

การประเมินปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสีแกมมาโดยใช้ MCNP 5

นางสาวทัศนีย์ เจริญนาม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2555  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)  
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)  
are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

DOSIMETRIC ASSESSMENT OF THE GAMMA IRRADIATION FACILITY USING MCNP 5

Miss Tasanee Charoennam

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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การประเมินปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสีแกมมา
	โดยใช้ MCNP 5
โดย	นางสาวทัศนีย์ เจริญนาม
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับเป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.....กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย  
(ดร.ชนาธิป ทิพยกุล)

ทัศนีย์ เจริญนาม : การประเมินปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสีแกมมาโดยใช้ MCNP 5.  
(DOSIMETRIC ASSESSMENT OF THE GAMMA IRRADIATION FACILITY USING  
MCNP 5) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์, 78 หน้า.

ได้คำนวณอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณี (center turntable) ของเครื่องฉายรังสีแกมมาด้วยโคบอลต์-60 ที่มีค่ากัมมันตภาพ 70 kCi ของศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) โดยใช้โมเดล 3 มิติของโค้ดคอมพิวเตอร์แบบมอนติคาร์โล, MCNP 5 (Monte Carlo N-Particle version 5) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณกับค่าที่ได้จากการวัดจริงโดยใช้เครื่องวัดรังสีชนิด Amber Perspex และ Red Perspex ที่ใช้ในงานประจำ พบว่ามีความสอดคล้องกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณโดยใช้ MCNP 5 นี้สามารถนำมาใช้ประเมินค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีได้อย่างสะดวกและรวดเร็ว

ภาควิชา.....วิศวกรรมนิวเคลียร์.....ลายมือชื่อนิสิต.....  
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....  
ปีการศึกษา.....2555.....

# # 5270311221 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : DOSE RATE / DOSIMETER / MCNP / IRRADIATOR

TASANEE CHAROENAM : DOSIMETRIC ASSESSMENT OF THE GAMMA IRRADIATION FACILITY USING MCNP 5. ADVISOR : ASST. PROF. ATTAPORN PATTARASUMANT, 78 pp.

The gamma dose rates during the operation of the 70 kCi Co-60 irradiator of Gems Irradiation Center, Thailand Institute of Nuclear Technology, were calculated using the three dimensional model of the Monte Carlo computer code, MCNP 5 (Monte Carlo N-Particle version 5). The results were compared with the actual measurements obtained from the routine dosimetry system, Amber and Red Perspex dosimeter. The agreements of the calculated and the measured results showed that MCNP 5 can be used to determine the dose rate of this facility conveniently and quickly.

Department : Nuclear Engineering Student's Signature.....

Field of Study : Nuclear Technology Advisor's Signature.....

Academic Year : 2012.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนอย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถพร ภัทรสุมันต์ และ ดร. ชนาธิป ทิพยกุล ซึ่งให้คำปรึกษา แนะนำ ตรวจสอบ และแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ด้วยความเอาใจใส่ทุกขั้นตอนเพื่อให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สมบูรณ์ที่สุด รวมทั้งคณาจารย์ในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้งานเครื่องฉายรังสีแกมมา Co-60 ระบบวัดปริมาณรังสีแกมมา และโปรแกรม MCNP 5 รวมทั้งเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยรังสีอัญมณีทุกท่านที่ให้ความรู้ และคำแนะนำในการทำวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ คุณวราวุธ ขจรฤทธิ ที่ให้คำปรึกษา และคำแนะนำ ในการทำงานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ดุลยพงศ์ วงศ์แสง ที่ให้ความอนุเคราะห์ และคำแนะนำ เกี่ยวกับโปรแกรม MCNP 5

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ น้องๆ รวมทั้งเจ้าหน้าที่ และบุคลากรในภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ ที่ให้ความช่วยเหลือ และคำแนะนำที่มีประโยชน์ในงานวิจัย

ท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ที่สนับสนุนจนสำเร็จการศึกษา

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับการจากการวิจัย.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	5
2.1 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล.....	5
2.2 รังสีแกมมา.....	19
2.3 อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัตถุ.....	20
2.4 ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose).....	22
2.5 ระบบการวัดปริมาณรังสี (Dosimetry System).....	22
2.6 วิธีการเลือกใช้เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานประจำ.....	25
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	26
3.1 ขั้นตอนการวิจัย.....	26
3.2 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MCNP 5.....	26

3.3 การวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย Amber Perspex Dosimeter และ Red Perspex Dosimeter.....	37
บทที่ 4 ผลการสร้างแบบจำลอง และผลการวิจัย.....	41
4.1 ผลการสร้างแบบจำลอง.....	41
4.2 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีด้วยโปรแกรม MCNP 5.....	43
4.3 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องวัดรังสี.....	45
4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการวัดอัตราปริมาณรังสี....	51
บทที่ 5 สรุปผล อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	57
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	57
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	58
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	59
รายการอ้างอิง.....	60
ภาคผนวก.....	61
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณภาพของการคำนวณนับค่าในช่วงต่าง ๆ ของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (R).....	16
2.2 แฟกเตอร์การแปลงค่าฟลักซ์ของฟิสิกส์ของฟิสิกส์ของฟิสิกส์.....	18
2.3 ลักษณะของแต่ละระดับชั้นของเครื่องวัดรังสี.....	24
3.1 หน่วยที่ใช้ในการเขียนแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า.....	30
3.2 พารามิเตอร์ในคำสั่งนิยามพื้นผิว.....	32
3.3 คำสั่งนิยามตัวประมาณค่า.....	35
4.1 ผลการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสี.....	44
4.2 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Amber Perspex dosimeter.....	46
4.3 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Red Perspex dosimeter.....	47
4.4 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง A.....	51
4.5 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง C.....	52
4.6 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง G.....	54

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
3.1	ขอบเขตแบบจำลองของเครื่องฉายรังสีแกมมา.....27
3.2	ขอบเขตแบบจำลองของท่อนำต้นกำเนิดรังสี (ก) และตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีและภาชนะบรรจุตัวอย่าง (ข).....28
3.3	ขอบเขตแบบจำลองการสร้างเซลล์ในภาชนะฉายรังสี.....28
3.4	ตัวอย่างคำสั่งนิยามเซลล์ในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า.....31
3.5	ตัวอย่างคำสั่งนิยามพื้นผิวในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า.....33
3.6	ตัวอย่างคำสั่งวัสดุในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า.....33
3.7	ตัวอย่างคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสีในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า.....34
3.8	ตัวอย่างคำสั่งนิยามตัวประมาณค่าในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า.....36
3.9	ตัวอย่างคำสั่งนิยามหยุดการทำงานในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า.....36
3.10	ลักษณะห้องฉายรังสีแกมมา.....38
3.11	เครื่องฉายรังสีแกมมา.....38
3.12	เครื่องวัดรังสี Amber Red Perspex dosimeter (ก) และ Red Perspex dosimeter (ข).....39
3.13	ระบบวัดปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสีแกมมา.....40
4.1	ผลจากการสร้างแบบจำลองเครื่องฉายรังสีแกมมาด้วย MCNP 5 เป็นภาพตัดขวาง ในระนาบ yz ที่พิกัด (0,0,0).....41
4.2	ผลจากการสร้างแบบจำลองที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีด้วย MCNP 5 เป็นภาพตัดขวางใน ระนาบ yz ที่พิกัด (0,0,0).....42
4.3	ภาพตัดขวางในระนาบ xy ที่พิกัด (0, 0, 0) และสร้างเซลล์ในภาชนะฉายรังสีเพื่อใช้ในการ คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมา.....43
4.4	ผลการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเฉลี่ยที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วยโปรแกรม MCNP 5 .....45
4.5	ลักษณะการติดเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ภาชนะ GC.....46
4.6	ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Amber Perspex dosimeter.....48
4.7	ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Red Perspex dosimeter.....49
4.8	เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วย Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex Dosimeter ที่ตำแหน่งวง A.....49

รูปที่	หน้า
4.9 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วย Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter ที่ตำแหน่งวง C.....	50
4.10 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วย Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter ที่ตำแหน่งวง G.....	50
4.11 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง A.....	52
4.12 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง C.....	54
4.13 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง G.....	56

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันมีการนำรังสีมาใช้ในอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย อุตสาหกรรมการฉายรังสีเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่น่าเทคนิคนิวเคลียร์มาใช้ โดยนำวัสดุมาฉายรังสีให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ทางชีววิทยาหรือทางกายภาพ เพื่อประโยชน์ในด้านการกำจัดจุลินทรีย์หรือการปรับปรุงคุณภาพของวัสดุ เช่น การฉายรังสีอัญมณีก็เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มมูลค่าให้กับอัญมณี โดยการเปลี่ยนสีหรือทำให้สีเข้มขึ้นได้สีตามที่ตลาดต้องการ

ตลาดอัญมณีของโลกมีความต้องการอัญมณีประเภทโทแพซ ทัวร์มาลีน เบริล เป็นอย่างมากโดยเฉพาะในประเทศไทยมีผู้ประกอบการส่งออกอัญมณีและเครื่องประดับที่มีความต้องการฉายรังสีอัญมณีด้วยเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย เครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์และเครื่องฉายรังสีแกมมา เป็นจำนวนมากกว่า 15,000 กิโลกรัมต่อปี (75 ล้านกระรัตต่อปี) ซึ่งปัจจุบันผู้ประกอบการต้องส่งอัญมณีไปฉายรังสีที่ต่างประเทศทำให้เสียค่าใช้จ่ายในการดำเนินการดังกล่าวปีละนับพันล้านบาท สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) จึงได้ดำเนินการจัดซื้อเครื่องฉายรังสีแกมมาโดยไอโซโทปรังสีโคบอลต์-60 และเครื่องเร่งอนุภาคอิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในการฉายรังสีอัญมณี วัสดุ ผลิตภัณฑ์ และใช้ในงานวิจัยของทางสถาบันฯ โดยอยู่ภายใต้การดำเนินงานของศูนย์ฉายรังสีอัญมณี ซึ่งเครื่องฉายรังสีแกมมาได้เปิดบริการฉายรังสีตั้งแต่วันที่ 3 กันยายน 2553

ในกระบวนการฉายรังสีนั้น สิ่งสำคัญที่ต้องควบคุมเป็นอันดับแรก ๆ คือการควบคุมปริมาณรังสีที่ตัวอย่างได้รับให้เป็นไปตามที่ต้องการ เช่น ในตัวอย่างอัญมณี ถ้าปริมาณรังสีสูงหรือต่ำกว่าที่กำหนด สีอัญมณีอาจจะเข้มหรืออ่อนเกินไป ไม่เป็นที่ต้องการของตลาด ดังนั้นก่อนการฉายรังสีตัวอย่าง ควรทราบอัตราปริมาณรังสีในบริเวณการฉายรังสีก่อน เพื่อให้สะดวกรวดเร็วในการดำเนินงาน และตัวอย่างได้รับปริมาณรังสีตรงตามต้องการ

ในวิทยานิพนธ์นี้ ใช้การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) ซึ่งเป็นวิธีการคำนวณที่สามารถช่วยประเมินหาอัตราปริมาณรังสีแกมมาในตำแหน่งฉายรังสี อัญมณีได้ โดยการสร้างแบบจำลองเครื่องฉายรังสีเพื่อคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมา เปรียบเทียบกับการวัดด้วยเครื่องวัดรังสีในกลุ่มที่ใช้ในงานประจำ (Routine/working dosimeter) ของเครื่องฉายรังสี

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมาในตำแหน่งที่ฉายรังสีอัญมณี (Center Turntable) โดยใช้โปรแกรม MCNP 5 ในการสร้างแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการวัดด้วยเครื่องวัดรังสี (Dosimeter)

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมาในตำแหน่งที่ฉายรังสีอัญมณี (Center Turntable) ของเครื่องฉายรังสีแกมมาของศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) โดยใช้ MCNP 5

1.3.2 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการวัด โดยใช้เครื่องวัดรังสี ได้แก่ Red Perspex หรือ Amber Perspex

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

1.4.1 ศึกษาค้นคว้าทฤษฎี ข้อมูลและผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 เก็บข้อมูลในส่วนของห้องฉายและระบบการทำงานของเครื่องฉายรังสีแกมมา ได้แก่ ตำแหน่ง ขนาด และความแรงรังสีของต้นกำเนิดรังสี

1.4.3 สร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม MCNP 5

1.4.4 ทำการวัดอัตราปริมาณรังสีแกมมาด้วย Red Perspex dosimeter หรือ Amber Perspex dosimeter

1.4.5 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากเครื่องวัดรังสี

1.4.6 สรุปผลงานวิจัย และเขียนวิทยานิพนธ์

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถประเมินอัตราปริมาณรังสีแกมมาในตำแหน่งที่ฉายรังสีอัญมณี (Center Turntable) ได้ ทำให้ควบคุมปริมาณรังสีที่อัญมณีจะได้รับอย่างถูกต้อง

1.5.2 แบบจำลองที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่บริเวณอื่น ๆ ภายในห้องฉายรังสีได้

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ปี 2543 C. Oliveira, J. Salgado, M. Luisa Botelho, L.M. Ferreira จาก Nuclear and Technological Institute, Sacavem, Portugal ได้ทำการวิจัยเรื่อง Monte Carlo studies for irradiation process planning at the Portuguese gamma irradiation facility. จำลองมอนติคาร์โลเพื่อวางแผนฉายรังสีตัวอย่างผลิตภัณฑ์ทางจุลชีววิทยาที่แตกต่างกัน 3 แบบ ด้วย Portuguese Gamma Irradiation Facility ผลจากการจำลองและการทดลอง (Amber Perspex dosimeter, Ceric-cerous dosimeter) มาเปรียบเทียบกันพบว่ามีความสอดคล้องกันดี แสดงให้เห็นว่าการจำลองมอนติคาร์โลช่วยประเมินปริมาณรังสีดูดกลืน และคำนวณปริมาณรังสี ในผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกัน จากผลการวิจัยนี้ สามารถใช้วางแผนการฉายรังสีผลิตภัณฑ์ได้

1.6.2 ปี 2546 Douglas E. Weiss, Ronald J. Stangeland จาก Corporate Process Technology Center, 3M Company, 3M Center, St. Paul, MN 55144-1000, USA และ 3M Health Care Plant, Brookings, SD 57006, USA ได้ทำการวิจัยเรื่อง Dose prediction and process optimization in a gamma sterilization facility using 3-D Monte Carlo code. วิจัยโดยใช้ 3-D Monte Carlo code ประมาณค่าปริมาณรังสีเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องฉายรังสีแกมมาในงานฆ่าเชื้อซึ่งมีลักษณะเป็นห้องฉายรังสี ต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 มีลักษณะจัดวางเป็นแผง ในการสร้างแบบจำลองใช้ ITS/ACCEPT Monte Carlo code และตรวจสอบปริมาณรังสี โดยวัดปริมาณรังสีในตัวอย่างที่มีวัสดุเป็นเนื้อเดียวกันที่มีขนาดใหญ่ 4 ประเภทแตกต่างกันตามค่าความหนาแน่นกับขนาด แบบจำลองจะทำการจำลองผลิตภัณฑ์เคลื่อนที่เข้าไปฆ่าเชื้อ ผลการวิจัยที่ได้มีการประมาณค่าปริมาณรังสีที่ได้ผลที่ดีและรวดเร็ว

1.6.3 ปี 2548 ผินแก้ว เทพสุต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิจัยเรื่อง การประเมินอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบ ตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร โดยใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP-4A คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเอกซ์เปรียบเทียบกับการวัดปริมาณรังสีด้วยเครื่องสำรวจรังสี และเทอร์โมลูมิเนสเซนโดสิมิเตอร์ และผลการคำนวณโดยผู้ผลิต ภายใต้เงื่อนไข คือ ไม่มีตู้บรรจุสินค้า มีตู้บรรจุสินค้า และมีสินค้าภายในตู้บรรจุสินค้าต่างชนิดกัน ผลการวิจัยพบว่า ผลจากการคำนวณกับการทดลองวัดด้วยเครื่องสำรวจรังสีนั้น มีแนวโน้มเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกัน

และอัตราปริมาณรังสีเอกซ์หรือระบบตรวจสอบมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานเมื่อประเมินตามเกณฑ์ความปลอดภัยตามคำแนะนำของ ICRP 60 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการคำนวณโดยวิธีนี้สามารถใช้ประมาณค่าอัตราปริมาณรังสีเอกซ์หรือระบบตรวจสอบได้

1.6.4 ปี 2553 M. Bailey, J.P. Sephton, P.H.G. Sharpe จาก National Physical Laboratory, Hampton Rd, Teddington TW11 0LW, UK ทำการวิจัยเรื่อง Monte Carlo modeling and real-time dosimeter measurements of dose rate distribution at a  $^{60}\text{Co}$  industrial irradiation plant. ศึกษาการกระจายตัวของปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสีทางด้านอุตสาหกรรม MDS Nordion JS7500 คำนวณด้วย egsp Monte carlo code ซึ่งพัฒนาจาก EGSnrc code จัดทำโดยสภาวิจัยแห่งชาติของประเทศแคนาดา โดยการวิจัยจะเปรียบเทียบปริมาณรังสีที่ได้จากแบบจำลองที่สร้างขึ้นกับระบบวัดที่ทนรังสี real-time dosimeter (RTD) และอะลานีน (Alanine) ซึ่งมีลักษณะเป็นเม็ด จากการวิจัยการคำนวณปริมาณรังสีจาก egsp model มีค่าใกล้เคียงกับที่ได้จาก RTD และอะลานีน

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล [1-2]

การคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล (Monte Carlo Method) ในด้านเทคโนโลยีนิวเคลียร์ เป็นการคำนวณโดยการสร้างแบบจำลองเพื่อแก้ปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการเคลื่อนที่ของอนุภาค ซึ่งมีการเคลื่อนที่แบบสุ่มไม่มีทิศทางแน่นอน โดยรูปแบบของอนุภาคจะขึ้นอยู่กับ 7 มิติ ที่เกี่ยวข้องกันได้แก่ มิติของเวลา 1 มิติ มิติของตำแหน่งที่อยู่ 3 มิติ คือตำแหน่งในพิกัดมุมฉากทั้ง 3 แกน ได้แก่ ตำแหน่งในแนวแกน X แกน Y และแกน Z มิติของทิศทาง 2 มิติ ได้แก่ เวกเตอร์ (Vector) ที่มีทิศทางของการเคลื่อน ซึ่งอาจจะระบุได้ด้วยมุมกัมกับมุมกวาด และมิติของพลังงาน

หลักการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลนั้น จะกำหนดทางเดินสุ่ม (Random Walk) ของอนุภาคว่ามีทิศทางและพฤติกรรมอย่างไร โดยอาศัยตัวแปรต่าง ๆ คือ ชนิดของอนุภาค (Source Particle) รูปทรงและรูปแบบการจัดวางระบบวัด (System Geometry) ชนิดและค่าความสามารถในการเกิดอันตรกิริยาของวัสดุกับอนุภาค (Material and Cross Section) รวมถึงวิธีการคำนวณนับค่าปริมาณที่สนใจ (Tallying or Scoring of Quantity of Interest) ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีทำได้โดยอาศัยการจำลองเหตุการณ์การเกิดอันตรกิริยาแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างอนุภาคกับวัสดุที่สนใจจากทางเดินสุ่มที่ได้จากตัวแปรข้างต้น ซึ่งการกำหนดทางเดินสุ่มจะกำหนดโดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างการสุ่มตัวเลข (Random Number) และทฤษฎีความน่าจะเป็น (Theory of Probability) ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กันดังนี้ เมื่อกำหนดให้  $x$  เป็นโอกาสที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจของอนุภาคกับวัสดุ ซึ่งเหตุการณ์และ  $x$  นั้น จัดเป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง (Continuous Random Variables) เพราะฉะนั้นโอกาสในการที่จะเกิดเหตุการณ์  $x$  ซึ่งจะเกิดอยู่ระหว่างเหตุการณ์  $a$  และเหตุการณ์  $b$  คือ

$$P \{a \leq x \leq b\} \quad 2.1$$

ทฤษฎีความน่าจะเป็นที่เกี่ยวข้องในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลเพื่อจะกำหนดทางเดินสุ่มนั้น อาศัย 2 ฟังก์ชันที่สำคัญคือฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น



(Probability Density Function) และฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (The Cumulative Probability Distribution Function)

2.1.1 ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น (Probability Density Function) ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น  $f(x)$  มีความสัมพันธ์กับความน่าจะเป็นดังนี้

$$f(x)\Delta x = P\{x \leq x' \leq x+\Delta x\} \quad 2.2$$

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

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

ถ้าค่า  $x$  เป็นค่าที่อยู่ระหว่าง  $\infty$  และ  $-\infty$  จะสามารถเขียนฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น เพื่อใช้ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลได้ว่า

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad 2.4$$

ถ้าค่าเหตุการณ์  $x$  ที่เป็นไปได้อยู่ระหว่างเหตุการณ์  $x^+$  และเหตุการณ์  $x^-$  แล้ว จะเขียนได้ว่า

$$\int_{x^-}^{x^+} f(x)dx = 1 \quad 2.5$$

2.1.2 ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (The Cumulative Probability Distribution Function)

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

จากสมการ ความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์  $x'$  จะเกิดขึ้นน้อยกว่าหรือเท่ากับเหตุการณ์  $x$  สามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นและฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมได้เป็น

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

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

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

จากสมการที่ 2.8 และสมการที่ 2.9 จะได้

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

และจากสมการที่ 2.10 จะได้ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์  $x$  ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น และฟังก์ชันการสะสมของความน่าจะเป็น กรณี  $x$  มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์คือ

$$\frac{dF(x)}{dx} = f(x) \quad 2.11$$

เพื่อความเหมาะสมในการใช้งาน จะพิจารณาที่  $0 \leq x \leq 1$  และกำหนดให้

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

เมื่อ  $x < 0$  และ  $x > 1$

$$F(x) = \int_0^x f(x) dx \quad 2.13$$

จากความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น  $[f(x)]$  และฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม  $[F(x)]$  ที่กล่าวมาข้างต้น สามารถนำไปใช้ในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล เพื่อที่จะกำหนดทางเดินสุ่มได้ดังนี้

กำหนดให้  $Y$  เป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ใดๆ และเป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่อง และให้  $Y$  เป็นฟังก์ชันที่มีความสัมพันธ์กับ  $X$  โดยที่  $X$  เป็นความน่าจะเป็นที่จะเกิดเหตุการณ์ที่สนใจของอนุภาคที่พิจารณาซึ่งเหตุการณ์  $X$  นั้นจัดเป็นตัวแปรสุ่มแบบต่อเนื่องเช่นกัน จะได้

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

เมื่อกำหนดให้  $g(Y)dY$  เป็นฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็นซึ่งมีความหมายว่า ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์  $Y$  ซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์อยู่ระหว่าง  $Y$  และ  $Y+dY$  และ  $f(X)dX$  ฟังก์ชันความหนาแน่นของความน่าจะเป็น ซึ่งมีความหมายว่า ความน่าจะเป็นในการเกิดเหตุการณ์  $X$  ที่สนใจของอนุภาคที่พิจารณาซึ่งจะมีขอบเขตของเหตุการณ์ อยู่ระหว่าง  $X$  และ  $X+dX$  นอกจากนั้นแล้ว ฟังก์ชัน  $G(Y)$  คือฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของ  $g(Y)$  และ ฟังก์ชัน  $F(X)$  ฟังก์ชันแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม ของ  $f(X)$  ซึ่งสามารถกำหนดความสัมพันธ์ต่าง ๆ ได้ดังนี้

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

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

สำหรับ  $g(Y)$  หรือ ตัวเลขสุ่มที่สร้างขึ้นมานั้น กำหนดให้เป็น Rectangular Distribution ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$g(Y) = \begin{cases} 0; & Y < 0 \\ 1; & 0 \leq Y \leq 1 \\ 0; & Y > 1 \end{cases} \quad 2.17$$

จะได้ความสัมพันธ์เมื่อ  $0 \leq Y \leq 1$  ดังนี้

$$\int_0^Y g(Y)dY = Y \quad 2.18$$

$$G(Y) = Y \quad 2.19$$

จากสมการที่ 2.14 จะได้

$$Y = F(X) \quad 2.20$$

โดย  $Y$  เป็นตัวเลขที่สุ่มขึ้นมา หากตัวเลขที่สุ่มได้คือ  $\xi$  นั้นมีค่าระหว่าง 0 ถึง 1

$$Y = \xi \quad 2.21$$

$$F(X) = \xi \quad 2.22$$

$$X = F(\xi)^{-1} \quad 2.23$$

ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าโอกาสในการที่จะเกิดเหตุการณ์  $X$  จะขึ้นอยู่กับ  $\xi$  ซึ่งเป็นตัวเลขที่สุ่มขึ้นมา

### MCNP5 (Monte Carlo N-Particle version 5) [3]

MCNP เป็นโปรแกรมการคำนวณที่ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องโดยศูนย์วิจัยนิวเคลียร์ Los Alamos National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา สามารถใช้ในการคำนวณหาประสิทธิภาพของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาค นิวตรอน โฟตอน อิเล็กตรอน ศึกษาการเคลื่อนที่ของอนุภาคใด ๆ เพียงชนิดเดียว หรือคู่ใดคู่หนึ่งของนิวตรอน โฟตอน หรือ อิเล็กตรอน MCNP 5 (Monte Carlo N-Particle version 5) ได้ถูกนำมาใช้งานในปี 2003 โดยเพิ่มความสามารถในการทำงานของ photonuclear collision physics, superimposed mesh tallies, time splitting, และ plotter upgrades นอกจากนี้ ยังมีการปรับปรุงการคำนวณแบบขนาน โดยเพิ่มการสนับสนุนการใช้งาน OpenMP (Open Multi-Processing) และ MPI (Message Passing Interface) ด้วย การใช้งาน MCNP จะต้องสร้างแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า (Input File) ตามลำดับการอ่านข้อมูลของ MCNP ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่เป็นคำสั่งนิยามเซลล์ (Cell Card), ส่วนคำสั่งนิยามพื้นผิว (Surface Card) และส่วนคำสั่งกำหนดข้อมูลหลัก โดยส่วนคำสั่งกำหนดข้อมูลหลักจะแบ่งเป็น 4 ส่วนย่อย คือ คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี (Source) คำสั่งนิยามตัวประมาณค่า (Tally) คำสั่งนิยามชนิดของวัสดุ (Materials) และคำสั่งนิยามหยุดการทำงาน (Problem Cut off)

#### 2.1.3 วิธีสุ่มตัวอย่าง

การสุ่มตัวอย่างในการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โลมีวิธีพื้นฐานอยู่ 2 วิธี คือการสุ่มตัวอย่างโดยวิธีการละทิ้งค่าที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข (Rejection Method) และวิธีการสุ่มตัวอย่างโดยตรง (Direct Sampling Method) ทั้งสองวิธีนี้ จะประยุกต์ใช้ร่วมกันเพื่อคำนวณค่าสุ่ม

ของความสัมพันธ์ที่ซับซ้อน โดยอาศัยขั้นตอน (Algorithm) และวิธีการคำนวณเฉพาะของความสัมพันธ์นั้น ๆ

การสุ่มหาตำแหน่งของอนุภาคที่เกิดภายในต้นกำเนิดรังสีชนิดที่มีปริมาตร เป็นตัวอย่างหนึ่งของการใช้วิธีการละทิ้งค่าที่ไม่เป็นไปตามเงื่อนไข เช่น ในกรณีต้นกำเนิดรังสีที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ค่าพิกัดของตำแหน่ง  $(x, y, z)$  ในทรงกลมจะถูกสุ่มโดยใช้ชุดของตัวเลขสุ่มสามค่า ซึ่งค่าทั้งสามจะนำมาคำนวณค่าพิกัดดังนี้  $x = \xi_1 \cdot r$   $y = \xi_2 \cdot r$  และ  $z = \xi_3 \cdot r$  โดยที่  $r$  คือรัศมีของทรงกลม ถ้า  $x^2 + y^2 + z^2 > r^2$  แสดงว่าค่าพิกัดชุดนี้เป็นตำแหน่งที่อยู่นอกปริมาตรทรงกลม ซึ่งจะไม่ถูกนำมาใช้ จะสุ่มค่าพิกัดใหม่จากตัวเลขสุ่มชุดถัดไป

การสุ่มหาระยะทางที่อนุภาคสามารถเคลื่อนผ่านตัวกลางก่อนที่จะชนกับอนุภาคของตัวกลาง เป็นตัวอย่างหนึ่งของการสุ่มตัวอย่างโดยตรง โดยการพิจารณาความน่าจะเป็นที่อนุภาคหนึ่งจะเคลื่อนที่ได้เป็นระยะทาง  $x$  ก่อนจะเกิดการชนเป็นครั้งแรกในระยะเวลา  $dx$  จะสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$f(x)dx = \sigma_T e^{-\sigma_T x} dx \quad 2.24$$

โดยที่ค่า  $\sigma_T$  เป็นค่าภาคตัดขวางรวม (Total Cross Section) ของอนุภาคตัวกลางและ  $f(x)$  เป็นความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะทำอันตรกิริยากับตัวกลางเมื่ออนุภาคนี้เคลื่อนที่ในตัวกลางเป็นระยะทาง  $x$  จากนิยามของความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นสำหรับตัวแปรชนิดต่อเนื่องมีคุณสมบัติดังนี้

$$\int_0^{\infty} f(x)dx = 1 \quad 2.25$$

เมื่อกำหนดให้

$$\xi = F(x) = \int_0^x f(x')dx' \quad 2.26$$

ดังนั้น  $F(x)$  คือความน่าจะเป็นที่อนุภาคจะเกิดการชนกับตัวกลางในระยะทาง  $x$  คำนวณได้ดังนี้

$$\xi = F(x) = \int_0^x \sigma_T e^{-\sigma_T x} dx = 1 - e^{-\sigma_T x} \quad 2.27$$

ในระดับอนุภาค การสุ่มตัวอย่างระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ได้ จะใช้ความสัมพันธ์ดังนี้

$$x = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(1-\xi) \quad 2.28$$

แต่เนื่องจากค่า  $\xi$  เป็นตัวเลขสุ่มซึ่งไม่แตกต่างกับค่า  $(1-\xi)$  เพราะเป็นค่าตัวเลขสุ่มที่มีค่าระหว่างศูนย์และหนึ่ง ระยะดังกล่าวจึงสามารถคำนวณจากความสัมพันธ์ต่อไปนี้

$$x = -\frac{1}{\sigma_T} \ln(\xi) \quad 2.29$$

การสุ่มหาชนิดของอันตรกิริยาที่เกิดขึ้น จากการชนของอนุภาคกับตัวกลางสามารถใช้ตัวเลขสุ่มหนึ่งค่า ตัวอย่างเช่น แบบจำลองหนึ่งมีการพิจารณาเพียง 2 อันตรกิริยา คือ อันตรกิริยาการกระเจิง (Scattering) และอันตรกิริยาการดูดกลืน (Absorption) ซึ่งเป็นผลให้ค่าภาคตัดขวางรวมคือ  $\sigma_T = \sigma_s + \sigma_a$  เมื่อค่าตัวเลขสุ่มเป็น  $\xi_i \leq \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$  อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น คืออันตรกิริยาการกระเจิง ในทางกลับกัน ถ้า  $\xi_i \geq \frac{\sigma_s}{\sigma_a}$  จะเกิดอันตรกิริยาการดูดกลืน

ในการเริ่มต้นคำนวณโดยใช้โค้ดคอมพิวเตอร์ จะเริ่มจากการกำหนดตำแหน่งที่จะปลดปล่อยรังสี กรณีที่ต้นกำเนิดรังสีเป็นชนิดที่มีปริมาตร (Volumetric Source) พิกัดของจุดกำเนิดรังสี  $(x, y, z)$  จะคำนวณจากการใช้ตัวเลขสุ่ม 3 ค่า โดยมีเงื่อนไขว่าจุดกำเนิดรังสีดังกล่าวจะต้องอยู่ภายในปริมาตรของเซลล์ที่เป็นต้นกำเนิดรังสี จึงจะทำการคำนวณสุ่มเพื่อกำหนดทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค สำหรับต้นกำเนิดรังสีชนิดไอโซโทปิกการคำนวณสุ่มจะเป็นดังนี้ ค่า

ของเวกเตอร์บอกทิศทาง ( direction cosines) คือ  $(u, v, w)$  จะคำนวณจากพิกัด  $(x, y, z)$  เมื่อกำหนดให้  $t = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  จากนั้น  $u = (x/t)$   $v = (y/t)$  และ  $w = (z/t)$  ส่วนค่าพลังงานของอนุภาคสามารถเลือกสุ่มได้จากสเปกตรัมที่กำหนด แต่ละอนุภาคที่ทำการจำลองจะมีค่าถ่วงน้ำหนัก (Particle Weight, W) ณ จุดเริ่มต้น ในกรณีที่ไม่มีการปรับแก้ (Bias) ใดๆ ค่าถ่วงน้ำหนักจะมีค่าเท่ากับหนึ่งซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักนี้ คือความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอนุภาคจริงกับจำนวนอนุภาคที่สุ่มตัวอย่างขึ้น ดังนั้นหากมีการปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนัก ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณทุกครั้งจะถูกปรับแก้กลับให้มีค่าเท่ากับผลลัพธ์ที่ได้จากหนึ่งอนุภาคจากต้นกำเนิดรังสี นอกจากนี้วิธีการปรับค่าถ่วงน้ำหนักยังสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการคำนวณในกรณีของแบบจำลอง Non-analog ที่เน้นการปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง โดยไม่เน้นการคำนวณตามกฎทางฟิสิกส์ของรังสี แต่ผู้ใช้งานต้องทำการชดเชยส่วนที่เบี่ยงเบนไปจากการคำนวณตามกฎทางฟิสิกส์เพื่อไม่ให้ผลลัพธ์เปลี่ยนแปลงไปจากทฤษฎี

การคำนวณค่ามุม และค่าพลังงานของอนุภาครังสีจากการทำอันตรกิริยากับอนุภาคตัวกลางจะใช้สูตรของ Klein-Nishina ในกรณีที่วิธีการคำนวณมีความซับซ้อน รวมถึงใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างพื้นฐานทั้งสองแบบในการสุ่มตัวอย่างทิศทาง และการคำนวณค่าพลังงานของอนุภาคหลังจากทำอันตรกิริยา ซึ่งในกรณีที่เกิดอนุภาคทุติยภูมิ (Secondary Particle) อันตรกิริยาค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคปฐมภูมิจะถูกปรับลดตามสัดส่วนค่าภาคตัดขวางของอันตรกิริยานั้น อนุภาคทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจะมีค่าถ่วงน้ำหนักตามค่าที่ถูกปรับลดจากอนุภาคปฐมภูมิ เนื่องจากวิธีมอนติคาร์โลจะทำการคำนวณทีละอนุภาค แต่ละอนุภาคจึงสามารถจำลองโดยมีรายละเอียดและเงื่อนไขที่หลากหลาย ซึ่งทำให้การสิ้นสุดการคำนวณของแต่ละอนุภาคเป็นไปได้หลายรูปแบบ เช่น เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าสู่ที่ว่าง (Void) ทำให้ไม่มีโอกาสเกิดอันตรกิริยาเพื่อหันเหการเคลื่อนที่กลับมาบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (Tally Region) อนุภาคจะสูญหายจากระบบ (Loss by Escape) หรืออนุภาคที่เกิดอันตรกิริยาแล้วค่าถ่วงน้ำหนักหรือค่าพลังงานของอนุภาคมีค่าต่ำมาก (Particle's Weight cut off or Particle's Energy cut off) การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลงสำหรับการคำนวณผู้ใช้สามารถกำหนดเงื่อนไขเหล่านี้ได้

#### 2.1.4 ตัวประมาณค่า (Estimators)

ตัวประมาณค่ามีหน้าที่คำนวณปริมาณตามเงื่อนไขที่กำหนดเมื่ออนุภาคเคลื่อนเข้ามาในบริเวณที่มีการคำนวณนับค่า (Tally Region) ซึ่งการคำนวณการเดินทางของอนุภาคด้วยวิธี



มอนิเตอร์ได้นั้น สามารถแบ่งการคำนวณนับค่าออกเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ การคำนวณนับค่ากระแสที่ผ่านพื้นผิว (Surface Current Tally) การคำนวณนับค่าฟลักซ์ (Flux tally) การคำนวณนับค่าพลังงานจากความยาวของเส้นทาง (Track Length Cell Energy Deposition Tallies) การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (Pulse Height Tally) และการคำนวณนับค่าฟลักซ์ที่หัววัดรังสี (Flux at a Detector)

### 1) การคำนวณนับค่ากระแสที่ผ่านพื้นผิว (Surface Current Tally)

การคำนวณนับค่ากระแสที่ผ่านพื้นผิว หรือการคำนวณนับค่าแบบ F1 (F1 Tally) เป็นการคำนวณแบบง่าย จะทำการคำนวณตามเงื่อนไขที่ว่า เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่ผ่านพื้นผิวที่กำหนดที่มีความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุของระบบหนึ่ง ๆ หน่วยของการคำนวณจะขึ้นกับต้นกำเนิดรังสี ถ้าต้นกำเนิดรังสีมีหน่วยเป็นอนุภาค หรือ อนุภาคต่อเวลา ผลจากการคำนวณก็จะมีหน่วยเหมือนกับหน่วยของต้นกำเนิดรังสี

### 2) การคำนวณนับค่าฟลักซ์ (Flux tally)

ในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยการคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิว (Surface Flux : F2) การคำนวณนับค่าฟลักซ์ภายในเซลล์ (Track Length Estimate of Cell Flux : F4) และการคำนวณนับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสี (Flux at a Point or Ring Detector : F5) การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิว เป็นการหาค่าเฉลี่ยของอนุภาคบนพื้นผิว ที่พิจารณาในปริมาตรซึ่งมีลักษณะบางมาก และเป็นวิธีการคำนวณที่เกี่ยวข้องกับการคำนวณนับค่าฟลักซ์ภายในเซลล์ ซึ่งเซลล์หมายถึง รูปทรงที่มีปริมาตร และประกอบขึ้นจากพื้นผิวจนได้รูปทรงปิดที่มีขอบเขตที่แน่นอน และมีปริมาตรที่ชัดเจนกว่าการหาค่าเฉลี่ยของอนุภาคบนพื้นผิว ฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์จึงคำนวณจากความยาวของเส้นทางเดินของอนุภาคต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของเซลล์ ส่วนการคำนวณนับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสีจะชอกล่าวในหัวข้อค่าฟลักซ์ในหัววัดรังสี

### 3) การคำนวณนับค่าพลังงานจากความยาวของเส้นทาง (Track Length Cell Energy Deposition Tallies)

ในกลุ่มนี้จะประกอบไปด้วยการคำนวณนับค่าพลังงานจากความยาวของเส้นทาง (F6 Tally) และการคำนวณนับค่าพลังงานจากความยาวของเส้นทางของการแตกตัว (F7 Tally) เป็นการคำนวณนับค่าที่จะทำการคำนวณเฉพาะเมื่อเกิดเหตุการณ์ตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้ เช่นการคำนวณนับค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว การคำนวณนับค่าจากการชน

ของอนุภาคกับตัวกลาง (Collision Estimator) จะคำนวณนับเฉพาะค่าผลคูณระหว่างค่าถ่วงน้ำหนัก (weight) กับค่าภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission cross section) เพื่อประมาณค่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission rate) หน่วยจากการคำนวณค่าพลังงานคือ MeV/g ถ้าคำสั่งมีดอกจัน (\*F6 และ \*F7) หน่วยจะเป็น Jerks/g

#### 4) การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (Pulse Height Tally)

การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (F8 Tally) จะได้ผลลัพธ์เป็นการแจกแจงพลังงานของอนุภาคภายในเซลล์ที่กำหนด ซึ่งเป็นการจำลองสภาวะที่เกิดขึ้นจริงในหัววัดรังสี ปริมาณของพลังงานที่ถูกดูดซับภายในเซลล์สามารถคำนวณได้โดยการคูณผลลัพธ์ของแต่ละอนุภาคกับค่าพลังงานของอนุภาคนั้นเอง การคำนวณนับค่านี้ จะเกิดขึ้นที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี และการคำนวณจะดำเนินต่อไปเมื่ออนุภาคเคลื่อนข้ามพื้นผิวของเซลล์ใด ๆ

#### 5) การคำนวณนับค่าฟลักซ์ที่หัววัดรังสี (Flux at a Detector)

การคำนวณนับค่าฟลักซ์ที่หัววัดรังสี (F5 Tally) เป็นการคำนวณนับค่าทุกครั้งที่อนุภาคเกิดอันตรกิริยากับตัวกลางภายในระบบ โดยการคำนวณอนุภาคเสมือน (Pseudo Particle) ให้เคลื่อนที่จากตำแหน่งที่เกิดอันตรกิริยาตรงไปยังตำแหน่งที่กำหนดเป็นหัววัดรังสี (Detector) ซึ่งเป็นการประมาณค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสี และนอกจากการคำนวณหาค่าฟลักซ์ในหัววัดรังสีแบบจุด (Point Detector) และหัววัดรังสีแบบวง (Ring Detector) แล้ว ยังสามารถใช้ในสร้างแบบจำลองการถ่ายภาพด้วยรังสี (Radiograph Image Tallies) ได้

### 2.1.5 การประมาณค่าความผิดพลาด (Estimation of Error)

ข้อดีของการคำนวณด้วยวิธีมอนติคาร์โล คือการสุ่มค่าของผลลัพธ์ในช่วงความเชื่อมั่นที่ยอมรับได้นั้นต้องใช้ข้อมูลในการคำนวณจำนวนมาก เพื่อให้สามารถสุ่มตัวอย่างได้จำนวนข้อมูลมากพอที่จะให้ผลลัพธ์เป็นค่าสถิติที่มีคุณภาพ ดังนั้นการประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (Estimated Relative Error) จึงเป็นสิ่งสำคัญ โดยแนวทางสำหรับการตีความคุณภาพในช่วงความเชื่อมั่นต่าง ๆ ของการประเมินค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ ระบุไว้ในตารางที่ 2.1 การกำหนดคุณภาพของการคำนวณนับค่าในช่วงต่าง ๆ ของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (R)

ตารางที่ 2.1 คุณภาพของการคำนวณนับค่าในช่วงต่าง ๆ ของค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ (R)

ช่วงของค่า R	คุณภาพของการคำนวณนับค่า
0.5 - 1.0	Not meaningful
0.2 - 0.5	Factor of a few
0.1 - 0.2	Questionable
< 0.10	Generally reliable
< 0.05	Generally reliable for point detectors

### 2.1.6 เครื่องมือการลดค่าความแปรปรวนใน MCNP (Variance Reduction Tools in MCNP)

การลดความแปรปรวนของผลลัพธ์จากการคำนวณทำได้ 4 วิธี คือวิธีการเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญ (Truncation Methods) วิธีการควบคุมจำนวนอนุภาคในแต่ละเซลล์ (Population Control Methods) การปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง (Modified Sampling Methods) และการเพิ่มการสุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณโดยตรง (Partially-Deterministic Methods)

1) การเลือกพิจารณาเฉพาะส่วนสำคัญ เป็นวิธีที่ง่ายที่สุดในการลดค่าความแปรปรวนในการคำนวณ และเป็นวิธีการที่ต้องใช้ด้วยความระมัดระวัง เนื่องจากการละทิ้งบางส่วนของปัญหาโดยไม่นำมาพิจารณา จะส่งผลให้ค่าผลลัพธ์ที่ได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ตัวอย่างของวิธีการนี้ ได้แก่ การตัดทิ้งบางส่วนของความสัมพันธ์ทางเรขาคณิตของวัตถุในระบบ (Geometry truncation) การกำหนดเวลาสูงสุดที่จะทำการคำนวณของแต่ละอนุภาค (Time cutoff) และการกำหนดค่าพลังงานต่ำสุดของอนุภาคที่จะจำลอง (Energy cutoff) ทั้งสองวิธีหลังนั้น เมื่อค่าที่กำหนดของอนุภาคได้ออกนอกเงื่อนไขที่พิจารณา การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลง

2) การควบคุมจำนวนอนุภาคในแต่ละเซลล์ เป็นการใช้ประโยชน์จากค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาค โดยค่าดังกล่าวจะแปรเปลี่ยนไปตามเงื่อนไขที่กำหนดโดยขอบเขตของเซลล์ในระบบค่าพลังงาน หรือระยะเวลาที่ใช้คำนวณ เป็นต้น เป้าหมายหลักเพื่อเพิ่มจำนวนหรือเน้นการคำนวณกับอนุภาคที่มีคุณสมบัติเป็นไปตามเงื่อนไข หรืออยู่ในบริเวณที่ให้ความสำคัญ ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักนี้จะปรับเปลี่ยนไปเพื่อให้ค่าผลลัพธ์โดยรวมจากการคำนวณยังคงเดิม

3) การปรับแก้วิธีการสุ่มตัวอย่าง เป้าหมายของวิธีการนี้ คือการปรับเปลี่ยนความสัมพันธ์ของการแจกแจงความน่าจะเป็นที่ใช้ในการสุ่มตัวอย่าง จากนั้นจึงปรับแก้ค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อชดเชยให้ค่าผลลัพธ์คงเดิม เช่น การเพิ่มโอกาสของการชนกันของอนุภาค (Forced collision) การปรับเงื่อนไขการชนด้วยค่าพลังงาน (Collision energy bias) การปรับเงื่อนไขการชนด้วยค่ามุมที่อนุภาคทำอันตรกิริยา (Collision angle bias) และการปรับเงื่อนไขเพื่อเน้นให้เกิดการเลือกทำปฏิกิริยา (Reaction selection bias)

4) การเพิ่มการสุ่มตัวอย่างโดยการคำนวณโดยตรง วิธีการนี้จะใช้เพื่อเน้นให้เกิดการสุ่มตัวอย่างของอนุภาคในบริเวณที่มีขนาดเล็ก เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของเซลล์อื่น ๆ ในระบบ เช่น ใช้วิธีการคำนวณการเดินทางของรังสีโดยตรง (Deterministic transport or "DXTRAN") ซึ่งจะมีการสร้างเซลล์ที่เป็นทรงกลมขนาดเล็ก ("DXTRAN" sphere) ห่อหุ้มบริเวณดังกล่าวไว้ เมื่ออนุภาคทำอันตรกิริยากับอนุภาคของตัวกลางภายนอกทรงกลมนี้ จะเกิดอนุภาค "DXTRAN" เคลื่อนที่โดยปราศจากการชนตรงไปยังพื้นผิวของทรงกลม ซึ่งหลักจากเข้าสู่ทรงกลม การสุ่มเส้นทางเดินของอนุภาคภายในทรงกลมจะดำเนินไปโดยปกติ แต่ค่าถ่วงน้ำหนักของอนุภาคที่บริเวณผิวทรงกลมจะคำนวณจากสูตรของวิธีคำนวณนับค่าแบบกำหนดเป้าหมาย (F5 Tally) โดยเมื่ออนุภาคใดเคลื่อนที่ด้วยเส้นทางเดินสุ่ม (Random walk) ตรงไปยังภายในทรงกลมที่กำหนดไว้การคำนวณของอนุภาคนั้นจะสิ้นสุดลง เพื่อให้ค่าถ่วงน้ำหนักรวมของอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลงวิธีการนี้จึงทำให้เกิดทางเดินสุ่มภายในบริเวณที่กำหนด โดยมีการสุ่มตัวอย่างในบริเวณดังกล่าวทุกครั้งที่เกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคกับอนุภาคของตัวกลาง

#### 2.1.7. ดรรชนีแสดงคุณภาพของการคำนวณ (MCNP Figure of Merit :FOM)

โค้ดคอมพิวเตอร์ MCNP นิยามตัวเลขที่แสดงถึงคุณภาพในการคำนวณดังนี้

$$FOM = \frac{1}{R^2 T} \quad 2.30$$

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

นำเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณนับค่า ซึ่งค่า FOM ควรจะมีค่าคงที่ตลอดการคำนวณ ยกเว้นในช่วงต้นของการคำนวณที่ค่าดังกล่าวสามารถเปลี่ยนแปลงได้ เนื่องจากจำนวนข้อมูลยังน้อย และใช้เป็นตัวเลขบ่งชี้ถึงคุณภาพของแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น เมื่อมีการปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณโดยการเลือกใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อช่วยลดค่าความแปรปรวน (Variance reduction techniques) ของผลลัพธ์ นอกจากนี้ยังใช้ในการเลือกค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวิธีการนั้น เพื่อให้ได้สภาวะที่เหมาะสมที่สุด (Optimum) ในทางปฏิบัติการทดสอบค่าพารามิเตอร์ดังกล่าวทำได้โดยการคำนวณด้วยช่วงสั้น ๆ เพื่อนำค่า FOM ที่มีค่ามากจะเป็นการคำนวณที่มีคุณภาพดี นอกจากนี้ ค่า FOM ยังนำมาใช้ประมาณเวลาที่ต้องใช้ในการคำนวณ เพื่อให้ได้ค่าความผิดพลาดสัมพัทธ์ตามที่ต้องการ

### 2.1.8 แฟกเตอร์การแปลงค่าฟลักซ์เป็นอัตราปริมาณรังสี

การแปลงค่าฟลักซ์ของโฟตอนที่คำนวณได้เป็นอัตราปริมาณรังสี จะใช้คำสั่ง DE และ DF โดยใช้แฟกเตอร์ที่อ้างอิงจาก ANSI/ANS-6.1.1-1977 ซึ่งจะแปลงค่าฟลักซ์ของโฟตอนเป็นอัตราปริมาณรังสีสมมูล (Dose equivalent rate) ในหน่วยเรมต่อชั่วโมง (rem/hr) จากนั้นคำนวณเป็นอัตราปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose) โดยที่  $1 \text{ rem} = 1 \text{ rad}$

ตารางที่ 2.2 แฟกเตอร์การแปลงค่าฟลักซ์ของโฟตอนเป็นอัตราปริมาณรังสีสมมูล [3]

Energy, E (MeV)	DF(E) (rem/hr)/(p/cm <sup>2</sup> -s)	Energy, E (MeV)	DF(E) (rem/hr)/(p/cm <sup>2</sup> -s)
0.01	3.96E-06	0.45	1.08E-06
0.03	5.82E-07	0.50	1.17E-06
0.05	2.90E-07	0.55	1.27E-06
0.07	2.58E-07	0.60	1.36E-06
0.10	2.83E-07	0.65	1.44E-06
0.15	3.79E-07	0.70	1.52E-06
0.20	5.01E-07	0.80	1.68E-06
0.25	6.31E-07	1.00	1.98E-06
0.30	7.59E-07	1.40	2.51E-06
0.35	8.78E-07	1.80	2.99E-06
0.40	9.85E-07	2.20	3.42E-06

ตารางที่ 2.2 แฟกเตอร์การแปลงค่าฟลักซ์ของโฟตอนเป็นอัตราปริมาณรังสีสมมูล (ต่อ)

Energy, E (MeV)	DF(E) (rem/hr)/(p/cm <sup>2</sup> -s)	Energy, E (MeV)	DF(E) (rem/hr)/(p/cm <sup>2</sup> -s)
2.60	3.82E-06	5.75	6.37E-06
2.80	4.01E-06	6.25	6.74E-06
3.25	4.41E-06	6.75	7.11E-06
3.75	4.83E-06	7.50	7.66E-06
4.25	5.23E-06	9.00	8.77E-06
4.75	5.60E-06	11.00	1.03E-05
5.00	5.80E-06	13.00	1.18E-05
5.25	6.01E-06	15.00	1.33 E-05

## 2.2 รังสีแกมมา

เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ไม่มีมวล ไม่มีประจุ เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง รังสีแกมมาเกิดขึ้นจากนิวเคลียสของธาตุกัมมันตรังสี ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกับความถี่ของคลื่นและความยาวคลื่นเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

$$E = h\nu \quad 2.31$$

เมื่อ  $\lambda\nu=c$  จะได้

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad 2.32$$

โดย E คือ พลังงานของรังสีแกมมา (eV)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's constant  $4.136 \times 10^{-15}$  eV-s)

$\nu$  คือ ความถี่ของคลื่น ( $s^{-1}$ )

c คือ ความเร็วแสง ( $2.9979 \times 10^{10}$  cm/s)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่น (cm)

เมื่อนิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้น (excited state) ภายหลังจากปฏิกิริยานิวเคลียร์หรือการสลายตัวให้รังสีแอลฟา บีตาและกระบวนการอื่น ๆ ที่จะได้กล่าวต่อไป การลดระดับพลังงานของนิวเคลียสอันลงสู่สถานะพื้น (ground state) จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมาเรียกว่ารังสีแกมมา ถ้าให้สถานะเริ่มต้นนิวเคลียสมีระดับพลังงาน  $E_i$  (เป็นสถานะกระตุ้น) และ  $E_f$  (เป็นสถานะสุดท้าย) ถ้าสถานะสุดท้ายเป็นสถานะพื้น การลดระดับพลังงานจะสิ้นสุด แต่ถ้าสถานะสุดท้ายยังเป็นสถานะกระตุ้นอยู่ การลดระดับพลังงานก็จะเกิดขึ้นอีกจนกระทั่งเป็นสถานะพื้น พลังงานของรังสีแกมมาที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของสถานะเริ่มต้นกับพลังงานของสถานะสุดท้าย ดังนี้

$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f \quad 2.33$$

### 2.3 อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับวัตถุ [4]

ลักษณะทางกายภาพของการดูดกลืนรังสีเมื่อรังสีเอกซ์, รังสีแกมมาหรืออิเล็กตรอนพลังงานสูง เกิดอันตรกิริยาที่ก่อให้เกิดอนุภาคทุติยภูมิเกือบทั้งหมดของปฏิกิริยาไอออนไนเซชัน จะให้อิเล็กตรอนและโฟตอนพลังงานต่ำ อนุภาคเหล่านี้จะเกิดอันตรกิริยาต่อไป ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า cascading effect

ในกรณีของโฟตอน (รังสีแกมมาไอโซโทปรังสีและและรังสีเอกซ์) ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดอันตรกิริยาทางไฟฟ้ากับตัวกลางเหมือนอนุภาคที่มีประจุที่สามารถทำให้ตัวกลางเกิดการแตกตัวเป็นไอออนได้โดยตรง รังสีแกมมาและรังสีเอกซ์เมื่อเกิดอันตรกิริยากับสสารและมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้สสารเกิดการปลดปล่อยอนุภาคอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่เป็นอนุภาคที่มีประจุทุติยภูมิที่มีพลังงานสูง ซึ่งอนุภาคที่มีประจุที่เกิดขึ้นใหม่นี้จะทำให้อะตอมเกิดการแตกตัวด้วยอันตรกิริยาต่อไป

#### (1) ปฏิกิริยาการณโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

ปฏิกิริยาการณโฟโตอิเล็กทริก เป็นอันตรกิริยาของโฟตอน เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา หรือแสง กับสสาร แล้วมีการการถ่ายเทพลังงานทั้งหมดไปยังชั้นของอิเล็กตรอน (ปกติจะเป็นชั้น K) ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอม เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า

โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) ซึ่งพลังงานจลน์ (Kinetic energy) ของโฟโตอิเล็กตรอนจะมีค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนลบค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) หลังจากโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกไปแล้วจะทำให้อะตอมอยู่ในสถานะถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรรอบนอกจะเข้ามาแทนที่ และมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสีเอกซ์ ที่มีพลังงานเท่ากับพลังงานยึดเหนี่ยว หลังจากนั้นอะตอมจะกลับเข้าสู่สถานะพื้นอีกครั้ง โฟโตอิเล็กตรอนมีคุณสมบัติเหมือนอนุภาคบีตา จึงอาจก่อให้เกิดอันตรายต่อไปได้อีก อันตรกิริยานี้จะไม่เกิดขึ้นถ้าโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากอะตอมได้

### (2) ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)

ปรากฏการณ์คอมป์ตัน เกิดขึ้นเมื่อโฟตอนวิ่งชนอิเล็กตรอนในอะตอม แล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกไปจากอะตอม เนื่องจากการชนของโฟตอนกับอิเล็กตรอนเป็นการชนแบบยืดหยุ่น โฟตอนจะมีการสูญเสียพลังงานเพียงบางส่วนให้อิเล็กตรอนเท่านั้น เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดไปว่า คอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) โฟตอนหลังจากวิ่งชนอิเล็กตรอนแล้วจะมีพลังงานลดลง และอาจทำอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ได้อีก เนื่องจากอันตรกิริยานี้เกิดได้ง่ายเมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ ผลสุดท้ายของอันตรกิริยานี้ จะได้คอมป์ตันอิเล็กตรอนและโฟตอนที่มีพลังงานลดลง

### (3) แพร่โปรดัคชัน (Pair production)

แพร่โปรดัคชันเกิดขึ้นเมื่อรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาพลังงานสูง เคลื่อนที่เข้าใกล้นิวเคลียสของสสารแล้วหายไป กลายเป็นอิเล็กตรอนและโพสิตรอน เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนและโพสิตรอนมีค่าพลังงานเท่ากับ 1.022 MeV ดังนั้นแพร่โปรดัคชันจะเกิดเมื่อรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาต้องมีพลังงานไม่ต่ำกว่า 1.022 MeV หลังจากเกิดแพร่โปรดัคชัน โพสิตรอนอาจรวมกับอิเล็กตรอนอื่นแล้วได้โฟตอน 2 ตัว แต่ละตัวมีพลังงาน 0.511 MeV เรียกการรวมนี้ว่า แอนนิฮิเลชัน (Annihilation)



## 2.4 ปริมาณรังสีดูดกลืน (Absorbed dose) [5]

การวัดปริมาณรังสีดูดกลืน เป็นการวัดพลังงานที่ถูกดูดกลืนต่อหน่วยมวลของวัสดุในบริเวณที่สนใจ เมื่อกำหนดให้พลังงานเฉลี่ย ( $d\bar{E}$ ) ที่ทำให้ตัวกลางแตกตัวเป็นไอออน พารามิเตอร์ ( $dm$ ) ที่เป็นปริมาตรของตัวกลางจะได้ปริมาณรังสีดูดกลืนตามสมการ

$$D = \frac{d\bar{E}}{dm} \quad 2.34$$

โดยหน่วย SI ของปริมาณรังสีดูดกลืนคือ เกรย์ (Gray) ตัวย่อใช้ Gy และมีหน่วยเก่าคือ แรด (rad)

โดยที่  $1\text{Gy} = 1\text{ J/kg} = 100\text{ rad}$

อัตราปริมาณรังสีดูดกลืน  $\dot{D}$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรังสีต่อหน่วยของเวลา

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad 2.35$$

ในทางปฏิบัติแล้วค่าปริมาณรังสีดูดกลืน และค่าอัตราปริมาณรังสีดูดกลืนมักจะวัดแบบค่าเฉลี่ยในวัสดุปริมาตรใหญ่ ต่างจากที่อธิบายไว้ตามนิยาม เนื่องจากไม่สามารถวัดปริมาณรังสีเหล่านี้ในวัสดุปริมาตรเล็ก ๆ ที่เราสนใจได้ และผลการวัดปริมาณรังสีดูดกลืนยังขึ้นกับขนาดและความไวของเครื่องวัดรังสี รวมถึงเงื่อนไขในการฉายรังสีเพื่อควบคุมปริมาณรังสีในแต่ละวัสดุ เพราะวัสดุที่แตกต่างกันจะมีคุณสมบัติการดูดกลืนรังสีที่แตกต่างกันด้วย

## 2.5 ระบบการวัดปริมาณรังสี (Dosimetry System) [5]

การวัดปริมาณรังสีดูดกลืนในระบบวัดปริมาณรังสี จะประกอบด้วยเครื่องวัดรังสี (Dosimeter) ชนิดที่มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือทางเคมี เครื่องมือวัดสำหรับวัดค่าความ

เปลี่ยนแปลงที่เกิดจากรังสี เช่น สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ และอิเล็กทรอนิกส์พาราแมกเนติกเรโซแนนซ์ สเปกโตรมิเตอร์ (EPR) เป็นต้น และมาตรฐานอ้างอิงที่เกี่ยวข้อง เช่น มาตรฐานความยาวคลื่นและ มาตรฐานการดูดกลืนแสง ซึ่งต้องมีขั้นตอนการใช้ระบบเครื่องมือที่ดีเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่เที่ยงตรง และถูกต้อง ในทางทฤษฎีความเปลี่ยนแปลงใด ๆ ที่เกิดขึ้นจากรังสีหรือที่เรียกว่าการตอบสนอง ของเครื่องวัดรังสี (Dosimeter Response) ต้องสามารถทำซ้ำและนำมาใช้สำหรับการวัดปริมาณ รังสีได้

### 2.5.1 ระดับชั้นของเครื่องวัดรังสี (Classes of dosimeter)

ระบบการวัดปริมาณรังสีสามารถจัดระดับชั้นตามคุณสมบัติความ แม่นยำและการประยุกต์ใช้งาน แบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม

#### (1) เครื่องวัดรังสีมาตรฐานปฐมภูมิ (Primary standard dosimeter)

เครื่องวัดรังสีมาตรฐานปฐมภูมิให้ผลการวัดเป็นค่าปริมาณรังสีดูดกลืน สัมบูรณ์ ที่อ้างอิงกับหน่วยมาตรฐานสากล (Standard International Unit) และค่าคงที่พื้นฐาน ทางฟิสิกส์ (Fundamental Physics Constants) เป็นเครื่องวัดรังสีที่ไม่จำเป็นต้องมีการสอบเทียบ เครื่องวัดรังสีชนิดนี้จะถูกรักษาและใช้งานโดยห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติและใช้เป็น มาตรฐานมูลฐาน (Basic Standard) สำหรับใช้ในประเทศ เครื่องวัดรังสีมาตรฐานปฐมภูมิมิ 2 ชนิด คือ ionization chambers และ calorimeters

#### (2) เครื่องวัดรังสีมาตรฐานอ้างอิง (Reference standard dosimeter)

เครื่องวัดรังสีมาตรฐานอ้างอิงเป็นเครื่องวัดรังสีที่มีคุณภาพทางมาตร วิทยาสูง สามารถใช้เป็นมาตรฐานอ้างอิงในการสอบเทียบเครื่องวัดรังสีอื่น ๆ และในทำนอง เดียวกัน เครื่องวัดรังสีมาตรฐานอ้างอิงนี้ จะต้องสอบเทียบกับมาตรฐานปฐมภูมิ เนื่องจาก เครื่องวัดรังสีมาตรฐานอ้างอิงเป็นจะต้องถูกนำไปใช้ในการสอบเทียบให้กับเครื่องวัดรังสีมาตรฐาน เคลื่อนย้าย จึงต้องมีการตอบสนองต่อรังสีที่ถูกต้อง การตอบสนองนี้จะต้องมีความสัมพันธ์กับค่า ปริมาณรังสีดูดกลืนที่สามารถอธิบายได้อย่างชัดเจน พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ การตอบสนอง เครื่องวัดรังสี เช่น อุณหภูมิขณะฉายรังสีและหลังการฉายรังสีจะต้องมีการตรวจวัดและสามารถ

คำนวณเป็นค่าแก้ได้ เครื่องวัดรังสีมาตรฐานอ้างอิงที่ใช้กันโดยทั่วไป คือ Fricke, ceric-cerous, dichromate, ethanolchlorobenzene (ECB) และ อะลานีน

(3) เครื่องวัดรังสีมาตรฐานเคลื่อนย้าย (Transfer standard dosimeter)

เครื่องวัดรังสีมาตรฐานเคลื่อนย้ายเป็นเครื่องวัดรังสีที่ใช้ในการถ่ายโอนข้อมูลปริมาณรังสีจากห้องปฏิบัติการมาตรฐานที่ได้รับการรับรองหรือห้องปฏิบัติการมาตรฐานระดับชาติ สู่วงงานฉายรังสีเพื่อให้สามารถสอบกลับไปยังห้องปฏิบัติการมาตรฐานได้ ตัวอย่างเครื่องวัดรังสี เช่น อะลานีน

(4) เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานประจำ (Routine/working dosimeter)

เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานประจำ เป็นเครื่องวัดรังสีที่ใช้ในกระบวนการฉายรังสีของโรงงานฉายรังสีเพื่อสร้างแผนที่ปริมาณรังสีและใช้สำหรับเฝ้าระวังปริมาณรังสีเพื่อควบคุมคุณภาพ เครื่องวัดรังสีกลุ่มนี้จะต้องมีการปรับเทียบอย่างสม่ำเสมอกับเครื่องวัดรังสีอ้างอิงหรือเครื่องวัดรังสีเคลื่อนย้าย เพราะเครื่องวัดรังสีกลุ่มนี้อาจได้รับอิทธิพลจากสิ่งแวดล้อมและรังสีในสิ่งแวดล้อม รวมถึงความแปรปรวนในแต่ละชุดของเครื่องวัดรังสี เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานประจำ เช่น Poly-methylmethacrylate (PMMA), Radiochromic films, cellulose triacetate (CTA), ceric-cerous, ethanolchlorobenzene (ECB)

ตารางที่ 2.3 ลักษณะของแต่ละระดับชั้นของเครื่องวัดรังสี [5]

Class	Calibration necessary?	Uncertainty ( $k = 1$ )	Examples
Primary	No	1%	Calorimeter, ionization chamber
Reference	Yes	2–3%	Calorimeter, alanine, dichromate, ceric-cerous, ECB, Fricke,
Transfer	Yes	3–5%	Alanine, Fricke, dichromate, ceric-cerous, ECB
Routine	Yes	≈5%	PMMA, radiochromic films, CTA, ceric-cerous, ECB

## 2.6 วิธีการเลือกใช้เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานประจำ

เกณฑ์การเลือกเครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานประจำสำหรับกระบวนการฉายรังสีจะต้องปฏิบัติตามเกณฑ์เพื่อให้แน่ใจว่ามีการวัดปริมาณรังสีที่เหมาะสม ระบบวัดปริมาณรังสีต้องมีคุณลักษณะดังนี้

- (1) มีความเหมาะสมกับช่วงปริมาณรังสีที่ใช้งาน
- (2) ง่ายต่อการสอบเทียบปริมาณรังสีในช่วงที่ใช้งาน
- (3) มีความสามารถในการให้ผลซ้ำที่ดี ทั้งในด้านการตอบสนองต่อปริมาณรังสีและการวัด
- (4) ความแปรปรวนที่เกิดจากการนำไปใช้กับรังสีที่มีพลังงานต่างกัน มีค่าจำกัด
- (5) ภายในช่วงที่ใช้งานค่าปริมาณรังสีที่วัดได้ต้องมีค่าความแปรปรวนต่ำ
- (6) ค่าความไม่แน่นอนรวมเหมาะสำหรับการใช้งาน
- (7) ความแปรปรวนที่เกิดจากสภาวะแวดล้อม เช่น ผลกระทบจากแสง อุณหภูมิ ความชื้น มีค่าจำกัดหรือสามารถแก้ไขค่าได้ง่าย
- (8) กระบวนการวัดได้รับพัฒนาเป็นอย่างดี และผ่านการพิสูจน์ว่าเป็นไปตามมาตรฐาน
- (9) มีช่วงเวลาสำหรับการอ่านค่าที่ยาว เช่น อ่านค่าได้ตั้งแต่ 1 ชั่วโมง ถึงสองสามวัน
- (10) ขนาดเหมาะสมสำหรับบริเวณที่ต้องการวัดปริมาณรังสี
- (11) ราคาถูกใช้งานง่ายและอ่านผลได้ง่าย
- (12) เก็บรักษาก่อนใช้งานได้นานและมีความทนทาน

## บทที่ 3

### ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

#### 3.1 ขั้นตอนการวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งขั้นตอนการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

3.1.1 เก็บข้อมูลของ ตำแหน่ง รูปทรง ขนาด ชนิดของวัสดุ และค่ากัมมันตภาพรังสีของต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ของเครื่องฉายรังสี นำมาสร้างแบบจำลองเพื่อคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมาโดยใช้โปรแกรม MCNP 5

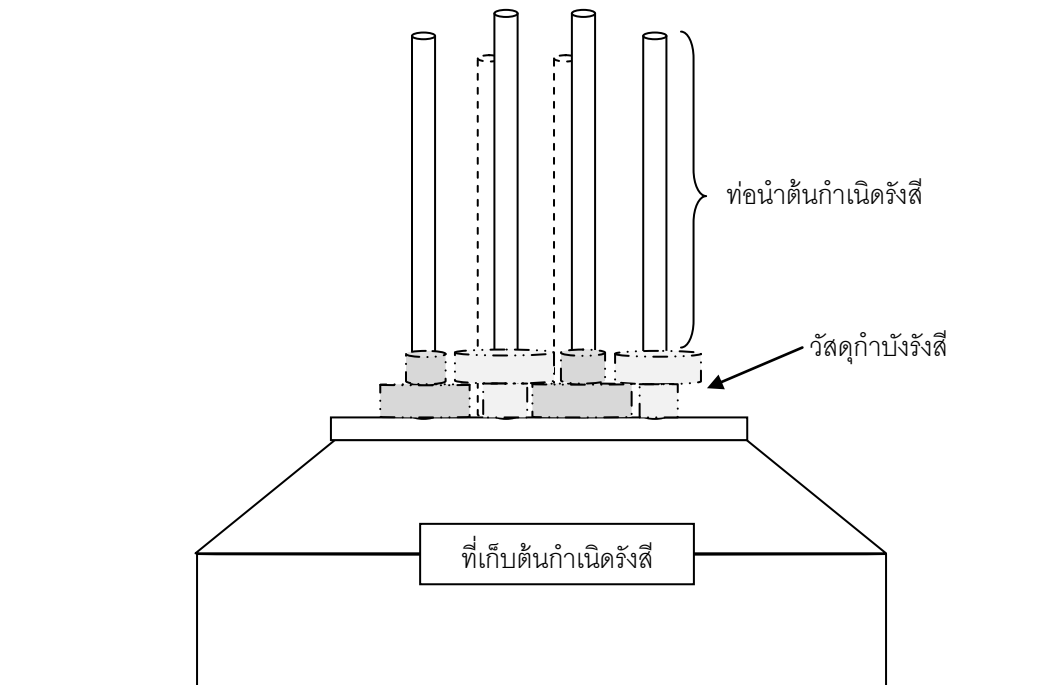
3.1.2 ทำการวัดอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีของเครื่องฉายรังสีแกมมาโคบอลต์-60 ด้วย Red Perspex dosimeter หรือ Amber Perspex dosimeter ซึ่งเป็นเครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานประจำ (Routine dosimeter)

3.1.3 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP 5 กับผลที่ได้จากเครื่องวัดรังสี

#### 3.2 การสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MCNP 5

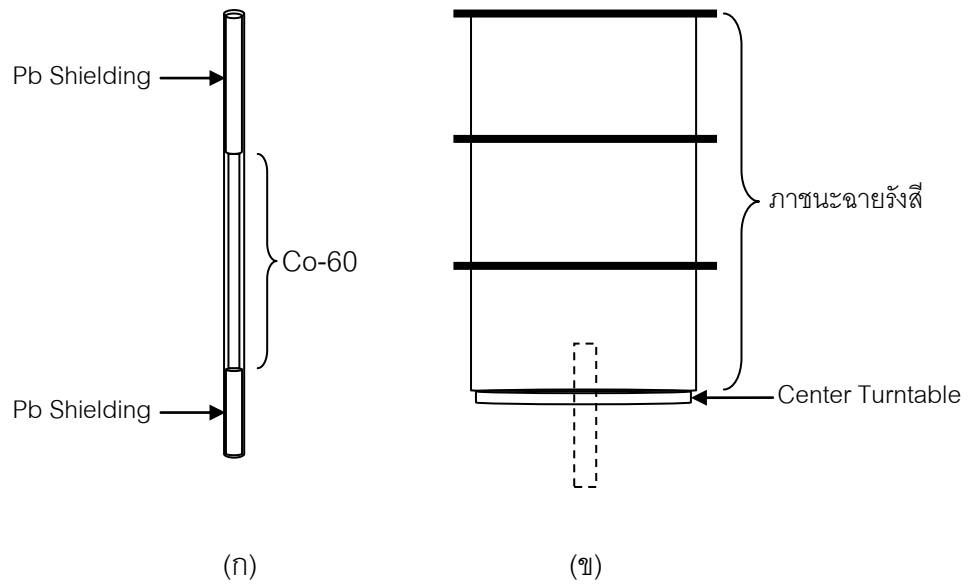
การสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของเครื่องฉายรังสีแกมมา และส่วนของบริเวณฉายรังสีอัญมณี (Center Turntable) ซึ่งเป็นบริเวณที่มีอัตราปริมาณรังสีสูงเหมาะสำหรับการปรับปรุงคุณภาพสีของอัญมณี โดยจะเริ่มเขียนโค้ดคอมพิวเตอร์ในส่วนของเครื่องฉายรังสี ซึ่งประกอบไปด้วยต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 จำนวน 6 แท่ง จัดวางในแนวตั้งล้อมเป็นรูปหกเหลี่ยม ที่เก็บต้นกำเนิดรังสี และวัสดุกำบังรังสีที่เป็นส่วนประกอบของเครื่องฉายรังสี ก่อน เนื่องจากเป็นส่วนที่มีการเปลี่ยนแปลงน้อยกว่าที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีที่จะต้องออกแบบให้ตรงกับความต้องการในการใช้งานจริง ซึ่งส่วนของตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีจะประกอบด้วยภาชนะบรรจุอัญมณีทำจากอลูมิเนียมทรงแบคสูง 15 เซนติเมตร พร้อมฝาปิดสำหรับบรรจุฉายอัญมณี (Gems container) วางเรียงซ้อนกัน 3 ชั้น ตลอดแนวความสูงของต้นกำเนิดรังสี

ภายในภาชนะฉายรังสีอัญมณีจะสร้างเซลล์ขึ้นมาเป็นตัวแทนในการคำนวณหาปริมาณรังสี ณ บริเวณนั้น ๆ ขนาดของเซลล์แต่ละเซลล์จะมีความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร ตลอดความสูงของต้นกำเนิดรังสี เพื่อให้สามารถคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีในภาชนะบรรจุอัญมณีได้หลาย ๆ ตำแหน่งพร้อมกัน ใช้การคำนวณนับค่า F4 Tally เพื่อหาค่าฟลักซ์เฉลี่ยภายในเซลล์

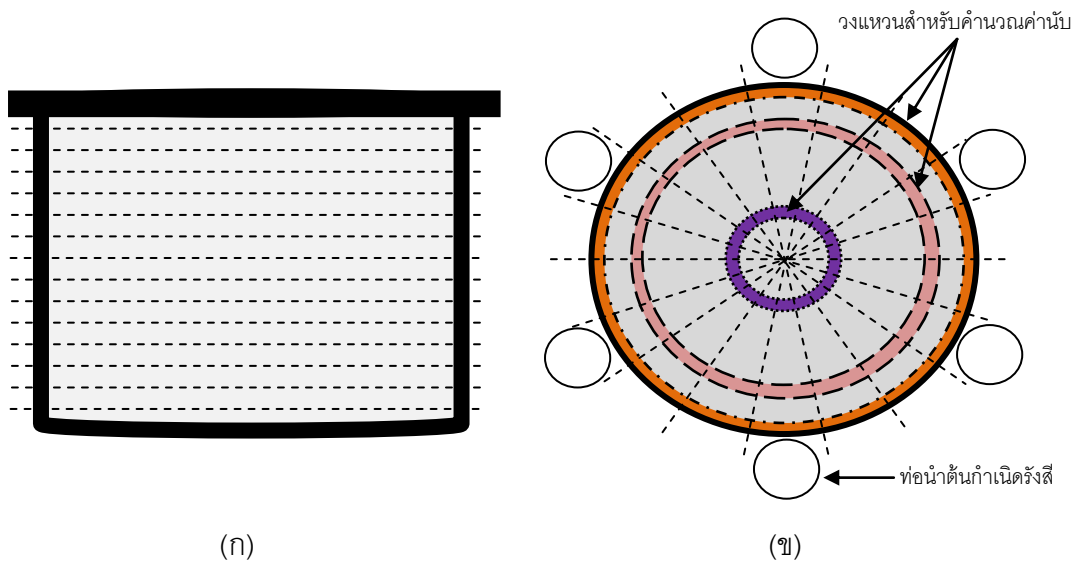


รูปที่ 3.1 ขอบเขตแบบจำลองของเครื่องฉายรังสีแกมมา

การสร้างแบบจำลองในส่วน of เครื่องฉายรังสีแกมมามีขอบเขตแบบจำลองดังรูปที่ 3.1 ซึ่งประกอบด้วยที่เก็บต้นกำเนิดรังสีและวัสดุกำบังรังสีทำจากตะกั่ว ส่วนท่อนำต้นกำเนิดรังสี (Source Exposure tubes) เป็นท่อสเตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 3 เซนติเมตร ในขณะที่ฉายรังสีภายในท่อนำต้นกำเนิดรังสีจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.2 (ก) คือมีต้นกำเนิดรังสี โคบอลต์-60 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร และที่กำบังรังสีตะกั่ว (Pb Shielding) ที่ด้านปลายทั้ง 2 ด้านของต้นกำเนิดรังสี และในส่วนของบริเวณฉายรังสีอัญมณี (Center Turntable) มีจานหมุนทำจากเหล็กสำหรับวางภาชนะฉายรังสี และสามารถสั่งให้หมุนหรือไม่หมุนตัวอย่างฉายรังสีได้



รูปที่ 3.2 ขอบเขตแบบจำลองของท่อนำต้นกำเนิดรังสี (ก)  
และตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีและภาชนะบรรจุตัวอย่าง (ข)



รูปที่ 3.3 ขอบเขตแบบจำลองการสร้างเซลล์ ในภาชนะฉายรังสี  
(ก) การแบ่งเซลล์ในระนาบ xz (ข) การแบ่งเซลล์ในระนาบ xy

การสร้างเซลล์เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนัก จะแบ่งเซลล์ตามแนวความสูงของภาชนะฉายรังสีจะแบ่งเป็น 15 ระดับ ซึ่งแต่ละระดับมีความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร และในระนาบ xy จะแบ่งเซลล์ตามแนวรัศมีคล้ายลักษณะการแบ่งเค้กเป็น 18 ส่วน และสร้างวงแหวน 3 วง ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในและภายนอกเท่ากับ 14 เซนติเมตร และ 15 เซนติเมตร, 10 เซนติเมตร และ 11 เซนติเมตร 1.5 เซนติเมตร และ 2.5 เซนติเมตร ตามลำดับ เพื่อใช้ในการคำนวณน้ำหนักดังรูปที่ 3.3

ในการใช้งาน MCNP 5 คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมา จะต้องสร้างแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า (Input File) เพื่อกำหนดเงื่อนไขและลักษณะของแบบจำลองโครงสร้างของเครื่องฉายรังสีแกมมาและตำแหน่งที่เกี่ยวข้องกับบริเวณที่ต้องการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมา ให้มีรายละเอียดตรงความเป็นจริงมากที่สุด

3.2.1 ข้อกำหนดค่าคงที่และหน่วยต่าง ๆ ที่ใช้ในการเขียนแฟ้มข้อมูลป้อนเข้ามีดังนี้

- 1) สามารถเขียนข้อความใด ๆ ก็ได้ที่บรรทัดแรกของแฟ้มข้อมูล
- 2) ในหนึ่งบรรทัดจะบรรจุตัวอักษรได้ 80 ตัว
- 3) ไม่สามารถใช้ Tab ในการจัดข้อมูลในแฟ้มข้อมูลได้
- 4) ใช้ "C" เมื่อต้องการสร้างบรรทัดสำหรับคำอธิบาย
- 5) ใช้ "\$" ใช้สำหรับแสดงการสิ้นสุดของข้อมูลในแต่ละบรรทัด ตัวอักษรและเครื่องหมายที่อยู่หลัง "\$" จะถือว่าเป็นคำอธิบาย
- 6) ใช้บรรทัดว่างสำหรับการแยกชุดคำสั่งนิยามแต่ละส่วนหรือแสดงการสิ้นสุดแฟ้มข้อมูล
- 7) ใช้ "&" ที่ปลายบรรทัดแสดงความต่อเนื่องของข้อมูลกับบรรทัดถัดไปและสามารถใส่ข้อมูลได้ตั้งแต่คอลัมน์ที่ 1-80



ตารางที่ 3.1 หน่วยที่ใช้ในการเขียนแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า

Physical Units in MCNP	
Length	cm
Energy	MeV
Time	shakes ( $10^{-8}$ s)
Temperature	MeV (kT)
Atomic Densities	atoms/barn.cm
Mass Densities	g/cm <sup>3</sup>
Cross Sections	barns ( $10^{-24}$ cm <sup>2</sup> )
Heating numbers	MeV/collision

### 3.2.2 แฟ้มข้อมูลป้อนเข้า แบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลักดังนี้

ส่วนที่ 1 คำสั่งนิยามเซลล์ (Cell Card) ในส่วนนี้จะเป็นการกำหนดเซลล์ซึ่งแต่ละบรรทัดจะใช้นิยามแต่ละเซลล์ตามหมายเลขที่กำกับอยู่ ในคอลัมน์แรกของบรรทัด ซึ่งเซลล์นั้นหมายถึงปริมาตรที่ห่อหุ้มด้วยพื้นผิวปิดใด ๆ หมายเลขของเซลล์ใช้ได้ตั้งแต่ 1 ถึง 99999 ข้อมูลตัวเลขในหลักถัดมาคือ หมายเลขของวัสดุตรงกับค่าในคอลัมน์แรกของบรรทัดที่ใช้ในคำสั่งนิยามวัสดุ ข้อมูลตัวเลขหลักที่สาม ถ้ามีค่าเป็นบวกจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงอะตอมในหน่วยอะตอมต่อตารางเซนติเมตร สำหรับค่าที่เป็นลบจะเป็นค่าความหนาแน่นเชิงมวลในหน่วยกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ชุดตัวเลขที่ถัดจากค่าความหนาแน่นของวัสดุคือ พื้นผิวที่ประกอบกันขึ้นเป็นเซลล์ จะมีค่าได้ทั้งบวกและลบ ซึ่งหมายถึงการเลือกใช้ด้านที่เป็นบวกหรือลบของพื้นผิวหนึ่ง ๆ เพื่อนำมาประกอบเป็นเซลล์ ด้วยการใช้ตัวปฏิบัติการของเซตได้แก่ อินเตอร์เซกชัน (Intersection) ซึ่งใช้การเว้นวรรค ( ) ยูเนียน (Union) ซึ่งใช้เครื่องหมายหัพภาคคู่ (: ) และคอมพลีเมนต์ (Complement) ใช้ชาร์ป (#)

C Cell cards					
C ell#	Mat#	Dens		Surface combinations	
C .....Sources.....					
1	1	-8.9	-1	imp:p=1	\$Source1
2	1	-8.9	-2	imp:p=1	\$Source2
3	1	-8.9	-3	imp:p=1	\$Source3

รูปที่ 3.4 ตัวอย่างคำสั่งนิยามเซลล์ในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า

ส่วนที่ 2 คำสั่งนิยามพื้นผิว (Surface Cards) เป็นการกำหนดพื้นผิวเพื่อประกอบกันเป็นส่วนต่าง ๆ ของเซลล์ MCNP 5 ได้นิยามพื้นผิวของเซลล์โดยใช้สมการทางคณิตศาสตร์ และใช้คำสั่งย่อในการกำหนดชนิดและพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของพื้นผิว ดังตารางที่ 3.2

นอกจากการสร้างพื้นผิวโดยใช้พารามิเตอร์ตามตารางที่ 3.2 แล้ว MCNP 5 ยังสามารถสร้างพื้นผิวโดยใช้ Macrobodies ซึ่งเป็นคำสั่งในการสร้างรูปทรงทางเรขาคณิตที่เป็นรูปทรงพื้นผิวปิด และพื้นผิวที่สร้างจาก Macrobodies สามารถใช้งานร่วมกับเซลล์และพื้นผิวอื่น ๆ ได้ ตัวอย่างคำสั่งที่ใช้บ่อย ๆ เช่น

- 1) BOX: การสร้างกล่องสี่เหลี่ยมมุมฉาก
- 2) RPP: การสร้างทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า
- 3) SPH: การสร้างทรงกลม
- 4) RCC: การสร้างทรงกระบอกตั้งฉากกับฐาน
- 5) RHP(HEX): การสร้างปริซึมฐานหกเหลี่ยม

แบบจำลองในการวิจัยนี้ ส่วนใหญ่ใช้การสร้างพื้นผิวด้วย Macrobodies โดยใช้ระบบแกนพิกัดฉาก X Y Z ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในคอลัมน์แรกของบรรทัด จะเป็นการกำหนดลำดับของพื้นผิวหรือรูปทรงเพื่อใช้อ้างอิงในการนิยามเซลล์ ส่วนในข้อมูลหลักที่สองของแต่ละบรรทัดจะเป็นการกำหนดคำสั่งย่อของรูปทรงที่ต้องการสร้าง ส่วนข้อมูลหลักต่อมาจะเป็นการกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้กับสมการ ตัวอย่างของคำสั่งนิยามพื้นผิวดังรูป 3.5

ตารางที่ 3.2 พารามิเตอร์ในคำสั่งนิยามพื้นผิว [3]

Mnemonic	Type	Description	Equation	Card Entries
P	Plane	General	$Ax + By + Cz - D = 0$	ABCD
PX		Normal to X-axis	$x - D = 0$	D
PY		Normal to Y-axis	$y - D = 0$	D
PZ		Normal to Z-axis	$z - D = 0$	D
SO	Sphere	Centered at Origin	$x^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
S		General	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} R$
SX		Centered on X-axis	$(x - \bar{x})^2 + y^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} R$
SY		Centered on Y-axis	$x^2 + (y - \bar{y})^2 + z^2 - R^2 = 0$	$\bar{y} R$
SZ		Centered on Z-axis	$y^2 + y^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{z} R$
C/X	Cylinder	Parallel to X-axis	$(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{y} \bar{z} R$
C/Y		Parallel to Y-axis	$(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} \bar{z} R$
C/Z		Parallel to Z-axis	$(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2 - R^2 = 0$	$\bar{x} \bar{y} R$
CX		On X-axis	$y^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CY		On Y-axis	$x^2 + z^2 - R^2 = 0$	R
CZ		On Z-axis	$x^2 + y^2 - R^2 = 0$	R
K/X	Cone	Parallel to X-axis	$\sqrt{(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2} - t(x - \bar{x}) = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
K/Y		Parallel to Y-axis	$\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2} - t(y - \bar{y}) = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
K/Z		Parallel to Z-axis	$\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} - t(z - \bar{z}) = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} t^2 \pm 1$
KX		On X-axis	$\sqrt{y^2 + z^2} - t(x - \bar{x}) = 0$	$\bar{x} t^2 \pm 1$
KY		On Y-axis	$\sqrt{x^2 + z^2} - t(y - \bar{y}) = 0$	$\bar{y} t^2 \pm 1$
KZ		On Z-axis	$\sqrt{x^2 + y^2} - t(z - \bar{z}) = 0$	$\bar{z} t^2 \pm 1$
				$\pm 1$ used only for 1 sheet cone
SQ	Ellipsoid Hyperboloid Paraboloid	Axis parallel to X-, Y-, or Z-axis	$A(x - \bar{x})^2 + B(y - \bar{y})^2 + C(z - \bar{z})^2 + 2D(x - \bar{x}) + 2E(y - \bar{y}) + 2F(z - \bar{z}) + G = 0$	ABCDE FG $\bar{x} \bar{y} \bar{z}$
GQ	Cylinder Cone Ellipsoid Hyperboloid Paraboloid	Axes not parallel to X-, Y-, or Z-axis	$Ax^2 + By^2 + Cz^2 + Dxy + Eyz + Fzx + Gx + Hy + Jz + K = 0$	ABCDE FGHIJK
TX	Elliptical or circular torus. Axis is parallel to X-, Y-, or Z-axis		$(x - \bar{x})^2/B^2 + (\sqrt{(y - \bar{y})^2 + (z - \bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} ABC$
TY			$(y - \bar{y})^2/B^2 + (\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (z - \bar{z})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} ABC$
TZ			$(z - \bar{z})^2/B^2 + (\sqrt{(x - \bar{x})^2 + (y - \bar{y})^2} - A)^2/C^2 - 1 = 0$	$\bar{x} \bar{y} \bar{z} ABC$
XYZP	Surfaces defined by points			See pages 3-15 and 3-17

*C Surface cards*

1 RCC 17.75 -10.25 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source1  
 2 RCC 0 -20.5 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source2  
 3 RCC -17.75 -10.25 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source3  
 7 SPH 0 0 0 1000

รูปที่ 3.5 ตัวอย่างคำสั่งนิยามพื้นผิวในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า

พื้นผิวที่ 1 เป็นทรงกระบอกมีจุดศูนย์กลางอยู่ที่พิกัด (17.75, -10.25, -22.58) มีความสูง 45.16 เซนติเมตร ขนานไปกับแกน Z และมีรัศมี 0.555 เซนติเมตร พื้นผิวที่ 2 และ 3 เป็นทรงกระบอกเหมือนพื้นผิวที่ 1 แต่มีจุดศูนย์กลางอยู่ที่พิกัด (0, -20.5, -22.58) และ (-17.75, -10.25, -22.58) ตามลำดับ พื้นผิวที่ 7 เป็นทรงกลมจุดศูนย์กลางอยู่ที่พิกัด (0, 0, 0) มีรัศมี 1000 หน่วยเป็นเซนติเมตร โดยการกำหนดพื้นผิวในส่วนของแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า จะใช้เครื่องหมายลบหรือค่าลบ เป็นปริมาตรด้านใน และค่าเป็นบวกคือด้านนอก

ส่วนที่ 3 คำสั่งกำหนดข้อมูลหลัก แบ่งเป็นส่วนย่อย ได้ 4 ส่วน ดังนี้

คำสั่งนิยามชนิดของวัสดุ (Materials Specification Cards) ซึ่งภายในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้าของแบบจำลองนี้ ได้กำหนดชนิดของธาตุนั้น ๆ ให้อยู่ในเลข 5 หลัก 2 หลักแรกแทนเลขอะตอม (Z) และ 3 หลักหลังจะเป็นเลขมวล (A) แต่ถ้ากำหนดเป็น 000 นั้นจะกำหนดให้เป็นเลขมวลรวมในธรรมชาติซึ่งเป็นค่ามาตรฐานอยู่แล้ว ส่วนการกำหนดสัดส่วนของสารประกอบหรือของผสมนั้นสามารถกำหนดได้ ทั้งสัดส่วนของอะตอมจะกำหนดเป็นเลขค่าบวก และสัดส่วนของน้ำหนักจะเป็นเลขค่าลบ แสดงตัวอย่างดังรูป 3.3

*C Materials Specification Cards*

m1 27000 1.0 \$Co-60  
 m2 82000 1.0 \$Pb(shielding)  
 m3 7000 -0.79 8000 -0.21 \$Air

รูปที่ 3.6 ตัวอย่างคำสั่งวัสดุในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า

จากตัวอย่างมีวัสดุ 3 ชนิด ชนิดแรก เป็นไอโซโทปโคบอลต์-60 ชนิดที่สอง เป็นธาตุตะกั่ว และชนิดที่สาม เป็นอากาศประกอบด้วยไนโตรเจน 79% กับออกซิเจน 21%

คำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสี (Source Specification Cards) คำสั่งนี้ใช้กำหนดคุณสมบัติต่าง ๆ ของต้นกำเนิดรังสี เช่น ค่าพลังงาน วิธีการสุ่มตัวอย่าง รวมทั้งกำหนดเงื่อนไขในการปรับแก้ค่าการสุ่มตัวอย่างตามที่ใช้กำหนด ผู้ใช้กำหนดชนิดของอนุภาคโดยใช้คำสั่ง MODE และ ตามด้วยอักษร ใช้ P เมื่อต้องการคำนวณอนุภาคฟิสิกส์ N แทนอนุภาคนิวตรอน (Neutron) และ B แทนอนุภาคบีตา (Beta) และคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสีใช้ SDEF กำหนดค่าพลังงาน ด้วยคำสั่ง ERG กำหนดตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีแบบมีปริมาตร ด้วยคำสั่ง AXS, EXT, RAD และ ใช้คำสั่ง POS ในการกำหนดสัดส่วนค่ากัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสีแต่ละแห่ง โดยใช้ SI (Source Information) และ SP (Source probabilities) ช่วยในการกำหนดรายละเอียดของต้นกำเนิดรังสี แสดงตัวอย่างดังรูป 3.7

```

C Source Specification cards
mode p
sdef ERG=D1 AXS=0 0 1 EXT=D2 RAD=D3 POS=D4
SI1 L 1.173 1.332
SP1 D 1 1
SI2 -22.58 22.58
SP2 0 1
SI3 0 0.555
SP3 -21 1
SI4 L 17.75 -10.25 0 0.00 -20.5 0 &
-17.75 -10.25 0 -17.75 10.25 0 &
0.00 20.50 0 17.75 10.25 0
SP4 D 0.992 0.983 1.000 0.983 0.983 0.983

```

รูปที่ 3.7 ตัวอย่างคำสั่งนิยามต้นกำเนิดรังสีในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า

จากตัวอย่างสามารถอธิบายได้ว่าต้นกำเนิดรังสีเป็นต้นกำเนิดโพตอนมีลักษณะเป็นทรงกระบอกสูง 450 มิลลิเมตร มีรัศมี 11.1 มิลลิเมตร จำนวน 6 แท่งถูกจัดวางในแนวตั้งล้อมเป็นรูปหกเหลี่ยมปลดปล่อยรังสีแกมมา 2 พลังงาน คือ 1.173, 1.332 MeV และมีค่ากัมมันตภาพแต่ละแท่งเป็นสัดส่วนตาม SP4 คือ 0.992, 0.983, 1.000, 0.983, 0.983 และ 0.983 ตามลำดับ

คำสั่งนิยามตัวประมาณค่า (MCNP Tally) ในส่วนนี้จะใช้ในการคำนวณและบันทึกอนุภาคที่สนใจและอยู่ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ที่ต้องการซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการบันทึกได้ดังนี้

ตารางที่ 3.3 คำสั่งนิยามตัวประมาณค่า

คำสั่งการคำนวณนับค่า	ลักษณะของตัวประมาณค่า
F1:N or F1:P or F1:E	การคำนวณนับค่ากระแสที่ผ่านพื้นผิว (Surface current)
F2:N or F2:P or F2:E	การคำนวณนับค่าฟลักซ์บนพื้นผิว (Surface flux)
F4:N or F4:P or F4:E	การคำนวณนับค่าฟลักซ์ภายในเซลล์ (Track length estimate of cell flux)
F5a:N or F5a:P	การคำนวณนับค่าฟลักซ์ที่ตำแหน่งหัววัดรังสี (Flux at a point or ring detector)
F6:N or F6:P or F6:N,P	การประมาณค่าพลังงานจากความยาวของเส้นทาง (Track length estimate of energy deposition)
F7:N	การประมาณค่าพลังงานจากความยาวของเส้นทางของการแตกตัว (Track length estimate of fission energy deposition)
F8:N or F8:P or F8:E or F8:P,E	การคำนวณนับค่าการแจกแจงพลังงาน (Pulse height tally)

การคำนวณนับค่าที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ใช้การบันทึกค่าแบบ F4 Tally เป็นการคำนวณนับค่าจากความยาวของเส้นทางหรือการคำนวณนับค่าฟลักซ์ภายในเซลล์ แสดงตัวอย่างดังรูป

<i>C Tally Specification card</i>	
<i>F4:p</i>	1140 1141 1142 1143 1144 1145 1146 1147 1148 1149 1150 1151 1152 & 1153 1154 1155 1156 1157
<i>fm4</i>	5.19e+15
<i>de4</i>	0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 & 0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 & 6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0
<i>df4</i>	3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 & 8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 & 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 & 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &

รูปที่ 3.8 ตัวอย่างคำสั่งนิยามตัวประมาณค่าในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า

จากตัวอย่างข้างต้นใช้การบันทึกค่าอัตราปริมาณรังสี หาค่าอัตราปริมาณรังสีเฉลี่ยในเซลล์ 1140-1157 จากต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ค่ากัมมันตภาพ 2595 TBq ใช้คำสั่งแปลงค่าฟลักซ์เป็นอัตราปริมาณรังสีในหน่วย rem/hr ด้วยคำสั่ง de และ df

คำสั่งนิยามหยุดการทำงาน (Problem Cut off) เป็นคำสั่งที่ใช้ในการหยุดการคำนวณโดยกำหนดเงื่อนไขการหยุดการคำนวณ ด้วยการกำหนดเวลา หรือจำนวนอนุภาคที่สุ่มครบตามจำนวนที่กำหนดไว้ แสดงตัวอย่างดังรูป 3.9

<i>C Problem Cut off</i>
<i>Nps 1e+8</i>

รูปที่ 3.9 ตัวอย่างคำสั่งนิยามหยุดการทำงานในแฟ้มข้อมูลป้อนเข้า

จากตัวอย่างข้างต้นเป็นการกำหนดจำนวนฟิสิกส์ที่สุ่มออกมา และจะหยุดการทำงานเมื่อมีการสุ่มครบ  $1 \times 10^8$  ตัว

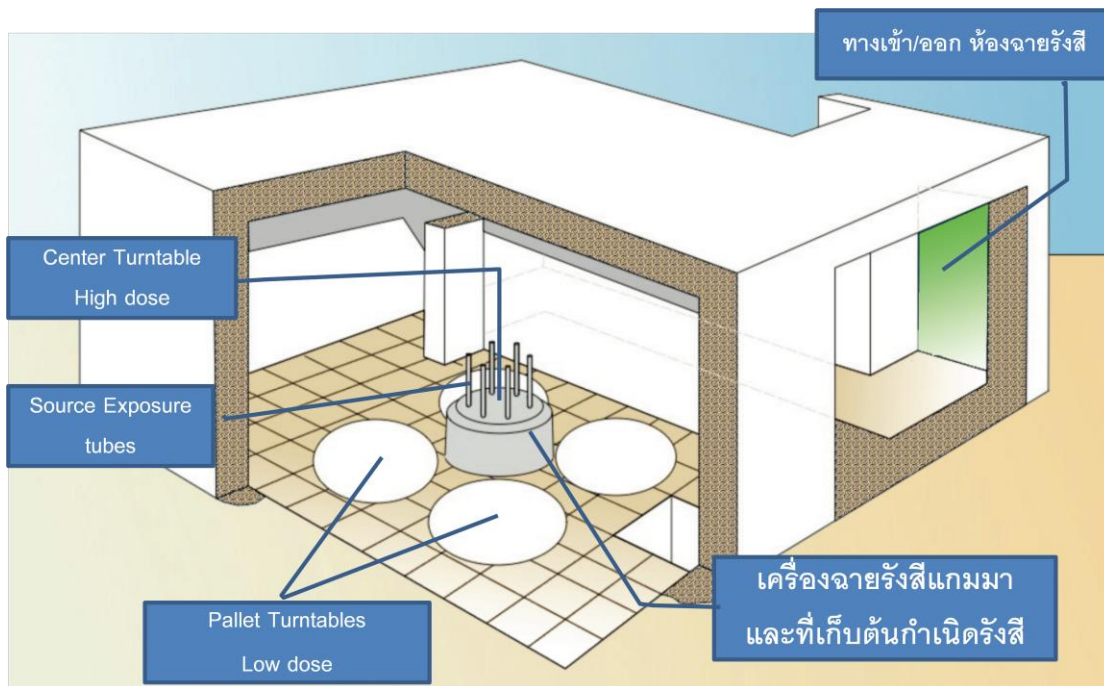
### 3.3 การวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter

การทดลองวัดอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณี ของเครื่องฉายรังสีแกมมาโดยต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 เพื่อนำผลมาเปรียบเทียบความถูกต้อง แม่นยำ กับค่าอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5

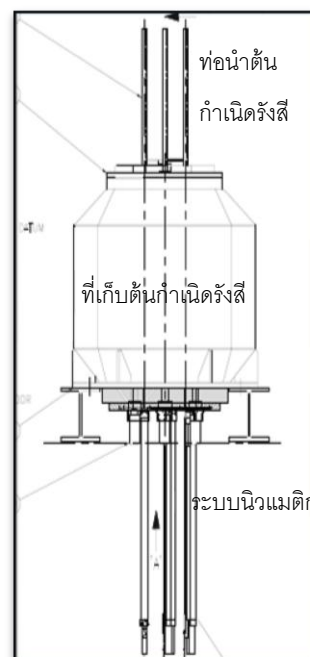
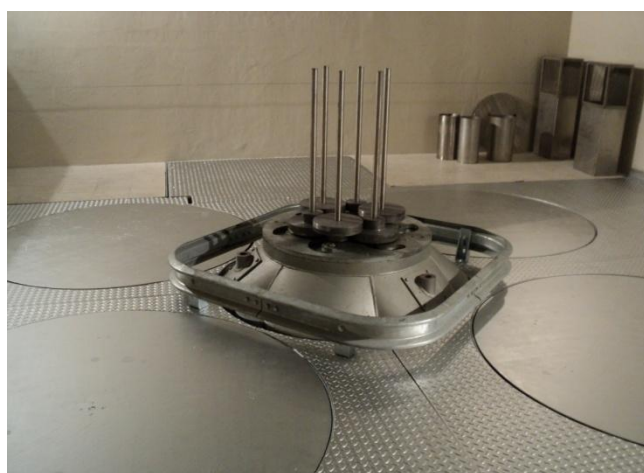
#### 3.3.1 วัสดุอุปกรณ์และระบบวัดรังสี

3.3.1.1 เครื่องฉายรังสีแกมมาโดยไอโซโทปรังสีโคบอลต์-60 (Multi-Purpose Gemstone Irradiator) ของศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) มีลักษณะเป็นห้องฉายรังสี ขนาด 7 เมตร x 7 เมตร x 4 เมตร ผนังคอนกรีตหนา 1.88 เมตร มีต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 จำนวน 6 แท่ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 เซนติเมตร ยาว 45 เซนติเมตร ถูกจัดวางในแนวตั้งล้อมเป็นรูปหกเหลี่ยมดังรูปที่ 1 มีค่ากัมมันตภาพรวม 70 kCi โดยแต่ละแท่งมีค่ากัมมันตภาพใกล้เคียงกันที่ประมาณ 1100-1200 Ci การเก็บต้นกำเนิดรังสีเป็นแบบแห้ง (Dry Storage) ที่เก็บและวัสดุกำบังรังสีทำจากตะกั่วอยู่ด้านล่างของห้องฉายรังสี เมื่อต้องการใช้งาน ต้นกำเนิดรังสี โคบอลต์-60 จะถูกดันด้วยระบบนิวแมติกขึ้นไปที่อยู่ด้านบน พื้นที่ฉายรังสีจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนใหญ่ ๆ คือบริเวณด้านในวงล้อมของต้นกำเนิดรังสี (Center turntable) จะเป็นบริเวณที่มีอัตราปริมาณรังสีสูงและมีแท่นวางตัวอย่างที่ขับเคลื่อนให้สามารถหมุนตัวอย่างขณะฉายรังสีเพื่อให้ได้ปริมาณรังสีที่สม่ำเสมอ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นบริเวณด้านนอกวงล้อมต้นกำเนิดรังสี ซึ่งจะมีอัตราปริมาณรังสีต่ำกว่า เครื่องฉายรังสีแกมมานี้ ผลิตโดยบริษัท Power Plus System Ltd., ประเทศอังกฤษ มีลักษณะดังรูป 3.10





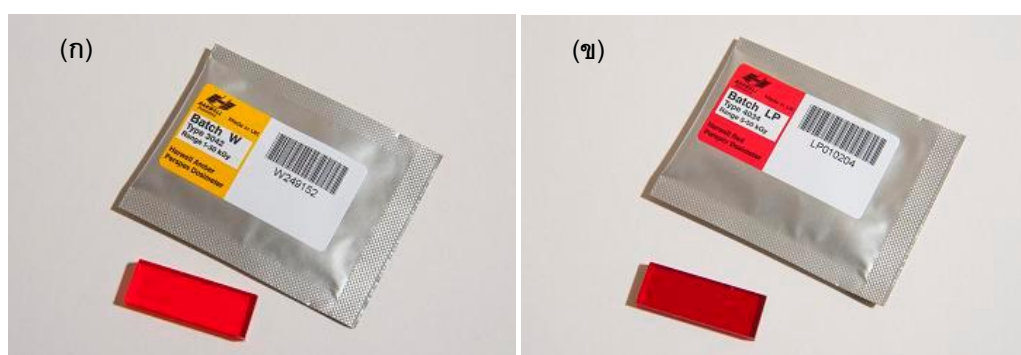
รูปที่ 3.10 ลักษณะห้องฉายรังสีแกมมา



รูปที่ 3.11 เครื่องฉายรังสีแกมมา

### 3.3.1.2 ระบบวัดอัตราปริมาณรังสีแกมมาของเครื่องฉายรังสีแกมมา ประกอบด้วย

1) เครื่องวัดปริมาณรังสีแกมมาใช้ Amber Red Perspex Dosimeter [6] และ Red Perspex Dosimeter [7] ซึ่งเป็นเครื่องวัดรังสีชนิด Poly-methylmethacrylate (PMMA) ขนาด 30 มิลลิเมตร x 11 มิลลิเมตรหนา  $3 \pm 0.55$  มิลลิเมตร มีค่าความไม่แน่นอนในการวัดที่ 6% จัดอยู่ในกลุ่มที่ใช้ในงานประจำ (Routine Dosimeter) เป็น เครื่องวัดรังสีที่ใช้ในงานทางด้านอุตสาหกรรมการฉายรังสี ลักษณะการทำงานของเครื่องวัดรังสีคือสีของเครื่องวัดรังสีจะเปลี่ยนไปเมื่อนำไปฉายรังสี ทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเมื่อวัดด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) มีค่าเปลี่ยนไปตามปริมาณรังสีที่ได้รับ โดยที่ Amber Perspex dosimeter จะวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 651 nm และสามารถวัดปริมาณรังสีแกมมาได้ในช่วง 1-30 kGy ส่วน Red Perspex dosimeter จะวัดค่าการดูดกลืนที่ความยาวคลื่น 640 nm และสามารถวัดปริมาณรังสีแกมมาได้ในช่วง 5-50 kGy การคำนวณหาค่าปริมาณรังสีดูดกลืน ทำได้โดยนำค่าการดูดกลืนหารด้วยค่าความหนาของเครื่องวัดรังสี แล้วนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเทียบกับกราฟมาตรฐานที่ทำการสอบเทียบไว้ ซึ่งในการวิจัยนี้ จะใช้ระบบวัดปริมาณรังสีของประเทศผู้ผลิตโดยคำนวณด้วยโปรแกรม Dosim2010 ในการวัดค่าปริมาณรังสีดูดกลืนที่เครื่องวัดรังสีได้รับ ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ดังรูป 3.12

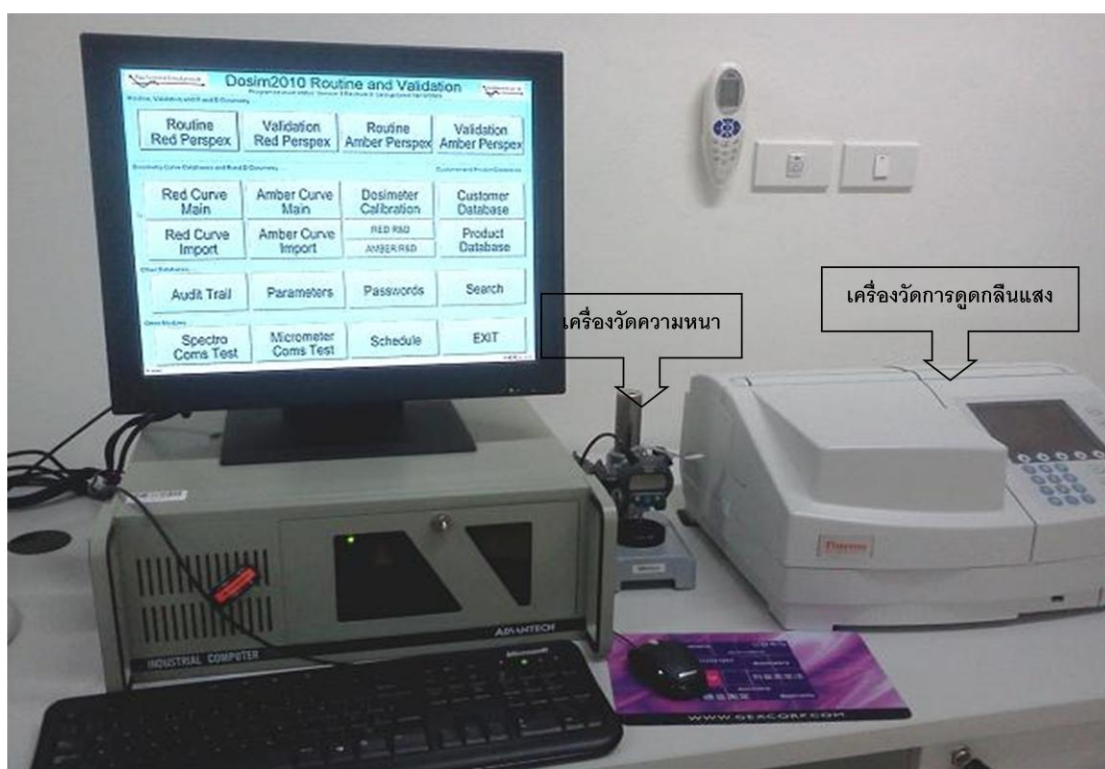


รูปที่ 3.12 เครื่องวัดรังสี Amber Perspex dosimeter (ก) และ Red Perspex dosimeter (ข)

2) เครื่องวัดการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer) ยี่ห้อ Thermo Scientific รุ่น Evolution 160 ใช้ในการวัดค่าการดูดกลืนแสงของ Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter หลังการฉายรังสี ดังรูป 3.10

3) เครื่องวัดความหนา ยี่ห้อ Mitutoyo ใช้วัดความหนาของ Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter ใช้ในการคำนวณหาปริมาณรังสี ดังรูป 3.10

4) คอมพิวเตอร์ (Industrial computer) และโปรแกรมคำนวณปริมาณรังสี Dosim2010 ของผู้ผลิต ดังรูป 3.10



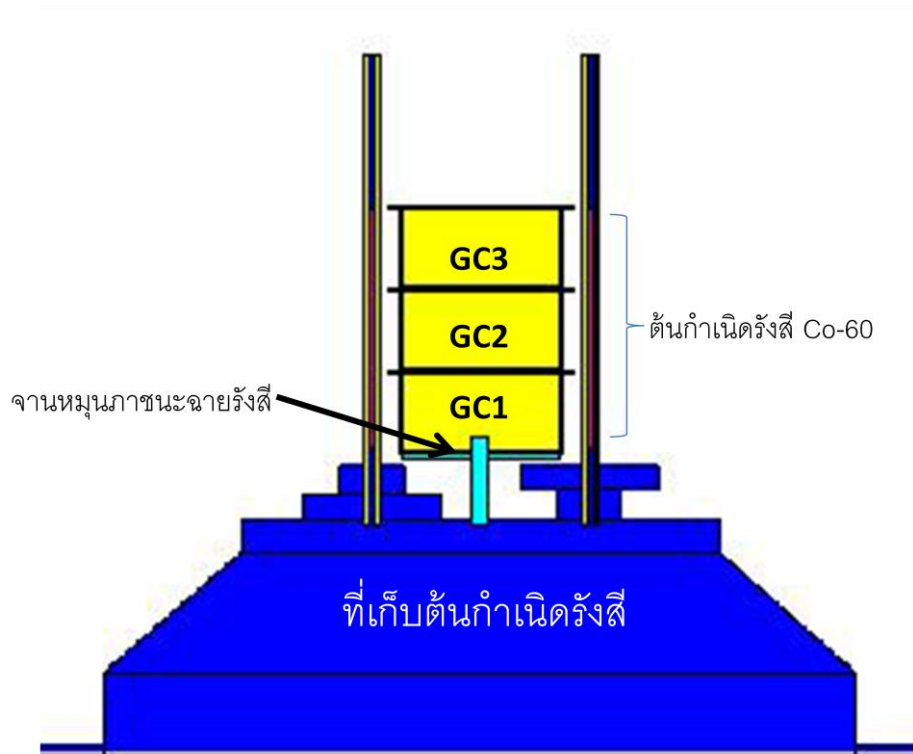
รูปที่ 3.13 ระบบวัดปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสีแกมมา

## บทที่ 4

### ผลการสร้างแบบจำลอง และผลการวิจัย

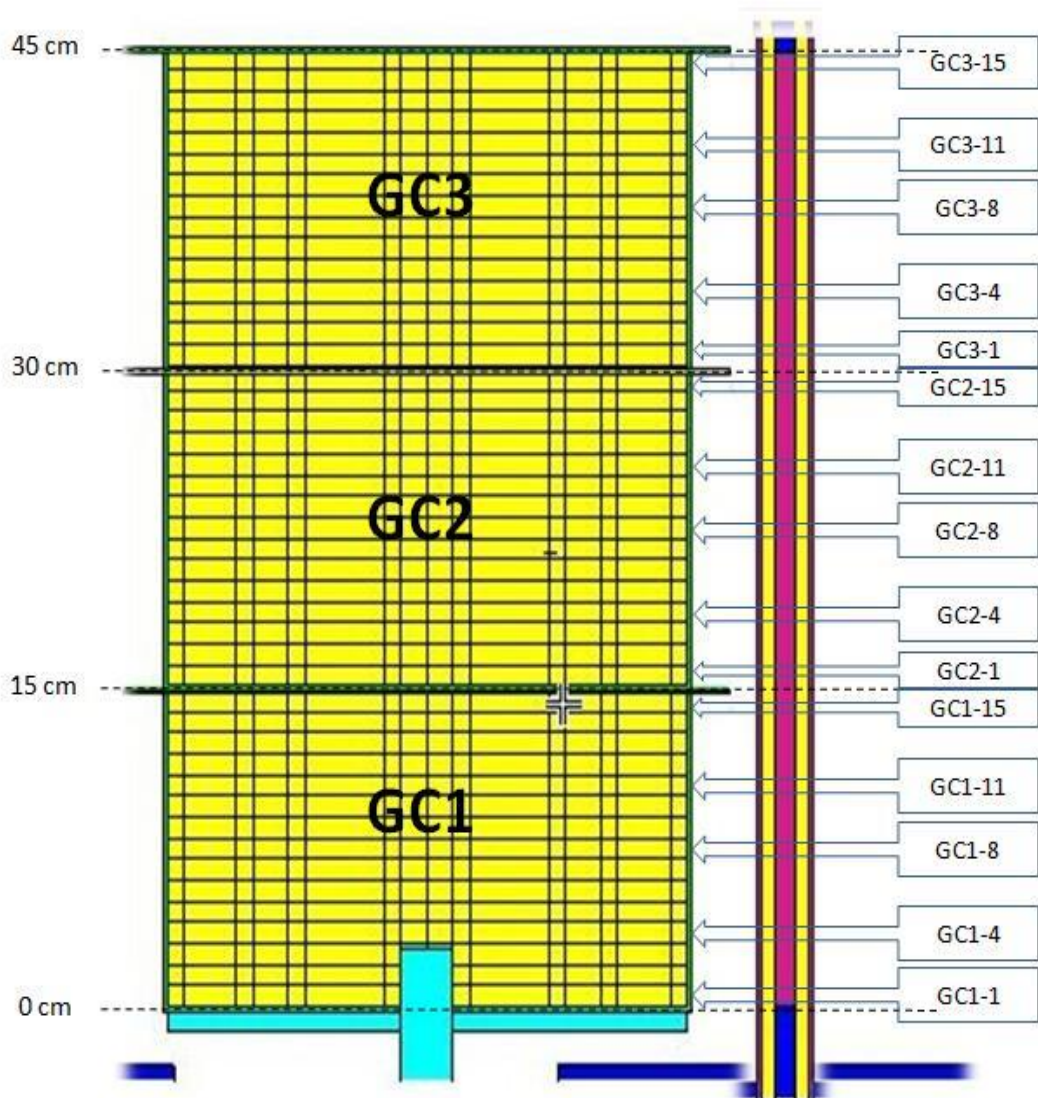
#### 4.1 ผลการสร้างแบบจำลอง

จากการเก็บข้อมูลในส่วนของ ตำแหน่ง ขนาด วัสดุ และค่ากัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสี โคบอลต์-60 ของเครื่องฉายรังสีเพื่อนำมาสร้างแบบจำลองเครื่องฉายรังสีและตำแหน่งฉายรังสี อัญมณี มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 4.1 ผลจากการสร้างแบบจำลองเครื่องฉายรังสีแกมมาด้วย MCNP 5 เป็นภาพตัดขวางในระนาบ yz ที่พิกัด (0,0,0)

จากรูปที่ 4.1 ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีจะมีลักษณะการวางภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างฉายรังสีเรียงซ้อนกัน กำหนดชื่อเรียกว่า GC1, GC2 และ GC3 จากล่างขึ้นบนตามลำดับ รวมถึงส่วนประกอบอื่น ๆ เช่น ต้นกำเนิดรังสีโคบอลต์-60 ที่เก็บต้นกำเนิดรังสี และสิ่งกำบังรังสี เป็นต้น

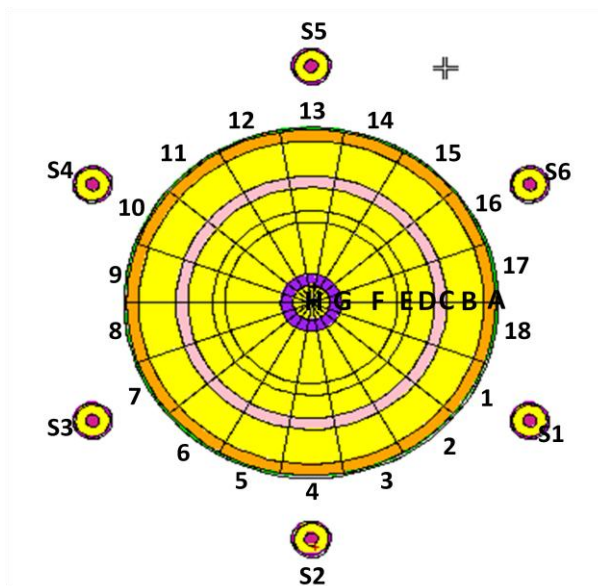


รูปที่ 4.2 ผลจากการสร้างแบบจำลองที่ตำแหน่งฉายรังสีอัลทราแมกเนติกด้วย MCNP 5 เป็นภาพตัดขวางในระนาบ yz ที่พิกัด (0,0,0)

จากการสร้างแบบจำลองเครื่องฉายรังสีแกมมาและภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างฉายรังสี (Gems container) ที่ตำแหน่งฉายรังสีอัลทราแมกเนติกด้วย MCNP 5 รูปที่ 4.2 เป็นภาพตัดขวางในระนาบ yz ที่พิกัด (0, 0, 0) จะเห็นลักษณะการวางภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างฉายรังสีเรียงซ้อนกันตลอดตามความสูงของแท่งต้นกำเนิดรังสี โดยแต่ละชั้นของภาชนะฉายรังสีจะมีความสูงประมาณ 15 เซนติเมตร ซึ่งภายในได้สร้างเซลล์เพื่อเป็นตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสี โดยเซลล์คือรูปทรงที่มีปริมาตรหรือประกอบขึ้นจากพื้นผิว ทำให้เป็นรูปทรงปิดและมีขอบเขตที่แน่นอน



และกำหนดชื่ออ้างอิงตามความสูง เช่น GC1-1 คือตำแหน่งเซลล์ที่มีความสูง 0-1 เซนติเมตร จาก  
กั้นภาชนะ GC1



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางในระนาบ xy ที่พิกัด (0, 0, 0) และสร้างเซลล์ในภาชนะฉายรังสีเพื่อใช้ในการ  
การคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีแกมมา

เมื่อดูภาพตัดขวางในระนาบ xy ดังรูปที่ 4.3 จะเห็นตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสี S1-S6  
เรียงตัวกันรอบภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างฉายรังสี ซึ่งภายในภาชนะฉายรังสีแบ่งเซลล์เป็นรูปวง  
แหวน ประกอบไปด้วยวง A, B, C, D, E, F, G และ H ตัดแบ่งตามแนวรัศมีได้ 18 เซลล์รอบ  
ภาชนะฉายรังสี และกำหนดชื่อของแต่ละเซลล์เพื่อใช้ในการอ้างอิง เช่น 1A คือตำแหน่งเซลล์ที่ตรง  
กับต้นกำเนิดรังสีแห่งที่หนึ่ง (S1) อยู่ในวง A 2A จะอยู่ต่อจาก 1A ตามเข็มนาฬิกา ส่วน 1B จะอยู่  
ถัดเข้าไปด้านใน 1A

ในงานวิจัยนี้ จะคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีภายในวง A, C และ G ซึ่งในแต่ละวงจะมี  
18 เซลล์ เช่น วง A จะมี A1-A18 ซึ่งในการคำนวณด้วย MCNP จะได้ผลการคำนวณทั้งหมด 18  
ค่า แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย เพื่อนำไปเทียบกับการวัดรังสีแบบที่หมุนตัวอย่างขณะฉายรังสี

#### 4.2 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีด้วยโปรแกรม MCNP 5

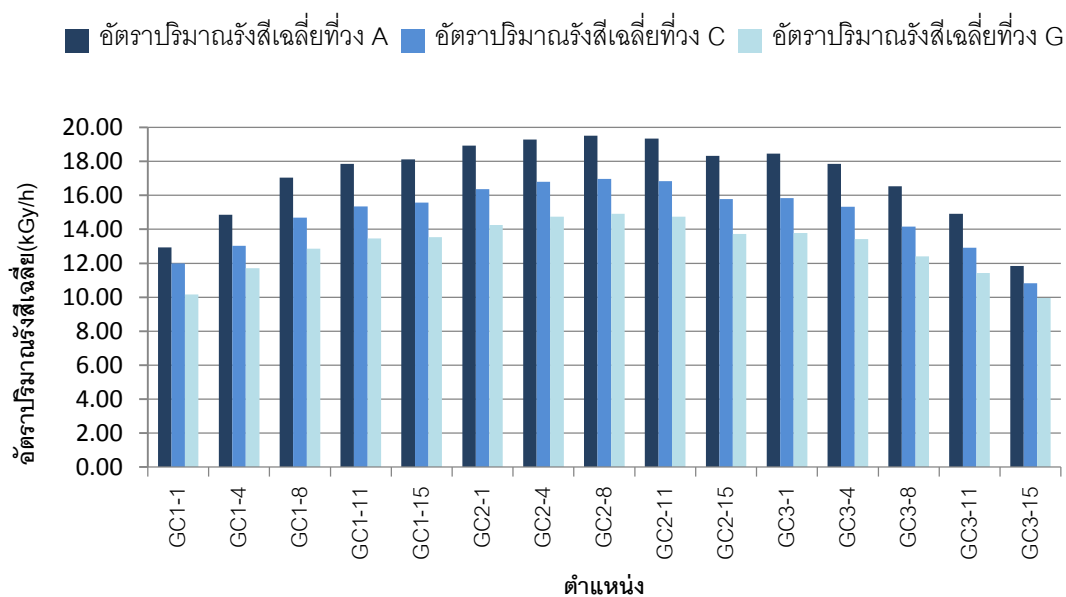
ในการคำนวณจะใช้เซลล์ในตำแหน่ง วง A, C และ G โดยกำหนดขนาดของเซลล์ให้มีความ  
กว้างและความสูงประมาณ 1 เซนติเมตร และมีรูปทรงโค้งตามภาชนะฉายรังสี ซึ่งแบ่งเซลล์

ตามแนวรัศมีโดยที่ในแต่ละวงจะมีจำนวนเซลล์ทั้งหมด 18 เซลล์ และค่ากัมมันตภาพที่ใช้ในการเขียนโค้ด MCNP 5 จะใช้ค่ากัมมันตภาพเดียวกับวันที่ทำการทดลองวัดด้วยเครื่องวัดรังสี

4.2.1 ผลการคำนวณจากโปรแกรม MCNP 5 จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนตามภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างฉายรังสี ได้แก่ GC1, GC2 และ GC3 ตามที่นิยามไว้ข้างต้น โดยการทดลองนี้ จะเป็นอัตราปริมาณรังสีเฉลี่ยใน วง A, C และ G ซึ่งได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4.1 ผลการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสี

ตำแหน่ง	ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีด้วย MCNP 5 (kGy/h)		
	ตำแหน่งวง A	ตำแหน่งวง C	ตำแหน่งวง G
GC1-1	12.94	12.00	10.17
GC1-4	14.86	13.03	11.71
GC1-8	17.05	14.69	12.85
GC1-11	17.86	15.35	13.47
GC1-15	18.12	15.58	13.53
GC2-1	18.93	16.36	14.26
GC2-4	19.29	16.80	14.74
GC2-8	19.50	16.97	14.91
GC2-11	19.34	16.83	14.74
GC2-15	18.33	15.78	13.73
GC3-1	18.46	15.83	13.79
GC3-4	17.85	15.33	13.42
GC3-8	16.53	14.15	12.40
GC3-11	14.92	12.92	11.42
GC3-15	11.84	10.82	9.95



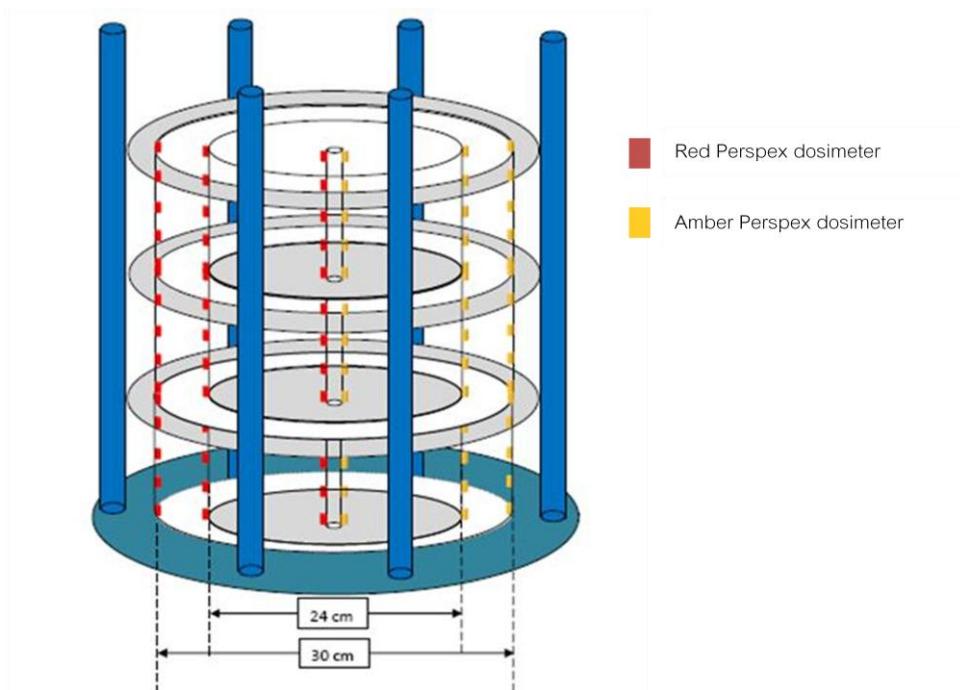
รูปที่ 4.4 ผลการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีเฉลี่ยที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วยโปรแกรม MCNP 5

จากผลการคำนวณด้วยโปรแกรม MCNP 5 ซึ่งจะคำนวณจากค่าเฉลี่ยของทุกเซลล์ทั้งหมด 18 เซลล์ในแต่ละวง พบว่าตำแหน่งวง A ซึ่งเป็นวงนอกสุดและติดกับต้นกำเนิดรังสีจะมีอัตราปริมาณรังสีสูงสุดในทุกตำแหน่งเมื่อเทียบกับวง C และ G และที่ภาชนะ GC2 จะมีอัตราปริมาณรังสีสูงกว่า GC1 และ GC3 โดยที่ตำแหน่ง GC2-8 จะมีอัตราปริมาณรังสีสูงสุด เพราะอยู่ในตำแหน่งกึ่งกลางของต้นกำเนิดรังสี และที่ตำแหน่ง GC1-1 มีอัตราปริมาณรังสีสูงกว่าที่ตำแหน่ง GC3-15 ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ปลายของต้นกำเนิดรังสีแต่ละด้าน เนื่องจากการกระเจิงของรังสีของตัวเครื่องฉายรังสี ทำให้ค่าอัตราปริมาณรังสีสูงกว่าที่ GC3-15

#### 4.3 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องวัดรังสี

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ซึ่งมีลักษณะการติดตั้งเครื่องวัดรังสีดังรูปที่ 4.5 และได้ผลการทดลอง ดังนี้





รูปที่ 4.5 ลักษณะการติดตั้งเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ภาชนะ GC

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Amber Perspex dosimeter

ตำแหน่ง	ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย Amber Perspex (kGy/h)		
	A	C	G
GC1-1	12.40	11.60	9.50
GC1-4	14.10	12.80	10.90
GC1-8	15.10	13.90	11.60
GC1-11	15.90	14.60	12.20
GC1-15	16.30	14.80	12.40
GC2-1	16.20	15.40	12.50
GC2-4	16.20	15.50	12.70
GC2-8	16.60	15.50	12.70
GC2-11	16.30	15.00	12.50
GC2-15	16.20	14.90	12.10

ตารางที่ 4.2 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Amber Perspex dosimeter (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย Amber Perspex (kGy/h)		
	A	C	G
GC3-1	14.90	14.20	11.40
GC3-4	14.40	13.50	11.00
GC3-8	13.10	12.40	10.20
GC3-11	10.90	10.30	9.10
GC3-15	9.10	8.90	8.00

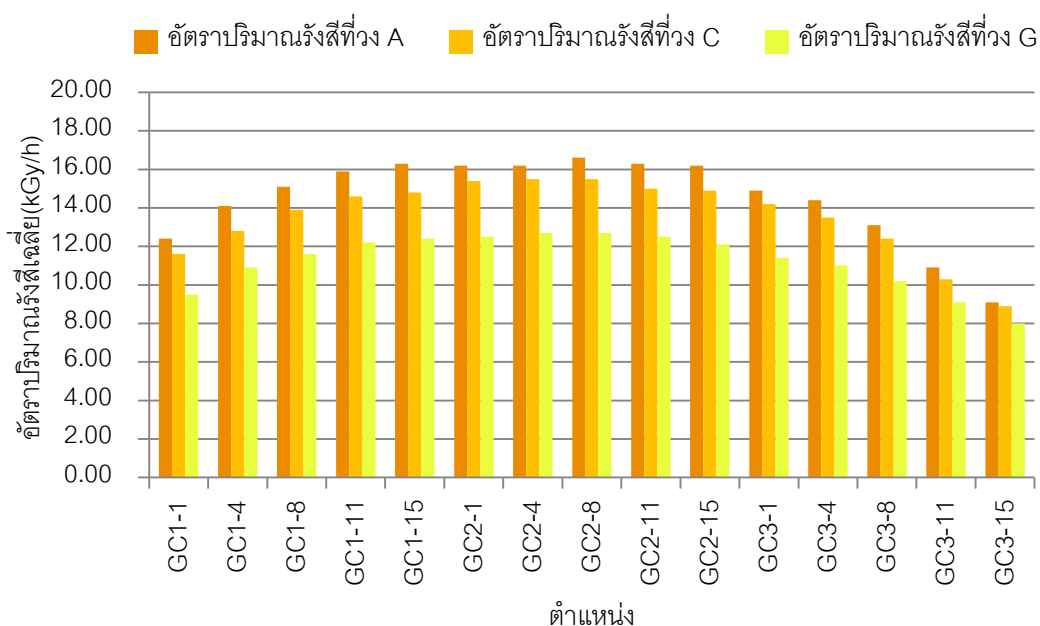
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Red Perspex dosimeter

ตำแหน่ง	ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย Red Perspex (kGy/h)		
	A	C	G
GC1-1	12.60	12.30	9.40
GC1-4	14.50	13.40	10.90
GC1-8	16.30	14.50	12.00
GC1-11	17.10	15.30	12.40
GC1-15	17.40	15.70	12.50
GC2-1	16.70	16.10	12.80
GC2-4	16.80	16.10	13.20
GC2-8	17.00	16.00	13.20
GC2-11	17.40	16.00	12.80
GC2-15	16.70	15.70	12.30
GC3-1	15.50	15.00	11.70
GC3-4	15.00	14.50	10.90
GC3-8	13.50	12.90	10.30

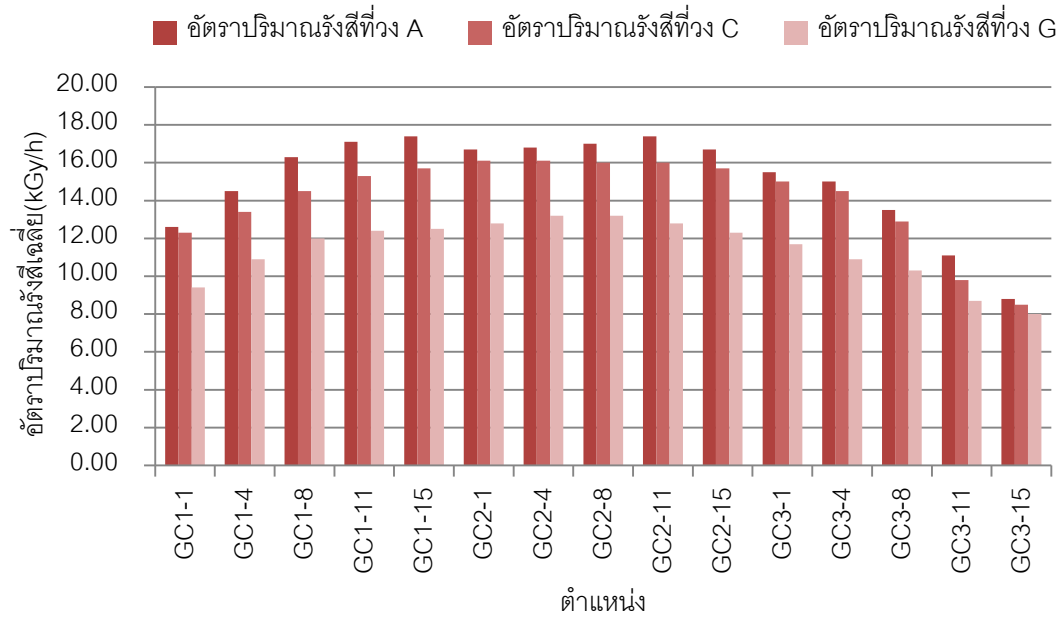
ตารางที่ 4.3 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีด้วย Red Perspex dosimeter (ต่อ)

ตำแหน่ง	ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย Amber Perspex (kGy/h)		
	A	C	G
GC3-11	11.10	9.80	8.70
GC3-15	8.80	8.50	8.00

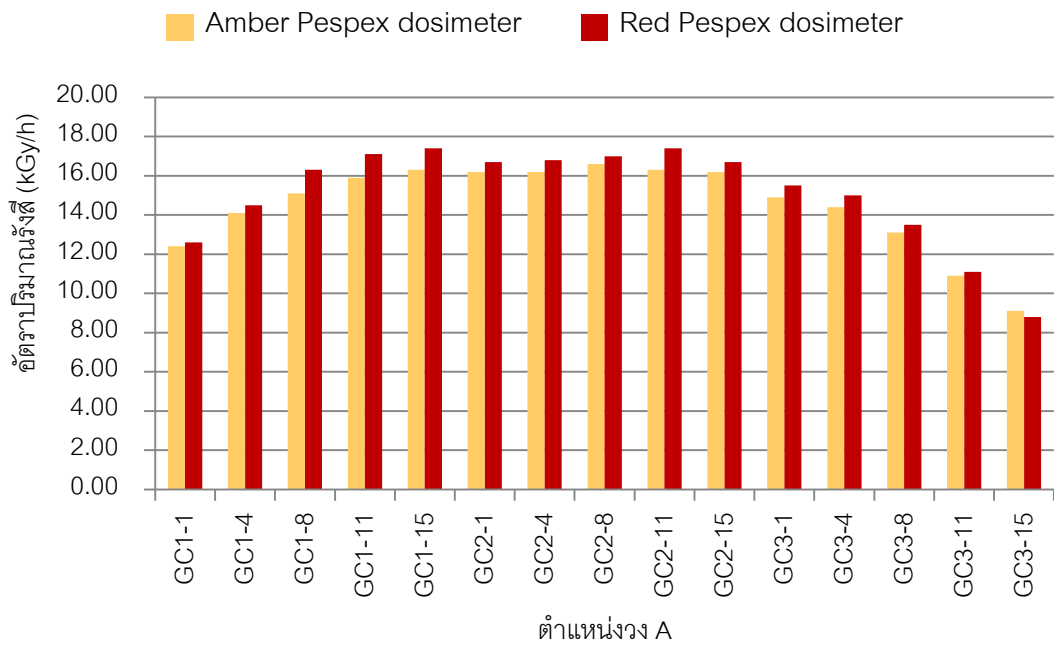
จากผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วย Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter วง A ซึ่งเป็นวงนอกสุดและติดกับต้นกำเนิดรังสีจะมีอัตราปริมาณรังสีสูงสุดในทุกตำแหน่งเมื่อเทียบกับวง C และ G และที่ภาชนะ GC2 จะมีอัตราปริมาณรังสีสูงกว่า GC1 และ GC3 เพราะอยู่ในบริเวณกึ่งกลางของต้นกำเนิดรังสี และที่ GC1 มีอัตราปริมาณรังสีสูงกว่าที่ GC3 อาจเนื่องมาจากการเคลื่อนที่ของต้นกำเนิดรังสีเคลื่อนที่จากด้านล่างทำให้ที่ GC1 ได้รับรังสีสูงกว่า รวมถึงการการกระเจิงของรังสีจากจานหมุนภาชนะฉายรังสี ซึ่งผลการวัดดังรูปที่ 4.6 และ 4.7 และเมื่อเปรียบอัตราปริมาณรังสีที่วัดจาก Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter ที่ตำแหน่งเดียวกัน พบค่าอัตราปริมาณรังสีที่วัดด้วย Red Perspex dosimeter ส่วนใหญ่จะวัดอัตราปริมาณรังสีได้สูงกว่า Amber Perspex dosimeter ดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10



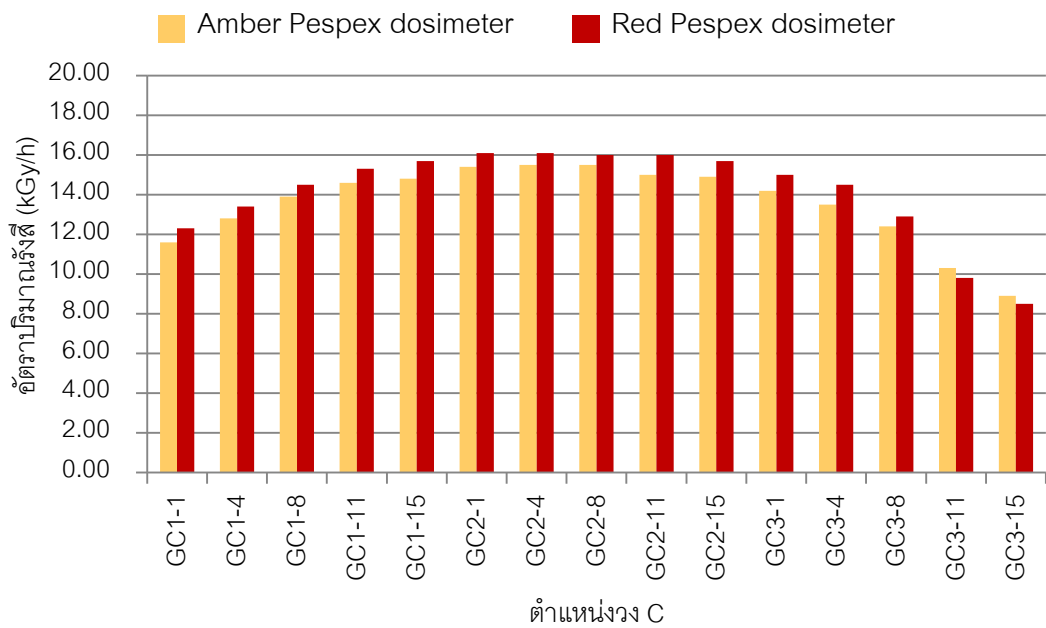
รูปที่ 4.6 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Amber Perspex dosimeter



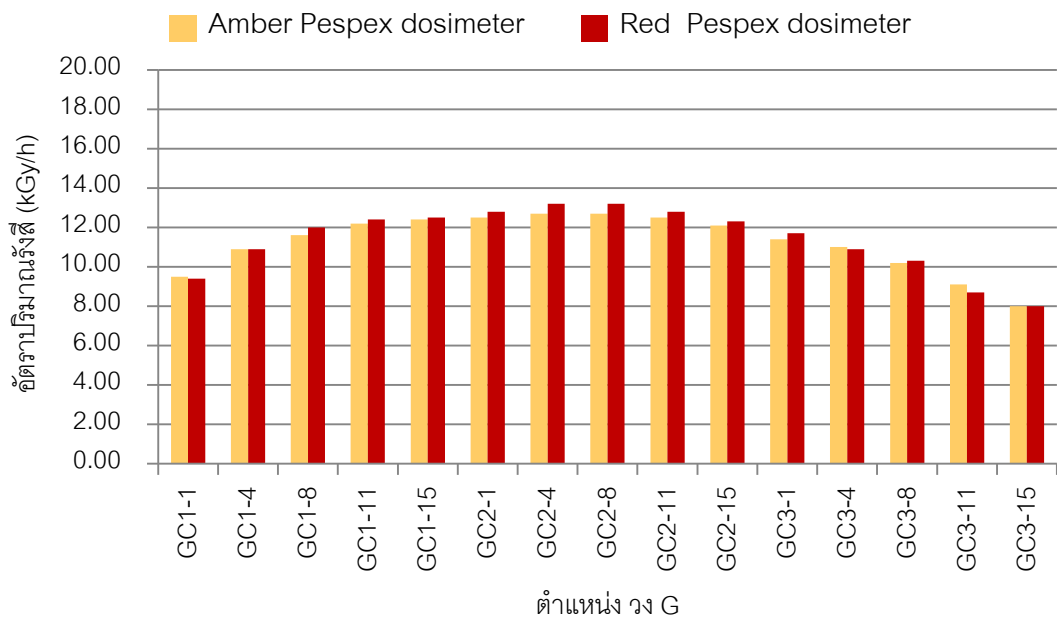
รูปที่ 4.7 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีด้วย Red Perspex dosimeter



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วย Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter ที่ตำแหน่งวง A



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วย Amber Pespex dosimeter และ Red Pespex dosimeter ที่ตำแหน่งวง C



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการวัดด้วย Amber Pespex dosimeter และ Red Pespex dosimeter ที่ตำแหน่งวง G

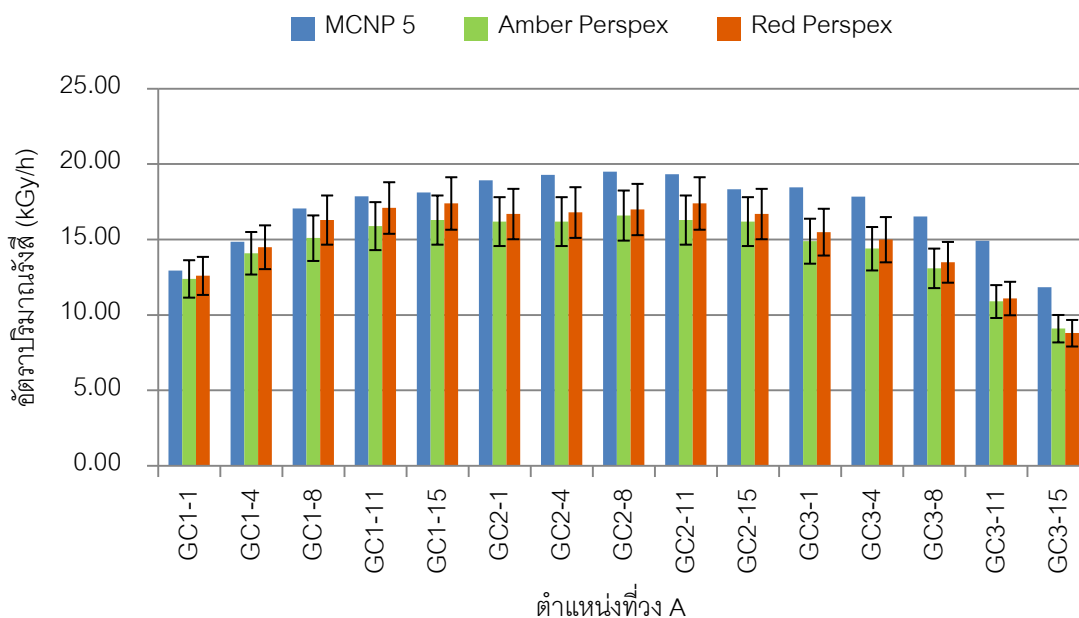
#### 4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณกับผลที่ได้จากการวัดอัตราปริมาณรังสี

ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง A

ตำแหน่ง	ค่าอัตราปริมาณรังสีที่วง A				
	MCNP 5 (kGy/h)	Amber Perspex dosimeter		Red Perspex dosimeter	
		อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน	อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน
GC1-1	12.94	12.40	4.35	12.60	2.70
GC1-4	14.86	14.10	5.39	14.50	2.48
GC1-8	17.05	15.10	12.91	16.30	4.60
GC1-11	17.86	15.90	12.33	17.10	4.44
GC1-15	18.12	16.30	11.17	17.40	4.14
GC2-1	18.93	16.20	16.85	16.70	13.35
GC2-4	19.29	16.20	19.07	16.80	14.82
GC2-8	19.50	16.60	17.47	17.00	14.71
GC2-11	19.34	16.30	18.65	17.40	11.15
GC2-15	18.33	16.20	13.15	16.70	9.76
GC3-1	18.46	14.90	23.89	15.50	19.10
GC3-4	17.85	14.40	23.96	15.00	19.00
GC3-8	16.53	13.10	26.18	13.50	22.44
GC3-11	14.92	10.90	36.88	11.10	34.41
GC3-15	11.84	9.10	30.11	8.80	34.55

จากการวัดอัตราปริมาณรังสีแกมมาด้วย Amber Perspex dosimeter, Red Perspex dosimeter พบว่าอัตราปริมาณรังสีสูงที่สุดที่ตำแหน่งวง A และมีค่าสูงที่สุดที่ตำแหน่ง A-8 ที่ GC2 ซึ่งมีแนวโน้มตรงกับผลการคำนวณจาก MCNP 5 และเมื่อเปรียบเทียบผลกับการคำนวณด้วย

MCNP 5 กับค่าที่วัดได้โดยใช้เครื่องวัดรังสีดังกล่าว พบว่าค่าที่คำนวณส่วนใหญ่จะมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 20\%$  ดังตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง A

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง C

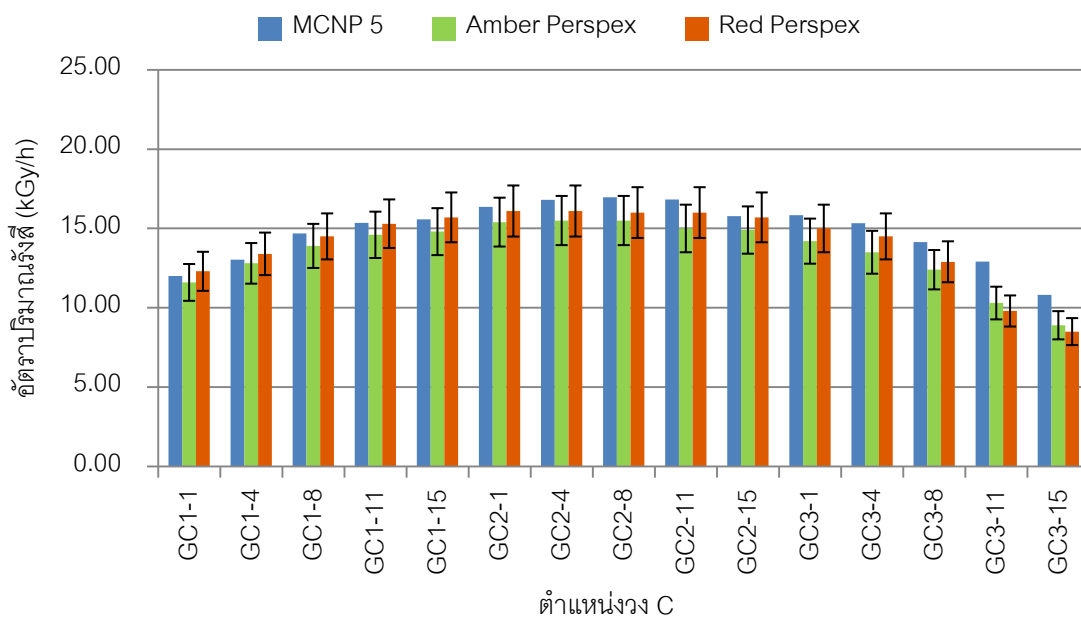
ตำแหน่ง	ค่าอัตราปริมาณรังสีที่วง C				
	MCNP 5 (kGy/h)	Amber Perspex dosimeter		Red Perspex dosimeter	
		อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน	อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน
GC1-1	12.00	11.60	3.45	12.30	-2.44
GC1-4	13.03	12.80	1.80	13.40	-2.76
GC1-8	14.69	13.90	5.68	14.50	1.31
GC1-11	15.35	14.60	5.14	15.30	0.33

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง C (ต่อ)

ตำแหน่ง	ค่าอัตราปริมาณรังสีที่วง C				
	MCNP 5 (kGy/h)	Amber Perspex dosimeter		Red Perspex dosimeter	
		อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน	อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน
GC1-15	15.58	14.80	5.27	15.70	-0.76
GC2-1	16.36	15.40	6.23	16.10	1.61
GC2-4	16.80	15.50	8.39	16.10	4.35
GC2-8	16.97	15.50	9.48	16.00	6.06
GC2-11	16.83	15.00	12.20	16.00	5.19
GC2-15	15.78	14.90	5.91	15.70	0.51
GC3-1	15.83	14.20	11.48	15.00	5.53
GC3-4	15.33	13.50	13.56	14.50	5.72
GC3-8	14.15	12.40	14.11	12.90	9.69
GC3-11	12.92	10.30	25.44	9.80	31.84
GC3-15	10.82	8.90	21.57	8.50	27.29

จากการวัดอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่ตำแหน่งวง C ด้วย Amber Perspex dosimeter, Red Perspex dosimeter เปรียบเทียบกับผลการคำนวณจาก MCNP 5 พบว่าค่าอัตราปริมาณรังสีมีค่าใกล้เคียงกัน ส่วนใหม่มีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 10\%$  ดังตารางที่ 4.5 และพบว่าที่ตำแหน่ง C-11 และ C-15 มีค่าคลาดเคลื่อนสูงที่ 31.84% และ 27.29% ตามลำดับ





รูปที่ 4.12 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง C

ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง G

ตำแหน่ง	ค่าอัตราปริมาณรังสีที่วง G				
	MCNP 5 (kGy/h)	Amber Perspex dosimeter		Red Perspex dosimeter	
		อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน	อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน
GC1-1	10.17	9.50	7.05	9.40	8.19
GC1-4	11.71	10.90	7.43	10.90	7.43
GC1-8	12.85	11.60	10.78	12.00	7.08
GC1-11	13.47	12.20	10.41	12.40	8.63
GC1-15	13.53	12.40	9.11	12.50	8.24

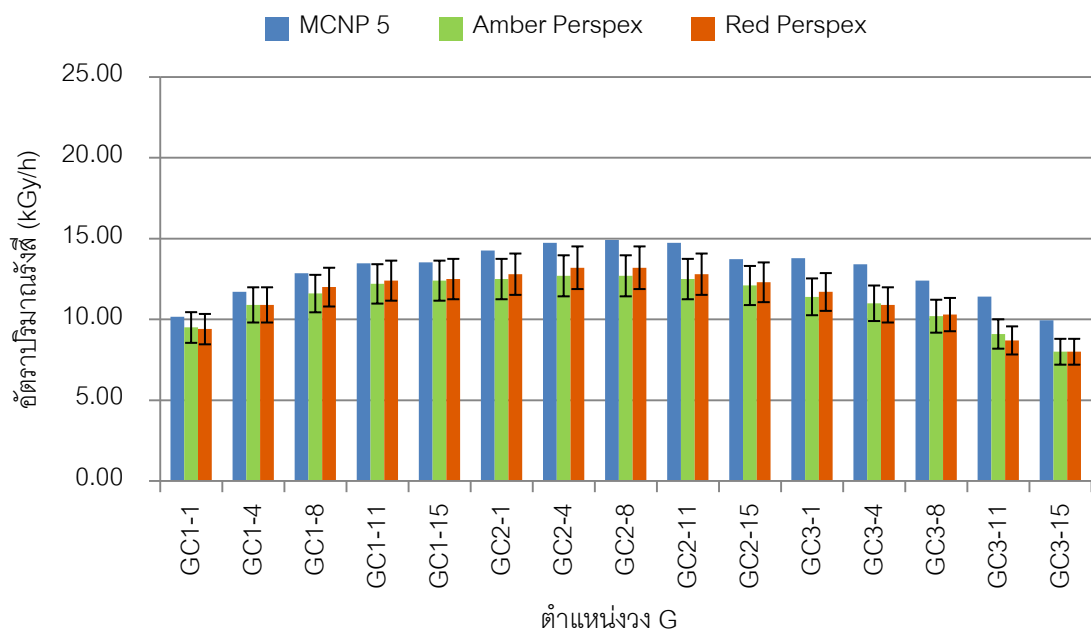
ตารางที่ 4.6 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง G (ต่อ)

ตำแหน่ง	ค่าอัตราปริมาณรังสีที่วง G				
	MCNP 5 (kGy/h)	Amber Perspex dosimeter		Red Perspex dosimeter	
		อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน	อัตราปริมาณรังสี (kGy/h)	% ค่า ความคลาด เคลื่อน
GC2-1	14.26	12.50	14.08	12.80	11.41
GC2-4	14.74	12.70	16.06	13.20	11.67
GC2-8	14.91	12.70	17.40	13.20	12.95
GC2-11	14.74	12.50	17.92	12.80	15.16
GC2-15	13.73	12.10	13.47	12.30	11.63
GC3-1	13.79	11.40	20.96	11.70	17.86
GC3-4	13.42	11.00	22.00	10.90	23.12
GC3-8	12.40	10.20	21.57	10.30	20.39
GC3-11	11.42	9.10	25.49	8.70	31.26
GC3-15	9.95	8.00	24.38	8.00	24.38

จากการวัดอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่ตำแหน่งวง G ด้วย Amber Perspex dosimeter, Red Perspex dosimeter พบว่าอัตราปริมาณรังสีน้อยที่สุด และมีค่าน้อยที่สุดที่ตำแหน่ง G-15 ที่ GC3 ซึ่งเป็นตำแหน่งปลายด้านบนของต้นกำเนิดรังสี มีแนวโน้มตรงกับผลการคำนวณจาก MCNP 5 และพบว่าค่าที่คำนวณส่วนใหญ่จะมีค่าคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 20\%$  ดังตารางที่ 4.6 ยกเว้นที่ตำแหน่ง GC3 ที่พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนเกิน  $\pm 20\%$  และค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่  $-31.26\%$  ที่ตำแหน่ง G-11 ที่ GC3 เมื่อเทียบกับ Red Perspex dosimeter

จากผลการทดลองทั้ง 3 ตารางพบว่า เมื่อเปรียบเทียบผลการวัดระหว่าง Amber Perspex dosimeter และ Red Perspex dosimeter การวัดที่ตำแหน่งอัตราปริมาณรังสีสูง Red Perspex dosimeter จะได้ค่าวัดสูงกว่า Amber Perspex dosimeter แต่ในตำแหน่งที่อัตราปริมาณรังสีต่ำ

กว่า 15 kGy ค่าวัดปริมาณรังสีที่ได้จะมีค่าใกล้เคียงกัน และ Amber Perspex dosimeter จะมีค่าใกล้เคียงกับการคำนวณด้วย MCNP 5 มากกว่า Red Perspex dosimeter ในตำแหน่งที่มีอัตราปริมาณรังสีต่ำกว่า 10 kGy/h แต่ที่อัตราปริมาณรังสีสูง Red Perspex dosimeter จะมีค่าอัตราปริมาณรังสีใกล้เคียงกับการคำนวณด้วย MCNP 5 มากกว่า



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบอัตราปริมาณรังสีจากการคำนวณด้วย MCNP 5 และเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex ที่ตำแหน่งวง G

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการสร้างแบบจำลองและคำนวณอัตราปริมาณรังสีด้วย F4 Tally ซึ่งเป็นตัวประมาณค่าฟลักซ์เฉลี่ยในเซลล์ของการคำนวณมอนติคาร์โล เปรียบเทียบกับระบบวัดปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสีแกมมาไอโซโทปรังสีโคบอลต์-60 ของศูนย์ฉายรังสีอัญมณี สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ซึ่งเป็นระบบวัดปริมาณรังสีที่ใช้เครื่องวัดรังสีในกลุ่มที่ใช้ในงานประจำ โดยแบ่งผลการวิจัยออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

5.1.1 จากผลการวิจัยข้อ 4.1 การสร้างแบบจำลองเครื่องฉายรังสีแกมมาและภาชนะฉายรังสีที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณี เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสีและการกระจายตัวของปริมาณรังสีในภาชนะฉายรังสีนั้น ใช้ข้อมูลจากผู้ผลิตและการเก็บข้อมูลโดยการวัดจริง เพื่อให้แบบจำลองที่ได้มีความใกล้เคียงกับเครื่องฉายรังสีมากที่สุด และในการกำหนดเซลล์เพื่อใช้ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสี จะกำหนดลักษณะเซลล์ ตามลักษณะรูปทรงของภาชนะฉายรังสีโดยแบ่งเซลล์ตามแนวรัศมี และมีขนาดความกว้างใกล้เคียงกับเครื่องวัดรังสีเพื่อให้เซลล์ที่กำหนดขึ้นเป็นตัวแทนของปริมาณรังสี ณ ตำแหน่งนั้น ๆ

5.1.2 จากผลการวิจัยข้อ 4.2 ผลการคำนวณอัตราปริมาณรังสีด้วยโปรแกรม MCNP 5 พบว่าอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งวง A มีอัตราปริมาณรังสีสูงที่สุด เนื่องจากอยู่ใกล้กับต้นกำเนิดรังสี รองลงมาเป็นตำแหน่งวง C และ G ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้เป็นไปตามที่คาดคะเนไว้ และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งวง A, C และ G ตามความสูงของต้นกำเนิดรังสี จะพบว่าการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีจะสมมาตรกัน ยกเว้นที่ตำแหน่ง GC1-1 (ตำแหน่งกั้นภาชนะ GC1 ติดกับที่เก็บต้นกำเนิดรังสี) จะมีค่าสูงกว่าค่าที่ตำแหน่ง

GC3-15 (ตำแหน่งบนสุดของภาชนะ GC3) ซึ่งเป็นผลมาจากที่ตำแหน่งด้านล่างนั้น จะเกิดการกระเจิงของรังสีจากฐานหมุนตัวอย่าง ทำให้ค่าความค่าอัตราปริมาณรังสีได้สูงกว่า

5.1.3 จากผลการวิจัยข้อ 4.3 ผลการวัดอัตราปริมาณรังสีด้วยเครื่องวัดรังสี Amber Perspex และ Red Perspex นั้น พบว่าค่าอัตราปริมาณรังสีที่ตำแหน่งวง A มีอัตราปริมาณรังสีสูงสุด รองลงมาเป็นตำแหน่งวง C และ G ตามลำดับ ค่าอัตราปริมาณรังสีที่วัดได้จาก Amber Perspex dosimeter จะมีค่าน้อยกว่า Red Perspex dosimeter และเมื่อพิจารณาการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีพบว่าที่ภาชนะ GC1 ซึ่งอยู่ติดกับที่เก็บต้นกำเนิดรังสีจะมีค่าอัตราปริมาณรังสีสูงกว่าที่ภาชนะ GC3

5.1.4 จากผลการวิจัย 4.4 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการคำนวณด้วย MCNP 5 กับผลที่ได้จากการวัดด้วย Amber Perspex Dosimeter, Red Perspex Dosimeter มีแนวโน้มการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีไปในทิศทางเดียวกัน และผลการคำนวณค่าอัตราปริมาณรังสีด้วย MCNP 5 ที่ภาชนะ GC1 และ GC2 ส่วนใหญ่จะมีค่าอยู่ในช่วงความคลาดเคลื่อนไม่เกิน  $\pm 15\%$  ของระบบวัดปริมาณรังสีของเครื่องฉายรังสี และพบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงที่ภาชนะ GC3 โดยเฉพาะตำแหน่ง GC3-11 และ GC3-15 ที่ตำแหน่งวง A, C และ G มีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 30 %

## 5.2 อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ จะใช้ค่าข้อมูลของเครื่องฉายรังสีจากแบบแปลนเครื่องฉายรังสีของผู้ผลิต ร่วมกับการวัดจริงมาใช้ในการสร้างแบบจำลอง และสร้างแบบจำลองให้มีความซับซ้อนน้อย เพื่อให้ใช้เวลาในการคำนวณสั้น แต่ยังคงได้ค่าอัตราปริมาณรังสีใกล้เคียงค่าที่ถูกต้อง อย่างไรก็ตาม ผลที่ได้ อาจมีความคลาดเคลื่อนอันเนื่องมาจากความไม่ครบถ้วนของการระบุข้อมูล เงื่อนไข รายละเอียดการสร้างแบบจำลอง หรืออาจเกิดจากลักษณะการทำงานของเครื่องฉายรังสีแกมมาเอง ที่มีการทำงานโดยใช้ระบบนิวแมติกในการขับเคลื่อนต้นกำเนิดรังสีขึ้นมาในบริเวณห้องฉายรังสีนั้น จะมีระยะเวลาในการขึ้นลงของต้นกำเนิดรังสีแต่ละแห่งแตกต่างกันเล็กน้อย รวมถึงตำแหน่งความสูงของต้นกำเนิดรังสีขณะฉายรังสีจริง และความสม่ำเสมอของค่ากัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสี ซึ่งไม่มีข้อมูลที่ชัดเจน และอาจเป็นสาเหตุทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น

จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าวิธีการคำนวณอัตราปริมาณรังสีด้วย MCNP 5 สามารถนำมาใช้ประเมินค่าอัตราปริมาณรังสีแกมมาที่ตำแหน่งฉายรังสีอัญมณีได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 5.3 ข้อเสนอแนะ

1) การเปรียบเทียบค่าอัตราปริมาณรังสีในปริมาตรขนาดเล็กนั้น มีโอกาสเกิดความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัดรังสีในภาชนะฉายรังสีได้ อาจปรับเปลี่ยนวิธีการคำนวณโดยให้คำนวณหาอัตราปริมาณรังสีในบริเวณที่สนใจหลาย ๆ ตำแหน่ง แล้วหาแนวโน้มการกระจายตัวของอัตราปริมาณรังสีเป็นภาพใหญ่แทน

2) ความถูกต้องของเครื่องวัดรังสีที่ใช้ในการวิจัยนี้ จะมีความถูกต้องน้อยกว่าเครื่องวัดรังสีในกลุ่มที่อยู่ในระดับชั้นที่สูงกว่า หากต้องการให้ผลการวัดมีความถูกต้องมากขึ้น สามารถปรับเปลี่ยนไปใช้เครื่องวัดรังสีในระดับชั้นที่สูงกว่า เช่น อะลานีน ซึ่งอยู่ในระดับชั้นเครื่องวัดรังสีมาตรฐานอ้างอิงและเครื่องวัดรังสีมาตรฐานเคลื่อนย้าย ซึ่งมีค่าความไม่แน่นอนอยู่ที่ 2-3 % จะให้ผลการวัดที่ถูกต้องมากขึ้น อย่างไรก็ตามเพื่อให้ได้ความถูกต้องแม่นยำในการวัดปริมาณรังสีนั้น ยังขึ้นกับการสอบเทียบและการควบคุมสภาวะแวดล้อมขณะฉายรังสีด้วย

3) การคำนวณด้วย MCNP 5 เพื่อให้ได้ผลการคำนวณที่มีความถูกต้องนั้น จะต้องระบุข้อมูลที่จำเป็นในการออกแบบระบบให้ตรงกับความเป็นจริงมากที่สุด เช่น วัสดุที่ใช้ทำเครื่องฉายรังสี อุปกรณ์การฉายรังสี ตำแหน่ง ขนาด การจัดวาง รายละเอียดของต้นกำเนิดรังสี รวมถึงลักษณะการทำงานของเครื่องฉายรังสีด้วย

4) แบบจำลองที่สร้างขึ้นนั้น สามารถนำไปประยุกต์ประโยชน์ต่าง ๆ ได้ ดังนี้

- ใช้ในการหาอัตราปริมาณรังสีภายในห้องฉายรังสีที่ตำแหน่งอื่น ๆ ได้
- ใช้ในการประเมินหาอัตราปริมาณรังสีที่ตัวอย่างได้รับ ในกรณีที่มีตัวอย่างฉายรังสีได้
- ใช้ในการประเมินความปลอดภัยของห้องฉายรังสี ในกรณีที่ต้องการเพิ่มค่า

กัมมันตภาพของต้นกำเนิดรังสีได้

## รายการอ้างอิง

- [1] ฝนแก้ว เทพสุต. การประเมินอัตราปริมาณรังสีเอกซ์รอบระบบตรวจสอบตู้บรรจุสินค้าแบบเคลื่อนย้ายได้ของกรมศุลกากร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [2] ธัญชัย พิรุณพันธ์. การพัฒนาแบบจำลองสำหรับการคำนวณประสิทธิภาพการวัดรังสีแกมมาด้วย MCNP-4A. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [3] X-5 Monte Carlo Team. MCNP-A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5 Volume I: Overview and Theory. USA : Los Alamos Nation Laboratory, 2003. (revised 2008)
- [4] Google. อันตรายของรังสีแกมมากับสสาร [Online]. Available from : <http://www.oaep.go.th/images/news/20110114110634.pdf> [2012, July 10]
- [5] International Atomic Energy Agency. Vienna : Dosimetry for Food Irradiation. Technical Reports Series no. 409, 2002.
- [6] Harwell Dosimeters. Harwell Amber 3042 Dosimeters [Online]. 2011. Available from : <http://www.harwell-dosimeters.co.uk/harwell-amber-3042>, [2013, January 15]
- [7] Harwell Dosimeters. Harwell Red 4034 Dosimeters [Online]. 2011. Available from : <http://www.harwell-dosimeters.co.uk/harwell-red-4034>, [2013, January 15]
- [8] C. Oliveira, J. Salgada, M. Luisa Botelho and L.M. Ferrira. Monte Carlo studies for irradiation process planning at the Portuguese gamma irradiation facility. Applied Radiation and Isotope 53 (2000) : 867-875.
- [9] Douglas E. Weiss and Ronald J. Stangeland. Dose prediction and process optimization in a gamma sterilization facility using 3-D Monte Carlo code. Radiation Physics and Chemistry 68 (2003) : 947–958.
- [10] M. Bailey, J.P. Sephton and P.H.G. Sharpe. Monte Carlo modeling and real-time dosimeter measurements of dose rate distribution at a  $^{60}\text{Co}$  industrial irradiation plant. Radiation Physics and Chemistry 78 (2009) : 453–456.

ภาคผนวก



## ภาคผนวก

ตัวอย่างคำสั่งโค้ดคอมพิวเตอร์ในการคำนวณหาอัตราปริมาณรังสี

Problem #Co-60 irradiator GC1

C Cell cards

C ell# Mat# Dens Surface combinations

C .....Sources.....

1	1	-8.9	-1	imp:p=1	\$Source1
2	1	-8.9	-2	imp:p=1	\$Source2
3	1	-8.9	-3	imp:p=1	\$Source3
4	1	-8.9	-4	imp:p=1	\$Source4
5	1	-8.9	-5	imp:p=1	\$Source5
6	1	-8.9	-6	imp:p=1	\$Source6
7	6	-7.80	21 -20	imp:p=1	\$Source tube 1
8	3	-0.0012	1 8 14 -21	imp:p=1	\$Air Source tube 1
9	6	-7.80	23 -22	imp:p=1	\$Source tube 2
10	3	-0.0012	2 9 15 -23	imp:p=1	\$Air Source tube 2
11	6	-7.80	25 -24	imp:p=1	\$Source tube 3
12	3	-0.0012	3 10 16 -25	imp:p=1	\$Air Source tube 3
13	6	-7.80	27 -26	imp:p=1	\$Source tube 4
14	3	-0.0012	4 11 17 -27	imp:p=1	\$Air Source tube 4
15	6	-7.80	29 -28	imp:p=1	\$Source tube 5
16	3	-0.0012	5 12 18 -29	imp:p=1	\$Air Source tube 5
17	6	-7.80	-30 31	imp:p=1	\$Source tube 6
18	3	-0.0012	6 13 19 -31	imp:p=1	\$Air Source tube 6
19	5	-7.87	-32 165	imp:p=1	\$center
20	5	-7.87	-33 32 165	imp:p=1	\$center turntable
21	0		1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 12 13 14 15 16 & 17 18 19 20 22 24 26 28 30 32 33 34 35 36 37 &		

				38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 &	
				53 54 56 57 59 60 62 -7	imp:p=1
22	0	7			imp:p=0
C .....Shielding.....					
23	2	-11.34	-8	imp:p=1 \$Shield(plug) bottom Pb 1	
24	2	-11.34	-9	imp:p=1 \$Shield(plug) bottom Pb 2	
25	2	-11.34	-10	imp:p=1 \$Shield(plug) bottom Pb 3	
26	2	-11.34	-11	imp:p=1 \$Shield(plug) bottom Pb 4	
27	2	-11.34	-12	imp:p=1 \$Shield(plug) bottom Pb 5	
28	2	-11.34	-13	imp:p=1 \$Shield(plug) bottom Pb 6	
C .....Shielding.....					
29	2	-11.34	-14	imp:p=1 \$Shield(plug) top Pb 1	
30	2	-11.34	-15	imp:p=1 \$Shield(plug) top Pb 2	
31	2	-11.34	-16	imp:p=1 \$Shield(plug) top Pb 3	
32	2	-11.34	-17	imp:p=1 \$Shield(plug) top Pb 4	
33	2	-11.34	-18	imp:p=1 \$Shield(plug) top Pb 5	
34	2	-11.34	-19	imp:p=1 \$Shield(plug) top Pb 6	
35	2	-11.34	-34	1 2 3 4 5 6 8 9 10 11 12 13 14 20 21 22 23 &	
			24 25 26 27 28 29 30 31 32	imp:p=1 \$shield	
36	2	-11.34	-35		imp:p=1 \$shield
37	2	-11.34	-36 37		imp:p=1 \$shield
38	2	-11.34	-37	36 35 50 51 52 53	imp:p=1 \$Floor
39	2	-11.34	-38	36 8 20 21	imp:p=1 \$Shield Source tube1-1
40	2	-11.34	-39	36 8 20 21	imp:p=1 \$Shield Source tube1-2
41	2	-11.34	-40	37 9 22 23	imp:p=1 \$Shield Source tube2-1
42	2	-11.34	-41	37 9 22 23	imp:p=1 \$Shield Source tube2-2
43	2	-11.34	-42	38 10 24 25	imp:p=1 \$Shield Source tube3-1
44	2	-11.34	-43	38 10 24 25	imp:p=1 \$Shield Source tube3-2
45	2	-11.34	-44	39 11 26 27	imp:p=1 \$Shield Source tube4-1

46 2 -11.34 -45 39 11 26 27 imp;p=1 \$Shield Source tube4-2  
 47 2 -11.34 -46 40 12 28 29 imp;p=1 \$Shield Source tube5-1  
 48 2 -11.34 -47 40 12 28 29 imp;p=1 \$Shield Source tube5-2  
 49 2 -11.34 -48 41 13 30 31 imp;p=1 \$Shield Source tube6-1  
 50 2 -11.34 -49 41 13 30 31 imp;p=1 \$Shield Source tube6-2

C .....Floor.....

51 5 -7.87 -50 imp;p=1 \$Floor1  
 52 5 -7.87 -51 imp;p=1 \$Floor2  
 53 5 -7.87 -52 imp;p=1 \$Floor3  
 54 5 -7.87 -53 imp;p=1 \$Floor4

C .....Gems container.....

55 4 -2.7 -54 32 55 imp;p=1 \$GC 1  
 57 4 -2.7 -56 imp;p=1 \$Lid GC 1  
 58 4 -2.7 -57 58 imp;p=1 \$GC 2  
 60 4 -2.7 -59 imp;p=1 \$Lid GC 2  
 61 4 -2.7 -60 61 imp;p=1 \$GC 3  
 63 4 -2.7 -62 imp;p=1 \$Lid GC 3

C .....

65 3 -0.0012 -165 imp;p=1 \$center(rod) of GC-1  
 66 3 -0.0012 -166 imp;p=1 \$center(rod) of GC-2  
 67 3 -0.0012 -167 imp;p=1 \$center(rod) of GC-3

C ..... position in Gems Container.....

C GC1

C Layer1

1140 3 -0.0012 63 -55 -105 158 -160 Vol= 5.0615 imp;p=1  
 1141 3 -0.0012 63 -55 -105 160 -162 Vol= 5.0615 imp;p=1  
 1142 3 -0.0012 63 -55 -105 162 -164 Vol= 5.0615 imp;p=1  
 1143 3 -0.0012 63 -55 -105 164 148 Vol= 5.0615 imp;p=1  
 1144 3 -0.0012 63 -55 -105 -148 150 Vol= 5.0615 imp;p=1

1145 3 -0.0012 63 -55 -105 -150 152 Vol= 5.0615 imp;p=1

...

..

.

C GC2

C Layer1

1300 3 -0.0012 77 -58 -119 158 -160 Vol= 5.0615 imp;p=1

1301 3 -0.0012 77 -58 -119 160 -162 Vol= 5.0615 imp;p=1

1302 3 -0.0012 77 -58 -119 162 -164 Vol= 5.0615 imp;p=1

1303 3 -0.0012 77 -58 -119 164 148 Vol= 5.0615 imp;p=1

1304 3 -0.0012 77 -58 -119 -148 150 Vol= 5.0615 imp;p=1

1305 3 -0.0012 77 -58 -119 -150 152 Vol= 5.0615 imp;p=1

...

..

.

C GC3

C Layer1

1460 3 -0.0012 91 -61 -133 158 -160 Vol= 5.0615 imp;p=1

1461 3 -0.0012 91 -61 -133 160 -162 Vol= 5.0615 imp;p=1

1462 3 -0.0012 91 -61 -133 162 -164 Vol= 5.0615 imp;p=1

1463 3 -0.0012 91 -61 -133 164 148 Vol= 5.0615 imp;p=1

1464 3 -0.0012 91 -61 -133 -148 150 Vol= 5.0615 imp;p=1

1465 3 -0.0012 91 -61 -133 -150 152 Vol= 5.0615 imp;p=1

...

..

.

C Surface cards

1 RCC 17.75 -10.25 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source1

2 RCC 0 -20.5 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source2

3 RCC -17.75 -10.25 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source3  
 4 RCC -17.75 10.25 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source4  
 5 RCC 0 20.5 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source5  
 6 RCC 17.75 10.25 -22.58 0 0 45.16 0.555 \$Source6  
 7 SPH 0 0 0 700  
 8 RCC 17.75 -10.25 -37.08 0 0 14.5 0.6 \$bottom Pb 1  
 9 RCC 0 -20.5 -37.08 0 0 14.5 0.6 \$bottom Pb 2  
 10 RCC -17.75 -10.25 -37.08 0 0 14.5 0.6 \$bottom Pb 3  
 11 RCC -17.75 10.25 -37.08 0 0 14.5 0.6 \$bottom Pb 4  
 12 RCC 0 20.5 -37.08 0 0 14.5 0.6 \$bottom Pb 5  
 13 RCC 17.75 10.25 -37.08 0 0 14.5 0.6 \$bottom Pb 6  
 14 RCC 17.75 -10.25 22.58 0 0 29 0.6 \$top Pb 1  
 15 RCC 0 -20.5 22.58 0 0 29 0.6 \$top Pb 2  
 16 RCC -17.75 -10.25 22.58 0 0 29 0.6 \$top Pb 3  
 17 RCC -17.75 10.25 22.58 0 0 29 0.6 \$top Pb 4  
 18 RCC 0 20.5 22.58 0 0 29 0.6 \$top Pb 5  
 19 RCC 17.75 10.25 22.58 0 0 29 0.6 \$top Pb 6  
 20 RCC 17.75 -10.25 -37.283 0 0 89.066 1.5875 \$Source tube (outer) 1  
 21 RCC 17.75 -10.25 -37.08 0 0 88.66 1.3845 \$Source tube (inner) 1  
 22 RCC 0 -20.5 -37.283 0 0 89.066 1.5875 \$Source tube (outer) 2  
 23 RCC 0 -20.5 -37.08 0 0 88.66 1.3845 \$Source tube (inner) 2  
 24 RCC -17.75 -10.25 -37.283 0 0 89.066 1.5875 \$Source tube (outer) 3  
 25 RCC -17.75 -10.25 -37.08 0 0 88.66 1.3845 \$Source tube (inner) 3  
 26 RCC -17.75 10.25 -37.283 0 0 89.066 1.5875 \$Source tube (outer) 4  
 27 RCC -17.75 10.25 -37.08 0 0 88.66 1.3845 \$Source tube (inner) 4  
 28 RCC 0 20.5 -37.283 0 0 89.066 1.5875 \$Source tube (outer) 5  
 29 RCC 0 20.5 -37.08 0 0 88.66 1.3845 \$Source tube (inner) 5  
 30 RCC 17.75 10.25 -37.283 0 0 89.066 1.5875 \$Source tube (outer) 6  
 31 RCC 17.75 10.25 -37.08 0 0 88.66 1.3845 \$Source tube (inner) 6

32	RCC	0	0	-37.08	0	0	16.7	1.5		\$center
33	RCC	0	0	-23.58	0	0	1.0	15		\$center turntable
34	RCC	0	0	-42.48	0	0	6.4	45		\$shield
35	TRC	0	0	-81.08	0	0	38.6	70.75	45	\$shield
36	RCC	0	0	-197.08	0	0	116	70.75		\$shield
37	RPP	-350	350	-350	350		-81.08	-79.08		\$Floor
38	RCC	17.75	-10.25	-36.08	0	0	5.4	6		\$Shield Source tube1-1
39	RCC	17.75	-10.25	-30.68	0	0	4.5	13		\$Shield Source tube1-2
40	RCC	0	-20.5	-36.08	0	0	4.5	13		\$Shield Source tube2-1
41	RCC	0	-20.5	-31.58	0	0	5.4	6		\$Shield Source tube2-2
42	RCC	-17.75	-10.25	-36.08	0	0	5.4	6		\$Shield Source tube3-1
43	RCC	-17.75	-10.25	-30.68	0	0	4.5	13		\$Shield Source tube3-2
44	RCC	-17.75	10.25	-36.08	0	0	4.5	13		\$Shield Source tube4-1
45	RCC	-17.75	10.25	-31.58	0	0	5.4	6		\$Shield Source tube4-2
46	RCC	0	20.5	-36.08	0	0	5.4	6		\$Shield Source tube5-1
47	RCC	0	20.5	-30.68	0	0	4.5	13		\$Shield Source tube5-2
48	RCC	17.75	10.25	-36.08	0	0	4.5	13		\$Shield Source tube6-1
49	RCC	17.75	10.25	-31.58	0	0	5.4	6		\$Shield Source tube6-2
50	RCC	105.5	-126	-81.08	0	0	2	89		\$Floor1
51	RCC	-105.5	-126	-81.08	0	0	2	89		\$Floor2
52	RCC	-105.5	126	-81.08	0	0	2	89		\$Floor3
53	RCC	105.5	126	-81.08	0	0	2	89		\$Floor4
54	RCC	0	0	-22.58	0	0	15	15.2		\$outer GC1
55	RCC	0	0	-22.38	0	0	14.8	15.0		\$inner GC1
56	RCC	0	0	-7.58	0	0	0.2	17.5		\$Lid GC1
57	RCC	0	0	-7.38	0	0	15	15.2		\$outer GC2
58	RCC	0	0	-7.18	0	0	14.8	15.0		\$inner GC2
59	RCC	0	0	7.62	0	0	0.2	17.5		\$Lid GC2
60	RCC	0	0	7.82	0	0	15	15.2		\$outer GC3

61	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	15.0	\$inner GC3
62	RCC	0	0	22.82	0 0	0.2	17.5	\$Lid GC3
63	RCC	0	0	-22.38	0 0	14.8	14.0	\$GC1 layer1
64	RCC	0	0	-22.38	0 0	14.8	11.0	\$GC1 layer2
65	RCC	0	0	-22.38	0 0	14.8	10.0	\$GC1 layer3
66	RCC	0	0	-22.38	0 0	14.8	8.0	\$GC1 layer4
67	RCC	0	0	-22.38	0 0	14.8	7.0	\$GC1 layer5
68	RCC	0	0	-22.38	0 0	14.8	2.5	\$GC1 layer6
69	RCC	0	0	-22.38	0 0	14.8	1.5	\$GC1 layer7
77	RCC	0	0	-7.18	0 0	14.8	14.0	\$GC2 layer1
78	RCC	0	0	-7.18	0 0	14.8	11.0	\$GC2 layer2
79	RCC	0	0	-7.18	0 0	14.8	10.0	\$GC2 layer3
80	RCC	0	0	-7.18	0 0	14.8	8.0	\$GC2 layer4
81	RCC	0	0	-7.18	0 0	14.8	7.0	\$GC2 layer5
82	RCC	0	0	-7.18	0 0	14.8	2.5	\$GC2 layer6
83	RCC	0	0	-7.18	0 0	14.8	1.5	\$GC2 layer7
91	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	14.0	\$GC3 layer1
92	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	11.0	\$GC3 layer2
93	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	10.0	\$GC3 layer3
94	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	8.0	\$GC3 layer4
95	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	7.0	\$GC3 layer5
96	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	2.5	\$GC3 layer6
97	RCC	0	0	8.02	0 0	14.8	1.5	\$GC3 layer7

C

105	pz	-21.393	\$1	cm	from bottom of GC1
106	pz	-20.407	\$2	cm	from bottom of GC1
107	pz	-19.420	\$3	cm	from bottom of GC1
108	pz	-18.433	\$4	cm	from bottom of GC1
109	pz	-17.447	\$5	cm	from bottom of GC1

110 pz -16.468 \$6 cm from bottom of GC1  
111 pz -15.473 \$7 cm from bottom of GC1  
112 pz -14.487 \$8 cm from bottom of GC1  
113 pz -13.500 \$9 cm from bottom of GC1  
114 pz -12.513 \$10 cm from bottom of GC1  
115 pz -11.527 \$11 cm from bottom of GC1  
116 pz -10.540 \$12 cm from bottom of GC1  
117 pz -9.553 \$13 cm from bottom of GC1  
118 pz -8.567 \$14 cm from bottom of GC1

C

119 pz -6.193 \$1 cm from bottom of GC2  
120 pz -5.207 \$2 cm from bottom of GC2  
121 pz -4.220 \$3 cm from bottom of GC2  
122 pz -3.233 \$4 cm from bottom of GC2  
123 pz -2.247 \$5 cm from bottom of GC2  
124 pz -1.260 \$6 cm from bottom of GC2  
125 pz -0.273 \$7 cm from bottom of GC2  
126 pz 0.713 \$8 cm from bottom of GC2  
127 pz 1.700 \$9 cm from bottom of GC2  
128 pz 2.687 \$10 cm from bottom of GC2  
129 pz 3.673 \$11 cm from bottom of GC2  
130 pz 4.660 \$12 cm from bottom of GC2  
131 pz 5.647 \$13 cm from bottom of GC2  
132 pz 6.633 \$14 cm from bottom of GC2

C

133 pz 9.007 \$1 cm from bottom of GC3  
134 pz 9.993 \$2 cm from bottom of GC3  
135 pz 10.980 \$3 cm from bottom of GC3  
136 pz 11.967 \$4 cm from bottom of GC3



137 pz 12.953 \$5 cm from bottom of GC3  
 138 pz 13.940 \$6 cm from bottom of GC3  
 139 pz 14.927 \$7 cm from bottom of GC3  
 140 pz 15.913 \$8 cm from bottom of GC3  
 141 pz 16.900 \$9 cm from bottom of GC3  
 142 pz 17.887 \$10 cm from bottom of GC3  
 143 pz 18.873 \$11 cm from bottom of GC3  
 144 pz 19.860 \$12 cm from bottom of GC3  
 145 pz 20.847 \$13 cm from bottom of GC3  
 146 pz 21.833 \$14 cm from bottom of GC3

C

148 p 1 -0.176 0 0  
 150 p 1 -0.577 0 0  
 152 p 1 -1.192 0 0  
 154 p 1 -2.747 0 0  
 156 py 0  
 158 p -1 -2.747 0 0  
 160 p -1 -1.192 0 0  
 162 p -1 -0.577 0 0  
 164 p -1 -0.176 0 0

C .....

165 RCC 0 0 -20.38 0 0 12.8 0.01 \$Center of GC-1  
 166 RCC 0 0 -7.18 0 0 14.8 0.01 \$Center of GC-2  
 167 RCC 0 0 8.02 0 0 14.8 0.01 \$Center of GC-3

C .....

C Data cards

m1 27000 1.0 \$Co-60  
 m2 82000 1.0 \$Pb(shieldind)

```

m3 7000 -0.79 8000 -0.21    $Air
m4 13000 1.0                $Al(Gems container)
m5 26000 1.0                $Fe (plate at center)
m6 26000 -0.9 24000 -0.1    $Stainless steel
mode p
sdef ERG=D1 AXS=0 0 1 EXT=D2 RAD=D3 POS=D4
SI1 L 1.173 1.332
SP1 D 1 1
SI2 -22.58 22.58
SP2 0 1
SI3 0 0.555
SP3 -21 1
SI4 L 17.75 -10.25 0 0.00 -20.5 0 &
    -17.75 -10.25 0 -17.75 10.25 0 &
    0.00 20.50 0 17.75 10.25 0
SP4 D 0.992 0.983 1.000 0.983 0.983 0.983
C ...GC1....
f4:p 8230
f14:p 1140 1141 1142 1143 1144 1145 1146 1147 1148 1149 1150 1151 1152 &
    1153 1154 1155 1156 1157 T
f24:p 4140 4141 4142 4143 4144 4145 4146 4147 4148 4149 4150 4151 4152 &
    4153 4154 4155 4156 4157 T
f34:p 8140 8141 8142 8143 8144 8145 8146 8147 8148 8149 8150 8151 8152 &
    8153 8154 8155 8156 8157 T
f44:p 11140 11141 11142 11143 11144 11145 11146 11147 11148 11149 11150 &
    11151 11152 11153 11154 11155 11156 11157 T
f54:p 15140 15141 15142 15143 15144 15145 15146 15147 15148 15149 15150 &
    15151 15152 15153 15154 15155 15156 15157 T
C

```

f64:p 1180 1181 1182 1183 1184 1185 1186 1187 1188 1189 1190 1191 1192 &  
1193 1194 1195 1196 1197 T

f74:p 4180 4181 4182 4183 4184 4185 4186 4187 4188 4189 4190 4191 4192 &  
4193 4194 4195 4196 4197 T

f84:p 8180 8181 8182 8183 8184 8185 8186 8187 8188 8189 8190 8191 8192 &  
8193 8194 8195 8196 8197 T

f94:p 11180 11181 11182 11183 11184 11185 11186 11187 11188 11189 11190 &  
11191 11192 11193 11194 11195 11196 11197 T

f104:p 15180 15181 15182 15183 15184 15185 15186 15187 15188 15189 15190 &  
15191 15192 15193 15194 15195 15196 15197 T

C

f114:p 1260 1261 1262 1263 1264 1265 1266 1267 1268 1269 1270 1271 1272 &  
1273 1274 1275 1276 1277 T

f124:p 4260 4261 4262 4263 4264 4265 4266 4267 4268 4269 4270 4271 4272 &  
4273 4274 4275 4276 4277 T

f134:p 8260 8261 8262 8263 8264 8265 8266 8267 8268 8269 8270 8271 8272 &  
8273 8274 8275 8276 8277 T

f144:p 11260 11261 11262 11263 11264 11265 11266 11267 11268 11269 11270 &  
11271 11272 11273 11274 11275 11276 11277 T

f154:p 15260 15261 15262 15263 15264 15265 15266 15267 15268 15269 15270 &  
15271 15272 15273 15274 15275 15276 15277 T

fm4 5.19e+15

fm14 5.19e+15

fm24 5.19e+15

fm34 5.19e+15

fm44 5.19e+15

fm54 5.19e+15

fm64 5.19e+15

fm74 5.19e+15

fm84 5.19e+15

fm94 5.19e+15

fm104 5.19e+15

fm114 5.19e+15

fm124 5.19e+15

fm134 5.19e+15

fm144 5.19e+15

fm154 5.19e+15

de4 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df4 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de14 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df14 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de24 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df24 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &

1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
 1.18e-5 1.33e-5

de34 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
 0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
 6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df34 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
 8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
 1.18e-5 1.33e-5

de44 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
 0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
 6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df44 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
 8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
 1.18e-5 1.33e-5

de54 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
 0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
 6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df54 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
 8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
 1.18e-5 1.33e-5

de64 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
 0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &

6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df64 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de74 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df74 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de84 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df84 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de94 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df94 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &

1.18e-5 1.33e-5

de104 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df104 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de114 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df114 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de124 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df124 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
1.18e-5 1.33e-5

de134 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df134 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &

8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
 1.18e-5 1.33e-5

de144 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
 0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
 6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df144 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
 8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
 1.18e-5 1.33e-5

de154 0.01 0.03 0.05 0.07 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4 0.45 0.5 0.55 0.6 &  
 0.65 0.7 0.8 1.0 1.4 1.8 2.2 2.6 2.8 3.25 3.75 4.25 4.75 5.0 5.25 5.75 &  
 6.25 6.75 7.5 9.0 11.0 13.0 15.0

df154 3.96e-6 5.82e-7 2.9e-7 2.58e-7 2.83e-7 3.79e-7 5.01e-7 6.31e-7 7.59e-7 &  
 8.78e-7 9.85e-7 1.08e-6 1.17e-6 1.27e-6 1.36e-6 1.44e-6 1.52e-6 1.68e-6 &  
 1.98e-6 2.51e-6 2.99e-6 3.42e-6 3.82e-6 4.01e-6 4.41e-6 4.83e-6 5.23e-6 &  
 5.60e-6 5.80e-6 6.01e-6 6.37e-6 6.74e-6 7.11e-6 7.66e-6 8.77e-6 1.03e-5 &  
 1.18e-5 1.33e-5

nps 1e+8



## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวทัศนีย์ เจริญนาม เกิดเมื่อวันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2528 ที่จังหวัดจันทบุรี สำเร็จ การศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ปี พ.ศ. 2551 หลังจากนั้นเข้าทำงานที่สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์ แห่งชาติ (องค์การมหาชน) ในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ สังกัดศูนย์ฉายรังสีอัญมณี และ ได้เข้าศึกษาหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปี พ.ศ. 2552