพลาสติกภายในตู้บรรจุสินค้า



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าอะลูมิเนียมภายในตู้บรรจุสินค้า

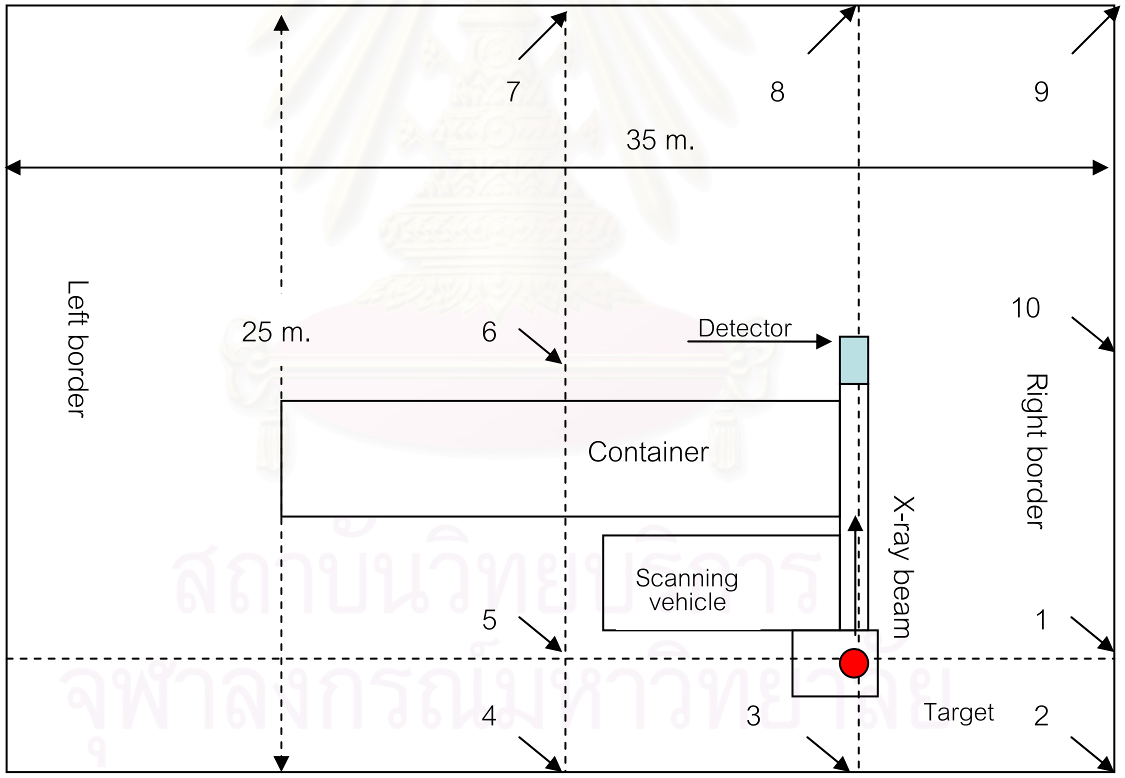
จากข้อมูลที่แสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 4.13, 4.14 และ4.15 ซึ่งเป็นความความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่มีสินค้าต่างชนิดอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้า พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการจำลองด้วย MCNP-4A กับการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และค่าที่ได้จากการจำลองด้วย MCNP-4A จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี ทั้งนี้เพราะ การจำลองระบบไม่นับรวมถึงรังสีที่เกิดในสิ่งแวดล้อม และปัจจัยอื่น ๆ เช่น พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ไม่สามารถหาข้อมูลได้ และในตำแหน่งที่ 3, 4 ในกรณีที่เป็นตู้เปล่า, พลาสติก และอะลูมิเนียม จะมีค่าแตกต่างจากการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี เนื่องจากสินค้าที่ใช้ในการจำลองกำหนดให้มีสินค้าเต็มตู้บรรจุสินค้า อีกทั้งส่วนของตู้บรรจุสินค้า และ detector arm ที่ใช้ในการจำลองจะแตกต่างจากความเป็นจริง จึงทำให้ค่าอัตราปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งนี้มีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี

ผลการทดลองวัดค่าอัตราปริมาณรังสีเมื่อสินค้าต่างชนิดกัน พบว่า ในกรณีที่เป็นตู้บรรจุสินค้าเปล่า อัตราปริมาณรังสีจะมากทางด้านหน้าต้นกำเนิดรังสี เนื่องมาจากรังสีการกระเจิงด้านหน้า (forward scattering) และผลที่ได้จากกรณีที่มีสินค้าพลาสติก และอลูมิเนียม

ค่าอัตราปริมาณรังสีจะสูงทางด้านหลังต้นกำเนิดรังสี เนื่องมาจากสินค้าทั้ง 2 ชนิดมีค่าเลขอะตอมต่ำจึงมีผลต่อการการกระเจิงกลับของรังสี (backscattering) มากกว่าในกรณีที่เป็นตู้บรรจุสินค้าเปล่า

4.2.4 ผลการทดลองจากการวัดอัตราปริมาณรังสีในบริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยตามที่ประเทศผู้ผลิตกำหนด ด้วยเครื่องสำรวจรังสี เมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณด้วย MCNP-4A

ผลจากการคำนวณของแบบจำลอง ของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า นำไปเปรียบเทียบกับการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี โดยจะกำหนดตำแหน่งที่ใช้คำนวณ และวัดอัตราปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งเดียวกันแสดงดังรูปที่ 4.16

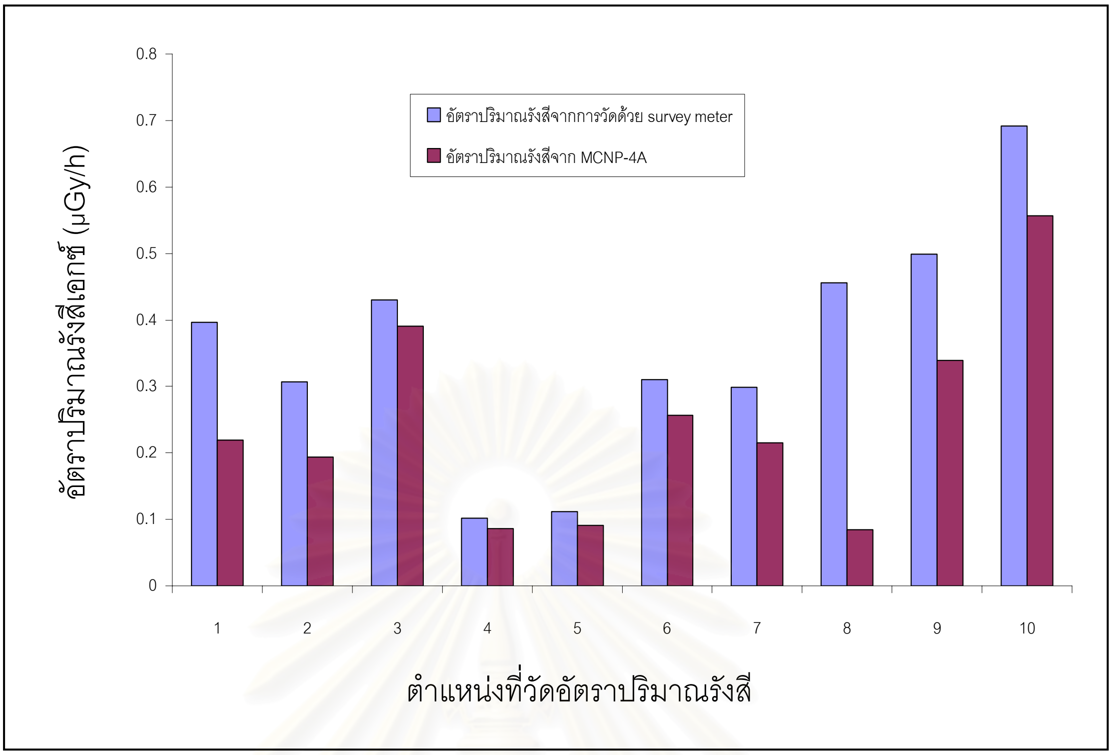


รูปที่ 4.16 แผนผังแสดงตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณ และวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยแบบจำลอง MCNP-4A กับการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากเครื่องสำรวจรังสี เมื่อมีตู้บรรจุสินค้าเปล่า ในบริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยตามที่ประเทศผู้ผลิตกำหนด

ตำแหน่งที่	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีเอกซ์จากแบบจำลอง (μGy/h)
1	0.397	0.219
2	0.307	0.194
3	0.430	0.390
4	0.102	0.086
5	0.111	0.091
6	0.310	0.256
7	0.299	0.215
8	0.456	0.0844
9	0.499	0.340
10	0.692	0.557

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีกับ MCNP-4A ในบริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยตามที่ประเทศผู้ผลิตกำหนด

จากข้อมูลที่แสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 4.17 ซึ่งเป็นความความสัมพันธ์ของอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี และ MCNP-4A ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่าและอยู่ในบริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยตามที่ประเทศผู้ผลิตกำหนด พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการจำลองด้วย MCNP-4A กับการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และค่าที่ได้จากการจำลองด้วย MCNP-4A จะมีค่าน้อยกว่าค่าที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี ทั้งนี้เพราะ การจำลองระบบไม่นับรวมถึงรังสีที่เกิดในสิ่งแวดล้อม และปัจจัยอื่น ๆ เช่น พารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบที่ไม่สามารถหาข้อมูลได้ และในตำแหน่งที่ 8 จะมีค่าแตกต่างจากการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี เนื่องจากในการจำลองวัสดุที่ใช้ทำตู้บรรจุสินค้า และ detector arm เป็นเหล็กตัน จึงทำให้เกิดการลดทอนของรังสีเอกซ์ภายในตัววัตถุมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำตู้บรรจุสินค้าและ detector arm นั้นไม่ใช่เหล็กตันทั้งหมด อาจมีวัสดุอื่น และส่วนช่องว่างของอากาศภายในด้วย

4.3 การประเมินความปลอดภัยด้านรังสีของระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้

ผลจากการคำนวณหาค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วย MCNP-4A, ผลการทดสอบการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต และการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสีรอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ในขอบเขตที่ทำการทดลอง และบริเวณขอบเขตที่ปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงานซึ่งกำหนดโดยประเทศผู้ผลิต จะนำผลที่ได้ไปประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ The International Commission on Radiology Protection Reccommendation number 60 (ICRP 60)

ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการทดลองทั้งหมดเป็นค่าอัตราปริมาณรังสีที่ดูดกลืนในตัวกลาง (absorbed dose rate; Gy/h) การประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีจะประเมินในความหมายของปริมาณรังสีที่ทำให้เกิดผลการทำลายของเนื้อเยื่อ (dose equivalent; Sv/h) จะต้องนำค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการทดลองไปคูณกับค่า quality factor (Q) คือ ค่าที่บอกถึงความรุนแรงของรังสีแต่ละชนิดจะมีผลต่อเนื้อเยื่อแตกต่างกัน ซึ่งโฟตอนมีค่าเท่ากับ 1

ในการประเมินความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงาน จะคำนวณโดยคิดเวลาในการปฏิบัติงานจริง คือ 2000 ชั่วโมง/ปี ซึ่งเป็นกรณีที่ระบบตรวจสอบต้องเดินเครื่องและส่งผ่านรังสีเพื่อการตรวจสอบตลอดเวลา แต่ในการปฏิบัติงานจริงระบบตรวจสอบไม่ต้องเดินเครื่องตลอดเวลา การตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าขนาดมาตรฐาน 1 ตู้ ใช้เวลา 3 นาที โดยตู้บรรจุสินค้าที่ทำการตรวจสอบอย่างน้อย 10 ตู้ ใช้เวลา 1 ชั่วโมง (80 ตู้/วัน โดยเครื่องจะทำงาน 3 ชั่วโมงต่อวัน) เพราะฉะนั้นในการปฏิบัติงานจริงระบบตรวจสอบจะมีการส่งผ่านของรังสีเอกซ์เพียง 900 ชั่วโมง/ปี ในงานวิจัยนี้จึงทำการประเมินความปลอดภัยทั้ง 2 ส่วน

4.3.1 การประเมินความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงาน จะคำนวณโดยคิดเวลาในการปฏิบัติงานจริง คือ 2000 ชั่วโมง/ปี

4.3.1.1 ผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีจากการกระจายตัวอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของประเทศผู้ผลิต

นำค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของของประเทศผู้ผลิตมาประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี จากการประเมิน พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต วัดค่าได้สูงสุด คือ 2.5 μGy/h นั่นคือ 5 mSv/year ซึ่งอัตรา

ปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 20 mSv/year เพราะฉะนั้นอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตนั้นปลอดภัยโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

4.3.1.2 ผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีจากการวัดอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP-4A

จะทำการประเมินค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A โดยนำค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดที่ได้ในทุกกรณี คือ ไม่มีตู้บรรจุ มีตู้บรรจุสินค้า และมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า ไปประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี

จากการประเมิน พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่ามีค่า 2.32 μGy/h นั่นคือ 4.64 mSv/year, ในกรณีที่มีพลาสติกอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 1.97 μGy/h นั่นคือ 3.94 mSv/year, ในกรณีที่มีอะลูมิเนียมอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 1.88 μGy/h นั่นคือ 3.76 mSv/year ซึ่งค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดทุกกรณีที่คำนวณได้อยู่ในตำแหน่งที่ 4 ดังรูปที่ 4.6 เมื่อประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี พบว่าอัตราปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 20 mSv/year ผู้ปฏิบัติงานจึงมีความปลอดภัยโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

4.3.1.3 ผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีจากการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี

จะทำการประเมินค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี โดยนำค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดที่ทำการวัดได้ในทุกกรณี คือ ไม่มีตู้บรรจุ มีตู้บรรจุสินค้า และมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า ไปประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี

จากการประเมิน พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่ามีค่า 6.9 μGy/h นั่นคือ 13.8 mSv/year, ในกรณีที่มีพลาสติกอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 5.25 μGy/h นั่นคือ 10.5 mSv/year, ในกรณีที่มีอะลูมิเนียมอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 4.97 μGy/h นั่นคือ 9.94 mSv/year และตำแหน่งที่ทำการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสีนี้เป็นตำแหน่งที่ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้เข้าไปทำงานดังรูปที่ 4.12 ซึ่งอัตราปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย 20 mSv/year ผู้ปฏิบัติงานจึงมีความปลอดภัยโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

ในการปฏิบัติงานจริงบุคลากรผู้ปฏิบัติงานจะทำงานบริเวณที่อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยตามประเทศผู้ผลิตกำหนดไว้ คือ 25 เมตร × 35 เมตร ดังรูปที่ 4.16 และอัตรา

ปริมาณรังสีที่วัดได้ค่ามากที่สุด (ตำแหน่งที่ 10 รูปที่ 4.16) มีค่า 0.75 μGy/h นั่นคือ 6.57 mSv/year และในส่วนของห้องควบคุมของระบบตรวจสอบนี้ (control room) จะมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในห้องนี้ด้วย โดยห้องนี้ได้ถูกออกแบบให้มีการกำบังรังสีด้วยตะกั่วเป็นอย่างดี จากการตรวจวัด ไม่พบอัตราปริมาณรังสีภายในห้องควบคุม เมื่อประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี พบว่าอัตราปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นในบริเวณที่บุคลากรทำงานมีความปลอดภัยและเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

4.3.2 การประเมินความปลอดภัยสำหรับผู้ปฏิบัติงาน จะคำนวณโดยคิดเวลาในการปฏิบัติงานจริงของระบบตรวจสอบเมื่อมีการส่งผ่านรังสี 900 ชั่วโมง/ปี

4.3.2.1 ผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีจากการกระจายตัวอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของประเทศผู้ผลิต

นำค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของของประเทศผู้ผลิต มาประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี จากการประเมิน พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิต วัดค่าได้สูงสุด คือ 2.5 μGy/h นั่นคือ 2.25 mSv/year ซึ่งอัตราปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 20 mSv/year เพราะฉะนั้นอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตนั้นปลอดภัยโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

4.3.2.2 ผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีจากการวัดอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP-4A

จะทำการประเมินค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A โดยนำค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดที่ได้ในทุกกรณี คือ ไม่มีตู้บรรจุ มีตู้บรรจุสินค้า และมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า ไปประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี

จากการประเมิน พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A ในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่ามีค่า 2.32 μGy/h นั่นคือ 2.09 mSv/year, ในกรณีที่มีพลาสติกอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 1.97 μGy/h นั่นคือ 1.77 mSv/year, ในกรณีที่มีอะลูมิเนียมอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 1.88 μGy/h นั่นคือ 1.69 mSv/year ซึ่งค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดทุกกรณีที่คำนวณได้อยู่ในตำแหน่งที่ 4 ดังรูปที่ 4.6 เมื่อประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี พบว่าอัตราปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยกว่า 20 mSv/year ผู้ปฏิบัติงานจึงมีความปลอดภัยโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

4.3.2.3 ผลการประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีจากการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี

จะทำการประเมินค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสี โดยนำค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดที่ทำการวัดได้ในทุกกรณี คือ ไม่มีตู้บรรจุ มีตู้บรรจุสินค้า และมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้า ไปประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสี

จากการประเมิน พบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่ามีค่า 6.9 μGy/h นั่นคือ 6.21 mSv/year, ในกรณีที่มีพลาสติกอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 5.25 μGy/h นั่นคือ 4.73 mSv/year, ในกรณีที่มีอะลูมิเนียมอยู่ภายในตู้บรรจุสินค้ามีค่า 4.97 μGy/h นั่นคือ 4.47 mSv/year และตำแหน่งที่ทำการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วยเครื่องสำรวจรังสีนี้เป็นตำแหน่งที่ผู้ปฏิบัติงานไม่ได้เข้าไปทำงานดังรูปที่ 4.12 ซึ่งอัตราปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นมีค่าน้อย 20 mSv/year ผู้ปฏิบัติงานจึงมีความปลอดภัยโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

ในการปฏิบัติงานจริงบุคลากรผู้ปฏิบัติงานจะทำงานบริเวณที่อยู่ในขอบเขตที่ปลอดภัยตามประเทศผู้ผลิตกำหนดไว้ คือ 25 เมตร × 35 เมตร ดังรูปที่ 4.16 และอัตราปริมาณรังสีที่วัดได้ค่ามากที่สุด (ตำแหน่งที่ 10 รูปที่ 4.16) มีค่า 0.75 μGy/h นั่นคือ 0.68 mSv/year และในส่วนของห้องควบคุมของระบบตรวจสอบนี้ (control room) จะมีผู้ปฏิบัติงานอยู่ภายในห้องนี้ด้วย โดยห้องนี้ได้ถูกออกแบบให้มีการกำบังรังสีด้วยตะกั่วเป็นอย่างดี จากการตรวจวัด ไม่พบอัตราปริมาณรังสีภายในห้องควบคุม เมื่อประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีพบว่าอัตราปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นในบริเวณที่บุคลากรทำงานมีความปลอดภัยและเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาผลการคำนวณนับค่า F5 ของ MCNP-4A ซึ่งเป็นการบันทึกค่า ฟลักซ์ แล้วนำค่าฟลักซ์ที่ได้คำนวณหาค่าอัตราปริมาณรังสีจากสมการ พบว่าค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ที่ได้จากการคำนวณภายใต้เงื่อนไข ต่าง ๆ นั้น มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับผลการทดสอบจากการกระจายอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ของ NUCTECH COMPANY LIMITED ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน ซึ่งเป็นประเทศผู้ผลิต และผลการทดลองจากการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ด้วยเครื่องสำรวจรังสี แต่ค่าที่ได้จากคำนวณด้วย MCNP-4A จะมีค่าน้อยกว่า สาเหตุเนื่องมาจากการจำลองหาค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบนั้น จะทำการคำนวณภายใต้เงื่อนไขในระบบเท่านั้น ไม่ได้ทำการคำนวณเงื่อนไขอื่นที่มีในระบบจริง ซึ่งในระบบจริงอาจวัดรวมไปถึงรังสีที่เกิดขึ้นในสิ่งแวดล้อม และการเกิดรังสีกระเจิงกับพื้นด้วย อีกทั้งค่าอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งด้านหลัง detector arm, บริเวณห้องควบคุมมีความแตกต่างกัน เนื่องจากในการจำลองวัสดุที่ใช้ทำ detector arm เป็นเหล็กตัน จึงทำให้เกิดการลดทอนของรังสีเอกซ์ภายในตัววัตถุมากกว่าความเป็นจริง ซึ่งวัสดุที่ใช้ทำ detector arm นั้นไม่ใช่เหล็กตันทั้งหมด อาจมีส่วนช่องว่างของอากาศภายในด้วย และในบริเวณห้องควบคุมการกระจายอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการคำนวณมีความแตกต่างจากผลการทดสอบการกระจายอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต เนื่องจากในการจำลองไม่มีข้อมูลที่จะใส่พารามิเตอร์ของห้องควบคุมที่มีการกำบังรังสีด้วยตะกั่ว ในส่วนของการวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์ด้วย Thermoluminesence dosimeter (TLD) ค่าที่วัดได้มีค่าต่ำกว่าค่ารังสีพื้นฐาน (background) นั่นคือไม่สามารถวัดปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นจากการกระเจิงของรังสี (scatter radiation) ได้ เนื่องมาจากอัตราปริมาณรังสีมีค่าต่ำกว่าค่าความไว (sensitivity) ของ TLD

การวัดอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบในกรณีที่มีสินค้าต่างชนิดภายในตู้บรรจุสินค้า ได้แก่ ตู้บรรจุสินค้าเปล่า พลาสติก และอลูมิเนียม ซึ่งผลจากการกระเจิงของรังสีที่มีต่อสินค้าจะแตกต่างกันด้วย จากการทดลองพบว่า พลาสติก และอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำ จะมีการกระเจิงกลับของรังสี (back scattering) มากกว่าในกรณีที่เป็นตู้บรรจุสินค้าเปล่า ซึ่งตู้บรรจุสินค้าเปล่าเป็นวัสดุที่ทำจากเหล็ก มีเลขอะตอมสูง มีผลการกระเจิงรังสีไปด้านหน้า (forward scattering)

ในด้านความปลอดภัยของบุคลากรผู้ปฏิบัติงาน เมื่อนำค่าอัตราปริมาณรังสีที่ได้จากการทดสอบของประเทศผู้ผลิต, เครื่องสำรวจรังสี, การคำนวณด้วย MCNP-4A, ขอบเขตปลอดภัยที่กำหนดโดยประเทศผู้ผลิต และห้องควบคุมสำหรับผู้ปฏิบัติงาน ไปประเมินความปลอดภัยทางด้านรังสีตามคำแนะนำของ ICRP 60 โดยประเมินจากเวลาที่ทำงาน และเวลาที่ระบบส่งผ่านรังสีเอกซ์จริง จากการวิจัยพบว่า ค่าอัตราปริมาณรังสีสูงสุดในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า, มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า และมีสินค้าต่างชนิดภายในตู้บรรจุสินค้า มีค่าอัตราปริมาณรังสีไม่เกิน 20 mSv/year เพราะฉะนั้นบุคคลากรผู้ปฏิบัติงานมีความปลอดภัยโดยเป็นไปตามคำแนะนำของ ICRP 60

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. เนื่องจากค่าที่คำนวณด้วย MCNP-4A ช่วยทำให้ทราบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล เมื่อมีการเปลี่ยนความสัมพันธ์ใด ๆ ในระบบได้ โดยการพิจารณาปัจจัยภายในระบบนั้น เพราะฉะนั้นเพื่อให้ได้ค่าที่คำนวณด้วย MCNP-4A อย่างแม่นยำ ควรจะได้ข้อมูลที่จำเป็นใช้ในการออกแบบระบบที่ถูกต้อง เช่น วัสดุที่ใช้ทำ detector arm, รูปแบบและการจัดวางของห้องควบคุมที่ปฏิบัติงาน เป็นต้น
2. สามารถประยุกต์ใช้ MCNP-4A ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีของระบบอื่นได้ เช่น ระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบติดตั้งประจำที่ (fixed system) เพื่อประเมินความปลอดภัยให้กับผู้ปฏิบัติงานก่อนใช้งานจริง
3. ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย TLD เป็นผลึกชนิด LiF แต่ไม่สามารถวัดปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจากพลังงานที่เกิดจากรังสีกระเจิงมีค่าน้อยกว่าขีดความไวของ TLD ซึ่งอาจจะเปลี่ยนไปใช้ CaF_2 หรือ $CaSO_4$ ซึ่งเป็น TLD ที่เหมาะสำหรับการวัดรังสีในสิ่งแวดล้อม และมีความไวต่อรังสีสูงกว่า LiF
4. สามารถขยายขอบเขตงานวิจัยได้ โดยออกแบบโปรแกรมในการใช้ MCNP-4A ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบ เพื่อความสะดวกในการติดตั้งและปฏิบัติงาน โดยออกแบบโปรแกรมให้สามารถระบุเงื่อนไขต่าง ๆ ของระบบได้อย่างครบถ้วน

รายการอ้างอิง

1. ทรงศักดิ์ องศ์วัฒนกุล. การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อหาความแรงรังสีของสารรังสีติดตามตามสำหรับฉีดเข้าไปในระบบของเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
2. กานต์พงศ์ ชูพันธ์. การจำลองการกระเจิงแบบคอมป์ตันของรังสีแกมมาในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีมอนติคาร์โล. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
3. ธนัญชัย พิรุณพันธ์. การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาด้วย MCNP-4A. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
4. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาในงานอุตสาหกรรม. เอกสารการสอนวิชา 2111660 การถ่ายภาพรังสีในงานอุตสาหกรรม ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2544.
5. Jianmin LI, Lin YANG and Xiaoyi HE. Advanced X-ray container/vehicle inspection systems plus radiation detection subsystem: THSCAN™ fused technology. Nuctech Company Limited.
6. Nuctech Company Limited. THSCAN MT 1213 LT Training Course for Basic Knowledge. China, April 2004.
7. Esam Hussein. Monte Carlo Particle Transport with the MCNP Code. Bangkok: Department of Nuclear Technology, Chulalongkorn University, 1997.
8. ICRP, Publication 60 .Radiation Protection, Pergamon Press,Oxford, 1990.
9. OAK RIDEG NATIONAL LABORATORY. RISC COMPUTER CODE COLLECTION MCNP-4A Monte Carlo N-Particles Transport Code System. 1st ed. Los Alamos, New Mexico : Los Alamos National Laboratory, 1993.
10. Glenn F. Knoll. Radiation detection and measurement. 3rd ed. New York : John Wiley & sons, 1999.
11. M. Sohrabpour. Gamma irradiator dose mapping simulation using the MCNP code and benchmarking with dosimetry. Applied Radiation and Isotopes 57 (2002) : 537-542.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

12. Herman Cember. Introduction to health physics. 2nd ed. New York : Pergamon Press, 1983.

13. John R. Lamarsh. Introduction to nuclear engineering. 2nd ed. Massachusetts : Addison-Wesley, 1983.

14. D.R.Vij. Thermoluminescent material. 2nd ed. Newyork : PTR Prentice-Hall,A Simon-Schuster Company,1993.

15. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และคณะ. ระบบตรวจสอบตู้คอนเทนเนอร์สินค้าด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูงของกรมศุลกากรไทย. วารสารสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย,ฉบับที่ 2 ปีที่ 5, 2004.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

ตัวอย่างแฟ้มข้อมูลของคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP-4A

ก.1 แฟ้มข้อมูลป้อนเข้ากรณีไม่มีสินค้าและตู้บรรจุสินค้า

```
c cell Cards
1   1  -11.34   -1  -2   3     #2   IMP:P=1$SHIELD
2   0              4  -5   6   -7  8  -9  IMP:P=1$SOURCE
3   1  -11.34   10   -11  12  -13  14  -15   #4  IMP:P=1$COLLIMATE
4   0             10   -11  12  -13  16  -17  IMP:P=1$HOLE COLLIMATE
5   0             18  -19   20  -21  22  -23  #1  #2  #3  #4  #7  IMP:P=1$BOX
6   0            -18:19:-20:21:-22:23   IMP:P=0$UNIVERSE
7   2  -7.87     24  -25  26  -27  28  -29  IMP:P=1$DETECTOR ARM

c surface cards
1    CZ  15
2    PZ  37
3    PZ -37
4    PZ -22
5    PZ  22
6    PX  0
7    PX  15
8    PY -1.6
9    PY  1.6
10  PZ -34
11  PZ  110
12  PX  60
13  PX  100
14  PY -10.5
15  PY  10.5
16  PY -0.5
17  PY  0.5
```

```
18  PZ -104
19  PZ  2000
20  PY -2000
21  PY  2000
22  PX -2000
23  PX  2000
24  PZ -89
25  PZ  356
26  PX  680
27  PX  713
28  PY -28
29  PY  28

MODE P
SDEF ERG=D1 PAR=2 POS 1 0 0
SI1 H  0  0.5  1  1.5  2  2.5
SP1 D 0  0.11138195  0.044136765  0.022035881  0.010335413  0.000650026
PHYS:P 2 0 0
F15:P  600   150  0   0.5
E15    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F25:P  900   280  0   0.5
E25    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F35:P  1000   180  0   0.5
E35    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F45:P  1350   250  0   0.5
E45    0  0.5  1  1.5  2  2.5
M1 82000 -1
M2 26000 -1
NPS 10000000
PRINT
```

ก.2 แฟ้มข้อมูลป้อนเข้ากรณีมีตู้บรรจุสินค้า แต่ไม่มีสินค้า

```
c cell cards
1    1  -11.34   -1  -2  3  #2  IMP:P=1$SHIELD
2    0              4  -5  6  -7  8  -9  IMP:P=1$SOURCE
3    1  -11.34  10  -11  12  -13  14  -15  #4  IMP:P=1$COLLIMATE
4    0             10  -11  12  -13  16  -17  IMP:P=1$HOLE COLLIMATE
5    0             18  -19  20  -21  22  -23  #1  #2  #3  #4  #7  #10  IMP:P=1$BOX
6    0            -18:19:-20:21:-22:23  IMP:P=0$UNIVERSE
7    2  -7.87  24  -25  26  -27  28  -29  IMP:P=1$DETECTOR ARM
8    2  -7.87    30  -31  32  -33  34  -35  #9  U=1  IMP:P=1$CONTAINER
9    0              36  -37  38  -39  40  -41  U=1  IMP:P=1$IN CONTAINER
10  0              42  -43  44  -45  46  -47  FILL=1  IMP:P=1
11  0              #8  #9  U=1  IMP:P=1

c surface cards
1     CZ  15
2     PZ  37
3     PZ -37
4     PZ -22
5     PZ  22
6     PX  0
7     PX  4
8     PY -1.6
9     PY  1.6
10   PZ -34
11   PZ  110
12   PX  60
13   PX  100
14   PY -10.5
15   PY  10.5
16   PY -0.5
```

```
17   PY  0.5
18   PZ -104
19   PZ  2000
20   PY -2000
21   PY  2000
22   PX -2000
23   PX  2000
24   PZ -89
25   PZ  356
26   PX  680
27   PX  713
28   PY -28
29   PY  28
30   PZ -64
31   PZ  195
32   PX  250
33   PX  500
34   PY  -303
35   PY   303
36   PZ  -62
37   PZ  193
38   PX  252
39   PX  498
40   PY  -301
41   PY  301
42   PZ -69
43   PZ  200
44   PX  248
45   PX  505
46   PY -305
47   PY  303
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
MODE P
SDEF ERG=D1 PAR=2 POS 1 0 0
SI1 H  0  0.5  1  1.5  2  2.5
SP1 D 0  0.11138195  0.044136765  0.022035881  0.010335413  0.000650026
PHYS:P 2 0 0
F15:P  544   900  0   0.5
E15    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F25:P  2200  900  0   0.5
E25    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F35:P  2200   0  0   0.5
E35    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F45:P  2200  -800  0   0.5
E45    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F55:P  544   -800  0   0.5
E55    0  0.5  1  1.5  2  2.5
M1 82000 -1
M2 26000 -1
NPS 10000000
PRINT
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.3 แฟ้มข้อมูลป้อนเข้ากรณีที่มีสินค้าอลูมิเนียมภายในตู้บรรจุสินค้า

```
c cell cards
1  1  -11.34  -1  -2  3  #2  IMP:P=1$SHIELD
2  0           4  -5  6  -7  8  -9  IMP:P=1$SOURCE
3  1  -11.34  10  -11  12  -13  14  -15  #4  IMP:P=1$COLLIMATE
4  0          10  -11  12  -13  16  -17  IMP:P=1$HOLE COLLIMATE
5  0          18  -19  20  -21  22  -23  #1  #2  #3  #4  #7  #10  IMP:P=1$BOX
6  0         -18:19:-20:21:-22:23  IMP:P=0$UNIVERSE
7  2  -7.87    24  -25  26  -27  28  -29  IMP:P=1$DETECTOR ARM
8  2  -7.87    30  -31  32  -33  34  -35  #9  #12  U=1  IMP:P=1$CONTAINER
9  0          36  -37  38  -39  40  -41  #12  U=1  IMP:P=1$IN CONTAINER
10 0          42  -43  44  -45  46  -47  FILL=1  IMP:P=1
11 0         #8  #9  #12  U=1  IMP:P=1
12 3  -2.699  48 -49 50 -51 52 -53 U=1 IMP:P=1$GOODS

c surface cards
1  CZ  15
2  PZ  37
3  PZ -37
4  PZ -22
5  PZ  22
6  PX  0
7  PX  4
8  PY -1.6
9  PY  1.6
10 PZ -34
11 PZ  110
12 PX  60
13 PX  100
14 PY -10.5
15 PY  10.5
```

16 PY -0.5

17 PY 0.5

18 PZ -104

19 PZ 2000

20 PY -2000

21 PY 2000

22 PX -2000

23 PX 2000

24 PZ -89

25 PZ 411

26 PX 680

27 PX 713

28 PY -28

29 PY 28

30 PZ -64

31 PZ 195

32 PX 250

33 PX 500

34 PY -303

35 PY 303

36 PZ -62

37 PZ 193

38 PX 252

39 PX 498

40 PY -301

41 PY 301

42 PZ -69

43 PZ 200

44 PX 248

45 PX 505

46 PY -305

```
47 PY  305
48 PZ -60
49 PZ  191
50 PX  254
51 PX  496
52 PY -299
53 PY  299

MODE P
SDEF ERG=D1 PAR=2 POS 1 0 0
SI1 H  0  0.5  1  1.5  2  2.5
SP1 D 0  0.11138195  0.044136765  0.022035881  0.010335413  0.000650026
PHYS:P 2 0 0
F15:P  780  -628  0   0.5
E15    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F25:P  780  -428  0   0.5
E25    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F35:P  780  -228  0   0.5
E35    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F45:P  780   228  0   0.5
E45    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F55:P  780   428  0   0.5
E55    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F65:P  780   628  0   0.5
E65    0  0.5  1  1.5  2  2.5
M1 82000 -1
M2 26000 -1
M3 13000 -1
NPS 10000000
PRINT
```

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.4 แฟ้มข้อมูลป้อนเข้ากรณีที่มีสินค้าพลาสติกภายในตู้บรรจุสินค้า

```
c cell cards
1   1  -11.34  -1  -2  3  #2  IMP:P=1$SHIELD
2   0           4  -5  6 -7  8  -9  IMP:P=1$SOURCE
3   1  -11.34  10  -11 12  -13  14  -15  #4  IMP:P=1$COLLIMATE
4   0          10  -11 12  -13  16  -17  IMP:P=1$HOLE COLLIMATE
5   0          18  -19  20 -21  22  -23  #1  #2  #3  #4  #7  #10 IMP:P=1$BOX
6   0         -18:19:-20:21:-22:23  IMP:P=0$UNIVERSE
7   2  -7.87   24  -25  26  -27  28  -29  IMP:P=1$DETECTOR ARM
8   2  -7.87   30  -31  32  -33  34  -35  #9  U=1  IMP:P=1$CONTAINER
9   0          36  -37  38  -39  40  -41  U=1  IMP:P=1$IN CONTAINER
10 0           42  -43  44  -45  46  -47  FILL=1  IMP:P=1
11 0           #8  #9  U=1  IMP:P=1
12 3  -0.92    48 -49 50 -51 52 -53 U=1 IMP:P=1$GOODS

c surface cards
1  CZ  15
2  PZ  37
3  PZ -37
4  PZ -22
5  PZ  22
6  PX  0
7  PX  4
8  PY -1.6
9  PY  1.6
10 PZ -34
11 PZ  110
12 PX  60
13 PX  100
14 PY -10.5
15 PY  10.5
```

16 PY -0.5

17 PY 0.5

18 PZ -104

19 PZ 2000

20 PY -2000

21 PY 2000

22 PX -2000

23 PX 2000

24 PZ -89

25 PZ 411

26 PX 680

27 PX 713

28 PY -28

29 PY 28

30 PZ -64

31 PZ 195

32 PX 250

33 PX 500

34 PY -303

35 PY 303

36 PZ -62

37 PZ 193

38 PX 252

39 PX 498

40 PY -301

41 PY 301

42 PZ -69

43 PZ 200

44 PX 248

45 PX 505

46 PY -305

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

```
47 PY  305
48 PZ -60
49 PZ  191
50 PX  254
51 PX  496
52 PY -299
53 PY  299

MODE P
SDEF ERG=D1 PAR=2 POS 1 0 0
SI1 H  0  0.5  1  1.5  2  2.5
SP1 D 0  0.11138195  0.044136765  0.022035881  0.010335413  0.000650026
PHYS:P 2 0 0
F15:P  780  -628  0   0.5
E15    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F25:P  780  -428  0   0.5
E25    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F35:P  780  -228  0   0.5
E35    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F45:P  780   228  0   0.5
E45    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F55:P  780   428  0   0.5
E55    0  0.5  1  1.5  2  2.5
F65:P  780   628  0   0.5
E65    0  0.5  1  1.5  2  2.5
M1 82000 -1
M2 26000 -1
M3 6000  -0.8571  1000  -0.14285
NPS 10000000
PRINT
```

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลจากการจำลอง และข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณ และจากการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีเมื่อเทียบกับผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตในกรณีที่ไม่มีตู้บรรจุสินค้า

ตำแหน่งที่	อัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีจากเครื่องสำรวจรังสี (μGy/h)	ค่าความผิดพลาด (%)	อัตราปริมาณรังสีจากแบบจำลอง (μGy/h)	ค่าความผิดพลาด (%)
1	1	1.04	3.85	0.86	14
2	1	1.1	9.1	1.07	7
3	1	0.88	13.63	0.97	3
4	1	0.91	9.89	0.62	38
5	1	1.05	4.76	0.87	13
6	2.5	2.39	4.6	2.14	14.4
7	2.5	2.43	2.88	0.53	78.8
8	2.5	2.42	3.31	0.67	73.2
9	2.5	2.31	8.23	2.23	10.8
10	2.5	2.38	5.04	2.46	1.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณ และจากการทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสีเมื่อเทียบกับผลการทดสอบของประเทศผู้ผลิตในกรณีที่มีตู้บรรจุสินค้าเปล่า

ตำแหน่งที่	อัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิต (μGy/h)	อัตราปริมาณรังสีจากเครื่องสำรวจรังสี (μGy/h)	ค่าความผิดพลาด (%)	อัตราปริมาณรังสีจากแบบจำลอง (μGy/h)	ค่าความผิดพลาด (%)
1	1	1.49	49	0.98	2
2	1	1.39	39	0.86	14
3	1	1.43	43	0.82	18
4	1	1.31	31	1.06	6
5	1	1.56	56	1.26	26
6	2.5	2.39	4.4	1.78	28.8
7	2.5	3.39	35.6	0.41	83.6
8	2.5	3.07	22.8	0.59	76.4
9	2.5	3.23	29.2	1.89	24.4
10	2.5	3.37	34.8	2.06	17.6

จากตารางที่ ข.1 และ ข.2 ในการคำนวณค่าความผิดพลาดของอัตราปริมาณรังสีจากเครื่องสำรวจรังสี และอัตราปริมาณรังสีจากแบบจำลองจะใช้ค่าอัตราปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิตเป็นค่ามาตรฐานที่ใช้ในการคำนวณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวฝนแก้ว เทพสุต เกิดเมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชารังสีเทคนิค คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยมหิดล ในปี พ.ศ. 2546 หลังจากนั้นเข้าศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นิวเคลียร์เทคโนโลยี) ที่ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย