

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อหาความแรงรังสีของสารรังสีติดตาม
สำหรับฉีดเข้าไปในระบบของเหลว



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

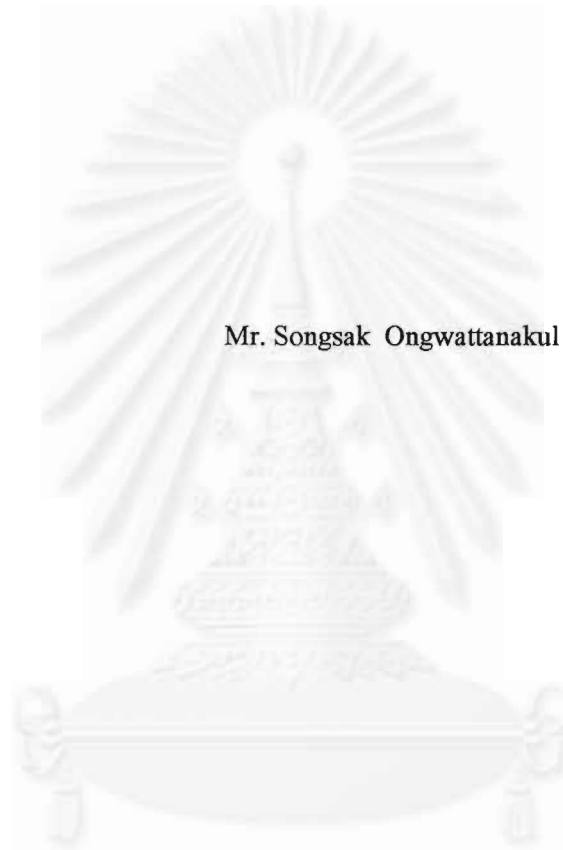
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-197-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

MONTE CARLO CALCULATION OF INJECTION ACTIVITY OF
RADIOTRACER IN LIQUID SYSTEMS



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

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-197-2

ทรงศักดิ์ อังค์วัฒนกุล : การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อหาความแรงรังสีของสารรังสีติดตามสำหรับฉีดเข้าไปในระบบของเหลว (MONTE CARLO CALCULATION OF INJECTION ACTIVITY OF RADIOTRACER IN LIQUID SYSTEMS) อ.ที่ปรึกษา : รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, อ. ที่ปรึกษาร่วม : Prof. Dr. Esam Hussein, 83 หน้า. ISBN 984-333-197-2.

ได้ใช้วิธีคำนวณแบบมอนติคาร์โลโดยใช้โค้ด MCNP 4A ในการคำนวณประสิทธิภาพการนับรังสีแกมมาพลังงาน 143 keV จากสารละลาย Tc-99m ในน้ำซึ่งบรรจุอยู่ในถังและท่อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 ถึง 25 ซม. โดยเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการทดลองโดยใช้หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว และกับการคำนวณแบบวิเคราะห์ซึ่งมีการแก้ผลจากลักษณะทางเรขาคณิตและการดูดกลืนตัวเองของรังสี ผลการวิจัยพบว่าผลการคำนวณจากวิธีมอนติคาร์โลเป็นสัดส่วนกับประสิทธิภาพการนับรังสี ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคำนวณโดยวิธีนี้สามารถใช้ในการประมาณความแรงของสารรังสีที่ต้องการฉีดเข้าไปในระบบเพื่อหาอัตราการใช้ ระยะเวลาที่สารอยู่ในระบบ และระยะเวลาในการผสมของสาร



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี
ปีการศึกษา 2.54.2

ลายมือชื่อนิสิต ทรงศักดิ์ อังค์วัฒนกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ทรงศักดิ์ อังค์วัฒนกุล
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม Esam Hussein

3970603621 : MAJORNUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD MONTE CARLO/ Tc-99m / RADIOTRACER

SONGSAK ONGWATTANAKUL : MONTE CARLO CALCULATION OF INJECTION ACTIVITY OF RADIOTRACER IN LIQUID SYSTEMS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, M. ENG. THESIS COADVISOR : PROF. DR. ESAM HUSSEIN, Ph.D., P.ENG. 83 pp. ISBN 974-333-197-2.

The Monte Carlo N-particle Transport code version 4A (MCNP 4A code) was used to calculate the counting yield of 143-keV gamma-ray photons emitted from Tc-99m solution dissolved in water contained in cylindrical tanks and pipes of diameters 10 to 25 cm. The results were compared with those obtained from the experiments using a 2" x 2" NaI(Tl) detector and from an analytical calculation model taking into account the geometrical and self-absorption factors. The results obtained from the MCNP calculation were found to be proportional to the actual counting efficiencies. The Monte Carlo calculation may be used to help estimating the required injection activity of radioactive substance to obtain information on the flow rate, residence time and mixing time.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....
ปีการศึกษา.....2542.....

ลายมือชื่อนิสิต.....ทรงศักดิ์ อังควรรักษ์นุก.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....มนต์วิวัฒน์.....
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....Esam Hussein.....



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ Professor Dr. Esam Hussein อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด ซึ่งเป็นผลให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ซึ่งประกอบด้วย รองศาสตราจารย์ ดร. รัชชัย สุมิตร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุพิชชา จันทโรยธา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปรัญญ์พร ที่ได้กรุณาตรวจสอบ แก้ไข และให้คำแนะนำในการทำวิทยานิพนธ์ เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนอุดหนุนงานวิจัยจากทางบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณ บัณฑิตวิทยาลัยไว้ ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ แผนกรังสีวินิจฉัย โรงพยาบาลจุฬาฯ ที่เอื้อเฟื้อสารละลายของไอโซโทป Tc-99m สำหรับใช้ในการทดลอง และคุณปัญญา ภาสว้าง ที่ช่วยเตรียมสารละลาย Tc-99m

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ รุ่นพี่ และรุ่นน้องทุก ๆ ท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดาที่ช่วยสนับสนุนทั้งทางกำลังทรัพย์ และกำลังใจอย่างเสมอมา ซึ่งเป็นอีกส่วนหนึ่งที่ช่วยให้วิทยานิพนธ์นี้ประสบความสำเร็จ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ | |
| 1. บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... | 1 |
| 1.2 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล..... | 2 |
| 1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 4 |
| 1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... | 4 |
| 1.5 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย..... | 4 |
| 1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 5 |
| 2. ทฤษฎี..... | 6 |
| 2.1 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล..... | 6 |
| 2.1.1 เครื่องกำเนิดตัวเลขสุ่ม..... | 6 |
| 2.1.2 วิธีสุ่มตัวอย่าง..... | 7 |
| 2.1.3 ตัวประมาณค่า..... | 9 |
| 2.1.4 การประมาณค่าความผิดพลาด..... | 14 |
| 2.1.5 การลดค่าความแปรปรวน..... | 16 |
| 2.1.6 ครรชนีแสดงคุณภาพของการคำนวณ (Figure of Merit FOM)..... | 19 |
| 2.2 การประยุกต์ใช้สารรังสีติดตาม..... | 20 |
| 2.2.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้สารรังสีติดตาม..... | 20 |
| 2.2.2 การตอบสนองของหัววัดรังสี..... | 23 |
| 2.2.3 การคำนวณทางรังสีคิดเพื่อประมาณค่าขอบเขตของความเชื่อมั่น..... | 24 |
| 2.2.4 การคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการใช้ของของเหลวด้วยวิธีการนับรังสีรวม..... | 25 |

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

| | |
|--|----|
| 3. วิธีดำเนินงานวิจัย..... | 27 |
| 3.1 ขั้นตอนการวิจัย..... | 28 |
| 3.1.1 การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณนับค่า (Tallies) F2 F4 และF8 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังหรือท่อ..... | 28 |
| 3.1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield) จากการทดลอง กับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล..... | 28 |
| 3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A..... | 28 |
| 3.2.1 แบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน..... | 28 |
| 3.2.2 แบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 29 |
| 3.2.3 โครงสร้างของแฟ้มข้อมูลนำเข้า (Input Files) ของคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A..... | 31 |
| 3.2.4 เงื่อนไขในการคำนวณแบบจำลอง..... | 34 |
| 3.3 การทดลอง..... | 34 |
| 3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย..... | 35 |
| 3.3.2 ขั้นตอนการหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ..... | 36 |
| 3.3.3 การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี..... | 37 |
| 4. ผลการจำลองและผลการทดลอง..... | 40 |
| 4.1 ผลการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณนับค่า (Tallies) จากแบบจำลองที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถัง..... | 40 |
| 4.1.1 ผลการคำนวณนับค่า F1 F2 และF8 จากแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน..... | 40 |
| 4.1.2 ผลการคำนวณนับค่า F1 F2 และF8 จากแบบจำลองท่อ ความยาว 20 เซนติเมตร..... | 44 |
| 4.2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield) จากการทดลอง กับผลการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล..... | 46 |
| 4.2.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่า F1 F2 และF8 กรณีถึงผสมมาตรฐาน..... | 47 |
| 4.2.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่า F1 F2 และF8 กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 50 |

สารบัญ(ต่อ)

บทที่

| | |
|--|----|
| 4.2.3 ผลการศึกษาแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่าจาก | |
| การคำนวณนับค่า F2 F4 F8 จากแบบจำลองถึงกวนผสม และแบบจำลองท่อ... | 53 |
| 4.3 การเปรียบเทียบเพื่อการทำนายค่าประสิทธิภาพการนับรังสี..... | 53 |
| 4.3.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากผลการจำลองกับผลการทดลอง..... | 54 |
| 4.3.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎีกับผลการทดลอง..... | 55 |
| 4.4 ผลการทำนายค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณด้วยแบบจำลอง..... | 56 |
| 5. สรุปการวิจัยและข้อเสนอแนะ..... | 58 |
| 5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย..... | 58 |
| 5.2 ข้อเสนอแนะ..... | 62 |
| รายการอ้างอิง..... | 65 |
| บรรณานุกรม..... | 67 |
| ภาคผนวก..... | 68 |
| ภาคผนวก ก..... | 69 |
| ภาคผนวก ข..... | 74 |
| ภาคผนวก ค..... | 77 |
| ภาคผนวก ง..... | 80 |
| ประวัติผู้เขียน..... | 83 |

สารบัญตาราง

| | หน้า |
|---|------|
| ตารางที่ 3.1 มิติของรูปทรงในแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน..... | 29 |
| ตารางที่ 3.2 มิติของรูปทรงในแบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 30 |
| ตารางที่ 4.1 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบ (K) กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน.... | 54 |
| ตารางที่ 4.2 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบ (K) กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 55 |
| ตารางที่ 4.3 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CM) กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน..... | 55 |
| ตารางที่ 4.4 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CF) กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 56 |



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

| | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 ภาพตัดขวางของเซลล์ที่มีความบางมากสำหรับการคำนวณนับค่า F2..... | 10 |
| รูปที่ 2.2 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาเพื่อหาเวลาที่จำเป็นในการผสมของเหลว(mixing time) | 20 |
| รูปที่ 2.3 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาเพื่อหาค่าเวลาที่สารอยู่ในระบบ (Residence time)..... | 21 |
| รูปที่ 2.4 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาเพื่อใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตรโดย วิธีการนับรังสีรวม (Total Counting Method)..... | 22 |
| รูปที่ 3.1 การจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบของระบบวัดรังสี ของแบบจำลองถังกวนผสมมาตรฐาน..... | 29 |
| รูปที่ 3.2 แสดงมิติของรูปทรงต่าง ๆ ในแบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 30 |
| รูปที่ 3.3 การจัดระบบวัดรังสีสำหรับหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ..... | 36 |
| รูปที่ 3.4 การจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุ และการจัดระบบวัดรังสี ในการทดลอง กรณีถังกวนผสมมาตรฐาน..... | 38 |
| รูปที่ 3.5 การจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุ และการจัดระบบวัดรังสี กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 39 |
| รูปที่ 4.1 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง เส้นผ่านศูนย์กลางของถัง กรณีถังกวนผสมมาตรฐาน..... | 41 |
| รูปที่ 4.2 แสดงตัวแปรที่ส่งผลต่อค่า F_G ของกรณีถังกวนผสมมาตรฐาน..... | 42 |
| รูปที่ 4.3 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 และค่าสัมประสิทธิ์ การลดทอนรวมทางทฤษฎี (MM) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง กรณีถังกวนผสมมาตรฐาน..... | 43 |
| รูปที่ 4.4 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลง เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 44 |
| รูปที่ 4.5 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อค่า F_G กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 45 |
| รูปที่ 4.6 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 และค่าสัมประสิทธิ์ การลดทอนรวมทางทฤษฎี (MF) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลาง ของท่อ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 46 |
| รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสีต่าง ๆ ($A_1 < A_2 < A_3$) กับค่า F2 กรณีถังผสมมาตรฐาน..... | 47 |

สารบัญภาพ(ต่อ)

| | หน้า |
|---|------|
| รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสีต่าง ๆ ($A1 < A2 < A3$) กับค่า F4 กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน..... | 48 |
| รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสีต่าง ๆ ($A1 < A2 < A3$) กับค่า F8 กรณีถึงผสมมาตรฐาน..... | 49 |
| รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสีต่าง ๆ ($A1 < A2 < A3$) และผลลัพธ์จากแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน..... | 50 |
| รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี 3 ระดับ ($A1 < A2 < A3$) กับ ค่า F2 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาดต่าง ๆ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 51 |
| รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี 3 ระดับ ($A1 < A2 < A3$) กับค่า F4 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาดต่าง ๆ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 51 |
| รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี 3 ระดับ ($A1 < A2 < A3$) กับค่า F8 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาดต่าง ๆ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 52 |
| รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี 3 ระดับ ($A1 < A2 < A3$) และผลการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 จากแบบจำลองท่อ ความยาว 20 เซนติเมตร..... | 52 |
| รูปที่ 4.15 ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ คำนวณจากการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 และจากสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน..... | 56 |
| รูปที่ 4.16 ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ คำนวณจากการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 และจากสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร..... | 57 |
| รูปที่ 5.1 ทางเลือกในการประมาณค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Y)..... | 59 |

บทที่ 1

บทนำ



1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การประยุกต์ใช้ไอโซโทปรังสีในงานอุตสาหกรรมสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทตามลักษณะของต้นกำเนิดรังสี^[1] คือ การประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดรังสีชนิดปิดผนึก (Sealed-source applications) และ การประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดรังสีชนิดไม่ปิดผนึก (Unsealed-source applications) การใช้สารรังสีติดตาม (Radioactive tracer) ตรวจสอบกระบวนการผลิต เป็นการประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดรังสีชนิดไม่ปิดผนึกประเภทหนึ่ง ซึ่งนำเอาไอโซโทปรังสีมาจัดเตรียมให้อยู่ในรูปที่เหมาะสม จากนั้นจึงฉีดหรือใส่ในกระบวนการผลิต

การตรวจวัดรังสีที่ตำแหน่งต่าง ๆ สามารถบอกให้ทราบถึงพารามิเตอร์บางอย่างของอุปกรณ์ในระบบการผลิตได้ ยกตัวอย่างเช่น^[2] ค่าเวลาที่จำเป็นในการกวนผสมสาร (Mixing time) ค่าเวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์ (Residence time) และการหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric Flow Rate Measurement) ด้วยวิธีการนับรังสีรวม (Total Count Method) ซึ่งข้อมูลที่ได้สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์นั้นให้สูงขึ้น และประหยัด นอกจากนี้สองวิธีการแรกยังสามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลที่ได้รับจากการนับรังสีตามช่วงเวลาที่ปฏิบัติงาน

ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ผู้ปฏิบัติงานต้องการฉีดเข้าไปในระบบโดยเฉพาะระบบการผลิตที่มีองค์ประกอบเป็นของเหลว ส่วนใหญ่ได้มาจากความชำนาญ หรือบางครั้งก็อาศัยการลองผิดลองถูกจนกว่าจะได้อัตรานับรังสีที่เหมาะสม ทั้งนี้เนื่องมาจากสารกัมมันตรังสีจะเคลื่อนที่และแพร่กระจายไปในระบบของเหลว ทำให้เกิดสถานะซึ่งแตกต่างจากการปรับเทียบตามปกติในห้องปฏิบัติการ ซึ่งในกรณีนี้สารกัมมันตรังสีมีลักษณะเป็นต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาตร (Volumetric Source) เป็นผลให้ลักษณะทางเรขาคณิตของต้นกำเนิดรังสีแตกต่างไปจากเดิมขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัตถุที่ห่อหุ้มของเหลวที่เป็นต้นกำเนิดรังสีนั้น รวมทั้งมีการดูดกลืนในตัวเอง (Self-absorption) ของรังสี ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิด/พลังงานของรังสี ชนิด/ปริมาณของวัสดุในระบบ และ

ลักษณะทางเรขาคณิตของระบบ การปรับเทียบสามารถทำได้แม้จะไม่สะดวกในทางปฏิบัติ แต่อาจสิ้นเปลืองเวลาและค่าใช้จ่ายสูง

ผลการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลสามารถช่วยในการประมาณค่าประสิทธิภาพในการวัดรังสี นั่นหมายถึง การประมาณความแรงรังสีของสารกัมมันตรังสีที่ต้องฉีดเข้าไปในระบบได้ ซึ่งค่าประสิทธิภาพการนับรังสีนั้นเป็นอัตราส่วนระหว่างอัตรานับรังสีกับอัตราการสลายตัวของสารรังสี แต่ในกรณีที่มีลักษณะทางเรขาคณิตของระบบเป็นสามมิติและมีความซับซ้อน การใช้วิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo method)^[3] จะช่วยให้การคำนวณสะดวกและเป็นไปตามหลักเกณฑ์ทางทฤษฎีฟิสิกส์ของอนุภาครังสี ซึ่งถือได้ว่าเป็นการทำการทดลองทางสถิติโดยการสุ่มทางเดินของอนุภาครังสี แล้วเก็บข้อมูลจากเฉพาะที่เกิดจากอนุภาคที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ที่สนใจ นำมาเฉลี่ยเพื่อประมาณค่าความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์นั้น ๆ ต่อหนึ่งอนุภาครังสีจากต้นกำเนิดรังสี

การวิจัยนี้เป็นจุดเริ่มต้นในการใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ที่มีชื่อว่า Monte Carlo N-particles Transport Code, MCNP^[4] เวอร์ชัน 4A ของ Radiation Shielding Information Center, RSIC ซึ่งเป็นโค้ดที่นิยมใช้ในการคำนวณทางวิศวกรรมนิวเคลียร์อย่างกว้างขวาง มาใช้ในการคำนวณประสิทธิภาพของการวัดรังสี เพื่อทำนายปริมาณสารกัมมันตรังสีที่ต้องฉีดเข้าไปในระบบที่ทำการศึกษา สำหรับการหาเวลาที่จำเป็นในการผสม การหาเวลาที่ของเหลวอยู่ในระบบ และการหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร โดยการฉีดสารรังสีติดตามที่มีไอโซโทปเทคนิคเนียม-99m (Technetium-99m, ^{99m}Tc) เข้าไปในระบบของเหลวที่เป็นน้ำ เนื่องจากไอโซโทปดังกล่าวมีค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสมคือ 6.02 ชั่วโมงซึ่งเป็นช่วงเวลาที่นานพอสำหรับการปฏิบัติงาน ในขณะที่เดียวกันก็สามารถสลายตัวลงในระดับเดียวกันกับระดับรังสีในสิ่งแวดล้อมในช่วงเวลาไม่นานหลังจากการปฏิบัติงาน และเป็นไอโซโทปที่มีใช้อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์ อีกทั้งยังอยู่ในรูปที่เหมาะสมคือสารละลายที่มีตัวทำละลายเป็นน้ำ เมื่อของเหลวผสมกันอย่างสมบูรณ์แล้ว และไม่เคลื่อนที่ (Static System) จึงทำการนับจำนวนนับรังสี ณ ช่วงพลังงานที่เป็นตำแหน่งยอดตามช่วงเวลาที่กำหนด เพื่อนำไปคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield)

1.2 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล^[5]

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล เป็นทางเลือกหนึ่งในการแก้ปัญหาทางด้านฟิสิกส์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการคำนวณด้านการเดินทางของอนุภาครังสี (Radiation Transport)^[6] เช่น โฟตอน อิเล็กตรอน และนิวตรอน โดยใช้วิธีการคำนวณรูปแบบต่าง ๆ ในการทำนายการเปลี่ยนแปลงจำนวนของอนุภาคที่ตำแหน่งเฉพาะภายในตัวกลางหรือวัตถุ เนื่องจากการทำอันตรกิริยาของ

อนุภาคเหล่านี้กับวัตถุเป็นลักษณะสุ่ม (Random) ซึ่งการสุ่มตัวอย่างโดยใช้กฎเกณฑ์ทางฟิสิกส์สามารถนำมาใช้สร้างทางเดินสุ่ม (Random walk) ของแต่ละอนุภาค และจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นกับอนุภาคเหล่านี้ จึงเรียกว่าเป็นการทดลองเชิงตัวเลข (Numerical experiment) หรือการจำลองเชิงตัวเลข (Numerical simulation)

โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP เวอร์ชัน 4A เป็นโค้ดที่ได้รับการพัฒนาจากศูนย์วิจัยนิวเคลียร์ Los Alamos National Laboratory ของประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งสามารถนำมาใช้แก้ปัญหาการเดินทางของอนุภาคโฟตอน อิเล็กตรอน^[7] และนิวตรอน หรือปัญหาที่มีการพิจารณาอนุภาครังสีเหล่านี้ควบคู่กัน นอกเหนือจากความสามารถในการคำนวณทางเดินสุ่มแบบสามมิติ และวิธีการคำนวณแบบต่าง ๆ เพื่อลดค่าความแปรปรวน (Variance Reduction)^[8] ของผลลัพธ์ซึ่งเทียบได้กับค่าเฉลี่ยทางสถิติ ที่มีอยู่ในโค้ดแล้ว โค้ดคอมพิวเตอร์นี้ยังประกอบด้วยเพิ่มข้อมูลของค่าภาคตัดขวาง (Cross-section Data Library) ของธาตุและไอโซโทปต่าง ๆ ที่ผู้ใช้สามารถเลือกใช้ให้เหมาะสมกับงานของตนได้ เพิ่มข้อมูลภาคตัดขวางเหล่านี้ได้รับการปรับปรุงเรื่อยมา พร้อมทั้งมีการศึกษาเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณกับการทดลองเพื่อยืนยันความน่าเชื่อถือของเพิ่มข้อมูลที่ปรับปรุงใหม่อย่างต่อเนื่องมาโดยตลอด^[9]

โค้ด MCNP ยังได้รับการทดสอบโดยแบ่งปัญหาที่ทดสอบออกเป็นประเภท คือ ปัญหาการคำนวณอนุภาคโฟตอน^[10] ปัญหาการคำนวณอนุภาคนิวตรอน^[11] และปัญหาการคำนวณค่าวิกฤต (Criticality Calculation)^[12] ผลการทดสอบเป็นที่น่าพอใจ โดยที่ผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยโค้ดนี้สามารถเทียบเคียงกับผลลัพธ์ที่ได้จากสมการ (Analytical Solution) หรือข้อมูลจากการทดลอง และให้ค่าผลลัพธ์ที่เทียบเคียงกันได้กับค่าจากโค้ดคอมพิวเตอร์อื่นที่ใช้วิธีมอนติคาร์โลในการคำนวณ โค้ด MCNP จึงได้รับการยอมรับให้เป็นเครื่องมือในการคำนวณทางด้านวิศวกรรมนิวเคลียร์ โดยเฉพาะการออกแบบการทดลองทางฟิสิกส์ เพื่อลดจำนวนการลองผิดลองถูกในขั้นตอนการเก็บข้อมูล^[13]

อย่างไรก็ตามการใช้งานโค้ด MCNP 4A นี้ผู้ใช้นอกจากจะต้องมีความรู้ทางด้านทฤษฎีของอนุภาคนิวเคลียร์แล้ว ยังต้องมีประสบการณ์ในการทดลองมากพอสมควร จึงจะสามารถเชื่อถือผลการคำนวณได้ เพราะการคำนวณต่าง ๆ จะต้องอาศัยการจัดระบบวัดรังสีเช่นเดียวกับการทดลองจริง วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นงานวิจัยแรกที่ทำโค้ดนี้มาใช้ จึงเริ่มศึกษากับระบบที่ไม่ซับซ้อนมากนัก เพื่อให้สามารถตรวจสอบผลที่ได้จากการทดลองจริงและการคำนวณ จึงเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานกับระบบที่ซับซ้อนต่อไป

1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อใช้โค้ด MCNP 4A ทำนายผลของความแรงรังสีแกมมา จากสารรังสีติดตามในระบบของเหลวที่จำลองขึ้น

1.4 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

1.4.1 ใช้โค้ด MCNP 4A ทำนายผลของความแรงรังสีของสารรังสีติดตามบางชนิด ที่มีต่อการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร (Volumetric flow rate) การหาเวลาที่ใช้ในการผสมของเหลว (Mixing time) และการหาเวลาที่สารรังสีติดตามอยู่ในระบบ (Residence time) เมื่อสารรังสีผสมอย่างสมบูรณ์ในระบบและไม่เคลื่อนที่

1.4.2 พัฒนาโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้ (User interface program) เพื่อช่วยในการจำลองระบบด้วยโปรแกรม MCNP 4A

1.4.3 พัฒนาวิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ จากความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลที่ได้จากการจำลองและค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลอง

1.5 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

1.5.1 พัฒนาโครงสร้างของแฟ้มข้อมูลนำเข้า (Input files) สำหรับโค้ด MCNP

1.5.2 พัฒนาโปรแกรมสำหรับติดต่อกับผู้ใช้ เพื่อช่วยในการจำลองระบบด้วยโค้ด MCNP

1.5.3 ศึกษาแนวโน้มของค่าจากการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหรือท่อ และเปรียบเทียบกับค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลอง

1.5.4 พัฒนาวิธีการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ เพื่อนำไปใช้ประมาณค่าความแรงรังสีของสารรังสีติดตามที่ให้ค่าอัตรานับรังสีที่ต้องการ

1.5.5 สรุปผลการวิจัยถึงความเป็นไปได้ในการใช้งาน และเขียนวิทยานิพนธ์

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

สามารถใช้ข้อมูลจากการทำนายผลของความแรงรังสีของสารรังสีแกมมาติดตาม ในการเลือกความแรงรังสีที่เหมาะสมในการปฏิบัติงาน เพื่อให้ได้ข้อมูลจำนวนนับรังสีที่ต้องการ ลดความเสี่ยงทางรังสี และเป็นแนวทางในการนำโค้ด MCNP 4A ไปใช้ในการคำนวณด้านอื่น ๆ



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล^[4]

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลทางการเดินทางของอนุภาครังสี (Radiation Transport) คือการสร้างทางเดินสุ่ม(Random walk) ของอนุภาครังสี เพื่อเก็บข้อมูลจากแต่ละอนุภาคมาหาค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ พร้อมทั้งทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของค่าดังกล่าวโดยใช้วิธีทางสถิติ ในระบบวัดรังสีนั้น อนุภาครังสีจะเคลื่อนที่แบบสุ่มผ่านวัสดุภายในระบบ และเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของวัสดุนั้น ซึ่งจะมีเพียงอนุภาครังสีบางส่วนที่สามารถเข้าสู่หัววัดรังสี เกิดเป็นสัญญาณที่แสดงออกทางเครื่องมือวัดรังสีในรูปของจำนวนนับรังสี พฤติกรรมเหล่านี้ของอนุภาครังสีสามารถทำนายได้โดยใช้ทฤษฎีความน่าจะเป็น และกฎทางฟิสิกส์รังสีในมุมมองระดับอนุภาค ในการจำลองระบบวัดรังสีนี้การสุ่มตัวอย่างจะทำโดยใช้เครื่องกำเนิดตัวเลขสุ่ม (Random Number Generator) จำนวนชุดของตัวเลขสุ่ม แล้วจึงนำค่าตัวเลขสุ่มแต่ละค่าไปคำนวณตามความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ทำให้เกิดเหตุการณ์สุ่ม แล้วจึงเลือกเฉพาะเหตุการณ์ที่สนใจนำมาคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นเฉลี่ยของเหตุการณ์นั้นตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ โดยค่าที่ได้จะเป็นค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ ต่อหนึ่งอนุภาคที่กำเนิดจากต้นกำเนิดรังสี

2.1.1 เครื่องกำเนิดตัวเลขสุ่ม (Random Number Generator)

โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP 4A ใช้ความสัมพันธ์ต่อไปนี้ในการคำนวณค่าของตัวเลขสุ่ม (Random Number)

$$\xi_{n+1} = \text{mod}(A \xi_n) \quad 2.1$$

โดยที่ ξ_n คือตัวเลขสุ่มขนาด 64 บิตซึ่งเป็นค่าเริ่มต้นในการคำนวณ A คือค่าตัวคูณที่เป็นตัวเลข 64 บิตสำหรับคูณกับตัวเลขสุ่มค่าเริ่มต้น ทำให้ได้ผลคูณเป็นตัวเลขขนาด 128 บิต และ ξ_{n+1} คือตัวเลข

สุ่มค่าถัดมาที่มีขนาด 64 บิตซึ่งได้จากการเลือกค่าตัวเลข 64 บิตท้ายของผลคูณดังกล่าว นำมาคำนวณให้มีค่าผลลัพธ์อยู่ในช่วงศูนย์ถึงหนึ่ง

2.1.2 วิธีสุ่มตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่างในวิธีการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลมีวิธีพื้นฐานอยู่ 2 วิธี^[3] คือ การสุ่มตัวอย่างโดยวิธีการละทิ้งค่าที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข (Rejection Method) และวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยตรง (Direct Sampling Method) ทั้งสองวิธีนี้ประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อคำนวณค่าสุ่มของความสัมพัทธ์ที่ซับซ้อน โดยอาศัยขั้นตอน (Algorithm) และวิธีการคำนวณเฉพาะของความสัมพัทธ์นั้น

การสุ่มหาตำแหน่งของอนุภาคที่กำเนิดภายในต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร เป็นตัวอย่างหนึ่งของการใช้วิธีการละทิ้งค่าที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไขในการสุ่มตัวอย่าง ในกรณีต้นกำเนิดรังสีที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ค่าพิกัดของตำแหน่ง (x, y, z) ในทรงกลมจะถูกสุ่มโดยใช้ชุดของตัวเลขสุ่มสามค่าซึ่งเป็นผลลัพธ์จากการคำนวณสมการ 2.1 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 เป็นตัวอย่างหนึ่งของการสุ่มตัวอย่างโดยตรง โดยการพิจารณาความน่าจะเป็นที่อนุภาคหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทาง x ก่อนจะเกิดการชนเป็นครั้งแรกในระยะเวลา dx จะสามารถเขียนเป็นความสัมพัทธ์ได้ดังนี้

$$p(x)dx = \sigma_t e^{-\sigma_t x} dx \quad 2.2$$

โดยที่ค่า σ_t เป็นค่าภาคตัดขวางรวม (total cross section) ของอนุภาคตัวกลาง และ $p(x)$ เป็นความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function) ที่อนุภาครังสีจะทำอันตรกิริยากับตัวกลางเมื่ออนุภาคนั้นเคลื่อนที่ในตัวกลางเป็นระยะทาง x จากนิยามของความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับตัวแปรชนิดต่อเนื่องมีคุณสมบัติดังนี้คือ

$$\int_0^{\infty} p(x) dx = 1. \quad 2.3$$

เมื่อกำหนดให้

$$\xi = P(x) = \int_0^x p(x') dx' \quad 2.4$$

ดังนั้น $P(x)$ คือความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะเกิดการชนกับตัวกลางในระยะทาง x คำนวณได้ดังนี้

$$\xi = P(x) = \int_0^x \sigma_T e^{-\sigma_T x'} dx' = 1 - e^{-\sigma_T x}. \quad 2.5$$

ในมุมมองระดับอนุภาค การสุ่มตัวอย่างระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ จะใช้ความสัมพันธ์นี้

$$x = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(1 - \xi). \quad 2.6$$

แต่เนื่องจากค่า ξ เป็นตัวเลขสุ่มจึงไม่แตกต่างกับค่า $(1 - \xi)$ เพราะเป็นค่าตัวเลขสุ่มที่มีค่าระหว่างศูนย์และหนึ่ง ระยะดังกล่าวจึงสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$x = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(\xi) \quad 2.7$$

ในการสุ่มหาชนิดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นเนื่องจากการชนของอนุภาคกับตัวกลาง สามารถทำได้โดยใช้ตัวเลขสุ่มหนึ่งค่า ยกตัวอย่างเช่น แบบจำลองหนึ่งมีการพิจารณาเพียง 2 อันตรกิริยา คือ อันตรกิริยาการกระเจิง (Scattering) และอันตรกิริยาการดูดซับ (Absorption) ซึ่งเป็นผลให้ค่าภาคตัดขวางรวม (total cross section σ_t) $\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a$ เมื่อค่าตัวเลขสุ่ม $\xi_i < \sigma_s / \sigma_t$ อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคือ อันตรกิริยาการกระเจิง ในทางกลับกัน เมื่อ $\xi_i > \sigma_s / \sigma_t$ จะเกิดอันตรกิริยาการดูดซับ

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

งานของอนุภาคสามารถเลือกสุ่มได้จากสเปกตรัมที่กำหนด แต่ละอนุภาคที่ทำการจำลองจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Particle Weight W) ณ จุดเริ่มต้นเมื่อไม่มีการปรับแก้ (bias) ใด ๆ จะมีค่าเท่ากับหนึ่ง ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักนี้แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคจริงกับจำนวนอนุภาคที่สุ่มตัวอย่างขึ้น ดังนั้นเมื่อมีการปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนัก ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทุกครั้งจะได้รับการปรับแก้กลับโดยให้มีความเท่ากับผลที่ได้จากหนึ่งอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสี นอกจากนี้วิธีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักยังสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคำนวณในกรณีของแบบจำลอง Non-analog ที่เน้นการปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง โดยไม่เน้นการคำนวณตามกฎทางฟิสิกส์ของรังสี แต่ผู้ใช้จะต้องทำการชดเชยส่วนที่เบี่ยงเบนไปจากการคำนวณด้วยกฎทางฟิสิกส์ เพื่อไม่ให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงหรือบิดเบือนไปจากทฤษฎี แต่การคำนวณจะเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่วนการสุ่มระยะทางที่รังสีเคลื่อนไปในตัวกลางจะใช้ความสัมพันธ์ที่ได้จากวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยตรงที่ได้กล่าวไว้ในตอนต้น

การคำนวณค่ามุม และค่าพลังงานของอนุภาครังสีหลังจากการทำอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลาง อาศัยสูตรของ Klein-Nishina^[4] ในการคำนวณด้วยวิธีการที่ซับซ้อน ซึ่งใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างพื้นฐานทั้งสองแบบเพื่อสุ่มตัวอย่างทิศทาง และค่าพลังงานของอนุภาครังสีหลังจากทำอันตรกิริยา ซึ่งกรณีที่เกิดอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary Particle) จากอันตรกิริยา ค่าถ่วงน้ำหนัก (W) ของอนุภาคปฐมภูมิจะถูกปรับลดตามสัดส่วนของค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยานั้น อนุภาคทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจึงมีค่าถ่วงน้ำหนักตามค่าที่ถูกปรับลดออกจากอนุภาคปฐมภูมิ เนื่องจากการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นทำการคำนวณทีละอนุภาค แต่ละอนุภาคจึงสามารถจำลองได้โดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขที่หลากหลาย ซึ่งทำให้การสิ้นสุดการคำนวณของแต่ละอนุภาคจึงเป็นไปได้หลายแบบ เช่น เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ที่ว่าง (void) ซึ่งทำให้ไม่มีโอกาสเกิดอันตรกิริยาเพื่อหันเหทิศทางการเคลื่อนที่กลับมายังบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (Tally Region) อนุภาคนั้นจะสูญหายจากระบบ (loss by escape) หรือ กรณีอนุภาคที่เกิดอันตรกิริยาแล้วทำให้ค่าถ่วงน้ำหนักมีค่าต่ำมาก หรือ ค่าพลังงานของอนุภาคมีค่าต่ำมาก (Particle's Weight cut off or Particle's Energy cut off) การคำนวณจะสิ้นสุดลง สำหรับโค้ด MCNP ผู้ใช้สามารถกำหนดเงื่อนไขเหล่านั้นได้

2.1.3 ตัวประมาณค่า (Estimators)

ตัวประมาณค่าจะทำหน้าที่คำนวณปริมาณที่กำหนดเงื่อนไขไว้ เมื่ออนุภาคเคลื่อนเข้ามายังบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (Tally Region) สำหรับการคำนวณการเดินทางของอนุภาครังสีด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นมีตัวประมาณค่าอยู่ 5 ประเภท^[3] คือ ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว (Surface

Estimator) ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์ (Event Estimator) ตัวประมาณค่าจากความยาวของเส้นทาง (Track Length Estimator) ตัวประมาณค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย (Next-event Estimator) และการคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (Pulse Height Tally)

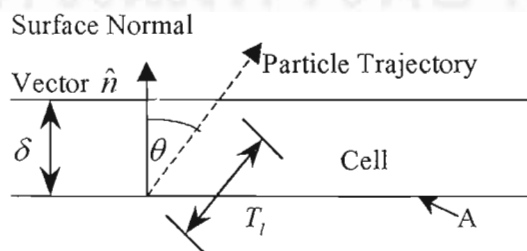
2.1.3.1 ตัวประมาณค่าบนพื้นผิว (Surface estimator :F1, F2 Tallies)

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

$$F1 = \int_A \int_{\mu} \int_t \int_E J(\vec{r}, E, t, \mu) dE dt d\mu dA \quad 2.8$$

เมื่อ $J(\vec{r}, E, t, \mu) = |\mu| \Phi(\vec{r}, E, t, \mu) A$ เป็นกระแสของอนุภาคเคลื่อนที่ในแนวที่ขนานกับเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิว A ขณะที่ค่า μ ($\mu = \cos \theta$) นั้นคำนวณจากมุมที่เส้นทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค ทำมุมกับเวกเตอร์ซึ่งตั้งฉากกับพื้นผิว 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 2.1 ภาพตัดขวางของเซลล์ที่มีความบางมากสำหรับการคำนวณนับค่า F2

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

$$= \frac{\left(\frac{W\delta}{|\cos\theta|} \right)}{(A\delta)} = \frac{W}{(A|\mu|)} \quad 2.9$$

เมื่อความหนาของเซลล์ δ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ ปริมาตรของเซลล์จะมีค่าเข้าใกล้ $A\delta$ และความยาวเส้นทางการเคลื่อนของอนุภาค (track length) จะมีค่าเข้าใกล้ $\delta/|\mu|$ โดยที่ค่า μ ($\mu = \cos\theta$) คำนวณจากค่ามุมระหว่างเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวกับวิถีการเคลื่อนที่ของอนุภาค ค่า W เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก (particle weight) ซึ่งใช้แทนจำนวนอนุภาคที่จำลอง ผลลัพธ์จากทางเดินสุ่มทุกครั้งจะคำนวณให้เทียบกับอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสีหนึ่งอนุภาค วิธีการคำนวณนี้ยังสามารถใช้ในการคำนวณหาพื้นที่ของพื้นผิวโดยอาศัยการคำนวณสุ่ม (stochastic calculation of surface areas) เมื่อวิธีการปกติไม่สามารถทำได้

2.1.3.2 ตัวประมาณค่าตามเหตุการณ์ (Event estimator: F6, F7 Tallies)

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

2.1.3.3 ตัวประมาณค่าจากความยาวของเส้นทาง (Track Length Estimator: F4 Tally)

ตัวประมาณค่าชนิดนี้ ใช้ในการคำนวณค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์ที่กำหนด โดยค่าฟลักซ์นิยามจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\Phi = \eta\nu \quad 2.10$$

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

$$\int \Phi dt = \eta v dt = \left(\frac{W}{V} \right) \left(\frac{dl}{dt} \right) dt = W \frac{dl}{V} \quad 2.11$$

โดยที่ค่า dl คือความยาวของเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ไปได้ก่อนจะเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในเซลล์ หรือก่อนที่อนุภาคจะเคลื่อนที่ข้ามผ่านพื้นผิวของเซลล์ ค่า W เป็นค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค (particle weight) ค่า V คือปริมาตรของเซลล์ ค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์จึงคำนวณจากความยาวของเส้นทางเดินของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเซลล์

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนต้นว่า การคำนวณนับค่าบนพื้นผิว F2 เป็นกรณีพิเศษของการคำนวณนับค่าแบบ F4 เมื่อพิจารณาเซลล์ในรูปที่ 2.1 ดังนี้ เซลล์หนึ่งมีปริมาตรเท่ากับ V ซึ่งมีลักษณะบางมาก ปริมาตรจึงคำนวณได้จากผลคูณ $A\delta$ โดยที่ δ เป็นความหนาของเซลล์และ A เป็นพื้นที่ผิวของเซลล์ เมื่อกำหนดให้ความยาวของเส้นทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในเซลล์ (track length) มีค่าเท่ากับ dl (ซึ่งก็คือ T_1 ในรูปที่ 2.1) ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ค่า δ/μ โดยที่ค่า μ เป็นค่าโคไซน์ของมุมระหว่างเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับพื้นผิวของเซลล์กับวิธีการเคลื่อนที่ของอนุภาค การประมาณค่าดังกล่าวมาทั้งหมดเขียนเป็นสัญลักษณ์ได้ดังนี้

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

2.1.3.4 ตัวประมาณค่าชนิดกำหนดเป้าหมาย (Next-event estimators: F5 Tally)

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

$$\Phi = \frac{W e^{-\sigma r x} 2 p(\mu)}{4\pi R^2} \quad 2.12$$

โดยที่ค่า $e^{-\sigma_T x}$ เป็นค่าที่แสดงถึงการลดทอนของรังสีผ่านวัสดุต่าง ๆ ก่อนที่อนุภาคเสมือนจะเคลื่อนที่ตรงไปยังตำแหน่งที่เป็นหัววัดรังสี ส่วนค่า $2p(\mu)$ เป็นความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่อนุภาคเสมือนนี้จะกระเจิงไปในทิศทางที่ตรงไปสู่ตำแหน่งของหัววัดรังสี ซึ่งค่า μ เป็นค่าโคไซน์ของมุมระหว่างวิถีของอนุภาคที่เข้าทำอันตรกิริยากับวิถีของอนุภาคเสมือนที่มุ่งตรงไปยังจุดที่เป็นตำแหน่งของหัววัดรังสี และค่า $4\pi R^2$ ที่นำไปหารเพื่อแสดงผลของการลดทอนเนื่องจากมุมตัน (solid angle attenuation) โดยมีค่า R คือ ระยะทางจากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยากับตำแหน่งของหัววัดรังสี ซึ่งเป็นเหตุการณ์ถัดมา (next-event) จากวิธีการคำนวณดังกล่าวทำให้ตัวประมาณค่าชนิดนี้ สามารถทำให้เกิดการคำนวณนับค่า ณ ตำแหน่งที่เป็นหัววัดรังสีทุกครั้งที่อนุภาครังสีเกิดอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลางที่ตำแหน่งใด ๆ ในระบบ การคำนวณนับค่าจึงเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ คือจะได้ผลลัพธ์ทุกครั้งที่อนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง

2.1.3.5 การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (Pulse Height Tally: F8 Tally)

การคำนวณนับค่าประเภทนี้ จะแสดงผลลัพธ์เป็นการแจกแจงพลังงานของอนุภาคภายในเซลล์ที่กำหนด ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในหัววัดรังสี ปริมาณของพลังงานที่ถูกดูดซับภายในเซลล์สามารถคำนวณได้โดยการคูณผลลัพธ์ของแต่ละอนุภาคกับค่าพลังงานของอนุภาคนั้นเอง การคำนวณนับค่านี้จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี และการคำนวณจะดำเนินต่อไปเมื่ออนุภาครังสีเคลื่อนที่ข้ามผ่านพื้นผิวของเซลล์ใด ๆ

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

2.1.4 การประมาณค่าความผิดพลาด (Estimation of Errors)

ข้อด้อยประการสำคัญของวิธีมอนติคาร์โล คือการเข้าสู่ของคำตอบที่มีช่วงของความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้นั้นต้องอาศัยการคำนวณข้อมูลเป็นจำนวนมาก เพื่อสุ่มตัวอย่างให้ได้จำนวนข้อมูลมากพอที่จะคำนวณให้ได้ผลลัพธ์เป็นค่าสถิติที่มีคุณภาพ การประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) จึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งทำได้โดยการพิจารณาทฤษฎีความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มต่อเนื่องต่อไปนี้

$$\int f(x) dx = 1 \quad 2.13$$

ค่า $f(x)$ เป็นความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของปัญหาที่ใช้วิธีมอนติคาร์โลในการคำนวณ ซึ่งค่าอินทิกรัล หรือค่าความน่าจะเป็นนั้นมีค่าสูงสุดเท่ากับหนึ่ง ในที่นี้ค่า $f(x)$ เป็นตัวแทนความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นทั้งหมดในระบบวัดรังสีเข้าไว้ได้ด้วยกัน

การคำนวณนับค่าด้วยวิธีมอนติคาร์โลจะประเมินค่าเฉลี่ยของความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่เป็นปัญหา ซึ่งในทางทฤษฎีใช้ความสัมพัทธ์ต่อไปนี้

$$M_1 = \int x f(x) dx \quad 2.14$$

ค่า M_1 เรียกว่าค่าคาดหมาย (Expected Value) หรือค่าเฉลี่ยของการคำนวณนับค่า (Tally Mean) ซึ่งเป็นค่าที่คำนวณจากโมเมนต์อันดับที่หนึ่งของความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ในการจำลองระบบวัดรังสีด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้น ค่าคาดหมาย \bar{x} เป็นค่าเฉลี่ยที่คำนวณจากผลลัพธ์ของแต่ละค่าของการคำนวณนับค่า x_i จากแต่ละอนุภาคเป็นจำนวนทั้งสิ้น N อนุภาค ดังนั้น

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum x_i \quad 2.15$$

ในทางทฤษฎีโมเมนต์อันดับสองของความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น ซึ่งจะนำไปใช้ประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์คำนวณได้ดังนี้

$$M_2 = \int x^2 f(x) dx \quad 2.16$$

ในขณะที่ วิธีมอนติคาร์โลคำนวณค่าดังกล่าวจากกลุ่มอนุภาคตัวอย่างโดย

$$\overline{x^2} = \frac{1}{N} \sum x_i^2 \quad 2.17$$

ทฤษฎีลิมิตสู่ศูนย์กลางกล่าวว่า การกระจายตัวของค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง (estimated mean) \bar{x} ซึ่งคำนวณจากการสุ่มตัวอย่าง x_i ที่เป็นอิสระต่อกัน จะเป็นการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) เมื่อจำนวนตัวอย่าง N ที่ทำการสุ่มเลือกมีค่ามาก หรือ

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\{M_1 - aS \leq \bar{x} \leq M_1 + bS\} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_a^b e^{-t^2/2} dt \quad 2.18$$

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

$$\begin{aligned} \sigma^2 &= \int_{-\infty}^{\infty} (x - M_1)^2 f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) dx - 2M_1 \int_{-\infty}^{\infty} x f(x) dx + M_1^2 \int_{-\infty}^{\infty} f(x) dx = M_2 - M_1^2 \end{aligned} \quad 2.19$$

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของกลุ่มตัวอย่าง S สัมพันธ์กับค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของประชากรดังนี้

$$S = \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \quad 2.20$$

วิธีมอนติคาร์โลประมาณค่าของความแปรปรวนของประชากรโดย

$$\sigma^2 = \overline{x^2} - \bar{x}^2 \quad 2.21$$

ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Relative Error) นิยามโดยความสัมพัทธ์ต่อไปนี้

$$R = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{N}}. \quad 2.22$$

จากสมการแสดงให้เห็นว่าค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์แปรผกผันกับค่ารากที่สองของจำนวนอนุภาคที่สุ่มตัวอย่าง N ซึ่งความสัมพัทธ์ที่จะพิสูจน์ต่อไปนี้จะแสดงถึงผลของผลลัพธ์ x_i แต่ละค่า ที่มีต่อค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์

$$\begin{aligned} R &= \frac{\sigma}{\bar{x}\sqrt{N}} = \frac{\sqrt{x^2 - \bar{x}^2}}{\bar{x}\sqrt{N}} \\ &= \sqrt{\frac{x^2}{\bar{x}^2 N} - \frac{1}{N}} = \sqrt{\frac{\sum x_i^2}{(\sum x_i)^2} - \frac{1}{N}}. \end{aligned} \quad 2.23$$

2.1.5 การลดค่าความแปรปรวน (Variance Reduction)

การลดความแปรปรวนของผลลัพธ์จากการคำนวณทำได้ 4 วิธี^[3] คือ การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญ (Problem truncation) การควบคุมจำนวนอนุภาคในแต่ละเซลล์ (Population control) การปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง (Modified sampling) และการเพิ่มการสุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณโดยตรง (Pseudo-deterministic methods)

2.1.5.1 การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญ (Problem truncation)

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

2.1.5.2 การควบคุมจำนวนอนุภาคในแต่ละเซลล์ (Population control)

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

ในทางตรงกันข้ามเงื่อนไขของรัสเซียรูเล็ตต์ (Russian Roulette) ซึ่งกำหนดเงื่อนไขเพื่อลดจำนวนอนุภาคให้น้อยลงแต่อนุภาคที่เหลือจะได้รับการปรับค่าถ่วงน้ำหนักให้มากขึ้นเพื่อชดเชยกัน มีตัวอย่างดังนี้ อนุภาคที่อยู่ในบริเวณที่มีการกำหนดค่าความสำคัญ (important) ให้ลดลงสองเท่าจากค่าปกติ ความน่าจะเป็นที่การคำนวณของอนุภาคนี้จะสิ้นสุดลงจะถูกกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 0.5 แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคจะเพิ่มเป็นสองเท่าจากค่าเดิม ซึ่งในที่สุดผลลัพธ์จากการคำนวณนับจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่จำนวนอนุภาคที่ต้องคำนวณในบริเวณที่ไม่สำคัญจะลดลง

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

2.1.5.3 การปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง (Modified sampling)

เป้าหมายของวิธีการนี้คือการปรับเปลี่ยนความสัมพัทธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability density function) ที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง จากนั้นจึงปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อชดเชยให้ค่าผลลัพธ์คงเดิม ตัวอย่างเช่น การสุ่มตัวอย่างโดยเพิ่มระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ (Path length stretching sampling) ซึ่ง ค่าภาคตัดขวางรวมที่ปรับแก้แล้ว (Modified total cross section σ'_T) จะนำมาใช้แทนค่าจริง σ_T ทำให้ระยะการเคลื่อนที่เดิมที่คำนวณจากความสัมพัทธ์

$$x = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(\xi) \quad 2.24$$

เปลี่ยนไปเป็น

$$x = -\frac{1}{\sigma'_T} \ln(\xi) \quad 2.25$$

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

$$\begin{aligned} W' &= W \frac{p(x)}{p'(x)} \\ &= W \frac{\sigma_T e^{-\sigma_T x}}{\sigma'_T e^{-\sigma'_T x}} \\ &= W \frac{\sigma_T}{\sigma'_T} e^{(\sigma'_T - \sigma_T)x} \end{aligned} \quad 2.26$$

ตัวอย่างอื่น ๆ ของวิธีการนี้มีดังนี้ คือ การเพิ่มโอกาสของการชนกันของอนุภาค (Forced collision) การปรับเงื่อนไขการชนด้วยค่าพลังงาน (Collision energy bias)^[14] การปรับเงื่อนไขการชนด้วยค่ามุมที่อนุภาคทำอันตรกิริยา (Collision angle bias) และการปรับเงื่อนไขเพื่อเน้นให้เกิดการเลือกทำปฏิกิริยา (Reaction selection bias)

2.5.1.4 การเพิ่มการสุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณโดยตรง (Pseudo-deterministic methods)

วิธีการนี้จะใช้เพื่อเน้นให้เกิดการสุ่มตัวอย่างของอนุภาคในบริเวณที่มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเซลล์อื่น ๆ ในระบบ ตัวอย่างของวิธีการนี้ คือการใช้วิธีการคำนวณการเดินทางของรังสีโดยตรง (Deterministic transport or “DXTRAN”) ซึ่งจะมีการสร้างเซลล์ที่เป็นทรงกลมขนาดเล็ก (“DXTRAN” sphere) ห่อหุ้มบริเวณดังกล่าวไว้ เมื่อใดก็ตามที่อนุภาครังสีทำอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลางภายนอกทรงกลมนี้ จะเกิดอนุภาค “DXTRAN” เคลื่อนที่โดยปราศจากการชนตรงไปยังพื้นผิวของทรงกลม ซึ่งหลังจากเข้าสู่ทรงกลมการสุ่มเส้นทางเดินของอนุภาครังสีภายใน

ในทรงกลมจะดำเนินไปโดยปกติ แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคที่บริเวณผิวทรงกลมจะคำนวณจากสูตรของวิธีคำนวณน้ำหนักแบบกำหนดเป้าหมาย (F5) ดังนี้

$$\frac{We^{-\sigma r^x} 2 p(\mu)}{4\pi R^2}$$

เมื่ออนุภาคใดเคลื่อนที่ด้วยเส้นทางเดินสุ่ม (Random walk) ตรงไปยังทรงกลมที่กำหนดไว้ การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลง เพื่อให้ค่าถ่วงน้ำหนักรวมของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง วิธีการนี้จึงทำให้เกิดทางเดินสุ่มภายในบริเวณที่กำหนด โดยมีการสุ่มตัวอย่างในบริเวณดังกล่าว ทุกครั้งที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาครังสีกับอนุภาคของตัวกลาง

2.1.6 ธรรมเนียมแสดงคุณภาพของการคำนวณ (MCNP Figure of Merit FOM)

โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP นิยามตัวเลขที่แสดงถึงคุณภาพในการคำนวณดังนี้

$$FOM \equiv \frac{1}{R^2 T} \tag{2.27}$$

โดยที่ค่า R เป็นค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ ซึ่งค่ายกกำลังสองของค่า R จะแปรผกผันกับจำนวนอนุภาคที่ทำการสุ่มตัวอย่าง N ส่วนค่า T เป็นเวลาที่เครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณมีหน่วยเป็นนาฬิกา ค่า T นี้จะแปรผันตรงกับค่า N ดังนั้นในการคำนวณแต่ละครั้ง ค่าธรรมเนียมแสดงคุณภาพของการคำนวณ (FOM) ควรจะมีค่าคงที่

ค่า FOM เป็นตัวบ่งชี้ถึงความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณน้ำหนัก ซึ่งค่า FOM ควรจะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ ยกเว้นในช่วงต้นของการคำนวณที่ค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากจำนวนข้อมูลยังน้อย และใช้เป็นตัวเลขบ่งชี้ถึงคุณภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณโดยการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อช่วยลดค่าความแปรปรวน (Variance reduction techniques)^[8] ของผลลัพธ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการนั้น เพื่อให้ได้สถานะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum) ในทางปฏิบัติการทดสอบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าว ทำได้โดยการคำนวณด้วยช่วงสั้น ๆ เพื่อนำค่า FOM ของแต่ละกรณีมาเปรียบเทียบกัน ซึ่งกรณีใดที่ให้ค่า FOM ที่มีค่ามากจะเป็นการคำนวณที่มีคุณภาพดี นอก

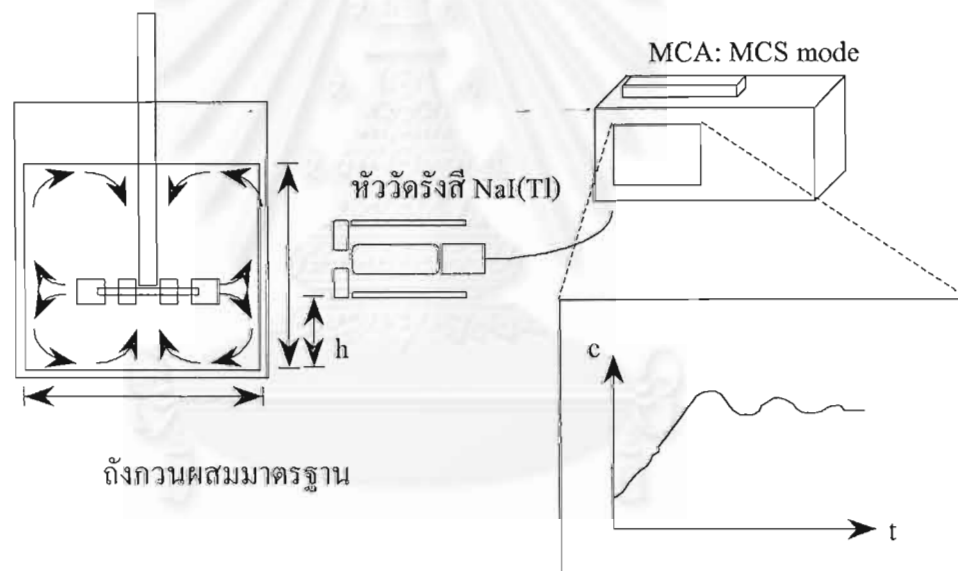
จากนี้ ค่า FOM ยังนำมาใช้ประมาณเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ตามที่ต้องการ โดยใช้สมการ 2.27 ในการคำนวณ

2.2 การประยุกต์ใช้สารรังสีติดตาม (Radioactive Tracer Application)¹²⁾

2.2.1 ตัวอย่างการประยุกต์ใช้สารรังสีติดตาม

2.2.1.1 การหาเวลาที่จำเป็นในการผสมสาร (Mixing Time)

เป็นวิธีที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพในการผสมของอุปกรณ์ผสมสาร ซึ่งเป็นกระบวนการแบบงวด (Batch process) การจัดระบบวัดรังสีแกมมาเป็นดังรูปที่ 2.2

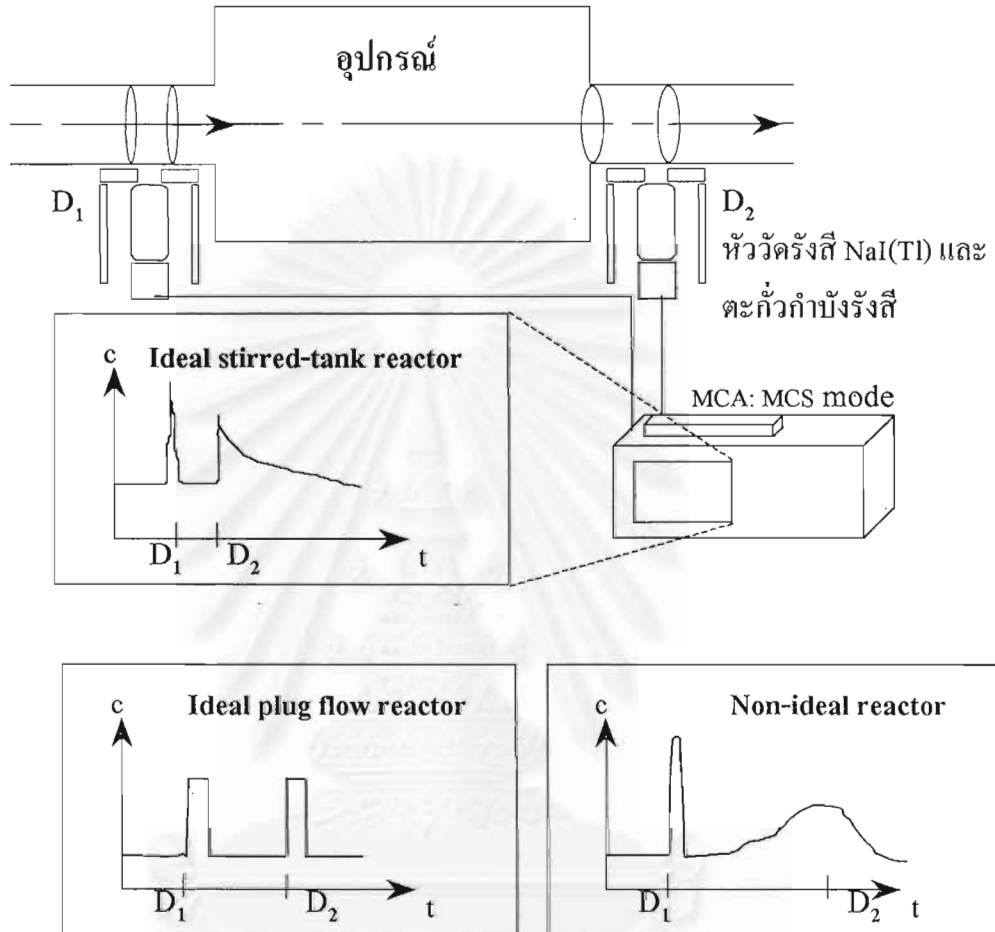


รูปที่ 2.2 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาเพื่อหาเวลาที่จำเป็นในการผสมของเหลว

2.2.1.2 การหาเวลาที่สารอยู่ในระบบ (Residence time)

เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการตรวจสอบกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous process) โดยข้อมูลเกี่ยวกับเวลาที่สารอยู่ในระบบ และลักษณะของเส้นกราฟซึ่งแสดงปริมาณของสารในรูปของจำนวนนับรังสีที่เวลาต่าง ๆ ตอนออกจากระบบ จะถูกนำมาเปรียบเทียบกับเส้น

กราฟที่ได้จากระบบเดียวกัน เมื่อยังไม่มีคามผิดปกติเกิดขึ้น เพื่อวิเคราะห์หาสาเหตุของความผิดปกติ ลักษณะของการจัดระบบวัดรังสีจะเป็นดังรูปที่ 2.3

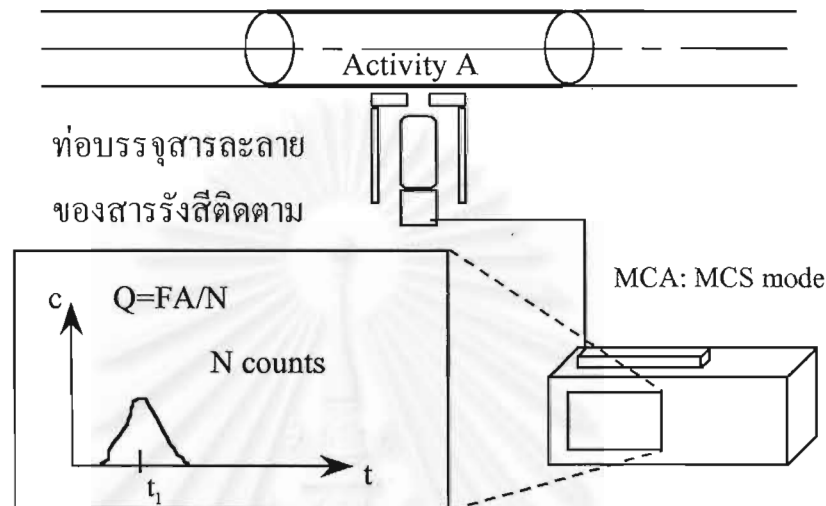


รูปที่ 2.3 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาเพื่อหาค่าเวลาที่สารอยู่ในระบบ

2.2.1.3 การหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร โดยวิธีการนับรังสีรวม (Total Count Method)

เป็นวิธีการวัดอัตราการไหลของของเหลว โดยใช้ค่าปรับเทียบที่คำนวณจากจำนวนนับรังสีในช่วงเวลาหนึ่งของสารละลายของของเหลวกับสารรังสีติดตามที่หยุดนิ่งในระบบที่มีการจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต (Geometry) แบบเดียวกันกับการปฏิบัติงานจริง ซึ่งทราบค่าปริมาตร ความแรงรังสีของสารละลายที่แน่นอน ค่าดังกล่าวเรียกว่า ค่าประสิทธิภาพการนับรังสี ต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลว (Counting yield per unit volume of source, F) จะคำนวณจาก

อัตราการนับรังสีหารด้วย ความแรงรังสีต่อปริมาตรของสารละลายที่ใช้ ค่า F นี้จะนำไปใช้คำนวณหาค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตร จากข้อมูลที่เป็นจำนวนนับรังสีที่ได้จากการทดลอง และความแรงรังสีของสารรังสีติดตามที่ใช้ในการทดลอง



รูปที่ 2.4 การจัดระบบวัดรังสีแกมมาเพื่อหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร
โดยวิธีการนับรังสีรวม

จากรูปที่ 2.2 ถึง รูปที่ 2.4 แสดงถึงความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของระบบของเหลวซึ่งประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสีซึ่งเป็นของเหลวรูปทรงกระบอก ภาชนะห่อหุ้มซึ่งมีลักษณะเป็นถึงทรงกระบอก ชุดตะกั่วกำบังรังสี และหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ในงานวิจัยนี้แบ่งความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในแบบจำลองดังกล่าวออกเป็น 2 แบบคือ

- แบบจำลองถึงกวนผสมแบบมาตรฐาน (Standard Mixing Tank Configuration) ซึ่งประกอบด้วยต้นกำเนิดรังสีรูปทรงกระบอกที่มีความสูงของช่องเหลวเท่ากับเส้นผ่าศูนย์กลางของรูปทรงกระบอก ถึงกวนผสมโลหะ แผ่นตะกั่วแบบมีช่องเปิดด้านหน้า ก้อนตะกั่วกำบังรังสีด้านข้าง และหัววัดโซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ซึ่งอยู่ ณ ตำแหน่งคงที่ในแนวตั้งข้างถึงกวนผสม 6 เซนติเมตรจากกันถึง ในงานวิจัยนี้จะกล่าวแบบย่อ ๆ ว่า แบบจำลองถึงกวนผสม แผ่นตะกั่วด้านหน้ามีไว้เพื่อกำกัดมมองของหัววัดรังสีเพื่อให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถศึกษาการเปลี่ยนแปลงในบางส่วนของระบบได้
- แบบจำลองท่อความยาวคงที่ 20 เซนติเมตร สำหรับการหาเวลาที่สารอยู่ในระบบ และการหาอัตราการไหลเชิงปริมาตร ซึ่งส่วนประกอบจะเหมือนกับแบบจำลองถึง

กวนผสมแบบมาตรฐาน เพียงแต่ไม่มีแผ่นตะกั่วกำบังรังสีด้านหน้าเท่านั้น เนื่องจากในทางปฏิบัติการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลนับรังสีเกิดขึ้นในช่วงเวลาที่สั้น เช่นในการศึกษาค่าเวลาที่สารอยู่ในอุปกรณ์นั้น การใช้พื้นที่ทั้งหมดของพื้นผิวด้านหน้าทรงกระบอกเป็นวิธีที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ปริมาณข้อมูลของจำนวนนับรังสีที่ต้องการในเวลาที่ยาว และการกำบังรังสีจึงทำเฉพาะด้านข้างเท่านั้น ในแบบจำลองนี้ของเหลวที่บรรจุอยู่ในท่อจะมีความยาวคงที่เท่ากับ 20 เซนติเมตร แบบจำลองนี้จะใช้ชื่อว่าแบบจำลองท่อ

2.2.2 การตอบสนองของหัววัดรังสี (Radiation Detector Response)

ประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting yield Y) แสดงถึงความสัมพันธ์ของการตอบสนองของหัววัดรังสีกับอัตราการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งนิยามโดยผลหารระหว่างอัตรานับรังสี R กับอัตราการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสี A

$$Y = \frac{R}{A} \quad 2.28$$

ประสิทธิภาพการนับรังสี ใช้ในการประเมินความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสี และสามารถที่จะประเมินได้จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้⁽¹⁾

$$Y = f_G f_A f_S f_T f_E f_D \quad 2.29$$

เมื่อ f_G คือค่าตัวประกอบซึ่งเป็นผลจากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบ (Geometry) โดยส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสี ค่า f_A (absorption factor) เป็นผลจากการลดทอนของรังสีเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจากต้นกำเนิดรังสีไปยังหัววัดรังสี ค่า f_S (scattering factor) เป็นค่าที่พิจารณาถึงผลของการกระเจิงของรังสีระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสี ค่า f_T เป็นค่าที่คำนวณจากค่า resolving time ของระบบวัดรังสี ค่า f_E (detector efficiency) เป็นค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสี ส่วนค่า f_D เป็นค่าที่แสดงถึงปัจจัยอื่น ๆ ที่เกิดจากหัววัดรังสี

ตามตัวประกอบแรกแสดงถึงปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการนับรังสี ซึ่งสามารถคำนวณโดยใช้วิธีมอนติคาร์โลจากแบบจำลองที่ทำขึ้น การหาค่าตัวประกอบที่เหลือจะใช้การประมาณจากผลหารค่าของประสิทธิภาพการนับรังสี Y กับค่าที่ได้จากการคำนวณนับค่าด้วยวิธี

มอนติคาร์โล เพื่อสร้างแบบจำลองที่สมบูรณ์เพื่อประเมินค่าความแรงรังสี ที่จะให้ค่าความผิดพลาดของอัตราการนับรังสีอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.2.3 การคำนวณทางสถิติเพื่อประมาณค่าขอบเขตของความเชื่อมั่น

การคำนวณเพื่อประมาณค่าขอบเขตของความเชื่อมั่น อาศัยสมมติฐานต่อไปนี้ ข้อมูลการนับรังสีครั้งหนึ่งจะถือว่าเป็นค่าประมาณของมีค่าเฉลี่ยแท้จริง (True average number of counts) m โดยคำนวณจากจำนวนนับรังสี n ในช่วงเวลา t ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของค่าจำนวนนับรังสี n คำนวณได้ดังนี้

$$\sigma(n) \cong \sqrt{n}. \quad 2.30$$

เช่นเดียวกับการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จะคำนวณได้จาก

$$\frac{\sigma(n)}{n} = \frac{1}{\sqrt{n}}. \quad 2.31$$

ค่าอัตรานับรังสีจากการทดลองคำนวณได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$r = \frac{n}{t}. \quad 2.32$$

โดยการตั้งสมมติฐานว่า การจับเวลาปราศจากความผิดพลาด การคำนวณค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตรานับรังสีทำได้โดย

$$\sigma(r) = \frac{\sigma(n)}{t} \cong \frac{\sqrt{n}}{t} = \sqrt{\frac{r}{t}}. \quad 2.33$$

ในทางปฏิบัติค่าอัตราการนับรังสีสุทธิ (Net counting rate R) คือผลต่างระหว่างค่าอัตราการนับรังสีรวม (total counting rate T) กับค่าอัตราการนับรังสีจากสิ่งแวดล้อม (background counting rate B) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราการนับรังสีสุทธิจึงประเมินได้โดย

$$\sigma(R) = \sigma(T - B) = \sqrt{\sigma(T)^2 + \sigma(B)^2} = \sqrt{\frac{T}{t_T} + \frac{B}{t_B}} \quad 2.34$$

2.2.4 การคำนวณเพื่อหาค่าอัตราการใช้ของของเหลวด้วยวิธีการนับรังสีรวม^[2]

วิธีการนับรังสีรวม ต้องอาศัยการเก็บข้อมูลจากการนับรังสีจากระบบของเหลวที่หยุดนิ่ง เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลว (Counting Yield per unit volume of liquid source F) โดยการจับอุปกรณ์และระบบวัดรังสีแบบเดียวกับการปฏิบัติงานจริง วิธีการดังกล่าวมีหลักการเป็นดังนี้ เมื่อผสมสารรังสีติดตามที่มีค่าความแรงรังสีจำเพาะเท่ากับ C ลงในของเหลวที่มีปริมาตร V ของเหลวที่ผสมได้จะมีความแรงรังสีเท่ากับ

$$A = CV \quad 2.35$$

ขณะที่ของเหลวอยู่นิ่ง ณ ตำแหน่งหัววัดรังสี ซึ่งของเหลวมีความเข้มข้นสารรังสีติดตามมีค่าเท่ากับ C_i

$$dA = C_i dV \quad 2.36$$

และปริมาตรขณะนั้นมีค่าเท่ากับ

$$dV = Q dt \quad 2.37$$

ซึ่ง Q เป็นอัตราการไหลเชิงปริมาตร จากการพิจารณาปริมาณสารรังสีทั้งหมดที่ใช้ซึ่งมีค่าเท่ากับ A ดังนั้น

$$A = Q \int C_i dt. \quad 2.38$$

เนื่องจากค่าจำนวนนับรังสีแปรผันโดยตรงกับความแรงรังสี ณ ตำแหน่งหัววัดรังสี ดังนั้น

$$N = F \int C_i dt \quad 2.39$$

โดยที่ค่า F เป็นค่าคงที่ ซึ่งมีค่าขึ้นกับประสิทธิภาพในการนับของหัววัดรังสี และการจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบ จากความสัมพันธ์ของจำนวนนับรังสี ณ ตำแหน่งหัววัดรังสี กับค่าความแรงรังสีที่ใช้ในการปฏิบัติงาน ค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรจึงคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$Q = \frac{AF}{N} \quad 2.40$$

การหาค่า F ทำโดยการทดลองกับระบบที่ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในแบบเดียวกัน แต่เป็นการเก็บข้อมูลจากของเหลวที่หยุดนิ่งอยู่หน้าหัววัดรังสี โดยการเติมสารรังสีติดตามที่ทราบค่าความแรงรังสี A ลงในท่อทรงกระบอกปิดที่บรรจุของเหลวชนิดเดียวกัน และมีปริมาตรเต็มพอดีภายในท่อซึ่งค่าปริมาตรเท่ากับ V_f จากนั้นจึงทำการนับรังสีเป็นช่วงเวลา t ซึ่งจำนวนนับรังสีที่ได้เท่ากับ n จะนำไปใช้ในการคำนวณค่า F ดังนี้^[1]

$$\begin{aligned} F &= \frac{V_f n}{At} \\ &= V_f Y \end{aligned} \quad 2.41$$

โดยที่ค่า Y คือค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting yield) และเมื่อความยาวของท่อมีค่ามากกว่าค่าของจำนวนนับรังสีจะไม่ขึ้นกับความยาวของท่อ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลถือได้ว่าเป็นการทดลองทางสถิติ โดยการจำลองพฤติกรรมของแต่ละอนุภาค ซึ่งก็คือการจำลองเหตุการณ์สุ่ม (Random Events) แล้วเก็บข้อมูลจากแต่ละอนุภาคตามเงื่อนไขที่กำหนดขึ้น นำมาหาค่าความน่าจะเป็นเฉลี่ยของเหตุการณ์เฉพาะที่สนใจ และใช้วิธีการทางสถิติในการคำนวณหาช่วงความเชื่อมั่นของคำตอบที่ได้

การวิจัยจึงเริ่มต้นโดยการศึกษาผลการทดลองทางสถิติโดยใช้วิธีมอนติคาร์โล เพื่อเก็บข้อมูลเบื้องต้นโดยใช้การคำนวณนับค่าสามประเภท คือ ตัวประมาณค่าฟลักซ์บนพื้นผิวด้านหน้าหัววัดรังสี ตัวประมาณค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในหัววัดรังสี และตัวประมาณค่าการแจกแจงพลังงานภายในหัววัดรังสีดังที่กล่าวไว้ เพื่อศึกษาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าผลลัพธ์จากการคำนวณนับค่าที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหรือท่อ ซึ่งข้อมูลที่ได้มาจะยืนยันการทดลองทางสถิติที่ขึ้นอยู่กับการสุ่มตัวอย่างโดยใช้กฎทางฟิสิกส์ ในส่วนที่สองจะเป็นการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี ซึ่งจะให้ข้อมูลในส่วนที่ไม่สามารถคำนวณได้ด้วยวิธีมอนติคาร์โล ซึ่งถ้าหากข้อมูลทั้งสองส่วนมีแนวโน้มที่เหมือนกันเมื่อพิจารณาตามการเปลี่ยนแปลงขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหรือท่อ ก็จะสามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจากการทดลองทั้งสองได้ และความสัมพันธ์ที่ได้ก็จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ (Estimated Counting Yield) ได้

การศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังหรือท่อ ซึ่งสัมพันธ์กับปริมาตรของเหลวที่เป็นต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาตรนั้นเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อค่าผลลัพธ์จากการคำนวณโดยใช้ตัวประมาณค่า เมื่อใช้ตัวประมาณค่าทั้งสามนั้นประมาณค่าเฉลี่ยของความน่าจะเป็นที่อนุภาครังสีหนึ่งจากต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาตรจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางต่าง ๆ ในระบบไปยังบริเวณที่เป็นหัววัดรังสี ค่าที่ได้จากการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภทควรจะให้แนวโน้มเดียวกัน เมื่อพิจารณาถึงการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร โดยการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหรือท่อ

การประมาณค่าความแรงรังสีของสารรังสีติดตาม จะเริ่มต้นจากการประมาณค่าประสิทธิภาพการนับรังสี โดยใช้ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่คำนวณได้จากผลการทดลองมาใช้คำนวณค่าตัวประกอบสำหรับการปรับแก้ค่าผลการคำนวณนับค่าแบบต่าง ๆ ให้เป็นค่าประสิทธิภาพการนับ

รังสีโดยประมาณ (Estimated counting yield) เนื่องจากผลการคำนวณนับค่าเหล่านี้ให้ความหมายที่สอดคล้องกับนิยามของค่าประสิทธิภาพการนับรังสี ซึ่งก็คือความน่าจะเป็นที่อนุภาครังสีอนุภาคหนึ่งจากต้นกำเนิดรังสีที่จะเคลื่อนไปยังหัววัดรังสี หรือความน่าจะเป็นที่ค่าอัตราการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสีค่าหนึ่ง จะทำให้เกิดค่าอัตราการนับรังสีค่าหนึ่งที่หัววัดรังสี แต่ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีเป็นปริมาณที่อยู่ขึ้นกับค่าความน่าจะเป็น 2 ประเภทดังสมการที่ 2.29 คือ ค่าความน่าจะเป็นที่คำนวณได้จากกฎทางฟิสิกส์ ซึ่งสามารถใช้วิธีมอนติคาร์โลในการหาคำตอบได้ และค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากระบบวัดรังสี ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของหัววัดรังสี และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ การประมาณค่าความน่าจะเป็นที่ได้จากระบบอิเล็กทรอนิกส์ จึงต้องอาศัยผลการทดลองจากระบบวัดรังสีที่ใช้งานจริง

3.1 ขั้นตอนการวิจัย

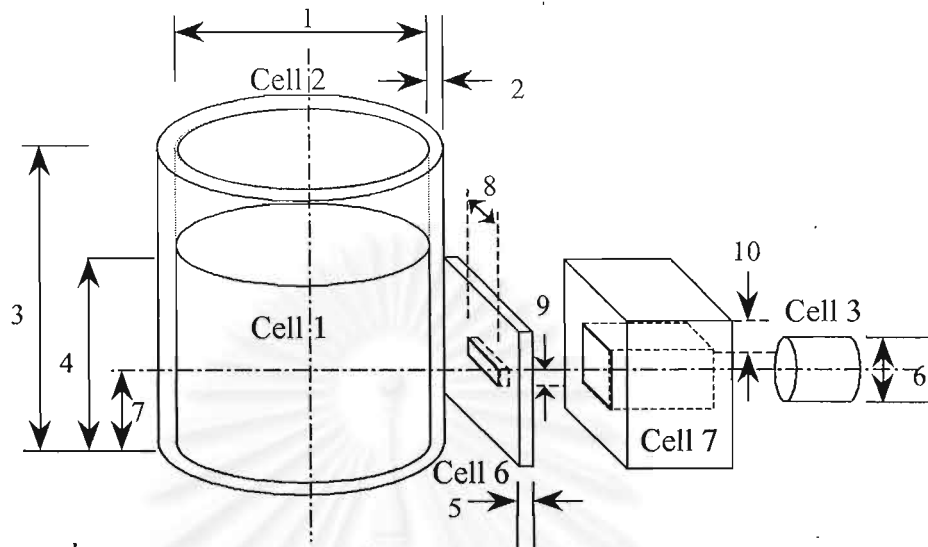
3.1.1 การศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณนับค่า (Tallies) F2 F4 และ F8 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังหรือท่อ ซึ่งได้แก่ การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิวด้านหน้าของเซลล์ทรงกระบอกที่เป็นหัววัดรังสี NaI(Tl) (F2 Tally) การคำนวณนับค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์ที่เป็นหัววัดรังสี (F4 Tally) การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงานภายในหัววัดรังสี (F8 Tally) ขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบแบบจำลองที่เป็นแฟ้มข้อมูลนำเข้า (Input files) ของโค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP 4A และศึกษาผลของเส้นผ่านศูนย์กลางของถังหรือท่อที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงค่าจากการคำนวณนับค่า

3.1.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield) จากการทดลองกับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล เพื่อเปรียบเทียบแนวโน้มของค่าจากการคำนวณนับค่ากับค่าประสิทธิภาพการนับรังสี ซึ่งจะนำไปสร้างความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลทั้งสอง

3.2 การสร้างแบบจำลองสำหรับคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A

3.2.1 แบบจำลองถังกวนผสมมาตรฐาน

ภายในแบบจำลองมีการจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบดังรูปที่ 3.1 และรูปทรงสามมิติทั้งหมด มีมิติที่กำหนดตามตารางที่ 3.1

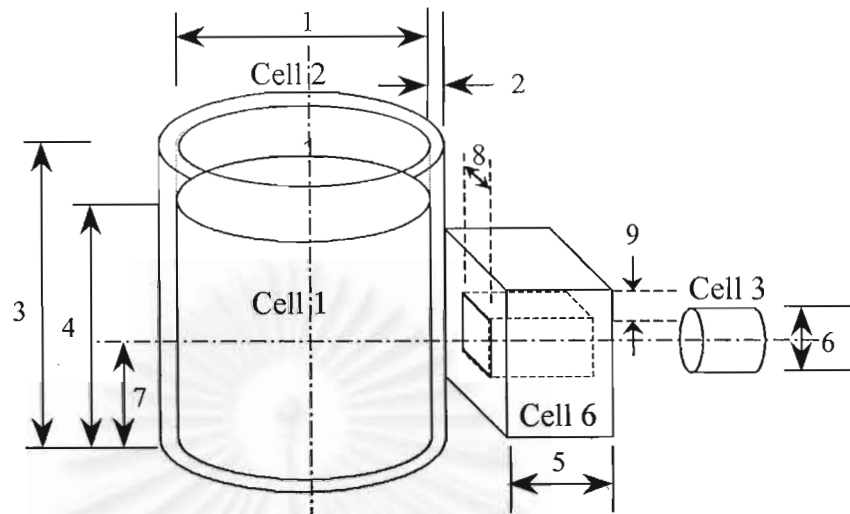


รูปที่ 3.1 การจัดการความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบของระบบวัดรังสี
ของแบบจำลองถึงกวนผลสมมาตรฐาน

ตารางที่ 3.1 มิติของรูปทรงในแบบจำลองถึงกวนผลสมมาตรฐาน

| หมายเลข | ความหมาย | มิติ (เซนติเมตร) |
|---------|---|------------------|
| 1 | เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในถึง (เซลล์ 2) | 10-25 |
| 2 | ความหนาของถึง | 0.05 |
| 3 | ความสูงของถึง | 25 |
| 4 | ความสูงของของเหลว=เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในถึง | 10-25 |
| 5 | ความหนาของแผ่นตะกั่วด้านหน้า (เซลล์ 6) | 0.4 |
| 6 | ขนาดของผลึก NaI(Tl) 2 นิ้ว X 2 นิ้ว (เซลล์ 3) | 5.08 X 5.08 |
| 7 | ความสูงของหัววัดรังสีโดยวัดจากก้นถึง | 6 |
| 8 | ความกว้างของช่องเปิดบนแผ่นตะกั่วด้านหน้า | 5 |
| 9 | ความสูงของช่องเปิดบนแผ่นตะกั่วด้านหน้า | 1 |
| 10 | ความหนาของตะกั่วกำบังรังสีด้านข้าง (เซลล์ 7) | 2.5 |

3.2.2 แบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร ความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในแบบจำลองประกอบด้วยวัตถุรูปทรงต่าง ๆ ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงมิติของรูปทรงต่าง ๆ ในแบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร

ตารางที่ 3.2 มิติของรูปทรงในแบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร

| หมายเลข | ความหมาย | มิติ (เซนติเมตร) |
|---------|---|------------------|
| 1 | เส้นผ่าศูนย์กลางด้านในถึง (เซลล์ 2) | 10-25 |
| 2 | ความหนาของถัง | 0.05 |
| 3 | ความสูงของถัง | 25 |
| 4 | ความสูงของของเหลว (เซลล์ 1) | 20 |
| 5 | ความยาวของตะกั่วกำบังรังสีด้านข้าง (เซลล์ 6) | 6 |
| 6 | ขนาดของผลึก NaI(Tl) 2 นิ้ว X 2 นิ้ว (เซลล์ 3) | 5.08 |
| 7 | ความสูงของหัววัดรังสีโดยวัดจากก้นถัง | 10 |
| 8 | ความกว้างของช่องเปิดของตะกั่วกำบังรังสี | 5.2 X 5.2 |
| 9 | ความหนาของตะกั่วกำบังรังสีด้านข้าง | 2.5 |

ในแบบจำลองทั้งสองได้ทำการเผื่อระยะระหว่างรูปทรงที่อยู่ติดกัน (Clearance) โดยให้มีค่าเท่ากับ 0.1 เซนติเมตร และรูปทรงต่าง ๆ จะมีการให้ชื่อเป็นเซลล์ดังที่ระบุไว้

3.2.3 โครงสร้างของแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า (Input Files) ของคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A

เนื่องจากแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน และแบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร มีข้อแตกต่างกันที่จำนวนเซลล์ และจำนวนพื้นผิวที่ใช้ नियามเซลล์ ผู้วิจัยจึงขออธิบายโครงสร้างของแฟ้มข้อมูลโดยภาพรวมไม่ขึ้นกับชนิดของแบบจำลอง

โครงสร้างของแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A เป็นแฟ้มข้อมูลแบบอักษร (Text Files) โดยข้อความในหนึ่งบรรทัดจะบรรจุตัวอักษรได้ 80 ตัว ซึ่งแต่ละบรรทัดจะบรรจุคำสั่ง และค่าพารามิเตอร์ต่างกันไป ซึ่งแบ่งตามประเภทได้ดังนี้ คือ

- บรรทัดของคำอธิบาย (Comment Card)

บรรทัดแรกของแฟ้มข้อมูลจะเป็นบรรทัดที่ใช้สำหรับเขียนคำอธิบายอย่างย่อ ๆ ถึงแบบจำลองที่ทำขึ้น

- คำสั่ง नियามเซลล์ (Cell Cards)

กลุ่มบรรทัดของตัวอักษรที่ต่อจากบรรทัดที่มีตัวอักษรซึ่งพิมพ์ว่า “c cell cards” แต่ละบรรทัดจะใช้นियามแต่ละเซลล์ตามหมายเลขที่กำกับอยู่ในคอลัมน์แรกของบรรทัด เซลล์นั้นหมายถึงปริมาตรที่ห่อหุ้มด้วยพื้นผิวปิด ข้อมูลตัวเลขในหลักถัดมาคือหมายเลขของวัสดุ (Material Number) ตรงกับค่าในคอลัมน์แรกของบรรทัดที่ใช้นियามวัสดุ (Material Cards) ข้อมูลตัวเลขหลักที่สาม ซึ่งถ้าค่าดังกล่าวเป็นบวกจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงอะตอมในหน่วย 10^{24} อะตอมต่อตารางเซนติเมตร ถ้าหาค่าที่เป็นลบจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงมวลในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชุดตัวเลขที่ถัดจากค่าความหนาแน่นของวัสดุคือ พื้นผิวที่ประกอบกันขึ้นเป็นเซลล์ จะมีค่าได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งหมายถึงการเลือกใช้ด้านที่เป็นบวกหรือลบของพื้นผิวหนึ่ง ๆ เพื่อนำมาประกอบเป็นเซลล์ ด้วยการใช้ตัวปฏิบัติการของเซต เช่น อินเตอร์เซกชัน ซึ่งใช้การเว้นวรรค และยูเนียนซึ่งใช้เครื่องหมายทับภาคคู่ ตัวอย่างของบรรทัดที่ใช้นियามเซลล์เป็นดังนี้

```
1 1 -1.0 1 -2 -3 imp:p=1
```

โดยที่ $imp:p=1$ เป็นคำสั่งเพื่อกำหนดให้เซลล์ที่ 1 มีค่าความสำคัญของอนุภาคโฟตอนเท่ากับหนึ่ง และเซลล์นี้เกิดจากการอินเตอร์เซกชันของด้านบวกของพื้นผิวที่หนึ่ง ด้านลบของพื้นผิวที่สอง และด้านลบของพื้นผิวที่สาม เซลล์ที่ 1 นี้ประกอบขึ้นด้วยวัสดุหมายเลข 1 ซึ่งมีความหนาแน่นเท่ากับ 1 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ซึ่งก็คือน้ำบริสุทธิ์

- คำสั่ง नियามพื้นผิว (Surface card)

พื้นผิวของ MCNP นั้นนิยามโดยใช้สมการคณิตศาสตร์ โดยใช้คำสั่งย่อในการกำหนดชนิดของพื้นผิว ตัวอย่างเช่น 1 pz 0 พื้นผิวที่ 1 เป็นพื้นผิวที่ตั้งฉากกับแกน Z ซึ่งมีสมการ

คือ $z=0$ ซึ่งด้านที่ทำให้ค่า $z < 0$ จะถือว่าเป็นด้านลบ (Negative Sense) และในทางตรงกันข้าม ด้านที่ทำให้ค่า $z > 0$ จะถือว่าเป็นด้านบวก (Positive Sense)

- คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี (Source Definition Card)

คำสั่งนี้ใช้กำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของต้นกำเนิดรังสี เช่น ค่าพลังงาน วิธีการสุ่มตัวอย่าง รวมทั้งกำหนดเงื่อนไขในการปรับแก้ค่าการสุ่มตัวอย่างตามที่ผู้ใช้กำหนด ในแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นมีข้อมูลดังนี้

ตัวอย่างการนิยามต้นกำเนิดรังสีของแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน

```
sdef erg=0.1426833 par=2 cel=1 pos 0. 0. 6.04 axs 0. 0. 1. rad=d2 ext=d1
```

```
si1 -6.04 3.96 $-DetectHeight<ext<LevelHeight-DetectHeight
```

```
si2 0 5 $0<rad<TankIDia/2
```

ค่าพลังงานกำหนดโดยคำสั่ง $erg = 0.1426833$ MeV ชนิดของอนุภาค $par=2$ คือโฟตอน โดยมีจุดศูนย์กลางการสุ่มตัวอย่างอยู่ที่พิกัดตำแหน่ง (0. 0. 6.04) จะมีการสุ่มตัวอย่างตามแนวแกนของทรงกระบอกซึ่งขนานกับเวกเตอร์ Axs (0, 0, 1) เป็นระยะทางตามค่าที่กำหนดให้กับตัวแปร ext ซึ่งระบุในบรรทัดของ $si1$ (Source Information1) ส่วนการสุ่มตัวอย่างตามแนวรัศมี ตามตัวแปร rad ในช่วงที่กำหนดโดย $si2$ คือจากศูนย์กลางถึงห้าเซนติเมตร ซึ่งเป็นรัศมีของทรงกระบอกที่เป็นต้นกำเนิดรังสี จากข้อมูลทั้งหมดจะทำให้เกิดการสุ่มตัวอย่างแบบเท่าเทียมกันทั่วปริมาตรของทรงกระบอก โดยอนุภาครังสีจะสุ่มตัวอย่างทิศทางการเคลื่อนที่แบบไอโซโทปิก

- คำสั่งกำหนดโหมดของอนุภาคในการคำนวณ (Mode card)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้โหมดโฟตอนเพียงอย่างเดียว เพื่อลดการคำนวณเนื่องจากอนุภาคอิเล็กตรอน ซึ่งถึงแม้ว่าอนุภาคนี้จะมีโอกาสทำอันตรกิริยาทำให้เกิดโฟตอนทุติยภูมิ แต่โฟตอนดังกล่าวจะมีค่าพลังงานต่ำ และอยู่นอกขอบเขตการพิจารณา ซึ่งเป็นช่วงยอดของสเปกตรัมพลังงาน

- คำสั่งกำหนดค่าทางฟิสิกส์ (Physics card)

คำสั่งที่กำหนดเงื่อนไขการคำนวณทางฟิสิกส์ของอนุภาค แบบจำลองทั้งสองใช้มีค่าต่าง ๆ ดังนี้

```
phys:p 1. 0 1 $UpLimEnergy detail phys=1.MeV; P not produce E=1; no coherent scat=1
```

คำสั่งกำหนดค่านี้ กำหนดให้ใช้แบบจำลอง Detail Physics สำหรับช่วงพลังงานของต้นกำเนิดรังสีที่มีค่าต่ำกว่า 1 MeV และใช้แบบจำลอง Thick-target bremsstrahlung เนื่องจากการใช้ Mode P และค่าถัดมาของคำสั่งเป็นศูนย์หมายถึงโฟตอนสามารถทำอันตรกิริยาให้อิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะส่งผลให้อิเล็กตรอนที่เกิดจากอันตรกิริยาของโฟตอน ทำอันตรกิริยาพันที่กับตัวกลาง การคำนวณ

ของอิเล็กตรอนนี้จึงสิ้นสุดลง ซึ่งส่งผลคือช่วยลดการคำนวณปริมาณมาก และซับซ้อนของอิเล็กตรอน ส่วนตัวเลข 1 ค่าสุดท้ายของคำสั่งคือการละทิ้งอันตรกิริยา Coherent Scattering เนื่องจากมีแนวโน้มว่าจะทำให้ค่าตรรกะนี้แสดงคุณภาพในการคำนวณ (FOM) มีค่าต่ำลง

- คำสั่งกำหนดชนิดของวัสดุ (Material card)

ภายในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองทั้งสองมีจำนวนชนิดของวัสดุเท่ากันซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

c materials

m1 1000 0.6667 8000 0.3333 \$ Water

วัสดุชนิดที่ 1 (m1) คือ น้ำส่วนประกอบโดยโมลคือ ไฮโดรเจน(1000) 2 (.6667) อะตอม ต่อ ออกซิเจน(8000) 1 (.3333) อะตอม

m2 24000 -0.190 25000 -0.020 26000 -0.695 28000 -0.095 \$ Fe alloy

วัสดุชนิดที่ 2 คือ โลหะผสมของเหล็ก ซึ่งส่วนประกอบโดยมวลเป็นดังนี้ โครเมียม 19% แมงกานีส 2% เหล็ก 69.5% นิกเกิล 9.5% โดยมวล

m3 82000 1 \$ Lead วัสดุชนิดที่ 3 เป็นตะกั่ว

m4 11000 0.4995 53000 0.4995 81000 .001 \$ NaI(Tl)

วัสดุชนิดสุดท้ายคือ โซเดียมไอโอไดด์(เทลเลียม)

- คำสั่งการคำนวณนับค่า (Tally card) มีคำสั่งดังนี้

f2:p 7 \$ flux P at surface 7 : front plane of NaI Crystal

e2 0.124 0.158

คำสั่งนี้เป็นการคำนวณนับค่าบนพื้นผิวที่ 7 ซึ่งเป็นผิวหน้าทรงกระบอกที่เป็นเซลล์ของหัววัดรังสี คำสั่ง e2 เป็นการกำหนดช่วงพลังงานที่จะคำนวณนับค่า เป็นดังนี้ ช่วงที่ 1 คือ 0.01 MeV ถึง 0.128 MeV ช่วงที่ 2 ตั้งแต่ 0.128 MeV ถึง 0.158 MeV ซึ่งเป็นช่วงพีคของไอโซโทป Tc-99m ที่กำหนดจากการทดลอง และช่วงที่ 3 ซึ่งจะครอบคลุมทั้งสเปกตรัม 0.01 MeV ถึง 0.158 MeV ค่าต่ำสุด 0.01 MeV นั้น เป็นค่าพลังงานที่ต่ำที่สุดของข้อมูลภาคตัดขวางของโฟตอนสำหรับโค้ด MCNP

f4:p 3 \$ flux P at cell 3 NaI Crystal

e4 0.124 0.158

คำสั่งให้คำนวณนับค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์หัววัดรังสี ในช่วงพลังงานที่ตรงกับ e2

f8:p 3 \$ Pulses P created at cell 6 : Detector NaI Crystal

e8 0. 0.124 0.158

คำสั่งให้คำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงานของภายในเซลล์หั่ววัดรังสี เนื่องจากการคำนวณด้วย F8 ต้องกำหนดค่าต่ำสุดของพลังงานในสเปกตรัม จึงมีการเพิ่มช่วงของค่าพลังงานอีกหนึ่งช่วงคือ ตั้งแต่ 0 MeV ถึง 0.01 MeV

- คำสั่งการคำนวณพื้นที่และปริมาตร (Area and Surface card)

เนื่องจากการกำหนดให้คำนวณนับค่าที่พื้นผิว (F2) และเซลล์ (F4, F8) จึงต้องมีการป้อนค่าที่ถูกต้อง เพื่อให้คอมพิวเตอร์ใ้ค้ค่นำไปใช้ในการคำนวณ ดังนี้

area 6j 20.2683 23j

ค่าที่ต้องคำนวณคือพื้นผิวที่ 7 เป็นผิวทรงกระบอกด้านหน้าเซลล์หั่ววัดรังสี

vol 2j 102.963 4j

ค่าที่ป้อนเข้าคือ ปริมาตรของเซลล์ที่ 3 ซึ่งเป็นเซลล์หั่ววัดรังสี

- คำสั่งหยุดการคำนวณ

คำสั่งที่ทำหน้าที่หยุดการคำนวณทั้งหมดตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ ดังนี้

ctme 30

คำสั่งหยุดการคำนวณด้วยเวลาที่คอมพิวเตอร์ใช้ในการคำนวณ ซึ่งเป็นเวลาทั้งสิ้น 30 นาที

3.2.4 เงื่อนไขในการคำนวณแบบจำลอง

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางที่จะทำการคำนวณมีค่าดังนี้ คือ 10 12 14 15.9 17.3 18.6 19.8 23 และ 25 เซนติเมตร ซึ่งค่าที่ขีดเส้นใต้เป็นขนาดของถังที่ใช้ในการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield)

3.3 การทดลอง

การทดลองมีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield) จากระบบที่มีความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในแบบเดียวกันกับแบบจำลองที่ทำไว้ทั้ง 2 แบบคือ ถึงกวนผสมมาตรฐาน และท่อความยาว 20 เซนติเมตร แล้วนำมาศึกษาเปรียบเทียบแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงค่าดังกล่าวกับผลลัพธ์จากการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล

3.3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

- **ถังกวนผสม**

ถังกวนผสมทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15.9 17.3 และ 19.8 เซนติเมตร แต่ละถังหนา 0.05 เซนติเมตรและสูง 25 เซนติเมตร ในการทดลองท่อความยาว 20 เซนติเมตรจะใช้ถังชุดดังกล่าวนี้เช่นกัน

- **ชุดเครื่องกวนผสม มีส่วนประกอบต่าง ๆ ดังนี้**

มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง ใช้แรงดัน 12 โวลต์ สำหรับขับเคลื่อนใบกวนชนิดเทอร์ไบน์ เครื่องจ่ายไฟกระแสตรงชนิดปรับค่าแรงดันไฟฟ้าได้ ใบกวนชนิดเทอร์ไบน์ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตรต่อกับแกนเหล็กกล้าไร้สนิม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.6 เซนติเมตร

- **ระบบวัดรังสีแกมมา**

(1) หัววัดรังสีชนิด High purity Germanium ผลิตโดยบริษัท CANBERRA รุ่น 7229 ใช้สำหรับการปรับเทียบเพื่อหาค่าความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสีที่ได้รับมา

(2) หัววัดรังสีชนิดโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) ผลิตโดยบริษัท BICRON รุ่น 2M2/2PR ใช้สำหรับการหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield)

(3) ฐานของหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์พร้อมปรี่แอมป์ ผลิตโดยบริษัท ORTEC รุ่น 276

(4) NIM (Nuclear Instrument Module) bin ผลิตโดยบริษัท ORTEC รุ่น 4001c.

(5) Spectroscopy Amplifier ผลิตโดยบริษัท CANBERRA รุ่น 2020.

(6) แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง ผลิตโดยบริษัท CANBERRA รุ่น 4261.

(7) เครื่องมือวิเคราะห์ชนิดหลายช่องสัญญาณ (Multi-Channel Analyzer) ผลิตโดยบริษัท CANBERRA รุ่น Series 40 ซึ่งมีขนาดหน่วยความจำ 4k

(8) สายนำสัญญาณ และสายไฟฟ้า

- **ชุดตะกั่วกำบังรังสี**

(1) ชุดของก้อนตะกั่วสี่เหลี่ยมมุมฉากซึ่งแต่ละก้อนมีมิติ 5-เซนติเมตร X 10-เซนติเมตร X 20-เซนติเมตร สำหรับกำบังรังสีด้านข้าง

(2) แผ่นตะกั่วซึ่งมีช่องเปิดในแนวระดับรูปสี่เหลี่ยมขนาด 5 เซนติเมตร X 1 เซนติเมตร และมีความหนา 0.3 เซนติเมตร

- อุปกรณ์อื่น ๆ

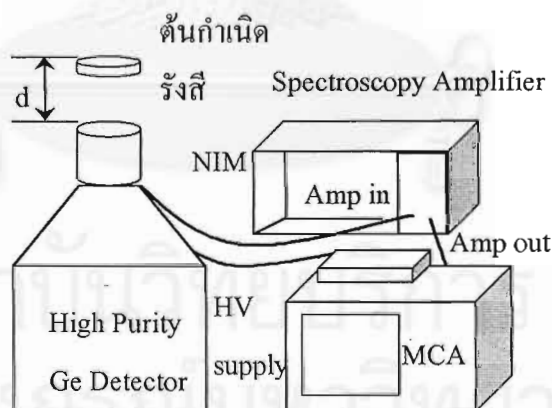
- (1) Micro-pipette ผลิตโดยบริษัท FINNPIPETTE รุ่น 9401 076 มีขนาดความจุ 100-1,000 ไมโครลิตร (0.1-1 ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- (2) หลอดฉีดยาขนาดความจุ 1, 3 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใช้ดวงของเหลวและฉีดสารรังสีติดตาม

- ต้นกำเนิดรังสี

- (1) ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Eu-152 สำหรับการปรับเทียบ ซึ่งมีความแรงรังสี 1.156 μ Ci (ณ วันที่ผลิต 1/8/1989) และมีค่าครึ่งชีวิต 4,933 วัน
- (2) สารละลายเจือจางของ Sodium pertechnetate (NaTcO_4) ในน้ำเกลือ ซึ่งเตรียมขึ้นจนมีความแรงรังสีของสารละลายในช่วง 200-300 μ Ci ณ วันที่ทำการทดลอง ไอโซโทป Tc-99m มีค่าครึ่งชีวิต 6.02 ชั่วโมง

3.3.2 ขั้นตอนการหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ

การหาค่าความแรงรังสีจำเพาะของสารละลายของสารรังสีที่ได้มา ทำโดยการคำนวณเปรียบเทียบจากความสัมพันธ์ของค่าพลังงานของรังสีกับประสิทธิภาพของหัววัดรังสี ซึ่งใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Eu-152 ในการหาค่าความสัมพันธ์ดังกล่าว การจัดระบบวัดรังสีเป็นดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 การจัดระบบวัดรังสีสำหรับหาค่าความแรงรังสีจำเพาะ

3.3.2.1 การปรับเทียบค่าพลังงานโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Eu-152

เมื่อปรับค่าต่าง ๆ ของเครื่องมือตามให้ได้ค่าที่กำหนดของแต่ละเครื่องมือ จึงวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของไอโซโทป Eu-152 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดรังสีแกมมามาตรฐาน เมื่อได้จำนวนนับรังสี ณ ตำแหน่งยอดของค่าพลังงาน (Peak) เป็นจำนวนที่ต้องการแล้ว จึงกำหนดตำแหน่งยอดของ

ค่าพลังงานทั้งสามของ Eu-152 ดังนี้ คือ 0.122 MeV 0.245 MeV และ 0.344 MeV เพื่อเปรียบเทียบค่าพลังงานของสเปกตรัมไว้สำหรับวิเคราะห์ไอโซโทป Tc-99m ต่อไป

3.3.2.2 การคำนวณหาค่าประสิทธิภาพทางพลังงานของหัววัดรังสี

จากสเปกตรัมพลังงานที่ได้ จะนำมาใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณหาฟังก์ชันค่าประสิทธิภาพทางพลังงานของหัววัดรังสี ซึ่งใช้วิธีนับพื้นที่ทั้งหมดใต้บริเวณยอด (Total Peak Area Method) ซึ่งฟังก์ชันที่ได้จะนำไปใช้ประมาณค่าประสิทธิภาพของหัววัดรังสี ณ ตำแหน่งของค่าพลังงานของ Tc-99m ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.143 MeV

3.3.2.3 การหาค่าความแรงรังสีจำเพาะของสารละลายต้นกำเนิดรังสี Tc-99m

เริ่มต้นโดยนำสารละลายเจือจางของไอโซโทป Tc-99m ปริมาณ 0.1 ลูกบาศก์เซนติเมตร ไปอบให้แห้ง จากนั้นจึงนำไปวิเคราะห์สเปกตรัมโดยใช้ระบบวัดดังรูปที่ 3.5 ค่าพื้นที่สุทธิ (Net Area) ใต้บริเวณยอด (Peak) จะนำมาใช้คำนวณอัตราการนับรังสี เพื่อนำไปแทนค่าสมการของประสิทธิภาพของหัววัดรังสี แล้วคำนวณหาค่าอัตราการสลายตัวของรังสี หรือค่าความแรงรังสีเฉลี่ย ณ เวลาที่ทำการทดลอง ได้ต่อไป

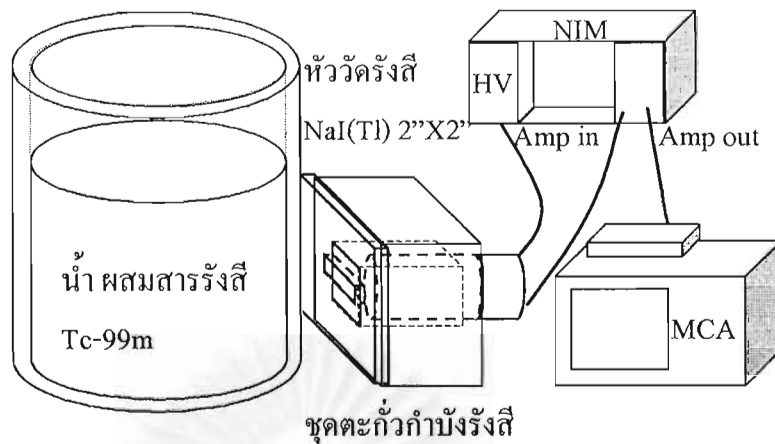
3.3.3 การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield)

3.3.3.1 การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสีของระบบถังกวนผสมมาตรฐาน

ฐาน

การทดลองทำโดยจัดระบบวัดรังสีดังรูปที่ 3.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



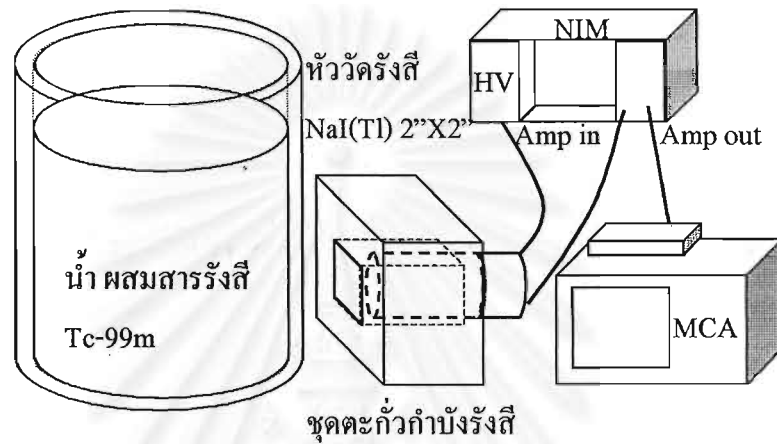
รูปที่ 3.4 การจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุและการจัดระบบวัดรังสีในการทดลอง
กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

การกำหนดระยะต่าง ๆ จะสัมพันธ์กับเงื่อนไขในแบบจำลอง ส่วนขั้นตอนในการทดลอง
เป็นดังนี้

- การเติมสารละลายของสารรังสี Tc-99m ลงในน้ำที่มีปริมาตรตามลักษณะของถังผสมมาตรฐาน ทำโดยการตวงด้วยไมโครปิเปตต์ ซึ่งปริมาตรที่ใช้ดวงสารรังสีเป็นดังนี้ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่าเหล่านี้จะนำไปใช้คำนวณความแรงรังสีจากค่าความแรงรังสีจำเพาะของสารละลายที่ทำการทดลองไว้แล้ว เนื่องจากมีถึงสามขนาด จึงทำการทดลองทั้งสิ้น 9 ครั้ง
- การเติมสารรังสีทุกครั้ง จะมีการบันทึกเวลาขณะเติมสารรังสี และจะกระทำในขณะที่เปิดระบบกวนผสม เมื่อของผสมหยุดนิ่งจึงทำการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาเฉพาะในช่วงค่าพลังงานที่เป็นบริเวณยอดเท่านั้น ซึ่งทำได้โดยการตั้งค่า LLD (Lower Level Discriminator) และค่า ULD (Upper Level Discriminator) ของเครื่อง MCA จากนั้นจึงบันทึกค่า Integral และค่า Area (Net Peak Area) หลังจากครบช่วงเวลาที่กำหนด 3 นาที
- จากนั้นจึงนำค่า Area ที่ได้นำมาคำนวณอัตราการนับรังสี ณ ตำแหน่งยอดของค่าพลังงาน แล้วจึงนำไปหารด้วยอัตราการสลายตัวเฉลี่ยในช่วงเวลาที่ใช้นับจำนวนรังสี ซึ่งมีการคำนวณปรับแก้ผลจากการสลายตัวตามค่าครึ่งชีวิตของไอโซโทป Tc-99m แล้ว ผลลัพธ์ที่ได้คือค่าของประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield)

3.3.3.2 การทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับของระบบท่อความยาว 20 เซนติเมตร

การจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบและระบบวัดรังสีคล้ายกับกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน เพียงแต่ไม่มีแผ่นตะกั่วกำบังรังสีด้านหน้าเท่านั้น ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 การจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุและการจัดระบบวัดรังสีกรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตรนี้ มีการกำหนดระยะต่าง ๆ เช่นเดียวกับแบบจำลอง ขั้นตอนการปฏิบัติก็เช่นเดียวกับกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน แต่ใช้เวลาในการนับรังสีแต่ละครั้งเพียง 2 นาที

บทที่ 4

ผลการจำลองและผลการทดลอง

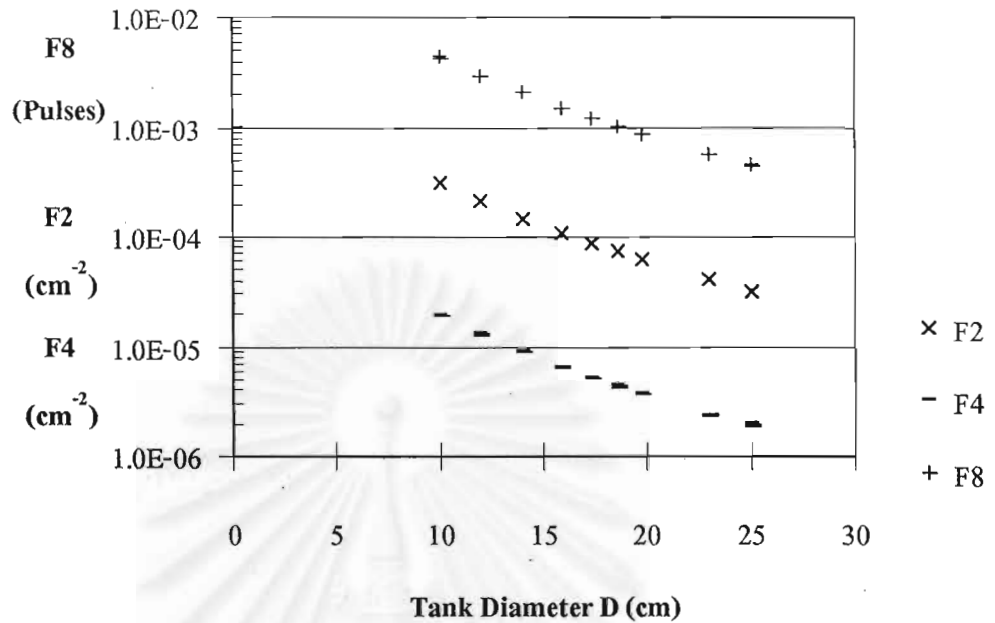
4.1 ผลการศึกษาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของผลการคำนวณนับค่า (Tallies) จากแบบจำลองที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถังหรือท่อ

ซึ่งได้แก่ การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิวด้านหน้าของเซลล์ทรงกระบอกที่เป็นหัววัดรังสี NaI(Tl) (F2 Tally) การคำนวณนับค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์ที่เป็นหัววัดรังสี (F4 Tally) การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงานภายในหัววัดรังสี (F8 Tally) ขั้นตอนนี้จะเป็นการทดสอบแบบจำลองที่เป็นเพิ่มข้อมูลป้อนเข้า (Input files) ของคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A และศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางถังหรือท่อ ที่มีต่อการคำนวณนับค่าประเภทต่าง ๆ

4.1.1 ผลการคำนวณนับค่า F1 F2 และ F8 จากแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน

ผลการคำนวณด้วยการคำนวณนับค่าแบบต่าง ๆ ในช่วงค่าพลังงานที่ใช้ในการทดลองกรณีถึงกวนผสมมาตรฐานคือ 0.124-0.158 MeV ซึ่งผลลัพธ์จากการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภทมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่สอดคล้องกันคือเป็นฟังก์ชันลดตามค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของถังที่เพิ่มขึ้นเป็นดังรูปที่ 4.1

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.1 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

ค่า F2 จะคำนวณตามเงื่อนไขเมื่อมีอนุภาคเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากค่า F4 แล F8 ที่ค่าที่ได้จากการคำนวณจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่เป็นหัววัดรังสีคือ โซเดียมไอโอไดด์ (แคลเซียม) แต่แนวโน้มของค่าทั้งสามนั้นเป็นความสัมพันธ์แบบลดลงในลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ทั้งนี้เนื่องจากการลดลงของทั้งสามค่าดังกล่าวเป็นผลมาบังปัจจัยหลักสองประการคือ ปัจจัยจากการลดทอนเนื่องจากการดูดกลืนรังสีในตัวเองของของเหลว ซึ่งก็คือ น้ำ และปัจจัยอันเนื่องมาจากมุมมองของหัววัดรังสีที่มีต่อต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร ผลของปัจจัยทั้งสองที่กล่าวมานั้นสามารถอธิบายได้โดยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

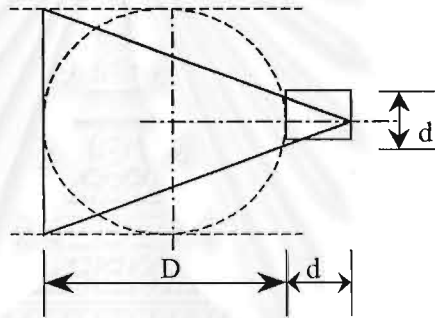
$$MM = F_A \times F_G \quad 4.1$$

โดยที่ค่า MM คือสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบถึงกวนผสมมาตรฐาน และค่า F_A ซึ่งคำนึงถึงการลดทอนของรังสีในของเหลวตามแนวเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง จะคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F_A &= \frac{\int_0^D e^{-\mu x} dx}{D} \\
 &= \frac{1}{\mu D} (1 - e^{-\mu D})
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

โดยที่ ค่า μ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient) ของรังสีแกมมา ที่ค่าพลังงานของต้นกำเนิดรังสี และค่า D คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของของเหลวรูปทรงกระบอก

เนื่องจากการใช้ตะกั่วกำบังรังสีด้านหน้าที่มีลักษณะเป็นช่องเปิดแคบ ๆ ในแนวราบ ซึ่งทำให้ระดับของเหลวที่เปลี่ยนแปลงไม่มีผลมากนักต่อการคำนวณ ความสัมพันธ์ของมุมมองของหัววัดรังสีกับต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาตรจึงเน้นที่พื้นที่ในแนวราบที่อยู่หน้าหัววัดรังสี ดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 แสดงตัวแปรที่ส่งผลต่อค่า F_G ของกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

เมื่อกำหนดให้ค่า F_G มีความสัมพันธ์โดยแปรผกผันกับพื้นที่สี่เหลี่ยมคางหมูที่อยู่ในแนวที่ มุมมองของหัววัดรังสีนั้นทอดตัวผ่านพื้นที่ของของเหลว ซึ่งคำนวณโดยความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$\begin{aligned}
 F_G &\propto \frac{1}{\frac{1}{2}((D+d)D)} \\
 F_G &= \frac{1}{((D+d)D)}
 \end{aligned}
 \tag{4.3}$$

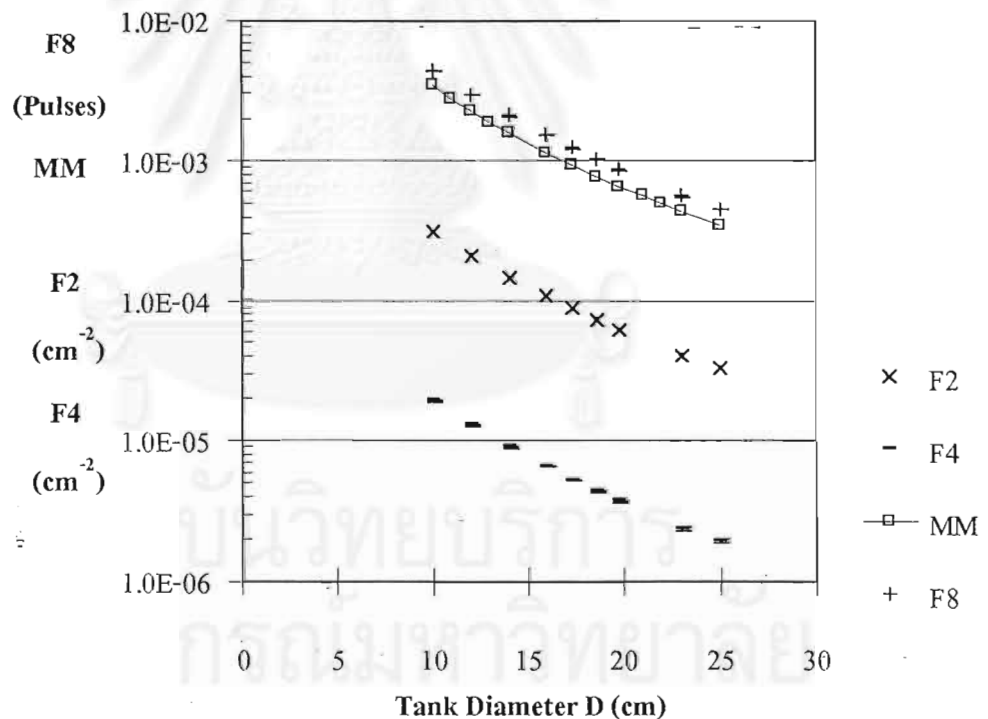
ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน MM จึงคำนวณได้ดังนี้

$$MM = \frac{(1 - e^{-\mu D})}{\mu D^2 (D + d)}
 \tag{4.4}$$

โดยที่ค่า μ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นในของเหลว ซึ่งของเหลวรูปทรงกระบอกนี้มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเท่ากับ D ส่วนค่า d คือเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดรังสี เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ) ของน้ำที่ค่าพลังงานของรังสีแกมมา 0.15 MeV มีค่าเท่ากับ 0.149 ต่อเซนติเมตร^[15] ซึ่งเป็นค่าพลังงานที่ใกล้เคียงกับค่าพลังงานของไอโซโทป Tc-99m และเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดค์(เทลเลียม) (d) มีขนาดเท่ากับ 5.08 เซนติเมตร ความสัมพันธ์ที่แสดงแนวโน้มการลดลงของการคำนวณนับค่ากรณีถึงกวนผสมมาตรฐานเป็นดังนี้

$$MM = \frac{(1 - e^{-0.149D})}{0.149 D^2 (D + 5.08)} \tag{4.5}$$

เมื่อแทนค่าเส้นผ่าศูนย์กลางถังในช่วง 10 ถึง 25 เซนติเมตรแล้วนำมาค่าผลลัพธ์มาแสดงพร้อมกับผลการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภท จะเป็นดังรูปที่ 4.3

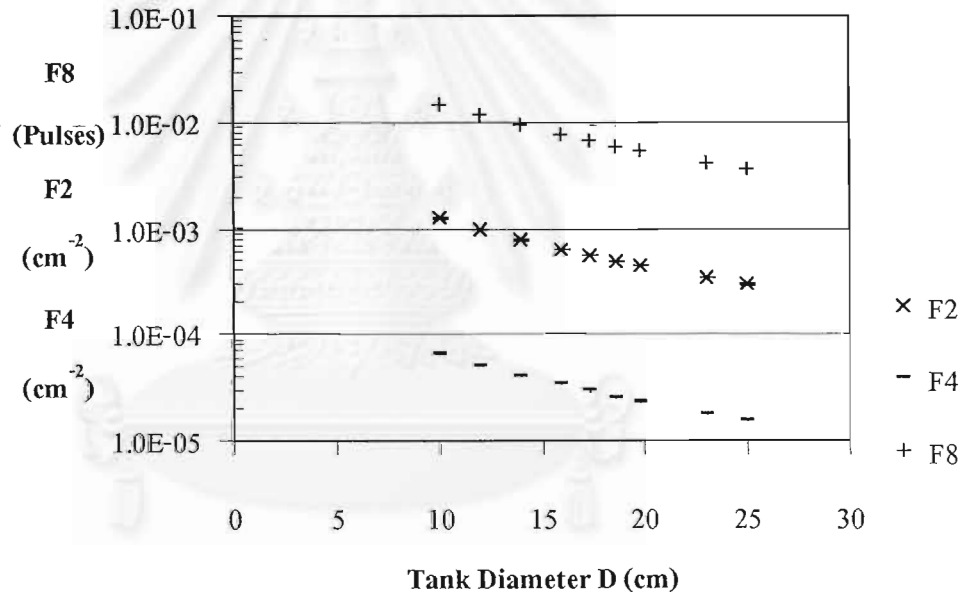


รูปที่ 4.3 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี (MM) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.3 แสดงว่าผลการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภทให้แนวโน้มเดียวกัน ซึ่งการลดลงของค่าจากการคำนวณนับค่าแต่ละประเภทยังเป็นผลจากสองปัจจัยหลักคือ การลดทอนเนื่องจากการดูดกลืนในตัวเองของของเหลว และมุมมองของหัววัดรังสีที่มีต่อขนาดของต้นกำเนิดรังสี การลดลงของค่าจากการคำนวณนับค่าแต่ละประเภทที่สอดคล้องกัน ข้อสังเกตที่อาจเป็นไปได้จากการพิจารณา คือ ค่าจากการคำนวณนับค่าแต่ละประเภท รวมทั้งสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี จะสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ที่เป็นผลคูณซึ่งกันและกันได้

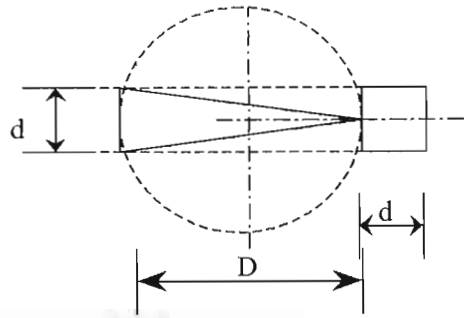
4.1.2 ผลการคำนวณนับค่า F1 F2 และ F8 จากแบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร

ผลการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลในช่วงพลังงาน 0.123-0.159 MeV เป็นดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

แนวโน้มการลดลงตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางท่อของค่าจากการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภทเป็นลักษณะเดียวกันกับกรณีของถังกวนผสมมาตรฐาน ซึ่งเป็นผลมาจากปัจจัยคู่เดียวกัน แต่มุมมองของหัววัดรังสีที่ปราศจากการกำบังรังสีด้านหน้าทำให้ต้องพิจารณาค่าตัวประกอบในความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบ (F_c) ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แสดงตัวแปรที่มีผลต่อค่า F_G กรณีของท่อความยาว 20 เซนติเมตร
ค่า F_G จะคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$F_G = \arctan\left(\frac{d}{D}\right) \quad 4.6$$

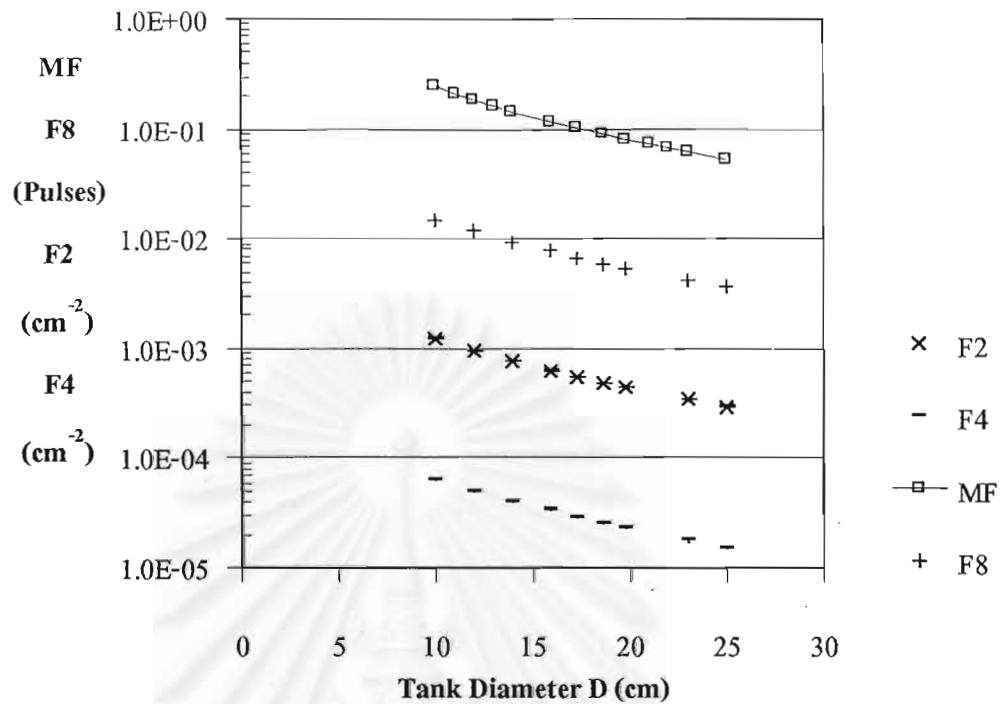
ค่า d คือขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์หัววัดรังสี และ D คือเส้นผ่าศูนย์กลางของเซลล์ของเหลว
ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบท่อความ
ยาว 20 เซนติเมตร (MF) จึงคำนวณได้ดังนี้

$$MF = \frac{(1 - e^{-\mu D}) \arctan\left(\frac{d}{D}\right)}{\mu D} \quad 4.7$$

เช่นเดียวกับสมการที่ 4.5 เมื่อแทนค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (μ) ของน้ำที่ค่าพลังงาน
ของรังสีแกมมา 0.15 MeV เท่ากับ 0.149 ต่อเซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลางของหัววัดรังสี 5.08
เซนติเมตร ค่า MF จึงคำนวณได้ดังนี้

$$MF = \frac{(1 - e^{-0.149 D}) \arctan\left(\frac{5.08}{D}\right)}{0.149 D} \quad 4.8$$

เมื่อแทนค่าเส้นผ่าศูนย์กลางลงในช่วง 10 ถึง 25 เซนติเมตร รูปที่ 4.6 แสดงค่าผลลัพธ์จากสมการที่
4.8 พร้อมกับผลการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภท



รูปที่ 4.6 แนวโน้มของผลการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี (MF) ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

เช่นเดียวกันกับกรณีของถึงกวนผสมมาตรฐานที่แนวโน้มการลดลงของค่าจากการคำนวณนับค่า เป็นผลมาจากการลดทอนภายในตัวของเหลว และมุมมองของหัววัดรังสีที่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของต้นกำเนิดรังสี จากการสังเกตแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของค่าต่าง ๆ ในรูปที่ 4.6 พบว่ามีความเป็นไปได้ที่ค่าจากการคำนวณนับค่าและค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎีจะสามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์ที่แต่ละค่าเป็นจำนวนเท่าของกันและกัน

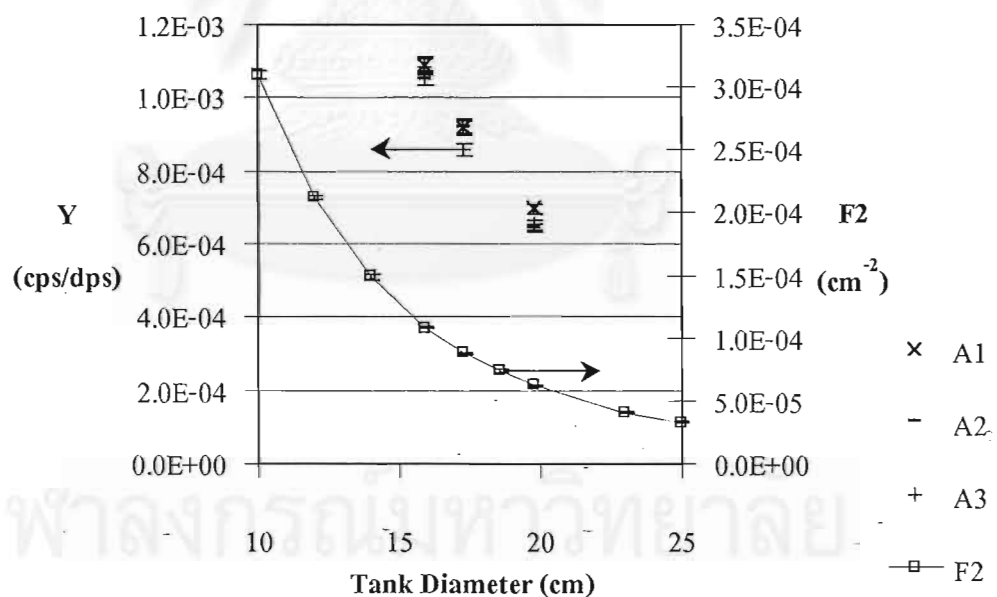
4.2 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Counting Yield) จากการทดลองกับผลการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล

ค่าประสิทธิภาพการนับรังสี แบ่งเป็น 3 ชุด ตามระดับความแรงรังสี 3 ระดับ โดยที่ค่า A1 ได้จากการตรวจปริมาตรสารรังสี 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่า A2 และ A3 ได้จากการตรวจปริมาตรสารรังสี 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร และ 1.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรตามลำดับ ซึ่งแต่ละชุดจะมีการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสี 3 ค่าตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง 3 ขนาด

4.2.1 ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่า F1 F2 และF8 กรณีถึงผลสมมาตรฐาน

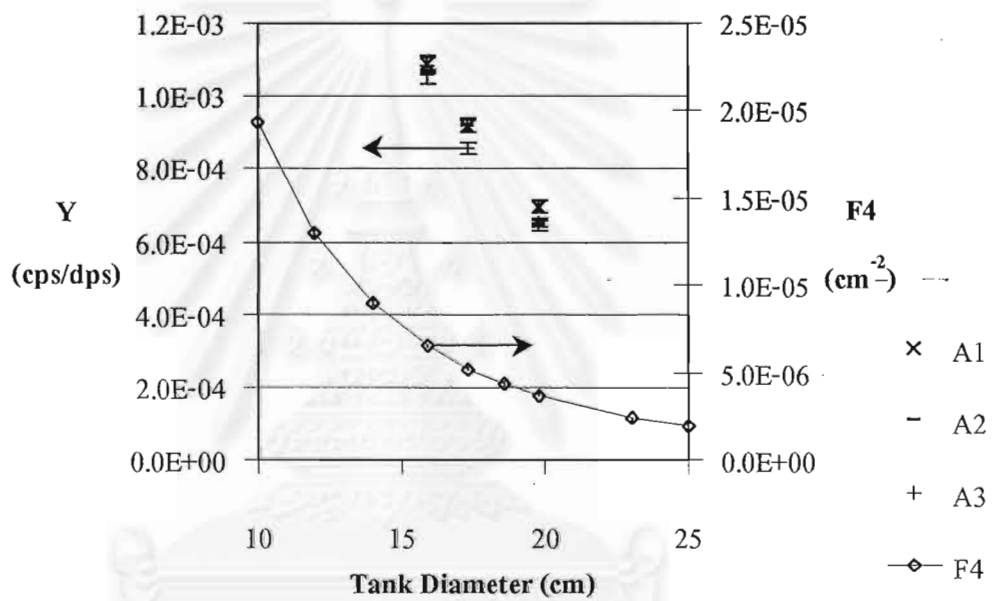
ค่าความผิดพลาดส่วนใหญ่ในการทดลองเกิดจากการหาค่าความแรงรังสีจำเพาะของสารรังสีที่นำมาใช้ในการทดลอง ซึ่งในกรณีนี้ค่าความแรงรังสีจำเพาะเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองสามครั้งที่ระยะห่างระหว่างคันทันกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสีตามค่านั้นมีค่าผิดพลาดสัมพัทธ์ประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ของค่าความแรงรังสีจำเพาะ เนื่องจากค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ที่ได้จากการนับนั้นมีค่าในช่วง 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างกันมากกับค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการหาค่าความแรงรังสีจำเพาะจึงกำหนดให้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์จากการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีนั้นมีค่าประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์

ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ได้จากการทดลองมีความสอดคล้องกับผลการคำนวณนับค่า (F2 F4 และF8) คือแสดงการลดลงตามค่าเส้นผ่าศูนย์กลางถังที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 4.7 รูปที่ 4.8 และรูปที่ 4.9 ตามลำดับ



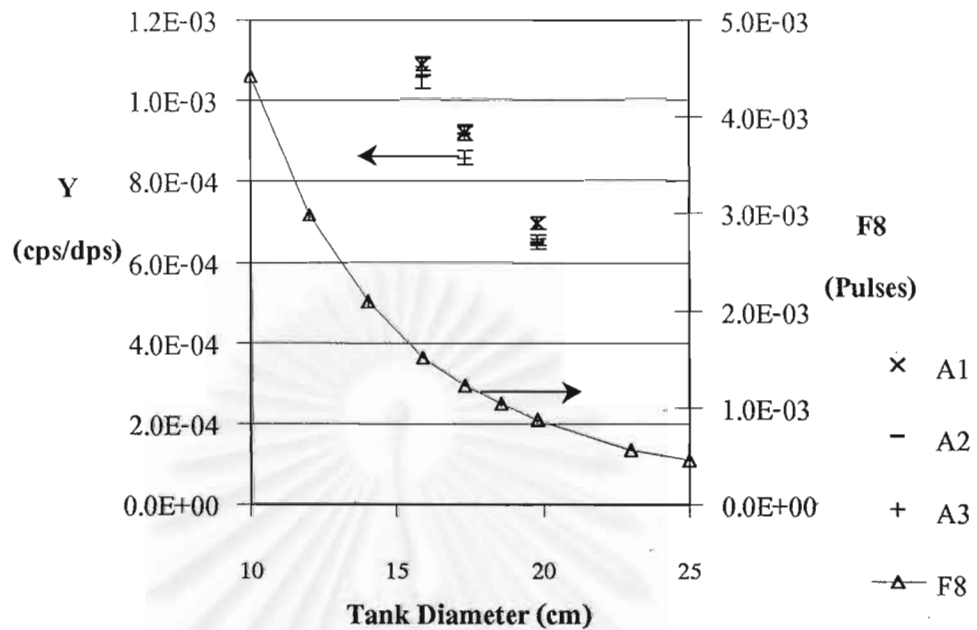
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสีต่าง ๆ (A1<A2<A3) กับค่า F2 กรณีถึงผลสมมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.7 ผลการคำนวณนับค่า F2 แสดงถึงค่าฟลักซ์เฉลี่ยที่พื้นผิวด้านหน้าของหัววัดรังสี ซึ่งแปรผันโดยตรงกับโอกาสที่อนุภาคหนึ่งจากต้นกำเนิดรังสีจะสามารถเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวด้านหน้าเข้าสู่ภายในของหัววัดรังสีได้ ซึ่งวิธีการคำนวณนับค่านี้ไม่ได้ขึ้นกับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัดรังสี แต่เนื่องจากการคำนวณจะกระทำตามเงื่อนไขเฉพาะกับอนุภาคที่มีพลังงานอยู่ในช่วงยอดพลังงานในสเปกตรัม จึงเกิดความสอดคล้องกันระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับการคำนวณนับค่า F2 ซึ่งค่าประสิทธิภาพการนับรังสีนี้คำนวณจากจำนวนนับรังสีสุทธิ (Net Counts) ภายใต้บริเวณยอดพลังงานเดียวกัน คือช่วง 0.124 ถึง 0.158 MeV



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสีต่าง ๆ (A1<A2<A3) กับค่า F4 กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.8 การคำนวณนับค่า F4 เป็นการหาค่าเฉลี่ยค่าฟลักซ์ภายในหัววัดรังสีซึ่งแปรผันโดยตรงกับโอกาสที่อนุภาคจากต้นกำเนิดรังสีจะเคลื่อนที่เข้าไปทำอันตรกิริยาภายในหัววัดรังสี โดยที่อนุภาคเหล่านั้นมีค่าพลังงานอยู่ในช่วงยอดพลังงาน จึงให้ผลที่สอดคล้องกับค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่คำนวณจากจำนวนนับรังสีภายใต้ยอดพลังงานเดียวกัน ที่ถึงแม้ว่าค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจะเป็นผลลัพธ์ที่รวมเอาค่าประสิทธิภาพทางพลังงานของหัววัดรังสีไว้แล้ว แต่ค่าดังกล่าวจะคงที่ที่ค่าพลังงานของรังสีที่ใช้ในการทดลอง ค่าจากการคำนวณนับค่าและค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจึงมีแนวโน้มลดลง ซึ่งสอดคล้องกันตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของถังที่เพิ่มขึ้น

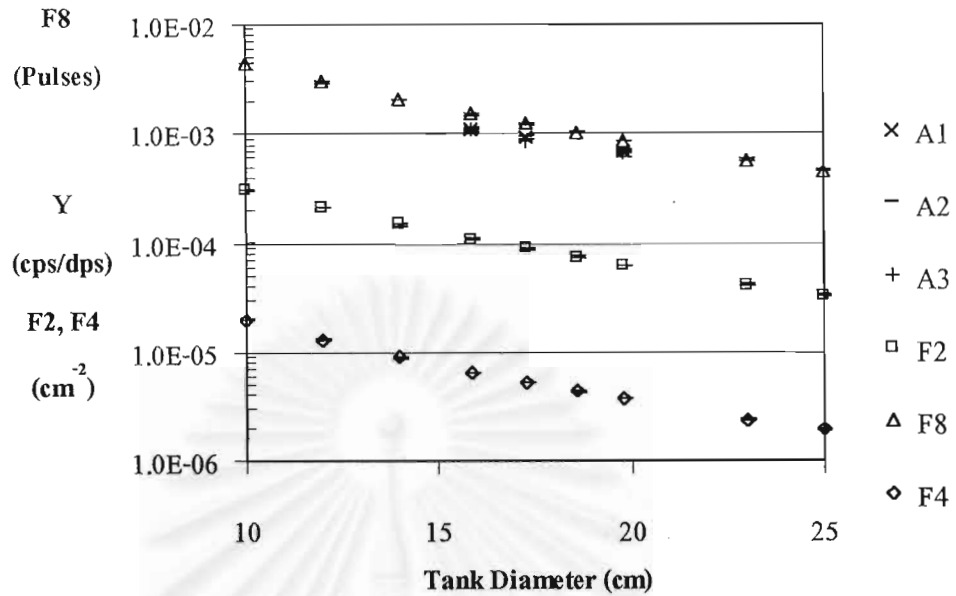


รูปที่ 4.9 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี

ต่าง ๆ ($A1 < A2 < A3$) กับค่า F8 กรณีถึงผลสมมาตรฐาน

จากรูปที่ 4.9 การคำนวณนับค่า F8 นั้นเป็นการคำนวณค่าเฉลี่ยของโอกาสที่อนุภาคหนึ่งจากต้นกำเนิดรังสี จะสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่หัววัดรังสี โดยถ่ายเทพลังงานที่อยู่ในช่วงยอดของพลังงานให้กับวัสดุที่ใช้ทำหัววัดรังสีได้ การคำนวณนับค่าประเภนี้จึงขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่ใช้ทำหัววัดรังสี และค่าที่คำนวณนับได้นั้นควรมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากแนวโน้มการลดลงของค่าจากการคำนวณนับค่ากับค่าประสิทธิภาพการนับรังสีตามขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถังที่เพิ่มขึ้น จึงแสดงถึงความสอดคล้องกันระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่าจากการคำนวณนับค่า F8

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



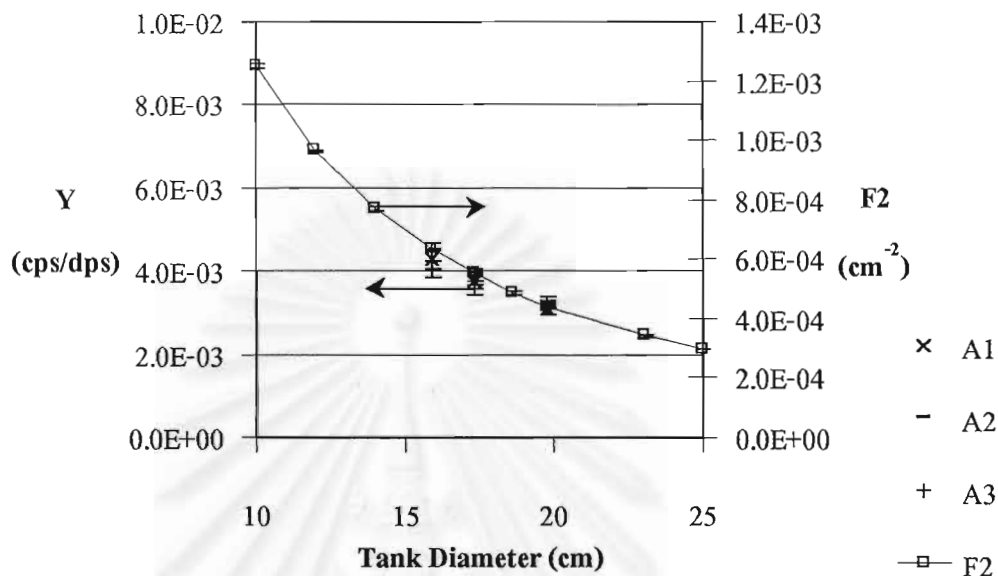
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่
ความแรงรังสีต่าง ๆ กัน (A1<A2<A3) และผลลัพธ์จาก
แบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน

รูปที่ 4.10 เมื่อนำค่าทั้งหมดมาแสดงบนสเกลลอการิทึมจะแสดงถึงแนวโน้มโดยภาพรวมของการลดลงของค่าประสิทธิภาพการนับรังสี ณ ระดับความแรงรังสีทั้งสามระดับและเป็นการลดลงที่สอดคล้องกันค่าจากการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภท F2 F4 และ F8 ต่อการเปลี่ยนแปลงเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง ข้อสังเกตประการหนึ่งคือ เช่นเดียวกับรูปที่ 4.3 ซึ่งแสดงแนวโน้มที่ได้จากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนทางทฤษฎีกับค่าจากการคำนวณนับค่าทั้งสามที่สอดคล้องกันทั้งหมด จึงมีความเป็นไปได้ที่ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลองสามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับค่าจากการคำนวณนับค่าทั้งสาม โดยแต่ละค่าเป็นจำนวนเท่าซึ่งกันและกัน

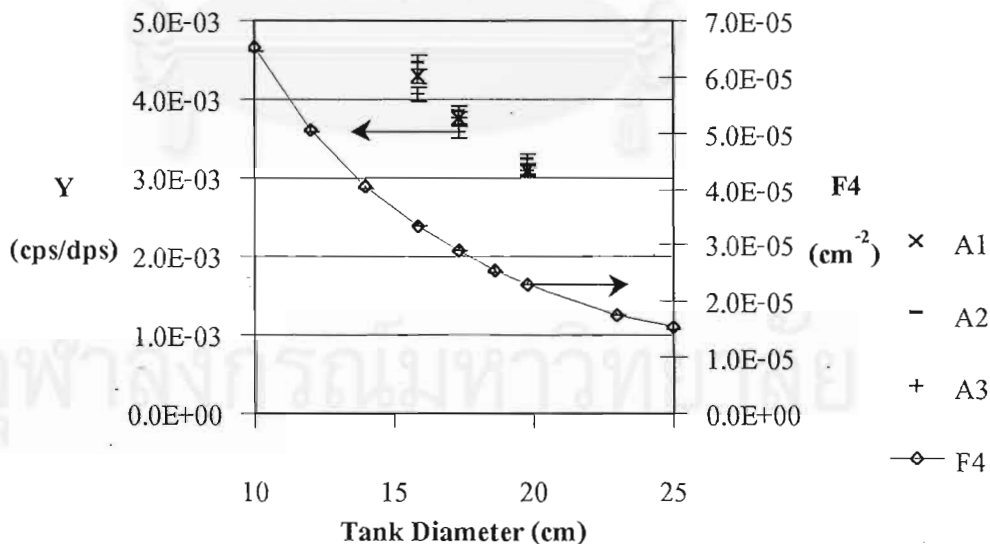
4.2.2 ผลการศึกษาเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่า F1 F2 และ F8 กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

จากการกำหนดเงื่อนไขการคำนวณในช่วงพลังงาน 0.123-0.159 MeV ผลที่ได้เช่นเดียวกับกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน มีแนวโน้มที่สอดคล้องกันระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่าจากการคำนวณนับค่า (F2 F4 และ F8) ของแบบจำลองมอนติคาร์โล ที่คำนวณผ่านศูนย์กลางท่อต่าง ๆ ดังรูปที่ 4.11 รูปที่ 4.12 รูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14 แบบจำลองท่อนี้ ทำให้ได้ข้อสังเกต

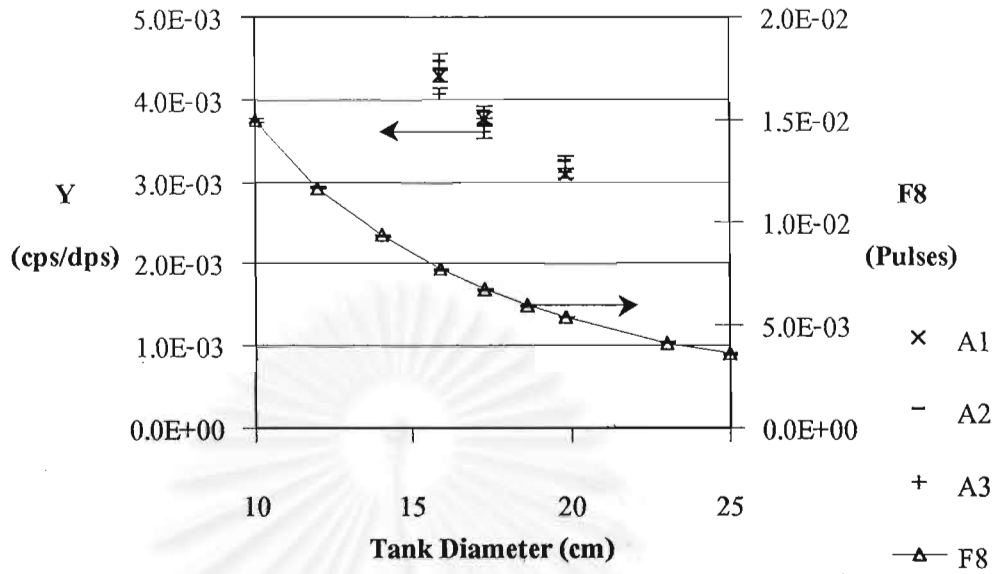
เช่นเดียวกับแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐานว่า ค่าประสิทธิภาพการนับรังสี และค่าจากการคำนวณนับค่าทั้งสามประเภทสามารถแสดงถึงความสัมพันธ์ที่เป็นจำนวนเท่าของกันและกัน



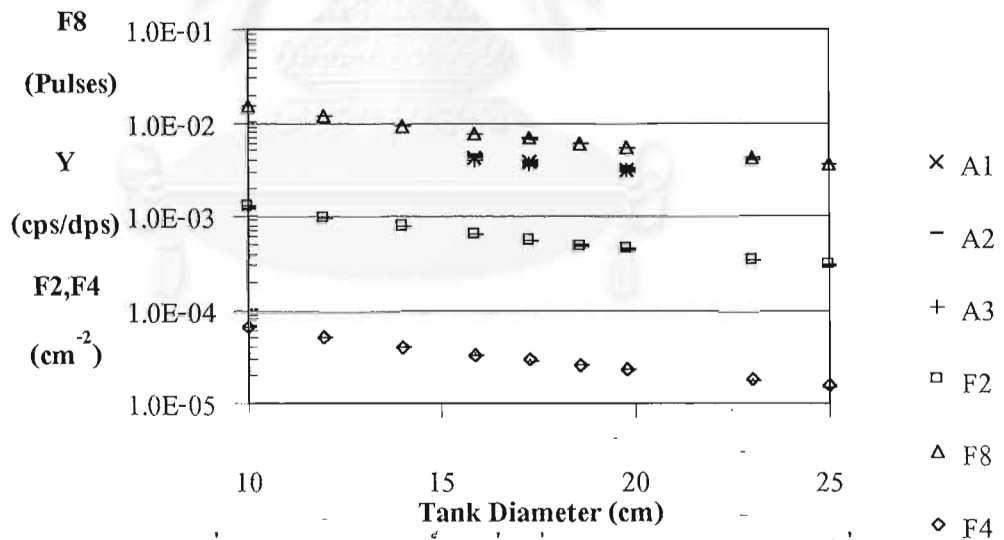
รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี 3 ระดับ (A1<A2<A3) กับค่า F2 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาดต่าง ๆ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.12 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี 3 ระดับ (A1<A2<A3) กับค่า F4 ที่เส้นผ่านศูนย์กลางของท่อขนาดต่าง ๆ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ค่าความแรงรังสี 3 ระดับ (A1<A2<A3) กับค่า F8 ที่เส้นผ่าศูนย์กลางของท่อขนาดต่าง ๆ กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่ความแรงรังสี 3 ระดับ (A1<A2<A3) และผลการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 จากแบบจำลองท่อความยาว 20 เซนติเมตร

ข้อสรุปจึงมีว่าการกำหนดช่วงพลังงานในการคำนวณนับค่าที่สัมพันธ์กับการทดลอง เป็นเงื่อนไขสำคัญที่ทำให้สามารถเปรียบเทียบค่าจากการคำนวณนับค่ากับค่าประสิทธิภาพการนับรังสี

4.2.3 ผลการศึกษาแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่าจากการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 จากแบบจำลองถึงกวนผสม และแบบจำลองท่อ

จากแนวโน้มของค่าประสิทธิภาพการนับรังสีที่สอดคล้องกับค่าจากการคำนวณนับค่า ซึ่งลดลงตามการเพิ่มของขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางถึงหรือท่อ ข้อสังเกตที่ได้จากแต่ละแบบจำลอง นำไปสู่ข้อสรุปที่ว่า ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลอง สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์กับค่าจากการคำนวณนับค่า โดยการใช้ตัวประกอบเพื่อปรับแก้ค่า ซึ่งเป็นค่าคงที่ที่คำนวณจากผลหารระหว่างค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกับค่าจากการคำนวณนับค่าแต่ละประเภท แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ยรวมโดยคิดจากผลของค่าเส้นผ่าศูนย์กลางถึงหรือท่อทั้งสามค่าในสามระดับความแรงรังสี ซึ่งรวมทั้งสิ้นแก้ค่า ซึ่งค่าเฉลี่ยของตัวประกอบที่คำนวณ จะนำไปใช้ในการประมาณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณต่อไป

การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎีของทั้งสองแบบจำลองพบว่า ค่าดังกล่าวก็สอดคล้องกับค่าจากการคำนวณนับค่าทุกประเภทเช่นกัน จึงเป็นเหตุให้เกิดการพิจารณาการคำนวณค่าตัวประกอบเพื่อปรับแก้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎีของแต่ละแบบจำลองด้วยเช่นกัน ซึ่งค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจะถูกหารด้วยค่าสัมประสิทธิ์ดังกล่าวตามเงื่อนไขในแต่ละขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางถึงหรือท่อ ตามระดับความแรงรังสีตามระดับ แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำค่าเฉลี่ยของตัวประกอบไปใช้ ซึ่งเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณต่อไป

4.3 การปรับเทียบเพื่อการทำนายค่าประสิทธิภาพการนับรังสี

จากความสอดคล้องกันของแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงค่าผลลัพธ์จากแบบจำลองมอนติคาร์โล ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี และค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลอง ได้นำมาสู่การพิจารณาว่า ความสัมพันธ์ของทั้งหมดควรจะออกมาในรูปของค่าที่เป็นจำนวนเท่าของกันและกัน โดยอาศัยตัวประกอบสำหรับปรับแก้ค่าจากแบบจำลองต่าง ๆ จะสามารถคำนวณเพื่อประมาณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณได้ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมามีวิธีขั้นตอนดังนี้

4.3.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากผลการจำลองกับผลการทดลอง

ผลการจำลอง ซึ่งได้แก่ค่า F2 F4 และ F8 ของแต่ละแบบจำลอง จะนำมาใช้หาค่าตัวประกอบสำหรับการเปรียบเทียบ ซึ่งเรียกว่า ตัวประกอบจากการคำนวณนับค่า (K) โดยการนำค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลองหารด้วยค่า F2 F4 และ F8 ตามลำดับ เพื่อให้ได้ค่าตัวประกอบดังกล่าวสำหรับแต่ละการคำนวณนับค่า

- ค่าตัวประกอบจากการคำนวณนับค่ากรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

การคำนวณจะกระทำกับทุกผลการทดลองซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการนับรังสีทั้งสิ้น 9 ข้อมูล จากขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ค่า และระดับความแรงรังสี 3 ระดับ ซึ่งตารางที่ 4.1 แสดงค่าสถิติของค่าตัวประกอบของการคำนวณนับค่าแต่ละประเภท คือ K2 เป็นค่าตัวประกอบของการคำนวณนับค่า F2 ขณะที่ K4 เป็นค่าตัวประกอบของการคำนวณนับค่า F4 และ K8 เป็นค่าตัวประกอบของการคำนวณนับค่า F8

ตารางที่ 4.1 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบ (K)

กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

| ตัวประกอบ | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบน | ค่าผิดพลาด |
|-----------|-----------|--------------|------------|
| | | มาตรฐาน | สัมพัทธ์ |
| K2 | 10.29 | 0.47 | 4.57% |
| K4 | 171.81 | 8.422 | 4.90% |
| K8 | 0.74 | 0.036 | 4.94% |

- ค่าตัวประกอบจากการคำนวณนับค่ากรณีท่อกความยาว 20 เซนติเมตร

เช่นเดียวกันกับการคำนวณค่าตัวประกอบในกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน ค่าทั้งหมดจะคำนวณจากการหารค่าประสิทธิภาพการนับรังสีด้วยผลลัพธ์การคำนวณนับค่าแต่ละประเภท ผลการวิเคราะห์สถิติเป็นดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบ (K)

กรณีท่อกวามยาว 20 เซนติเมตร

| ตัวประกอบ | ค่าเฉลี่ย | ค่าเบี่ยงเบน มาตรฐาน | ค่าผิดพลาด สัมพัทธ์ |
|-----------|-----------|-------------------------|------------------------|
| K2 | 6.86 | 0.283 | 4.12% |
| K4 | 130.69 | 5.781 | 4.42% |
| K8 | 0.56 | 0.024 | 4.21% |

4.3.2 การเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎีกับผลการทดลอง

วิธีการคือการนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎีไปหารค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลอง ซึ่งจะให้ผลเป็นค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (C)

- การหาค่าตัวประกอบทางทฤษฎีกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน (CM)
ค่า CM ที่คำนวณได้พร้อมทั้งค่าสถิติเป็นดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CM)

กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

| ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CM) | |
|---------------------------|----------|
| ค่าเฉลี่ย | 9.76E-01 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 4.66E-02 |
| ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ | 4.77% |

- การหาค่าตัวประกอบทางทฤษฎีกรณีท่อกวามยาว 20 เซนติเมตร (CF)
ค่า CF ที่คำนวณได้พร้อมทั้งค่าสถิติเป็นดังตารางที่ 4.4

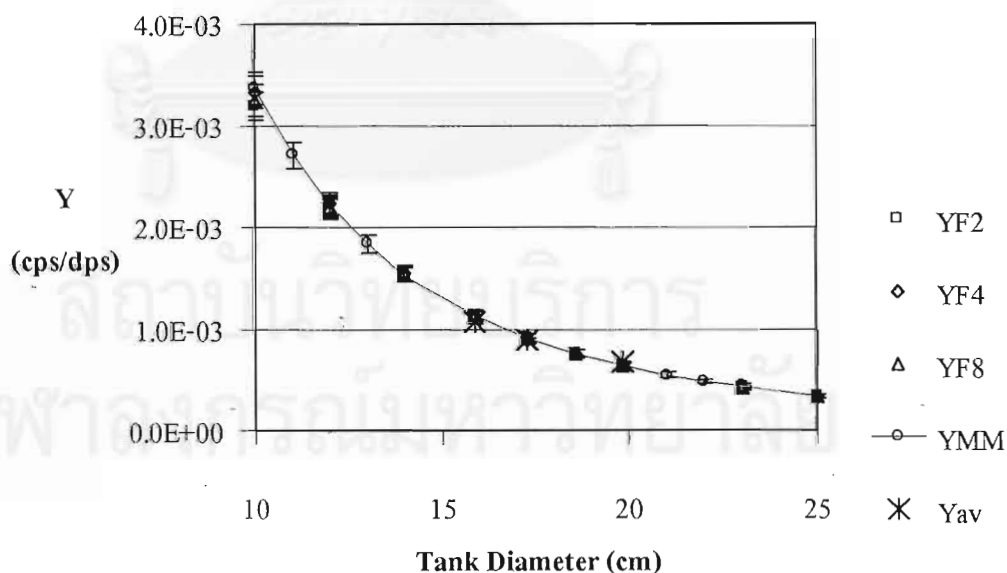
ตารางที่ 4.4 ค่าสถิติที่ได้จากการวิเคราะห์ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CF)

กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

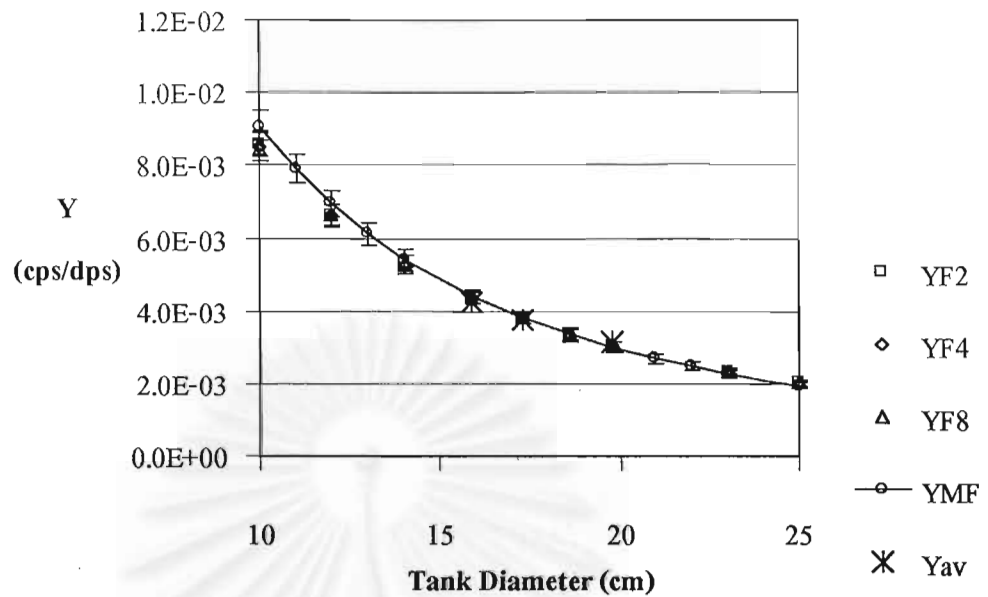
| ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CF) | |
|---------------------------|----------|
| ค่าเฉลี่ย | 0.0372 |
| ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน | 0.001787 |
| ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ | 4.80% |

4.4 ผลการทำนายค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณด้วยแบบจำลอง

ในรูปที่ 4.15 แสดงผลการทำนายค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ YF2 YF4 และ YF8 ในกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน ซึ่งคำนวณจากค่าการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 ตามลำดับ และ ค่า YMM เป็นค่าที่คำนวณจากค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี โดยใช้ตัวประกอบ (CM) ที่คำนวณได้เป็นตัวคูณเพื่อปรับค่า เมื่อพิจารณากับค่า Yav ซึ่งเฉลี่ยจากค่าประสิทธิภาพการนับรังสีสามระดับ ในแต่ละค่าเส้นผ่าศูนย์กลางของถัง จะเห็นว่าค่าที่ได้มีค่าที่ใกล้เคียงกัน ผลในลักษณะเดียวกันสามารถดูได้จากรูปที่ 4.16 ซึ่งเป็นกรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร



รูปที่ 4.15 ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ คำนวณจากการคำนวณนับค่า F2 F4 F8 และจากสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน



รูปที่ 4.16 ค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ คำนวณจากการ
คำนวณนับค่า F2 F4 F8 และจากสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี
กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

จากรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16 แสดงถึงค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยการประมาณที่มีค่าใกล้เคียงกัน เมื่อใช้ค่าจากการคำนวณนับค่า F2 F4 หรือ F8 ในการคำนวณโดยใช้ตัวประกอบสำหรับคูณเพื่อปรับค่า นอกจากนี้ยังสามารถใช้สมการที่ 4.5 ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน และใช้สมการที่ 4.8 คำนวณในกรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตรได้ โดยมีต้นกำเนิดรังสีที่ใช้เป็น Tc-99m ค่าที่ได้จากสมการทั้งสองมีค่าแตกต่างจากผลการคำนวณนับค่าค่อนข้างมากในช่วงที่เส้นผ่านศูนย์กลางของถังและท่อมีค่าน้อย ซึ่งค่าประสิทธิภาพการนับรังสีในช่วงดังกล่าวมีค่ามาก เนื่องจากสมการที่ 4.5 และ 4.8 ไม่ได้คำนึงถึงผลของความหนาของถังหรือท่อซึ่งมีข้อจำกัด ทำให้ไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ประมาณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีของถังหรือท่อที่มีความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลาง กับความหนาซึ่งมีค่าแตกต่างออกไปมาก ๆ ได้ การใช้วิธีมอนติคาร์โลในการคำนวณด้วยการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 จึงยังเป็นที่เลือกสำหรับการหาประมาณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยมีต้นกำเนิดรังสีเป็น Tc-99m

บทที่ 5

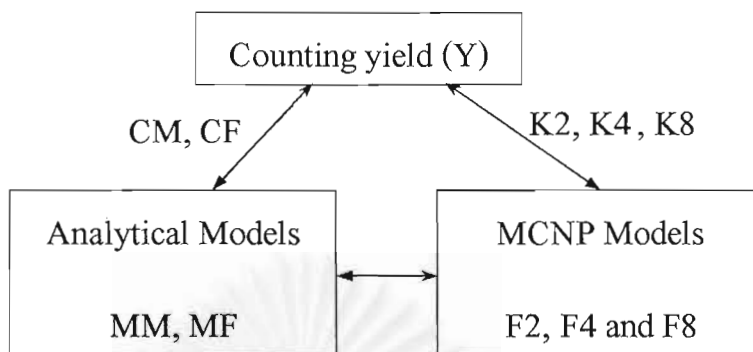
สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

จากการศึกษาผลการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8 ซึ่งเป็นการทดลองทางสถิติด้วยวิธีมอนติคาร์โลทำให้ได้ทราบถึงแนวโน้มของการลดลงของค่าผลลัพธ์จากการคำนวณนับค่า ต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดของของเหลวที่เป็นต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร แนวโน้มที่ได้จากการทดลองทางสถิติด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นเป็นไปในแนวเดียวกันกับการลดลงของค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลอง การสอดคล้องกันของการทดลองทั้งสองนั้นมีสาเหตุมาจากการกำหนดช่วงพลังงานที่ใช้เปรียบเทียบที่ตรงกัน โดยเป็นช่วงของค่าพลังงานที่เป็นตำแหน่งยอด (Energy Peak) ซึ่งทำให้ผลการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสีนั้น สามารถนำมาสร้างความสัมพันธ์เพื่อทำนายค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ (Estimated Counting Yield) ได้ โดยการใช้ตัวประกอบการคูณเพื่อปรับค่าจากการคำนวณนับค่า (F2 F4 หรือ F8) แต่ละประเภทให้เป็นค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ แล้วนำค่าที่ได้ไปใช้ในการประมาณค่าความแรงรังสีที่จะให้ค่าอัตรานับรังสีที่ต้องการ

นอกจากนี้ ผลการศึกษาจากการทดลองทางสถิติด้วยวิธีมอนติคาร์โล ยังทำให้ทราบถึงปัจจัยที่มีผลต่อค่าจากการคำนวณนับค่า ซึ่งนำไปสู่การพัฒนาแบบจำลองทางทฤษฎีที่สามารถนำมาใช้ในการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณได้ โดยใช้ตัวประกอบการคูณในการปรับค่าที่คำนวณจากสมการที่ 4.4 และสมการที่ 4.7 สำหรับกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน และกรณีของท่อ ตามลำดับ โดยข้อจำกัดในการใช้สมการอยู่ที่ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของถัง หรือท่อที่บรรจุของเหลว กับความหนาของถังหรือท่อ ที่จะต้องไม่แตกต่างกันมากจากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ซึ่งในแบบจำลองนั้นค่าความหนาของถังมีค่าประมาณ 0.05 เซนติเมตร และท่อหรือถังมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 10 ถึง 25 เซนติเมตร และเช่นเดียวกันกับค่าพลังงานของรังสีนั้นไม่ก็ควรที่จะมีค่าพลังงานของรังสีแกมมาที่แตกต่างไปมาจากไอโซโทป Tc-99m ที่มีค่า 0.142 MeV เพราะค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงจะส่งผลต่อค่าตัวประกอบทุกประเภทที่คำนวณไว้ เนื่องจากค่าของตัวประกอบทุกประเภทเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของวัสดุที่ใช้ทำหัววัดรังสี จึงมีค่าที่แปรตามพลังงานของรังสีที่ตกกระทบหัววัดรังสี

ขั้นตอนการคำนวณแต่ละวิธี สามารถสรุปเป็นแผนผังดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 ทางเลือกในการประมาณค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Y)

- การคำนวณเพื่อหาค่าความแรงรังสีสำหรับชนิดสารรังสีติดตาม

เมื่อการปฏิบัติงานครั้งหนึ่งกำหนดให้ ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ของอัตรานับรังสีมีค่าประมาณ 1% ซึ่งค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์นี้เป็นอัตราส่วนระหว่างส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตรานับรังสี ต่อค่าอัตรานับรังสี นั่นคือ

$$\frac{\sigma(R)}{R} = 0.01 = \frac{1}{R} \left(\frac{R}{t} \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{1}{Rt} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$10^{-4} = \frac{1}{Rt}$$

$$R = \frac{10^4}{t}$$

5.1

โดยที่ค่า R เป็นอัตราการนับรังสีสุทธิ (Net Counting Rate) ค่า $\sigma(R)$ เป็นค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานที่คิดได้จากสมการ 2.33 ส่วนค่า t เป็นช่วงเวลาที่ใช้ในการปฏิบัติงาน เพื่อให้หน่วยของเวลาสัมพันธ์กับหน่วยของอัตราการสลายตัวของรังสี จึงใช้หน่วยเป็นวินาที

จากความสัมพันธ์ของค่าประสิทธิภาพการนับรังสี เมื่อแทนค่าอัตราการนับรังสี (R) ลงในสมการ 2.28 จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้ประมาณค่าความแรงรังสีดังนี้

$$A = \frac{R}{Y} = \frac{10^4}{Yt}$$

5.2

โดยที่ค่า Y จะเป็นค่าประสิทธิภาพการนับรังสี ซึ่งอาจคำนวณค่าประมาณได้จากผลคูณของค่าจากการคำนวณนับค่า $F2$ $F4$ หรือ $F8$ กับตัวประกอบ $K2$ $K4$ หรือ $K8$ หรือจากผลคูณของค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี (MM หรือ MF) กับตัวประกอบทางทฤษฎี (CM หรือ CF) กรณีถึงกวนผสมมาตรฐานเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

$$A = \frac{10^4}{(Ki)(Fi) t} = \frac{10^4}{(CM)(MM)t} \quad 5.3$$

เมื่อค่า Fi อาจจะเป็น $F2$ $F4$ หรือ $F8$ ซึ่งผู้ปฏิบัติงานสามารถเลือกใช้ได้ โดยเลือกค่า Ki ให้ตรงกัน ส่วนกรณีของท่อบรรจุสารรังสีติดตาม เขียนเป็นสมการดังนี้

$$A = \frac{10^4}{(Ki)(Fi) t} = \frac{10^4}{(CF)(MF)t} \quad 5.4$$

ยกตัวอย่าง การใช้สารรังสีติดตามกรณีถึงกวนผสมมาตรฐานบรรจุของเหลวที่เป็นน้ำ ซึ่งถึงมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 19.8 เซนติเมตร ค่าความแรงรังสีของรังสีแกมมาจาก $Tc-99m$ ที่จะให้ค่าอัตรานับรังสีที่มีค่าความผิดพลาด 1% ในเวลาปฏิบัติงาน 1 วินาที ด้วยระบบวัดรังสีที่มีหัววัดโซเดียมไอโอไดด์ (แคลเซียม) ขนาด 2 นิ้ว X 2 นิ้ว ค่า $K2$ ที่คำนวณได้จากตารางที่ 4.1 มีค่าเท่ากับ 10.29 เซนติเมตร² และค่า $F2$ เท่ากับ 6.20×10^{-5} เซนติเมตร⁻² (จากตารางที่ ข.1)

$$A = \frac{10^4}{(K2)(F2)t} = \frac{10^4}{(10.29)(6.20 \times 10^{-5})(1)}$$

$$A = 1.57 \times 10^7 \text{ Bq}$$

เมื่อใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี (MM) ในการคำนวณ ซึ่งค่า MM คำนวณจากสมการ 4.5 เท่ากับ 0.000652 เซนติเมตร⁻² และค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CM) จากตารางที่ 4.3 มีค่าเท่ากับ 0.976 เซนติเมตร² ค่าความแรงรังสีคำนวณได้ดังนี้

$$A = \frac{10^4}{(CM)(MM)t} = \frac{10^4}{(6.52 \times 10^{-4})(9.76 \times 10^{-1})(1)}$$

$$A = 1.57 \times 10^7 \text{ Bq}$$

กรณีแบบจำลองท่อ การคำนวณทำได้โดยใช้สมการ 5.4 เมื่อเส้นผ่าศูนย์กลางมีค่าเท่ากับ 19.8 เซนติเมตร โดยใช้ระบบวัดรังสี และเงื่อนไขการปฏิบัติงานเดียวกันกับกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน จะคำนวณค่าความแรงรังสีได้ดังนี้

$$A = \frac{10^4}{(K2)(F2)t} = \frac{10^4}{(6.86)(4.43 \times 10^{-4})(1)}$$

$$A = 3.29 \times 10^6 \text{ Bq}$$

เมื่อค่า K2 ได้จากตารางที่ 4.2 เท่ากับ 6.86 เซนติเมตร² และ ค่า F2 เท่ากับ 4.43×10^{-4} เซนติเมตร⁻² จากตารางที่ ข.2 ในภาคผนวก เมื่อคำนวณด้วยค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรวมทางทฤษฎี จะได้ค่า ดังนี้

$$A = \frac{10^4}{(CF)(MF)t} = \frac{10^4}{(0.0372)(0.08067)(1)}$$

$$A = 3.33 \times 10^6 \text{ Bq}$$

เมื่อค่า CF จากตารางที่ 4.4 มีค่าเท่ากับ 0.0372 และ ค่า MF ซึ่งคำนวณจากสมการ 4.8 มีค่าเท่ากับ 0.08067

- การคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลว ส่วนการคำนวณค่าประสิทธิภาพการนับรังสีต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของของเหลว (Counting Yield per unit volume of liquid source F) ทำได้โดยใช้สมการ 2.41 ดังนี้

$$F = V_f Y$$

$$= V_f (Fi)(Ki) = V_f (CF)(MF)$$

5.5

สำหรับระบบท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 19.8 เซนติเมตร บรรจุของเหลวรูปทรงกระบอกที่มีความสูง เท่ากับ 20 เซนติเมตร ซึ่งคิดเป็นปริมาตร V_f เท่ากับ 6,158 ลูกบาศก์เซนติเมตร ค่า F ของระบบจะ ประมาณได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 F &= V_f Y \\
 &= V_f (K^2)(F^2) \\
 &= (6,158)(6.86)(4.43 \times 10^{-4}) \\
 &= 18.71 \frac{\text{cps} * \text{cm}^3}{\text{dps}}
 \end{aligned}$$

เนื่องจากการใช้งานแบบจำลองทางทฤษฎีมีข้อจำกัดที่มากกว่าการคำนวณนับค่าด้วยวิธีมอนติคาร์โล เพราะผลการลดทอนของรังสีเนื่องจากความหนาของถังหรือท่อนั้นไม่ได้นำมาพิจารณา ทำให้แบบจำลองทางสถิติที่คำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลจึงเหมาะสมในการใช้งานในกรณีทั่วไป (General case) เนื่องจากผู้ใช้สามารถกำหนดค่าของข้อมูลในระบบได้อย่างครบถ้วนโดยใช้โปรแกรม Minput.xls และ Finput.xls สำหรับการเตรียมเพิ่มข้อมูลนำเข้าสำหรับโค้ด MCNP กรณีของถังกวนผสมมาตรฐาน และกรณีท่อบรรจุสารรังสีติดตาม ตามลำดับ

ถึงแม้ว่าปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์ของการประยุกต์ใช้สารรังสีติดตามจะเป็นที่เข้าใจ และสามารถจำลองได้ด้วยวิธีมอนติคาร์โลโดยใช้โค้ด MCNP แต่ข้อจำกัดประการสำคัญของวิธีการนี้อยู่ที่ค่าตัวประกอบการคูณที่ใช้ปรับเทียบค่าผลจากการคำนวณนับค่าให้เป็นค่าประสิทธิภาพการนับรังสีโดยประมาณ ซึ่งค่าดังกล่าวขึ้นอยู่กับระบบวัดรังสีที่ใช้ปฏิบัติงาน ค่าตัวประกอบการคูณที่คำนวณจากค่าเฉลี่ยความหนาแน่นผ่านศูนย์กลางของปริมาตรของเหลวรูปทรงกระบอก และที่ระดับความแรงรังสีสามระดับ จึงเหมาะสมกับการนับรังสีที่อัตราการนับรังสีที่ไม่สูงมาก เนื่องจากการประมวลผลสัญญาณนิวเคลียร์ของระบบอิเล็กทรอนิกส์ในระบบวัดรังสี จะมีการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นกับจำนวนนับรังสีที่เข้าสู่หัววัดรังสีต่อหนึ่งหน่วยเวลาในช่วงที่อัตราการนับรังสีมีค่าต่ำ (low counting rate)

5.2 ข้อเสนอแนะ

เนื่องจากค่าตัวประกอบชนิดต่าง ๆ คำนวณได้จากการทดลอง ซึ่งเก็บข้อมูลจากค่าเส้นผ่านศูนย์กลางสามค่าในสามระดับความแรงรังสี การขยายผลจากงานวิจัยนี้ไปสู่การใช้งานจริงควรมีการเก็บข้อมูลค่าประสิทธิภาพการนับรังสีจากการทดลองที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางต่าง ๆ เพิ่มขึ้น เพื่อให้ได้ข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณค่าตัวประกอบที่สามารถเป็นตัวแทนที่มีคุณภาพ รวมทั้งมีการศึกษาปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องจากความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบเพิ่มเติม ซึ่งสิ่งเหล่านี้จะส่งผลดีต่อความน่าเชื่อถือของการประมาณค่าความแรงรังสีของสารรังสีติดตาม และการทดลองทางสถิติด้วยวิธีมอนติคาร์โลจะช่วยให้ทราบถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของข้อมูล เมื่อมี

การเปลี่ยนความสัมพันธ์ใด ๆ ในระบบได้ โดยการพิจารณาที่ละเอียดแยกกัน ซึ่งจะช่วยให้ขั้นตอนการทดลองผิดถูกเพื่อเก็บข้อมูลมาศึกษาแนวโน้มของการเปลี่ยนแปลงเหล่านั้น

การประยุกต์ใช้การจำลองระบบด้วยวิธีมอนติคาร์โล กับระบบที่ไม่หยุดนิ่ง (Dynamic system) นั้น มีความเป็นไปได้ในระดับหนึ่ง เมื่อพิจารณาถึงการประยุกต์ใช้สารรังสีติดตามในระบบของเหลวเป็นตัวอย่าง กรณีของเหลวที่เป็นสารรังสีติดตามเคลื่อนที่ภายในท่อนั้น จะเริ่มต้นจากการจำลองการเปลี่ยนแปลงของขนาดของต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาตรภายในท่อ ซึ่งจำเป็นต้องอาศัยแบบจำลอง CFD (Computational fluid dynamic) เพื่อหาขนาดของของเหลวที่เป็นต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาตร ตามเงื่อนไขของรูปแบบการไหลของของไหลในท่อ (Flow pattern) และเงื่อนไขการปฏิบัติงาน (Operating condition) เมื่อปริมาตรของต้นกำเนิดรังสีนี้เคลื่อนที่ไปตามท่อที่ระยะต่าง ๆ ตามช่วงเวลา การจำลองการเดินทางของอนุภาครังสีด้วยวิธีมอนติคาร์โล จึงจะนำมาใช้จำลองค่าความเข้มของอนุภาครังสี (particle intensity or time-integrated flux) เมื่อปริมาตรดังกล่าวเคลื่อนที่ไปตามระยะต่าง ๆ ที่กำหนดไว้โดยใช้แบบจำลอง CFD เวลาที่ใช้ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้นจะไม่ใช้ค่าเวลาจริง (Real time) และไม่สัมพันธ์กับช่วงเวลาที่ปริมาตรของต้นกำเนิดรังสีเคลื่อนที่ แต่ค่าของช่วงเวลาที่ใช้คำนวณเพื่อให้ได้คำตอบที่มีค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ตามต้องการ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าความเข้มของอนุภาครังสีตามช่วงเวลาจริงที่ได้จากแบบจำลอง CFD จะเป็นผลลัพธ์ที่ได้ โดยการคำนวณชุดของแฟ้มข้อมูลนำเข้าของโค้ด MCNP ตามช่วงเวลาต่าง ๆ ที่ของเหลวซึ่งเป็นต้นกำเนิดรังสีที่มีปริมาตรเคลื่อนที่ไปตามท่อ

โค้ด MCNP สามารถนำมาประยุกต์ใช้งานได้หลากหลาย โดยแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ดังนี้ คือ

(1) การคำนวณต้นกำเนิดรังสีจำเพาะ (Fixed source calculation) เป็นการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของจำนวนอนุภาครังสี ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ในระบบที่จำลองขึ้น โดยมีต้นกำเนิดรังสีที่มีการนิยามค่าต่าง ๆ ไว้แล้ว โดยสามารถเลือกพิจารณาตามเงื่อนไขต่าง ๆ ได้ เช่น ชนิดของอนุภาครังสี ค่าพลังงาน และเวลา เป็นต้น

การศึกษาสเปกตรัมพลังงานของอนุภาครังสีชนิดใดชนิดหนึ่ง เพื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองจากระบบวัดรังสีที่กำหนด เป็นตัวอย่างหนึ่งของการใช้งานประเภทนี้ ซึ่งสเปกตรัมที่ได้จาก โค้ด MCNP จะเป็นสเปกตรัมที่จำลองจากการสุ่มตัวอย่างทางฟิสิกส์ เป็นต้นแบบ (Benchmark)^[9] สำหรับการวัดรังสี สำหรับใช้เปรียบเทียบกับสเปกตรัมพลังงานจากการทดลองหรือใช้กำหนดมาตรฐานในการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงาน

(2) การคำนวณค่าวิกฤต (Criticality calculation)^[16] เป็นการประมาณค่าตัวประกอบการคูณ (Multiplication Factor, k) สำหรับการประเมินแนวโน้มของสภาวะวิกฤต (Criticality) ของระบบที่มีความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตหนึ่ง ๆ ซึ่งอนุภาคที่คำนวณคือนิวตรอน และสามารถคำนวณร่วมกับอนุภาคอื่น ๆ ในลักษณะควบคู่กันได้ ปกติจะใช้ในการคำนวณค่าตัวประกอบการคูณของแกนปฏิกรณ์นิวเคลียร์ ที่มีการจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิต ของวัสดุต่าง ๆ ที่กำหนด หรือใช้ประเมินสภาวะวิกฤตของการจัดเก็บกากกัมมันตรังสีในรูปแบบต่าง ๆ โดยการคำนวณค่าตัวประกอบการคูณของระบบที่การจัดความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตที่กำหนด



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. Gardner, Robin P., and Ely, Ralph L., Jr. Radioisotope Measurement Applications in Engineering. New York: Reinhold Publishing, 1967.
2. Charlton, J. S. Radioisotope Techniques for Problem-solving in Industrial Process Plants. London: Leonard Hill, 1986.
3. Hendricks, John S. Introduction to Monte Carlo Methods. Los Alamos: TITANS Lecture, Applied Theoretical Physics Division, Los Alamos National Laboratory, February 3, 1997.
4. Briesmeister, Judith F. MCNP A General Monte Carlo N-Particle Transport Code version 4A Manual. Oak Ridge: Radiation Shielding Information Center, 1993.
5. Hendricks, John S. A Monte Carlo Code for Particle Transport. Los Alamos Science Number 22 1994; pp. 31-43.
6. Lorence, L. J. ,Jr. and Beutler, D. E.. Radiation Transport Phenomena and Modeling. Albuquerque: Simulation Technology Research Department, Sandia National Laboratories, 1997.
7. Hughes, H. Grady. Treating Electron Transport in MCNPTM. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1995.
8. Booth, Thomas E. A Sample Problem for Variance Reduction in MCNP. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1985.
9. Frankle, Stephanie. Benchmarking the Monte Carlo Simulation Code MCNP. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1994.
10. Whalen, Daniel J., Hollowell, David E. and Hendricks, John S. MCNP: Photon Benchmark Problems. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1991.
11. Whalen, D. J., Cardem, D. A., Uhle, J. L., and Hendricks, J. S. MCNP: Neutron Benchmark Problems. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1991.
12. Wagner, John C., Sisdak, James E., McKinney, Gregg W. MCNP: Criticality Safety Benchmark Problems. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1993.
13. George, Michael J., and others, The Use of Monte-Carlo Method to Simulate High-Energy Radiography of Dense Objects. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1990.

14. Brown, Robert Springer, Jr. Collision Biasing Schemes for Monte Carlo Transport Codes. Master's Thesis, Department of Nuclear and Energy Engineering, Graduate College, The University of Arizona, 1990.
15. Lamarsh, John R., Introduction to Nuclear Engineering. 2nd edition. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1982.
16. Harmon, Charles D., II, and others., Criticality Calculation with MCNP: A Primer. Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1994.



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

พิภพ ชรรณราชย์. การหาเวลาที่จำเป็นของการผสมในถังผสมที่มีการกวนแบบไม่ต่อเนื่องด้วยเทคนิคสารติดตาม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2535.

มิ่งขวัญ เจริญประยูร. ความน่าจะเป็นและสถิติ. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาคณิตศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2534.

ภาษาอังกฤษ

Glasstone, Samuel, and Sesonske, Alexander. Nuclear Reactor Engineering 4th edition. London: Chapman & Hall, Inc., 1994.

Hussein, Esam. Monte Carlo Particle Transport with the MCNP Code. Bangkok: Dept. of Nuclear Technology, Chulalongkorn University, 1997.

Knoll, Glenn F. Radiation Detection and Measurement. 1st edition. New York: John Wiley & Sons, 1979.

Lewis, E. E., and Miller, F. M. Computational Methods of Neutron Transport. Illinois: American Nuclear Society, Inc, 1993.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ตัวอย่างเพิ่มข้อมูลของคอมพิวเตอร์โค้ด MCNP 4A

ก.1 เพิ่มข้อมูลป้อนเข้ากรณีตั้งผสมมาตรฐาน

Mixing D10cmThick 0.05cm ModeP 1Bin 0.124-0.158MeV

c cell cards

```

1  1  -1.0  1 -2 -3 imp:p=1 $ Vol. Source Cylindrical cell m1=1
2  2  -7.92 (-1:3) -4 -5 6 imp:p=1 $ m2= SS-304
3  4  -3.67 7 -8 -9 imp:p=1 $ NaI(Tl) crystal m4=4
4  0  -10 #1 #2 #3 #6 imp:p=1$ Inside Void
5  0  10 imp:p=0 $ Outside Void
6  3  -11.34 (18:20:-17:-19)(-12 -16 11 15) 13 -14 imp:p=1$ Pb m3=3
7  3  -11.34 (28:30:-27:-29)(-22 -26 21 25) 23 -24 imp:p=1$ $ Pb m3=3

```

c surface cards

```

1  pz 0  $BottomPlaneofVolSource
2  pz 10  $=TankIDia Top plane of VolSource
3  cz 5  $=TankIDia/2 :SidePlaneofVolSource
4  pz 25  $=TankHeight :TopPlaneofTank
5  cz 5.05  $=TankIDia/2+TankThck :OuterCylindricalSidePlaneofTank
6  pz -0.05  $=Sur1-TankThck BottomSurfaceofBottomCellofTank
7  py 5.65  $=Sur14+Clearance(0.1) FrontPlaneofNaI(Tl)Crystal
8  py 10.73  $=Sur7+NaILength(5.08) BottomPlaneofNaI(Tl)Crystal
9  c/y 0 6.04 2.54  $z=6.04 R=2.54 SidePlaneofNaI(Tl)Crystal
10 sz 10 50  $z=10 R=50(2*Ymax) InsideVoid
11 px -9  $=4*Sur18 :SidePlaneofPbShield-x
12 px 9  $=4*Sur18 :SidePlaneofPbShield+x
13 py 5.15  $=Sur5+Clearance(0.1) FrontPlaneofPbShield+y
14 py 5.55  $=Sur13+FrontPbThck(0.4) BottomPlaneofPbShield+y
15 pz -1  $Sur1-1

```

```

16 pz 26 $Sur4+1
17 px -2.5 $=-WinWidth/2
18 px 2.5 $=WinWidth/2
19 pz 5.54 $Sur9Z-WinHeight(0.5)
20 pz 6.54 $Sur9Z+WinHeight(0.5)
21 px -5 $SidePlaneofPbShield-x
22 px 5 $SidePlaneofPbShield+x
23 py 5.75 $=(Sur7+Sur14)/2 FrontPlaneofPbShield+y
24 py 12 $=Sur8+1 :BottomPlaneofPbShield+y
25 pz 1.04 $=Sur9Z-RecPbThck(5)
26 pz 11.04 $=Sur9Z+RecPbThck(5)
27 px -2.64 $=Sur9R-Clearance(0.1)
28 px 2.64 $=Sur9R+Clearance(0.1)
29 pz 3.4 $=Sur9z-NaIDia/2(=2.54)-clearacne(0.1)
30 pz 8.68 $=Sur9z+NaIDia/2(=2.54)+clearacne(0.1)

sdef erg=0.1426833 par=2 cel=1 pos 0. 0. 6.04 axs 0. 0. 1. rad=d2 ext=d1
si1 -6.04 3.96 $-DetectHeight<ext<Sur2-DetectHeight
si2 0 5 $0<rad<TankIDia/2
mode p
phys:p 1. 0 1 $ULE detail phys=1.MeV; P not produce E=1; no coherent scat=1
c materials
m1 1000 0.6667 8000 0.3333 $ water
m2 24000 -0.190 25000 -0.020 26000 -0.695 28000 -0.095 $ SS 304
m3 82000 1 $ lead
m4 11000 0.4995 53000 0.4995 81000 .001 $ NaI(Tl)
area 6j 20.2683 23j
vol 2j 102.963 4j
c tally
f2:p 7 $ flux P at surface 7 : front plane of NaI Crystal

```

e2 0.124 0.158

f4:p 3 \$ fluxt P at cell 3 : front plane of NaI Crystal

e4 0.124 0.158

f8:p 3 \$ Pulses P created at cell 6 : Detector NaI Crystal

e8 0. 0.124 0.158

c miscellaneous

ctme 30

print



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ก.2 เพิ่มข้อมูลป้อนเข้ากรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

Labs' Fvalue Dia10cmThick 0.05cm Peak1Bin

c cell cards

- 1 1 -1.0 1 -2 -3 imp:p=1\$ \$ Vol. Source Cylindrical cell m1=1
- 2 2 -7.87 (-1:3) -4 -5 6 imp:p=1 \$ \$ Side Wall of tank m2=2
- 3 4 -3.67 7 -8 -9 imp:p=1 \$ \$ NaI(Tl) crystal m4=4
- 4 0 -10 #1 #2 #3 #6 imp:p=1 \$ \$ Inside Void
- 5 0 10 imp:p=0 \$ \$ Outside Void
- 6 3 -11.34 (18:20:-17:-19)(-12 -16 11 15) 13 -14 imp:p=1 \$ \$ Pb Shield m3=3

c surface cards

- 1 pz 0 \$=Bottom plane of Vol. source
- 2 pz 20 \$=SourceHeight :TopPlaneofVolSource
- 3 cz 5 \$TankIDia/2 :Side plane of Vol. source
- 4 pz 25 \$TankHeight :Top plane of Tank
- 5 cz 5.05 \$TankIDia/2+TankThck :OuterCylindricalSidePlaneofTank
- 6 pz -0.05 \$=-TankThck :Bottom surface of bottom cell of Tank
- 7 py 5.15 \$=Sur5+Clearance(0.1) :FrontPlaneofNaI(Tl)Crystal
- 8 py 10.23 \$=Sur7+NaILength(5.08) :BottomPlaneofNaI(Tl)Crystal
- 9 c/y 0 10 2.54 \$z=TankHeight/2 R=NaIDia/2 :SidePlaneofNaI(Tl)Crystal
- 10 sz 10 50 \$z=10 R=2*TankHeight(50) :InsideVoidSphere
- 11 px -5 \$ Side plane of Pb Shield -x
- 12 px 5 \$ Side plane of Pb Shield +x
- 13 py 5.1 \$=(Sur5+Sur7)/2 :FrontPlaneofPbShield+y
- 14 py 11 \$=Sur13+NaIThck+1 :BottomPlaneofPbShield+y
- 15 pz 5
- 16 pz 15
- 17 px -2.55 \$=-NaIDia/2-Clearance(0.01)
- 18 px 2.55 \$=NaIDia/2+Clearance(0.01)
- 19 pz 7.45 \$=TankHeight/2-NaIDia/2-Clearance(0.01)

```

20 pz 12.55 $=TankHeight/2+NaIDia/2+Clearance(0.01)
sdef erg=0.1426833 par=2 cel=1 pos 0. 0. 10. axs 0. 0. 1. rad=d2 ext=d1
si1 -10 10 $=TankHeigh/2<ext<TankHeigh/2
si2 0 5 $0<rad<TankDia/2
mode p $Mode P
phys:p 1. 0 1 $ULE detail phys=1.MeV; P not produce E=1; no coherent scat=1
c materials
m1 1000 0.6667 8000 0.3333 $ water
m2 24000 -0.190 25000 -0.020 26000 -0.695 28000 -0.095 $ iron
m3 82000 1 $ lead
m4 11000 0.4995 53000 0.4995 81000 .001 $ NaI(Tl)
area 6j 20.2683 13j
vol 2j 102.963 3j
c tally
f2:p 7 $ flux P at surface7 : front plane of NaI Crystal
e2 0.123 0.159
f4:p 3 $ flux P at cell3 :DetectorNaICrystal
e4 0.123 0.159
f8:p 3 $ Pulses P created at cell 3 :DetectorNaICrystal
e8 0 0.123 0.159
c miscellaneous
ctme 30
print

```

ภาคผนวก ข

ข้อมูลจากการจำลอง และข้อมูลจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ผลการคำนวณจากแบบจำลองถึงกวนผสมมาตรฐาน

ด้วยการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8

| D(cm) | F2(cm ⁻²) | Rel Err. | F4(cm ⁻²) | Rel Err. | F8(Pulses) | Rel Err. |
|-------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|------------|----------|
| 10 | 3.10E-04 | 0.90% | 1.93E-05 | 1.23% | 4.42E-03 | 0.91% |
| 12 | 2.12E-04 | 1.02% | 1.30E-05 | 1.38% | 2.99E-03 | 1.03% |
| 14 | 1.49E-04 | 1.36% | 9.02E-06 | 1.84% | 2.09E-03 | 1.36% |
| 15.9 | 1.08E-04 | 0.66% | 6.54E-06 | 0.89% | 1.52E-03 | 0.66% |
| 17.3 | 8.81E-05 | 0.73% | 5.24E-06 | 1.00% | 1.23E-03 | 0.74% |
| 18.6 | 7.36E-05 | 1.95% | 4.36E-06 | 2.71% | 1.03E-03 | 1.96% |
| 19.8 | 6.20E-05 | 0.89% | 3.70E-06 | 1.20% | 8.61E-04 | 0.89% |
| 23 | 4.09E-05 | 2.20% | 2.36E-06 | 2.99% | 5.67E-04 | 2.21% |
| 25 | 3.26E-05 | 2.46% | 1.94E-06 | 3.34% | 4.55E-04 | 2.47% |

ตารางที่ ข.2 ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ความยาว 20 เซนติเมตร

ด้วยการคำนวณนับค่า F2 F4 และ F8

| D(cm) | F2(cm ⁻²) | Rel. Err. | F4(cm ⁻²) | Rel. Err. | F8(Pulses) | Rel. Err. |
|-------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|------------|-----------|
| 10 | 1.25E-03 | 0.65% | 6.52E-05 | 0.75% | 1.50E-02 | 0.57% |
| 12 | 9.65E-04 | 0.58% | 5.07E-05 | 0.68% | 1.17E-02 | 0.51% |
| 14 | 7.70E-04 | 0.76% | 4.04E-05 | 0.88% | 9.38E-03 | 0.66% |
| 15.9 | 6.35E-04 | 0.42% | 3.35E-05 | 0.49% | 0.007721 | 0.37% |
| 17.3 | 5.54E-04 | 0.47% | 2.91E-05 | 0.55% | 6.74E-03 | 0.41% |
| 18.6 | 4.88E-04 | 0.98% | 2.55E-05 | 1.14% | 5.95E-03 | 0.85% |
| 19.8 | 4.43E-04 | 0.40% | 2.31E-05 | 0.47% | 5.37E-03 | 0.35% |
| 23 | 3.42E-04 | 0.93% | 1.77E-05 | 1.08% | 4.13E-03 | 0.81% |
| 25 | 2.97E-04 | 1.02% | 1.54E-05 | 1.18% | 3.60E-03 | 0.89% |

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Y)

กรณีถังกวนผสมมาตรฐาน

| Tank | Samp. | Net | Cps1 | Average | Y1 | Net | Cps2 | Average | Y2 |
|---------|-----------|--------|-------|---------|----------|--------|-------|---------|----------|
| Dia(cm) | Vol.(cc.) | Area1 | 180 s | Dps1 | cps/dps1 | Area2 | 180 s | Dps2 | cps/dps2 |
| 15.9 | 0.5 | 32,288 | 179 | 160,321 | 1.12E-03 | 33,984 | 189 | 159,093 | 1.19E-03 |
| 17.3 | | 26,696 | 148 | 153,682 | 9.65E-04 | 26,959 | 150 | 152,212 | 9.84E-04 |
| 19.8 | | 20,362 | 113 | 151,293 | 7.48E-04 | 19,600 | 109 | 149,559 | 7.28E-04 |
| 15.9 | 1 | 74,082 | 412 | 366,118 | 1.12E-03 | 72,125 | 401 | 361,919 | 1.11E-03 |
| 17.3 | | 48,095 | 267 | 270,223 | 9.89E-04 | 45,952 | 255 | 267,638 | 9.54E-04 |
| 19.8 | | 41,412 | 230 | 337,073 | 6.83E-04 | 40,775 | 227 | 333,208 | 6.80E-04 |
| 15.9 | 1.5 | 90,834 | 505 | 436,888 | 1.16E-03 | 88,836 | 494 | 432,709 | 1.14E-03 |
| 17.3 | | 68,255 | 379 | 419,604 | 9.04E-04 | 68,270 | 379 | 415,590 | 9.13E-04 |
| 19.8 | | 47,990 | 267 | 390,798 | 6.82E-04 | 48,952 | 272 | 387,804 | 7.01E-04 |

กรณีถังกวนผสมมาตรฐาน มีช่วงเวลาการนับรังสีครั้งละ 3 นาที

Net Area คือ จำนวนนับรังสีสุทธิบริเวณใต้ยอดพลังงานของ Tc-99m

Average Dps คือ ค่าเฉลี่ยของการสลายตัวของ Tc-99m ในช่วงเวลา 3 นาที

Cps คือ อัตรานับรังสีสุทธิ คำนวณจาก Net Areaหารช่วงเวลาการนับรังสี

Y คือ ค่าประสิทธิภาพการนับรังสี เท่ากับ Cps หารด้วย Average Dps

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการทดลองเพื่อหาค่าประสิทธิภาพการนับรังสี (Y)

กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

| Tank D(cm) | Samp. V(cc.) | Net Area1 | Cps1 120 s | Average Dps1 | Y1 cps/dps1 | Net Area2 | Cps2 120 s | Average Dps2 | Y2 cps/dps2 |
|---------------|-----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|--------------|---------------|-----------------|----------------|
| 15.9 | 0.5 | 140,304 | 1,169 | 273,048 | 4.3E-03 | 141,981 | 1,183 | 274,627 | 4.3E-03 |
| 17.3 | | 127,212 | 1,060 | 278,883 | 3.8E-03 | 125,752 | 1,048 | 280,496 | 3.7E-03 |
| 19.8 | | 105,497 | 879 | 284,295 | 3.1E-03 | 106,290 | 886 | 285,939 | 3.1E-03 |
| 15.9 | 1 | 316,926 | 2,641 | 596,581 | 4.4E-03 | 324,129 | 2,701 | 600,032 | 4.5E-03 |
| 17.3 | | 280,104 | 2,334 | 609,330 | 3.8E-03 | 284,239 | 2,369 | 612,854 | 3.9E-03 |
| 19.8 | | 241,518 | 2,013 | 621,833 | 3.2E-03 | 243,427 | 2,029 | 625,950 | 3.2E-03 |
| 15.9 | 1.5 | 477,208 | 3,977 | 983,255 | 4.0E-03 | 486,388 | 4,053 | 990,844 | 4.1E-03 |
| 17.3 | | 432,572 | 3,605 | 1,004,267 | 3.6E-03 | 436,304 | 3,636 | 1,010,075 | 3.6E-03 |
| 19.8 | | 382,240 | 3,185 | 1,027,010 | 3.1E-03 | 387,372 | 3,228 | 1,035,633 | 3.1E-03 |

กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร มีช่วงเวลากการนับรังสีครั้งละ 2 นาที

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

ผลคำนวณค่าตัวประกอบ

ตารางที่ ก.1 การคำนวณค่าตัวประกอบของการคำนวณนับค่า (K) กรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน

| Activity | Tank | Yav cps/dps | F2 | K2 | F4 | K4 | F8 | K8 |
|----------|-------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------|------|
| | D(cm) | | (cm ⁻²) | (cm ²) | (cm ⁻²) | (cm ²) | | |
| A1 | 15.9 | 1.09E-03 | 1.08E-04 | 10.06 | 6.54E-06 | 166.50 | 1.52E-03 | 0.72 |
| | 17.3 | 9.20E-04 | 8.81E-05 | 10.45 | 5.24E-06 | 175.59 | 1.23E-03 | 0.75 |
| | 19.8 | 6.97E-04 | 6.20E-05 | 11.24 | 3.70E-06 | 188.29 | 8.61E-04 | 0.81 |
| A2 | 15.9 | 1.05E-03 | 1.08E-04 | 9.73 | 6.54E-06 | 161.14 | 1.52E-03 | 0.69 |
| | 17.3 | 9.17E-04 | 8.81E-05 | 10.41 | 5.24E-06 | 175.02 | 1.23E-03 | 0.74 |
| | 19.8 | 6.43E-04 | 6.20E-05 | 10.38 | 3.70E-06 | 173.82 | 8.61E-04 | 0.75 |
| A3 | 15.9 | 1.08E-03 | 1.08E-04 | 10.01 | 6.54E-06 | 165.78 | 1.52E-03 | 0.71 |
| | 17.3 | 8.58E-04 | 8.81E-05 | 9.74 | 5.24E-06 | 163.64 | 1.23E-03 | 0.70 |
| | 19.8 | 6.53E-04 | 6.20E-05 | 10.54 | 3.70E-06 | 176.51 | 8.61E-04 | 0.76 |

ตารางที่ ก.2 การคำนวณค่าตัวประกอบ ของการคำนวณนับค่า (K)

กรณีท่อความยาว 20 เซนติเมตร

| Activity | Tank | Yav cps/dps | F2 | K2 | F4 | K4 | F8 | K8 |
|----------|-------|----------------|---------------------|--------------------|---------------------|--------------------|----------|-------|
| | D(cm) | | (cm ⁻²) | (cm ²) | (cm ⁻²) | (cm ²) | | |
| A1 | 15.9 | 4.30E-03 | 6.35E-04 | 6.76 | 3.35E-05 | 128.27 | 7.72E-03 | 0.556 |
| | 17.3 | 3.77E-03 | 5.54E-04 | 6.81 | 2.91E-05 | 129.33 | 6.74E-03 | 0.559 |
| | 19.8 | 3.10E-03 | 4.43E-04 | 6.99 | 2.31E-05 | 133.85 | 5.37E-03 | 0.576 |
| A2 | 15.9 | 4.46E-03 | 6.35E-04 | 7.03 | 3.35E-05 | 133.32 | 7.72E-03 | 0.578 |
| | 17.3 | 3.85E-03 | 5.54E-04 | 6.95 | 2.91E-05 | 132.05 | 6.74E-03 | 0.571 |
| | 19.8 | 3.24E-03 | 4.43E-04 | 7.31 | 2.31E-05 | 140.06 | 5.37E-03 | 0.603 |
| A3 | 15.9 | 4.07E-03 | 6.35E-04 | 6.40 | 3.35E-05 | 121.47 | 7.72E-03 | 0.527 |
| | 17.3 | 3.59E-03 | 5.54E-04 | 6.49 | 2.91E-05 | 123.35 | 6.74E-03 | 0.533 |
| | 19.8 | 3.11E-03 | 4.43E-04 | 7.02 | 2.31E-05 | 134.47 | 5.37E-03 | 0.579 |

ตารางที่ ค.3 ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CM) กรณีถึงกวางผสมมาตรฐาน

| Activity | Tank D(cm) | Yav cps/dps | MM cm ⁻² | CM cm ² |
|----------|---------------|----------------|------------------------|-----------------------|
| A1 | 15.9 | 1.09E-03 | 1.147E-03 | 9.49E-01 |
| | 17.3 | 9.20E-04 | 9.259E-04 | 9.94E-01 |
| | 19.8 | 6.97E-04 | 6.521E-04 | 1.07E+00 |
| A2 | 15.9 | 1.05E-03 | 1.147E-03 | 9.19E-01 |
| | 17.3 | 9.17E-04 | 9.259E-04 | 9.91E-01 |
| | 19.8 | 6.43E-04 | 6.521E-04 | 9.86E-01 |
| A3 | 15.9 | 1.08E-03 | 1.147E-03 | 9.45E-01 |
| | 17.3 | 8.58E-04 | 9.259E-04 | 9.26E-01 |
| | 19.8 | 6.53E-04 | 6.521E-04 | 1.00E+00 |

ค่าเฉลี่ย 9.76E-01

ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 4.66E-02

ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ 4.77%

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ค่าตัวประกอบทางทฤษฎี (CF) กรณีที่ต่อความยาว 20 เซนติเมตร

| Activity | Tank D(cm) | Yav cps/dps | MF | CF |
|----------|---------------|----------------|---------|--------|
| A1 | 15.9 | 4.30E-03 | 0.11832 | 0.0363 |
| | 17.3 | 3.77E-03 | 0.10239 | 0.0368 |
| | 19.8 | 3.10E-03 | 0.08067 | 0.0384 |
| A2 | 15.9 | 4.46E-03 | 0.11832 | 0.0377 |
| | 17.3 | 3.85E-03 | 0.10239 | 0.0376 |
| | 19.8 | 3.24E-03 | 0.08067 | 0.0401 |
| A3 | 15.9 | 4.07E-03 | 0.11832 | 0.0344 |
| | 17.3 | 3.59E-03 | 0.10239 | 0.0351 |
| | 19.8 | 3.11E-03 | 0.08067 | 0.0385 |

ค่าเฉลี่ย 0.0372
 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.001787
 ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ 4.80%

ภาคผนวก ง

วิธีการใช้งานโปรแกรมติดต่อผู้ใช้ minput.xls และ finput.xls

โปรแกรม minput.xls นั้นเป็นโปรแกรมติดต่อกับผู้ใช้สำหรับช่วยเตรียมเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของโค้ด MCNP ในกรณีถึงกวนผสมมาตรฐาน ในขณะที่เดียวกันโปรแกรม finput.xls จะใช้เตรียมเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าของกรณีแบบจำลองท่อ ซึ่งมีวิธีการใช้ของทั้งสองโปรแกรมมีขั้นตอนที่เหมือนกันดังนี้

เมื่อเลือกโปรแกรมหักกล่าวขึ้นมาทำงาน โดยใช้ชวด (Mouse) หรือการกด Enter ที่คีย์บอร์ด จะปรากฏหน้าจอดังรูปที่ ง.1

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---|--------------------------------------|---|---|------|----|--|---------|-----|--------|
| 1 | Tank | | | | | Physics Card | | | |
| 2 | Tank Diameter=Liquid Height | | | 23 | cm | Upper Energy for Applying Detailed Phy | | | |
| 3 | Tank Height | | | 25 | cm | Photon Produce Electron(Yes=0, No=1) | | | |
| 4 | Tank Thickness | | | 0.05 | cm | Include Coherent Scattering(Yes=1, No=1) | | | |
| 5 | NaI Detector Diameter(Length) | | | 5.08 | cm | Radiation Source | | | |
| 6 | Detector Height | | | 6.04 | cm | Energy | 0.14268 | MeV | |
| 7 | clearance | | | 0.1 | cm | Peak Energy | | | |
| 8 | Front Pb Shield | | | | | From | 0.124 | MeV | To |
| 9 | Shield Thickness | | | 0.4 | cm | Computer Run Time | | | 30 min |

รูปที่ ง.1 แสดงหน้าจอแรกของโปรแกรม Minput.xls

หน้าจอนี้แสดงเวิร์กชีต Input ซึ่งผู้ใช้สามารถป้อนค่ามิติของวัสดุต่าง ๆ ลงในเซลล์ รวมทั้งเงื่อนไขในการจำลองแบบต่าง ๆ ซึ่งค่าที่เปลี่ยนแปลงจะนำไปคำนวณเป็นข้อมูลสำหรับเพิ่มข้อ

มูลป้อนเข้าในเวิร์กชีต M ต่อไป เมื่อผู้ใช้ป้อนค่าต่าง ๆ ครบถ้วนแล้วก็ใช้ชวลเลือกเวิร์กชีต M เพื่อบันทึกเพิ่มข้อมูลป้อนเข้าในขั้นตอนต่อไป เวิร์กชีต M เป็นดังรูป ง.2

The screenshot shows a Microsoft Excel window titled 'Microsoft Excel - MInput2'. The worksheet 'M' contains the following data:

| | A | B | C | D | E | F | G | H | I | J | K | L |
|---|---|------|--------|--------|-----|----|-----|---------|----------|---|---|---|
| 1 | M | Inp | | | | | | | | | | |
| 2 | c | cell | cards | | | | | | | | | |
| 3 | 1 | 1 | -1 | 1 | -2 | -3 | | imp:p=1 | | | | |
| 4 | 2 | 2 | -7.92 | (-1:3) | -4 | -5 | 6 | imp:p=1 | | | | |
| 5 | 3 | 4 | -3.67 | 7 | -8 | -9 | | imp:p=1 | | | | |
| 6 | 4 | 0 | -10 | #1 | #2 | #3 | #6 | imp:p=1 | | | | |
| 7 | 5 | 0 | 10 | | | | | imp:p=0 | | | | |
| 8 | 6 | 3 | -11.34 | (-12 | -16 | 11 | 15) | (18:20: | -17:-19) | & | | |
| 9 | | | | 13 | -14 | | | imp:p=1 | | | | |

รูปที่ ง.2 แสดงเวิร์กชีต M ที่จะบันทึกเป็นแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของ MCNP

จากนั้นจึงใช้ชวลเลือกเมนู บันทึกเพิ่มเป็น(Save As) จากเมนูแฟ้ม (File) แล้วตั้งชื่อตามต้องการในช่องของชื่อแฟ้มข้อมูล ส่วนช่องว่างที่เหลือให้ทำตามรูปที่ ง.3 ซึ่งเป็นหน้าจอ บันทึกเพิ่มเป็น โดยเลือกบันทึกลงในไดเรกทอรี MCNP และ เลือกบันทึกเพิ่มข้อมูลชนิดอักษรที่มีตัวขึ้นระหว่างข้อมูลเป็นเครื่องหมายวรรคตอน (Formatted text : Space delimited) ซึ่งแฟ้มข้อมูลที่บันทึกได้จะมีนามสกุล (extension) เป็น PRN

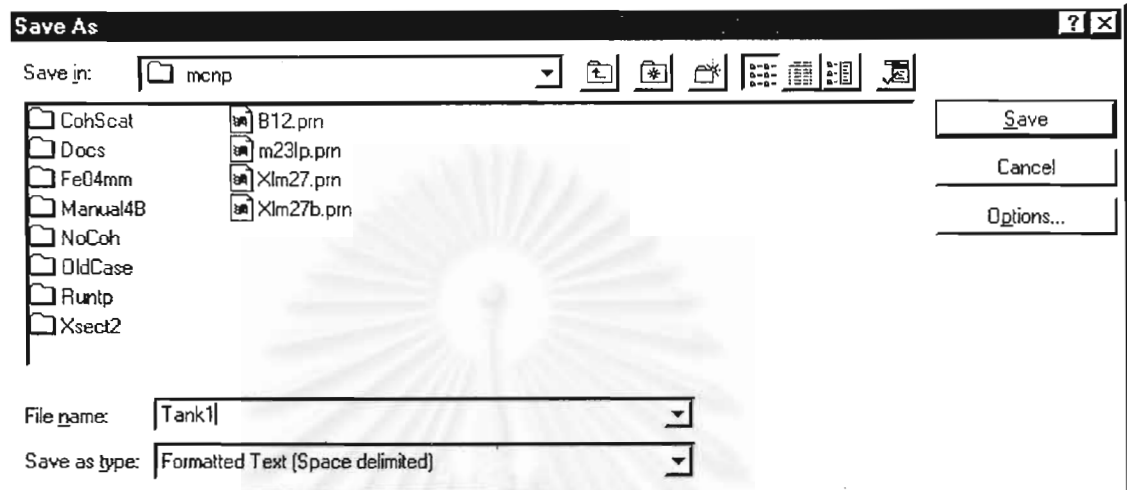
หลังจากทำเสร็จตามขั้นตอนแล้วจึงปิดโปรแกรม โดยไม่บันทึกการเปลี่ยนแปลงใด ๆ (Save change) การคำนวณแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าที่บันทึกไว้ทำตามขั้นตอนดังนี้

- (1) เข้าสู่โหมด DOS เปลี่ยนไดเรกทอรีเป็น MCNP
- (2) เปลี่ยนนามสกุลของแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าโดยพิมพ์คำสั่งต่อไปนี้

c:\mcnp\ ren *.prm * (กด Enter)

(3) จากนั้นจึงสั่งให้โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP ทำงานโดยใช้พิมพ์คำสั่งต่อไปนี้

c:\mcnp\ mcnp i=tank1 o=tank1o (กด Enter)



รูปที่ 3.3 แสดงเงื่อนไขการบันทึกแฟ้มเป็น ให้เป็นแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของ MCNP

การใช้งานโปรแกรม Finput.xls มีขั้นตอนการทำงานที่เหมือนกัน Minput.xls เพียงแต่จำนวนข้อมูลที่ป้อนเข้าแตกต่างกัน โดย Finput.xls ใช้เตรียมแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าสำหรับกรณีท่อซึ่งมีรายละเอียดปลีกย่อยที่น้อยกว่า แต่ภายในโปรแกรมมี 2 เวอร์กซ์ิต (เวอร์กซ์ิต input และเวอร์กซ์ิต F) เช่นเดียวกันกับ Minput.xls ซึ่งใช้กับกรณีถังกวนผสมมาตรฐาน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายทรงศักดิ์ องค์กรวัฒนกุล เกิดวันที่ 11 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2517 ที่เขตสัมพันธวงศ์ กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาปริญญาตรี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2539 จากนั้นเข้าศึกษาต่อที่ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีเดียวกัน



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย