

การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาด้วย MCNP-4A



นายธนัญชัย พิรุณพันธ์

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

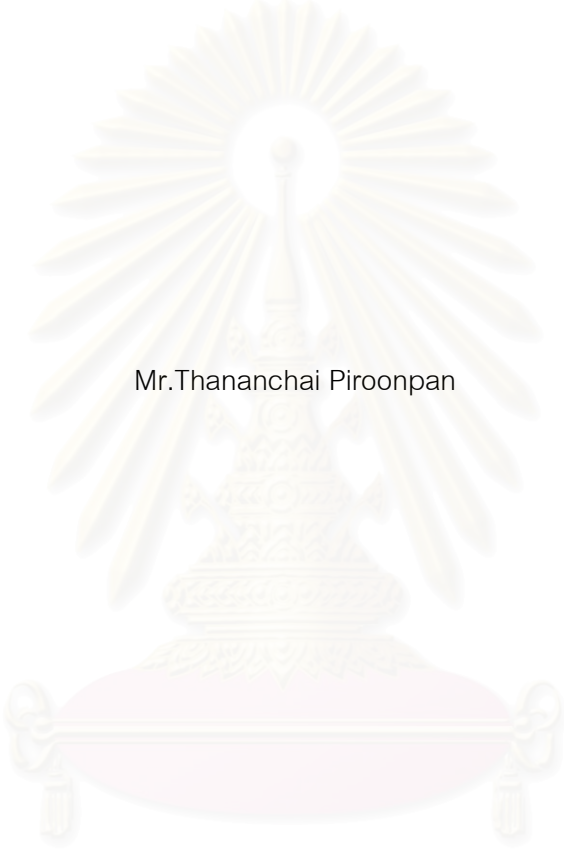
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2677-5

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A SIMULATION MODEL FOR CALCULATING GAMMA-RAY DETECTION
EFFICIENCY BY MCNP-4A



Mr.Thananchai Piroonpan

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2677-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการวัดรังสี แกมมาด้วย MCNP-4A
โดย	นายธนัญชัย พิรุณพันธ์
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณชัย นิลสุวรรณโฆษิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัณชัย นิลสุวรรณโฆษิต)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์สมยศ ศรีสถิตย์)

ธัญชัย พิรุณพันธ์: การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาด้วย MCNP-4A. (DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL FOR CALCULATING GAMMA-RAY DETECTION EFFICIENCY BY MCNP-4A)

อ.ที่ปรึกษา: รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม: ผศ. ดร. สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต, 104 หน้า. ISBN 974-17-2677-5.

ได้ใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP-4A คำนวณประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยจากต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาตรที่มีรูปร่างต่าง ๆ กัน ได้แก่ ทรงกลม ทรงกระบอก และกล่อง รวมทั้งที่เป็นเส้น และจุด โดยได้ทำการพัฒนาโปรแกรมเชื่อมประสานกับผู้ใช้เพื่อให้สามารถป้อนพารามิเตอร์ต่าง ๆ ให้กับโค้ดคอมพิวเตอร์ได้โดยง่าย เช่น ขนาด รูปร่าง และส่วนประกอบของต้นกำเนิดรังสี ขนาดของหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(ทลเลียม) ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสี เป็นต้น ในขั้นแรกได้ตรวจสอบผลการคำนวณกับวิธีวิเคราะห์เมื่อต้นกำเนิดรังสีมีลักษณะแบบง่าย ๆ คือ แบบจุด และแบบเส้น ซึ่งก็พบว่าได้ผลตรงกัน ในที่สุดได้ตรวจสอบผลการคำนวณจากต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาตร คือ แบบทรงกลม ทรงกระบอก และกล่อง กับผลจากการทดลองโดยใช้ไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ เช่น ตะกั่ว-214 บิสมัท-214 โปแตสเซียม-40 และ ทลเลียม-208 ผลปรากฏว่าประสิทธิภาพของพีคที่ได้จากโค้ด MCNP-4A มีค่าสูงกว่าที่ได้จากการทดลองประมาณ 10 - 20 % ความแตกต่างนี้เกิดขึ้นจากประสิทธิภาพทั้งหมดและการปรับตั้งค่าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้



ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2545

ลายมือชื่อนิสิต *ธัญชัย พิรุณพันธ์*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา *นเรศร์ จันทน์ขาว*
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม *สัญชัย นิลสุวรรณโฆษิต*

##4370327121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: MCNP / Monte Carlo Method / Gamma-ray / Volumetric Source

THANANCHAI PIROONPAN: DEVELOPMENT OF SIMULATION MODEL FOR CALCULATING GAMMA-RAY DETECTION EFFICIENCY BY MCNP-4A. THESIS ADVISOR: ASSOC.PROF.NARES CHANKOW, THESIS COADVISOR: ASST. PROF DR. SUNCHAI NILSUWANKOSIT, 104 PP. ISBN 974-17-2677-5.

Detection efficiency of gamma-rays emitted from volumetric sources of different shapes; namely sphere, cylinder and box as well as line and point; were calculated using the MCNP-4A computer code. A user interface programme was developed to allow the user to easily provide input parameters for the code such as size, shape and composition of the source, size of the NaI(Tl) detector, distance between the source and the detector, etc. The results were first verified with simple source geometry, i.e. point and line sources, and they were found to be perfect match with the analytical method. Finally, the results from volumetric sources, i.e. sphere, cylinder and box, were obtained and rechecked with experiments using available naturally occurring radioisotopes such as ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{40}K and ^{208}Tl . It was found that the photopeak efficiencies obtained from the MCNP-4A code were approximately 10 – 20 % greater than those obtained from the experiments. These discrepancies were due to overall efficiencies and settings of the electronic equipment used.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2002

Student's signature.....*Thananchai Piroonpan*

Advisor's signature.....*Nares Chankow*

Co-advisor's signature.....*Sunchai Nilsuwankosit*

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของรองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สัญญาชัย นิลสุวรรณโสมชาติ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีทุกท่าน

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และ น้องๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจและคำแนะนำที่มีประโยชน์ในงานวิจัย

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนให้ทุนสำหรับ อุดหนุนงานวิจัย ในการทำวิจัยมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ น้องโอ๊ น้องเบส สำหรับกำลังใจที่ให้เสมอมาและคำแนะนำที่ดี รวมทั้งความช่วยเหลือในเรื่องอุปกรณ์ในการทำงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ซึ่งสนับสนุนด้านการเงินและให้กำลังใจด้วยดีเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

บทที่	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฎ

บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 หลักการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล.....	6
2.2 Monte Carlo N-Particle Transport Code System Version 4A (MCNP-4A).....	12
2.3 รังสีแกมมา.....	27
3. ขั้นตอนดำเนินการวิจัย.....	53
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	53
3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับ คำนวณหาประสิทธิภาพของระบบวัดด้วย MCNP-4A	54
3.3 การทดลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A.....	66
3.4 การคำนวณด้วยวิธีอื่นๆเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A.....	68
3.5 โปรแกรมสำหรับเขียนแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า (Input File) ใน MCNP-4Aเพื่อการ คำนวณประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบมี	

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
ปริมาณ.....	69
4. ผลการจำลองและผลการทดลองเปรียบเทียบ.....	76
4.1 ผลการคำนวณประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อต้นกำเนิดรังสีเป็น แบบมีปริมาณ.....	76
.	80
4.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบแบบจำลองระบบวัดรังสีแกมมา.....	
4.3 ผลการคำนวณด้วยวิธีอื่นเปรียบเทียบกับแบบผลการคำนวณของจำลองระบบวัด รังสีแกมมาด้วย MCNP4-A	94
	96
	96
5. สรุป และข้อเสนอแนะ.....	97
5.1 สรุป.....	
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	99
	100
รายการอ้างอิง.....	101
ภาคผนวก.....	104
ภาคผนวก ก	
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ระดับพลังงาน และ ต้นกำเนิดรังสีที่กำหนดในการคำนวณ.....	54
3.2 พารามิเตอร์ในคำสั่งนิยามพื้นผิว.....	61
4.1 ระดับพลังงานและชนิดของไอโซโทปที่ใช้ในการคำนวณต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกลม.....	76
4.2 ระดับพลังงานและชนิดของไอโซโทปที่ใช้ในการคำนวณต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกระบอก.....	78
4.3 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้ระยะระหว่างหัววัดรังสีแกมมาและต้นกำเนิดรังสีแกมมามีระยะที่แตกต่างกัน.....	82
4.4 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ระยะระหว่างหัววัดรังสีแกมมาและต้นกำเนิดรังสีแกมมามีระยะที่แตกต่างกัน.....	82
4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลองและจากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ระยะระหว่างหัววัดรังสีแกมมาและต้นกำเนิดรังสีแกมมามีระยะที่แตกต่างกัน.....	83
4.6 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้พลังงานต้นกำเนิดรังสีแกมมามีพลังงานที่แตกต่างกัน.....	86
4.7 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้พลังงานต้นกำเนิดรังสีแกมมามีพลังงานที่แตกต่างกัน.....	86
4.8 เปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลองและการคำนวณ เมื่อกำหนดให้พลังงานรังสีแกมมามีพลังงานที่แตกต่างกัน.....	87
4.9 เปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาจากการ ทดลองและการคำนวณ จากสารยูเรเนียม(U)และทอเรียม(Th)มาตรฐาน.....	88
4.10 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้ขนาดของหัววัดรังสีแกมมามีขนาดแตกต่างกัน.....	90
4.11 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ขนาดของหัววัดรังสีแกมมามีขนาดแตกต่างกัน.....	92
4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา ระหว่าง จากการคำนวณ และจากการทดลองเมื่อกำหนดให้ขนาดของหัววัดรังสีแกมมามีขนาดแตกต่างกัน.....	92
4.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา ระหว่าง จากการทดลองเมื่อกำหนดให้ขนาดของต้นกำเนิดรังสีแกมมามีรูปแบบแตกต่างกัน.....	93
4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมา ระหว่างการคำนวณด้วยสมการ และ	

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
ใช้ แบบจำลอง MCNP-4A.....	94
4.15เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาระหว่างการคำนวณด้วยสมการ และ	
ใช้ แบบจำลอง MCNP-4A.....	95



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น.....	7
2.2 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม	8
2.3 ภาคตัดขวางของเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณ.....	17
2.4 ผังการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสีบางชนิด.....	29
2.5 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์.....	32
2.6 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ของตะกั่วที่พลังงานต่างกัน	34
2.7 ค่า n ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ.....	35
2.8 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์.....	36
2.9 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมการกระเจิงต่างๆ	39
2.10 ค่า σ_c ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่างๆ.....	40
2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน.....	42
2.12 การเกิดแฟร์ไอโรดักชันและปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน.....	44
.	45
2.13 ค่า σ_{pp} ของตะกั่วที่พลังงานต่างๆ.....	45
2.14 โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวดูดกลืน.....	48
2.15 ค่า μ/p , μ_{pe}/p , μ_c/p และ μ_{pp}/p ของตะกั่ว.....	49
2.16 ค่า μ/p ของธาตุบางชนิด.....	50
2.17 การทะลุผ่านของรังสีแกมมา.....	56
3.1 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกลมที่สร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP4-A.....	56
3.2 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกระบอกแบบที่ 1 ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP4-A.....	57
3.3 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกระบอกแบบที่ 2 ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP4-A.....	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงสี่เหลี่ยมซึ่งสร้างโดย แบบจำลองการวัดด้วย MCNP4-A.....	58 62
3.5 ระบบแกนพิกัดฉาก X Y Z ที่กำหนดในการสร้างแบบจำลองของ.....	
3.6 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกลมที่สร้างโดยแบบ จำลองการวัดด้วย MCNP4-A.....	66 67
3.7 แผนภาพการของระบบวัดรังสีแกมมา.....	69
3.8 ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นและเงื่อนไขการคำนวณ.....	
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบ กับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบทรงกลม.....	77
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบ กับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบทรงกระบอก.....	79
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบ กับระยะทาง ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงาน 1.4028 MeV.....	81
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบ กับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบจุดพลังงานต่างๆ.....	85
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบ กับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมา.....	89
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบ กับขนาดของหัววัดรังสีแกมมา.....	91

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในระบบวัดทางนิวเคลียร์นั้นปัจจัยที่มีผลต่อความแม่นยำและความถูกต้องของการวัดมากที่สุดก็คือรูปแบบการจัดวางเรขาคณิตของระบบวัด (Geometry) และการปรับเทียบมาตรฐาน (Standard Calibration) ถ้าทั้งสองปัจจัยมีความถูกต้องและแม่นยำแล้วระบบที่ใช้วัดรังสีนั้นก็มีความถูกต้องแม่นยำด้วย

รูปแบบการจัดวางเรขาคณิตของระบบวัดของระบบวัดนั้นจะมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการวัดรังสีโดยตรง กล่าวคือเมื่อมีการจัดวางระบบวัดที่ดีและถูกต้องอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสีนั้นก็สามารถเข้าทำอันตรกิริยากับหัววัดได้มากขึ้นดังนั้นประสิทธิภาพของระบบวัดก็จะดีขึ้นตามไปประสิทธิภาพนั่นเองที่เป็นเงื่อนไขที่ส่งผลให้ความถูกต้องและแม่นยำมีมากหรือน้อย

การปรับเทียบมาตรฐาน นั้นคือความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับ (Count Rate) ของรังสีกับเงื่อนไขหรือค่าต่าง ๆ ที่พิจารณา อาทิเช่น จำนวนนับกับความแรงรังสี จำนวนนับกับพลังงาน จำนวนนับกับความหนาวัตถุ จำนวนนับกับความเข้มข้นหรือน้ำหนัก เป็นต้น ในการปรับเทียบมาตรฐานนั้น จะมีผลกระทบโดยตรงต่อความแม่นยำและความถูกต้อง ถ้าหากการปรับเทียบมาตรฐาน นั้นมีความถูกต้องแม่นยำสูงผลการปฏิบัติงานที่ได้ก็น่าเชื่อถือและแม่นยำสูงเช่นกันซึ่งจะส่งผลให้ข้อมูลหรือผลการทดลองได้รับความเชื่อถือไปด้วย

ความแม่นยำและถูกต้องนั้นเป็นพื้นฐานในระบบวัดทางนิวเคลียร์ของผู้ปฏิบัติงาน แต่ปัญหาที่ทำให้ความแม่นยำและความถูกต้องในระบบวัดทางนิวเคลียร์นั้นลดลง ก็เนื่องมาจากปัจจัยทั้งสองที่ได้กล่าวมาข้างต้น การปฏิบัติงานทางระบบวัดนิวเคลียร์ที่สามารถลดปัญหาดังกล่าวนั้นโดยส่วนใหญ่อาศัยจากประสบการณ์และการลองผิดลองถูกซึ่งต้องอาศัยเวลา และความชำนาญในการปฏิบัติงานซึ่งทำให้ใช้เวลาในการปฏิบัติงานมากและค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานแต่ละครั้งก็จะสูงตามขึ้นไปด้วย แม้กระนั้นแล้วผู้ปฏิบัติงานจะมีความเชื่อมั่นได้อย่างไรว่าเงื่อนไขต่างๆ ที่ใช้ในระบบวัดทางนิวเคลียร์นั้น มีขีดความสามารถที่สูงที่สุดที่จะเพิ่มความแม่นยำและความถูกต้องในการปฏิบัติงานและในบางกรณีผู้ปฏิบัติงานนั้นไม่สามารถที่จะสร้างแบบจำลองการปฏิบัติงานจริง (Laboratory) เพื่อคำนวณหาค่าปรับเทียบมาตรฐานได้ งาน

ลักษณะนี้ได้แก่ การวัดรังสีในสิ่งแวดล้อม การหาปริมาณแร่ธาตุบางชนิดในสิ่งแวดล้อม การจัดการกากกัมมันตภาพรังสี ระบบป้องกันอันตรายจากรังสี การวัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแบบปริมาตร (Volumetric Source) เป็นต้น ซึ่งทำให้การทดลองวัดรังสีจริงเพื่อการปรับเทียบมาตรฐาน ไม่อาจกระทำได้ดีเต็มที่

ในการปฏิบัติงานทั่วไปนั้นตัวอย่างในการหา จำนวนนับเพื่อหาการปรับเทียบมาตรฐานต้องมีลักษณะเหมือนกับสารมาตรฐาน เพื่อความถูกต้องและแม่นยำทุก ๆ ตัวอย่างต้องมีสารมาตรฐานที่เหมาะสมแต่ในบางกรณีไม่สามารถหาสารมาตรฐานมาปรับเทียบได้ อาทิเช่น ตัวอย่างของต้นกำเนิดที่ให้พลังงานสูง สารกัมมันตรังสีที่มีครึ่งชีวิตต่ำ เป็นต้น หรือหากทำได้ก็จำเป็นต้องใช้ทุนสูง ซึ่งเป็นปัญหาที่พบมากในการปฏิบัติงาน

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) สามารถช่วยในการประเมินประสิทธิภาพและทำนายการนับรังสีของระบบวัดทางนิวเคลียร์รวมทั้งการปรับเทียบมาตรฐานได้ กล่าวคือ จะทำการจำลองระบบวัดทางนิวเคลียร์และทำการคำนวณการนับรังสีโดยกำหนดเงื่อนไขต่าง ๆ ตามต้องการ ซึ่งสามารถทำได้โดยง่ายและจะมีความแม่นยำถูกต้องค่อนข้างสูงสำหรับระบบจำลองที่สร้างขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับคำนวณประสิทธิภาพ (Efficiency) การวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point Source) และแบบมีปริมาตร (Volumetric source) โดยใช้ MCNP-4A

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 พัฒนาโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้ (User interface program) สำหรับคำนวณประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) และแบบมีปริมาตร (Volumetric source)

1.3.2 คำนวณหาประสิทธิภาพ (Efficiency) ของการวัดรังสีแกมมาโดยใช้ MCNP-4A เมื่อกำหนดให้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาเป็นต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) และ

แบบมีปริมาตร (Volumetric source) ซึ่งต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาตรที่ใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพ นั้นมีรูปลักษณะเป็นทรงกลม ทรงกระบอก และ แบบกล่อง ที่มีปริมาตรไม่เกิน 20 ลิตร

1.3.3 คำนวณหาประสิทธิภาพของการวัดรังสีแกมมาที่มีลักษณะรูปทรงเรขาคณิตแบบต่าง ๆ กันโดยใช้ MCNP-4A

1.3.4 ตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณกับ วิธีการคำนวณ และ/หรือ การทดลอง แบบอื่น ๆ

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 คำนวณหาประสิทธิภาพ (Efficiency) การวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) และแบบมีปริมาตร (Volumetric source) โดยใช้ MCNP-4A

1.4.3 เขียนโปรแกรมสำหรับติดต่อกับผู้ใช้ (User interface program) สำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) และแบบมีปริมาตร (Volumetric source)

1.4.4 ตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณกับ วิธีการคำนวณแบบ และ/หรือ การทดลองแบบอื่น ๆ

1.4.5 สรุปผลงานวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัย

ได้แบบจำลองสำหรับคำนวณหาประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point source) และแบบมีปริมาตร (Volumetric source) โดยใช้ MCNP-4A

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ปี 2543 กานต์พงษ์ ชูพันธ์⁽¹⁾ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการวิจัยเรื่อง การจำลองการกระเจิงแบบคอมป์ตันของรังสีแกมมาในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีมอนติคาร์โล โดยทำการศึกษาเทคนิคดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเทอริงสเปกโตรสโคปีในการหาขนาดและตำแหน่งของเหล็กเส้นในคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยใช้การจำลองการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน โดยใช้คอมพิวเตอร์โค้ด MCNP-4A การประเมินผลการจำลองทำโดยพิจารณาค่าความเบี่ยงต่าง สำหรับแบบจำลองพบว่าค่าความเบี่ยงต่างเพิ่มขึ้นตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเหล็กเส้น และลดลงตามความลึก นอกจากนี้ค่าความเบี่ยงต่างเพิ่มขึ้น เมื่อสอดเหล็กเส้นเข้าไปยังลำรังสีที่ตกกระทบ จนถึงค่าประมาณ 0.173 ซม. ที่ระยะ 2.914 ซม. จากนั้นความเบี่ยงต่างเริ่มลดลงแล้วคงที่

1.6.2 ปี 2542 ทรงศักดิ์ องค์วัฒนกุล⁽²⁾ แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยได้ทำการวิจัยเรื่อง การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อหาความแรงรังสีของสารรังสีติดตามสำหรับฉีดเข้าไปในระบบของเหลว ได้ให้การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล โดยใช้โปรแกรม MCNP-4A ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการนับรังสีแกมมาพลังงาน 143 keV จากสารละลาย Tc-99m ในน้ำซึ่งบรรจุในถึงและท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ถึง 25 ซม. โดยเปรียบเทียบกับผลการทดลองเมื่อใช้หัววัด NaI(Tl) ขนาด 2 นิ้ว X 2 นิ้ว ปรากฏว่าการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลหาประสิทธิภาพการนับรังสีนั้นเป็นสัดส่วนกับประสิทธิภาพการนับรังสีซึ่งได้จากการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคำนวณด้วยวิธีนี้สามารถใช้ในการประมาณความแรงของรังสีที่ต้องการฉีดเข้าไปในระบบเพื่อหาอัตราการไหล ระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบ และระยะเวลาในการผสมของสาร

1.6.3 ปี 2539 ปรีวรรต เสียงสนั่น, วันชัย ธรรมาวานิช และสมพร จงคำ⁽³⁾ แห่งสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติได้ทำการวิจัยเรื่อง การจำลองแบบการกัมมันตรังสีแกมมาโดยวิธีมอนติคาร์โล ได้ทำการพัฒนาโปรแกรมจำลองแบบการกัมมันตรังสีแกมมาโดยอาศัยวิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โล และเพิ่มค่าภาคตัดขวางของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาจากโปรแกรม MCNP และได้เปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองจริง โดยการใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ²⁴¹Am พลังงาน 60 keV และใช้อลูมิเนียมเป็นเครื่องกัมมันตรังสี และเปรียบเทียบกับผลจากการคำนวณแบบ deterministic ได้ผลใกล้เคียงกัน

1.6.4 ปี 2539 O.Sima⁽⁴⁾ แห่ง Department of Physics, Bucharest University ได้วิจัยเรื่อง Application of Monte Carlo Calculation to Gamma – Spectrometric Measurements of Environmental Sample ได้ทำการออกแบบโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยใช้

พื้นฐานการคำนวณด้วยวิธีการคำนวณแบบมอนติคาร์โลเพื่อจำลองการทดลองวัดรังสีแกมมาจากตัวอย่างที่ได้จากสิ่งแวดล้อมด้วยการกำหนดรูปร่างของตัวอย่างที่ต้องการวัดเป็นทรงกระบอก ทรงกลม และแบบจุด และใช้หัววัดแบบ HPGe, Ge(Li) สามารถจำลองหาผลจากการดูดกลืนรังสี จากต้นกำเนิดรังสีเอง (Self Attenuation effect), Coincidence summing, Full Energy Peak Efficiency และสามารถใช้อุปกรณ์ส่วนบุคคล (PC) ทำการคำนวณ



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 หลักการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล^{(2), (5), (6), (7)}

หากพิจารณาความสัมพันธ์ของการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) ในด้านของเทคโนโลยีนิวเคลียร์ การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) นั้นเป็นวิธีการคำนวณแบบจำเพาะที่ใช้แก้ปัญหาการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งอนุภาคใด ๆ มีการเคลื่อนที่แบบสุ่มไม่มีทิศทางแน่นอนและรูปแบบของอนุภาคนั้น ๆ จะขึ้นอยู่กับ 7 มิติที่เกี่ยวข้องกันซึ่งได้แก่ มิติของเวลา (Time) 1 มิติ มิติของตำแหน่งที่อยู่ (Position) 3 มิติ คือ ตำแหน่งในพิกัดมุมฉากทั้ง 3 แกนอันได้แก่ตำแหน่งในแกน X แกน Y และแกน Z มิติของทิศทาง (Direction) 2 มิติ อันได้แก่ เวกเตอร์ (Vector) ที่มีทิศทางการเคลื่อนที่ซึ่งอาจจะระบุได้ด้วยมุมกัม (มุมเงย) กับมุมกวาด และมิติสุดท้ายก็คือมิติของพลังงานอีกหนึ่งความสัมพันธ์

หลักการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นจะทำการกำหนดทางเดินสุ่ม (Random Walk) ของอนุภาคที่พิจารณาว่ามีทิศทางและพฤติกรรมอย่างไรโดยอาศัยตัวแปรต่าง ๆ อันได้แก่ ชนิดของอนุภาค (Source Particle) รูปทรงและรูปแบบการจัดวางของระบบวัด (System Geometry) ชนิดและค่าความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุและอนุภาคที่สนใจ (Material and Cross Section) รวมทั้ง รูปแบบการประเมินจำนวนครั้งการเกิดอันตรกิริยา (Tallying or Scoring of quantity of Interest) การคำนวณหาประสิทธิภาพของระบบวัดในเงื่อนไขและรูปแบบต่าง ๆ ที่กำหนดกระทำได้โดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์การเกิดอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอนุภาคกับวัสดุที่พิจารณานั้นจากทางเดินสุ่ม (Random Walk) ที่ได้จากตัวแปรข้างต้น

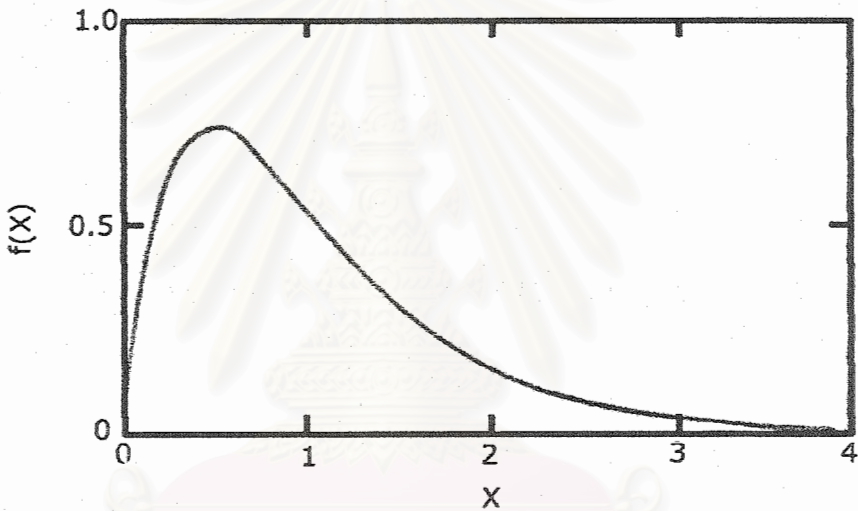
การกำหนดทางเดินสุ่มนั้น (Random Walk) จะกำหนดโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการสุ่มตัวเลข (Random Number) และทฤษฎีความน่าจะเป็น (Theory of Probability) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้ กำหนดให้ X เป็นโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ ที่สนใจของอนุภาคที่พิจารณาซึ่งเหตุการณ์ และ X นั้นจัดเป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง (Continuous Random Variables) เพราะฉะนั้นโอกาสในการที่จะเกิดเหตุการณ์ X ซึ่งจะเกิดอยู่ระหว่างเหตุการณ์ a และเหตุการณ์ b คือ

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

2.1

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

2.1.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function)



รูปที่ 2.1 ภาพแสดงฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น

ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น $f(x)$ มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นดังนี้

$$f(x)\Delta x = P\{x \leq x' \leq x + \Delta x\}$$

2.2

ถ้า Δx เข้าใกล้ศูนย์จะได้ $f(x)\Delta x$ ก็คือโอกาสในการเกิดเหตุการณ์ x' ซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์อยู่ระหว่าง x และ $x + \Delta x$

จากนิยามข้างต้นแล้วก็จะได้

$$\int_a^b f(X)dX = P\{a \leq X \leq b\} \quad 2.3$$

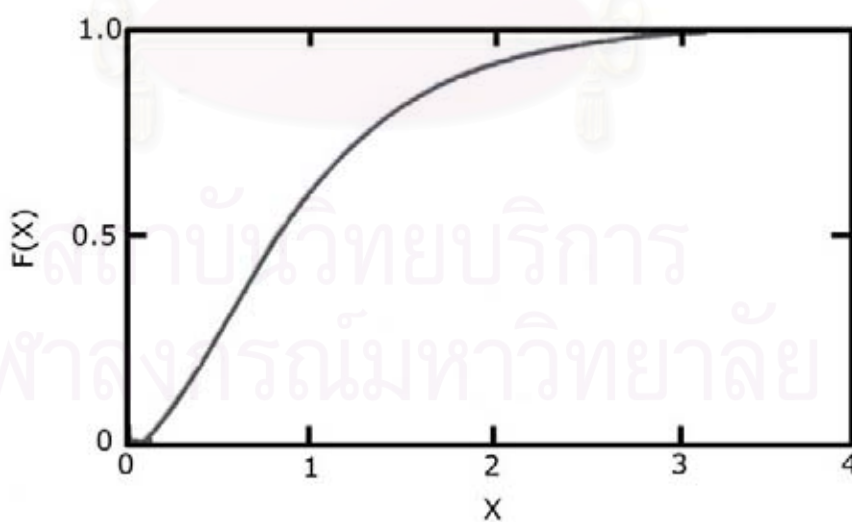
ถ้าค่า X เป็นค่าที่อยู่ระหว่าง ∞ และ $-\infty$ จะสามารถเขียนฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) เพื่อใช้ในการคำนวณด้วยวิธีอินทิเกรตได้ว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(X)dX = 1 \quad 2.4$$

อย่างไรก็ตาม ถ้าค่าเหตุการณ์ X ที่เป็นไปได้อยู่ระหว่าง เหตุการณ์ X^+ และเหตุการณ์ X^- แล้ว จากสมการที่ 2.4 จะเขียนได้ว่า

$$\int_{X^-}^{X^+} f(X)dX = 1 \quad 2.5$$

2.1.2 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (The Cumulative Probability Distribution Function)



รูปที่ 2.2 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม

$$F(X) = P\{X' \leq X\} \quad 2.6$$

สมการที่ 2.6 คือความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ X' จะเกิดขึ้นโดยที่ X' น้อยกว่าหรือเท่ากับเหตุการณ์ X ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น และ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ได้เป็น

$$F(X) = \int_{-\infty}^X f(X')dX' \quad 2.7$$

เพราะฉะนั้นจะเห็นได้ว่า

$$\lim_{X \rightarrow \infty} F(X) = F(\infty) = 1 \quad 2.8$$

$$\lim_{X \rightarrow -\infty} F(X) = F(-\infty) = 0 \quad 2.9$$

จากสมการที่ 2.3 และสมการที่ 2.7 จะได้

$$P\{a \leq X \leq b\} = F(b) - F(a) \quad 2.10$$

และจากสมการที่ 2.7 จะได้ความน่าจะเป็นในการที่จะเกิดเหตุการณ์ X ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) และฟังก์ชันการสะสมของความน่าจะเป็น (The Cumulative Probability Distribution Function) กรณี X มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ คือ

$$\frac{dF(X)}{dX} = f(X) \quad 2.11$$

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

$$f(X) = 0 \quad 2.12$$

เมื่อ $X < 0$ และ $X > 1$

$$F(X) = \int_0^X f(X)dX \quad 2.13$$

จากความสัมพันธ์ที่กล่าวมาข้างต้นของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) $f(X)$ และ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (The Cumulative Probability Distribution Function) $F(X)$ จะสามารถนำไปใช้ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) เพื่อที่จะกำหนดทางเดินสุ่ม (Random Walk) ได้ดังนี้

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

$$Y = Y(X) \quad 2.14$$

เมื่อกำหนดให้ $g(Y)dY$ เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ซึ่งมีความหมายว่า ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ Y ซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์อยู่ระหว่าง Y และ $Y+dY$ และ $f(X)dX$ ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ซึ่งมีความหมายว่า ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์ X ที่สนใจของอนุภาคที่พิจารณาซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์ อยู่ระหว่าง X และ $X+dX$ นอกจากนั้นแล้ว ฟังก์ชัน $G(Y)$ คือฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (The Cumulative Probability Distribution Function) ของ $g(Y)$ และฟังก์ชัน $F(X)$ ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ของ $f(X)$ ซึ่งสามารถกำหนดความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$G(Y) = F(X) \quad 2.15$$

$$\int_0^Y g(Y)dY = \int_0^X f(X)dX \quad 2.16$$

ถ้า $f(X) > 0$ และ $g(Y) > 0$ แล้วจะได้

$$g(Y) = f(X) \left| \frac{dX}{dY} \right| \quad 2.17$$

สำหรับ $g(Y)$ หรือ ตัวเลขสุ่ม (Random Number) ที่สร้างขึ้นมานั้นกำหนดให้เป็น Rectangular Distribution ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$g(Y) = \begin{cases} 0 & ; Y < 0 \\ 1 & ; 0 \leq Y \leq 1 \\ 0 & ; Y > 1 \end{cases} \quad 2.18$$

จะได้ความสัมพันธ์เมื่อ $0 \leq Y \leq 1$ ดังนี้

$$\int_0^Y g(Y) dY = Y \quad 2.19$$

$$G(Y) = Y \quad 2.20$$

จากสมการที่ 2.14 จะได้

$$Y = F(X) \quad 2.21$$

โดย Y เป็นตัวเลขที่สุ่มขึ้นมา (Random Number) หากตัวเลขที่สุ่มได้คือ ξ นั้นมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

$$Y = \xi \quad 2.22$$

$$F(X) = \xi \quad 2.23$$

$$\int_0^X f(X) dX = \xi \quad 2.24$$

$$X = F(\xi)^{-1} \quad 2.25$$

ดังนั้นจากกล่าวได้ว่าโอกาสในการที่จะเกิดเหตุการณ์ X จะขึ้นอยู่กับ ξ ซึ่งเป็นตัวเลขที่สุ่มขึ้นมา (Random Number)

2.2 Monte Carlo N-Particle Transport Code System Version 4A (MCNP-4A)⁽⁷⁾

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 กับวัสดุที่สนใจภายในเงื่อนไขที่กำหนด ซึ่ง MCNP รุ่น 4 A นี้เป็นโปรแกรมการคำนวณที่ได้รับการพัฒนาจากศูนย์วิจัยนิวเคลียร์ Los Alamos National Laboratory ของประเทศสหรัฐอเมริกาโดยใช้ FORTAN 77 ภายใต้มาตรฐานของ ANSI ในการเขียนโปรแกรมดังกล่าว

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลทางด้านการเดินทางของอนุภาครังสี (Radiation Transport) คือการสร้างทางเดินสุ่ม (Random Walk) ของอนุภาครังสี เพื่อเก็บข้อมูลจากแต่ละอนุภาคมาหาค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของค่าดังกล่าวโดยใช้วิธีทางสถิติ ในระบบวัตรังสีนั้น อนุภาครังสีจะเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านวัสดุภายในระบบ และเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของวัสดุนั้น ซึ่งจะมีเพียงอนุภาครังสีบางส่วนที่สามารถเข้าสู่หัววัตรังสี เกิดเป็นสัญญาณที่แสดงออกทางเครื่องมือวัตรังสีในรูปของจำนวนนับรังสี พฤติกรรมเหล่านี้ของอนุภาครังสีสามารถทำนายได้โดยใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็น และกฎทางฟิสิกส์รังสีในมุมมองระดับอนุภาค ในการจำลองระบบวัตรังสีนี้การสุ่มตัวอย่างจะทำโดยใช้เครื่องกำเนิดตัวเลขสุ่ม (Random Number Generator) คำนวณชุดของตัวเลขสุ่ม แล้วจึงนำค่าตัวเลขสุ่มแต่ละค่าไปคำนวณตามความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ทำให้เกิดเหตุการณ์สุ่ม แล้วจึงเลือกเฉพาะเหตุการณ์ที่สนใจนำมาคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นเฉลี่ยของเหตุการณ์นั้นตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ ต่อหนึ่งอนุภาค กำเนิดจากต้นกำเนิดรังสี

2.2.1 เครื่องกำเนิดตัวเลขสุ่ม (Random Number Generator)

โค้ด(Code) คอมพิวเตอร์ MCNP-4A ใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้ในการคำนวณค่าของตัวเลขสุ่ม (Random Number)

$$\xi_{n+1} = \text{mod}(A\xi_n) \quad 2.26$$

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 ทำขของผลคูณดังกล่าว ตัวเลขที่ได้นี้เมื่อหารด้วยค่าสูงสุดของตัวเลขขนาด 64 บิตจะทำให้ได้เลขสุ่มเป็นจำนวนจริงระหว่าง ศูนย์ ถึง หนึ่ง

2.2.2. วิธีสุ่มตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่างในวิธีการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลมีวิธีพื้นฐานอยู่ 2 วิธี คือ การสุ่มตัวอย่างโดยวิธีการละทิ้งค่าที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข (Rejection Method) และวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยตรง (Direct Sampling Method) ทั้งสองวิธีนี้ประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อคำนวณค่าสุ่มของความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน โดยอาศัยขั้นตอน (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 ก่อนจะเกิดการชนเป็นครั้งแรกในระยะเวลา dX จะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f(X)dX = \sigma_T e^{-\sigma_T X} \quad 2.27$$

โดยที่ค่า σ_T เป็นค่าภาคตัดขวางรวม (total cross section) ของอนุภาคตัวกลาง และ $f(X)$ เป็นความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function) ที่อนุภาครังสีจะทำอันตรกิริยากับตัวกลางเมื่ออนุภาคนั้นเคลื่อนที่ในตัวกลางเป็นระยะทาง X จากนิยามของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับตัวแปรชนิดต่อเนื่องมีคุณสมบัติดังนี้คือ

$$\int_0^{\infty} f(X)dX = 1 \quad 2.28$$

เมื่อกำหนดให้

$$\xi = F(X) = \int_0^{\infty} f(X')dX' \quad 2.29$$

ดังนั้น $F(X)$ คือความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะเกิดการชนกับตัวกลาง
ในระยะเวลา X คำนวณได้ดังนี้

$$\xi = F(X) = \int_0^X \sigma_T e^{-\sigma_T x} dx = 1 - e^{-\sigma_T X} \quad 2.30$$

ในมุมมองระดับอนุภาค การสุ่มตัวอย่างระยะเวลาที่อนุภาคเคลื่อน
ที่ได้ จะใช้ความสัมพันธ์นี้

$$X = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(1 - \xi) \quad 2.31$$

แต่เนื่องจากค่า ξ เป็นตัวเลขสุ่มซึ่งไม่แตกต่างกับค่า $(1 - \xi)$
เพราะเป็นค่าตัวเลขสุ่มที่มีค่าระหว่างศูนย์และหนึ่ง ระยะเวลาดังกล่าวจึงสามารถคำนวณจากความ
สัมพันธ์ต่อไปนี้

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

ในการสุ่มหาชนิดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชนของ
อนุภาคกับตัวกลางสามารถทำได้โดยใช้ตัวเลขสุ่มหนึ่งค่า ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองหนึ่งมีการ
พิจารณาเพียง 2 อันตรกิริยา คือ อันตรกิริยาการกระเจิง (Scattering) และอันตรกิริยาการดูด
กลืน (Absorption) ซึ่งเป็นผลให้ค่าภาคตัดขวางรวม (Total cross section σ_T) $\sigma_T = \sigma_s + \sigma_a$

เมื่อค่าตัวเลขสุ่ม $\xi_i \leq \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น คือ อันตรกิริยาการกระเจิง ในทางกลับกัน

เมื่อ $\xi_i \geq \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$ จะเกิดอันตรกิริยาการดูดกลืน

การเริ่มต้นคำนวณของแต่ละอนุภาครังสีโดยใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP-4A จะเริ่มจากการกำหนดตำแหน่งที่จะปลดปล่อยรังสี ในกรณีของต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร (Volumetric Source) พิกัดของจุดกำเนิดรังสี (x , y , z) จะคำนวณจากการใช้ตัวเลขสุ่ม 3 ค่า โดยมีเงื่อนไขว่าจุดดังกล่าวจะต้องอยู่ภายในปริมาตรของเซลล์ที่เป็นต้นกำเนิดรังสี จากนั้นจึงทำการคำนวณสุ่มเพื่อกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาครังสี 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 แต่ละอนุภาคที่ทำการจำลองจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (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 ค่าถ่วงน้ำหนัก (W) ของอนุภาคปฐมภูมิจะถูกปรับลดตามสัดส่วนของค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยานั้น อนุภาคทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจึงมีค่าถ่วงน้ำหนักตามค่าที่ถูกปรับลดออกจากอนุภาคปฐมภูมิ เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นทำการคำนวณที่ละอนุภาค แต่ละ

อนุภาคจึงสามารถจำลองได้โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขที่หลากหลาย ซึ่งทำให้การสิ้นสุดการคำนวณของแต่ละอนุภาคจึงเป็นไปได้หลายแบบ เช่น เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ที่ว่าง (Void) ซึ่งทำให้ไม่มีโอกาสเกิดอันตรกิริยาเพื่อหันเหทิศทางเคลื่อนที่กลับมายังบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (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

2.2.3 ตัวประมาณค่า (Estimators)

ตัวประมาณค่าจะทำหน้าที่คำนวณปริมาณที่กำหนดเงื่อนไขไว้เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้ามายังบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (Tally Region) สำหรับการคำนวณการเดินทางของอนุภาครังสีด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นมีตัวประมาณค่าอยู่ 5 ประเภท คือ ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว (Surface Estimator) ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์ (Event Estimator) ตัวประมาณค่าจากความยาวของเส้นทาง (Track Length Estimate) ตัวประมาณค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย (Next-event Estimator) และการคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (Pulse Height Tally)

- ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว

(Surface estimator: F1, F2 Tallies)

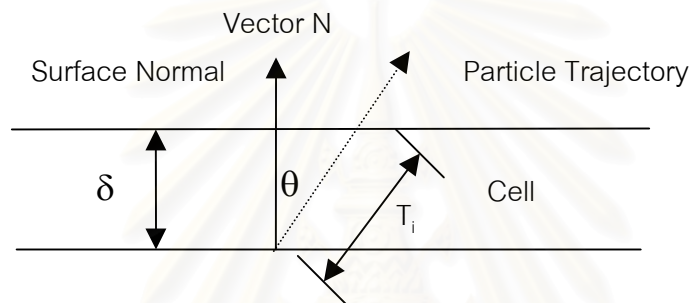
ตัวประมาณค่าประเภทนี้ จะทำการคำนวณตามเงื่อนไขเมื่ออนุภาครังสีเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวที่กำหนดในความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุของระบบหนึ่ง ๆ ตัวอย่างของตัวประมาณค่าประเภทนี้ คือ การคำนวณนับค่ากระแสที่ผ่านพื้นผิว (Surface Current Tally: F1) สำหรับการประมาณค่ากระแสของอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวในแนวของเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวนั้น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

$$F1 = \int_A \int_{\mu} \int_t \int_E J(\vec{r}, E, t, \mu) dE dt d\mu dA \quad 2.33$$

เมื่อ $J(\vec{r}, E, t, \mu) = |\mu| \Phi(\vec{r}, E, t) A$ เป็นกระแสของอนุภาคเคลื่อนที่ในแนวที่ขนานกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิว A ขณะที่ค่า $\mu (\mu = \cos\theta)$ นั้น

คำนวณจากมุมที่เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำมุมกับเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิว A และค่า ϕ คือค่าฟลักซ์ที่คำนวณได้ ณ พิกัดตำแหน่งที่กำหนดขึ้น

อีกตัวอย่างหนึ่งของตัวประมาณค่าบนพื้นผิวคือ การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิว (Surface Flux Tally: F2) เป็นวิธีการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณนับค่าฟลักซ์ภายในเซลล์ (Cell Flux or Track Length Estimator: F4) ซึ่งเซลล์หมายถึงรูปทรงที่มีปริมาตร และประกอบขึ้นจากพื้นผิวจนได้รูปทรงปิดที่มีขอบเขตที่แน่นอน เมื่อพิจารณาปริมาตรหนึ่งซึ่งมีลักษณะบางมาก โดยปริมาตรดังกล่าวมีความหนาเท่ากับ δ การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิว (F2) จะเป็นไปตามความสัมพันธ์ต่อไปนี้



รูปที่ 2.3 ภาคตัดขวางของเซลล์ที่ใช้สำหรับการคำนวณ

$$F2 = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{WT_i}{V} \quad 2.34$$

$$F2 = \frac{\left[\frac{W\delta}{|\cos\theta|} \right]}{A\delta} \quad 2.35$$

$$F2 = \frac{W}{A|\mu|} \quad 2.36$$

เมื่อความหนาของเซลล์ δ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ปริมาตรของเซลล์จะมีค่าเข้าใกล้ $A\delta$ และความยาวเส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค (Track length) จะมีค่าเข้าใกล้ $A|\delta|$ โดยที่ค่า $\mu (\mu = \cos\theta)$ คำนวณจากค่ามุมระหว่างเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวกับวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค ค่า W เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (Particle weight) ซึ่งใช้แทนจำนวนอนุภาคที่

จำลอง ผลลัพธ์จากทางเดินสุ่มทุกครั้งจะคำนวณให้เทียบกับอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสีหนึ่งอนุภาค วิธีการคำนวณนี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ของพื้นผิวโดยอาศัยการคำนวณสุ่ม (Stochastic calculation of surface areas) เมื่อวิธีการปกติไม่สามารถทำได้

- ตัวประกอบค่าตามเหตุการณ์

(Event estimator: F6,F7 Tallies)

ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์ เป็นตัวประมาณค่าที่จะทำการคำนวณเฉพาะเมื่อเกิดเหตุการณ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ซึ่งค่าผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนักคูณกับค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยาที่กำหนด จะเป็นข้อมูลที่นำมาใช้คำนวณอัตราการเกิดอันตรกิริยานั้น ตัวอย่างเช่น การประมาณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว ตัวประมาณค่าจากการชนของอนุภาคกับตัวกลาง (Collision Estimator) จะคำนวณนับเฉพาะค่าผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) กับค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission cross section) เพื่อประมาณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission rate)

- ตัวประมาณค่าจากความยาวของเส้นทาง

(Track Length Estimation: F4 Tally)

ตัวประมาณค่าชนิดนี้ ใช้ในการคำนวณค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์ที่กำหนด โดยค่าฟลักซ์นิยามจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Phi = \eta v \quad 2.37$$

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

$$\int \Phi dt = \eta v dt = \left[\frac{W}{V} \right] \left[\frac{dl}{dt} \right] dt = W \frac{dl}{V} \quad 2.38$$

โดยที่ค่า dl คือค่าความยาวของเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ก่อนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในเซลล์ หรือก่อนที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ข้ามผ่านพื้นผิว

ของเซลล์ค่า W เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค (Particle weight) ค่า V คือปริมาตรของเซลล์ค่า ฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์จึงคำนวณจากความยาวของเส้นทางเดินของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเซลล์

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า การคำนวณนับค่าบนพื้นผิว F_2 เป็นกรณีพิเศษของการคำนวณกับค่าแบบ F_4 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 จะทำการคำนวณนับค่าทุกครั้งทีอนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในระบบ โดยการคำนวณอนุภาคเสมือน (Pseudo Particle) ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยาตรงไปยังตำแหน่งที่กำหนดไว้ให้เป็นหัววัดรังสี (Point Detector) การประมาณค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสีจะคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Phi = \frac{We^{-\sigma_T x} 2f(\mu)}{4\pi R^2} \quad 2.39$$

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

ตำแหน่งที่เป็นหัววัดรังสีทุกครั้งทีอนุภาคอนุภาครังสีเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลางที่ตำแหน่งใด ๆ ในระบบ การคำนวณนับค่าจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ คือจะได้ผลลัพธ์ทุกครั้งทีอนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง

- การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน

(Pulse Height Tally : F8 Tally)

การคำนวณนับค่าประเภทนี้ จะแสดงผลลัพธ์เป็นการแจกแจงพลังงานของอนุภาคภายในเซลล์ที่กำหนด ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในหัววัดรังสี ปริมาณของพลังงานที่ถูกดูดซับภายในเซลล์สามารถคำนวณได้โดยการคูณผลลัพธ์ของแต่ละอนุภาคกับค่าพลังงานของอนุภาคนั้นเอง การคำนวณนับค่านี้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี และการคำนวณจะดำเนินต่อไปเมื่ออนุภาครังสีเคลื่อนข้ามพื้นผิวของเซลล์ใด ๆ

การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน เซลล์ที่เป็นต้นกำเนิดรังสีจะเก็บค่าผลคูณของค่าพลังงานกับค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นของอนุภาครังสีไว้ เมื่ออนุภาคนั้นเคลื่อนข้ามพื้นผิวของเซลล์ใด ๆ ผลคูณของค่าที่คำนวณ ณ ตำแหน่งก่อนออกจากเซลล์จะนำไปลบออกจากค่าผลคูณที่เก็บไว้ครั้งแรก และหลังจากที่อนุภาคข้ามพื้นผิวดังกล่าวเข้าสู่เซลล์ใหม่ ค่าผลคูณ ณ ตำแหน่งใหม่จะนำไปบวกกับค่าผลคูณที่เหลืออยู่ เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ออกจากเซลล์ที่กำหนด ผลหารระหว่างค่าผลคูณที่เหลือสุทธิที่เก็บไว้ในเซลล์ต้นกำเนิดรังสีกับค่าถ่วงน้ำหนักเริ่มต้นของอนุภาค จะใช้เป็นตัวคูณตำแหน่งของช่วงพลังงานที่อนุภาคนั้นถ่ายทอดให้กับเซลล์ที่กำหนด และค่าผลลัพธ์ที่ได้คือค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสี หรืออีกนัยหนึ่งคือจำนวนอนุภาคเฉลี่ยจากต้นกำเนิดรังสี ที่สามารถเคลื่อนที่ไปยังเซลล์ที่เป็นหัววัดรังสี ค่าผลลัพธ์ดังกล่าวจะเป็นศูนย์เมื่อไม่มีอนุภาคใดสามารถเคลื่อนที่ไปยังหัววัดรังสี

2.2.4 การประมาณค่าความผิดพลาด (Estimation of Error)

ข้อด้อยประการสำคัญของวิธีมอนติคาร์โล คือการลู่เข้าของคำตอบที่มีช่วงของความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้นั้นต้องอาศัยการคำนวณข้อมูลเป็นจำนวนมาก เพื่อสุ่มตัวอย่างให้ได้จำนวนข้อมูลมากพอที่จะคำนวณให้ได้ผลลัพธ์เป็นค่าสถิติที่มีคุณภาพ การประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) จึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งทำได้โดยการพิจารณาทฤษฎีความน่าจะเป็นของตัวแปรชนิดต่อเนื่องต่อไปนี้

$$\int f(x)dx=1$$

2.40

ค่า $f(X)$ เป็นความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของปัญหาที่ใช้วิธีมอนติคาร์โลในการคำนวณ ซึ่งค่าอินทิกรัล หรือค่าความน่าจะเป็นนั้นจะมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง ในที่นี้ค่า $f(X)$ เป็นตัวแทนความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นทั้งหมดในระบบวัดรังสีเข้าไว้ด้วยกัน

การคำนวณนับค่าด้วยวิธีมอนติคาร์โลจะประเมินค่าเฉลี่ยของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เป็นปัญหาซึ่งในทางทฤษฎีใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$M_1 = \int Xf(X)dX \quad 2.41$$

ค่า M_1 เรียกว่าค่าคาดหวัง (Expected Value) หรือค่าเฉลี่ยของการคำนวณนับค่า (Tally Mean) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณจากโมเมนต์อันดับที่หนึ่งของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ในการจำลองระบบวัดรังสีด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้น ค่าคาดหวัง \bar{X} เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากผลลัพธ์ของแต่ละค่าของการคำนวณนับค่า X_i จากแต่ละอนุภาคเป็นจำนวนทั้งสิ้น N อนุภาค ดังนั้น

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum X_i \quad 2.42$$

ในทางทฤษฎีโมเมนต์อันดับสองของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งจะนำไปใช้ประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์คำนวณได้ดังนี้

$$M_2 = \int x^2 f(x) dx \quad 2.43$$

ในขณะที่ วิธีมอนติคาร์โลคำนวณค่าดังกล่าวจากกลุ่มอนุภาคตัวอย่างโดย

$$\overline{X^2} = \frac{1}{N} \sum X_i^2 \quad 2.44$$

ทฤษฎีลิมิตสู่ศูนย์กลางกล่าวว่า การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง (Estimated mean) \bar{X} ซึ่งคำนวณจากการสุ่มตัวอย่าง X_i ที่เป็นอิสระต่อกัน จะเป็น

การกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) เมื่อจำนวนตัวอย่าง N ที่ทำการสุ่มเลือกมีค่ามาก หรือ

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\{M_1 - aS \leq \bar{x} \leq M_1 + bS\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-(x^2)/2} dt \quad 2.45$$

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

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_1)^2 f(x) dx \quad 2.46$$

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2M_1 \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx + M_1^2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = M_2 - M_1^2 \quad 2.47$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง สัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากรดังนี้

$$s = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad 2.48$$

วิธีมอนติคาร์โลประมาณค่าของความแปรปรวนของประชากรโดย

$$\sigma^2 = \overline{x^2} - (\bar{x})^2 \quad 2.49$$

ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) นิยามโดยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{N}} \quad 2.50$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์แปรผกผันกับค่ารากที่สองของจำนวนอนุภาคที่สุ่มตัวอย่าง N ซึ่งความสัมพันธ์ที่จะพิสูจน์ต่อไปนี้จะแสดงถึงผลของผลลัพธ์ X_i แต่ละค่า ที่มีต่อค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์

$$R = \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{x^2 - (\bar{x})^2}}{\bar{x}\sqrt{N}} = \sqrt{\frac{x^2}{(\bar{x})^2 N} - \frac{1}{N}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{(\sum x_i)^2} - \frac{1}{N}} \quad 2.51$$

2.2.5 การลดค่าความแปรปรวน (Variance Reduction)

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

2.2.5.1 การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญ (Problem truncation)

การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญที่ส่งผลต่อผลลัพธ์ในการคำนวณ เป็นวิธีการที่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากการละทิ้งบางส่วนของปัญหาโดยไม่นำมาพิจารณา จะส่งผลให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ตัวอย่างของวิธีการนี้ ได้แก่ การตัดทิ้งบางส่วนของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบ (Geometry truncation) การกำหนดเวลาสูงสุดที่จะทำการคำนวณของแต่ละอนุภาค (Time cutoff) และการกำหนดค่าพลังงานต่ำสุดของอนุภาคที่จะจำลอง (Energy cutoff) ทั้งสองวิธีหลังนั้น เมื่อค่าที่กำหนดของอนุภาคใดอยู่นอกเงื่อนไขที่พิจารณา การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลง

2.2.5.2 การควบคุมจำนวนอนุภาคในแต่ละเซลล์ (Population control)

วิธีการนี้ใช้ประโยชน์จากค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค (Particle weight W) โดยค่าดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขที่กำหนดโดย ขอบเขตของเซลล์ในระบบ

ค่าพลังงาน หรือระยะเวลาที่ใช้คำนวณ เป็นต้น เป็นหลักก็เพื่อเพิ่มจำนวนหรือเน้นการคำนวณกับอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไข หรืออยู่ในบริเวณที่ให้ความสำคัญ ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะปรับเปลี่ยนไปเพื่อให้ค่าผลลัพธ์โดยรวมจากการคำนวณยังคงเดิม ตัวอย่างเช่น การกำหนด ให้อนุภาคเดี่ยวที่ค่าถ่วงน้ำหนัก W แยกเป็นอนุภาคคู่ โดยใช้ขั้นตอนการแยกคำนวณอนุภาค (Particle splitting procedures) ในบริเวณที่ต้องการเพิ่มจำนวนอนุภาคที่จะสุ่มตัวอย่าง ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละอนุภาคจะถูกลดทอนลงเหลือ $W/2$

ในทางตรงกันข้ามเงื่อนไขของรัสเซียรูเล็ตต์ (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) และการแบ่งช่วงการสุ่มตัวอย่างโดยการกำหนดช่วงของค่าพลังงานหรือเวลา (Energy or time splitting/ roulette)

2.2.5.3 การปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง

(Modified sampling)

เป้าหมายของวิธีการนี้คือการปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function) ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง จากนั้นจึงปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อชดเชยให้ค่าผลลัพธ์คงเดิม ตัวอย่างเช่น การสุ่มตัวอย่างโดยเพิ่มระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ (Path length stretching sampling) ซึ่ง ค่าภาคตัดขวางรวมที่ปรับแก้แล้ว (Modified total cross section σ'_t) จะนำมาใช้แทนค่าจริง σ_t ทำให้ระยะการเคลื่อนที่เดิมที่คำนวณจากความสัมพันธ์

$$x = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(\xi) \quad 2.52$$

เปลี่ยนไปเป็น

$$X = -\frac{1}{\sigma'_T} \ln(\xi) \quad 2.53$$

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

$$\begin{aligned} W' &= W \frac{P(x)}{P'(x)} \\ W' &= W \frac{\sigma_T e^{-\sigma_T x}}{\sigma'_T e^{-\sigma'_T x}} \\ W' &= W \frac{\sigma_T}{\sigma'_T} e^{(\sigma'_T - \sigma_T)x} \\ W' &= \frac{W e^{-\sigma_T x} 2p(\mu)}{4\pi R^2} \end{aligned} \quad 2.54$$

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

2.2.5.4 การเพิ่มการสุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณโดยตรง

(Pseudo-deterministic method)

วิธีการนี้จะใช้เพื่อเน้นให้เกิดการสุ่มตัวอย่างของอนุภาคในบริเวณที่มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเซลล์อื่น ๆ ในระบบ ตัวอย่างของวิธีการนี้ คือ การใช้วิธีการคำนวณการเดินทางของรังสีโดยตรง (Deterministic transport or "DXTRAN") ซึ่งจะมีการสร้างเซลล์ที่เป็นทรงกลมขนาดเล็ก ("DXTRAN" sphere) ห่อหุ้มบริเวณดังกล่าวไว้ เมื่อใด

ก็ตามที่อนุภาคครั้งที่ทำอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลางภายนอกทรงกลมนี้ จะเกิดอนุภาค “DXTRAN” เคลื่อนที่โดยปราศจากการชนตรงยังพื้นผิวของทรงกลม ซึ่งหลักจากเข้าสู่ทรงกลมการ สุ่มเส้นทางเดินของอนุภาคครั้งที่ภายในทรงกลมจะดำเนินไปโดยปกติ แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค ที่บริเวณผิวทรงกลมจะคำนวณจากสูตรของวิธีคำนวณน้ำหนักแบบกำหนดเป้าหมาย (F5) ดังนี้

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

เมื่ออนุภาคใดเคลื่อนที่ด้วยเส้นทางเดินสุ่ม (Random walk) ตรงไปยังภายในทรงกลมที่กำหนดไว้การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลง เพื่อให้ค่าถ่วงน้ำหนักรวมของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงวิธีการนี้จึงทำให้เกิดทางเดินสุ่มภายในบริเวณที่กำหนด โดยมีการสุ่มตัวอย่างในบริเวณดังกล่าวทุกครั้งที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคครั้งที่กับอนุภาคของตัวกลาง

2.2.6. ดรรชนีแสดงคุณภาพของการคำนวณ (MCNP Figure of Merit : FOM)

โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP นิยามตัวเลขที่แสดงถึงคุณภาพในการคำนวณดังนี้

$$FOM = \frac{1}{R^2 T} \quad 2.56$$

โดยที่ค่า R เป็นค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ ซึ่งค่ายกกำลังสองของค่า R จะแปรผกผันกับจำนวนอนุภาคที่ทำการสุ่มตัวอย่าง N ส่วนค่า T เป็นเวลาที่เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณมีหน่วยเป็นนาที่ ค่า T นี้จะแปรผันตรงกับค่า N ดังนั้นในการคำนวณแต่ละครั้ง ค่าดรรชนีแสดงคุณภาพของการคำนวณ (FOM) ควรจะมีค่าคงที่

ค่า FOM เป็นตัวบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณน้ำหนัก ซึ่งค่า FOM ควรจะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ ยกเว้นในช่วงต้นของการคำนวณที่ค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากจำนวนข้อมูลยังน้อย และใช้เป็นตัวเลขบ่งชี้ถึงคุณภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณโดยการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อช่วยลดค่าความแปรปรวน (Variance reduction techniques) ของผลลัพธ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการนั้น เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสม

ที่สุด (Optimum) ในทางปฏิบัติการทดสอบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ทำได้โดยการคำนวณด้วย ช่วงสั้น ๆ เพื่อนำค่า FOM ที่มีค่ามากจะเป็นการคำนวณที่มีคุณภาพดี นอกจากนี้ ค่า FOM ยังนำมาใช้ประมาณเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ตามที่ต้องการ โดยใช้สมการ 2.56 ในการคำนวณ

2.3 รังสีแกมมา^{(8), (9)}

เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีมวล ไม่มี ประจุ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง รังสีแกมมาเกิดขึ้นจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$E = hv \quad 2.57$$

$$E = h \frac{c}{\lambda} \quad 2.58$$

เมื่อ E คือพลังงานของรังสีแกมมา (eV)

h คือค่าคงที่ของพลังค์(Planck's constant 4.136×10^{-15} eV-s)

v คือ ความถี่ของคลื่น (s^{-1})

c คือ ความเร็วแสง (2.9979×10^{10} cm/s)

λ คือ ความยาวคลื่น (cm)

เมื่อนิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) ภายหลังจากปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตาและกระบวนการอื่น ๆ ที่ได้กล่าวต่อไป การลดระดับพลังงานของนิวเคลียสลงสู่สถานะพื้น (ground state) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเรียกว่า รังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้นนิวเคลียสมีระดับพลังงาน E_i (เป็นสถานะกระตุ้น) และ E_f เป็นสถานะสุดท้าย ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุด แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจน

กระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \quad 2.59$$

2.3.1 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา

2.3.1.1 รังสีแกมมาที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี

การสลายตัวได้รังสีแกมมามักจะเกิดตามหลังการสลายตัวให้รังสีแอลฟาหรือรังสีบีตา เพราะนิวเคลียสที่มีการสลายตัวจะได้นิวเคลียสใหม่ นิวเคลียสใหม่มักอยู่ในสถานะกระตุ้น เมื่อกลับสู่สถานะพื้นจะปล่อยรังสีแกมมาออกมา ระดับพลังงานในนิวเคลียสอยู่ในระดับ MeV ส่วนอะตอมอยู่ในระดับ eV เท่านั้น ดังนั้นพลังงานที่ปล่อยออกจากนิวเคลียสจึงสูงมากเมื่อเทียบกับพลังงานที่ปล่อยจากอะตอม

2.3.1.2 การสลายตัวให้รังสีแอลฟา (α decay)

การสลายตัวให้รังสีแอลฟาเกิดกับนิวเคลียสที่มีมวลมากๆ มีมวลอะตอมมากกว่า 82 ขึ้นไป ดังนั้นจะเสียมวลอย่างรวดเร็วเพื่อเป็นไอโซโทปที่มีมวลต่ำลง นิวเคลียสใหม่จะมีประจุลดลง 2 หน่วยและเลขมวลอะตอมจะลดลง 4 หน่วยเช่น ${}_{88}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}_{86}^{222}\text{Rn} + {}_2^4\text{He}$

2.3.1.3 การสลายตัวให้รังสีบีตาลบ (β^- decay)

เนื่องจากในนิวเคลียสมีจำนวนนิวตรอนมากเกินไป นิวตรอนจะเปลี่ยนไปเป็นโปรตอน โดยปล่อยอิเล็กตรอนกับแอนตินิวตริโน ดังนั้นประจุของนิวเคลียสใหม่จะเพิ่มขึ้น 1 หน่วย ดังสมการ $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}$ เช่น ${}_{8}^{19}\text{O} \rightarrow {}_{9}^{19}\text{F} + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}$

2.3.1.4 การสลายตัวให้รังสีบีตาบวก (β^+ decay)

เนื่องจากในนิวเคลียสมีจำนวนนิวตรอนน้อยเกินไป โปรตอนจะเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอน โดยปล่อยโพสิตรอนกับนิวตริโน ดังนั้นประจุของนิวเคลียสใหม่จะลดลง 1 หน่วย ดังสมการ $p \rightarrow n + e^+ + \nu$ เช่น ${}_{8}^{15}\text{O} \rightarrow {}_{7}^{15}\text{N} + {}_{+1}^0e + \nu$

2.3.1.5 การจับอิเล็กตรอน (Electron capture)

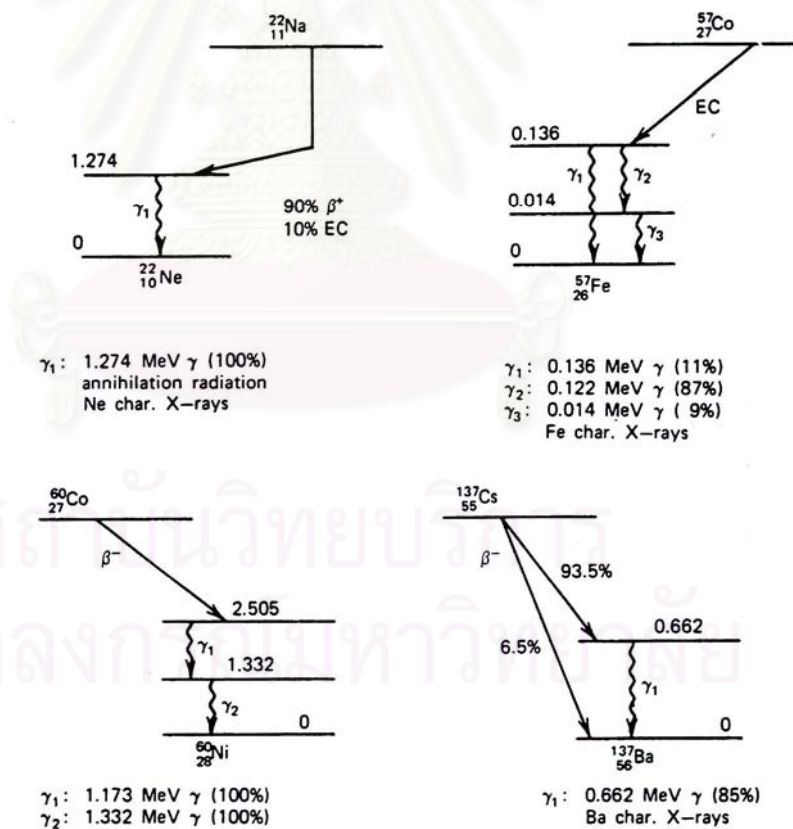
เป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงทางนิวเคลียร์คล้ายคลึงกับการสลายตัวให้รังสีบีตาบวก คือ นิวเคลียสขาดนิวตรอนแต่พลังงานไม่มากพอที่จะเกิดการสลายตัวให้รังสีบีตาบวกได้

ดังนั้นนิวเคลียสจึงดึงอิเล็กตรอนที่อยู่รอบๆเพื่อรวมกับโปรตอนแล้วเปลี่ยนไปเป็นนิวตรอน อิเล็กตรอนที่ถูกดึงมักอยู่ในชั้น K จึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า เคแคปเจอร์ (K-capture) นิวเคลียสใหม่จะประจุบวกจะลดลงไป 1 หน่วย แต่มวลอะตอมยังคงเดิมแล้วปล่อยแอนตินิวตริโนออกมดั่งสมการ

$${}^1_1p + {}^0_{-1}e^- \rightarrow {}^1_0n + \bar{\nu}$$

ผลที่ตามมาจากการที่อิเล็กตรอนชั้นวงโคจรในถูกจับเข้าไปในนิวเคลียสก็คือการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic x-rays) เพราะว่าเกิดที่ว่างขึ้นทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรชั้นนอกเข้าไปแทนที่

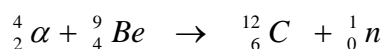
ต้นกำเนิดรังสีที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการที่เกิดจากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี เช่น ${}^{22}\text{Na}$, ${}^{57}\text{Co}$, ${}^{60}\text{Co}$, และ ${}^{137}\text{Cs}$ ซึ่งมีผังการสลายตัว (Decay scheme) ดังรูป 2.4



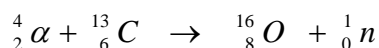
รูปที่ 2.4 ผังการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสีบางชนิด

2.3.1.6 รังสีแกมมาที่เกิดเนื่องจากปฏิกิริยานิวเคลียร์

ถ้าต้องการต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่าที่ได้จากการสลายตัวของรังสีบีตา ปฏิกิริยานิวเคลียร์บางปฏิกิริยาผลิตภัณฑ์ที่ได้จะอยู่ในสถานะกระตุ้นจึงถูกนำมาใช้ เช่น



ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาคือนิวเคลียส ${}^{12}_6\text{C}$ ซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น ในการสลายตัวจะปล่อยรังสีแกมมาพลังงาน 4.4 MeV ออกมา ตัวอย่างอีกปฏิกิริยาหนึ่ง คือ



ผลิตภัณฑ์ที่ออกมาคือนิวเคลียส ${}^{16}_8\text{O}$ ซึ่งอยู่ในสถานะกระตุ้น ในการสลายตัวจะปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงถึง 6.130 MeV

2.3.1.7 ปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน (Annihilation Radiation)

หลังจากเกิดการสลายตัวให้รังสีบีตาบวกและหลังจากการเกิดกระบวนการแปรโพรงได้โฟลิตรอนออกมา เมื่อโฟลิตรอนสูญเสียพลังงานในตัวกลางจนกระทั่งพลังงานลดต่ำลงจะรวมตัวกับอิเล็กตรอน ผลที่ได้คือโฟลิตรอนกับอิเล็กตรอนหายไปเกิดรังสีแกมมา 2 ตัว พลังงาน 0.511 MeV ปลดปล่อยไปในทิศทางตรงกันข้าม

2.3.1.8 อินเทอร์นัลคอนเวอร์ชัน (Internal conversion)

รังสีแกมมาที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวนั้น มีโอกาสชนอิเล็กตรอนที่ล้อมรอบนิวเคลียส เมื่อรังสีแกมมาชนอิเล็กตรอนมันจะถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอน เมื่ออิเล็กตรอนรับพลังงานก็จะกระเด็นหลุดออกจากอะตอม อิเล็กตรอนที่หลุดจากอะตอมโดยขบวนการนี้เรียกว่าคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน (Conversion electron) ก็คือรังสีบีตาที่มีพลังงานเดียวซึ่งออกมาจากอะตอมแทนรังสีแกมมา เมื่ออิเล็กตรอนวิ่งในว่างลงอิเล็กตรอนวิ่งนอกจะมาแทนที่ การเกิดอินเทอร์นัลคอนเวอร์ชันรังสีแกมมาจะหายไปแต่ได้อิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์ออกมา

2.3.1.9 การเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Bremsstrahlung)

เมื่ออนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าวิ่งไปในสนามไฟฟ้าของนิวเคลียสที่มีประจุบวก เกิดแรงกระทำต่ออนุภาคทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคเปลี่ยนไป ทางทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ อนุภาคจะปล่อยรังสีในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเรียกว่า

รังสีเบรมสตราลูงห์ ความเข้มรังสีขึ้นกับประจุ (z_1) มวลของอนุภาคที่เข้าชน (M) และเลขอะตอม (Z_2) ของสารที่ถูกระดมการ

$$I \propto \left[\frac{z_1 Z_2}{M} \right]^2 \quad 2.60$$

เมื่อ I คือ ความเข้มรังสี

M, z_1 คือ มวลและประจุของอนุภาคที่วิ่งเข้าชน

Z_2 คือ เลขอะตอมของสารที่ถูกระดมการ

จากสมการจะเห็นว่าอนุภาคบีตาเกิดเบรมสตราลูงห์ได้ดีกว่าอนุภาคแอลฟา ในการกันรังสีบีตาไม่นิยมใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมสูงๆ เนื่องจากการเกิดเบรมสตราลูงห์ ดังนั้นในการกันรังสีบีตานิยมใช้วัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ

2.3.2 อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสาร

อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารนั้นมีด้วยกันหลายแบบ โดยอันตรกิริยาที่สำคัญมี 3 แบบ คือ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect) คอมป์ตันเอฟเฟกต์ (Compton effect) หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และแพร์โปรดักชัน (Pair production)

2.3.2.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect)

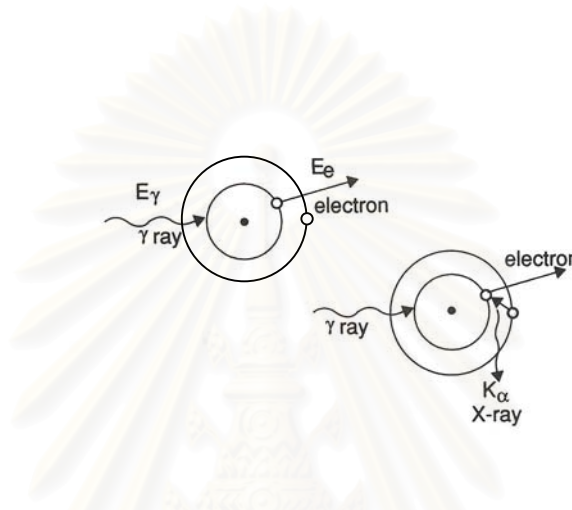
เป็นปฏิกิริยาที่รังสีแกมมาเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมตัวกลาง เกิดมากกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำประมาณ 0.01 MeV ถึง 0.5 MeV โดยพลังงานที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยานี้ได้จะต้องมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนเข้าชนอะตอมจะถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากรอบอะตอม อิเล็กตรอนอยู่ภายในวงโคจรด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวจำนวนหนึ่ง ดังนั้น พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน ที่หลุดออกมาจึงมีค่าเท่ากับพลังงานของรังสีแกมมาลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ดังสมการ

$$E_e = E_\gamma - E_b \quad 2.61$$

เมื่อ E_e คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอม

E_γ คือ พลังงานของรังสีแกมมาที่วิ่งเข้าชนอะตอม

E_b คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.5 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์

อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาเรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (Photo electron) กระบวนการนี้โฟตอนจะเสียพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนแล้วโฟโตอิเล็กตรอนจะเป็นตัวทำให้เกิดการแตกตัวเมื่อเคลื่อนผ่านอะตอมของสาร และเมื่อมีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมจะทำให้เกิดช่องว่างในอะตอม อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นนอกจะเลื่อนเข้ามาแทนตำแหน่งเดิมที่ว่างพร้อมกับปล่อยรังสีเอกซ์เฉพาะ (Characteristic x-ray) ออกมา และอาจจะชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ในรอบนอกแล้วทำให้เกิดไอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) ซึ่งมีพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในวงโคจร การดูดกลืนรังสีแกมมาจะเป็นไปไม่ได้กับอิเล็กตรอนอิสระเพราะขัดกับหลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานแต่ในกรณีของอิเล็กตรอนที่มีขอบเขตที่อยู่ในอะตอมนั้น การดูดกลืนเกิดขึ้นได้เพราะอะตอมจะเป็นตัวถอยหลังแต่เนื่องจากอะตอมมีมวลมาก การถอยหลังจึงน้อยจนถือว่าอะตอมไม่มีการถอยหลังเลย เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะถูกผลักไปในทิศทางข้างหน้าในแนวเดียวกับทิศของรังสีแกมมา ส่วนรังสีแกมมาที่มากกระทบมีพลังงานต่ำมักจะส่งอิเล็กตรอนในแนวทำมุมฉาก

ถ้าให้ σ_{pe} เป็นค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ ต่ออะตอมของตัวกลาง เมื่อรังสีแกมมา ความเข้ม I (γ - photon /cm².s) ตกกระทบเป้า ซึ่งมีความหนาแน่นของอะตอมเท่ากับ N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร อัตราการเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ต่อปริมาตรของเป้า, F_{pe} (cm⁻³ s⁻¹) จะคำนวณได้จากสมการ

$$F_{pe} = I N \sigma_{pe} \quad 2.62$$

ค่า σ_{pe} ขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวกลางและพลังงานของรังสีแกมมา σ_{pe} จะมีค่าลดลงเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้น และ σ_{pe} จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของตัวกลาง รูปที่ 2.6 แสดงค่า σ_{pe} ของตะกั่วที่พลังงานของรังสีแกมมาต่างๆ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อพลังงานต่ำกว่า 1 MeV ค่า σ_{pe} ของตะกั่วมีค่าสูงและจะสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดลง นั่นก็หมายความว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำจะทะลุผ่านตะกั่วได้ยาก

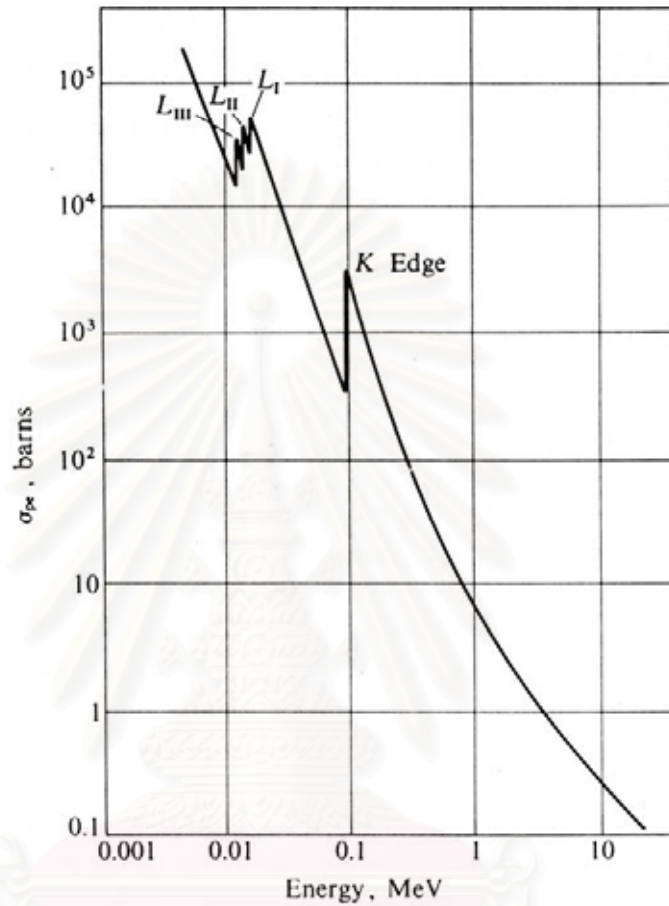
จากรูป 2.6 ค่า σ_{pe} มีความไม่ต่อเนื่องในบางพลังงานแสดงว่ามีการเปลี่ยนแปลงค่า σ_{pe} อย่างรวดเร็ว บริเวณรอยหยักนี้เรียกว่า “แอบซอร์พชันเอจ” (Absorption edge) ซึ่งบริเวณนี้จะเป็นบริเวณที่ค่าพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเท่ากับพลังงานที่ใช้ในการทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมพอดี เนื่องจากอิเล็กตรอนในอะตอมแบ่งเป็นชั้นระดับพลังงานต่างๆ แต่ละชั้น จึงมีค่าแอบซอร์พชันเอจ ต่างกันคือ K_{edge} , L_{edge} , M_{edge} เป็นต้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นระดับพลังงานต่ำ (ใกล้นิวเคลียส) จะหลุดออกมาจากอะตอมได้ยากกว่าอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นนอกที่มีระดับพลังงานสูงกว่า ดังนั้นค่าสันขอบการดูดกลืนของชั้น K จึงมีพลังงานสูงกว่าชั้น L สำหรับชั้น K มีพลังงานค่าเดียวเนื่องจากในชั้น K มีระดับพลังงานเดียว ส่วนชั้น L จะมีระดับพลังงานย่อย 3 พลังงานจึงมียอดสันขอบการดูดกลืน 3 ค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกัน

K_{edge} เป็นค่าพลังงานที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร K เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานเท่ากับค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K -electron) พอดี อะตอมจะมีค่า σ_{pe} สูงขึ้น เพราะฉะนั้นอะตอมจะดูดกลืนพลังงานของรังสีแกมมาพลังงานเท่ากับ K_{edge} ได้ดีกว่าในช่วงพลังงานใกล้เคียงกันในกรณีที่รังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า K_{edge} ก็ไม่สามารถที่จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์กับอิเล็กตรอนในวงโคจร K (K -electron) ได้

ส่วน L_I , L_{II} และ L_{III} ก็ทำนองเดียวกัน คือ เป็นจุดที่สอดคล้องกับพลังงานยึดเหนี่ยว หรือ พลังงานที่ทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionization energy) ของอิเล็กตรอนในวงโคจร L (L -electron) ในวงโคจรย่อย (Subshell) ที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

ดังนี้

ช่วงที่รังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า K_{edge} ขึ้นไป ค่า σ_{pe} จะลดลงตามค่าพลังงาน



รูปที่ 2.6 ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ของตะกั่วที่พลังงานต่างกัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\sigma_{pe} = E^{-3} \tag{2.63}$$

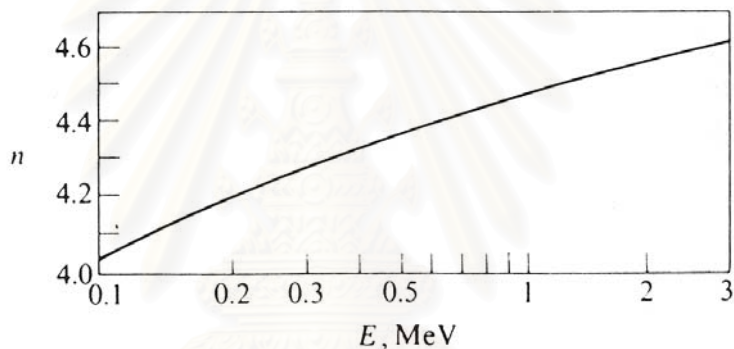
นอกจากนี้ค่า σ_{pe} ยังขึ้นอยู่กับค่า Z ของตัวกลางอย่างมาก คือ

$$\sigma_{pe} = Z^n \tag{2.64}$$

ค่า n จะแปรผันตามพลังงานของรังสีแกมมาแต่จะมีค่าประมาณ 4 กราฟของค่า n แสดง ดังรูป 2.7 โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ จะมีค่าประมาณดังสมการ

$$\sigma_{pe} = \frac{Z^n}{E^3} \times const \quad 2.65$$

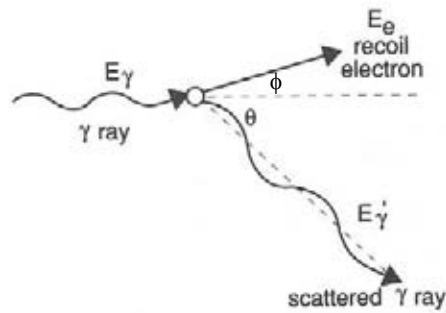
การที่ค่า σ_{pe} ขึ้นอยู่กับค่า Z ของตัวกลางอย่างมาก ดังนั้นธาตุที่เลขอะตอมสูง เช่น ตะกั่ว จึงใช้ในการกำบังรังสีแกมมาได้ดี การเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์เป็นอันตรกิริยาที่พึงประสงค์ในการกำบังรังสีแกมมา ทั้งนี้เพราะรังสีแกมมาจะหายไป และเปลี่ยนไปเป็นอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถกำบังได้ง่ายกว่ารังสีแกมมา



รูปที่ 2.7 ค่า n ที่พลังงานรังสีแกมมาต่างๆ

2.3.2.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟคต์ (compton effect) หรือการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (compton scattering)

เป็นอันตรกิริยารังสีแกมมาชนแบบยืดหยุ่นกับอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม เกิดมากกับรังสีแกมมาพลังงานต่ำประมาณ 0.1 MeV ถึง 10 MeV รังสีแกมมา จะเสียพลังงานบางส่วนให้อิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ส่วนรังสีแกมมาจะกระเจิงทำมุม θ กับแนวการเคลื่อนที่เดิมดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟคต์

ถ้าให้รังสีแกมมาตกกระทบบนอิเล็กตรอนที่มีพลังงาน, $h\nu$ และ โมเมนตัม, $h\nu/c$ ตกกระทบบนอิเล็กตรอนอิสระที่มีมวลนิ่ง (m_0) อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับอิเล็กตรอนมีผลทำให้รังสีแกมมากระเจิงไปเป็นมุม θ และมีพลังงานเหลือเป็น $h\nu'$ ($< h\nu$) ส่วนอิเล็กตรอนที่ถูกชนกระเด็นถอยหลังไปเป็นมุม ϕ และมีพลังงานจลน์ของการถอยหลังเป็น E_k ดังรูปที่ 2.8 จากการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงาน จะได้

$$E_k = mc^2 - m_0c^2$$

$$E_k = m_0c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad 2.66$$

เมื่อ $\beta = v/c$ โดยที่ v เป็นความเร็วของอิเล็กตรอนและโมเมนตัมของอิเล็กตรอน (p_e) จะมีค่า

$$p_e = m \cdot \beta \cdot c$$

$$p_e = \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \quad 2.67$$

เมื่อแยกโมเมนตัมออกเป็น 2 แนวแกน x และ y และใช้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัมและพลังงานทำให้ได้

$$\frac{hv}{c} = \frac{hv'}{c} \cos \theta + \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \cos \phi \quad 2.68$$

$$0 = \frac{hv'}{c} \sin \theta - \frac{m_0 \beta c}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin \phi \quad 2.69$$

$$hv = hv' + E_k \quad 2.70$$

$$hv = hv' + m_0 c^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} - 1 \right) \quad 2.71$$

เมื่อให้ค่าของมุม ϕ คงที่ จะหาค่าของสมการได้

$$p_e c \cos \phi = hv - hv' \cos \theta \quad 2.72$$

$$p_e c \sin \phi = hv' \sin \theta \quad 2.73$$

ยกกำลังสองทั้งสองสมการแล้วนำมารวมกันได้

$$p_e^2 c^2 = (hv)^2 - 2(hv)(hv') \cos \theta + (hv')^2 \quad 2.74$$

พลังงานรวมของอิเล็กตรอนมีค่า

$$E_e = E_k + m_0 c^2 \quad 2.75$$

และจากทฤษฎีสัมพันธภาพได้

$$E_e = \sqrt{(p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4)} \quad 2.76$$

แทนค่าสมการ (2.76) ลงในสมการ (2.75) ได้

$$p_e^2 c^2 + m_0^2 c^4 = (E_k + m_0 c^2)^2 \quad 2.77$$

และแทนค่า $E_k = hv - hv'$ ในสมการ (2.77) ได้

$$p_e^2 c^2 = (hv - hv')^2 + 2(hv - hv')m_0 c^2 \quad 2.78$$

สมการ (2.74) และสมการ (2.78) เท่ากัน จะได้ว่า

$$hv' = \frac{hv}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \quad 2.79$$

เมื่อ $\alpha = \frac{hv}{m_0 c^2}$ ซึ่งเท่ากับพลังงานของโฟตอนที่ตกลงบนอิเล็กตรอนที่อยู่ในหน่วยของมวลนิ่งของอิเล็กตรอนในทำนองเดียวกัน สามารถหาค่าของพลังงานจลน์ได้

$$E_k = hv - hv'$$

$$E_k = hv \left(1 - \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \quad 2.80$$

$$E_k = hv \left(\frac{\alpha(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right) \quad 2.81$$

$$\text{ซึ่ง} \quad \cos\theta = 1 - \frac{2}{(1 + \alpha)^2 \tan^2 \phi + 1} \quad 2.82$$

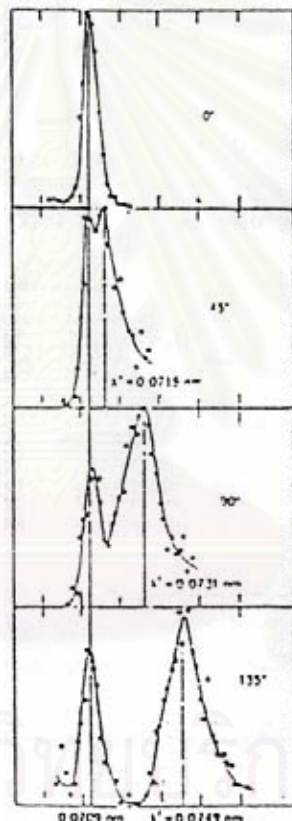
จากสมการ (2.79) เมื่อเปลี่ยนความถี่คลื่นให้อยู่ในรูปความยาวคลื่นจะได้เป็น

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 c} (1 - \cos\theta) \quad 2.83$$

โฟตอนที่กระเจิงออกมามีความยาวคลื่นมากกว่าโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอนและความยาวคลื่นที่เปลี่ยน ($\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$) ไม่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นที่ตกกระทบอิเล็กตรอน แต่จะขึ้นอยู่กับมุมกระเจิง θ และมวลของอิเล็กตรอน m_0 สำหรับค่า $h/m_0 c$ มีหน่วยเป็นความยาวเรียกว่า ความยาวคลื่นคอมป์ตัน (compton wavelength) เมื่อแทนค่า m_0 , h และ c แล้วจะได้ $h/m_0 c = 0.02426 \text{ \AA}$ ดังนั้นจากสมการ (2.83) ได้

$$\Delta\lambda = 0.02426(1 - \cos\theta) \text{ \AA} \quad 2.84$$

ที่ $\theta = 0^\circ$ ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาไม่เปลี่ยนแปลง ส่วนที่มุม $\theta = 90^\circ$ ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาเปลี่ยนไป $\Delta\lambda = 0.02426 \text{ \AA}$ และที่มุม $\theta = 180^\circ$ ทำให้ได้ $\Delta\lambda = 2 \times 0.02426 = 0.4852 \text{ \AA}$ ผลการทดลองหาค่าความเข้มรังสีแกมมาที่กระเจิงเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นนั้นแสดงดังรูปที่ 2.9 จากรูปจะเห็นว่าความเข้มของรังสีและความยาวคลื่นของรังสีเพิ่มขึ้นตามค่ามุมกระเจิง



รูปที่ 2.9 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่เกิดจากการกระเจิงคอมป์ตันโดยมีความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมการกระเจิงต่างๆ

สามารถคำนวณหาค่าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบกับอิเล็กตรอนได้ โดยใช้สมการ (2.79) จากการวัดพลังงานของอิเล็กตรอนซึ่งมีค่าสูงสุดที่มุมกระเจิง 180° จาก

$$E_k = hv \left(\frac{2\alpha}{1+2\alpha} \right)$$

$$E_k = hv \left(\frac{2hv/m_0c^2}{1+2hv/m_0c^2} \right) \quad 2.85$$

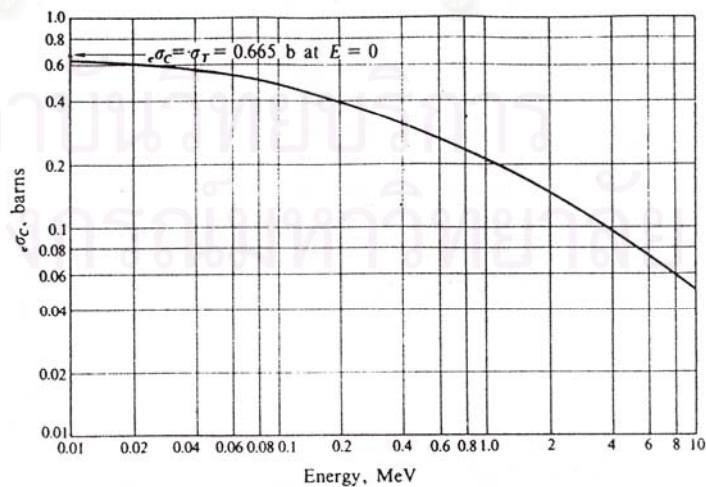
ค่าภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันต่ออะตอม (σ_c) จึงเป็นค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอน (${}_e\sigma_c$) ซึ่ง

$${}_e\sigma_c = {}_e\sigma_s + {}_e\sigma_a \quad 2.86$$

เมื่อ ${}_e\sigma_s$ คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการกระเจิงพลังงานของรังสีแกมมา

${}_e\sigma_a$ คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอนในการดูดกลืนพลังงานโดยอิเล็กตรอน

และค่าภาคตัดขวางนี้จะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นจากที่สูงที่สุด 0.655บาร์น (barns) ที่พลังงาน 0 MeV ซึ่งเรียกว่าภาคตัดขวางทอมสัน (Thompson cross section, σ_T) ดังรูป 2.10 จะเห็นว่าที่รังสีแกมมามีพลังงานสูงขึ้นจน $E_\gamma \gg E_e$ ค่า ${}_e\sigma_c$ จะแปรผันตรงตามค่า E^{-1}



รูปที่ 2.10 ค่า ${}_e\sigma_c$ ที่พลังงานของรังสีแกมมาต่างๆ

ค่าภาคตัดขวางการกระเจิงคอมป์ตันต่ออะตอม (σ_c) จะขึ้นอยู่กับเลขอะตอมของตัวดูดกลืน ดังสมการ

$$\sigma_c = Z_e \sigma_e \quad 2.87$$

$${}_e \sigma_e \propto E_\gamma^{-1} \quad 2.88$$

ดังนั้นโอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์จึงขึ้นกับจำนวนอิเล็กตรอนที่อยู่ในอะตอมของตัวดูดกลืน และจะเกิดได้ดีกับสารที่มีเลขอะตอม, Z สูง และจะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมา, E_γ สูงขึ้น

$$\sigma_c \approx \frac{Z}{E_\gamma} \quad 2.89$$

พิจารณาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนในหน่วย cm^{-1} จะได้

$$\mu_\sigma = \frac{\rho N_A Z}{A} {}_e \sigma_e \quad 2.90$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของตัวอย่าง (g/cm^3)

N_A คือ เลขอะโวกาโดร

Z คือ เลขอะตอมของตัวกลาง

A คือ เลขมวลของตัวกลาง

ค่าของ ${}_e \sigma_e$ (cm^2/e) ไม่ขึ้นกับสมบัติของตัวดูดกลืน ในขณะที่ μ_σ เป็นฟังก์ชันอะตอมของตัวดูดกลืน และเมื่อพิจารณาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล จะกำหนดได้โดย

$$\frac{\mu}{\rho} = N \left(\frac{Z}{A} \right) {}_e \sigma_e \quad 2.91$$

จะเห็นว่าในกรณีธาตุเบา $Z/A \sim 0.5$ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของธาตุเบาแต่ละธาตุจะมีค่าคงตัวที่พลังงานของโฟตอนเดียวกัน

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคของการกระเจิง ที่กระเจิงเป็นมุมต่างๆ สามารถคำนวณหาได้จากสูตรของ Klein-Nishina ดังสมการ

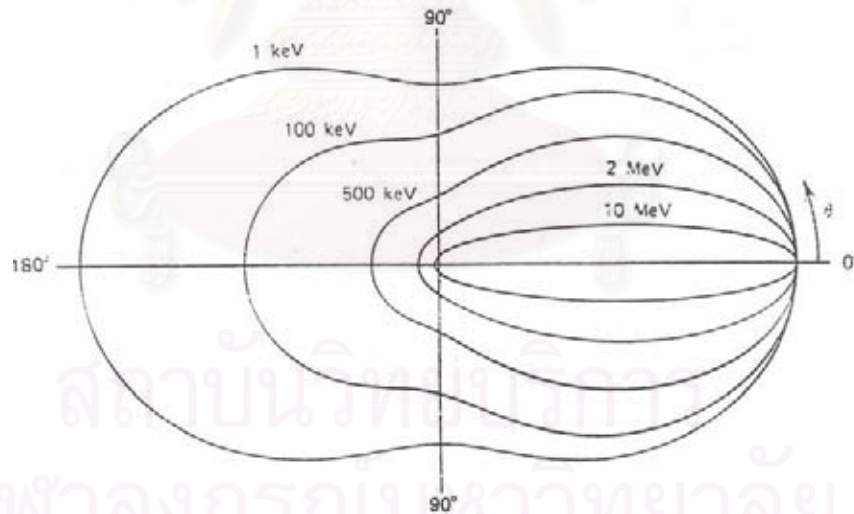
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_0^2 \left(\frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]} \right) \quad 2.92$$

เมื่อ r_0 คือ classical electron radius 2.82×10^{-13} cm

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{m_0c^2} = \frac{662 \text{ keV}}{511 \text{ keV}} = 1.29 \quad \text{for } ^{137}\text{Cs} \quad 2.93$$

เมื่อ θ คือมุมกระเจิง

ค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงจากโฟตอนระดับพลังงานต่างๆ ได้แสดงดังรูปที่ 2.11 จากสมการของ Klein-Nishina เมื่อพลังงานของรังสีตกกระทบยิ่งสูงมาก การกระเจิงส่วนใหญ่จะเป็นการกระเจิงไปข้างหน้า (Forward scattering)



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม θ จากรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน

ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์และปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟกต์ก็คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกเอฟเฟกต์เป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่ตก

กระทบกับอิเล็กตรอน แต่ในกระบวนการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันเอฟเฟคต์นั้นเพียงแต่ลดขนาดพลังงานเดิมของโฟตอน เกิดโฟตอนใหม่ที่มีพลังงานลดลงและอิเล็กตรอนที่มีพลังงานค่านึง หลังจากการเกิดคอมป์ตันแล้วโฟตอนที่มีพลังงานต่ำลงก็อาจจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนตัวอื่นทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคต์ได้อีก

2.3.2.3 แพร่โพรงชักขึ้น (pair production)

ปรากฏการณ์นี้จะเกิดเมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าสูงกว่า 1.02 MeV เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงเคลื่อนผ่านสนามไฟฟ้าของอิเล็กตรอนในอะตอมรังสีแกมมาจะหายไปกลายเป็นอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้ามพิจารณาตามกฎการอนุรักษ์พลังงาน

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} + E_{nuc} \quad 2.94$$

เมื่อ $h\nu$ คือ พลังงานของรังสีแกมมาตกกระทบ

$2m_0c^2$ คือ พลังงานมวลนิ่งของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน

E_{e^-} , E_{e^+} , E_{nuc} คือ พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน, โพสิตรอนและนิวเคลียสตามลำดับ

หากคิดว่านิวเคลียสมีมวลมาก E_{nuc} จะมีค่าน้อยมากจนสามารถตัดทิ้งได้ สมการ (2.94) จะเหลือ

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_{e^-} + E_{e^+} \quad 2.95$$

ซึ่งแสดงให้เห็นว่า พลังงานขีดเริ่มที่จะทำให้เกิดกระบวนการนี้คือ $2m_0c^2$ หรือ 1.02 MeV พลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนจะมีค่าเท่ากันคือ เท่ากับค่าผลต่างระหว่างพลังงานรังสีแกมมากับพลังงานมวลพัก (Rest mass energy) ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนรวมกัน นั่นคือ

$$E_{k(e^- \text{ or } e^+)} = \frac{1}{2}(E_\gamma - 1.022) \text{ MeV} \quad 2.96$$

อันตรกิริยาแบบแพร่โพรงชักขึ้นนี้เป็นปรากฏการณ์ของการเปลี่ยนแปลงพลังงานไปเป็นมวล ซึ่งตรงกันข้ามกับปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน (Annihilation) ของอิเล็กตรอนกับโพสิ

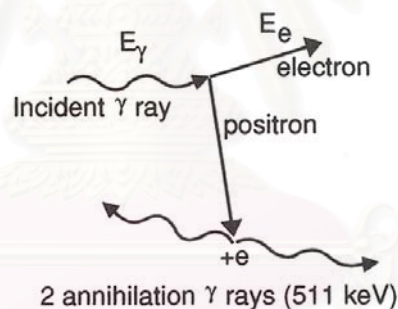
ตรอน แต่เมื่อโฟลิตรอนมีค่าพลังงานต่ำลงจะสามารถรวมกับอิเล็กตรอน เกิดเป็นรังสีแกมมา 2 ตัว คือเกิด แอนนิฮิเลชัน ขึ้นได้ $e^+ + e^- \rightarrow 2h\nu$

รังสีแกมมาที่เกิดจากมวลของโฟลิตรอนและอิเล็กตรอน จะมีพลังงาน 0.511 MeV และวิ่งไปในทิศทางตรงกันข้าม

โอกาสในการเกิดแพริโพรดักชันของรังสีแกมมาที่พลังงานสูงกว่า 1.02 MeV จะมีค่าสูงขึ้น ให้ σ_{pp} เป็นภาคตัดขวางในการเกิดแพริโพรดักชัน ต่ออะตอมของตัวกลาง และ Z คือเลขอะตอมของตัวกลาง

$$\sigma_{pp} \propto Z^2 \quad 2.97$$

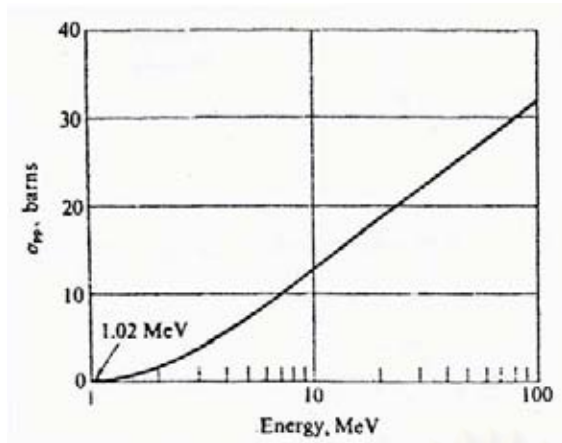
ดังนั้นโอกาสของการเกิดแพริโพรดักชัน จะประมาณได้ว่า



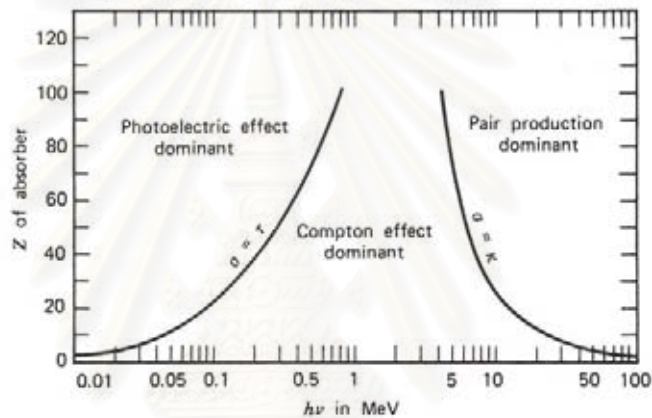
รูปที่ 2.12 การเกิดแพริโพรดักชันและปรากฏการณ์แอนนิฮิเลชัน

$$\sigma_{pp} \equiv Z^2 (E - 1.022) \quad 2.98$$

เมื่อเปรียบเทียบโอกาสการเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 แบบ จะได้ว่าที่พลังงานต่ำประมาณ 0.01 MeV ถึง 0.5 MeV จะมีโอกาสเกิดโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์มากที่สุด ส่วนที่พลังงานประมาณ 0.1 MeV ถึง 10 MeV จะมีโอกาสเกิดคอมป์ตันเอฟเฟกต์มากที่สุด และพลังงานที่สูงกว่า 1.02 MeV ขึ้นไปจะสามารถเกิดแพริโพรดักชันได้ และจะมีโอกาสในการเกิดมากขึ้นเมื่อพลังงานสูงๆ



รูปที่ 2.13 ค่า σ_{pp} ของตะกั่วที่พลังงานต่างๆ



รูปที่ 2.14 โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆสัมพันธ์กับเลขอะตอมของตัวดูดกลืน

นอกจากอันตรกิริยาที่สำคัญทั้งสาม จะขอกกล่าวถึง อันตรกิริยาบางแบบที่เกิดขึ้นกับรังสีแกมมา แล้วทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานของรังสีแกมมา หรือการดูดกลืนรังสีแกมมาในแบบอื่น ถึงแม้ว่าจะไม่มีผลต่อการดูดกลืนรังสีแกมมามากนักก็ตาม ได้แก่

การกระเจิงเรย์ลี (Rayleigh Scattering) เป็นการกระเจิงแบบยืดหยุ่น เกิดขึ้นในกรณีโฟตอนตกกระทบกับอิเล็กตรอน แล้วพลังงานที่อิเล็กตรอนได้รับไม่เพียงพอที่จะทำให้มันหลุดออกไปจากอะตอมได้ เกิดกับโฟตอนพลังงานต่ำ และตัวดูดกลืนที่มีเลขอะตอมสูงๆ

การกระเจิงทอมสัน (Thomson Scattering) เรียกกันอีกอย่างหนึ่งว่าการกระเจิงคอมป์ตันกับนิวเคลียส (nuclear Compton scattering) เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนกับนิวเคลียส แต่เนื่องจากนิวเคลียสมีมวลมาก การกระเจิงของทอมสันจึงมีผลน้อยมาก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับนิวเคลียส (Nuclear Photoelectric Effect) โฟตอนพลังงานสูงอาจถูกดูดกลืนโดยนิวเคลียส เป็นผลให้มีนิวคลีออนหลุดออกมาจากนิวเคลียส กระบวนการนี้เกิดกับนิวเคลียสที่มีเลขอะตอมสูงๆ

2.3.3 สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation Coefficient)

เป็นสัมประสิทธิ์การลดความเข้มรังสีแกมมา ถ้าให้ σ เป็นภาคตัดขวางรวม (Total cross section) ต่ออะตอมของตัวกลาง ดังนั้น

$$\sigma = \sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_c \quad 2.99$$

เมื่อ σ_{pe} เป็นภาคตัดขวางของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

σ_c เป็นภาคตัดขวางของการเกิดการกระเจิงคอมป์ตัน

σ_{pp} เป็นภาคตัดขวางของการเกิดแพร์โพรดักชัน

และคูณค่าความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง (N) เข้าไปในสมการ (2.98) จะได้

$$N\sigma = N(\sigma_{pe} + \sigma_{pp} + \sigma_c) \quad 2.100$$

ผลคูณระหว่าง $N\sigma$ นี้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การลดทอน (Attenuation coefficient)” ซึ่งใช้สัญลักษณ์แทนเป็น μ ดังนั้น

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_{pp} + \mu_c \quad 2.101$$

เมื่อ μ , μ_{pe} , μ_{pp} และ μ_c เป็น สัมประสิทธิ์การลดทอนรวม และของอันตรกิริยาแบบ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ แพร์โพรดักชันและการกระเจิงคอมป์ตันตามลำดับ ค่า μ นี้มีหน่วยเป็น cm^{-1} ซึ่งเรียก μ ว่า “สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น” (linear attenuation coefficient) ในการคำนวณเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน มักจะพบค่า μ ใน เทอมของ (μ/ρ) ซึ่งได้จากการนำค่าความหนาแน่น, ρ (physical density) ของตัวกลางไปหารค่า μ

ค่า (μ/ρ) นี้เรียกว่า “สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล” (mass attenuation coefficient) มีหน่วยเป็น cm^2/g จากสมการที่ (2.101) จะได้

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right) = \frac{\mu_{pe}}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} \quad 2.102$$

รูปที่ 2.15 แสดงค่า μ/ρ ของตะกั่ว จะเห็นได้ว่าค่า μ_{pe}/ρ และ μ_c/ρ ลดลงเมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้น ส่วนค่า μ_{pp}/ρ จะเริ่มที่พลังงาน 1.022 MeV และสูงขึ้นเรื่อยๆ เมื่อรังสีแกมมาพลังงานสูงขึ้น ถ้าพิจารณา (μ/ρ) รวม จะพบว่าที่พลังงานรังสีแกมมาเท่ากับ 3.5 MeV ค่า (μ/ρ) รวมมีค่าต่ำสุด ในช่วงพลังงาน 0.5 ถึง 5 MeV ค่า μ_c/ρ ของตะกั่วจะสูงกว่า μ_{pe}/ρ และ μ_{pp}/ρ กล่าวคือในช่วงพลังงานดังกล่าวอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเป็นการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (compton scattering) เนื่องจากค่า σ_{pe} และ σ_{pp} ขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอมของตัวกลางอย่างมาก ดังนั้นธาตุที่มีค่าเลขอะตอมต่ำ ช่วงที่ μ_c/ρ จะมีค่ามากกว่า μ_{pe}/ρ และ μ_{pp}/ρ จึงมีช่วงกว้างกว่า ตัวอย่างเช่น อะลูมิเนียม ค่า μ_c/ρ จะมีค่ามากกว่า μ_{pe}/ρ และ μ_{pp}/ρ ในช่วงที่รังสีแกมมามีพลังงาน 0.06 ถึง 20 MeV

ในกรณีที่รังสีแกมมามีพลังงานต่ำกว่า 1.022 MeV ค่า μ_{pp}/ρ จะเท่ากับ 0 ดังนั้น (μ/ρ) รวมจะเท่ากับ $\mu_{pe}/\rho + \mu_c/\rho$ และในช่วงที่ μ_c/ρ มีค่าสูงเมื่อเทียบกับค่า μ_{pe}/ρ และค่า μ_{pp}/ρ จะได้

$$\frac{\mu}{\rho} \cong \frac{\mu_c}{\rho} = \frac{N\sigma_c}{\rho} \quad 2.103$$

แทนค่า ความหนาแน่นอะตอม, $N = \frac{\rho N_A}{M}$ ในสมการที่ (2.102) จะได้

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A \sigma_c}{M} = N_A \left(\frac{Z}{M}\right)_e \sigma_c \quad 2.104$$

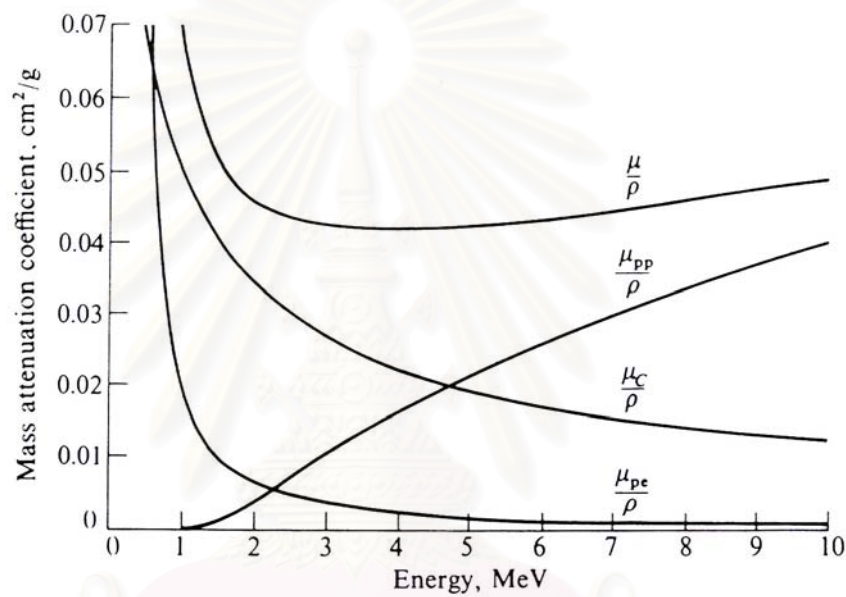
เมื่อ M คือ น้ำหนักของอะตอม (g)

ค่า Z/M มีค่าประมาณ 1/2 ยกเว้นไฮโดรเจน และธาตุหนักๆ ดังนั้น

$$\frac{\mu}{\rho} \cong \frac{1}{2} N_A e \sigma_c \quad 2.105$$

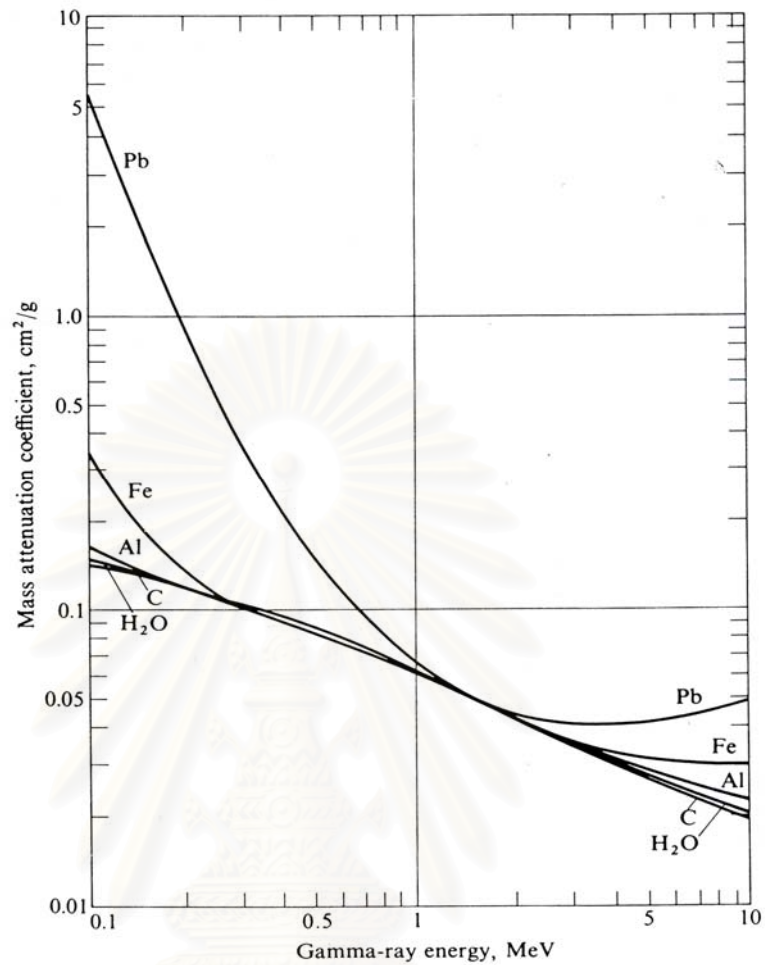
เมื่อ σ_c คือ ภาคตัดขวางคอมป์ตันต่ออิเล็กตรอน (Compton cross section per electron)

จะเห็นได้ว่าในช่วงการกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) จะเด่นกว่าเมื่อเทียบกับโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) และแพริโพรดักชัน (pair production) ส่วนค่า μ/ρ ของธาตุเกือบทุกธาตุจะมีค่าเท่าๆกัน ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจนจากรูปที่ 2.16 โดยเฉพาะในช่วงพลังงาน 1 –4.5 MeV



รูปที่ 2.15 ค่า μ/ρ , μ_{pe}/ρ , μ_c/ρ และ μ_{pp}/ρ ของตะกั่ว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.16 ค่า μ/ρ ของธาตุบางชนิด

ค่า μ และ μ/ρ ของของผสมสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\mu_{\text{total}} = \mu_1 + \mu_2 + \mu_3 + \dots \quad 2.106$$

เมื่อ $\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient) ของธาตุที่ 1, 2, 3 ในของผสม ตามลำดับ และ

$$\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{\text{total}} = 0.01 \left[w_1 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_1 + w_2 \left(\frac{\mu}{\rho}\right)_2 + \dots \right] \quad 2.107$$

เมื่อ $(\mu/\rho)_1, (\mu/\rho)_2, \dots$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ของธาตุที่ 1, 2, ... ในส่วนผสมและ W_1, W_2, \dots เป็นร้อยละโดยน้ำหนักของธาตุที่ 1, 2, ตามลำดับ

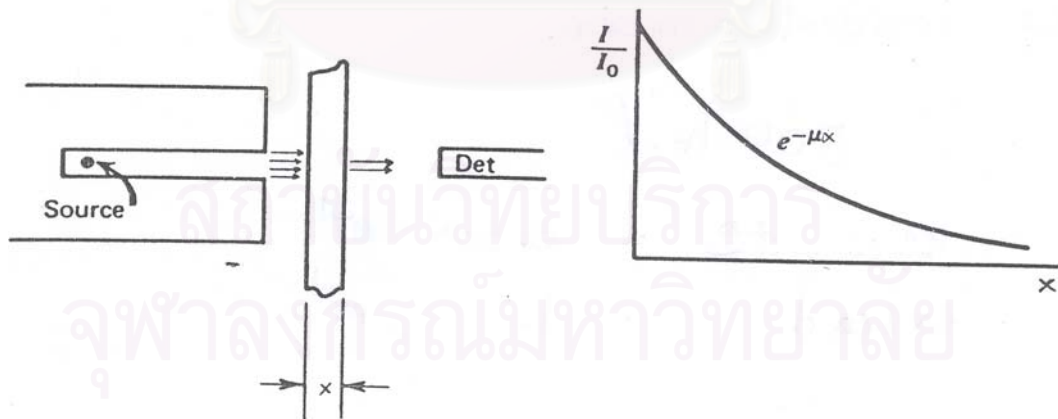
ระยะทางเฉลี่ยอิสระ (Mean free path; λ) ของรังสีแกมมาในตัวกลางมีค่าเท่ากับส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Mean free path หมายถึงระยะทางเฉลี่ยที่รังสีจะเคลื่อนไปได้ในตัวกลางโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ)

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad 2.108$$

ถ้ามีรังสีแกมมาพลังงานเดียว (Monoenergetic γ -ray) มีความเข้ม I_0 (γ -rays/cm²-s) ตกกระทบเป้าหมายหนา x ซม. ความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านไปได้โดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆ กับเป้าเลยจะคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$I = I_0 e^{-(\mu x)} \quad 2.109$$

$$I = I_0 e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)(\rho x)} \quad 2.110$$



รูปที่ 2.17 การทะลุผ่านของรังสีแกมมา

เมื่อ I คือความเข้มรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านวัสดุหนา x ไปโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใดๆ และค่า ρx นี้เรียกว่า “ความหนาแน่นเชิงมวล (density thickness)” มีหน่วยเป็น g/cm^2

2.3.4 การถ่ายเทพลังงาน (Energy Deposition) ในตัวกลาง

เมื่อรังสีแกมมาความเข้ม I ตกกระทบเป้า ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) เท่ากับ μ สามารถคำนวณหาอัตราการเกิดอันตรกิริยาต่อหน่วยปริมาตร, F (interactions/ cm^3 -s) ได้จาก

$$F = I\mu \quad 2.111$$

$$\lambda = \frac{1}{\mu} \quad 2.112$$

ถ้า E เป็นพลังงานของรังสีแกมมาในหน่วย MeV ค่าอัตราพลังงานที่รังสีแกมมาถ่ายเทให้กับเป้าต่อหน่วยปริมาตรจะหาได้จาก

$$EF = EI\mu \quad 2.113$$

ทั้งอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (photoelectric effect) และแพริโพรดัคชัน (pair production) ถือว่าพลังงานทั้งหมดถ่ายเทในตัวกลาง ยกเว้นในกรณีในตัวกลางบางมากสำหรับการชนแบบคอมป์ตัน (compton scattering) พลังงานที่ถ่ายเทในตัวกลาง คือพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอน (ในที่นี้คือ recoil electron)

ถ้าให้ T เป็นพลังงานจลน์เฉลี่ยของ recoil electron ดังนั้นพลังงานเฉลี่ยที่ถ่ายเทในตัวกลางโดยการชนแบบคอมป์ตัน คือ $T\mu_c$

ถ้าให้ σ_c เป็นภาคตัดขวางของการชนแบบคอมป์ตัน (compton cross section) ต่ออะตอมของตัวกลาง จะได้

$$E\sigma_c = T\sigma_c \quad 2.114$$

$$E\mu_c = T\mu_c \quad 2.115$$

ค่าพลังงานที่ถ่ายเทในตัวกลางโดยการชนแบบคอมป์ตัน ก็สามารถคำนวณได้จาก

$$(EF)_c = EI\mu_c \quad 2.116$$

เมื่อ $(EF)_c$ เป็นอัตราการถ่ายเทพลังงานในตัวกลางเนื่องจากการชนแบบคอมป์ตัน, $\text{MeV/cm}^3\cdot\text{s}$

ถ้า W เป็นพลังงานทั้งหมดที่ถ่ายเทในตัวกลางต่อหน่วยเวลาต่อปริมาตร จะได้

$$W = EI(\mu_{pe} + \mu_{pp} + \mu_c)$$

$$W = E \cdot I \cdot \mu_a \quad 2.117$$

เมื่อ $\mu_a = \mu_{pe} + \mu_{pp} + \mu_{ca}$ เรียก μ_a ว่า “สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (Linear absorption coefficient)” มีหน่วยเป็น cm^{-1} เช่นเดียวกับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient) ทำนองเดียวกัน ค่า (μ_a/ρ) จะเรียกว่า “สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (mass absorption coefficient)” มีหน่วยเป็น cm^2/g

ถ้า ρ เป็นความหนาแน่น (Physical density) ของตัวกลาง $EI(\mu_a/\rho)$ จะเป็นอัตราการถ่ายเทพลังงานของรังสีแกมมาในตัวกลางต่อหน่วยน้ำหนัก ($\text{MeV/g}\cdot\text{s}$) และค่า EI มีชื่อเรียกว่า “energy flux” มีหน่วยเป็น $\text{MeV/cm}^2\cdot\text{s}$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยชิ้นนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น สาม ส่วนคือ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการสร้างแบบจำลองด้วย MCNP-4A ตามเงื่อนไขต่างๆ ส่วนที่สองจะเป็นการตรวจความถูกต้องของแบบจำลองนั้นๆ ด้วยผลการทดลอง และส่วนที่สามจะเป็นการสร้างโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้ เพื่อให้ผู้ที่ไม่มีความรู้ ในการใช้ MCNP-4A สามารถใช้ได้

การวิจัยนี้เริ่มต้นโดยการศึกษาผลการคำนวณจาก MCNP-4A เพื่อเก็บข้อมูลของประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบมีปริมาตรที่ไม่เกิน 20 ลิตรโดยใช้วิธีการประมาณค่าแบบการแจกแจงภายในหัววัดรังสี เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อระบบวัดจากเงื่อนไขต่างๆ กัน อาทิเช่น พลังงาน ขนาดและรูปแบบของต้นกำเนิดรังสี ที่แตกต่างกัน ขนาดของหัววัด และระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงหัววัด เป็นต้น

ในส่วนที่สองนั้นจะเป็นการตรวจสอบผลที่ได้จากการทดลองกับการคำนวณด้วย MCNP-4A ในส่วนนี้จะสร้างเงื่อนไขของการทดลองที่เป็นไปได้โดยไม่คำนึงถึงเงื่อนไขจากส่วนแรกเพื่อสะดวกในการปฏิบัติงาน แล้วใช้ MCNP-4A สร้างแบบจำลองของการทดลองนั้นๆ และทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพของระบบวัดระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและผลที่ได้จากการคำนวณ ซึ่งแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพการวัดรังสีจากขั้นตอนการทดลองและจากการคำนวณนั้นต้องมีทิศทางเป็นไปในทิศทางเดียวกัน

และในส่วนที่ สาม เป็นส่วนที่ออกแบบโปรแกรมในการใช้ MCNP-4A ในการคำนวณประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบมีปริมาตร ในการออกแบบโปรแกรมนั้นได้ใช้ VB Script ในการเขียนโปรแกรมและให้โปรแกรมห้างกล่าวนี้ใช้งานบน Microsoft Internet Explorer เพื่อความสะดวกในการติดตั้งและปฏิบัติงาน โปรแกรมการใช้งาน MCNP-4A นี้ สะดวกสำหรับผู้ใช้ทั่วไปที่ไม่มีความรู้และเข้าใจใน MCNP-4A มากนัก นอกจากนั้นโปรแกรมดังกล่าวนี้ได้ระบุเงื่อนไขต่างๆ ในระบบระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบมีปริมาตรไว้อย่างครบถ้วน

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

3.1.1 คำนวณหาประสิทธิภาพ (Efficiency) การวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบจุด (Point Source) และแบบมีปริมาตร (Volumetric Source) โดยใช้ MCNP-4A ซึ่งกำหนดให้เงื่อนไขการคำนวณประสิทธิภาพใช้การบันทึกของ MCNP-4A เป็นแบบ F8 Tally หรือการบันทึกค่าแบบการแจกแจงพลังงานภายในหัววัดรังสี โดยกำหนดให้หัววัดรังสีที่ใช้ เป็นหัววัดรังสี NaI(Tl) เท่านั้น ขั้นตอนนี้ จะได้ค่าประสิทธิภาพ ของระบบวัดรังสีแกมมา จากหัววัดรังสี NaI (Tl) ที่เงื่อนไขต่างๆ กัน

3.1.2 ตรวจสอบผลที่ได้จากการคำนวณโดยใช้ MCNP-4A กับวิธีการคำนวณแบบอื่น และ/หรือ การทดลอง แบบอื่นๆ เพื่อตรวจสอบผลที่ได้ว่ามีความถูกต้องแม่นยำเพียงใด

3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับ คำนวณหาประสิทธิภาพสมบูรณ์ของหัววัดNaI(Tl)ด้วย MCNP-4A

3.2.1 แบบจำลองของระบบวัดรังสีแกมมา จากต้นกำเนิดรังสีแบบจุดและแบบมีปริมาตร ซึ่งประกอบเนื้อดิน หรือ เนื้อสารเคมีบางชนิด ที่มีปริมาตรต่างๆ กันแต่ไม่เกิน 20 ลิตรในภาชนะบรรจุแบบทรงกลม, ทรงกระบอก หรือแบบกล่อง ทั้งยังใช้หัววัดเป็นแบบ NaI(Tl) ขนาดต่างๆ นอกจากนั้นกำหนดพลังงานเป็นดังนี้

ตารางที่ 3.1 ระดับพลังงานและต้นกำเนิดที่กำหนดในการคำนวณ

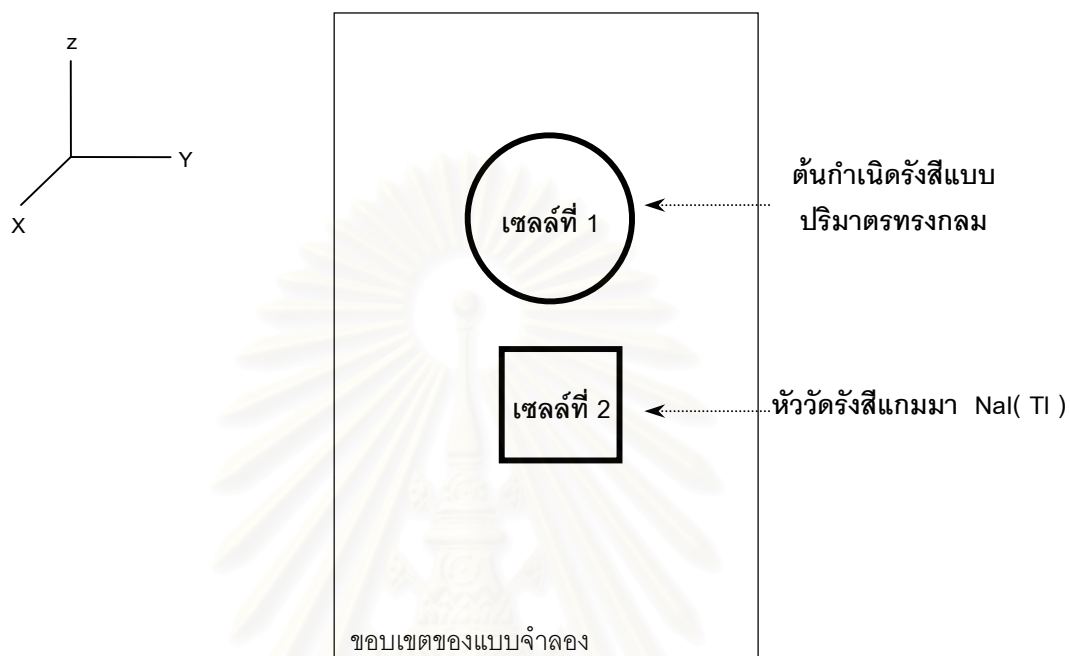
พลังงาน (Energy MeV)	ไอโซโทปรังสี
0.1861	Ra - 226 U - 238 Series
0.3519	Pb - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
0.511	Annihilation Radiation
0.6093	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
0.6617	Cs -137 Fission Product
0.969	Ac - 228 Th - 232 Series
1.1203	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series

ตารางที่ 3.1 ระดับพลังงานและต้นกำเนิดที่กำหนดในการคำนวณ(ต่อ)

พลังงาน (Energy MeV)	ไอโซโทปรังสี
1.1732	Co - 60
1.2745	Na - 22
1.3325	Co - 60
1.4608	K - 40
1.6207	Bi - 212 Th - 232 Series
1.7645	Bi -214 U - 238 (Ra - 226) Series
2.6144	Tl - 204 Th - 232 Series

3.2.2 เงื่อนไข รูปแบบการจัดวางในการสร้างแบบจำลองและการคำนวณ นั้นมีขอบเขตของการคำนวณซึ่งจะถูกกำหนดภายใต้เงื่อนไขของ MCNP-4A เองให้เป็นรูปกล่อง มีขนาด 60 ซม. X 60 ซม. X 80 ซม. ซึ่งขนาดขอบเขตนี้จะขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานที่กำหนดให้มีขนาดเป็นเช่นไร ให้ครอบคลุมระบบของแบบจำลองทั้งหมด หากกำหนดขนาดใหญ่เกินไปก็จะใช้เวลาในการคำนวณมากขึ้น และหากเล็กเกินไปขอบเขตอาจจะไม่ครอบคลุมระบบแบบจำลอง ตามต้องการ เพราะฉะนั้นควรจะกำหนดขอบเขตให้เหมาะสมกับขนาดของแบบจำลอง นอกจากนั้นรูปแบบการจัดวางและระบบวัดนั้นสามารถแสดงให้ได้ดังนี้

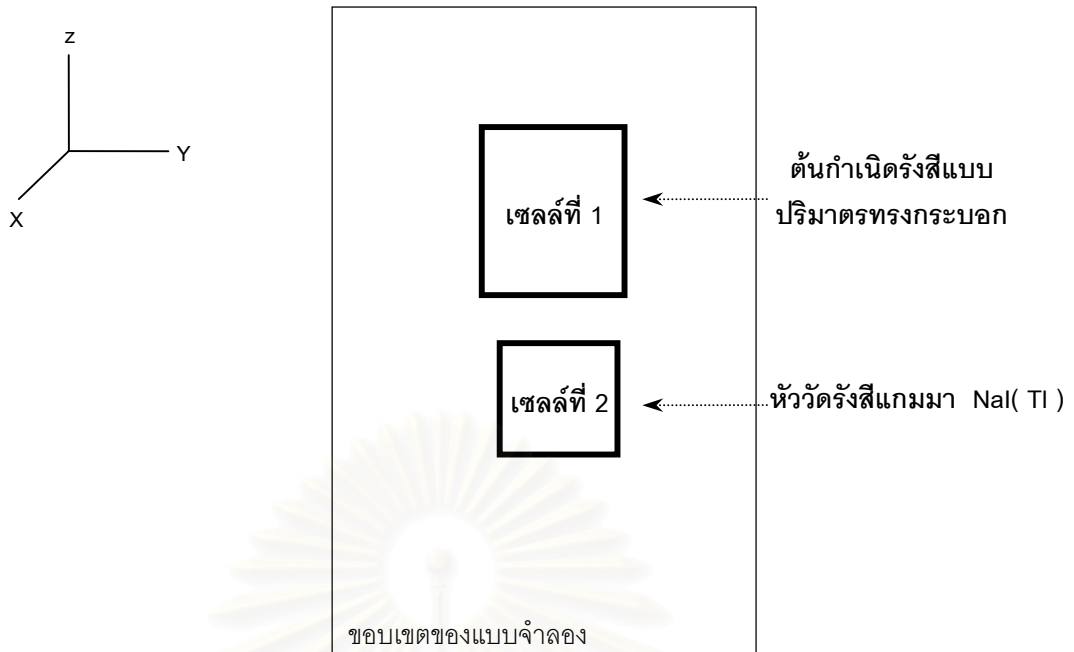
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



พิจารณา ระนาบ YZ

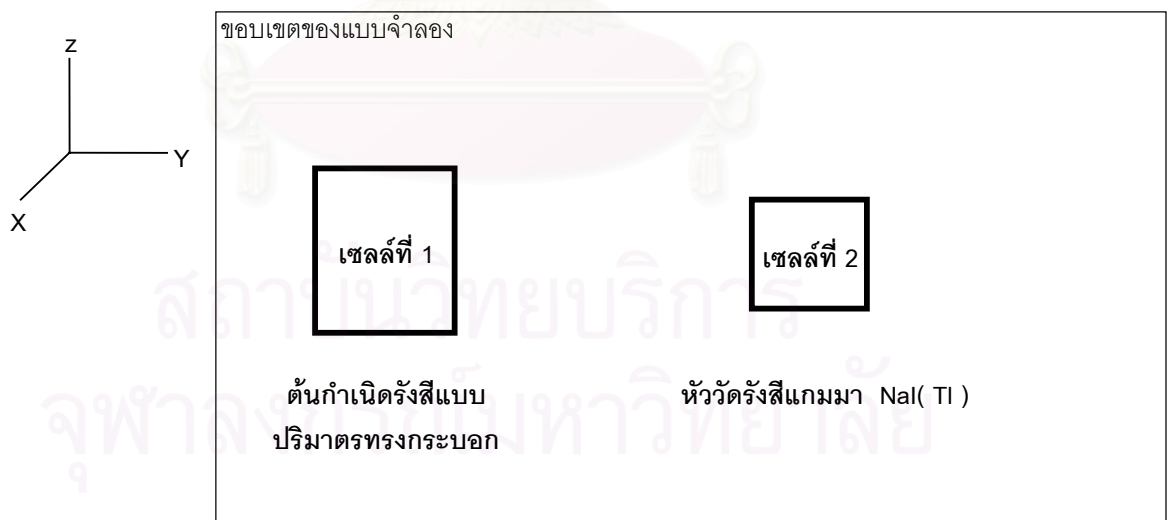
รูปที่ 3.1 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกลมที่สร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



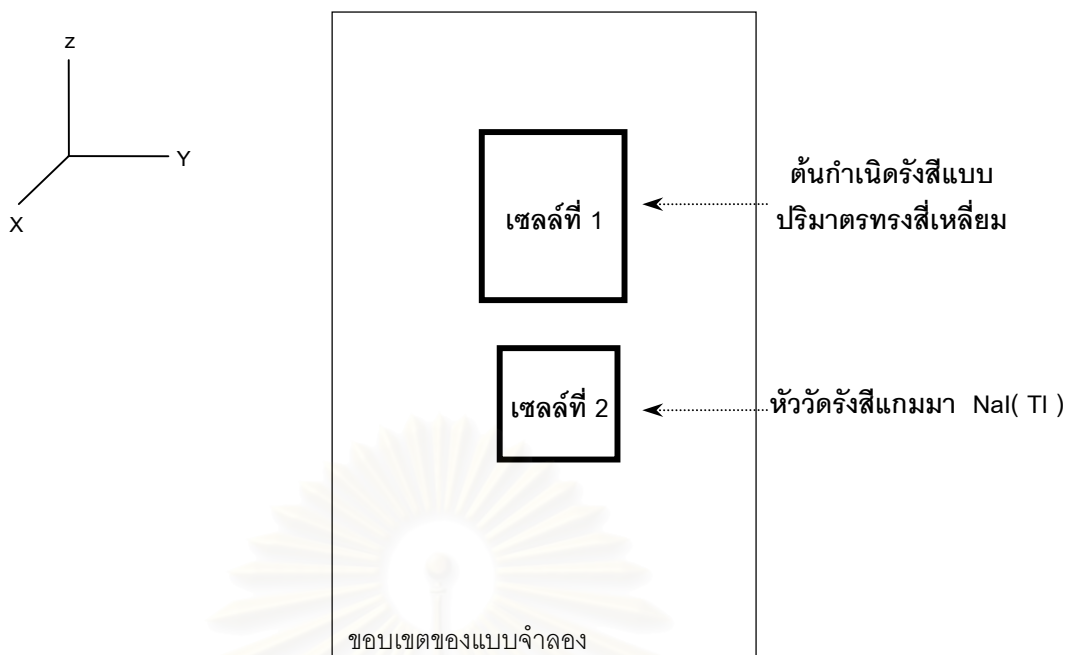
พิจารณา ระนาบ YZ

รูปที่ 3.2 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกระบอกแบบที่ 1 ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A



พิจารณา ระนาบ YZ

รูปที่ 3.3 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกระบอกแบบที่ 2 ซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A



พิจารณา ระนาบ YZ

รูปที่ 3.4 รูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงสี่เหลี่ยมซึ่งสร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A

3.2.3 การสร้างแบบจำลอง ของระบบวัดรังสีแกมมา จากต้นกำเนิดรังสีแบบจุดและแบบมีปริมาตร จากแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า(Input File) ใน MCNP-4A มีข้อกำหนดค่าคงที่และหน่วยต่างๆดังนี้

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

การใช้งาน MCNP-4A จะต้องมี แฟ้มข้อมูลป้อนเข้า (Input File) เพื่อกำหนด เงื่อนไข และ ลักษณะต่างๆ ของแบบจำลองตามต้องการ โดยโครงสร้างของแฟ้มข้อมูลป้อนเข้านี้เป็นแฟ้มข้อมูลแบบอักขระ(Text File) ซึ่งข้อความในหนึ่งบรรทัดจะบรรจุตัวอักษรได้ 80 ตัว แต่ละ บรรทัดจะบรรจุคำสั่ง และค่าพารามิเตอร์ต่างกันไปเพื่อสร้างแบบจำลองให้ได้ตามเงื่อนไขและ ลักษณะตามต้องการ ดังตัวอย่างต่อไปนี้

C Cell Cards

```
1 1 -1.600 -1 IMP:P=1
2 2 -2.699 -2 #1 IMP:P=1
3 3 -3.670 -9 11 -12 IMP:P=1
4 0      3 -4 5 -6 7 -8 #1 #2 #3 IMP:P=1
5 0      #1 #2 #3 #4 IMP:P=0
```

C Surface Cards

```
1 SO 20
2 SO 21
3 PZ -30
4 PZ 30
5 PY -30
6 PY 50
7 PX -30
8 PX 30
9 CZ 2.54
11 PZ 21
12 PZ 26.08
```

C Data Cards

C Source Specification Cards

MODE P

SDEF ERG=0.1861 PAR=2 CEL=1 RAD=D1

SI1 0 20

SP1 -21 2

PHYS:P 2 0 0

C Tally Specification card

F8:P 3

E8 0 0.1860 0.1862

C Materials Specification Cards

M1 13000 -0.071 26000 -0.032 14000 -0.316 6000 -0.012 1000 -0.011 8000 -0.558

M2 13000 -1

M3 11000 0.4995 53000 0.4995 81000 0.001

C Problem Cut off

NPS 3000000

PRINT

เพิ่มข้อมูลป้อนเข้าข้างต้นนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

- ส่วนที่เป็นคำสั่งนิยามเซลล์ (Cell Card) ในส่วนแรกนี้จะเป็น การกำหนดเซลล์ซึ่งแต่ละบรรทัดจะใช้นิยามแต่ละเซลล์ตามหมายเลขที่กำกับอยู่ ในคอลัมน์แรก ของบรรทัด ซึ่งเซลล์นั้นหมายถึงปริมาตรที่ห่อหุ้มด้วยพื้นผิวปิดใดๆ ข้อมูล ตัวเลขในหลักถัดมาคือ หมายเลขของวัสดุตรงกับค่าในคอลัมน์แรกของบรรทัดที่ใช้นิยามวัสดุข้อมูลตัวเลขหลักที่สาม ซึ่ง ถ้าค่าดังกล่าวเป็นบวกจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงอะตอมในหน่วยอะตอมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าที่เป็นลบจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงมวลในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชุดตัว เลขที่ถัดจากค่าความหนาแน่นของวัสดุคือ พื้นผิวที่ประกอบกันขึ้นเป็นเซลล์ จะมีค่าได้ทั้งบวก และลบ ซึ่งหมายถึงการเลือกใช้ด้านที่เป็นบวกหรือลบของพื้นผิวหนึ่ง ๆ เพื่อนำมาประกอบเป็น เซลล์ ด้วยการใช้ตัวปฏิบัติการของเซตได้แก่ อินเตอร์เซกชัน ซึ่งใช้การเว้นวรรค() ยูเนียนซึ่งใช้ เครื่องหมายมหัพภาคคู่(:) และคอมพลีเมนต์ใช้ชาร์ป (#) ตัวอย่างของพารามิเตอร์ที่ใช้นิยาม เซลล์เป็นดังนี้

C Cell Cards

1 1 -1.600 -1 IMP:P=1

2 2 -2.699 -2 #1 IMP:P=1

3 3 -3.670 -9 11 -12 IMP:P=1

4 0 3 -4 5 -6 7 -8 #1 #2 #3 IMP:P=1

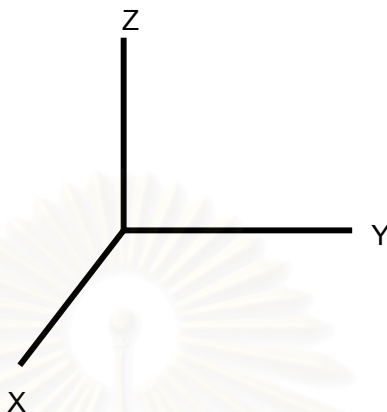
5 0 #1 #2 #3 #4 IMP:P=0

- คำสั่งนิยามพื้นผิว (Surface Cards) ในส่วนที่สองจะเป็นการกำหนดพื้นผิวของของเซลล์เพื่อประกอบกันเป็นส่วนต่างของเซลล์ MCNP-4A นั้นได้นิยามพื้นผิวของเซลล์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และใช้คำสั่งย่อในการกำหนดชนิดและพารามิเตอร์ต่างๆของพื้นผิว ดังนี้

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในคำสั่งนิยามพื้นผิว

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

โดยกำหนดแกนในระบบแกนพิกัดฉาก X Y Z ดังนี้



รูปที่ 3.5 ระบบแกนพิกัดฉาก X Y Z ที่กำหนดในการสร้างแบบจำลองของ MCNP-4A

การกำหนดค่าให้พารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนิยามพื้นผิวนั้น ในคอลัมน์แรกของบรรทัด จะเป็นการกำหนดลำดับของพื้นผิวเพื่อใช้อ้างอิงในการนิยามเซลล์ ส่วนในคอลัมน์ที่สองของแต่ละบรรทัดจะเป็นคำสั่งอย่างย่อ ของสมการทางคณิตศาสตร์ ส่วนคอลัมน์ ที่ถัดจากคอลัมน์ที่สองนั้นเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับสมการ และตัวอย่างของคำสั่งนิยามพื้นผิวนั้นสามารถแสดงได้ดังนี้

C Surface Cards

- 1 SO 20
- 2 SO 21
- 3 PZ -30
- 4 PZ 30
- 5 PY -30
- 6 PY 50
- 7 PX -30
- 8 PX 30
- 9 CZ 2.54

11 PZ 21

12 PZ 26.08

ในพื้นที่ผิวที่ 1 เป็น พื้นผิวทรงกลมจุดศูนย์กลางอยู่ที่พิกัด $X = 0$
 $Y = 0$ $Z = 0$ (0 , 0 , 0) ซึ่งมีรัศมี 20 เซนติเมตร ส่วนในพื้นที่ 5 เป็นระนาบขนาน ระนาบ XZ
 ตัดแกน Y ที่จุด $Y = -30$

- คำสั่งกำหนดข้อมูลหลัก แบ่งเป็นส่วนย่อย ได้ 4 ส่วน ดังนี้

- คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี Source Specification Cards

คำสั่งนี้ใช้กำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของต้นกำเนิดรังสี เช่น ค่าพลังงาน วิธีการสุ่มตัวอย่าง รวมทั้งกำหนดเงื่อนไขในการปรับแก้ค่าการสุ่มตัวอย่างตามที่ผู้ใช้กำหนด โดยผู้ใช้กำหนด เงื่อนไขการทำงานในตอนต้นว่าให้ทำการคำนวณด้วยวิธีการใดโดยใช้คำสั่ง MODE และ ตามด้วยอักษรต่างๆ เป็น P เมื่อต้องการคำนวณอนุภาคโฟตอน (Photon) N (Neutron) แทนอนุภาคนิวตรอน และ B (Beta) แทนอนุภาคบีตา

คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี ใช้ SDEF ค่าพลังงานกำหนด

โดยคำสั่ง ERG ชนิดของอนุภาคกำหนดโดยคำสั่ง PAR โดยที่ 1 คือ นิวตรอน N (Neutron) 2 คือ โฟตอน (Photon) 3 คือ บีตา (Beta) และ กำหนดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาตรด้วยคำสั่ง Cell และตามด้วยเลขที่ต้องการซึ่งตัวเลขดังกล่าวนี้ถูกกำหนดขึ้นในคำสั่งนิยามเซลล์ นอกจากนั้นจะทำการกำหนดการกระจายตำแหน่งของการสุ่มตัวอย่างซึ่งการแจกแจงการกระจายการสุ่มตัวอย่างนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของต้นกำเนิดรังสี ถ้าเป็นทรงกลมให้ใช้การกระจายแบบกฎเลขยกกำลัง (Power Law) ในแนวรัศมีโดยจะใช้สมการการกระจายเป็น $P(x) = C[X]^2$ ส่วนทรงกระบอกนั้นก็ใช้การกระจายแบบกฎเลขยกกำลังในแนวรัศมีเช่นกันแต่จะใช้สมการการกระจายเป็น $P(x) = C[X]^1$ นอกจากนั้นสำหรับทรงกระบอกยังต้องกำหนดการกระจายการสุ่มในแนวแกนความสูงอีกด้วยแต่ส่วนการกระจายในแนวความสูงนั้นกำหนดให้เท่ากันทุกๆ จุด เพื่อทำให้เกิดการสุ่มตัวอย่างแบบเท่าเทียมกันทั่วทั้งปริมาตรโดยอนุภาครังสีจะสุ่มตัวอย่างทิศทางการเคลื่อนที่แบบไอโซโทปิกตัวอย่างของคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสีสามารถแสดงให้เห็นดังนี้

C Source Specification Cards

MODE P

SDEF ERG=0.1861 PAR=2 CEL=1 RAD=D1

SI1 0 20

SP1 -21 2

PHYS:P 2 0 0

จากตัวอย่างข้างต้นสามารถอธิบายได้ว่าต้นกำเนิดรังสีเป็นต้นกำเนิดโฟตอน พลังงาน 0.1861 MeV อยู่ตำแหน่ง เซลล์ที่ 3 มีการกระจายการสุ่มตามรัศมี 20 cm มีการกระจายการสุ่มอนุภาคตามแนวรัศมีในรูปของการกระจายแบบกฎเลขยกกำลัง

-คำสั่งนิยามตัวประมาณค่า ในส่วนนี้จะใช้ในการคำนวณและบันทึกอนุภาคที่สนใจและอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่างที่ต้องการซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการบันทึกได้ดังนี้

1. ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว

(Surface Estimator: F1, F2 Tallies)

2. ตัวประกอบค่าตามเหตุการณ์

(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)

ส่วนในการคำนวณที่เลือกใช้ในแบบจำลองนี้เน้นใช้การบันทึกของ MCNP-4A เป็นแบบ F8 Tally หรือ การบันทึกค่าแบบการแจกแจงพลังงานภายในหัววัดรังสีซึ่งสามารถแสดงตัวอย่างให้เห็นดังนี้

C Tally Specification card

F8:P 3

E8 0 0.1860 0.1862

จากตัวอย่างข้างต้นใช้การบันทึกแบบการแจกแจงพลังงานระหว่าง 0 ถึง 0.1860 และ 0.1860 ถึง 0.1862 จากกำหนดช่วงการแจกแจงพลังงานดังกล่าวนี้จะครอบคลุม พลังงานที่ต้องการพอดี และ ทำการบันทึกอนุภาคฟิสิกส์ที่เกิดอันตรกิริยาขึ้นในเซลล์ที่ 3 ซึ่งจากตัวอย่างนี้เซลล์ที่ 3 นี้เป็นหัววัดรังสี

- คำสั่งนิยามชนิดของวัสดุ (Materials Specification Cards) ซึ่งภายในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองนี้ได้กำหนดชนิดของธาตุนั้นๆ ให้อยู่ในเลข 5 หลัก 2 หลักแรกแทนเลขอะตอม (Z) และ 3 หลักหลังจะเป็นเลขมวล (A) แต่ถ้ากำหนด เป็น 000 นั้นจะกำหนดให้เป็นเลขมวลรวมในธรรมชาติซึ่งเป็นค่ามาตรฐานอยู่แล้ว ส่วนการกำหนดสัดส่วนของสารประกอบหรือของผสมนั้นสามารถกำหนดได้ ทั้งสัดส่วนของอะตอมจะกำหนดเป็นเลขค่าบวก และสัดส่วนของน้ำหนักจะเป็นเลขค่าลบ สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังนี้

C Materials Specification Cards

M1 13000 -0.071 26000 -0.032 14000 -0.316 06000 -0.012 1000 -0.011 8000 -0.558

M2 13000 -1

M3 11000 0.4995 53000 0.4995 81000 0.001

จากตัวอย่างข้างต้น มีวัสดุ 3 ชนิด ชนิดแรก เป็นดิน มีองค์ประกอบของ Al 7.1% Fe 3.2% Si 31.6% C 1.2% H 1.1% และ O 55.8 % วัสดุที่ 2 เป็น Al วัสดุที่ 3 คือ NaI(Tl)

- คำสั่งนิยามหยุดการทำงาน (Problem Cut off) เป็นคำสั่งที่ใช้ในการหยุดการคำนวณโดยกำหนดเงื่อนไขการหยุดการคำนวณไม่ว่าจะเป็นหยุดเมื่ออนุภาคที่สุ่มออกมาได้ตามจำนวนต้องการหรือ กำหนดเป็นเวลาก็ได้

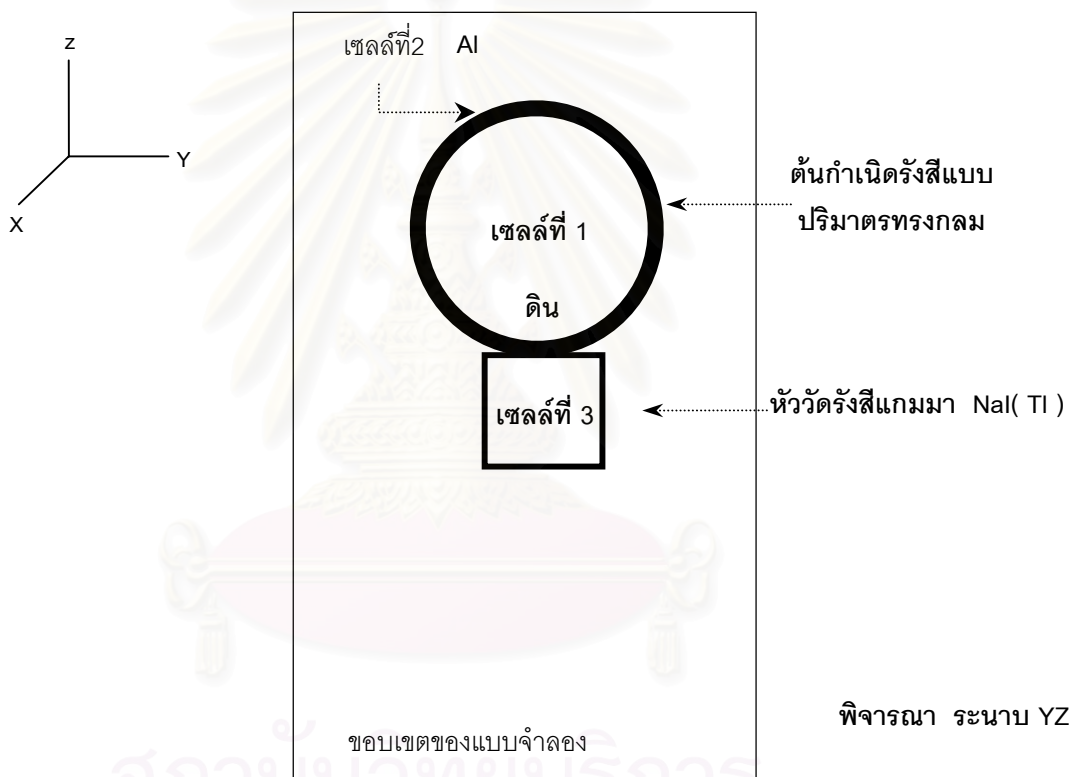
C Problem Cut off

NPS 3000000

PRINT

จากตัวอย่างข้างต้นกำหนดเป็นจำนวนอนุภาคที่สุ่มออกมา และจะหยุดการทำงานเมื่ออนุภาคที่สุ่มออกมามีจำนวนทั้งสิ้น 3,000,000 อนุภาค

จากข้อมูลทั้งหมดนี้แบบจำลองที่ถูกที่ถูกสร้างขึ้นมีรูปร่างดังนี้



รูปที่ 3.6 ภาพแสดงรูปแบบการจัดวางระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกลมที่สร้างโดยแบบจำลองการวัดด้วย MCNP-4A

3.3 การทดลองเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A

การทดลองเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมานั้น จะทำการทดลองเพื่อ เปรียบเทียบความถูกต้องและแม่นยำของการคำนวณด้วย MCNP-4A โดยการทดลองนั้นจะ

ทำการกำหนดเงื่อนไข และ รูปแบบการจัดวาง ตามต้องการแล้วคำนวณหาประสิทธิภาพของการทดลองของแต่ละระบบ เมื่อได้ประสิทธิภาพแล้ว ก็นำเงื่อนไข ของแต่ละระบบวัดรังสีนั้น ไปทำการสร้างแบบจำลอง และ การคำนวณเพื่อหาประสิทธิภาพของระบบวัดดังกล่าว

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- ภาชนะบรรจุ ต้นกำเนิดรังสี และ ต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาณ ต้นกำเนิดรังสีแบบจุด ใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบ มาตรฐาน Cs-137, Co-60 และ Na -22 ใช้สารเคมี KCl และ $K_2Cr_2O_7$ เพื่อทำการวัดรังสี จาก K-40 และ สารยูเรเนียม (U) ทอเรียม (Th) มาตรฐาน

- ระบบวัดรังสีแกมมา

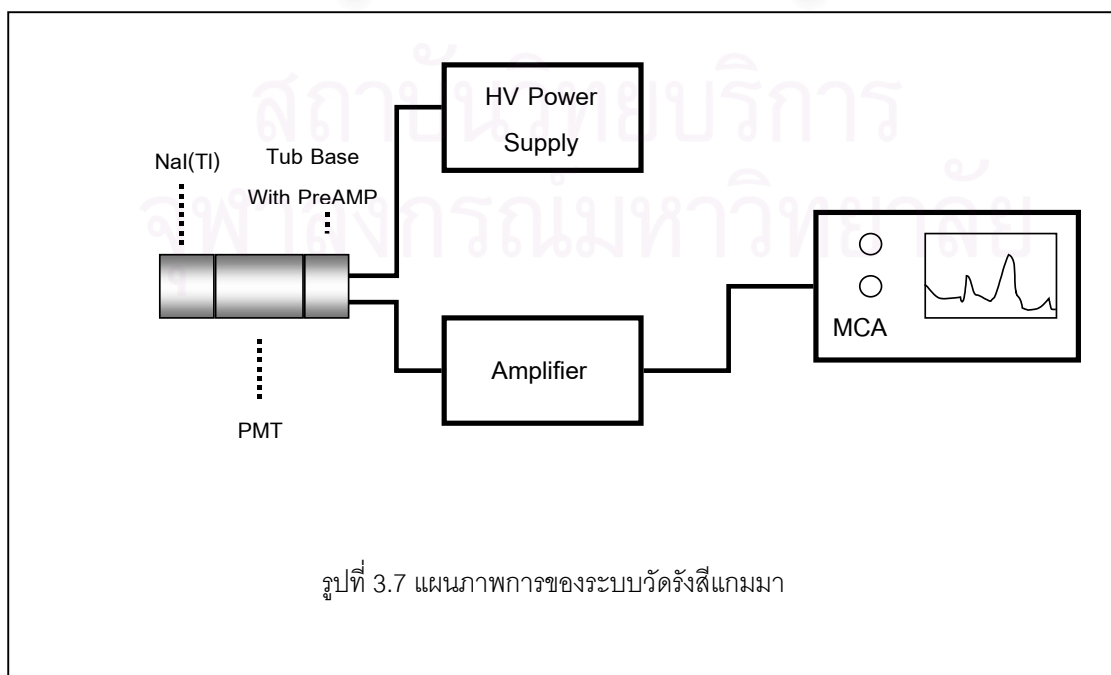
หัววัดรังสีแบบ NaI(Tl)

NIM (Nuclear Instrument Module)

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบ หลายช่อง (MCA)

หลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์พร้อม ปรีแอมป์

สายนำสัญญาณ พร้อมสายไฟ



รูปที่ 3.7 แผนภาพการของระบบวัดรังสีแกมมา

3.3.2 ขั้นตอนการคำนวณการหาประสิทธิภาพสัมบูรณ์ (Absolute Efficiency) ของระบบวัดของระบบวัดรังสีแกมมา

ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ (Absolute Efficiency) ของระบบวัดรังสีแกมมาสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง

$$\text{ประสิทธิภาพสัมบูรณ์} = \frac{\text{จำนวนนับวัดรังสีที่เข้าสู่หัววัด}}{\text{จำนวนอนุภาคที่ปลดปล่อยออกจากต้นกำเนิดรังสี}}$$

ส่วนขั้นตอนทำการวัดรังสีก็เพื่อหาจำนวนนับวัดรังสีที่เข้าสู่หัววัดนั้น สามารถหาได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณหลายช่อง (MCA) ทำการวิเคราะห์ และใช้หัววัดรังสี NaI(Tl) วัดรังสีจากต้นกำเนิดรังสีแบบต่างๆ และเงื่อนไขการจัดวางต่าง เพื่อให้ได้จำนวนนับของแต่ละช่วงพลังงานที่ต้องการ และทำการคำนวณจำนวนอนุภาคที่ปลดปล่อยออกจากต้นกำเนิดรังสี จากต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน และคำนวณ ความแรงรังสีของยูเรเนียม (U) ทอเลียม(Th) มาตรฐาน K-40 จาก KCl และ $K_2Cr_2O_7$ ที่เตรียมไว้ในภาชนะที่บรรจุ

3.4 การคำนวณด้วยวิธีอื่นๆเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A

ในการตรวจสอบผลที่ได้กับการคำนวณจะทำการตรวจสอบจากแบบจำลองที่จำลองภายใต้เงื่อนไขของต้นกำเนิดรังสีแบบจุดและแบบเส้นโดยอาศัยสมการ

ต้นกำเนิดรังสีแบบจุด

$$\Phi(r) = \frac{S}{4\pi r^2}$$

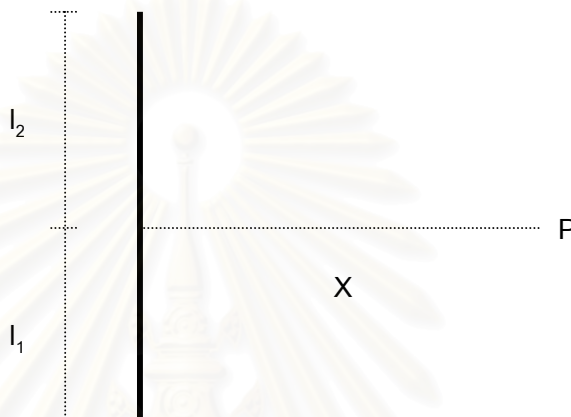
เมื่อ $\Phi(r)$ คือ ฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่ระยะ r

r คือ ระยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงตำแหน่งที่ต้องการหาฟลักซ์

S คือ ความแรงรังสี

ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้น

$$\Phi(P) = \frac{S}{4\pi X} \left[\tan^{-1} \left(\frac{l_2}{X} \right) + \tan^{-1} \left(\frac{l_1}{X} \right) \right]$$



ภาพที่ 3.8 ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้นและเงื่อนไขการคำนวณ

เมื่อ $\Phi(P)$ คือ ฟลักซ์ของรังสีแกมมาที่ตำแหน่ง P

S คือ ความแรงรังสี

X คือ ระยะจากต้นกำเนิดรังสีถึงตำแหน่ง P

3.5 โปรแกรมสำหรับเขียนเพิ่มข้อมูลป้อนเข้า (Input File) ใน MCNP-4A เพื่อการคำนวณประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบมีปริมาตร

เป็นโปรแกรมในการเขียนเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับใช้ MCNP-4A ในการคำนวณประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบมีปริมาตร ในการออกแบบโปรแกรมนั้นได้ใช้ VB Script ในการเขียนโปรแกรมและให้โปรแกรมหาดังกล่าวนี้ใช้งานบน Microsoft Internet Explorer เพื่อความสะดวกในการติดตั้งและปฏิบัติงาน

โปรแกรมดังกล่าว ประกอบด้วย 4 โปรแกรมย่อย ซึ่งแบ่งตามลักษณะของต้นกำเนิดรังสีและรูปแบบการจัดวางได้ดังนี้

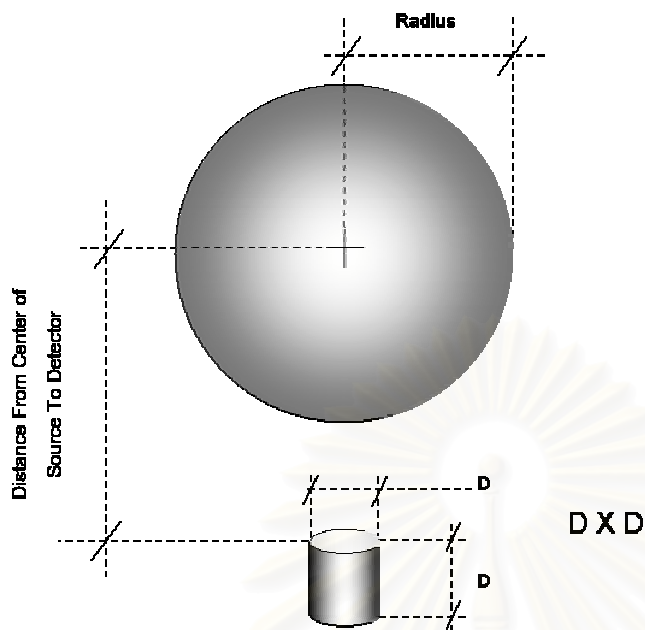
- ต้นกำเนิดรังสีทรงกลม ชื่อโปรแกรม Sphere.html
- ต้นกำเนิดรังสีทรงกระบอกวางขนานกับหัววัดรังสี ชื่อโปรแกรม Cylinder1.html
- ต้นกำเนิดทรงรังสีกระบอกวางตั้งฉากกับหัววัดรังสี ชื่อโปรแกรม Cylinder2.html
- ต้นกำเนิดทรงรังสีแบบกล่อง ชื่อโปรแกรม Box.html

เมื่อเลือกรูปแบบที่ต้องการได้แล้ว ก็ใช้ Microsoft Internet Explorer เปิดโปรแกรมนั้นๆ ตามต้องการซึ่งสามารถแสดงผลได้ดังนี้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ต้นกำเนิดรังสีทรงกลม ชื่อโปรแกรม Sphere.html



Soil Source Material

Radius (cm.)

Aluminium Claddings Material

Thickness of Claddings (cm.)

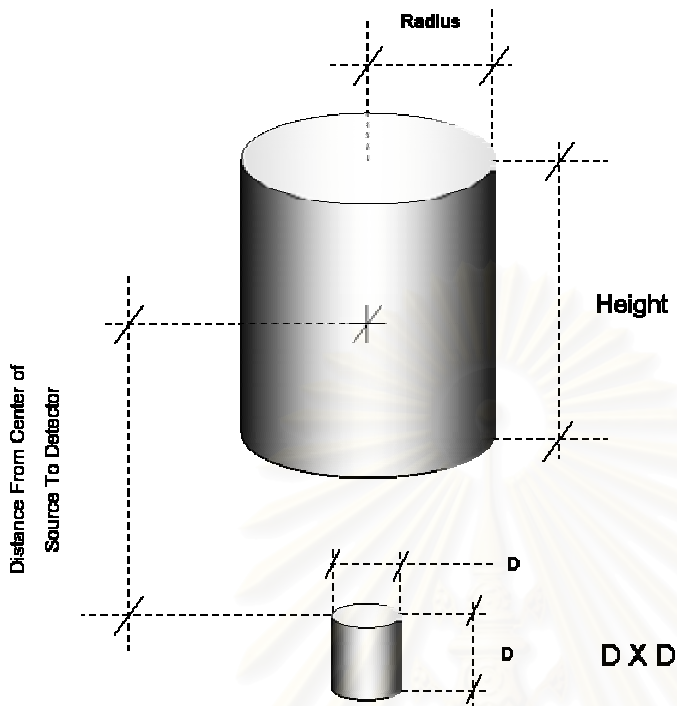
Energy (MeV)

Distance from Center of Source to Detector (cm.)

1" x 1" Detector Size

Particles Sample

Cylinder1.html



Soil Source Material

Radius (cm.)

Height (cm.)

Aluminium Cladding Material

Thickness of Cladding (cm.)

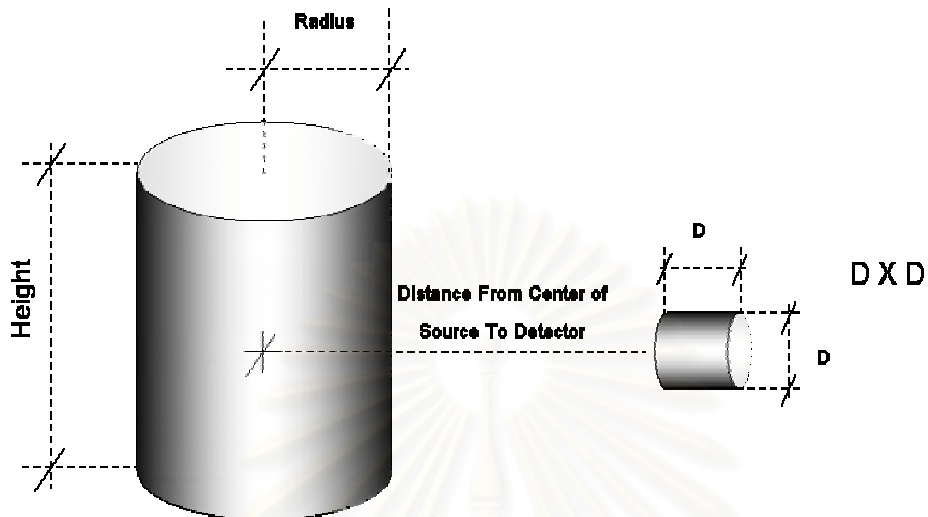
Energy(MeV)

Distance from Center of Source to Detector (cm.)

1" x 1" Detector Size

Particles Sample

ต้นกำเนิดทรงรังสีกระบอวางตั้งฉากกับหัววัดรังสีซีไอโปรแกรม Cylinder2.html



Soil Source Material

Radius (cm.)

Highs (cm.)

Aluminium Cladding Material

Thickness of Cladding (cm.)

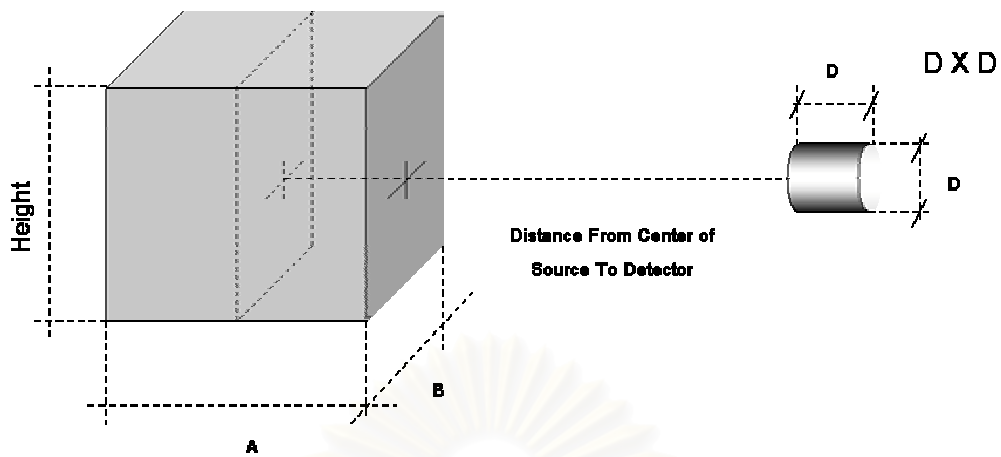
Energy (MeV)

Distance from Center of Source to Detector (cm.)

1" x 1" Detector Size

Particles Sample

ต้นกำเนิดทรงรังสีแบบกล่อง ชื่อโปรแกรม Box.html



Soil Source Material

A (cm.)

B (cm.)

Height (cm.)

Aluminium Cladding Material

Thickness of Cladding (cm.)

Energy (MeV)

Distance from Center of Source to Detector (cm.)

1" x 1" Detector Size

Particle Sample

เมื่อทำการป้อนค่าเงื่อนไขต่างๆที่ต้องการลงในโปรแกรมแล้วก็ทำการบันทึก (Save) ลงในชื่อแฟ้มข้อมูล (File) ที่ต้องการให้อยู่ในรูปของแฟ้มข้อมูลแบบ ANSI ซึ่งชื่อแฟ้มข้อมูล (File) ดังกล่าวนี้อาจจะเป็นแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าที่ใช้ใน MCNP-4A เพื่อทำการคำนวณประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบมีปริมาตร



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการจำลอง และ ผลการทดลองเปรียบเทียบ

4.1 ผลการคำนวณประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อต้นกำเนิดรังสีเป็นแบบมีปริมาตร

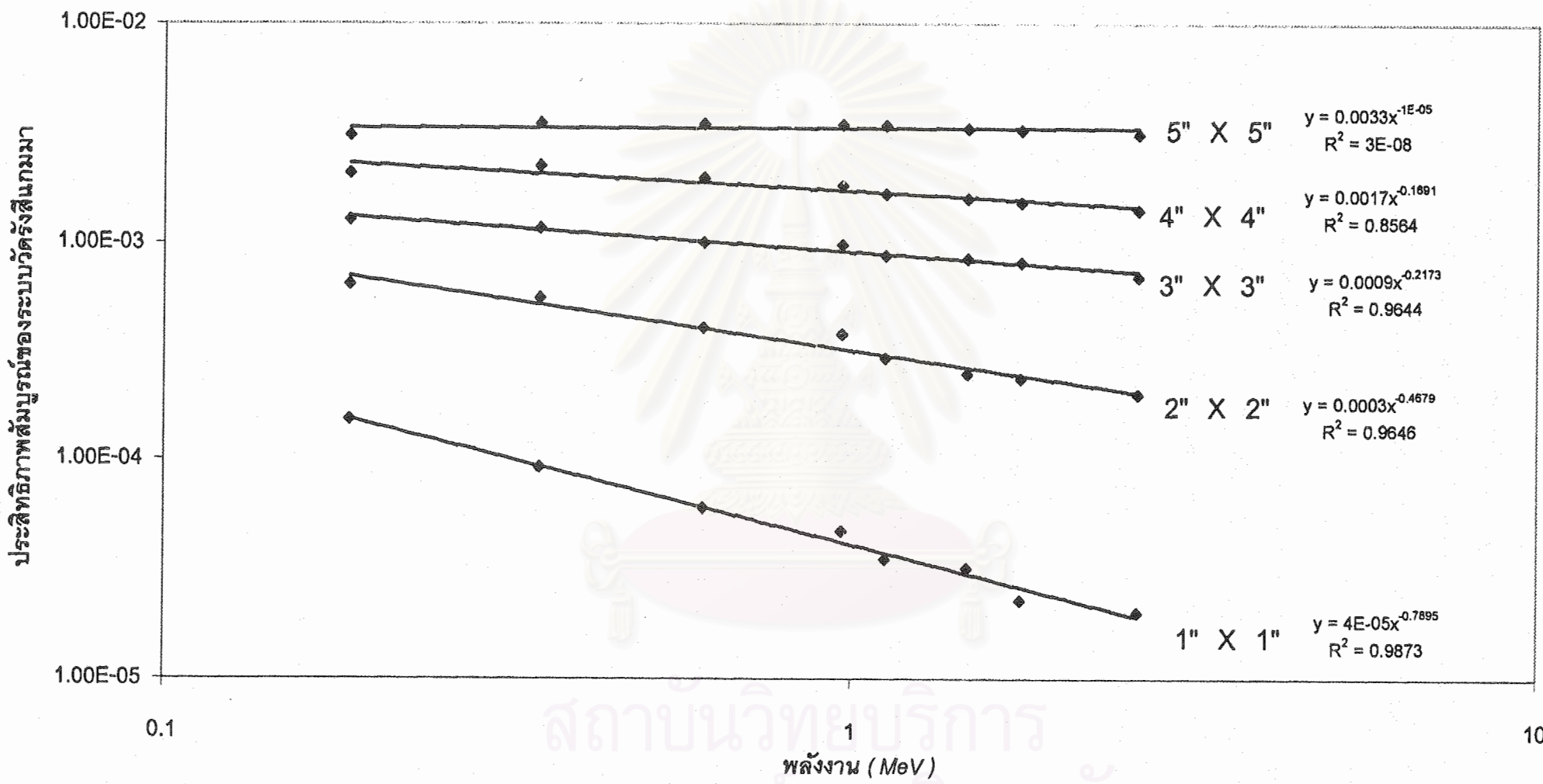
ได้คำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F8 Tally) จากเพิ่มข้อมูลป้อนเข้า ของ MCNP-4A และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงของพลังงาน ขนาดของหัววัด และรูปแบบของต้นกำเนิดรังสีแบบต่างๆ

4.1.1 ผลการคำนวณประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อต้นกำเนิดรังสีเป็นแบบมีปริมาตรทรงกลม

ผลการคำนวณของแบบจำลองของระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อต้นกำเนิดรังสีเป็นทรงกลมนั้นได้กำหนดพลังงานที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.1 ระดับพลังงาน และ ชนิดของไอโซโทปที่ใช้ในการคำนวณต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกลม

พลังงาน (Energy MeV)	ชนิดของไอโซโทป
0.3519	Pb - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
0.6093	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
0.969	Ac - 228 Th - 232 Series
1.1203	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
1.4608	K - 40 Natural K
1.6207	Bi - 212 Th - 232 Series
1.7645	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
2.6144	Tl - 204 Th - 232 Series



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบกับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบทรงกลม

และให้ต้นกำเนิดรังสีเป็นทรงกลมขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 40 เซนติเมตร ในภาชนะอะลูมิเนียมหนา 1 เซนติเมตรภายในต้นกำเนิดรังสีดังกล่าวนี้บรรจุไว้ด้วยดิน และใช้หัววัดขนาด 1" X 1", 2" X 2", 3" X 3", 4" X 4" และ 5" X 5" ทำการวัดโดยให้หัววัดวางติดกับต้นกำเนิดรังสีทรงกลม

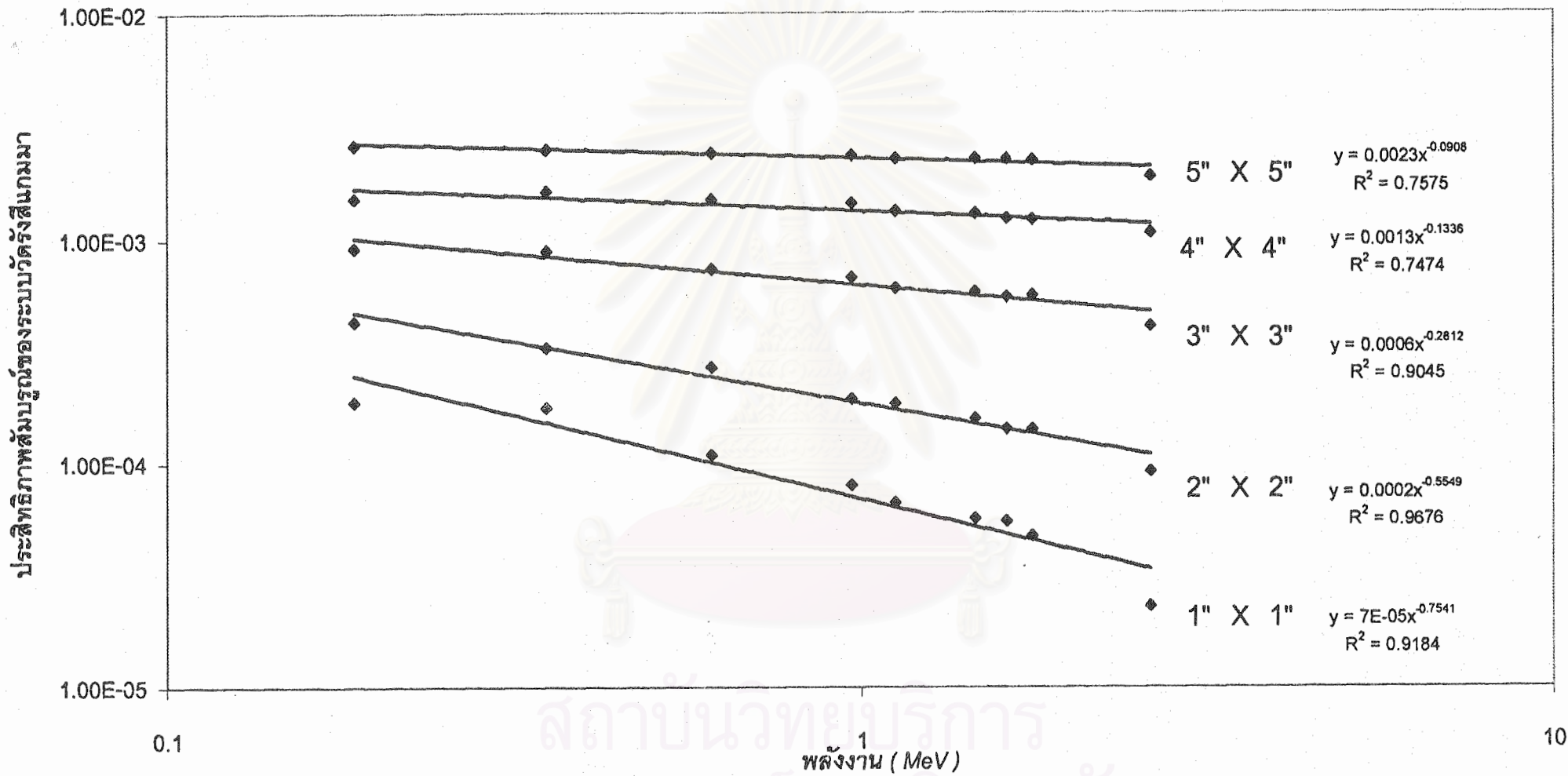
ผลการจำลองโดยคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F8 Tally) แสดงให้เห็นว่าเมื่อหัววัดมีขนาดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาก็ดีขึ้น และเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาประสิทธิภาพก็ลดลงซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ต่างๆได้จากรูปที่ 4.1

4.1.1 ผลการคำนวณประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อต้นกำเนิดรังสีเป็นแบบมีปริมาตรทรงกระบอก

ผลการคำนวณของแบบจำลองของระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อต้นกำเนิดรังสีเป็นทรงกระบอกนั้นได้กำหนดพลังงานที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.2 ระดับพลังงาน และ ชนิดของไอโซโทปที่ใช้ในการคำนวณต้นกำเนิดรังสีแบบทรงกระบอก

พลังงาน (Energy MeV)	ชนิดของไอโซโทป
0.3519	Pb - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
0.6093	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
0.969	Ac - 228 Th - 232 Series
1.1203	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
1.4608	K - 40 K - 40 Natural K
1.6207	Bi - 212 Th - 232 Series
1.7645	Bi - 214 U - 238 (Ra - 226) Series
2.6144	Tl - 204 Th - 232 Series



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบกับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบทรงกระบอก

ให้ต้นกำเนิดรังสีเป็นทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 40 เซนติเมตรสูง 40 เซนติเมตร ในภาชนะอะลูมิเนียมหนา 1 เซนติเมตรภายในต้นกำเนิดรังสีดังกล่าวนี้บรรจุไว้ด้วยดิน ในการกำหนดขนาดของต้นกำเนิดรังสีให้มีขนาดดังกล่าวก็เพื่อต้องการลดเงื่อนไขด้านการจัดวางของระบบวัดให้มีเงื่อนไขเหมือนกัน และกำหนดให้ใช้หัววัดขนาด 1" X 1", 2" X 2", 3" X 3", 4" X 4" และ 5" X 5" ทำการวัดโดยให้หัววัดวางติดกับต้นกำเนิดรังสีทรงกระบอกในแนวตั้งฉากกับความสูงของทรงกระบอก

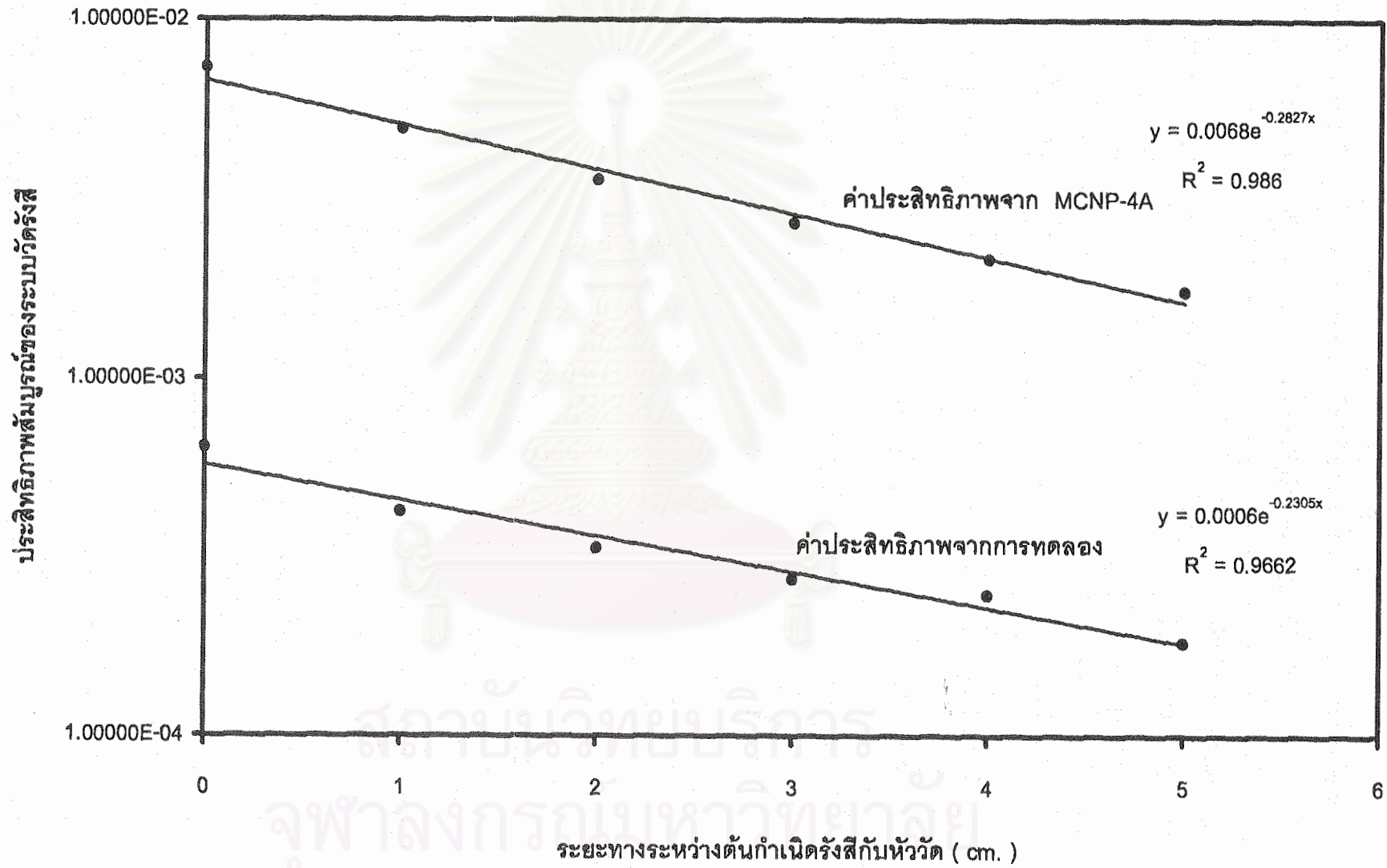
ผลการจำลองโดยคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F8 Tally) แสดงให้เห็นว่าเมื่อหัววัดมีขนาดใหญ่ขึ้นประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาก็ดีขึ้น และเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้นประสิทธิภาพก็ลดลงเหมือนกับต้นกำเนิดรังสีทรงกลมแต่ค่าที่ได้นั้นมีความแตกต่างกันจากผลของจากการดูดกลืนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีเองซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ต่างๆได้จากรูปที่ 4.2

4.2 ผลการทดลองเปรียบเทียบกับแบบจำลองระบบวัดรังสีแกมมา

4.2.1 ผลการทดลองของระบบวัดรังสีเมื่อมีการกำหนดระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี แตกต่างกัน

ในการการทดลองกำหนดให้วัดค่าพลังงาน 1.4028 MeV ของ K ซึ่งได้จาก $K_2Cr_2O_7$ จำนวน 293 กรัม บรรจุในภาชนะ เหล็กกล้าไร้สนิม ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.08 เซนติเมตรสูง 5.08 เซนติเมตรหนา 0.2 เซนติเมตรวางไว้หน้าหัววัด NaI(Tl)ขนาด 2" X 2" ในแนวระดับให้ตั้งฉากกับความสูงของต้นกำเนิดรังสี ปรับระยะความห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสี และ หัววัดรังสีให้ห่างกันเป็นระยะต่างๆ กัน 6 ระยะ ได้ผลดังนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบกับระยะทาง ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาพลังงาน 1.4028 MeV

ตารางที่ 4.3 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้
ระยะระหว่างหัววัดรังสีแกมมาและต้นกำเนิดรังสีแกมมามีระยะที่แตกต่างกัน

ระยะทางระหว่างต้นกำเนิด รังสีถึงหัววัดรังสี	จำนวนนับรังสีเฉพาะช่วงพลังงาน 1.4608 MeV	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของ ระบบวัดรังสีแกมมาจากการ ทดลอง
0 เซนติเมตร	4603 (3000 วินาที)	6.373×10^{-4}
1 เซนติเมตร	3037 (3000 วินาที)	4.205×10^{-4}
2 เซนติเมตร	2414 (3000 วินาที)	3.342×10^{-4}
3 เซนติเมตร	1975 (3000 วินาที)	2.735×10^{-4}
4 เซนติเมตร	1785 (3000 วินาที)	2.471×10^{-4}
5 เซนติเมตร	1313 (3000 วินาที)	1.818×10^{-4}

และได้ทำการจำลองระบบวัดรังสีแกมมาโดยใช้เงื่อนไขจากการ
ทดลองข้างต้น และจำลองอนุภาคทั้งสิ้น 3,000,000 อนุภาค ได้ผลการจำลองดังนี้

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ระยะ
ระหว่างหัววัดรังสีแกมมาและต้นกำเนิดรังสีแกมมามีระยะที่แตกต่างกัน

ระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึง หัววัดรังสี	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาจาก แบบจำลอง
0 เซนติเมตร	7.362×10^{-3}
1 เซนติเมตร	4.986×10^{-3}
2 เซนติเมตร	3.601×10^{-3}
3 เซนติเมตร	2.745×10^{-3}

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ ระยะระหว่างหัววัดรังสีแกมมาและต้นกำเนิดรังสีแกมมามีระยะที่แตกต่างกัน(ต่อ)

ระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงหัววัดรังสี	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาจากแบบจำลอง
4 เซนติเมตร	2.175×10^{-3}
5 เซนติเมตร	1.767×10^{-3}

หากนำประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง และประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบเพื่อหาความผิดพลาดโดยกำหนดให้ค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่ถูกต้องสามารถแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลองและจากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ระยะระหว่างหัววัดรังสีแกมมาและต้นกำเนิดรังสีแกมมามีระยะที่แตกต่างกัน

ระยะทางระหว่างต้นกำเนิดรังสีถึงหัววัดรังสี	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาจากแบบจำลอง	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาจากการทดลอง	ค่าเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพทั้งสอง
0 เซนติเมตร	7.362×10^{-3}	6.373×10^{-4}	8.656%
1 เซนติเมตร	4.986×10^{-3}	4.205×10^{-4}	8.433%
2 เซนติเมตร	3.601×10^{-3}	3.342×10^{-4}	9.281%
3 เซนติเมตร	2.745×10^{-3}	2.735×10^{-4}	9.964%
4 เซนติเมตร	2.175×10^{-3}	2.471×10^{-4}	11.361%
5 เซนติเมตร	1.767×10^{-3}	1.818×10^{-4}	10.289%

จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถแสดงให้เห็นได้จากกราฟที่ 4.3 ซึ่ง

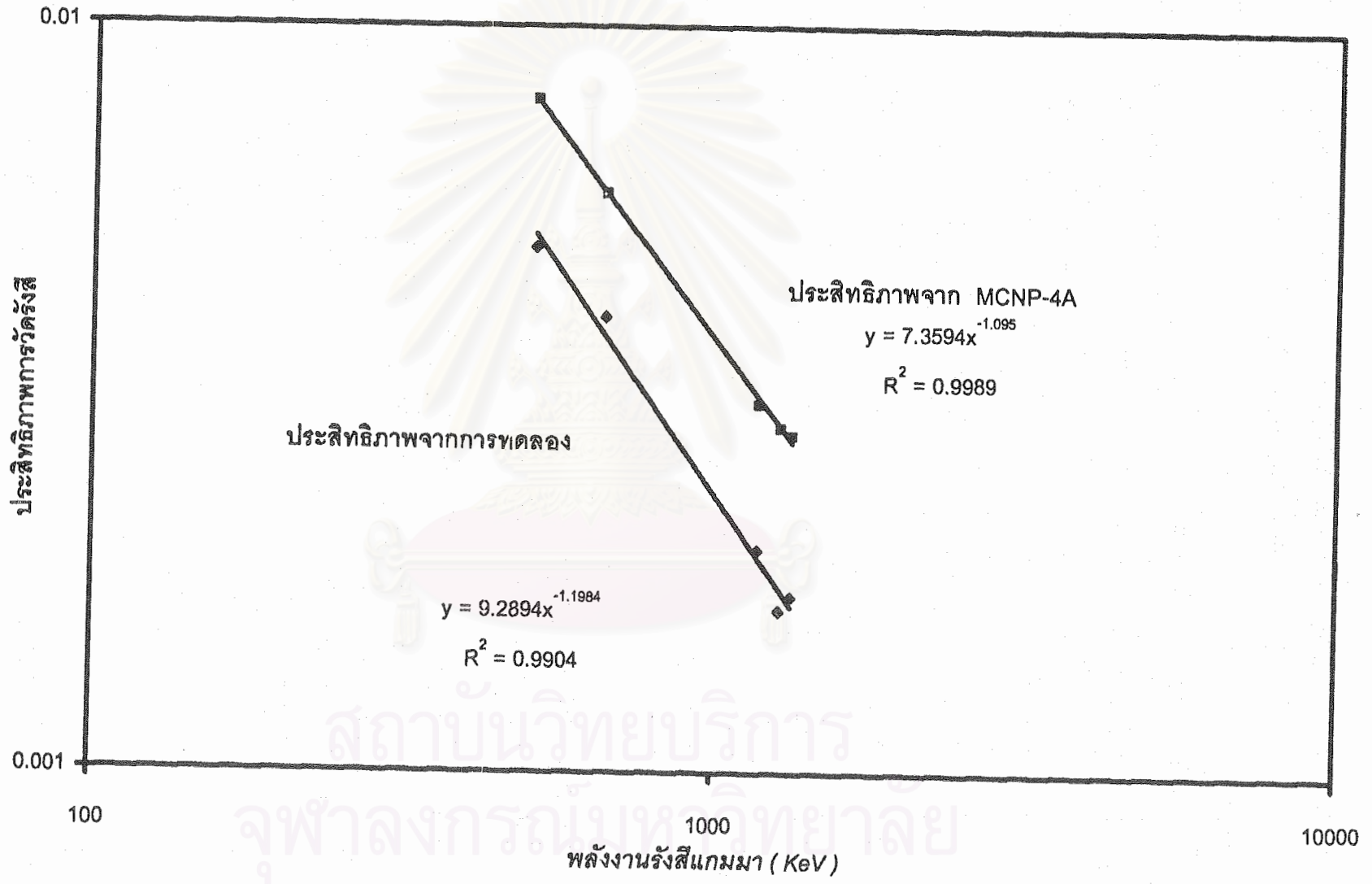
เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง ระหว่างต้นกำเนิดรังสีและหัววัดรังสี กับประสิทธิภาพการวัดรังสี ของระบบ จากการทดลองและจากการคำนวณ พบว่าเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการวัดรังสีลดลง และ อัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีเกมมาที่ได้จากการทดลองเทียบกับประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีเกมมาที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A นั้นอยู่ในช่วงของ 8% -12%

จากข้อมูลดังกล่าวนี้ แสดงว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองนั้น น้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นผลของความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของระบบวัดนั้นเอง อาจจะเป็นการคำนวณโดยคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F 8 Tally) นั้นพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดกับหัววัดรังสี ซึ่งจะเกิดเฉพาะผลึกของหัววัดรังสีเท่านั้น ดังนั้นในแบบจำลองที่ใช้ในการคำนวณนี้ รังสีเกมมาทำปฏิกิริยากับผลึกของNaI(Tl) เท่านั้น เพราะฉะนั้นค่าที่ได้จากการทดลองจึงไม่เท่ากับค่าที่ได้จากการคำนวณ

4.2.2 ผลการทดลองของระบบวัดรังสีเมื่อมีการกำหนดพลังงานต้นกำเนิดรังสี แตกต่างกัน

ได้ทำการทดลองวัดปริมาณรังสีเพื่อหาประสิทธิภาพการวัดรังสีโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีเกมมามาตรฐาน แบบจุด ซึ่งประกอบด้วย Cs-137 ให้รังสีเกมมาพลังงาน 0.662 MeV Co-60 ให้กำเนิดรังสีเกมมาพลังงาน 1.17 MeV 1.33 MeV ส่วน Na-22 ให้กำเนิดรังสีเกมมาพลังงาน 0.511 MeV 1.274 MeV โดยใช้หัววัด NaI(Tl) ขนาดขนาด 2" X 2"วางในแนวตั้งและให้ต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานแบบจุดดังกล่าวนี้วางสูงขึ้นไปเป็นระยะ 7.9 เซนติเมตรจากหัววัดรังสีและทำการวัดรังสีของแต่ละช่วงพลังงานปรากฏว่าได้ข้อมูลต่างๆดังต่อไปนี้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบกับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมาแบบจุดพลังงานต่างๆ

ตารางที่ 4.6 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้
พลังงานต้นกำเนิดรังสีแกมมามีพลังงานที่แตกต่างกัน

ต้นกำเนิดรังสี	พลังงาน (MeV)	สัมประสิทธิ์การ สลายตัว	ความแรงแรังสี * (Bq)	จำนวนนับรังสี (3000 วินาที)	ประสิทธิภาพ สัมบูรณ์ของ ระบบ
Na-22	0.511	1.798	12272	89697	2.43×10^{-3}
Cs-137	0.662	0.846	22308	121738	1.81×10^{-3}
Co-60	1.17	1	51396	130446	1.69×10^{-3}
Na-22	1.27	0.9994	6821	16265	7.94×10^{-4}
Co-60	1.33	1	51458	112744	1.46×10^{-3}

* ความแรงแรังสี คิด ณ วันทดลอง

และได้ทำการจำลองระบบวัดรังสีแกมมาโดยใช้เงื่อนไขจากการ
ทดลองข้างต้น และจำลองอนุภาคทั้งสิ้น 1,000,000 อนุภาคได้ประสิทธิภาพจากการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้พลัง
งานต้นกำเนิดรังสีแกมมามีพลังงานที่แตกต่างกัน

พลังงานจากต้นกำเนิดรังสี	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสี
0.511 MeV	7.99×10^{-3}
0.662 MeV	6.00×10^{-3}
1.17 MeV	3.14×10^{-3}
1.27 MeV	2.91×10^{-3}
1.33 MeV	2.85×10^{-3}

หากนำประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง และประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบเพื่อหาสัดส่วนเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพการวัดรังสีจากแบบจำลองและประสิทธิภาพการวัดรังสีจากแบบการทดลองสามารถแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4.8 เปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลองและการคำนวณ เมื่อกำหนดให้พลังงานรังสีแกมมามีพลังงานที่แตกต่างกัน

พลังงานจากต้นกำเนิดรังสี	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากแบบจำลอง	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากการทดลอง	ค่าสัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพทั้งสอง
0.511 MeV	7.99×10^{-3}	2.43×10^{-3}	19.57 %
0.662 MeV	6.00×10^{-3}	1.81×10^{-3}	21.02 %
1.17 MeV	3.14×10^{-3}	1.69×10^{-3}	19.49 %
1.27 MeV	2.91×10^{-3}	7.94×10^{-4}	17.20 %
1.33 MeV	2.85×10^{-3}	1.46×10^{-3}	19.24 %

จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถแสดงให้เห็นได้จากรูปที่ 4.4 ซึ่งเป็นกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน และประสิทธิภาพการวัดรังสีของระบบ จากการทดลองและจากการคำนวณ พบว่าเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการวัดรังสีลดลงเพราะเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้นความสามารถในการทะลุทะลวงก็สูงขึ้นตามไปด้วย และ อัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองเทียบกับประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A นั้นอยู่ในช่วงของ 15% -22%

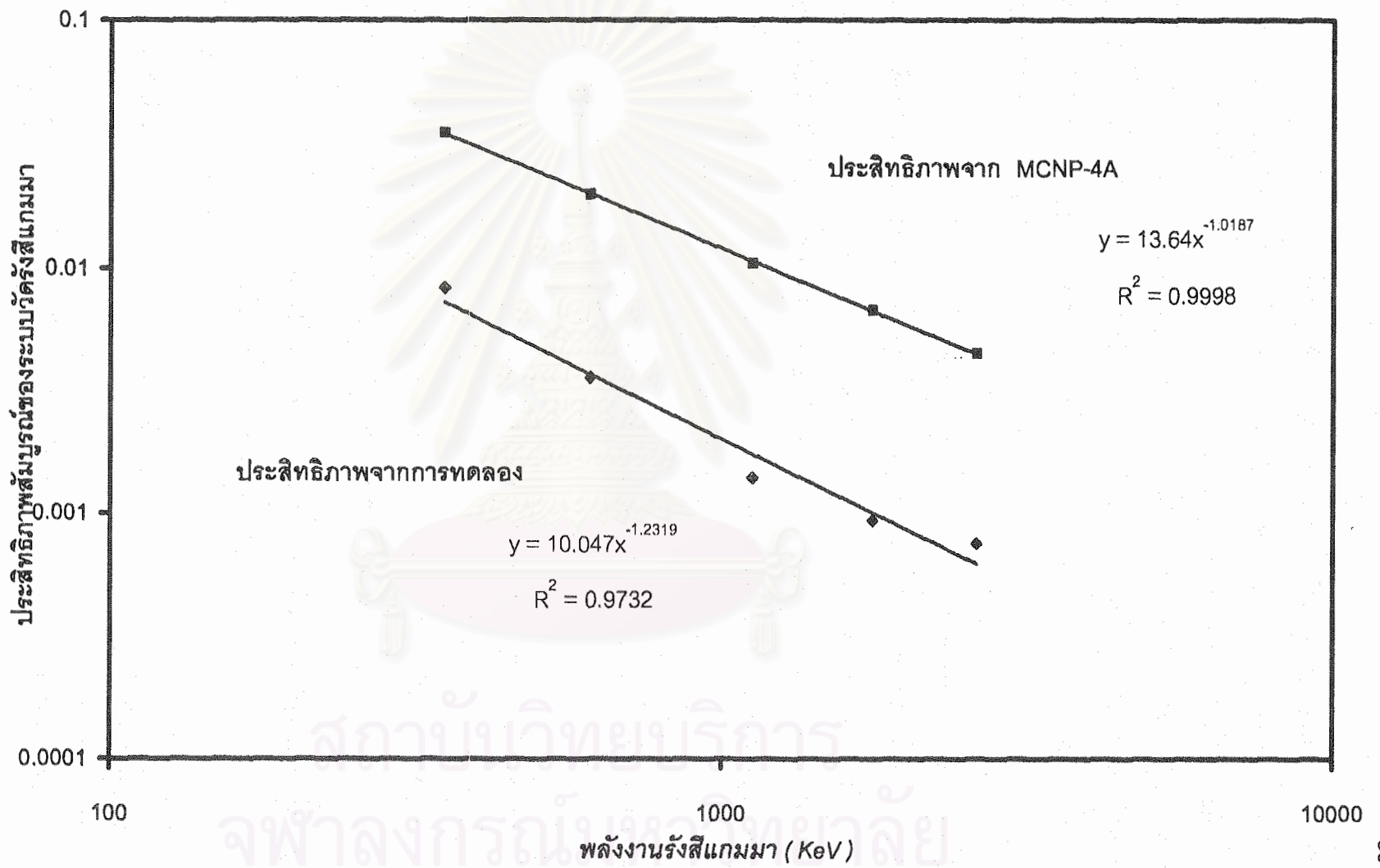
จากข้อมูลดังกล่าวนี้ แสดงว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองนั้นน้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นผลของความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของระบบวัดนั้นเอง อาจจะสามารถได้ ใน ผลการจำลองโดยคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F 8 Tally) นั้นพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดกับหัววัด ซึ่งจะเกิดอันตรกิริยาเฉพาะในผลึกของหัววัดเท่านั้น แต่ในการ

ทดลองจริงมีการสูญเสียประสิทธิภาพจากระบบวัดเอง ทำให้ค่าที่ได้ไม่เท่ากันแต่อย่างไรก็ตาม สัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพการวัดรังสีจากการทดลองกับประสิทธิภาพการวัดรังสีจากแบบจำลองจะเท่ากันทั้งระบบ

นอกจากนี้ได้ทำการวัดรังสีแกมมาจากสารยูเรเนียม(U)และทอเลียม(Th)มาตรฐานในภาชนะพลาสติกทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 12 เซนติเมตร สูง 3 เซนติเมตร ที่รังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ กันด้วยหัววัดรังสีแกมมา NaI(Tl) ขนาด 2" X 2" และทำการจำลองระบบวัดดังกล่าวด้วยอนุภาค 1,000,000 อนุภาคซึ่งจะได้ประสิทธิภาพในการวัดรังสีจากการทดลองและจากการจำลองดังนี้

ตารางที่ 4.9เปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาจากการทดลอง และการคำนวณ จากสารยูเรเนียม(U)และทอเลียม(Th)มาตรฐาน

พลังงาน (MeV)	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากแบบจำลอง	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากแบบการทดลอง	ค่าสัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพทั้งสอง
0.352	3.50×10^{-2}	8.34×10^{-3}	23.83%
0.609	1.98×10^{-2}	3.62×10^{-3}	18.26%
1.120	1.05×10^{-2}	1.41×10^{-3}	13.52%
1.765	6.78×10^{-3}	9.39×10^{-3}	13.87%
2.614	4.52×10^{-3}	7.51×10^{-4}	16.64%



รูปที่ 4.5 ภาพแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบกับพลังงาน ของต้นกำเนิดรังสีแกมมา

จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถแสดงให้เห็นได้จากกราฟที่ 4.5 ซึ่ง

เป็นกราฟความสัมพันธ์ของพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน และประสิทธิภาพการวัดรังสี ของระบบ จากการทดลองและจากการคำนวณ พบว่าเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการวัดรังสีลดลงเพราะเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาสูงขึ้นความสามารถในการทะลุทะลวงก็สูงขึ้นตามไปด้วย และ อัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองเทียบกับประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A นั้นอยู่ในช่วงของ 13% -23%

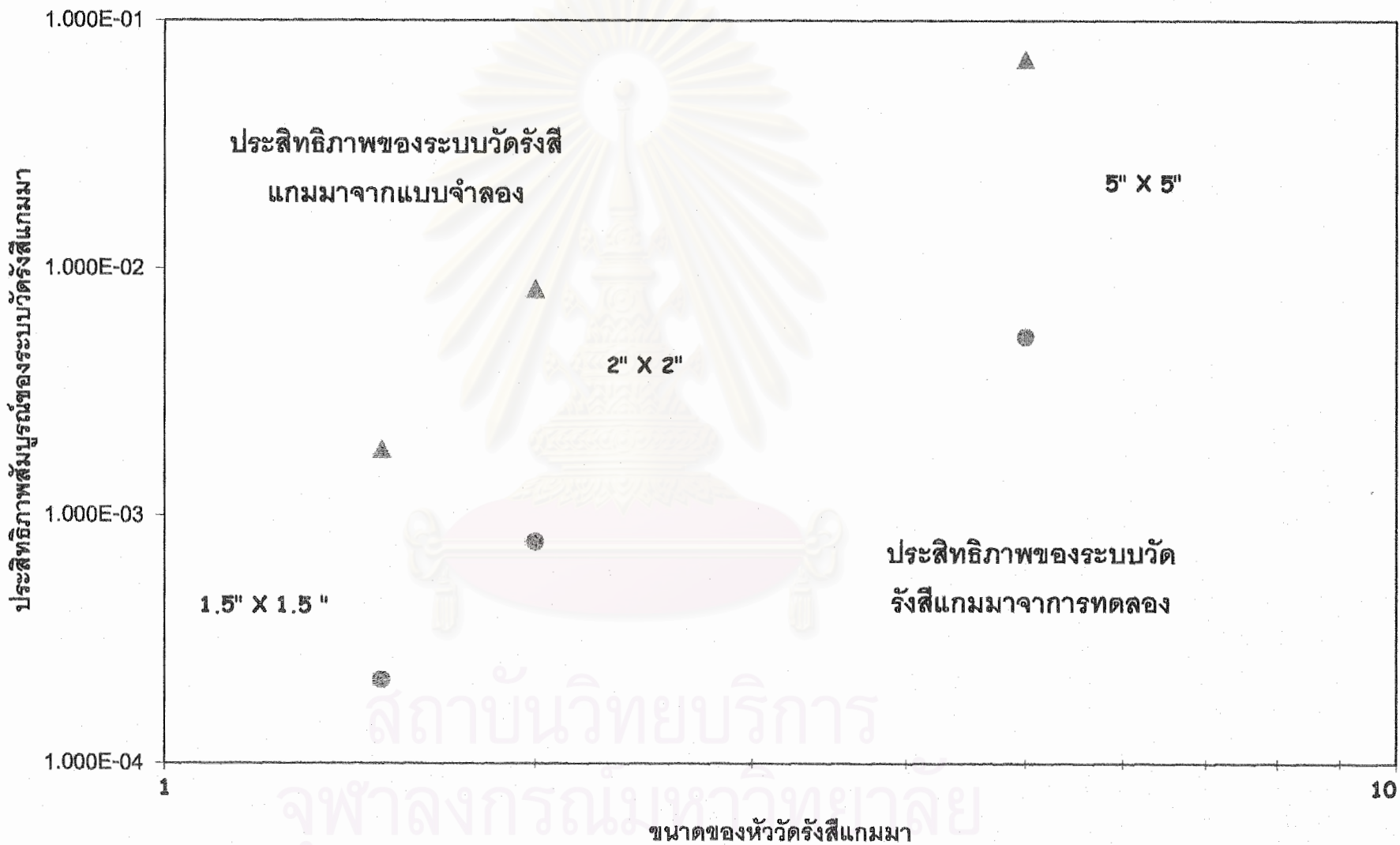
จากข้อมูลดังกล่าวนี้ แสดงว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองนั้น น้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นผลของความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของระบบวัดนั้นเอง อาจจะกล่าวได้ใน ผลการจำลองโดยคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F 8 Tally) นั้น พิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดกับหัววัด ซึ่งจะเกิดอันตรกิริยาเฉพาะในผลึกของหัววัดเท่านั้น ทำให้ค่าที่ได้ไม่เท่ากันแต่อย่างไรก็ตามสัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพการวัดรังสีจากแบบการทดลองกับประสิทธิภาพการวัดรังสีจากแบบจำลองจะเท่ากันทั้งระบบ

4.2.3 ผลการทดลองของระบบวัดรังสีเมื่อมีการกำหนดให้หัววัดรังสีแกมมามีขนาด แตกต่างกัน

ได้ทำการทดลองโดยกำหนดให้วัดค่าพลังงาน 1.4028 MeV ของ K ซึ่งได้จาก KCl จำนวน 94.56 กรัม บรรจุในภาชนะ พลาสติก ทรงกระบอกขนาด 4.65 เซนติเมตร สูง 6.8 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร วางบนหัววัด NaI(Tl) ขนาดต่างๆกัน ได้แก่ 1.5" X 1.5", 2" X 2" และ 5" X 5" ปรากฏได้ประสิทธิภาพจากการทดลองดังต่อไปนี้

ตารางที่ 4.10 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการทดลอง เมื่อกำหนดให้ขนาดของหัววัดรังสีแกมมามีขนาดแตกต่างกัน

ขนาดหัววัดรังสี NaI(Tl)	จำนวนนับรังสี	ค่าเปรียบเทียบระหว่างประสิทธิภาพทั้งสอง
1.5" X 1.5"	2112 (6000 วินาที)	2.172×10^{-4}
2" X 2"	3803 (3000 วินาที)	7.823×10^{-4}
5" X 5"	25732 (3000 วินาที)	5.293×10^{-3}



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา เทียบกับขนาดของหัววัดรังสีแกมมา

และได้ทำการจำลองระบบวัดรังสีแกมมาโดยใช้เงื่อนไขจากการทดลองข้างต้น และจำลองอนุภาคทั้งสิ้น 1,000,000 อนุภาคได้ประสิทธิภาพจากการคำนวณดังนี้

ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา จากการคำนวณ เมื่อกำหนดให้ขนาดของหัววัดรังสีแกมมามีขนาดแตกต่างกัน

ขนาดของหัววัด	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสี
1.5" X 1.5"	1.858×10^{-3}
2" X 2"	8.272×10^{-3}
5" X 5"	6.98×10^{-2}

หากนำประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลอง และประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณมาเปรียบเทียบเพื่อหาความผิดพลาดโดยกำหนดให้ค่าที่ได้จากการทดลองเป็นค่าที่ถูกต้องสามารถแสดงผลได้ดังนี้

ตารางที่ 4.12 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา ระหว่าง จากการคำนวณ และจากการทดลองเมื่อกำหนดให้ขนาดของหัววัดรังสีแกมมามีขนาดแตกต่างกัน

ขนาดของหัววัด	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากแบบจำลอง	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากการทดลอง	ค่าเปรียบระหว่างประสิทธิภาพทั้งสอง
1.5" X 1.5"	1.858×10^{-3}	2.172×10^{-4}	11.697%
2" X 2"	8.272×10^{-3}	7.823×10^{-4}	9.457%
5" X 5"	6.98×10^{-2}	5.293×10^{-3}	7.593 %

จากข้อมูลดังกล่าวนี้สามารถแสดงให้เห็นได้จากกราฟที่ 4.6 ซึ่งเป็นกราฟของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของหัววัดรังสีแกมมา NaI(Tl) และประสิทธิภาพการวัดรังสี

ของระบบ จากการทดลองและจากการคำนวณ พบว่าเมื่อขนาดหัววัดรังสีเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการวัดรังสีก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย และ อัตราส่วนระหว่างประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีเกมมาที่ได้จากการทดลองเทียบกับประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีเกมมาที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A นั้นอยู่ในช่วงของ 9% -12%

จากข้อมูลดังกล่าวนี้ แสดงว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองนั้น น้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นผลของความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของระบบวัดนั้นเอง อาจจะเป็นกล่าวได้ ใน ผลการจำลองโดยคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F 8 Tally) นั้นพิจารณาพิจารณาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นกับ ผลึกของหัววัดรังสีเท่านั้น

4.2.4 ผลการทดลองของระบบวัดรังสีเมื่อมีการกำหนดให้ต้นกำเนิดรังสี เกมมามีรูปร่างแตกต่างกัน

ได้ทำการทดลองโดยกำหนดให้วัดค่าพลังงาน 1.4028 MeV ของ K ซึ่งได้จาก $K_2Cr_2O_7$ จำนวน 138.01 กรัม บรรจุในภาชนะ พลาสติก ทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.65 เซนติเมตร สูง 6.8 เซนติเมตร หน้า 0.2 เซนติเมตร และ $K_2Cr_2O_7$ จำนวน 223.375 กรัม บรรจุในภาชนะ พลาสติกทรงกลมขนาด กว้าง 6 เซนติเมตร ยาว 9.5 เซนติเมตร สูง 3.5 เมตร วางบนหัววัด NaI(Tl) ขนาด 2" X 2" โดยเปรียบเทียบกับผลที่ได้จากการคำนวณ ปรากฏได้ผลดังนี้

ตารางที่ 4.13 เปรียบเทียบประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีเกมมา ระหว่าง จากการทดลองเมื่อกำหนดให้ขนาดของต้นกำเนิดรังสีเกมมามีรูปแบบแตกต่างกัน

ชนิดของต้นกำเนิดรังสี	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากแบบจำลอง	ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีจากการทดลอง	ค่าเปรียบระหว่างประสิทธิภาพทั้งสอง
แบบกล่อง	1.23×10^{-2}	1.07×10^{-3}	8.764 %
แบบทรงกระบอก	9.28×10^{-3}	8.85×10^{-4}	9.536 %

จากข้อมูลดังกล่าวนี้ แสดงว่าประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองนั้น น้อยกว่าค่าที่ควรจะเป็นผลของความแตกต่างนี้มีสาเหตุมาจากการสูญเสียประสิทธิภาพของระบบวัดนั้นเอง

4.3 ผลการคำนวณด้วยวิธีอื่นเปรียบเทียบกับแบบผลการคำนวณของจำลองระบบวัดรังสีแกมมาด้วย MCNP-4A

ได้ทำการคำนวณหาประสิทธิภาพการวัดรังสีของต้นกำเนิดรังสี 3 ประเภทคือ แบบจุด แบบเส้น และแบบมีปริมาตรเป็นทรงกระบอกโดยพิจารณาเปรียบเทียบกับคำนวณแบบจำลองด้วย MCNP-4A

ต้นกำเนิดรังสีแบบจุด

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาระหว่างการคำนวณด้วยสมการ และ ใช้ แบบจำลอง MCNP-4A

คำนวณประสิทธิภาพด้วยแบบจำลอง MCNP-4A	$\frac{\Phi(r)}{S}$ ที่ได้จากสมการ	ค่าความผิดพลาด
7.958×10^{-2}	7.958×10^{-2} (r = 1 cm.)	0.00 %
1.989×10^{-2}	1.989×10^{-2} (r = 2 cm.)	0.00 %
3.183×10^{-3}	3.183×10^{-3} (r = 5 cm.)	0.00 %
7.958×10^{-4}	7.958×10^{-4} (r = 10 cm.)	0.00 %
7.958×10^{-6}	7.958×10^{-6} (r = 100 cm.)	0.00 %

ต้นกำเนิดรังสีแบบเส้น

ตารางที่ 4.14 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาระหว่างการคำนวณด้วยสมการ
และใช้แบบจำลอง MCNP-4A

คำนวณประสิทธิภาพ ด้วยแบบจำลอง MCNP-4A	$\frac{\Phi(r)}{S(l_1 + l_2)}$ ค่าที่ได้ จากสมการ	เงื่อนไขและรูปแบบของต้น กำเนิดรังสี	ค่าความผิดพลาด
2.181×10^{-2}	2.183×10^{-2}	X = 1 cm $l_1 = 5$ cm $l_2 = 5$ cm	0.09 %
9.478×10^{-3}	9.475×10^{-3}	X = 2 cm $l_1 = 5$ cm $l_2 = 5$ cm	0.03 %
2.504×10^{-3}	2.509×10^{-3}	X = 5 cm $l_1 = 5$ cm $l_2 = 5$ cm	0.07 %
7.382×10^{-4}	7.384×10^{-4}	X = 10 cm $l_1 = 5$ cm $l_2 = 5$ cm	0.03 %
7.951×10^{-6}	7.957×10^{-6}	X = 100 cm $l_1 = 5$ cm $l_2 = 5$ cm	0.07 %

ค่าผลการคำนวณที่ได้เมื่อเทียบระหว่างเงื่อนไขทั้งสองจากต้นกำเนิดรังสีทั้งสอง
แบบนี้สามารถแสดงให้เห็นได้ว่ามีค่าเท่ากันนั้นก็เป็นการแสดงว่าค่าที่ได้จากการใช้แบบจำลอง
MCNP-4A คำนวณประสิทธิภาพการนับวัดรังสีนั้น มีความถูกต้องมาก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุป และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาผลการคำนวณนับค่า F8 ของ MCNP-4A ซึ่งเป็นการนับค่าการแจกแจงพลังงานภายในหัววัดรังสีแกมมานั้น พบว่าค่าประสิทธิภาพสัมบูรณ์ที่ได้จากการคำนวณจากเงื่อนไขต่างๆ นั้นมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองไม่ว่าจะเป็นระบบที่มีขนาดของหัววัดที่แตกต่างกัน ซึ่งทำการวัดพลังงานรังสีแกมมาตัวเดียวกันผลที่ได้นั้นพบว่าประสิทธิภาพในการวัดจะเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องทั้งการคำนวณประสิทธิภาพด้วย MCNP-4A กับ การหาประสิทธิภาพจากการทดลองนอกจากนั้นการหาประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาเมื่อกำหนดให้เงื่อนไขของระบบวัดนั้นทำการวัดรังสีแกมมาที่พลังงานต่างๆ กัน พบว่าประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมานั้นจะลดลงเมื่อพลังงานของรังสีแกมมาที่ใช้สูงขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A นั้นมีทิศทางและแนวโน้มไปในทางเดียวกัน และเมื่อระยะทางจากต้นกำเนิดรังสีถึงหัววัดรังสีแกมมา มีระยะทางเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาจะลดลง ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองและการคำนวณด้วย MCNP-4A

หากนำสัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพของระบบวัดที่ได้จากการปฏิบัติงานจริงเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A นั้นในระบบที่ใช้อุปกรณ์การวัดชนิดเดียวกันในการปฏิบัติงาน จะมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง นอกจากนั้นพบว่าค่าที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A มีค่าประสิทธิภาพสูงกว่าค่าที่ได้จากการปฏิบัติงานจริง สาเหตุเนื่องมาจากการใช้ MCNP-4A สร้างแบบจำลอง และใช้ F8 ในการคำนวณนับหาประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมา แจกแจงพลังงานภายในหัววัดนั้น จะทำการคำนวณการเกิดอันตรกิริยาระหว่าง รังสีกับผลึกหัววัดเท่านั้น ไม่ได้ทำการคำนวณเงื่อนไขอื่นที่มีในระบบการวัดรังสีจริง ซึ่งระบบดังกล่าวนี้ ประสิทธิภาพที่สูญหายไปจะหายไปจาก กระบวนการต่างๆ ในระบบอุปกรณ์การวัดทางนิวเคลียร์ หรือ การประมวลผลสัญญาณนิวเคลียร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ในระบบวัดรังสี นั้นเอง เพราะฉะนั้นค่าประสิทธิภาพของการทดลองจึงมีค่าน้อยกว่าค่าประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A ซึ่งอาจกล่าวอีกนัยหนึ่งได้ว่าค่าสัดส่วนระหว่างประสิทธิภาพของระบบวัดที่ได้จากการปฏิบัติงานเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A คือค่า X ซึ่งค่า X สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$X = \frac{\varepsilon_{LAB}}{\varepsilon_{MCNP}}$$

เมื่อ ε_{MCNP} คือ ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองMCNP-4A

ε_{LAB} คือ ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ของระบบวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลองทดลอง

เพราะฉะนั้นหากต้องการนำประสิทธิภาพที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP-4A เพื่อนำไปคำนวณหาความแรงรังสีที่มีอยู่จริงในตัวอย่าง จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าที่สูญหายไปในระบบวัดด้วย เพื่อจะได้ค่าความแรงรังสีที่ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่ง การคำนวณหาความแรงรังสีจากสารตัวอย่างนั้นสามารถหาจากสมการความสัมพันธ์ดังนี้

$$A = \frac{C}{\varepsilon_{MCNP} \cdot X}$$

เมื่อ A คือ ความแรงรังสีแกมมาจากสารตัวอย่าง (Bq)

C คือ คำนับวัดรังสีแกมมาที่ได้จากการทดลอง (Count / Second)

ε_{MCNP} คือ ประสิทธิภาพสัมบูรณ์ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองMCNP-4A

ค่า X นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัด และอุปกรณ์อื่นๆในระบบวัด ถ้าระบบวัดใดๆก็ตามใช้หัววัดชนิดเดียวกัน หรือ อุปกรณ์ประมวลผลอื่นๆในระบบวัด ภายใต้งี้ออนไขเดียวกันแล้วละก็ ค่า X จะมีค่าเท่ากัน ทั้งระบบ

5.2 ข้อเสนอนแนะ

เนื่องจากการประยุกต์ใช้ MCNP-4A ในการคำนวณโดยส่วนใหญ่จะทำการคำนวณในระบบหยุดนิ่งเท่านั้นหากสามารถนำ MCNP-4A ไปคำนวณในระบบที่ไม่หยุดนิ่งก็สามารถขยายขอบเขตของงานวิจัยได้ นอกจากนี้ หากสามารถคำนวณหาประสิทธิภาพสำหรับระบบที่ไม่หยุดนิ่งได้ก็สามารถจะทำให้นำประยุกต์ใช้วัดรังสีแบบออนไลน์ ได้ซึ่งมีประโยชน์สำหรับการปฏิบัติงานทางรังสีเมื่อเป็นระบบเปิด

การปฏิบัติงานวัดรังสีในสิ่งแวดล้อมโดยเฉพาะอย่างยิ่งอากาศและในพื้นดิน นั้น มีข้อปลีกย่อยมากมายซึ่งจะ จำกัดขอบเขตในการปฏิบัติงานมากหากสามารถใช้ MCNP-4A จำนวนปรับแก้ค่าเหล่านั้น ก็สามารถเพิ่มความสะดวกในการวัดรังสีในสิ่งแวดล้อมมากขึ้นได้

หากในการทดลองในระบบวัดรังสีแกมมาที่ซับซ้อน MCNP-4A ยังสามารถออกแบบการจัดวางและออกแบบเงื่อนไขต่างๆ ให้ได้ประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากนั้นในการประยุกต์ใช้เทคนิคนิวเคลียร์ในงานด้านอุตสาหกรรม ยังสามารถออกแบบระบบวัดซึ่งสามารถใช้ MCNP-4A ในการออกแบบได้ เพื่อจะได้ประสิทธิภาพของระบบสูงที่สุด และยังสามารถใช้ออกแบบ และพัฒนาระบบการถ่ายภาพด้วยรังสีไม่ว่าจะเป็น รังสีเอกซ์ แกมมา หรือ นิวตรอน ได้เพื่อได้ภาพที่คมชัดและมีความเปรียบเทียบที่ดี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. กานต์พงศ์ ชูพันธ์. การจำลองการกระจายแบบคอมพิวเตอร์ของรังสีแกมมาในคอนกรีตเสริมเหล็กโดยใช้วิธีมอนติคาร์โล. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
2. ทรงศักดิ์ องค์กรวัฒนกุล. การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อหาความแรงรังสีของสารรังสีติดตามสำหรับฉีดเข้าไปในระบบของเหลว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
3. ปวีร์วรรต เสียงสนั่น, วันชัย ธรรมาวานิช และสมพร จงศ์คำ. การจำลองแบบการกำบังรังสีแกมมาโดยวิธีมอนติคาร์โล. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ, 2539.
4. O.Sima. Application of Monte Carlo Calculation to Gamma – Spectrometric Measurements of Environmental Sample. Application Radiation and Isotope Vol. 47 No.9/10 (1996) : PP. 919-923.
5. E.E. Lewis, W.F. Miller JR. Computational Methods of Neutron Transport. 1st ed. United States of America : American Nuclear Society, 1993.
6. William H. Press, Brian P. Flannery, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling. Numerical Recipes The Art of Scientific Computing (Fortran Version). 1st ed. United States of America : Cambridge University Press, 1990.
7. OAK RIDE 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.
8. John R. Lamarsh. Introduction to nuclear engineering. 2nd ed. Massachusetts : Addison-Wesley, 1983.
9. Glenn F. Knoll. Radiation detection and measurement. 3rd ed. New York : John Wiley & sons, 1999.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างผลการจำลองจาก MCNP-4A

1mcnp version 4a ld=10/01/93 03/23/03 22:10:19

probid = 03/23/03 22:10:19
 INP=Gasby OUTP=G1 RUNTP=Q1

1-
 2- 1 0 1 -2 3 -4 5 -6 IMP:P=1
 3- 2 0 #1 IMP:P=0
 4-
 5- 1 PZ -100
 6- 2 PZ 100
 7- 3 PY -100
 8- 4 PY 100
 9- 5 PX -100
 10- 6 PX 100
 11-
 12- MODE P
 13- SDEF ERG=1 PAR=2 X=D1 Y= 0 Z= 0
 14- S11 -5 5
 15- SP1 0 1
 16- PHYS:P 2 0 0
 17- F5:P 0 0 1 1
 18- NPS 1000000
 19-

warning. no cross-section tables are called for in this problem.

1cells

print table 60

cell	mat	density	atom density	volume	gram mass	photon pieces	importance
1	1	0	0.00000E+00	0.00000E+00	8.00000E+06	0.00000E+00	0 1.0000E+00
2	2	0	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0 0.0000E+00

total 8.00000E+06 0.00000E+00

minimum source weight = 1.0000E+00 maximum source weight = 1.0000E+00

1 warning message so far.

decimal words of dynamically allocated storage

general	1968
tallies	6524
bank	6403
cross sections	0
total	13667

 dump no. 1 on file Q1 nps = 0 coll = 0 ctm = 0.00 nrn = 0

run terminated when 100000 particle histories were done.

+

03/23/03 22:13:37
 probid = 03/23/03 22:10:19

computer time so far in this run 3.29 minutes maximum number ever in bank 0
 computer time in mcrun 3.28 minutes bank overflows to backup file 0
 source particles per minute 3.0454E+05 field length 0
 random numbers generated 3545410 most random numbers used was 21 in history
 625310

range of sampled source weights = 1.0000E+00 to 1.0000E+00
 1photon activity in each cell print table 126

1tally 5 nps = 1000000
 tally type 5 particle flux at a point detector. units 1/cm**2
 tally for photons

detector located at x,y,z = 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00
 2.17870E-02 0.0010

detector located at x,y,z = 0.00000E+00 0.00000E+00 1.00000E+00
 uncollided photon flux
 2.17870E-02 0.0010

average tally per history = 2.17870E-02 largest score = 7.95775E-02
 (largest score)/(average tally) = 3.65252E+00 nps of largest score = 314410

score contributions by cell

cell	misses	hits	tally per history	weight per hit
1 1	0	1000000	2.17870E-02	2.17870E-02
total	0	1000000	2.17870E-02	2.17870E-02

score misses

russian roulette on pd	0
psc=0.	0
russian roulette in transmission	0
underflow in transmission	0
hit a zero-importance cell	0
energy cutoff	0

1analysis of the results in the tally fluctuation chart bin (tfc) for tally 5 with nps = 1000000 print table 160

normed average tally per history = 2.17870E-02 unnormed average tally per history = 2.17870E-02
 estimated tally relative error = 0.0010 estimated variance of the variance = 0.0000
 relative error from zero tallies = 0.0000 relative error from nonzero scores = 0.0010

number of nonzero history tallies = 1000000 efficiency for the nonzero tallies = 1.0000
 history number of largest tally = 314410 largest unnormalized history tally = 7.95775E-02
 (largest tally)/(average tally) = 3.65252E+00 (largest tally)/(avg nonzero tally) = 3.65252E+00

(confidence interval shift)/mean = 0.0000 shifted confidence interval center = 2.17870E-02

if the largest history score sampled so far were to occur on the very next history, the tfc bin quantities would change as follows:

estimated quantities	value at nps	value at nps+1	value(nps+1)/value(nps)-1.
mean	2.17870E-02	2.17870E-02	0.000003
relative error	1.03807E-03	1.03807E-03	0.000000
variance of the variance	2.44771E-06	2.44770E-06	-0.000006
shifted center	2.17870E-02	2.17870E-02	0.000000
figure of merit	2.82612E+05	2.82612E+05	0.000001

the 100 largest history tallies appear to have a maximum value of about 7.95775E-02
 the large score tail of the empirical history score probability density function appears to have no unsampled regions.

=====

results of 10 statistical checks for the estimated answer for the tally fluctuation chart (tfc) bin of tally 5

tfc bin	--mean--	-----relative error-----	----variance of the variance----	--figure of merit--	-pdf-
behavior	value	decrease	decrease rate	value	decrease
slope				decrease rate	value

desired	random	<0.05	yes	1/sqrt(nps)	<0.10	yes	1/nps	constant	random	>
3.00										
observed	random	0.00	yes	yes	0.00	yes	yes	constant	random	10.00
passed?	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes	yes

=====

this tally meets the statistical criteria used to form confidence intervals: check the tally fluctuation chart to verify. the results in other bins associated with this tally may not meet these statistical criteria.

estimated asymmetric confidence intervals(1,2,3 sigma): 2.1764E-02 to 2.1810E-02; 2.1742E-02 to 2.1832E-02; 2.1719E-02 to 2.1855E-02

estimated symmetric confidence intervals(1,2,3 sigma): 2.1764E-02 to 2.1810E-02; 2.1742E-02 to 2.1832E-02; 2.1719E-02 to 2.1855E-02

1status of the statistical checks used to form confidence intervals for the mean for each tally bin

tally result of statistical checks for the tfc bin (the first check not passed is listed) and error magnitude check for all bins

- 5 passed the 10 statistical checks for the tally fluctuation chart bin result
- passed all bin error check: 2 tally bins all have relative errors less than 0.05 with no zero bins

the 10 statistical checks are only for the tally fluctuation chart bin and do not apply to other tally bins.

1tally fluctuation charts

tally	nps	mean	error	vov	slope	fom
5						
64000	2.1859E-02	0.0041	0.0000	10.0	276476	
128000	2.1826E-02	0.0029	0.0000	10.0	280316	
192000	2.1830E-02	0.0024	0.0000	10.0	281367	
256000	2.1789E-02	0.0021	0.0000	10.0	279993	
320000	2.1792E-02	0.0018	0.0000	10.0	280489	
384000	2.1788E-02	0.0017	0.0000	10.0	280831	
448000	2.1804E-02	0.0016	0.0000	10.0	281372	
512000	2.1794E-02	0.0015	0.0000	10.0	281669	
576000	2.1816E-02	0.0014	0.0000	10.0	282132	
640000	2.1814E-02	0.0013	0.0000	10.0	282201	
704000	2.1813E-02	0.0012	0.0000	10.0	282153	
768000	2.1803E-02	0.0012	0.0000	10.0	282345	
832000	2.1807E-02	0.0011	0.0000	10.0	282546	
896000	2.1800E-02	0.0011	0.0000	10.0	282618	
960000	2.1792E-02	0.0011	0.0000	10.0	282745	
1000000	2.1787E-02	0.0010	0.0000	10.0	282612	

 dump no. 2 on file Q1 nps = 1000000 coll = 0 ctm = 3.28 nrn = 3545410

1 warning message so far.

run terminated when 1000000 particle histories were done.

computer time = 3.56 minutes

mcnp version 4a 10/01/93 03/23/03 22:13:53 probid = 03/23/03 22:10:19

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายธนัญชัย พิรุณพันธ์ เกิดเมื่อวันที่ 5 สิงหาคม พ.ศ. 2518 ที่จังหวัดชุมพร จบการศึกษาระดับอุดมศึกษาจากภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วิศวกรรมโยธา) ในปี พ.ศ. 2541 และสำเร็จการศึกษาในระดับ ประกาศนียบัตรบัณฑิตสาขา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2542 หลังจากนั้นก็เข้าศึกษาหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี) ที่ภาควิชา นิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย