

การออกแบบกั้นรังสีสำหรับจัดเก็บกากกัมมันตรังสีจากกระบวนการ enrich ยูเรเนียม
เครื่องปฏิกรณ์ที่มหาวิทยาลัย ฟิว.-1/1
SHIELDING DESIGN FOR STORAGE OF RADIOACTIVE WASTE
FORM TRR-1/01 POOL

นายกิติพิทก์ อังเกียรติวงศ์

นายสุพรรณภูมิ โขธา

นายชาติดี จันทร์ทองกุล

โครงการพิเศษเป็นส่วนหนึ่งของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
คณะวิศวกรรมศาสตร์

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2556

การออกแบบกำบังรังสีสำหรับจัดเก็บกากกัมมันตรังสีจากการบำรุงรักษาบ่อ
เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1

นายกิตติพิศ ส่องเกียรติวงศ์
นายฐาปกรณ์ ไชยา
นายสาธิต จันทร์หอมกุล

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2556






**SHIELDING DESIGN FOR STORAGE OF RADIOACTIVE WASTE
FORM TRR-1/M1 POOL**

**Mr. KITTIPHOT SONGKIATIWONG
Mr. THAPAKORN CHAIYA
Mr. SATIT JANHOMKUL**

**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE
DEPARTMENT OF APPLIIED PHYSICS
FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2013**

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบกำบังรังสีสำหรับจัดเก็บกากกัมมันตรังสี จากการบำรุงรักษาบ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 SHIELDING DESIGN FOR STORAGE OF RADIOACTIVE WASTE FROM TRR-1/M1 POOL
ชื่อนักศึกษา	นายกิตติพิศ ส่องเกียรติวงศ์ นายฐาปกรณ์ ไชยา นายสาธิต จันทร์หอมกุล
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหรัย เล็กชะอุ่ม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ชนาธิป ทิพยกุล

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2556

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.ประธาน บุรณศิริ	
ดร.ศ.ทิพวรรณ คล้ายบุญมี	
ดร.ณัฐพร พรหมรส	
รศ.สาหรัย เล็กชะอุ่ม	
ดร.ชนาธิป ทิพยกุล	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การออกแบบกำบังรังสีสำหรับจัดเก็บกากกัมมันตรังสีจากการบำรุงรักษาบ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1
ชื่อนักศึกษา	นายกิตติพิศ ส่งเกียรติวงศ์ นายฐาปกรณ์ ไชยา นายสาธิต จันท์หอมกุล
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2556
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.ชนาธิป ทิพยกุล

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นกรออกแบบกำบังรังสีสำหรับจัดเก็บกากกัมมันตรังสีจากการบำรุงรักษาบ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 ซึ่งกากกัมมันตรังสีปลดปล่อยรังสีแกมมาที่พลังงาน 1173.2 keV , 1332.5 keV ในการออกแบบวัสดุที่ใช้กำบังรังสี คือ อะลูมิเนียม สแตนเลส และตะกั่ว โดยการหาคุณสมบัติของวัสดุที่ลดทอนความเข้มรังสีจากค่าพารามิเตอร์คืออัตราการส่งผ่าน(T), สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น(μ), ความหนาของวัสดุที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลงครึ่งหนึ่ง(HVL), ความหนาของวัสดุที่ทำให้ความเข้มรังสีลดลง $1/10$ เท่า(TVL) การทดลองหาค่าพารามิเตอร์ T, μ, HVL, TVL ตามลำดับจะแบ่งออกเป็น 2 ตอนคือ ตอนแรกเป็นการนับวัดรังสีด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์และตอนที่สองการออกแบบและสร้างแบบจำลองด้วยการประมวลผลทางโปรแกรม MCNP ซึ่งผลการทดลองด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์พบว่าอะลูมิเนียมที่มีความหนา 2 cm. มีค่า 0.75 , 0.15 cm^{-1} , 4.5 cm. และ 15 cm. ตามลำดับ สแตนเลสที่มีความหนา 2 cm. มีค่า 0.44 , 0.39 cm^{-1} , 1.8 cm. และ 6.0 cm. ตามลำดับ ตะกั่วที่มีความหนา 1.2 cm. มีค่า 0.46 , 0.59 cm^{-1} , 1.2 cm. และ 3.9 cm. และการประมวลผลด้วยโปรแกรม MCNP พบว่า อะลูมิเนียมที่มีความหนา 2 cm. มีค่า 0.75 , 0.14 cm^{-1} , 4.8 cm. และ 16 cm. ตามลำดับ สแตนเลสที่มีความหนา 2 cm. มีค่า 0.42 , 0.43 cm^{-1} , 1.6 cm. และ 5.4 cm. ตามลำดับ ตะกั่วที่มีความหนา 1.2 cm. มีค่า 0.45 , 0.66 cm^{-1} , 1.1 cm. และ 3.5 cm. แล้วนำผลการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ทั้ง 2 ตอนมาเปรียบเทียบดูความสอดคล้องกันจะเห็นว่าวัสดุทั้งสามชนิดนำไปออกแบบสร้างเป็นวัสดุกำบังรังสีให้ลดทอนความเข้มรังสีได้ 1000 เท่า โดยใช้พื้นที่ในการจัดเก็บและต้นทุนในการสร้างน้อยที่สุด

คำสำคัญ : กากกัมมันตรังสี , แกมมาสเปกโตรมิเตอร์

Title	SHIELDING DESIGN FOR STORAGE OF RADIOACTIVE WASTE FROM TRR-1/M1 POOL
Students	Mr. Kittiphot Songkiattiwong Mr. Thapakorn Chaiya Mr. Satit Janhomkul
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Physics
Academic Year	2013
Advisor	Assoc.Prof. Sarai Lekchaum
Co-Advisor	Dr.Chanatip Tipayakul

ABSTRACT

This project is to design radiation shielding for storing radioactive waste from TRR-1/M1 pool which release radioactive gamma rays of energy 1173.2 keV, 1332.5 keV. In materials design, radiation shielding, including aluminum, stainless steel and lead by finding the material properties reduce radiation intensity of the parameters is the transmission rate (T), attenuation coefficients, linear (μ), thickness of the radiation intensity is reduced by half (HVL), the thickness of the material makes radiation intensity reduced to 1/10 times (TVL). Experimental T, μ, HVL, TVL parameters Sequence is divided into two sections: the first is counted with a gamma radiation spectrometer specification and the second design and modeling with application processing MCNP. The results of the experiments with gamma spectrometer found that aluminum thickness 2 cm. were 0.75, 0.15 cm^{-1} , 4.5 cm. and 15 cm. Respectively, stainless steel thickness 2 cm. were 0.44, 0.39 cm^{-1} , 1.8 cm. and 6.0 cm. respectively lead thickness 1.2 cm. were 0.46, 0.59 cm^{-1} , 1.2 cm. and 3.9 cm. and processing using MCNP found that aluminum thickness 2 cm. were 0.75, 0.14 cm^{-1} , 4.8 cm. and 16 cm. Their respective Stainless thickness 2 cm. were 0.42, 0.43 cm^{-1} , 1.6 cm. and 5.4 cm. respectively, lead to a thickness of 1.2 cm. were 0.45, 0.66 cm^{-1} , 1.1 cm. and 3.5 cm. Then the results of the experimental parameters all 2 compare viewing consistency is that the material of the three different lead designers to create a shielding to reduce radiation intensity is 1000 times the area of storage and cost of building less.

Keywords : Radioactive waste , Gamma spectrometer

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถลุล่วงไปได้เนื่องจากได้รับความสนับสนุน และความช่วยเหลือจากรองศาสตราจารย์สาหร่าย เล็กชะอุ่ม ผู้ให้คำแนะนำปรึกษาทางวิชาการที่ติดต่อมารวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(สทท.)ที่กรุณาให้ความอนุเคราะห์และคำแนะนำการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์การนับวัดรังสี

ขอขอบคุณ ดร.ชนาธิป ทิพยกุล ผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับการใช้โปรแกรม MCNP ในการออกแบบรูปทรงในการเก็บกากกัมมันตรังสี และให้ความรู้ระบบการทำงานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 ตลอดมา

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ อาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชา ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับจนถึงปัจจุบัน ตลอดจน กราบขอบคุณพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียนและเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

นายกิตติพิศ ส่องเกียรติวงศ์

นายฐาปกรณ์ ไชยา

นายสาธิต จันทร์หอมกุล

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญ(ต่อ)	V
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
สารบัญรูป(ต่อ)	VIII
สารบัญรูป(ต่อ)	IX
สารบัญรูป(ต่อ)	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนในการวิจัยและวิธีในการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 การค้นพบกัมมันตรังสี	4
2.2 กัมมันตภาพรังสี	7
2.3 กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี	8
2.4 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร	11
2.5 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร	14
2.6 การกำบังรังสี	16

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.7 ระบบนับวัดรังสี	23
2.8 หน่วยวัดปริมาณรังสี	35
2.9 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของประเทศไทย	40
2.10 รหัสคอมพิวเตอร์เอ็มซีเอ็นพี	46
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	53
3.1 การศึกษาระบบการนับวัดและการกำบังรังสีแกมมา	53
3.2 การศึกษาการเขียนโปรแกรม	54
3.3 ออกแบบรูปทรงตัวกำบังรังสีด้วยโปรแกรม MCNP	71
3.4 วัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง	79
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	83
4.1 การวัดและวิเคราะห์ผลด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์	83
4.2 การวัดและวิเคราะห์แบบจำลองทางโปรแกรม MCNP	83
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	104
5.1 สรุปผลการทดลอง	104
5.2 ข้อเสนอแนะ	105
เอกสารอ้างอิง	106

สารบัญตาราง

	หน้า	
ตารางที่ 1	แสดงระยะเวลาในการดำเนินงาน	3
ตารางที่ 2.1	คุณสมบัติทางรังสีที่มาจากสารกัมมันตรังสี	7
ตารางที่ 2.2	Weighting Factor (w_R) ของรังสีแต่ละประเภท	37
ตารางที่ 2.3	สรุปหน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสี	38
ตารางที่ 2.4	เกณฑ์ความปลอดภัยทางด้านรังสี	38
ตารางที่ 2.5	แสดงการจำแนกชนิดของนิวตรอน	40
ตารางที่ 2.6	รูปแบบการเขียนไฟล์อินพุต	47
ตารางที่ 2.7	Source specification Card	49
ตารางที่ 2.8	ตารางแสดงชุดคำสั่งย่อยของ SDEF Cards	50
ตารางที่ 2.9	แสดงชุดคำสั่ง Fna Cards	51
ตารางที่ 3.1	ข้อมูลต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน	80
ตารางที่ 3.2	ประเภทตัวกำบังรังสีแกมมา	80
ตารางที่ 3.3	Specification of Scintillation detector(LaBr ₃)	80
ตารางที่ 3.4	ข้อมูลคุณสมบัติของหัววัดรังสี	81
ตารางที่ 4.1	แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังประเภทอะลูมิเนียม	85
ตารางที่ 4.2	แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังประเภทสแตนเลส	86
ตารางที่ 4.3	แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังประเภทตะกั่ว	87
ตารางที่ 4.4	แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังอะลูมิเนียม (แบบจำลองทางโปรแกรมMCNP)	89
ตารางที่ 4.5	แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังสแตนเลส (แบบจำลองทางโปรแกรมMCNP)	90
ตารางที่ 4.6	แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังตะกั่ว (แบบจำลองทางโปรแกรมMCNP)	91
ตารางที่ 4.7	การเปรียบเทียบความเข้มรังสีจากการประเมินทางรังสีกับโปรแกรม MCNP	98
ตารางที่ 4.8	ผลการลดทอนจากการออกแบบตัวกำบังรังสี	100

สารบัญตาราง(ต่อ)

	หน้า
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการคิดราคาตัวกำบังรังสีทรงกระบอก	100

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ภาพมือกรรยาของเรินต์เกนถ่ายด้วยรังสีเอกซ์,วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน	4
รูปที่ 2.2 แสดงการเบี่ยงเบนของรังสีบีตา แอลฟา แกมมา ในสนามไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.3 แสดงการเบี่ยงเบนของรังสีบีตา แอลฟา แกมมา ในสนามแม่เหล็ก	5
รูปที่ 2.4 แสดงอำนาจทะลุทะลวงของรังสีบีตา แอลฟา แกมมา	6
รูปที่ 2.5 การแตกตัวเป็นไอออนของตัวกลาง	7
รูปที่ 2.6 แสดงการสลายตัวของกัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่และการเพิ่มนิวไคลด์ลูก	9
รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	12
รูปที่ 2.8 แสดงปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน	12
รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์การผลิตคู่	13
รูปที่ 2.10 แสดงการชนแบบยืดหยุ่น	14
รูปที่ 2.11 แสดงการการชนแบบไม่ยืดหยุ่น	15
รูปที่ 2.12 แสดงการจับอนุภาคไว้แล้วให้รังสี	15
รูปที่ 2.13 แสดงการจับอนุภาคแล้วปล่อยอนุภาค	16
รูปที่ 2.14 แสดงการส่งผ่านรังสี	17
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการเดินทางของรังสีแบบเส้นตรง	18
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการเดินทางของรังสีแบบวงกว้าง	19
รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการเดินทางของรังสีคิดค่าแฟคเตอร์บี	20
รูปที่ 2.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์การส่งผ่านรังสีเทียบกับความหนาของตัวกลาง	22
รูปที่ 2.19 วงจรการทำงานของระบบนับวัดรังสี	24
รูปที่ 2.20 ภาพหัววัดรังสีที่ประกอบด้วย NaI(Tl) และหลอด PM	25
รูปที่ 2.21 โครงสร้างของหัววัดรังสี	26
รูปที่ 2.22 ภาควัดความหนาของแผ่นโลหะไดโนดลำดับที่สองในการคายพลังงาน	27
รูปที่ 2.23 การทำงานของ preamplifier	28
รูปที่ 2.24 แสดงถึงสัญญาณที่ได้จาก preamplifier	29
รูปที่ 2.25 ภาพแสดงหลักการทำงานของ multichannel analyzer (MCA)	30

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.26 เครื่อง multichannel analyzer	30
รูปที่ 2.27 energy spectrum	31
รูปที่ 2.28 energy spectrum	32
รูปที่ 2.29 energy spectrum ของ 137-Cs	33
รูปที่ 2.30 การหาค่า energy resolution จาก Full Width at Half Maximum (FWHM)	33
รูปที่ 2.31 แสดงวิธีคำนวณหาค่าพื้นที่ใต้พีค	34
รูปที่ 2.32 แสดงการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่	39
รูปที่ 2.33 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย	41
รูปที่ 2.34 บ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย	42
รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะของแกนเครื่องปฏิกรณ์	43
รูปที่ 2.36 ภาพตำแหน่งเทอร์มัลคอลลัมน์, วอยแท็งค์ภายในบ่อเครื่องปฏิกรณ์	44
รูปที่ 2.37 ภาพแสดงขนาดวอยแท็งค์ภายในบ่อเครื่องปฏิกรณ์	44
รูปที่ 2.38 ที่เก็บเชื้อเพลิงภายในสระน้ำเครื่องปฏิกรณ์	45
รูปที่ 2.39 ส่วนประกอบของไฟลอินพุต MCNP	46
รูปที่ 2.40 Operator	47
รูปที่ 2.41 Material specification Cards	52
รูปที่ 2.42 แสดงการรันโปรแกรมคูโครงสร้างแบบจำลอง	53
รูปที่ 2.43 แสดงการรันโปรแกรมคำนวณการทดลอง	53
รูปที่ 3.1 ระบบการนับวัดรังสี	54
รูปที่ 3.2 แสดงการวัดการส่งผ่านรังสี	54
รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม XLaunch	55
รูปที่ 3.4 หน้าต่างโปรแกรม Context	56
รูปที่ 3.5 การตั้งค่าโปรแกรม MCNP ใน Environment Variables	57
รูปที่ 3.6 แผนภาพ Flow Chart แสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MCNP	58
รูปที่ 3.7 หน้าต่างแสดงโครงสร้างแบบจำลอง MCNP	59

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.8 แบบจำลองอัตราการส่งผ่านของรังสีผ่านอะลูมิเนียมในระบบพิกัด 3 มิติ	60
รูปที่ 3.9 แบบจำลองอัตราการส่งผ่านของรังสีผ่านสแตนเลสในระบบพิกัด 3 มิติ	62
รูปที่ 3.10 แบบจำลองอัตราการส่งผ่านของรังสีผ่านตะกั่วในระบบพิกัด 3 มิติ	64
รูปที่ 3.11 การประเมินผลทางรังสี	72
รูปที่ 3.12 ตัวกำบังรังสีทรงกระบอก	74
รูปที่ 3.13 ภาพฉายตัวกำบังรังสีทรงกระบอก	74
รูปที่ 3.14 ออกแบบตัวกำบังรังสีทรงกระบอก	76
รูปที่ 3.15 แสดงแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาแบบปิดผนึก	79
รูปที่ 3.16 Scintillation Detector $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	79
รูปที่ 3.17 โปรแกรม Genie2000	80
รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังทั้ง 3 ประเภท(การทดลอง)	88
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังทั้ง 3 ประเภท (แบบจำลองทางโปรแกรม MCNP)	92
รูปที่ 4.3 แบบจำลองการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียม ทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขเซลล์)	93
รูปที่ 4.4 แบบจำลองการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียม ทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขพื้นผิว)	94
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียม ทางการทดลองกับแบบจำลองทางโปรแกรม MCNP	95
รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังสแตนเลส ทางการทดลองกับแบบจำลองทางโปรแกรม MCNP	96
รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังตะกั่ว ทางการทดลองกับแบบจำลองทางโปรแกรม MCNP	97
รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีจากการประเมินทางรังสีกับโปรแกรม MCNP	99
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งของหัววัดรังสีในการออกแบบตัวกำบังรังสีทางโปรแกรม MCNP	101

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.10 แบบจำลองการออกแบบตัวกำบังรังสีทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขเซลล์)	102
รูปที่ 4.11 แบบจำลองการออกแบบตัวกำบังรังสีทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขพื้นผิว)	103

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การนำพลังงานนิวเคลียร์มาใช้ประโยชน์ไม่ว่าจะเป็นการผลิตไฟฟ้าหรือกิจกรรมใดๆ ก็ตามจำเป็นต้องมีระบบที่ใช้ผลิตพลังงานดังกล่าวขึ้นมาคือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูหรือเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) ประเทศไทยมีเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Research reactor) เครื่องที่กำลัง 1200 กิโลวัตต์ เป็นการนำนิวตรอน (Neutron) ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear fission reaction) ภายในเครื่องปฏิกรณ์ ไปทำการวิจัยและนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอาหาร การเกษตร อุตสาหกรรม การแพทย์ และด้านพลังงาน เพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุด แต่อย่างไรก็ตามจะต้องมีการตรวจสอบสภาพเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยอย่างสม่ำเสมอ โดยหาจุดบกพร่องและแก้ไข เพื่อให้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเดินเครื่องเป็นปกติ โดยไม่มีการเกิดอุบัติเหตุขึ้นแต่ประการใด

รังสีทุกชนิดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยานิวเคลียร์เป็นอันตรายทั้งสิ้น จึงต้องทำการป้องกันไม่ให้ร่างกายได้รับรังสี หรือได้รับในปริมาณน้อยที่สุด ในกรณีที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้เนื่องจากต้องทำงานเกี่ยวข้องกับรังสีแล้ว มีหลักการป้องกันรังสีดังนี้

1. เวลา หมายถึง ใช้เวลาในการทำงานในบริเวณที่มีรังสีให้สั้นที่สุด
2. ระยะทาง (distance) หมายถึง อยู่ห่างจากแหล่งกำเนิดรังสีไว้ให้มากที่สุด
3. อุปกรณ์กำบังรังสี (shielding) กรณีที่ต้องทำงานในบริเวณที่มีรังสีและใช้เวลาปฏิบัติงาน อุปกรณ์กำบังรังสีเป็นทางเลือกหนึ่งช่วยให้ความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงานทางรังสี

ดังนั้นเวลาทำการซ่อมบำรุงเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย จะต้องถอดชิ้นส่วนประเภทนี้ที่ เป็นตัวยึดถัง(Void tank)เข้ากับแกนเครื่องปฏิกรณ์ ดังนั้นควรจะต้องหาอุปกรณ์ใต้น้ำ ซึ่งน้ำที่อยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยนี้จะถูกกระตุ้นจากนิวตรอนที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Nuclear fission reaction) ทำให้น้ำมีสภาพเป็นวัสดุที่มีการแผ่รังสีแกมมา (Radiation) และมีความแรงรังสีสูงมาก จึงมีความสนใจที่จะสร้างอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติเป็นวัสดุกำบังรังสีแกมมาเพื่อใช้ในการเก็บน้ำในขณะที่ยังปฏิบัติงานทำการซ่อมบำรุง เพื่อไม่ให้ผู้ปฏิบัติงานทำการซ่อมบำรุงได้รับ

อันตรายจากปริมาณรังสีมากเกินไป ดังนั้นตัวกำบังรังสีถือเป็นเครื่องป้องกันชนิดหนึ่งที่จะช่วยให้ความปลอดภัยขณะปฏิบัติงานทางด้านนิวเคลียร์

สิ่งสำคัญการออกแบบอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสี ต้องออกแบบให้อุปกรณ์มีขนาดที่เหมาะสมสามารถจัดเก็บอุปกรณ์หรือนำไปใช้งานในพื้นที่ที่จำกัดได้และต้องใช้งบประมาณในการสร้างให้น้อยที่สุด โดยการเลือกวัสดุที่มีคุณสมบัติกำบังรังสีเกมมาได้ดีคือธาตุที่มีเลขอะตอมสูง งานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบการกำบังรังสีของวัสดุ 3 ประเภท ได้แก่ อะลูมิเนียม สแตนเลส ตะกั่ว แล้วนำวัสดุที่กำบังรังสีได้ดีมาเป็นส่วนผสมสำหรับการออกแบบอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสี เนื่องจากถัง(Void tank)อยู่ใกล้แกนเครื่องปฏิกรณ์ ที่บริเวณนี้จะมีพลังรังสีสูงมากทำให้ไม่สามารถเข้าไปทดลองในห้องเครื่องปฏิกรณ์ได้โดยตรง จึงใช้โปรแกรม MCNP ในการสร้างแบบจำลองจากสถานการณ์จริงขึ้นมาแทน เพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีของเครื่องปฏิกรณ์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อออกแบบอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสีที่ลดทอนรังสีได้ 1000 เท่า
2. เพื่อออกแบบอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสีที่สามารถนำไปใช้งานในพื้นที่จำกัดได้
3. เพื่อใช้งบประมาณในการสร้างอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสีให้น้อยที่สุด
4. เพื่อป้องกันอันตรายจากรังสี ขณะที่มีการปฏิบัติงานทางด้านรังสี
5. เพื่อใช้เป็นที่กักเก็บกากกัมมันตรังสีป้องกัน ไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษาระบบนับวัดรังสีแบบเกมมาสเปคโตรมิเตอร์(หัววัดชนิดผลึกสารเรืองแสง(LaBr₃))
2. ศึกษาการเกิดอันตรกิริยาของรังสีเกมมากับสสาร
3. ศึกษาการกำบังรังสีเกมมาของวัสดุ อะลูมิเนียม สแตนเลส ตะกั่ว
4. วิเคราะห์การส่งผ่านของรังสีเกมมาผ่านวัสดุ อะลูมิเนียม สแตนเลส ตะกั่ว
5. คำนวณหาค่าพารามิเตอร์สำหรับการกำบังรังสี (T, μ, HVL, TVL)
6. ศึกษารูปแบบการเขียนโปรแกรม MCNP
7. ศึกษาการใช้โปรแกรม MCNP สร้างแบบจำลองและคำนวณการส่งผ่านของรังสีเกมมา สำหรับการออกแบบอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสี

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

โครงการมีระยะเวลาในการจัดทำรวมทั้งสิ้น 9 เดือน โดยเริ่มตั้งแต่เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2556 ถึงเดือนมีนาคม พ.ศ. 2557 ซึ่งมีแผนดำเนินงานแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินงาน

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลา				
	ก.ค. – ส.ค. 2556	ก.ย. – ต.ค. 2556	พ.ย. – ธ.ค. 2556	ม.ค. – ก.พ. 2557	มี.ค. 2557
ศึกษาระบบการนับวัด รังสีแบบเกมมา สเปกโตรมิเตอร์และ การกำบังรังสีเกมมา					
ศึกษาการเขียน โปรแกรม MCNP					
ออกแบบรูปทรง ตัวกำบังรังสีด้วย โปรแกรม MCNP					
วัดและวิเคราะห์ ผลการทดลอง					
สรุปผลการทดลองและ ข้อเสนอแนะ					

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. มีความรู้และทักษะในการเขียนซอฟต์แวร์ทางคอมพิวเตอร์จากโปรแกรม MCNP
2. มีความรู้และเข้าใจเทคนิคการใช้เครื่องมือและระบบนับวัดรังสีทางด้านนิวเคลียร์
3. มีความรู้และเข้าใจหลักการของระบบนับวัดรังสีแบบเกมมาสเปกโตรมิเตอร์
4. ทำให้เกิดการพัฒนาความคิดและรู้จักรับฟังความคิดเห็นของผู้อื่น

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การค้นพบกัมมันตรังสี

วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์เริ่มเมื่อ เรินต์เกน(W.C Roentgen) ค้นพบรังสีเอกซ์จากหลอดรังสีแคโทด(Cathode ray tube) โดยให้ลำอิเล็กตรอนกระทบเป้าโลหะทำให้เกิดรังสีเอกซ์ที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง เขาสามารถอธิบายคุณสมบัติของรังสีเอกซ์คือมันมีสมบัติเช่นเดียวกับแสงสว่างที่ทำให้ฟิล์มเกิดรอยดำและทำให้วัตถุเกิดการวาวแสงได้(fluorescent) โดยแสดงให้เห็นว่ารังสีเอกซ์สามารถเคลื่อนที่ผ่านวัตถุได้โดยถ่ายภาพมือของภรรยาเขาเองไว้ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ภาพมือภรรยาของเรินต์เกนถ่ายด้วยรังสีเอกซ์(ด้านซ้าย)

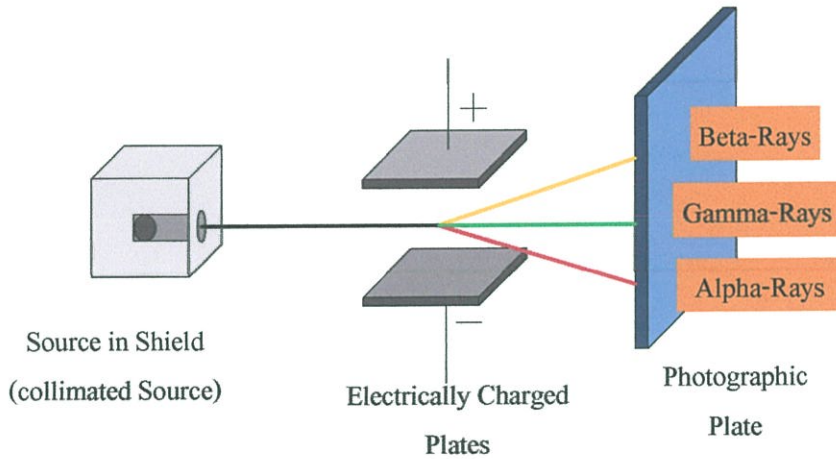
วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน(W.C. Roentgen)(ด้านขวา)

หลังจากนั้นแบ็กแกอแรล(A.H. Becquerel) สนใจกระบวนการวาวแสงของเกลือยูเรเนียม (Uranium salt) ใช้แสงอาทิตย์มากระตุ้น แต่แม้ว่าเกลือยูเรเนียมจะไม่ได้รับแสงอาทิตย์ก็ยังคงปลดปล่อยรังสีออกมาทำให้ฟิล์มเกิดรอยดำ แสดงว่าเกลือยูเรเนียมปล่อยรังสีออกมาได้โดยไม่ต้องมีแสงมากระตุ้น แบ็กแกอแรลแสดงให้เห็นว่ารังสีนี้มีสมบัติบางประการคล้ายรังสีเอกซ์ ต่างกันที่รังสีนี้เบี่ยงเบนในสนามแม่เหล็ก แสดงว่ารังสีนี้ประกอบด้วยอนุภาคมีประจุแม้ว่าแบ็กแกอแรลเป็นผู้ค้นพบกัมมันตรังสีแต่ มารี คูรี เป็นผู้กำหนดศัพท์นี้ และเธอเป็นผู้ค้นพบธาตุเรเดียม ใช้รักษาโรคมะเร็ง ซึ่งเป็น โรคร้ายที่ไม่รักษาให้หายขาดได้ในยุคนั้นการศึกษาของมารี คูรีและปีแอร์ คูรี

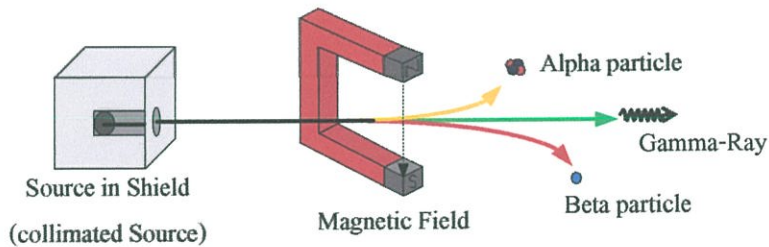
พบธาตุเรเดียมจากแร่พิทช์เบลน(pitch blende)ที่เป็นออกไซด์ชนิดหนึ่งสามารถแผ่กระจายรังสีได้แล้ว
 ศักดิ์ธาตุเรเดียมให้บริสุทธิ์ได้เป็น เรเดียมคลอไรด์ ซึ่งมันมีกัมมันตภาพรังสีสูงกว่าธาตุยูเรเนียมหลาย
 เท่า เพื่อเป็นการให้เกียรติแก่มารี คูรี โดยใช้คำว่า คูรีเป็นหน่วยของกัมมันตภาพรังสี

หลังจากค้นพบธาตุกัมมันตรังสี นักวิทยาศาสตร์ค้นพบสมบัติที่สำคัญของกัมมันตภาพรังสีมี
 ด้วยกัน 3 ประเภท

1.การเบี่ยงเบนเนื่องจากสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้า



รูปที่ 2.2 แสดงการเบี่ยงเบนของรังสีบีตา แอลฟา แกมมา ในสนามไฟฟ้า

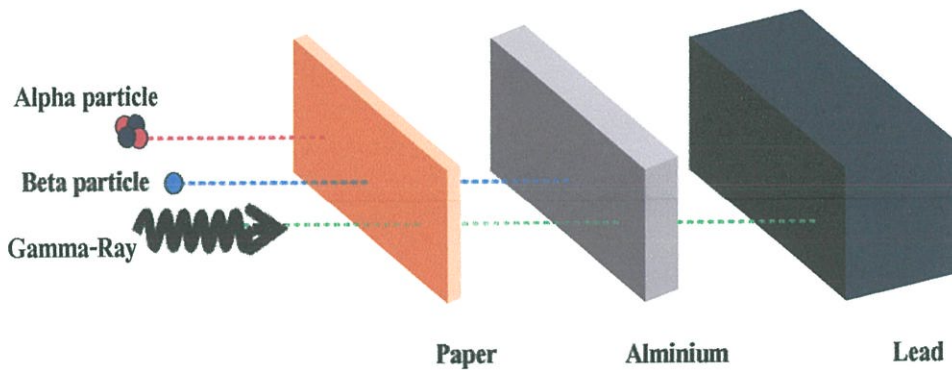


รูปที่ 2.3 แสดงการเบี่ยงเบนของรังสีบีตา แอลฟา แกมมา ในสนามแม่เหล็ก

ผลการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ด(Rutherford) โดยให้กัมมันตภาพรังสีของธาตุยูเรเนียมผ่านไป
 ในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าดังรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3 พบว่ารังสีเบนเข้าหาขั้วบวกในสนามไฟฟ้า
 และเบนเข้าหาขั้วเหนือในสนามแม่เหล็ก แสดงว่ารังสีนี้เป็นอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าลบจึงให้ชื่อว่ารังสี

บีตา(beta rays : β) มีรังสีอีกชนิดหนึ่งซึ่งเบนเข้าหาขั้วลบของสนามไฟฟ้าและเบนเข้าหาขั้วได้ของสนามแม่เหล็ก แสดงว่า รังสีนี้มีประจุไฟฟ้าบวก จึงให้ชื่อรังสีนี้ว่า รังสีแอลฟา (alpha rays : α) ส่วนรังสีชนิดที่สามซึ่งแผ่ออกมาจากยูเรเนียม รังสีนี้มีอำนาจทะลุทะลวงสูงกว่ารังสีบีตาแต่ไม่มีการเบนในสนามแม่เหล็กและสนามไฟฟ้าเลย แสดงว่ามันเป็นรังสีที่ไม่มีประจุไฟฟ้าและไม่มีมวล คือรังสีแกมมา (gamma rays : γ) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก โดยมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 0.5–0.005 Å

2.อำนาจการทะลุทะลวงของกัมมันตรังสีในสสาร



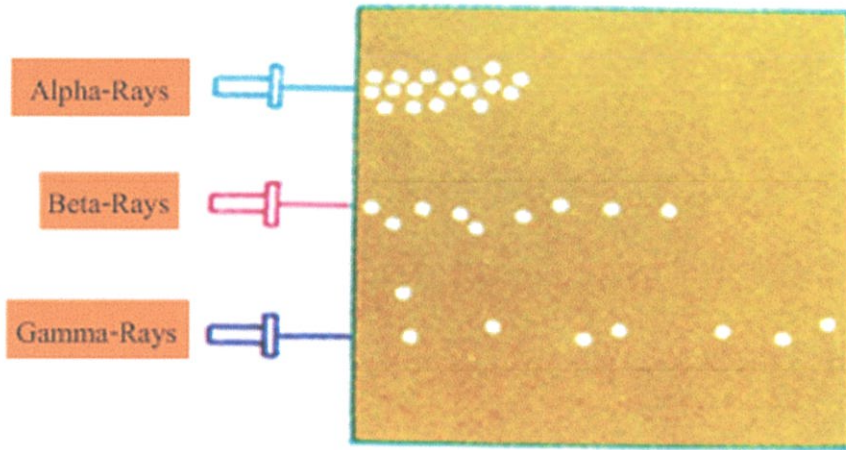
รูปที่ 2.4 แสดงอำนาจทะลุทะลวงของรังสีบีตา แอลฟา แกมมา

ผลการทดลองของรัทเทอร์ฟอร์ดดังรูปที่ 2.4 วัดอำนาจการทะลุทะลวงของรังสีทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ แอลฟา บีตา แกมมา พบว่ารังสีทั้ง 3 ชนิดมีอำนาจทะลุทะลวงจากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้ แกมมา>บีตา>แอลฟา โดยวัดปริมาณกระแสจากกัมมันตภาพรังสีที่ทำให้อากาศแตกตัวเป็นไอออน หลังจากที่ผ่านมาวัสดุแล้วถูกวัสดุดูดกลืน แสดงว่าอำนาจการทะลุทะลวงของรังสีขึ้นอยู่กับพลังงานและมวล ซึ่งรังสีบีตามีมวลน้อยกว่ารังสีแอลฟา อำนาจการทะลุทะลวงของรังสีบีตาจึงมีมากกว่ารังสีแอลฟา

3.การแตกตัวของแก๊สเป็น ไอออน

รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา เป็นรังสีที่มีสมบัติทำให้สารหรือตัวกลางที่มันเคลื่อนที่ผ่านแตกตัวเป็น ไอออนได้ จึงสามารถชนอิเล็กตรอนของอะตอมให้หลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระ หลังจากที

ปล่อยให้รังสีแอลฟา บีตา และแกมมา เคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลาง พบว่ารังสีแอลฟาเคลื่อนที่ได้ระยะทางน้อยที่สุด และรังสีแกมมาสามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลที่สุดดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 การแตกตัวเป็นไอออนของตัวกลาง

แสดงว่ารังสีแอลฟาสามารถทำให้ตัวกลางที่มันเคลื่อนที่ผ่าน ไปแตกตัวเป็นไอออนได้ดีที่สุด จึงสูญเสียพลังงานให้ตัวกลางอย่างรวดเร็ว ทำให้เคลื่อนที่ผ่านไปในตัวกลางได้ไม่มากนัก ส่วนรังสีบีตา และแกมมา มีความสามารถทำให้ตัวกลางแตกตัวเป็นไอออนได้ค่อนข้างมาตามลำดับดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางรังสีที่มาจากสารกัมมันตรังสี

ชนิดของรังสี	สัญลักษณ์	ประจุ (หน่วย)	มวล (u)	Spec. ioniz. (ionpair)/cm	พิสัย (ซม.)	การเกิดไอออน
อัลฟา	α	+2e	4	50,000	8	ทางตรง
บีตา	β^+, β^-	+1e, -1e	1/1840	30 – 300	13	ทางตรง
นิวตรอน	n	0	1	ต่ำมาก	ยาว	ทางอ้อม
แกมมา	γ	0	0	1.5	ยาวมาก	ทางอ้อม

2.2 กัมมันตภาพรังสี(radioactivity)

กัมมันตภาพรังสี(radioactivity) คือสมบัติในการปล่อยรังสีหรือความแรงของวัสดุกัมมันตรังสีหรือความแรงของธาตุกัมมันตรังสี ชื่อที่ถูกต้องของวัสดุที่มีกัมมันตภาพรังสีคือวัสดุกัมมันตรังสีซึ่งจะบอกเป็นปริมาณในหน่วยเบ็กเคอเรล (Becquerel, Bq) หรือเบเกอเรล ซึ่งหน่วยของกัมมันตภาพ(activity, A) 1 Bq หมายถึง จำนวนของนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัว 1 ครั้งต่อวินาที (disintegration per sec, dps) แต่หน่วยของกัมมันตภาพที่นิยมใช้ทั่วไปคือ คูรี (Curie, Ci) ซึ่งกำหนดจากการสลายตัวของ ^{226}Ra หนัก 1 กรัม โดยมีค่าเท่ากับ 3.7×10^{10} dps กัมมันตภาพเป็นสัดส่วนกับจำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสี ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังนี้ และได้สมการ 2.1 เป็นสมการสุทธิ

$$\begin{aligned}
 \text{จาก} \quad & A \propto N \\
 & A = \lambda N \\
 & N = N_0 e^{-\lambda t} \\
 \lambda N &= \lambda N_0 e^{-\lambda t} \\
 A &= A_0 e^{-\lambda t} \tag{2.1}
 \end{aligned}$$

เมื่อ A คือ กัมมันตภาพรังสีที่เริ่มต้น ($t=0$)
 A_0 คือ กัมมันตภาพรังสีที่เวลา t ใดๆ
 t คือ ระยะเวลาของการสลายตัว

2.3 กฎการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (radioactive decay)

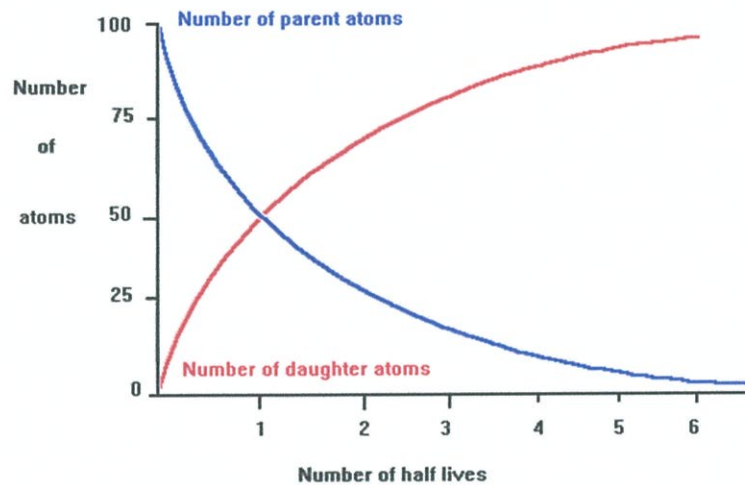
กัมมันตรังสีประกอบด้วยนิวไคลด์ไม่เสถียรมากมาย ซึ่งจะต้องมีการสลายตัว (decay, disintegration) ปลดปล่อยรังสีออกมา เพื่อปรับตัวเป็นนิวไคลด์เสถียร ดังนั้นลักษณะการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีเริ่มต้น(UX) จะมีจำนวนนิวไคลด์ลดลงเรื่อยๆแล้วมีการปลดปล่อยรังสีออกมา(X) และ

ในขณะเดียวกันจะมีธาตุกัมมันตรังสีใหม่เพิ่มขึ้น(U) ดังสมการ 2.2 และรูปที่ 2.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของนิวไคลด์แม่กับนิวไคลด์ลูกของธาตุกัมมันตรังสีมีลักษณะเป็นเอกซ์โพเนนเชียล



เมื่อ UX คือ ธาตุกัมมันตรังสีเริ่มต้น หรือ นิวไคลด์แม่ (parent nuclide)

U คือ ธาตุเกิดจากการสลายตัว หรือ นิวไคลด์ลูก (daughter nuclide)



รูปที่ 2.6 แสดงการสลายตัวของกัมมันตภาพของนิวไคลด์แม่และการเพิ่มนิวไคลด์ลูก

แต่ละธาตุกัมมันตรังสีจะมีสมบัติการสลายตัวที่เฉพาะตัว เช่น อัตราการสลายตัว ชนิดของรังสี และปริมาณรังสีที่แตกต่างกัน ในการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีนั้น จำนวนเริ่มต้นเป็นสัดส่วนกับจำนวนนิวไคลด์ของธาตุกัมมันตรังสีที่มีอยู่ ซึ่งเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ (2.3)

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.3)$$

เมื่อ N_0 คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลาเริ่มต้น ($t=0$)

N คือ จำนวนนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่เวลา t ใดๆ

t คือ ระยะเวลาของการสลายตัว

λ คือ ค่าคงที่การสลายตัว (decay constant)

2.3.1 ค่าคงที่การสลายตัว

ค่าคงที่ของการสลายตัว(decay constant or disintegration constant) ครึ่งชีวิต(half life)และชีวิตเฉลี่ย (mean life) เป็นสมบัติเฉพาะของแต่ละธาตุกัมมันตรังสี และมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน

โดยพิจารณาจากสมการ เมื่อต้องการทราบค่าคงตัวของการสลายตัว สามารถคำนวณได้ดังนี้ และได้สมการ(2.4) เป็นสมการสุทธิ

$$\begin{aligned}
 N &= N_0 e^{-\lambda t} \\
 \frac{N}{N_0} &= e^{-\lambda t} \\
 \ln \frac{N}{N_0} &= -\lambda t \\
 (2.30261) \log \frac{N}{N_0} &= -\lambda t \\
 \log \frac{N}{N_0} &= -0.4343 \lambda t \\
 \text{หรือ} \quad \log \frac{A}{A_0} &= -0.4343 \lambda t \\
 \log A - \log A_0 &= -0.4343 \lambda t \\
 \lambda &= \frac{\log A - \log A_0}{-0.4343 t} \quad (4)
 \end{aligned}$$

2.3.2 ครึ่งชีวิต

ครึ่งชีวิต (half-life, $t_{1/2}$) หมายถึงระยะเวลาที่ธาตุกัมมันตรังสีสลายตัว แล้วเหลือปริมาณเพียงครึ่งหนึ่งจากของเดิม จากสมการ เมื่อนิวไคลด์กัมมันตรังสีสลายตัวนานครึ่งชีวิต ทำให้ $N = N_0 / 2$ สามารถหาค่าครึ่งชีวิตได้สมการ(2.5)ดังนี้

จาก
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$\begin{aligned}
 \text{เมื่อเวลา } t = t_{1/2} : \quad & \frac{N}{2} = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \\
 & \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}} \\
 -t_{1/2} & = \frac{0.693}{\lambda} \tag{2.5}
 \end{aligned}$$

2.3.3 ชีวิตเฉลี่ย

จากลักษณะการสลายตัวแบบสุ่มของนิวไคลด์กัมมันตรังสี ดังนั้น แต่ละนิวไคลด์อาจสลายตัวที่เวลาใดๆ ก็ได้ ผลรวมของเวลาที่ทุกๆ นิวไคลด์กัมมันตรังสีมีชีวิตอยู่ต่อจำนวนนิวไคลด์ทั้งหมด เรียกว่าชีวิตเฉลี่ย (τ) เนื่องจากแต่ละนิวไคลด์กัมมันตรังสีอาจมีชีวิตอยู่ได้ตั้งแต่ศูนย์จนถึงอนันต์ ดังนั้น จากค่าจำกัดความของชีวิตเฉลี่ย เขียนเป็นสมการ(2.6) ได้ดังนี้

$$\begin{aligned}
 \tau & = \frac{t_{1/2}}{0.693} \\
 \tau & = 1.44t_{1/2} \tag{2.6}
 \end{aligned}$$

2.4 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร(Gamma Radiation Interaction)

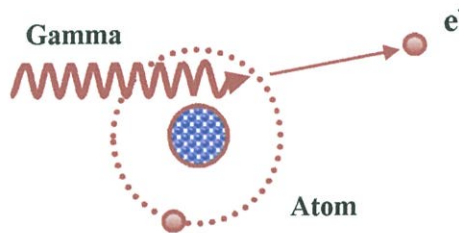
รังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเป็นรังสีก่อไอออนทางอ้อมรูปแบบหนึ่ง การป้องกันอันตรายจากรังสีถือว่ารังสีเอกซ์และรังสีแกมมามีหลักการป้องกันเหมือนกัน รังสีสองชนิดนี้มีข้อแตกต่างตรงที่มีจุดกำเนิดรังสีต่างกัน รังสีแกมมาถูกปล่อยออกมาจากนิวเคลียสที่ไม่เสถียร ส่วนรังสีเอกซ์ถูกปลดปล่อยออกมาจากชั้นของอิเล็กตรอน ซึ่งอันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสารมีอยู่ด้วยกัน 3 ปฏิกิริยา ดังนี้

2.4.1 ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

ปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้น เมื่อรังสีแกมมากระทบกับสสารแล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้แก่อิเล็กตรอนของสสาร ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากอะตอมเรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) พลังงานที่(E_e)ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของแกมมาโฟตอนกับฟังก์ชันงาน ดังสมการ(2.7) และรูปที่ 2.7

$$E_e = h\nu - \phi \quad (2.7)$$

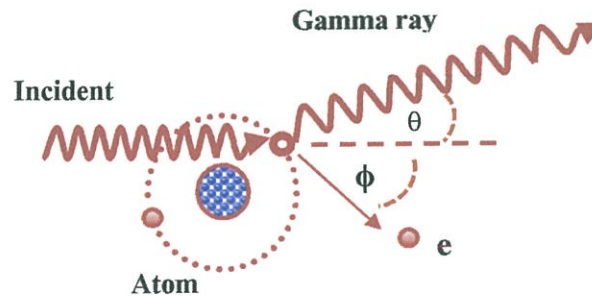
โดยที่ E_e คือ พลังงานจลน์ของโฟตอน(จูล)
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} (จูล.วินาที)
 ν คือ ความถี่ของโฟตอน(รอบ/วินาที)
 ϕ คือ ฟังก์ชันงาน(จูล)



รูปที่ 2.7 แสดงปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

2.4.2 ปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

เมื่อรังสีแกมมาชนกับอะตอมของตัวกลางและถ่ายเทพลังงานบางส่วนให้แก่อิเล็กตรอน กระบวนการนี้เรียกว่า “การกระเจิงแบบคอมป์ตัน” ดังรูปที่ 2.8 อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีพลังงานจลน์เท่ากับผลต่างของรังสีแกมมาที่เข้ามา และพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนดังกล่าว(2.8)



รูปที่ 2.8 แสดงปรากฏการณ์การกระเจิงแบบคอมป์ตัน

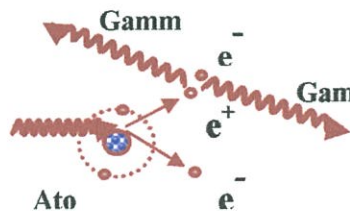
$$\lambda' - \lambda_0 = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta) \quad (2.8)$$

- โดยที่
- λ' คือ ความยาวคลื่นของรังสีหลังการกระเจิง(เมตร)
 - λ_0 คือ ความยาวคลื่นของรังสีก่อนการกระเจิง(เมตร)
 - h คือ ค่าคงที่ของพลังค์มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} (จูล.วินาที)
 - c คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 เมตร/วินาที
 - m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน 9.1×10^{-31} กิโลกรัม
 - $\frac{h}{m_e c}$ คือ ความยาวคลื่นของคอมป์ตัน, λ_c

2.4.3 ปรากฏการณ์การผลิตคู่ (Pair production)

รังสีแกมมาพลังงานสูงๆ ถูกดูดกลืนเมื่อทำปฏิกิริยากับ Coulombic field ของนิวเคลียสแล้วทำให้อิเล็กตรอนและโพสิตรอนเกิดขึ้น เรียก “การผลิตคู่” ปฏิกิริยานี้เป็นตัวอย่างการเปลี่ยนพลังงานเป็นมวล จากนั้นโพสิตรอนที่เกิดขึ้นจะรวมกับอิเล็กตรอนแล้วทำให้เกิดการประลัยคู่ (Annihilation radiation) คือให้โฟตอนออกมา 2-3 ตัว ซึ่งมีพลังงานเท่ากันตัวละ 0.511 MeV เคลื่อนที่ไปในทิศตรงข้าม ปรากฏการณ์การผลิตคู่จะเกิดเมื่อรังสีแกมมาดังรูปที่ 2.9 ซึ่งจะต้องมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับสองเท่าของพลังงานมวลนิ่ง(Rest mass) ของอิเล็กตรอน ดังสมการ 2.9

$$h\nu_{\min} = 2m_0c^2 = 1.022\text{MeV} \quad (2.9)$$



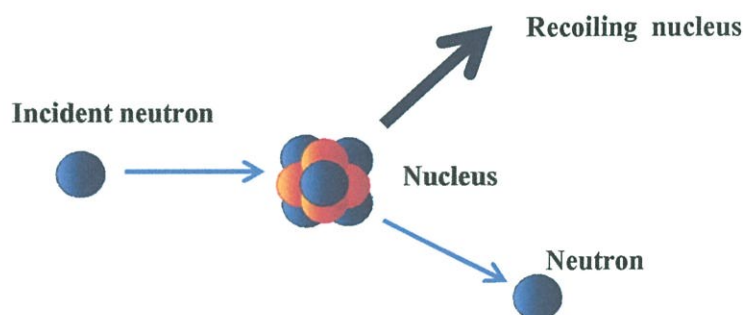
รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์การผลิตคู่

2.5 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร(Neutron Interaction)

นิวตรอน มีสัญลักษณ์ ${}_0^1n$ เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ เป็นกลางทางไฟฟ้าและมีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10^{-13} เมตร และมวลของนิวตรอนประมาณ 1.0086654 amu ซึ่งมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอน 1838 เท่า เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ มันจึงทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสโดยตรง นิวตรอนจะทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของอะตอม โดยมีวิธีการดังนี้

2.5.1 การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

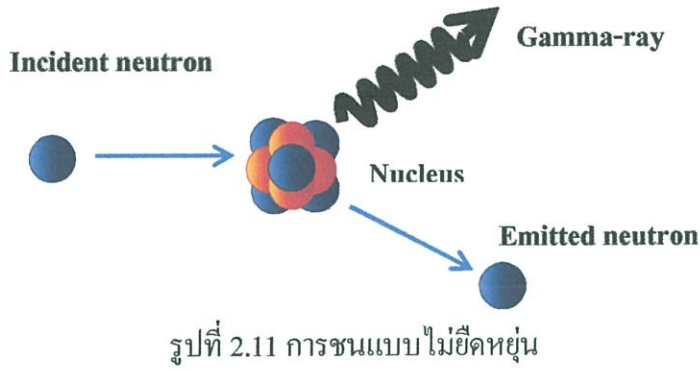
เป็นการกระเจิงแบบที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน เช่น โปรตอนกับนิวตรอน ลักษณะการชนแบบลูกบิลเลียด ไม่มีการเหนี่ยวนำให้เกิดสถานะตื่นเต้นตัวของนิวเคลียส แต่มีการแลกเปลี่ยน เช่น การลดพลังงานนิวตรอนเมื่อชนกับนิวเคลียสของอะตอม ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 การชนแบบยืดหยุ่น

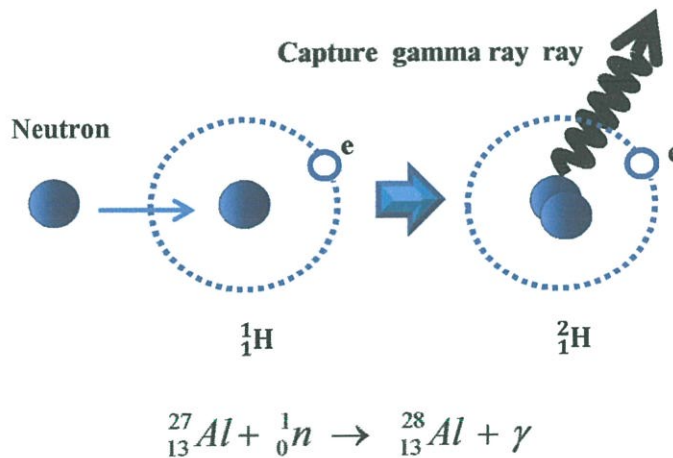
2.5.2 การกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

เป็นการกระเจิงที่เกิดจากอนุภาคที่มีขนาดต่างกันมาก พลังงานจลน์ของอนุภาคก่อให้เกิดสถานะตื่นเต้นของนิวเคลียสที่ถูกชน ซึ่งจะพยายามกลับเข้าสู่สถานะที่เสถียร (ground state) โดยการให้รังสีแกมมาออกมา ดังรูปที่ 2.11



2.5.3 การจับอนุภาคไว้แล้วให้รังสี (radiative capture)

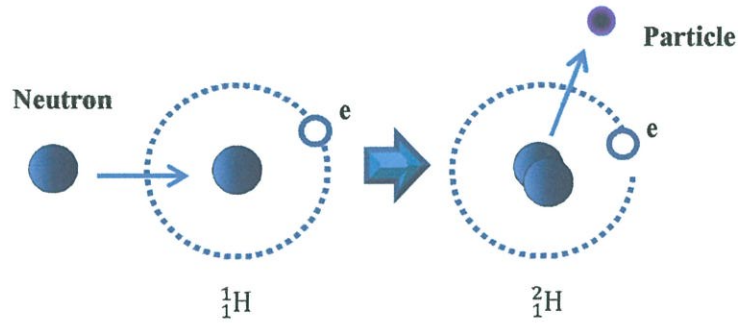
อนุภาคถูกจับไว้แล้วนิวเคลียสมีสถานะตื่นเต้น ต่อมาจึงสลายตัวให้รังสีแกมมาเพื่อลด
 คับพลังงานลงสู่สถานะเสถียร เรียกว่ารังสีที่ปลดปล่อยออกมาเรียกว่า Capture gamma ray ดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 การจับอนุภาคไว้แล้วให้รังสี

2.5.4 การจับอนุภาคแล้วปล่อยอนุภาค (Capture with particle ejection)

เป็นปฏิกิริยาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้น เมื่อนิวเคลียสจับอนุภาคแล้วจะปล่อยอนุภาคอีกตัวหนึ่งออกมา
 นิวเคลียสจะได้อยู่สถานะตื่นเต้น และสลายตัวให้รังสีต่างๆ ออกมาเพื่อสู่สถานะเสถียร เช่น (n,α)



รูปที่ 2.13 การจับอนุภาคไว้แล้วปล่อยอนุภาค

2.6 การกำบังรังสี(Radiation Shielding)

อันตรายจากกัมมันตภาพรังสีขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ปริมาณพลังงานของกัมมันตภาพรังสีต่อมวลที่ถูกรังสี และความสำคัญของอวัยวะ ส่วนที่ถูกกัมมันตภาพรังสี อย่างไรก็ตามถึงแม้กัมมันตภาพรังสีจะมีอันตราย แต่ถ้าถูกนำไปใช้อย่างถูกวิธี ก็จะมีประโยชน์มากมาย จึงมีหลักการป้องกันรังสีที่สำคัญดังนี้

2.6.1 เวลา (Time)

โดยใช้เวลาในการทำงานในบริเวณที่มีรังสีให้สั้นที่สุด เพราะปริมาณกำหนดของรังสีจะแปรตรงกับเวลาของการเผชิญ ปริมาณรังสีสะสมที่แต่ละคนได้รับขึ้นอยู่กับระยะเวลาทำงานภายใต้สภาวะแวดล้อมที่มีสนามรังสี/บริเวณที่มีรังสี ตามสมการ

$$\text{ปริมาณรังสีที่ได้รับ (Dose)} = \text{อัตราการแผ่รังสี (Dose rate)} \times \text{เวลา (time)}$$

2.6.2 ระยะทาง (Distance)

ปริมาณรังสีที่แต่ละคนได้รับขึ้นอยู่กับระยะห่างของต้นกำเนิดรังสี คนที่อยู่ไกลจากต้นกำเนิดรังสีมากกว่าก็จะได้รับปริมาณรังสีน้อยกว่าคนที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดรังสี ปริมาณรังสีที่ได้รับคำนวณได้จากกฎกำลังสองผกผัน(Inverse square law)สมการ(2.10)

จากสูตร

$$I \propto \frac{1}{d^2}$$

ดังนั้น
$$I = \frac{k}{d^2} \quad (2.10)$$

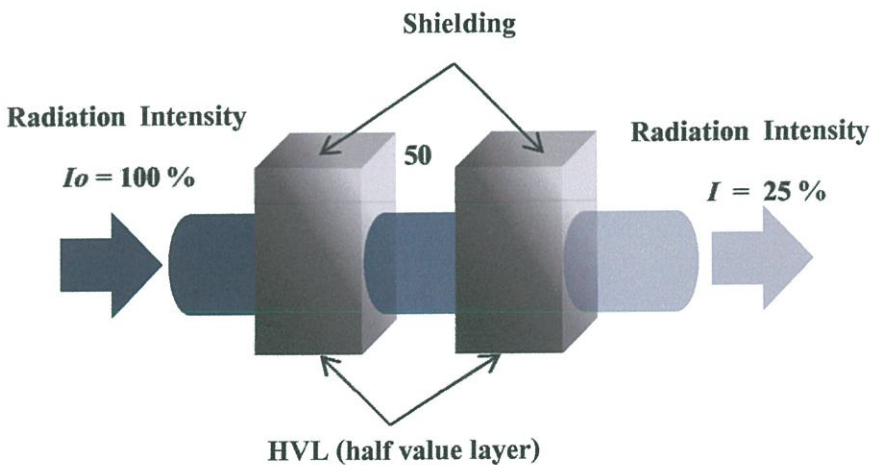
เมื่อ I คือ ปริมาณรังสีที่ได้รับ (โฟตอน/เมตร.วินาที)
 k คือ ค่าคงที่ของต้นกำเนิดรังสี (โฟตอน/เมตร.².วินาที)
 d คือ ระยะทางที่ห่างจากต้นกำเนิดรังสี (เมตร)

ถ้าเป็นต้นกำเนิดรังสีเดียวกัน ค่า k จึงเท่ากัน สามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการ(2.11)

$$k = \frac{I_1}{d_1^2} = \frac{I_2}{d_2^2} \quad (2.11)$$

2.6.3 อุปกรณ์กำบังรังสี (Shielding)

เมื่อไม่สามารถลดระยะเวลา หรือเพิ่มระยะทางในการทำงานกับสารรังสีได้ สิ่งที่ต้องพิจารณาในขั้นต่อไปคือ การใช้เครื่องกำบังรังสี การเลือกใช้เครื่องกำบังรังสีที่เหมาะสมควรเลือกชนิดของเครื่องกำบังให้เหมาะกับชนิดของรังสี พลังงาน และความแรงของต้นกำเนิดรังสี



รูปที่ 2.14 แสดงอัตราการส่งผ่านของรังสีผ่านตัวกลาง

ดังรูปที่ 2.14 เมื่อรังสีผ่านเข้าไปในสสารหรือตัวกลางใดๆ ก็จะมีอันตรกิริยาต่างๆขึ้น โดยความเข้มของรังสีแกมมาก็จะลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล การสูญเสียความเข้มของรังสีในความ

หนา dx ของตัวกลางใดๆ เป็นปฏิกิริยาโดยตรงกับความเข้มของรังสีที่จุดนั้น สำหรับการก่อบังรังสีมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญดังนี้

1. สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น(Linear Attenuation Shielding)

พารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นพิจารณาจากอนุภาคโฟตอนทำอันตรกิริยากับตัวก่อบังรังสีตามสมการ(2.12) ซึ่งเป็นสมการการลดทอนรังสี จากรูปที่ 2.15 มีตัวคอลลิเมเตอร์ทำหน้าที่กำหนดทางเดินของรังสีให้มีลักษณะเป็นเส้นตรง ดังนั้นสัมประสิทธิ์ชนิดนี้จึงไม่คิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันและการผลิตคู่ของโฟตอน นั่นก็คือแนวทางรังสีที่มีลักษณะเป็นเส้นตรงนี้ช่วยลดการกระเจิงและการผลิตคู่ของโฟตอนให้น้อยที่สุด

$$I_B = I_A e^{-\mu x} \quad (2.12)$$

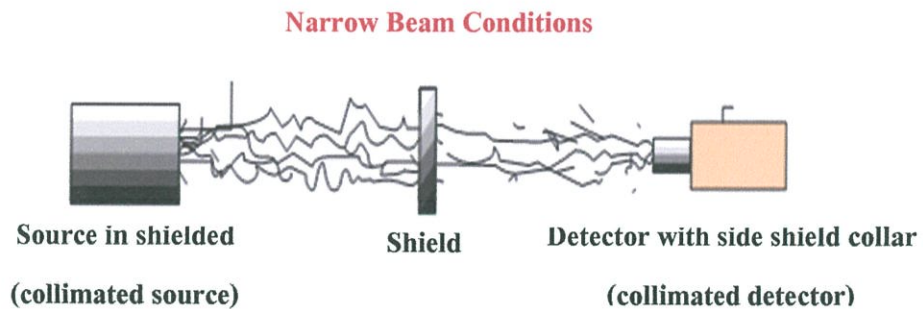
เมื่อ

I_B = อัตราปริมาณรังสีที่ผ่านก่อบังรังสีแล้ว(โฟตอน/ซม.วินาที)

I_A = อัตราปริมาณรังสีเริ่มต้น(โฟตอน/ซม.วินาที)

μ = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น(ซม.⁻¹)

x = ค่าความหนาของก่อบังรังสี (ซม.)



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการเดินทางของรังสีแบบเส้นตรง

2. สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น(Linear Energy Absorption Shielding)

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนการดูดซึมพลังงานเชิงเส้นพิจารณาจากพลังงานของอนุภาคโฟตอน ถูกตัวกำบังรังสีดูดกลืนตามสมการ(2.13) ซึ่งเป็นสมการดูดกลืนพลังงาน จากรูปที่ 2.16 ต้นกำเนิดรังสี ไม่มีคอลลิเมเตอร์ แนวทางรังสีจึงมีลักษณะกระจายตัวเป็นบริเวณกว้าง ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์นี้คิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันและการผลิตคู่ของโฟตอนด้วย ซึ่งเครื่องตรวจจับสามารถตรวจจับโฟตอนที่เกิดการกระเจิงได้ นั่นก็คือถ้าแหล่งกำเนิดรังสีและเครื่องตรวจจับไม่มีคอลลิเมต(collimate) ทำให้บริเวณด้านหน้าและด้านหลังของตัวกำบังรังสีมีการกระเจิงของอนุภาคโฟตอนเกิดขึ้น

$$I_B = I_A e^{-\mu_{en} x} \quad (2.13)$$

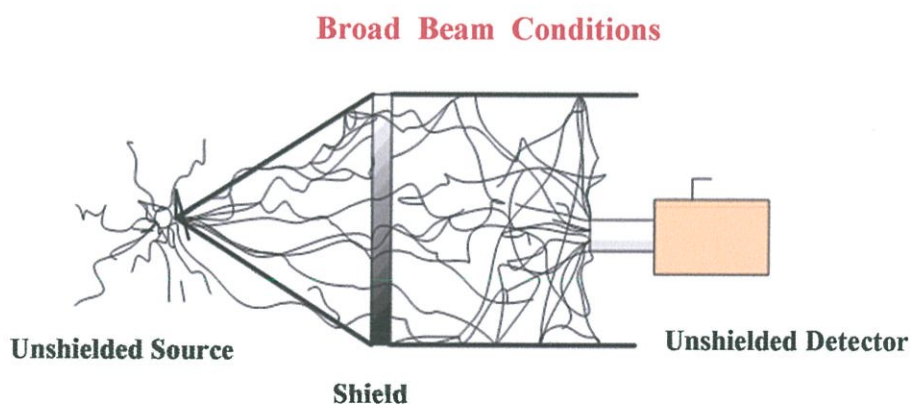
เมื่อ

I_B = อัตราปริมาณรังสีที่ผ่านกำบังรังสีแล้ว(โฟตอน/ซม.วินาที)

I_A = อัตราปริมาณรังสีเริ่มต้น(โฟตอน/ซม.วินาที)

μ_{en} = ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนการดูดกลืนพลังงานเชิงเส้น(ซม.⁻¹)

x = ค่าความหนาของกำบังรังสี (ซม.)



รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะการเดินทางของรังสีแบบวงกว้าง

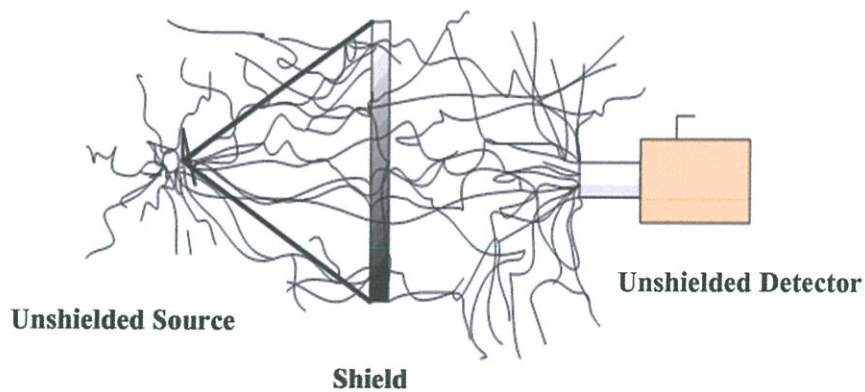
3. ค่าแฟคเตอร์บีในสมการลดทอนรังสีเชิงเส้น(Build up Factor for linear attenuation)

ค่าแฟคเตอร์บีจะถูกนำมาคำนวณในสมการการลดทอนรังสีด้วย ถ้าหากแนวทางรังสีมีลักษณะกระจายเป็นวงกว้างดังรูปที่ 2.17 ทำให้เกิดการกระเจิงและการผลิตคู่ของอนุภาคโฟตอนจนถึงหัววัดรังสี ดังสมการ(2.14) นี้พยายามที่จะประเมินจำนวนที่ถูกต้องของโฟตอนที่กระจายไปถึงเครื่องตรวจจับ (ประมาณการที่ใกล้เคียงที่สุด) โดยเพิ่มปัจจัยการกระเจิงของคอมป์ตันและการผลิตคู่ของโฟตอน

$$I_B = I_A * b * e^{-\mu x} \quad (2.14)$$

- เมื่อ
- I_B = อัตราปริมาณรังสีที่ผ่านกำบังรังสีแล้ว(โฟตอน/ซม.วินาที)
 - I_A = อัตราปริมาณรังสีเริ่มต้น(โฟตอน/ซม.วินาที)
 - b = buildup factor สำหรับต้นกำเนิดรังสี 1 ระดับพลังงาน
 - μ = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (ซม.⁻¹)
 - x = ค่าความหนาของกำบังรังสี (ซม.)

Using Buildup Factor



รูปที่ 2.17 แสดงลักษณะการเดินทางของรังสีคิดค่าแฟคเตอร์บี

4. ค่าแฟคเตอร์บีหลายระดับพลังงาน(Build up for Multiple Photon Energies)

เมื่อแหล่งกำเนิดรังสีมีหลายระดับพลังงาน จะดั่งสมการ(2.15) ซึ่งสูตรนี้พยายามที่จะประเมินจำนวนที่ถูกต้องของโฟตอนกระจายไปถึงเครื่องตรวจจับ (ประมาณการที่ใกล้เคียง)โดยเพิ่มปัจจัยการกระเจิงแบบคอมป์ตันและการผลิตคู่ของโฟตอน

$$I_B = I_A * (b_1 * f_1 * e^{-\mu_1 x} + b_2 * f_2 * e^{-\mu_2 x} + b_3 * f_3 * e^{-\mu_3 x} \dots + b_i * f_i * e^{-\mu_i x}) \quad (2.15)$$

เมื่อ

- I_B = อัตราปริมาณรังสีที่ผ่านกำบังรังสีแล้ว(โฟตอน/ชม.วินาที)
- I_A = อัตราปริมาณรังสีเริ่มต้น(โฟตอน/ชม.วินาที)
- b_i = buildup factor ของของต้นกำเนิดรังสีที่มีหลายระดับพลังงาน
- μ_i = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นของแต่ละระดับพลังงาน(ชม.⁻¹)
- f_i = ส่วนหนึ่งของ I_A ในแต่ละระดับพลังงาน (MeV) = $\frac{e_i * n_i}{\sum_i e_i * n_i}$
- n_i = ความน่าจะเป็นการสลายตัวของอะตอมในแต่ละระดับพลังงาน
- x = ค่าความหนาของกำบังรังสี มีหน่วยเป็น (ชม.)

5. mean free paths (R)

mean free paths คือ ระยะทางเฉลี่ยที่อนุภาคเดินทางในวัสดุกำบังรังสีก่อนการเกิดอันตรกิริยาดั่งสมการ(2.16)

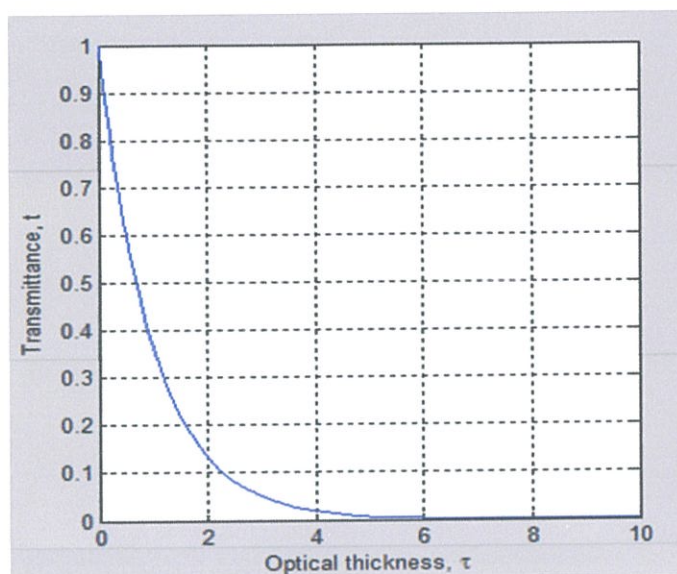
$$1 \text{ mean free path} = \mu x = \ln \frac{I_B}{I_A} \quad (2.16)$$

เมื่อ

- I_B = อัตราปริมาณรังสีที่ผ่านกำบังรังสีแล้ว(โฟตอน/ชม.วินาที)
- I_A = อัตราปริมาณรังสีเริ่มต้น(โฟตอน/ชม.วินาที)
- μ = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น(ชม.⁻¹)
- x = ความหนาของกำบังรังสี(ชม.)

6. อัตราการส่งผ่าน(Transmittance, T)

อัตราการส่งผ่านของรังสีคือจากอัตราส่วนปริมาณ โฟตอนที่ผ่านมาตัวกำบัง (I_B) ต่อปริมาณโฟตอนจากต้นกำเนิดโดยตรง (I_A) ดังสมการ(2.17) จากความสัมพันธ์แสดงให้เห็นว่า เมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนาเพิ่มขึ้นจะทำให้อัตราการส่งผ่านของรังสีนั้นลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียล ดังรูปที่ (2.18)



รูปที่ 2.18 กราฟแสดงอัตราการส่งผ่านของรังสีที่ความหนาของตัวกลางใดๆ

$$T = \frac{I_B}{I_A} \quad (2.17)$$

เมื่อ I_B = อัตราปริมาณรังสีที่ผ่านกำบังรังสีแล้ว (โฟตอน/ชม.วินาที)

I_A = อัตราปริมาณรังสีเริ่มต้น (โฟตอน/ชม.วินาที)

T = อัตราการส่งผ่านของรังสี

7. Half Value Layer (HVL)

Half Value Layer คือความหนาของเครื่องกำบัง ที่ใช้ในการลดความเข้มของรังสีเหลือเพียงครึ่งหนึ่งเมื่อเทียบกับไม่มีตัวกำบัง สามารถพิสูจน์ได้จากสมการลดทอนความเข้มรังสีดังสมการ(2.18)

เมื่อ

$$I_B = I_A e^{-\mu x}$$

$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{1}{2} = e^{-\mu x}$$

$$e^{-\mu x} = 2$$

$$\mu x = \ln 2$$

$$x = \ln \frac{2}{\mu}$$

ดังนั้น

$$HVL = \ln \frac{2}{\mu} \quad (2.18)$$

8. Tenth Value Layer (TVL)

Tenth Value Layer คือความหนาของเครื่องกำบัง ที่ใช้ในการลดความเข้มของรังสีลงสิบเท่า เมื่อเทียบกับไม่มีตัวกำบัง สามารถคำนวณได้จากสูตรสามารถพิสูจน์ได้จากสมการลดทอนความเข้มรังสีดังสมการ(2.19)

เมื่อ

$$I_B = I_A e^{-\mu x}$$

$$\frac{I_B}{I_A} = \frac{1}{10} = e^{-\mu x}$$

$$e^{-\mu x} = 10$$

$$\mu x = \ln 10$$

$$x = \ln \frac{10}{\mu}$$

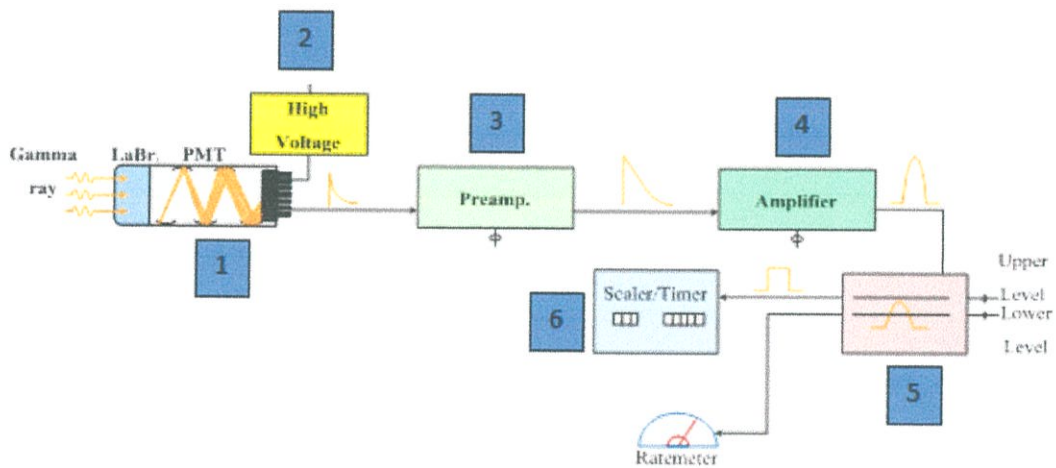
ดังนั้น

$$TVL = \ln \frac{10}{\mu} \quad (2.19)$$

2.7 ระบบนับวัดรังสี(Radiation Counting System)

เป็นกระบวนการนำผลที่ได้จากหัววัดรังสีไปสร้างเป็นข้อมูลการวัดและวิเคราะห์ผลการวัดรังสีเพื่อแสดงผลในหน่วยวัดรังสีมาตรฐานประกอบด้วย 2 ส่วนย่อยคือ 1.อุปกรณ์การวัดรังสี 2.การแสดงผลการวัดรังสี

หลักการทำงานของเครื่องวัดรังสีโดยส่วนมากแล้วเครื่องมือวัดทางรังสีจะประกอบด้วย 2 ส่วนหลักๆคือส่วนที่เป็นหัววัดรังสี(Detector) และส่วนของระบบนับวัดรังสีมีรายละเอียดต่างๆในรูปที่ 2.19 ดังนี้



รูปที่ 2.19 วงจรการทำงานของระบบนับวัดรังสี

1. หัววัดรังสี

จะทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์พื้นฐานที่มีความสำคัญในการตรวจจับและวัดการปรากฏของรังสี ซึ่งกลไกการตรวจจับรังสีของหัววัดรังสีจะอาศัยผลลัพท์จากการทำอันตรกิริยาระหว่างรังสีกับสสารที่รังสีเดินทางผ่านสำหรับผลลัพท์ที่นำมาประยุกต์ทำเป็นหัววัดรังสีสามารถแบ่งแยกได้ดังนี้

- เกิดการแตกตัวเป็นไอออนของอะตอมตัวกลาง
- เกิดการประกายแสงวาบของอะตอมตัวกลาง
- เกิดการทำปฏิกิริยาทางเคมี
- เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์ของตัวกลาง
- เกิดเป็นร่องรอยของตัวกลาง
- เกิดความร้อนสะสมในตัวกลาง

1.1 ผลึกสารเรืองแสงแบบของแข็ง(Crystal Scintillation Detector)

หัววัดรังสีชนิดเรืองแสงประเภทของแข็งที่นิยมใช้ในงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ได้แก่ผลึก NaI(Tl), CsI, LaBr₃(Ce) เป็นต้น ซึ่งผลึกเรืองแสงที่เหมาะสมที่จะนำมาทำหัววัดรังสีควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

- 1.เปลี่ยนพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้ในผลึกให้เป็น visible light ได้อย่างมีประสิทธิภาพ
- 2.โฟตอนแสงที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วน โดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ถูกดูดกลืนไว้
- 3.การเรืองแสงที่เกิดขึ้นควรเกิดระยะเวลาสั้นๆเพื่อที่จะสามารถวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมด

ผลึก NaIบริสุทธิ์จะเรืองแสงในสภาวะที่เย็นจัดซึ่งใช้ในโตรเจนเหลวควบคุมอุณหภูมิ ดังนั้น เพื่อให้ผลึก NaIเรืองแสงได้ในอุณหภูมิห้อง ได้จึงต้องเติมสารปนเปื้อน (impurity) เข้าไปเพื่อไปรบกวนโครงสร้างของผลึกทำให้เกิดการเรืองแสงได้ง่ายสารปนเปื้อนที่นิยมใช้คือ thallium(Tl)

ผลึก NaI(Tl) จะถูกสร้างขึ้นโดยการหลอม NaIและเติม thallium ลงไปเล็กน้อย (0.1-0.4% mole) จากนั้นนำไปอบในเตาภายใต้อุณหภูมิที่กำหนด ผลึก NaI(Tl) จะไวในการดูดความชื้นจากอากาศ ดังนั้นในการนำเอาผลึกมาใช้จึงบรรจุอยู่ในภาชนะอะลูมิเนียมที่ปิดผนึกไม่ให้อากาศเข้าเนื่องจาก อะลูมิเนียมจะดูดกลืนรังสีอัลฟาและรังสีเบตาไว้ได้จึงเป็นผลให้หัววัดรังสีNaI(Tl) โดยทั่วไปใช้วัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเท่านั้น

โดยทั่วไปผลึกNaI(Tl) จะประกอบติดกับหลอด PM (รูปที่2.20) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนโฟตอนแสงที่ได้จากผลึก NaI(Tl) ให้เป็นสัญญาณ ไฟฟ้า

รูปที่2.20 ภาพหัววัดรังสีที่ประกอบด้วยผลึก NaI(Tl) และหลอด PM



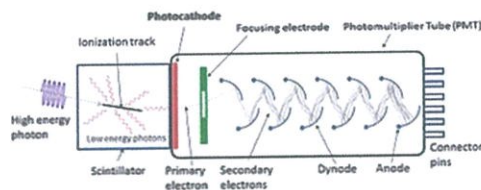
1.2ตัวตรวจวัดแสงทวีคูณแบบหลอดสุญญากาศ(Photomultiplier tubes: PMT)

ตรวจวัดแสงหรือรังสีแบบทวีคูณทางแสงนี้เป็นหัววัดหลอดสุญญากาศที่ระดับ 10^{-4} Pa ประกอบด้วยช่องหน้าต่างที่ให้แสงหรือรังสีนั้นผ่านเข้าสู่ส่วนของแผ่นคาโทดที่สามารถปรับโพกัสแสงได้เป็นอย่างดีโดยมีการออกแบบอย่างพิเศษเพื่อเพิ่มจำนวนของประจุลบให้มีการเพิ่มอย่างทวีคูณด้วยการใช้แผ่นโลหะไดโนดตังแสดงในรูปที่ 2.21(ข) เมื่อแสงตกกระทบกับแผ่นคาโทดที่เป็นขั้วลบจะมีการดูดกลืนพลังงานแล้วประจุลบก็จะวิ่งผ่านไปยังแผ่นไดโนดขั้วที่ 1 ต่อจากนั้นก็จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าอีกครั้งให้อิเล็กตรอนตกกระทบกับแผ่นไดโนดที่ 2 เป็นอย่างนี้ต่อไปจนถึงแผ่นโลหะได

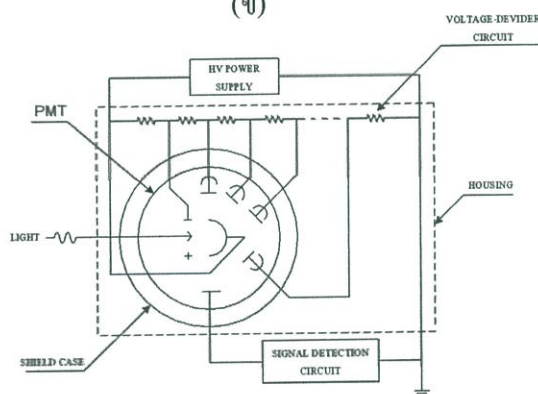
โนดแผ่นสุดท้าย นั่นคือแผ่นแอนโนดที่เป็นขั้วบวกเช่นเดียวกัน โดยแต่ละแผ่นไดโนดนี้จะต่อเข้ากับวงจรแบ่งแรงดัน ที่มีการเชื่อมต่อกันอย่างอนุกรมเรียกว่าสายโซ่ไดโนด Dynode chain ดังแสดงในรูปที่ 2.21(ค) ซึ่งประจุลบในลำดับที่สอง และลำดับอื่น ๆ เกิดการเพิ่มจำนวนอย่างทวีคูณได้ถึง 10^8 เท่า โดยที่ตัวตรวจวัดชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์ที่ให้ค่ากระแสสูงมากทำให้มีอัตราการขยายสัญญาณที่ค่อนข้างสูง และมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำ อีกทั้งมีการตอบสนองของสัญญาณความถี่ที่สูง โดยโครงสร้างของตัวตรวจวัดนี้จะเป็นหลอดแก้วทรงกระบอกดังแสดงในรูปที่ 2.21(ก) โดยตรงส่วนด้านหน้าจะทำการออกแบบให้แสงสามารถผ่านเข้าสู่ด้านหน้าต่างที่รับแสงจะมีการปรับโฟกัสแสงให้ตกกระทบกับแผ่นคาโทด และแผ่นไดโนด



(ก)



(ข)



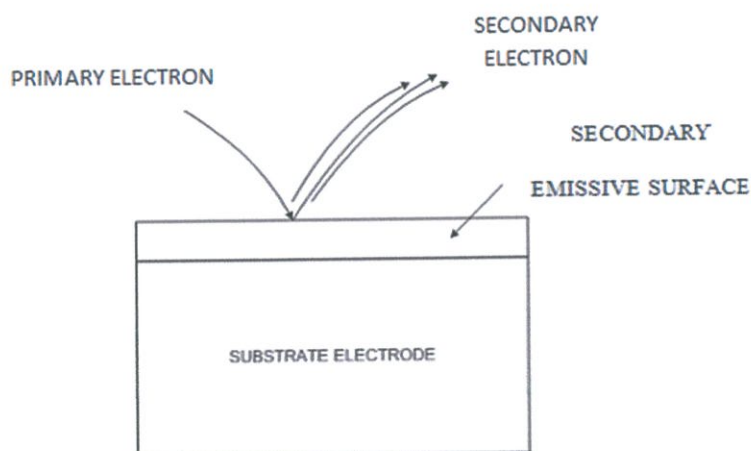
(ค)

รูปที่ 2.21 โครงสร้างของหัววัดรังสี

(ก) หัววัดรังสี (ข) ทวีคูณด้วยหลอดสุญญากาศ (ค) วงจรแบ่งแรงดันกับสายโซ่ ไดโนด Dynode chain การทวีคูณของอิเล็กตรอน

การออกแบบการทำงานของหัววัดรังสีแบบทวีคูณทางแสง จะทำการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานมากที่สุดเพื่อให้การกระจายศักย์ค่าไฟฟ้าได้ทั่วทั้งโครงสร้างของแผ่นอิเล็กโทด เมื่อวัสดุที่แผ่นคาโทดได้รับการดูดกลืนพลังงานของแสงหรือรังสีที่ตกกระทบเพียงพอแล้วอิเล็กตรอนก็จะหลุดออก ซึ่งจากระบวนการทวีคูณจากแผ่นไดโนดแผ่นแรกไปยังแผ่นไดโนดอื่นๆต่อไป ดังนั้นจะมีการขยายกระแสจาก 10 เท่าจนถึง 10⁸ เท่า เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปจนถึงแผ่นแอนโนด โดยปกติแล้ววัสดุที่ใช้สำหรับการดูดกลืนในลำดับที่สองของแผ่นไดโนด จะใช้สารประกอบ อัลคาไลด์ แอนติโมนี

เบอริลเลียม ออกไซด์ (BeO) แมกนีเซียม ออกไซด์ (MgO) แกลเลียม ฟอสไฟด์ (GaP) และ แกลเลียม อาร์ซีไนด์ ฟอสไฟด์ (GaAsP) ซึ่งวัสดุเหล่านี้ ได้ถูกเคลือบลงบนแผ่นตัวนำไฟฟ้าที่ทำจากโลหะนิกเกิล สแตนเลส หรือโลหะอัลลอยด์ของ ทองแดง-เบอริลเลียม ดังแสดงในรูปที่ 2.22 ที่เป็นภาคตัดขวางของแผ่นโลหะไดโอดลำดับที่สองที่มีการคายพลังงาน หรือการสะท้อนให้อิเล็กตรอนเกิดการทวีคูณ



รูปที่ 2.22 ภาคตัดขวางของแผ่นโลหะไดโอดลำดับที่สองในการคายพลังงาน

ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเริ่มต้น (Primary electron) ที่มีพลังงานขีดเริ่ม (E_p) ตกกระทบยังสารเคลือบที่ผิวหน้าของแผ่นไดโอดทำให้เกิดการสะท้อนหรือการคายพลังงานของอิเล็กตรอนในลำดับที่สอง (Secondary electron) ในที่นี้ค่าของ δ เป็นจำนวน ของอิเล็กตรอนในลำดับที่สอง (Secondary electron) ต่ออิเล็กตรอนเริ่มต้น (Primary electron) เรียกกระบวนการนี้ว่า อัตราส่วนของการสะท้อนลำดับที่สอง โดยปกติแล้วทางอุดมคติการขยายกระแส หรือผลการทวีคูณของตัวตรวจวัดแสงทวีคูณแบบหลอดสุญญากาศ จะมีจำนวนของแผ่นไดโอดเป็นจำนวน (n)แผ่น และมีอัตราส่วนของการสะท้อนวัสดุที่ใช้สำหรับการคูณในลำดับที่สอง δ :ratio เป็น δ^n เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างแผ่นไดโอดจะมีประโยชน์ก่อให้เกิดอัตราการขยายกระแส การตอบสนองทางเวลา และความแตกต่างของความเป็นเชิงเส้น จะขึ้นกับจำนวนของแผ่นไดโอด และปัจจัยอื่น ๆ โดยปกติแล้วชนิดของแผ่นไดโอดที่เหมาะสมจะขึ้นกับการประยุกต์ใช้งาน

ในส่วนของแผ่นแอโนดของตัวตรวจวัดแสงทวีคูณแบบหลอดสุญญากาศ เป็นขั้วไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการเก็บสะสมอิเล็กตรอนลำดับที่สอง เพื่อให้เกิดการทวีคูณของอิเล็กตรอนในลำดับอื่นๆอีกใน

กระบวนการที่มีการเชื่อมต่อของแผ่นไดโนดแบบต่อเนื่องจนถึงแบบหลายระดับ และกระแสของอิเล็กตรอนที่ไหลออกสู่ภายนอก

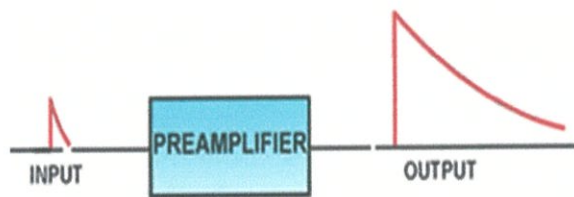
ในการออกแบบขั้วแอโนดจำเป็นที่จะต้องออกแบบอย่างประณีตเพื่อให้เหมาะสมกับแนววิถีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน โดยปกติขั้วโลหะแอโนดจะทำการออกแบบให้เป็นทรงกระบอก, แผ่น, หรือต่อเป็นโครงข่าย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญของการออกแบบขั้วแอโนดนี้จะต้องคำนึงถึงความสามารถของการกระจายศักย์ค่าไฟฟ้าที่แตกต่างกันระหว่างแผ่นไดโนดแผ่นสุดท้ายกับขั้วแอโนด เพื่อเป็นการป้องกันผลกระทบของช่องว่างในการเก็บประจุ และปริมาณของกระแสเอาต์พุตที่ปรากฏขึ้นเป็นจำนวนมาก

2. แหล่งจ่ายแรงดันสูง (High voltage power supply: HVPS)

แหล่งจ่ายแรงดันสูง (High voltage power supply: HVPS) เป็นส่วนที่ทำหน้าที่จ่ายแรงดันบวกหรือลบ ให้กับหัววัด โดยส่วนใหญ่จะเป็นแรงดันสูงบวก

3. Preamplifier

เมื่อรังสีเข้ามาตกกระทบหัววัดรังสีทำให้มีการสร้างสัญญาณไฟฟ้าเกิดขึ้น สัญญาณที่ได้ส่วนมาก จะมีขนาดเล็กและหัววัดรังสีส่วนมากจะมี output impedance ค่อนข้างสูงทำให้จำเป็นต้องหาอุปกรณ์ที่มาเชื่อมต่อที่มี impedance ที่สัมพันธ์กันมิฉะนั้นจะเกิดการบิดเบี้ยวของรูปสัญญาณเป็นเหตุให้ประสิทธิภาพของการนับวัดเสียไป (รูปที่ 2.23)



รูปที่ 2.23 การทำงานของ preamplifier

ดังนั้น preamplifier ที่ต่อกับหัววัดรังสี จึงมีหน้าที่

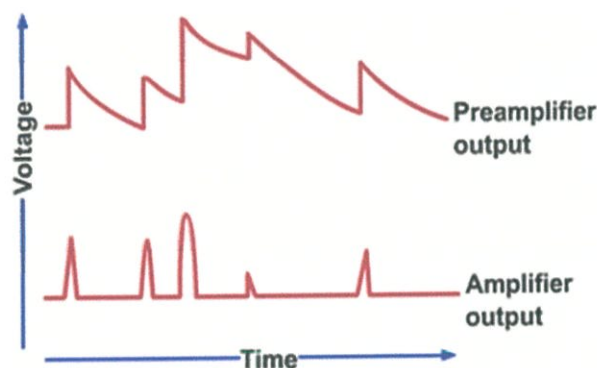
1. ขยายสัญญาณ (ถ้าจำเป็น) เนื่องจากสัญญาณที่ได้จากหัววัดรังสีจะเล็กมาก
2. ทำให้ impedance ระหว่างหัววัดรังสีกับ อุปกรณ์อื่น ๆ มีความใกล้เคียงกัน
3. ปรับรูปร่างสัญญาณให้เหมาะสมเพื่อที่จะนำไปวิเคราะห์ต่อไป

Preamplifier ที่ดีควรทำหน้าที่ขยายสัญญาณ โดยความสูงของสัญญาณจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนสัญญาณที่มาจากหัววัดรังสี นั่นคือความสูงของสัญญาณสัมพันธ์โดยตรงกับพลังงานของรังสีที่นับวัดได้นั่นเองเพื่อที่จะให้การขยายสัญญาณได้ผลดีตามที่ต้องการ preamplifier ควรอยู่ใกล้กับหัววัดรังสีมากที่สุดทั้งนี้เพื่อเป็นการทำให้อัตราส่วนระหว่างสัญญาณและ noise (signal to noise ratio: S/N) สูงสุด นั่นคือต้องขยายสัญญาณก่อนที่จะมี noise จากสายเคเบิลมารบกวน และถ้าสายเคเบิลยาวมาก จะทำให้เกิด noise รบกวนมากสัญญาณที่ได้จะมีการบิดเบี้ยว ดังนั้นปัจจุบัน preamplifier จึงประกอบรวมเป็นชิ้นเดียวกับหัววัดรังสี สำหรับเครื่องแกมมาคาเมรา หัววัดรังสีและ preamplifier จะอยู่ใกล้กันมากที่สุดเพื่อให้ spatial resolution และ image sharpness ดี

4. Amplifier

เป็นส่วนที่เชื่อมต่อจาก preamplifier โดยมีหน้าที่หลักคือ

1. ขยายสัญญาณที่ได้จาก preamplifier ซึ่งยังถือว่าเป็นขนาดเล็ก ให้มีความสูงพอเหมาะสำหรับที่จะส่งไปยังอุปกรณ์ส่วนอื่นเช่น pulse height analyzer เป็นต้น
2. เนื่องจากสัญญาณที่ได้จาก preamplifier จะลดลงอย่างช้าๆ (รูปที่ 2.24)



รูปที่ 2.24 แสดงถึงสัญญาณที่ได้จาก preamplifier

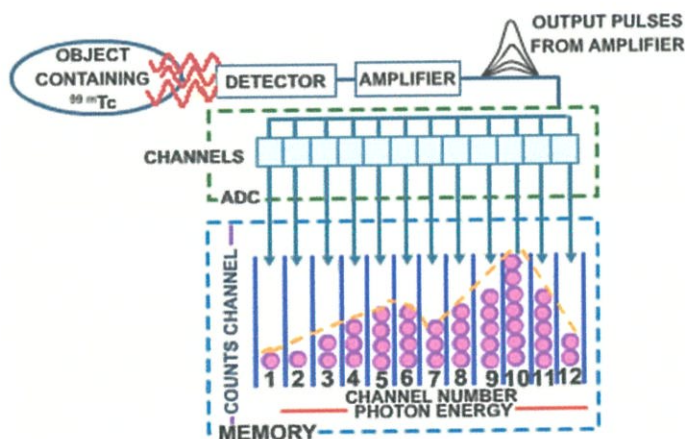
ทำให้เกิดมีการซ้อนทับ (pile up) ของสัญญาณในกรณีที่มีสัญญาณถี่มากจากแหล่งกำเนิดรังสีมีค่า high count rate ดังนั้น amplifier จะทำหน้าที่ปรับเปลี่ยนให้สัญญาณมีรูปร่างแคบลง นั่นคือ เปลี่ยนจากรูปร่างคล้ายสามเหลี่ยม กลายเป็นรูปร่าง แบบ Gaussian ทำให้สามารถแยกแต่ละสัญญาณออกจากกันได้ ในการตั้งค่า amplifier จะใช้ค่า gain factor ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้มีความสูงตามที่ต้องการ โดยความสูงของสัญญาณต้องสัมพันธ์กับพลังงานของรังสีที่ทำกรนับวัด

ทำให้เกิดการซ้อนทับของสัญญาณ amplifier จึงช่วยปรับเปลี่ยนสัญญาณ ให้มีรูปร่างเหมาะสม สามารถแยกสัญญาณออกจากกันได้ชัดเจน

5. Pulse-Height Analyzer (PHA)

เมื่อรังสีตกกระทบหัววัดรังสี ความสูงของสัญญาณ (voltage amplitude) ที่ได้จาก amplifier จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนของพลังงานที่ถูกดูดกลืนในหัววัดรังสี และจากส่วน amplifier สัญญาณที่ได้ออกมาจะสามารถบอกพลังงานของรังสีได้จากความสูงของสัญญาณ ดังนั้นการคัดเลือกสัญญาณที่จะนับวัดก็คือ ดูจากความสูงของสัญญาณนั่นเอง ซึ่งทำให้แยก background และ scatter ออกจากรังสีที่ต้องการจะวัดค่าได้ เครื่องที่ใช้คัดเลือกสัญญาณนี้เรียก pulse-height analyzer ซึ่งอุปกรณ์ส่วนนี้จะนับวัดเฉพาะ สัญญาณที่ออกจากส่วน amplifier ที่มีความสูงอยู่ใน ช่วงที่กำหนดหรืออยู่ใน “channel” ถ้า PHA นี้ สามารถทำงานวัดสัญญาณได้ที่ละพลังงานหรือ channel จะเรียกว่า single channel analyzer (SCA) ในขณะที่ PHA ที่สามารถวัดความแตกต่างของความสูงของสัญญาณ หรือวัดได้ครั้งละหลาย channel ในเวลาเดียวกันจะเรียก PHA ชนิดนี้ว่า multichannel analyzer (MCA)

MCA ทำหน้าที่คล้ายกับนำเอา SCA หลายชิ้นมาต่อกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25 และ รูปที่ 2.26 ทำให้เห็นรูปสัญญาณทั้งหมด นั่นคือสามารถเห็น spectrum ของรังสีที่เข้ามาตกกระทบกับหัววัดรังสีได้ทั้งหมดในเวลาเดียวกัน



รูปที่ 2.25 ภาพแสดงหลักการทำงานของ multichannel analyzer (MCA)



รูปที่ 2.26 เครื่อง multichannel analyzer

6. หน่วยแสดงผล

- Scaler and Timers สัญญาณที่ผ่านการคัดเลือกจาก SCA จะถูกส่งมาบันทึกค่าเป็นตัวเลขด้วยเครื่อง scaler โดยมี timer เป็นตัวควบคุมเวลาในการนับวัดหรืออาจใช้

- Analog ratemeter เป็นเครื่องสำหรับแสดงค่านับวัดเฉลี่ยต่อหน่วยเวลา โดยค่านับวัดที่แสดงบนจอจะแปรตามค่าเฉลี่ยของสัญญาณที่ได้รับ

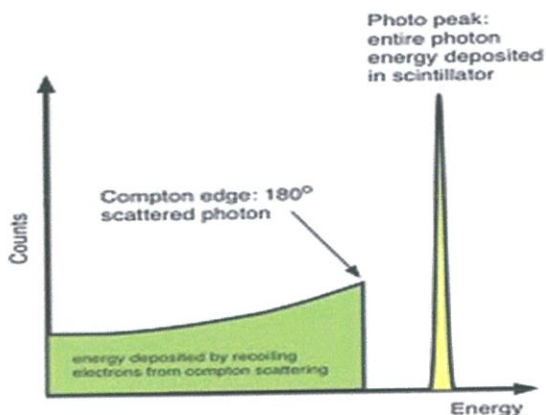
- High voltage power supplies ทำหน้าที่จ่ายความต่างศักย์ไฟฟ้าให้แก่หลอด PM เพื่อทำการขยายสัญญาณ ซึ่งส่วน high voltage (HV) จะแปลงไฟฟ้ากระแสสลับ (AC) ให้เป็นกระแสตรง (DC) การเปลี่ยนแปลงของ HV มีผลกระทบต่อความสูงของสัญญาณอย่างมากเนื่องจากการเปลี่ยนแปลง HV เพียง 1% ทำให้ความสูงของสัญญาณที่ได้จากหลอด PM เปลี่ยนแปลงไป 10% การเปลี่ยนแปลงของ HV อาจมีผลมาจากอุณหภูมิที่ไม่คงที่ ความแปรปรวนของกระแสไฟฟ้าที่ได้จากแหล่งกำเนิด ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับเครื่องนับวัดควรผ่านการปรับกระแสไฟฟ้าให้คงที่มาแล้ว

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าในการคัดเลือกพลังงานของรังสีที่จะนับวัดนั้น PHA จะคัดเลือกจากความสูงของสัญญาณที่เข้ามา โดยมีปุ่ม discriminator เป็นตัวกำหนดพลังงานที่ต้องการนับวัด ซึ่งความสูงของสัญญาณจะสอดคล้องกับพลังงานของรังสี ดังนั้นในการวัดพลังงานจะหมายถึง การหาแถบพลังงาน (energy spectrum) ซึ่งจะได้จากรังสีเข้ามาตกกระทบกับหัววัดรังสี

- Energy Spectrum

โดยสรุป energy spectrum จะหมายถึง พลังงานของรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาที่ปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดรังสีและเข้ามาทำปฏิกิริยาภายในผลึกเรืองแสง ส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาแบบ photoelectric effect และถูกดูดกลืนไว้ในผลึกจนหมดซึ่งจะเรียกส่วนที่สูงที่สุดใน energy spectrum ว่า photo peak นอกจากนี้ energy spectrum จะประกอบด้วยส่วนที่เกิดจากปฏิกิริยา Compton scattering ที่รังสีถูกดูดกลืนไว้บางส่วน หรือมีบางส่วนเบี่ยงเบนออกไปและเกิด ปฏิกิริยา photoelectric effect ภายหลัง

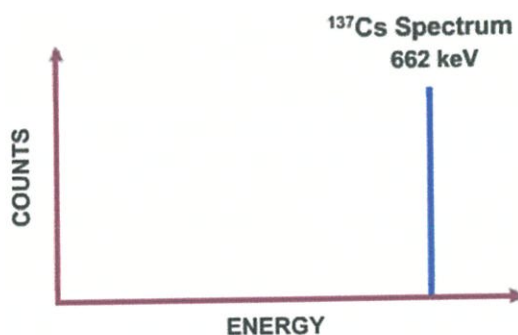
ผังรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 energy spectrum

- Energy spectrum

จะเป็นกราฟที่สร้างขึ้น โดยแกน X จะเป็นพลังงานของรังสีหรือเป็นความสูงของสัญญาณและแกน Y เป็นจำนวนค่านับวัดที่เข้ามาต่อหน่วยเวลา สำหรับหัววัดรังสีในอุดมคติจะต้องให้ photo peak เป็นเส้นตรงเพียงเส้นเดียวเนื่องจากพลังงานรังสี ถูกดูดกลืนไว้หมดทันทีเมื่อเข้ามาทำปฏิกิริยา (ผังรูปที่ 2.28) และมีความสูงเท่ากับพลังงานของรังสี



รูปที่ 2.28 Energy spectrum

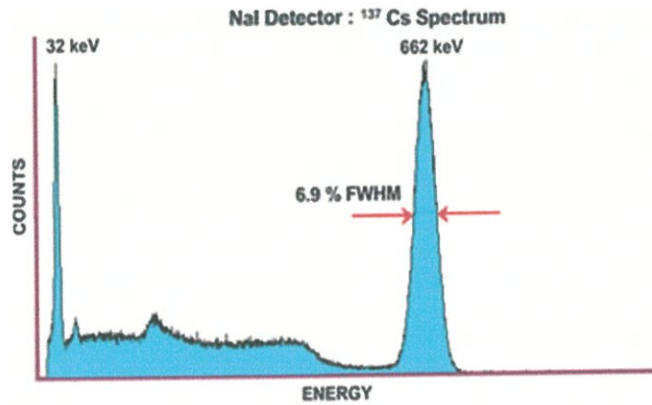
แต่ในความเป็นจริง photo peak จะมีลักษณะคล้ายระฆังคว่ำ (Gaussian) ดังแสดงในรูปที่ 2.29 ทั้งนี้ขึ้นกับ

1. การแปรปรวนของจำนวนโฟตอนแสงที่เกิดขึ้นในหัววัดรังสี
2. ความแปรปรวนจากจำนวนโฟตอนและที่นับวัดได้ ที่ photocathode ของหลอด PM

3. ความแปรปรวนของจำนวน photoelectron ที่ออกจาก photocathode

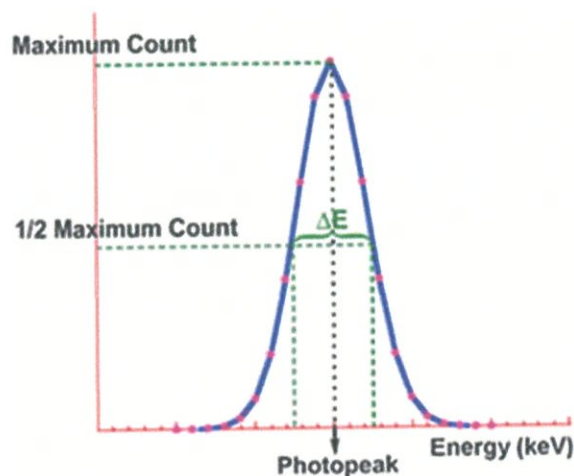
4. ความไม่คงที่ของ HV ที่จ่ายให้กับ หลอด PM

นอกจากนี้ที่บริเวณพลังงานต่ำจะมีการเกิด scattering ในผลึก และหรือ scattered photon ไม่ถูกดูดกลืนในผลึก หรือ โฟตอนดูดกลืนบางส่วนในผลึก (incomplete absorption)



รูปที่ 2.29 Energy spectrum ของ ¹³⁷Cs

ดังนั้น energy resolution จึงเป็นปัจจัยที่บอกลักษณะความสามารถของระบบนับวัดในการแยก รายละเอียด ของพลังงานต่างๆออกจากกันได้ โดยแยกตามพลังงานหรือระยะห่างของพลังงาน photo peak ยิ่งกว้าง บ่งบอกลักษณะความสามารถในการแยกพลังงานได้ไม่ดี energy resolution สามารถหาได้จากการคำนวณ Full Width at Half Maximum (FWHM) ของ photo peak (ดังรูปที่ 2.30)



รูปที่ 2.30 การหาค่า energy resolution จาก Full-Width-at-Half-Maximum (FWHM)

Energy Resolution

การหา FWHM ทำได้โดยวัดค่านับวัดสูงสุดที่ยอดของ photo peak และอ่านค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งนี้ (energy ที่ photo peak) จากนั้นหาค่าตำแหน่งของพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของค่านับวัดของ photo peak ซึ่งค่าพลังงานที่ได้จะมี 2 ค่าคือค่าที่อยู่ด้านซ้ายและด้านขวาของ photo peak และจะได้ค่าความแตกต่างของพลังงานที่มีค่านับวัดเป็นครึ่งหนึ่งของค่านับวัด (DE) เพราะฉะนั้น คำนวณหาค่า FWHM ได้จากสมการ(2.30) ยิ่งเปอร์เซ็นต์ FWHM ยิ่งน้อยแสดงว่า energy resolution ยิ่งดี

$$\% \text{Energy resolution(FWHM)} = \frac{\Delta E \text{ at FWHM}}{\text{energy at photopeak}} \times 100 \quad (2.20)$$

ประสิทธิภาพของหัววัด (Detection efficiency)

$$\Sigma = \frac{NPA}{A(t) * I * t}$$

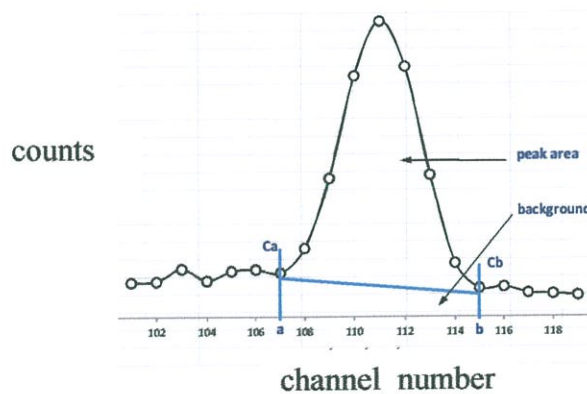
เมื่อ

NPA = Net Peak Area

$A(t)$ = Activity ของต้นกำเนิดรังสีในขณะที่ทำการวัดรังสี

I = Absolute Intensity ของรังสีแกมมา

t = เวลาของการนับวัดรังสี



รูปที่ 2.31 แสดงวิธีคำนวณหาค่าพื้นที่ใต้พีค

$$\text{หาพื้นที่ใต้พีค (Net peak area)} = \sum_{i=a}^b C_i - \frac{1}{2}(C_a + C_b)(b - a + 1)$$

2.8 หน่วยวัดปริมาณรังสี

หน่วยวัดปริมาณทางรังสีสามารถอธิบายคุณสมบัติของสารกัมมันตรังสีนั้นๆ ได้ว่ามีความสามารถในการก่อไอออน การดูดกลืนพลังงานจากรังสีของตัวกลาง ผลทางชีววิทยาที่เกิดขึ้นกับสิ่งมีชีวิตที่ได้รับรังสี โดยหน่วยงานต่างประเทศ (International Commission on Radiation Unit and Measurement : ICRU) ได้กำหนดหน่วยวัดปริมาณรังสีไว้ 4 ประเภท ดังนี้

2.8.1 กัมมันตภาพรังสี (radioactivity)

กัมมันตภาพรังสี คือ ความแรงของสารกัมมันตรังสี เป็นหน่วยกัมมันตรังสี (radioactivity unit) ที่แสดงอัตราการสลายตัวของสารกัมมันตรังสี โดยมีหน่วย คูรี (curie, Ci) และรัทเทอร์ฟอร์ด (rutherford) เป็นหน่วยแสดงค่ากัมมันตรังสี เมื่อ

1 คูรี หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 3.7×10^{10} ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ curie} = 3.7 \times 10^{10} \text{ dps}$$

1 รัทเทอร์ฟอร์ด หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 10^6 ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ rutherford} = 10^6 \text{ dps}$$

สำหรับหน่วยสากล (International System Units, SI unit) ค่าที่กำหนดคือ เบ็กเกอร์เรล (Becquerel, Bq) เป็นหน่วยของกัมมันตภาพ โดยที่

1 เบ็กเกอร์เรล หมายถึง ปริมาณสารกัมมันตรังสีที่สลายตัวให้กัมมันตภาพ 1 ครั้งต่อวินาที

$$1 \text{ becquerel} = 1 \text{ dps}$$

2.8.2 เอกซ์โพเชอร์ (exposure)

ICRU ได้กำหนดให้ เรินต์เกน (roentgen, R) เป็นหน่วย เอกซ์โพเชอร์ ซึ่งหมายถึงหน่วยที่ใช้วัดปริมาณของประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแตกตัวเป็นไอออนเมื่อรังสีผ่านไปในอากาศ

ปริมาณรังสี 1 เรินต์เกน หมายถึง ปริมาณรังสีที่ทำให้อากาศหนัก 0.001293 กรัม (1 cm^3) ที่อุณหภูมิและความดันมาตรฐานแตกตัวเกิดประจุไฟฟ้า 1 esu

เรินต์เกนมักใช้กับรังสีเอกซ์และแกมมา ซึ่งเป็นการบอกถึงความสามารถของโฟตอนในการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจาก

$$\begin{aligned}
 1R &= 1 \text{ esu} / 0.001293 \text{ g} \\
 &= \frac{1 \text{ esu}}{0.001293 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ C}}{3 \times 10^9 \text{ esu}} \times \frac{10^3 \text{ g}}{1 \text{ kg}} \\
 &= 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg of standard air}
 \end{aligned}$$

2.8.3 แอบซอร์บโดส (absorbed dose)

เร็ด (rad) ซึ่งเป็นคำย่อจาก radiation adsorbed dose หมายถึง ปริมาณพลังงานของรังสีที่ตัวกลางใดๆ ดูดกลืนไว้ต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของตัวกลางนั้น เมื่รังสีผ่านไปซึ่งจะเขียนได้ว่า

ปริมาณรังสี 1 เร็ด หมายถึง ปริมาณของรังสีที่ตัวกลางดูดกลืนพลังงานไว้ได้ 100 เอิร์กต่อกรัมของตัวกลาง

$$\begin{aligned}
 1 \text{ rad} &= 100 \text{ erg/g} \\
 &= 10^{-2} \text{ J/kg}
 \end{aligned}$$

SI unit กำหนดให้จูลต่อกิโลกรัม หรือเกรย์ (Gray , Gy) เป็นหน่วยสำหรับแอบซอร์บโดสโดย

$$\begin{aligned}
 1 \text{ J/kg} &= 1 \text{ Gy} \\
 1 \text{ Gy} &= 100 \text{ rad}
 \end{aligned}$$

เมื่อพิจารณาปริมาณรังสี 1 เรินต์เกน ซึ่งมีค่าเท่ากับพลังงาน 87.7 เอิร์ก ที่ถูกดูดกลืนไว้โดยอากาศ 1 กรัม จะเห็นได้ว่า มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณรังสี 1 เร็ด ความสัมพันธ์ ความสัมพันธ์ของหน่วยเกโพเซอร์ และแอบซอร์บโดส จึงประมาณได้ว่า

$$1R = 1 \text{ rad}$$

2.8.4 โดสอิควิวาเลนต์ (dose equivalent)

เรม (rem , radiation equivalent man) เป็นหน่วยของโดสอิควิวาเลนต์ หมายถึง ปริมาณพลังงานของรังสีที่เนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิตดูดกลืนไปทั้งหมดสำหรับหน่วยสากล กำหนดให้ จูลต่อกิโลกรัม หรือ ซีเวิร์ต (sievert, Sv) เป็นหน่วยของโดสอิควิวาเลนต์ โดยมีความสัมพันธ์กับเรมดังนี้

$$\begin{aligned} 1 \text{ J/kg} &= 11 \text{ Sv} \\ 1 \text{ Sv} &= 100 \text{ rem} \end{aligned}$$

เพียงแค่ปริมาณรังสีดูดกลืน ไม่สามารถบอกได้ว่ามีความเสียหายต่ออวัยวะ หรือเนื้อเยื่อส่วนที่ดูดกลืนพลังงานรังสีไว้เพียงใด และไม่สามารถนำมาประเมินอันตรายที่เกิดขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณรังสีสมมูล (Equivalent dose) นั้นมีการวัดผลทางชีววิทยาจากรังสีชนิดต่างๆด้วย โดยคำนวณจากปริมาณรังสีดูดกลืนกับตัวคูณที่เรียกว่า Radiation weighting factor (w_R) ซึ่งขึ้นกับชนิดและพลังงานของรังสี ซึ่งแนะนำโดยกรรมการการป้องกันอันตรายจากรังสีใน ICRP 60 แสดงตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 Weighting Factor (w_R) ของรังสีแต่ละประเภท

ชนิดของรังสีและช่วงพลังงาน	Radiation Weighting Factor (w_R)
แอลฟาทุกพลังงาน	20
บีตาทุกพลังงาน	1
แกมมาและเอกซเรย์ทุกพลังงาน	1
นิวตรอน:	
<10 keV	5
10 keV to 100 keV	10
>100 keV to 2 MeV	20
>2 MeV to 20 MeV	10
>20 MeV	5

ปริมาณรังสีสมมูล (Equivalent dose) มีสัญลักษณ์ (H) และสามารถหาได้จากสมการข้างล่างนี้ สำหรับรังสีชนิดใดชนิดหนึ่งซึ่งเกิดอันตรกิริยากับอวัยวะหรือเนื้อเยื่อใดใดดังนี้

$$H_{TR} = D_{TR} \times W_R$$

โดย H_{TR} คือ ปริมาณรังสีสมมูล (Equivalent dose) ที่เนื้อเยื่อ T จากรังสีชนิด R

D_{TR} คือ ปริมาณรังสีดูดกลืน(Absorbed dose) ที่เนื้อเยื่อ T จากรังสีชนิด R

W_R คือ Radiation weighting factor สำหรับรังสีชนิด R

ตารางที่ 2.3 สรุปหน่วยที่ใช้วัดปริมาณรังสี

หน่วยปริมาณทางรังสี	หน่วยเก่า	SI unit	ความสัมพันธ์
activity	Ci	Bq	1 Ci = 3.7×10^{10} Bq 1 Bq = 2.7×10^{-11} Ci
exposure dose	R	C/kg	1 C/kg = 3876 R 1 R = 2.58×10^{-4} C/kg
adsorbed dose	rad	Gy	1 Gy = 100 rad 1 rad = 0.01 Gy
dose equivalent	rem	Sv	1 Sv = 100 rem 1 rem = 0.01 Sv

ดังนั้นวัตถุประสงค์ในการป้องกันอันตรายจากรังสีคือ การดำเนินการต่างๆเพื่อป้องกันอันตรายจาก Deterministic Effect(ผลกระทบจากการได้รับรังสีปริมาณสูงในช่วงระยะเวลาสั้นๆ) และจำกัดผลของ Stochastic Effect(ภาวะเสี่ยงของผลกระทบจากการได้รับรังสี) ให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ รวมทั้งเพื่อให้มั่นใจได้ว่าการปฏิบัติงานทางด้านรังสีดำเนินไปด้วยความเหมาะสม ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 เกณฑ์ความปลอดภัยทางด้านรังสี

Maximum Permissible Dose Equivalent for Occupation Exposure	
Whole body	50 mSv (5 rem) in any one year
All tissues except the eye lens	500 mSv (50 rem) in any one year
Eye lens	150 mSv (15 rem) in any one year
Women of reproductive capacity	5 mSv (0.5 rem) during the first 2 months of pregnancy
Pregnant woman (more than 2 months)	< 15 mSv (1.5 rem) in a year

Dose-equivalent limits for individual members of the public	
Whole body	5 mSv (0.5 rem) in any one year
Any one organ or tissue	50 mSv (5 rem) in any one year

Dose-equivalent limits populations	
Genetic	1.7 mSv (0.17 rem) average per year
Somatic	1.7 mSv (0.17 rem) average per year

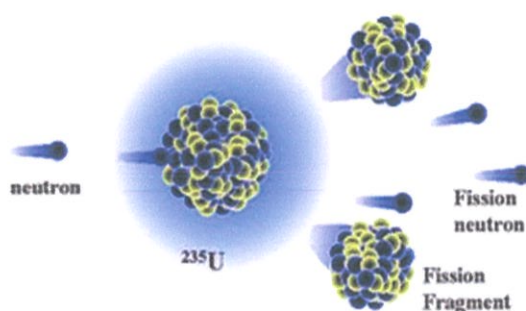
Emergency Dose - equivalent limits –life saving	
Genetic	1 Sv (100 rem)
Somatic	2 Sv (200 rem) additional (3 Sv or 300 rem total)

Emergency Dose-equivalent limits-less urgent	
Individual	250 mSv (25 rem)
Hand and forearms	1 Sv (100 rem)

Family of radioactive patients	
Individual (under 45 yr)	5 mSv (0.5 rem) in any one year
Individual (over 45 yr)	50 mSv (5 rem) in any one year

2.9 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของประเทศไทย(Thai Research Reactor:TRR)

เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear Reactor) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนขนาดใหญ่ อาศัยการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันดังรูปที่ 2.32 โดยการยิงนิวตรอนพลังงานต่ำไปยังนิวเคลียสของธาตุหนัก แล้วทำให้นิวเคลียสแตกออก และเกิดนิวตรอนใหม่ซึ่งมีพลังงานสูง นิวตรอนที่เกิดใหม่นี้ จะถูกลดความเร็วและพลังงานลงด้วยน้ำที่หล่ออยู่รอบแท่งเชื้อเพลิงเพื่อที่จะเข้าชนกับอะตอมอื่นต่อไป ทำให้เกิดปฏิกิริยาต่อเนื่อง เรียกว่า ปฏิกิริยาลูกโซ่ เกิดพลังงานปริมาณมหาศาลตามมา และได้จำแนกนิวตรอนตามพลังงานตามตาราง 2.5 ดังนี้



รูปที่ 2.32 แสดงการเกิดปฏิกิริยาลูกโซ่

ตารางที่ 2.5 แสดงการจำแนกชนิดของนิวตรอน

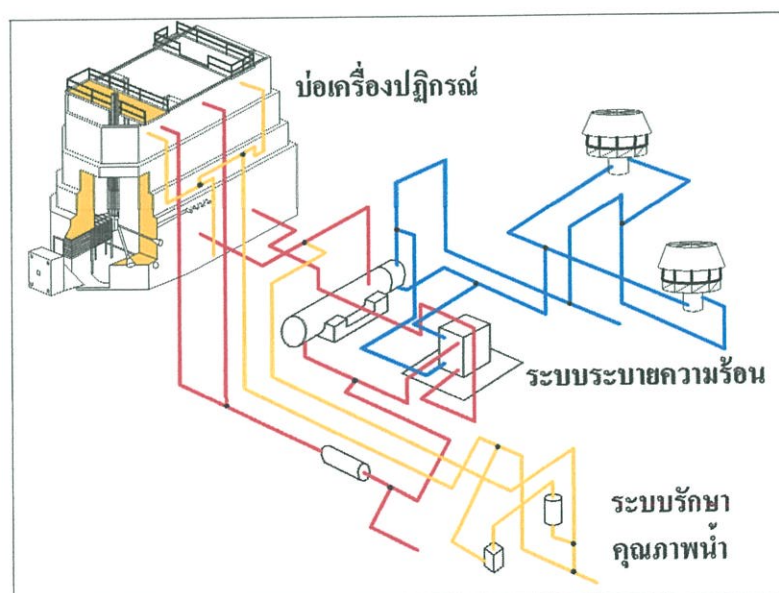
นิวตรอน	ชนิดของนิวตรอน	พลังงาน	อันตรกิริยา
นิวตรอนเร็ว (fast neutron)	นิวตรอนสัมพัทธภาพ (relativistic neutron)	>20 MeV	การแตกเป็นเสี่ยง
	นิวตรอนพลังงานสูง (high energy neutron)	0.5-20 MeV	การกระเจิงแบบยืดหยุ่น
	นิวตรอนปานกลาง (intermediate neutron)	1-500 keV	กระเจิงแบบยืดหยุ่น,การดูดจับ
นิวตรอนช้า (slow neutron)	เทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron)	0.025 eV : 29 °C	การดูดจับ
	อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (epithermal neutron)	1-100eV	

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูของไทย (Nuclear Research Reactor) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยมีวัตถุประสงค์ในการนำนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาฟิชชันไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ทั้งในงานวิจัยด้วย ส่วนความร้อนที่เกิดขึ้นนี้ไม่ได้นำมาใช้ประโยชน์ ซึ่งจะถูกระบายทิ้งทางหอระบายความร้อน ดังนั้นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยจึงมีกำลังน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูกำลังเป็นอย่างมาก

2.10.1 ข้อมูลทั่วไปของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปวว.1/1 (TRR-1/M1)

เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 หรือ เครื่อง ปวว.1/1 เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของประเทศไทย มีกำลังเดินเครื่องอยู่ที่ 1200 kw เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนขนาดใหญ่สำหรับการใช้ประโยชน์จากนิวตรอนในหลายๆ ด้าน เช่น ด้านการแพทย์ อุตสาหกรรม การเกษตรและการศึกษาวิจัย เป็นต้น ในอดีต เครื่องปวว.1/1 มีชื่อเดิมว่า เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 หรือ เครื่องปวว.1 ได้ถูกพัฒนาและทำการเปลี่ยนชนิดของเชื้อเพลิงเครื่องปฏิกรณ์ประเภท MTR-type (เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูใช้เชื้อเพลิงชนิดแผ่น) เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดเชื้อเพลิงแบบแท่ง (Rod type) ที่มียูเรเนียมเสริมสมรรถนะอยู่ 20 % กลายเป็น เป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยชนิด TRIGA Mark III ซึ่งถูกออกแบบและสร้างโดยบริษัท General Atomics (GA) ประเทศสหรัฐอเมริกา เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปวว.1/1 ใช้หลักการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) ในการระบายความร้อนออกจากระบบ เป็นการถ่ายเทความร้อนของน้ำจากบริเวณที่มีอุณหภูมิสูงไปยังบริเวณที่อุณหภูมิต่ำ

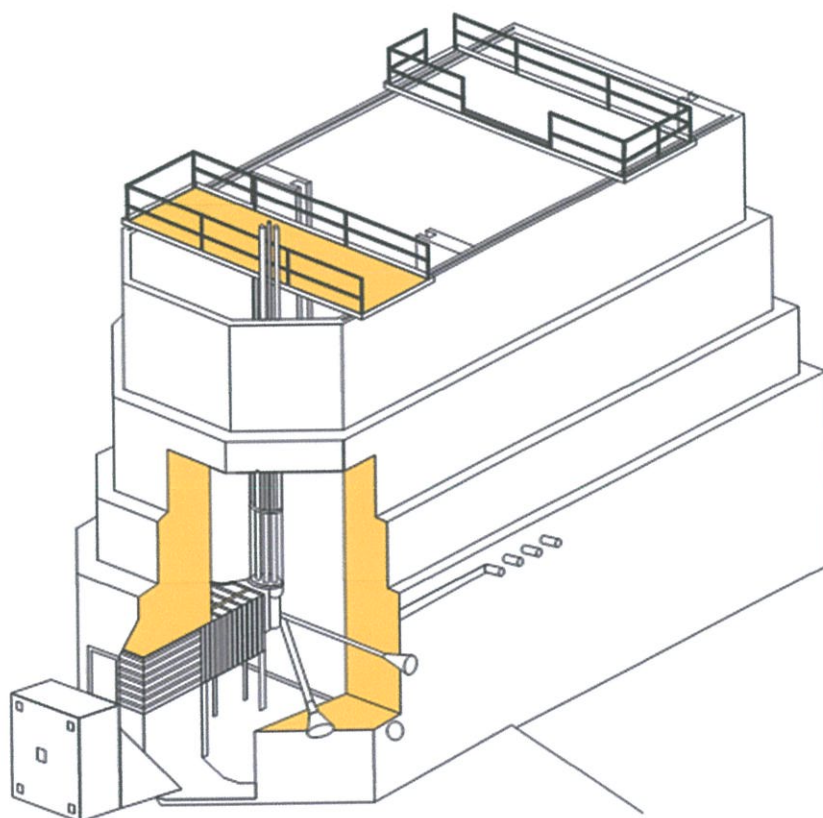
2.10.2 โครงสร้างของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปวว.1/1 (TRR-1/M1)



รูปที่ 2.33 ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยของไทย

1. บ่อของเครื่องปฏิกรณ์ ปวว.1/1

บ่อเครื่องปฏิกรณ์ มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีความสูง 8 เมตร คิดเป็นปริมาตรน้ำ 245 ลบ.ม. ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน โดยมีประตูอะลูมิเนียมเป็นตัวกั้น ดังรูปที่ 2.34 ส่วนแรกเป็นสระเล็ก สำหรับตั้งเครื่องปฏิกรณ์และทำการทดลองต่างๆ และส่วนที่สองเป็นสระใหญ่ ผนังด้านในของบ่อเครื่องปฏิกรณ์สร้างจากคอนกรีตที่มีความหนาแน่นของมวลคอนกรีตสูง ส่วนผนังด้านในสร้างด้วยคอนกรีตที่มีความหนาแน่นของมวลธรรมดา เพื่อป้องกันอันตรายทางรังสี เนื่องจากที่ก้นบ่อเป็นตำแหน่งของแกนเครื่องปฏิกรณ์ บริเวณก้นบ่อนี้จึงมีความแรงรังสีมาก ดังนั้น ความสูงทุกๆ 2 เมตร จากด้านบนของบ่อลงมา ความหนาของผนังคอนกรีตจะหนาขึ้นเป็น 0.9150 เมตร ที่ บริเวณก้นบ่อจึงมีความหนาสุดเป็นซึ่งเป็น 1.3750 เมตร เพื่อป้องกันรังสีจากแกนเครื่องปฏิกรณ์สู่ภายนอกบ่อ นอกจากนั้นผนังด้านในและก้นบ่อ ถูกทำด้วยสีที่มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถทนต่อรังสีปริมาณสูง และ ยังเป็นการป้องกันผิวคอนกรีตที่อาจทำปฏิกิริยากับน้ำได้ ดังรูปที่ 2.34

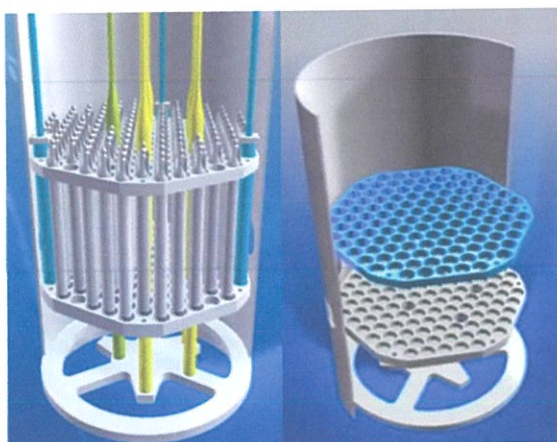


รูปที่ 2.34 บ่อเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยไทย

1.1 แกนเครื่องปฏิกรณ์(reactor core)

แกนเครื่องปฏิกรณ์ถูกยึดด้วยแท่งอะลูมิเนียม 2 แท่งกับสะพานยึดเครื่องปฏิกรณ์ ลักษณะของแกนเครื่องเป็นรูปทรงกระบอกอะลูมิเนียม ดังรูปที่ 2.35 มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 48 เซนติเมตร โดยภายในทรงกระบอกจะมีเพลท 2 เพลท(ลักษณะรังผึ้งมีจำนวน 121 ช่อง) ออกแบบให้มีการถ่ายเทความร้อนที่ดีอยู่บริเวณด้านบนและด้านล่างของทรงกระบอกทำหน้าที่ยึดแท่งเชื้อเพลิงแท่งควบคุมและอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องในแกนเครื่องปฏิกรณ์ ภายในแกนเครื่องปฏิกรณ์ประกอบไปด้วย

- แหล่งกำเนิดนิวตรอน(Neutron source) : Am-Be (Americium Beryllium)
- สารหน่วงนิวตรอน(Moderator) : water
- แท่งเชื้อเพลิง (Fuel) : U-ZrH (Uranium-Zirconium hydride)
- แท่งควบคุม(Control rod) : Boron Carbide (B_4C)
- หัววัดนิวตรอน(Neutron detector)

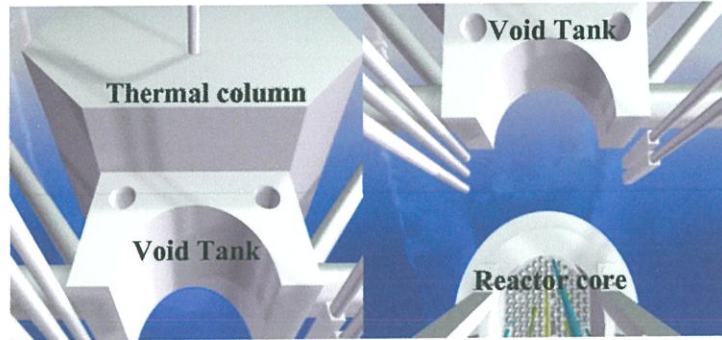


รูปที่ 2.35 แสดงลักษณะของแกนเครื่องปฏิกรณ์

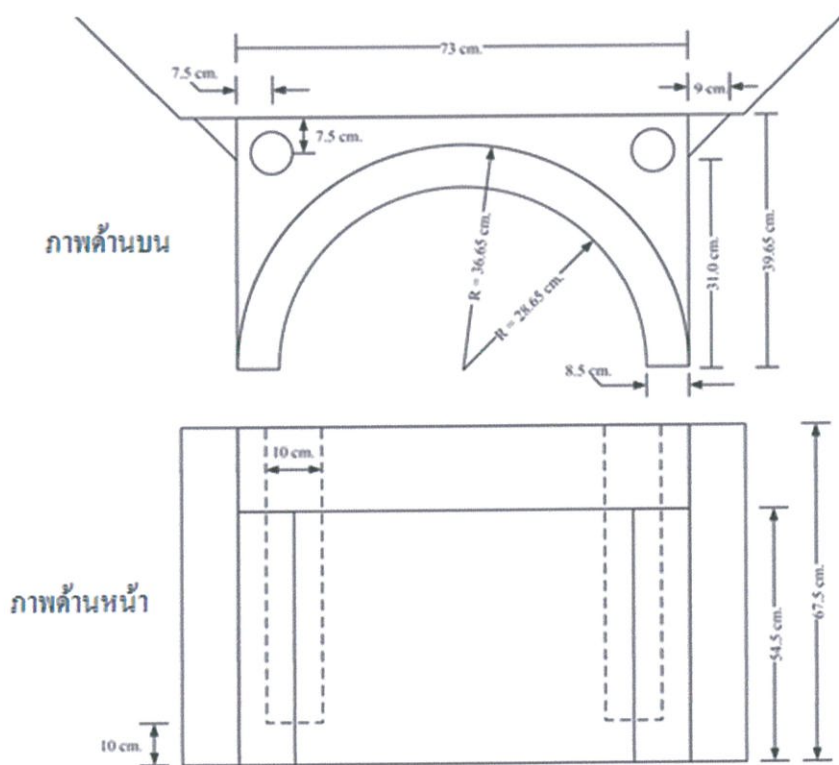
1.2 เทอร์มัลคอลัมน์ และวอยแท็งค์ (Thermal column and Void tank)

เทอร์มัลคอลัมน์ จัดเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการกำบังรังสีจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ ทำจากบล็อกราไฟต์ โดยเทอร์มัลคอลัมน์ ถูกติดตั้งอยู่ในบริเวณก้นสระน้ำ ตรงกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ จัดได้ว่าบริเวณนั้นเป็นบริเวณที่มีปริมาณรังสีสูง เทอร์มัลคอลัมน์ มีขนาด 150 เซนติเมตร x 150 เซนติเมตร x 240 เซนติเมตร ดังรูปที่ 2.36

วอยแท็งค์ ทำหน้าที่ลดความเร็ว ของนิวตรอนและความร้อนจากท่อลำเลียงนิวตรอนและยังยึดท่อนิวตรอนบีททั้ง 4 ท่อ ให้อยู่ในระดับเดียวกับแกนเครื่องปฏิกรณ์ถูกติดตั้งอยู่ระหว่างแกนเครื่องปฏิกรณ์กับเทอร์มัลคอลัมน์ รูปทรงของวอยแท็งค์สี่เหลี่ยมผืนผ้า พื้นผิวด้านที่อยู่ตรงข้ามกับแกนเครื่องปฏิกรณ์จะ โคง้วาวตามรูปทรงของแกนเครื่องปฏิกรณ์ และพื้นผิวอีกด้านอยู่ติดกับเทอร์มัล ดังรูป 2.36 ที่แสดงให้เห็น โครงสร้างและขนาดวอยแท็งค์ ดังรูปที่ 2.37



รูปที่ 2.36 ภาพตำแหน่งเทอร์มัลคอลัมน์,วอยแท็งค์ ภายในบ่อเครื่องปฏิกรณ์



รูปที่ 2.37 ภาพแสดงขนาด วอยแท็งค์ ภายในบ่อเครื่องปฏิกรณ์

1.3 ที่เก็บเชื้อเพลิง (Fuel Storage Racks)

ที่เก็บเชื้อเพลิงทำมาจากอะลูมิเนียม ถูกติดตั้งอยู่ใต้น้ำตามแนวผนังของสระน้ำ สามารถจัดเก็บแท่งเชื้อเพลิงได้จำนวน 10 แท่ง ซึ่งจะจัดเก็บไว้ชั่วคราวเพื่อนำไปใช้อีกครั้งหรือรอการจัดการกากกัมตรังสี ดังรูปที่ 2.38



รูปที่ 2.38 ที่เก็บแท่งเชื้อเพลิงภายในสระน้ำเครื่องปฏิกรณ์

2. ระบบระบายความร้อน(cooling system)

เนื่องจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาถูกโซ่ในแกนเครื่องปว.-1/1 ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์ดังนั้นจึงจำเป็นต้องระบายความร้อนทิ้ง เครื่องปว.-1/1 ใช้หลักการระบายความร้อนจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ฯ แบบที่เรียกว่าการพาความร้อนโดยธรรมชาติ (Natural Convection) โดยทำการแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำอ้อในระบบในอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน(Heat Exchanger) และในที่สุดความร้อนจะถูกระบายสู่บรรยากาศโดยใช้หอระบายความร้อน (Cooling Tower) และมีระบบรักษาคุณภาพน้ำเพื่อไม่ให้น้ำในบ่อเครื่องปฏิกรณ์มีสิ่งปนเปื้อน

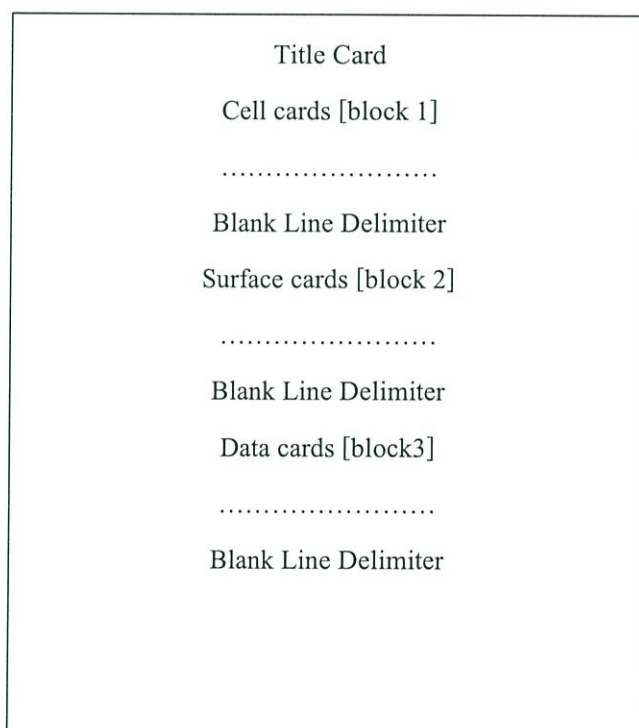
3. เครื่องกำบังรังสี(Shielding)

เครื่องกำบังรังสีเป็นส่วนประกอบสำคัญอีกส่วนหนึ่งของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ทุกชนิดทั้งนี้ เพื่อให้การทำงานกับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูนั้นมีความปลอดภัย สำหรับเครื่องปว.-1/1 เครื่องกำบังรังสีประกอบด้วยผนังบ่อเครื่องปฏิกรณ์ฯ ที่ทำจากคอนกรีตความหนาแน่นสูง (high density concrete) และน้ำในบ่อปฏิกรณ์ฯ โดยทั้งน้ำและคอนกรีตความหนาแน่นสูงจะทำหน้าที่กำบังรังสีที่เกิดขึ้นจากแกนเครื่องปฏิกรณ์

2.10 รหัสคอมพิวเตอร์เอ็มซีเอ็นพี (Monte Carlo N-Particle : MCNP)

รหัสคอมพิวเตอร์เอ็มซีเอ็นพีเป็นซอฟต์แวร์ชนิดหนึ่ง มันถูกแก้ไขและได้รับการพัฒนาจากห้องปฏิบัติการแห่งชาติลอสมอส ซอฟแวร์นี้ถูกนำไปใช้สร้างแบบจำลองและใช้ในการคำนวณอันตรกิริยาของอนุภาคฟิสิกส์นิวเคลียร์ นิวตรอนที่มีความแตกต่างกันถึง 34 รูปแบบ ซึ่งมีการนำซอฟต์แวร์นี้ไปใช้ประโยชน์ในงานเฉพาะทางนิวเคลียร์ได้หลากหลาย เช่น การออกแบบการกำบังรังสี ความปลอดภัยทางด้านนิวเคลียร์ การออกแบบเครื่องตรวจจับและการวิเคราะห์ การสร้างแบบจำลองและคำนวณการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันและฟิวชันในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์

ไฟล์อินพุต MCNP มีองค์ประกอบอยู่ด้วยกันทั้งหมด 3 ส่วนหลักที่สำคัญ ดังนี้ ชุดคำสั่งคุณสมบัติของสาร(Cell Card) , ชุดคำสั่งพื้นผิว(Surface Card) , ชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะ (Data Card) แสดงโครงสร้างของไฟล์อินพุตดังรูปที่ 2.39 โดยทั้ง 3 ชุด สามารถใส่เลขชุดคำสั่งได้ห้าหลักตั้งแต่ 1-99999 แต่ละชุดคำสั่งจะต้องทำการเว้นบรรทัดไว้ให้ห่างกัน 1 บรรทัด แต่ละบรรทัดสามารถเขียนตัวอักษรได้ไม่เกิน 80 ตัวอักษร และในการเขียนชุดคำสั่งหากมีการกดปุ่ม tab จะส่งผลให้ไฟล์ไม่สามารถรันได้ โดยมีการจัดรูปแบบการเขียนไว้ดังตารางที่ 2.6



รูปที่ 2.39 ส่วนประกอบของไฟล์อินพุต MCNP

ตารางที่ 2.6 รูปแบบการเขียนไฟล์อินพุต

ตัวอักษร	ตำแหน่งในการเขียน	รายละเอียด
C	ด้านหน้าสุดของบรรทัด	บอกรายละเอียดในบรรทัดนั้นหรือไม่ ต้องการบรรทัดนั้นมากำหนดด้วย
\$	ด้านหลังสุดต่อจากชุดคำสั่ง	คำอธิบายชุดคำสั่งในบรรทัดนั้น
&	ใส่หลังข้อมูล	ต้องการให้คำสั่งในแต่ละบรรทัดมีความต่อเนื่องกัน
Blank	บรรทัดว่าง	รอยต่อระหว่างชุดคำสั่งในแต่ละชุด

1.(Title card)

Title card เป็นชื่อไฟล์อินพุต MCNP อยู่บนบรรทัดแรกสุด บอกถึงความเฉพาะตัวของไฟล์ ถ้าหากไม่ได้ใส่ title card ไว้ในไฟล์อินพุต ระบบจะทำการประมวลผลโดยคิดโค้ดบรรทัดถัดมาเป็น title card ทำให้ระบบมีการคำนวณผิดพลาด และถ้าหากตั้งชื่อไฟล์อินพุตเกิน 80 ตัวอักษร ก็จะทำให้การคำนวณนั้นผิดพลาดเช่นเดียวกัน

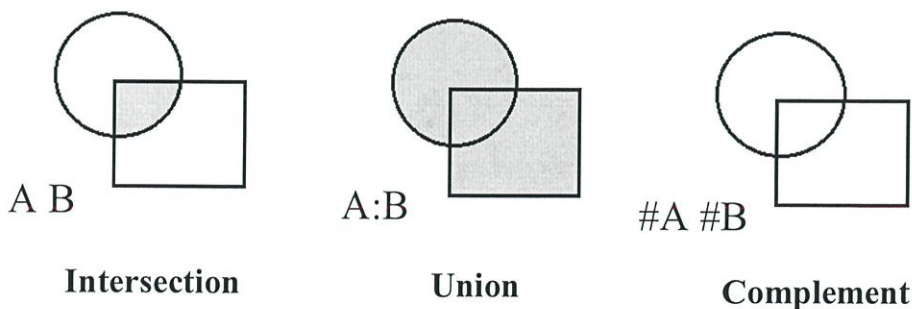
2.(Cell Card)

ถัดมาจาก title card เป็นส่วนของ cell card เรียกส่วนนี้ว่าชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์ ทำหน้าที่กำหนดขอบเขตของเซลล์แต่ละเซลล์ มีการกำหนดขอบเขตของเซลล์อยู่ 3 รูปแบบ

2.1 Union operator เป็นการกำหนดขอบเขตโดยการเลือกพื้นที่ทั้งหมดของเซลล์ ขั้นตอนการเขียนรหัสโค้ดคำสั่งจะไม่ใส่เครื่องหมายใดๆ แต่จะทำการเว้นวรรค วรรค ดังรูปที่ 2.4

2.2 intersection operator เป็นการกำหนดขอบเขตโดยการคิดพื้นที่ส่วนที่ซ้อนทับกัน โดยใส่เครื่องหมาย(:) ในโค้ดรหัสคำสั่ง ดังรูปที่ 2.4

2.3 complement operator เป็นการกำหนดขอบเขตโดยการไม่คิดพื้นที่ส่วนนั้นมากำหนด โดยใส่เครื่องหมาย (#) ในรหัสคำสั่ง ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.40 Operator

มีแบบฟอร์มดังนี้ J M D GEOM PARAMS

J = หมายเลขเซลล์(cell number) กำหนดเลขได้ตั้งแต่ 1-99999

M = หมายเลขคุณสมบัติของเซลล์(material number)

D = ค่าความหนาแน่นของเซลล์

[ถ้าใช้เครื่องหมายบวกหมายถึงความหนาแน่นของอะตอม(atoms/cm³)]

[ถ้าใช้เครื่องหมายลบหมายถึงความหนาแน่นของมวล(g/cm³)]

GEOM = หมายเลขขอบเขตของเซลล์แต่ละเซลล์

PARAMS = พารามิเตอร์ของ variance reduction cards

3.(Surface Card)

ถัดมาจาก cell card เป็นส่วนของ surface card เรียกส่วนนี้ว่าชุดคำสั่งพื้นผิวทำหน้าที่กำหนดลักษณะรูปร่างขอบเขตของพื้นผิวเซลล์ สามารถกำหนดพื้นผิวได้หลายรูปแบบ เช่น ระนาบ(Plane) ทรงกลม(Sphere) ทรงกระบอก(Cylinder) เป็นต้น

มีแบบฟอร์มดังนี้ J A LIST

J = หมายเลขพื้นผิว(Surface); 1-99999

A = กำหนดลักษณะขอบเขตพื้นผิว

LIST = กำหนดขนาดและตำแหน่งของรูปทรง

4. (Data Card)

ถัดมาจาก Surface card เป็นส่วนของ data card เรียกส่วนนี้ว่าชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะทำหน้าที่กำหนดรายละเอียดย่อยๆ เพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์และมีความถูกต้องมากขึ้นมีรายละเอียดดังนี้

4.1 Mode Card

เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคนั้นมีรูปแบบที่แตกต่าง ดังนั้น MCNP สามารถกำหนดประเภทของอนุภาคในการส่งผ่านได้ ดังนี้

MODE N	→	การส่งผ่านของอนุภาคนิวตรอน
MODE P	→	การส่งผ่านของอนุภาคโฟตอน
MODE E	→	การส่งผ่านของอนุภาคอิเล็กตรอน
MODE N P	→	การส่งผ่านของอนุภาคนิวตรอนและอนุภาคโฟตอน
MODE P E	→	การส่งผ่านของอนุภาคโฟตอนและอนุภาคอิเล็กตรอน
MODE N P E	→	การส่งผ่านของอนุภาคนิวตรอน โฟตอนและอิเล็กตรอน

4.2 cell or surface parameter card

cell or surface parameter card เป็นชุดคำสั่งหลัก มีพารามิเตอร์ IMP ทำหน้าที่กำหนดให้เซลล์แต่ละเซลล์มีการตอบสนองการส่งผ่านรังสีประเภทต่าง ถ้า IMP ของเซลล์ มีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าให้เซลล์นั้นคิดการตอบสนองของรังสีประเภทนั้น ถ้าเป็น 0 แสดงว่าไม่มีการตอบสนองของรังสีตามที่ได้กำหนด

4.3 Source specification Card

ส่วนของการระบุรายละเอียดของต้นกำเนิดรังสี จะใช้คำสั่ง SDEF สำหรับระบุรายละเอียดของต้นกำเนิดรังสี คำสั่ง SDEF, SIn, SPn เป็นคำสั่งหลักๆ ที่สำคัญจากคำสั่งทั้งหมด ดังตาราง 2.7

ตารางที่ 2.7 Source specification Card

Source Cards	Card Type	General Form
SDEF	General Source	SDEF source variable
SIn	Source Information	SIn option I1 ... Ik
SPn	Source Probability	SPn option P1 ...Pk

4.3.1 SDEF General Source Card

คำสั่ง SDEF เป็นคำสั่งหลักที่สำคัญ ทำหน้าที่กำหนดตำแหน่ง พลังงาน ชนิดอนุภาค ของต้นกำเนิดรังสีไว้ตามตาราง 2.8

ตารางที่ 2.8 ตารางแสดงชุดคำสั่งย่อยของ SDEF Cards

source variable	คำอธิบาย	รูปแบบการเขียน
POS	ตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีในพิกัด x,y,z	POS=1 1 1
CELL	หมายเลขเซลล์ที่ให้ป็นต้นกำเนิดรังสี	CELL=1
SUR	หมายเลขพื้นผิวที่ให้ป็นต้นกำเนิดรังสี	SUR=1
ERG	พลังงานเริ่มต้นของต้นกำเนิดรังสี หน่วย (MeV)	ERG = 0.511
PAR	ประเภทของอนุภาคที่ปลดปล่อยจากต้นกำเนิด N = อนุภาคนิวตรอน P = อนุภาคโพตอน E = อนุภาคอิเล็กตรอน	PAR=1 ; N,N P, N P E PAR=2 ; P, P E PAR=3 ; E

4.3.2. SIn Source Information Card

SIn Card เป็นคำสั่งที่ทำหน้าที่กำหนดระดับพลังงานของต้นกำเนิดรังสี ถ้าหากต้นกำเนิดรังสีปลดปล่อยอนุภาคออกมามากกว่าหนึ่งระดับพลังงาน มีรูปแบบดังนี้

มีแบบฟอร์มดังนี้ SIn option I1 ... Ik

n = หมายเลขชุดข้อมูล

option = กำหนดขอบเขตระดับพลังงานของอนุภาค

[ใช้ H หรือ เว้นว่าง หมายถึง การแจกแจงของระดับพลังงานแบบต่อเนื่อง]

[ใช้ L หมายถึง ค่าพลังงานของต้นกำเนิดรังสีแบบไม่ต่อเนื่อง]

[ใช้ A หมายถึง จุดที่มีการแจกแจงความหนาแน่นแบบความน่าจะเป็น]

[ใช้ L หมายถึง หมายเลขการแจกแจงพลังงาน]

I1 ... Ik = ระดับพลังงาน(MeV) ที่ต้องการระบุ

4.3.3 SPn Source Probability Card

SPn Card เป็นคำสั่งมีหน้าที่กำหนดโอกาสในการเกิดอนุภาคที่ระดับพลังงานต่างๆคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เต็มร้อย มีรูปแบบดังนี้

มีแบบฟอร์มดังนี้ SPn option P1 ...Pk

n = หมายเลขชุดข้อมูล

option = กำหนดขอบเขตของระดับพลังงาน

[ใช้ D หรือ เว้นว่าง หมายถึง เปอร์เซ็นต์ abundance ถ้า SIn Card ใช้การแจกแจงแบบ H,L]

[ใช้ C หมายถึง ความน่าจะเป็นของการสะสมพลังงาน ถ้า SIn Card ใช้การแจกแจงแบบ H,L]

[ใช้ V หมายถึง การแจกแจงพลังงานของเซลล์อย่างเดี่ยว]

P1 ... Pk = ความน่าจะเป็นที่จะเกิดระดับพลังงาน ที่ต้องการระบุ

4.4 Tally specification Cards

คำสั่ง Tally ทำหน้าที่ในการคำนวณหาปริมาณฟลักซ์ของอนุภาคโพตอน นิวตรอน อิเล็กตรอน ที่ทะลุผ่านพื้นผิวหรือเซลล์ใดๆ ในชุดคำสั่ง Tally มี Fna Cards เป็นคำสั่งหลัก จะมีรูปแบบการนำไปใช้แตกต่างกัน ตามคำอธิบายดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 แสดงชุดคำสั่ง Fna Cards

Fna tally Cards	คำอธิบาย	หน่วย(อนุภาค)	หน่วย(พลังงาน)
F1:N or F1:P or F1:E	กระแสรวมบนพื้นผิว	particles	MeV
F2:N or F2:P or F2:E	ฟลักซ์เฉลี่ยบนพื้นผิว	Particles/cm ²	MeV/cm ²
F4:N or F4:P or F4:E	ฟลักซ์เฉลี่ยบนเซลล์	Particles/cm ²	MeV/cm ²
F5a:N or F5a:P	ใช้หัววัดรังสี วัดปริมาณฟลักซ์ที่เกิดขึ้น ณ จุดใดๆ	Particles/cm ²	MeV/cm ²
F6:Nor F6:P or F6:N,P	การสะสมพลังงานเฉลี่ยบนเซลล์	MeV/g	Jerks/g
F7:N	การสะสมพลังงานเฉลี่ยจากปฏิกิริยาฟิชชันบนเซลล์	MeV/g	Jerks/g
F8:P or F8:E or F8:E,P	การแจกแจงพลังงานของพัลส์ในหัววัดนิวเคลียร์	pulses	MeV

4.5 Material specification Cards

การสร้างแบบจำลองจะต้องมีการระบุชนิดวัสดุของเซลล์แต่ละเซลล์ที่ถูกสร้างขึ้น เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาของอนุภาคกับสสารต่างชนิดกันนั้นมีไม่เท่ากัน ใน Material specification Cards จะเลือกใช้คำสั่ง Mn material card กำหนดวัสดุของเซลล์ มีแบบฟอร์มดังนี้

มีแบบฟอร์มดังนี้ Mn ZAID₁ fraction1
ZAID₂ fraction2

1. Material number (Mn) คือหมายเลขวัสดุของเซลล์
2. Nuclide Identification number(ZAID) เป็นส่วนของการระบุคุณสมบัติของนิวไคลด์

มีแบบฟอร์มดังนี้ ZZZAAA.nn

ZZZ คือ เลขอะตอม(atomic number)

AAA คือ เลขมวลอะตอม(mass number)

nn คือ crosssection(barn)

X คือ ประเภทของข้อมูล : D = discrete reaction , C = continuous energy

3. Nuclide Fraction เป็นร้อยละองค์ประกอบธาตุคิดเป็นจำนวนเต็มหนึ่ง

ใช้เครื่องหมาย + นำหน้าหมายถึงอัตราส่วนของโมเลกุลสาร

ใช้เครื่องหมาย - นำหน้าหมายถึงอัตราส่วนโดยน้ำหนักสาร

WATER for neutron transport (by mass fraction); ignore H-2,H-3,O-17,O-18

M1 1001.60c -0.11190 \$ H-1 and mass fraction

8016.60c -0.88810 \$ O-16 and mass fraction

WATER for gamma-ray transport (by atom fraction)

M1 1000 2 \$ elemental H and atomic abundance

8000 1 \$ elemental O and atomic abundance

รูปที่ 2.41 Material specification Cards

4.6 Problem cutoffs Cards

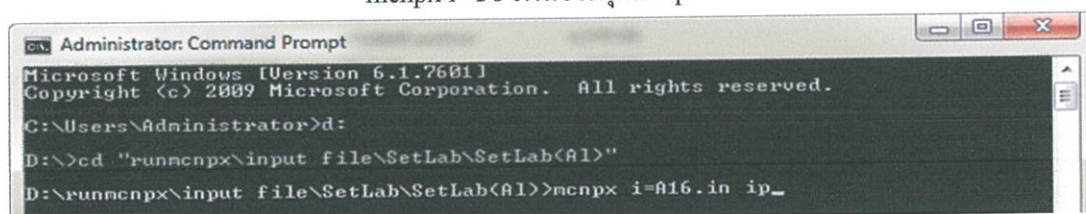
Problem cutoffs Cards เป็นคำสั่งที่ทำหน้าที่สำหรับกำหนดการประมวลผลทางโปรแกรมในคำสั่งนี้จะใช้คำสั่งnpsเป็นคำสั่งหลัก สำหรับกำหนดจำนวนครั้งในการยิงอนุภาค นั่นก็คือโปรแกรมจะสิ้นสุดการประมวลผลก็ต่อเมื่อจำนวนครั้งในการยิงอนุภาคนั้นครบตามที่ได้กำหนดไว้แล้ว

5. การรันโปรแกรม MCNP

ในโปรแกรม MCNP จะแบ่งการรันไฟล์อินพุตตามลักษณะการนำไปใช้งานออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่

1. การรันโปรแกรมดูโครงสร้างของแบบจำลอง การรันแบบนี้ทำหน้าที่ตรวจสอบโครงสร้างแบบจำลองว่าเป็นไปตามข้อกำหนดไว้ การรันเพื่อดูโครงสร้างนี้ต้องใช้ cmd(command prompt) เข้าไปยังตำแหน่งของไฟล์อินพุตก่อนแล้วพิมพ์คำสั่งดังนี้

mcnpx i=ชื่อไฟล์อินพุต.in ip

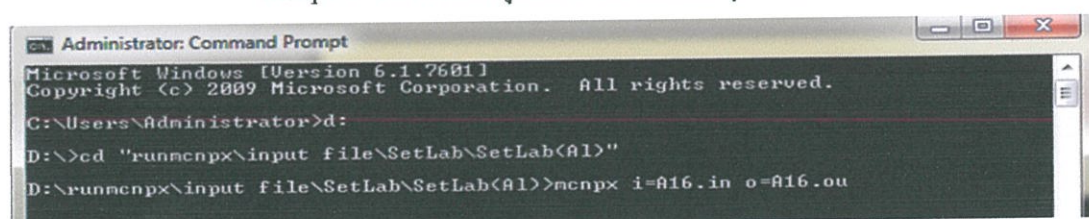


```
Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\Administrator>d:
D:\>cd "runmcnpx\input file\SetLab\SetLab(A1)"
D:\runmcnpx\input file\SetLab\SetLab(A1)>mcnpx i=A16.in ip_
```

รูปที่ 2.42 แสดงการรันโปรแกรมดูโครงสร้างแบบจำลอง

2. การรันโปรแกรมสำหรับการคำนวณผลการทดลอง การรันแบบนี้ทำหน้าที่คำนวณอัตราการส่งผ่านของรังสี ซึ่งจะใช้เวลารันไฟล์อินพุตนานกว่าการรันดูโครงสร้าง ยิ่งแบบจำลองมีความซับซ้อนมากเท่าไร ยิ่งใช้เวลาในการรันไฟล์นาน การรันสำหรับการคำนวณผลต้องใช้ cmd(command prompt) เข้าไปยังตำแหน่งของไฟล์อินพุตเช่นเดียวกัน แล้วพิมพ์คำสั่งดังนี้

mcnpx i=ชื่อไฟล์อินพุต.in o=ชื่อไฟล์อินพุตที่ตั้งใหม่.ou



```
Administrator: Command Prompt
Microsoft Windows [Version 6.1.7601]
Copyright (c) 2009 Microsoft Corporation. All rights reserved.
C:\Users\Administrator>d:
D:\>cd "runmcnpx\input file\SetLab\SetLab(A1)"
D:\runmcnpx\input file\SetLab\SetLab(A1)>mcnpx i=A16.in o=A16.ou
```

รูปที่ 2.43 แสดงการรันโปรแกรมคำนวณผลการทดลอง

บทที่ 3

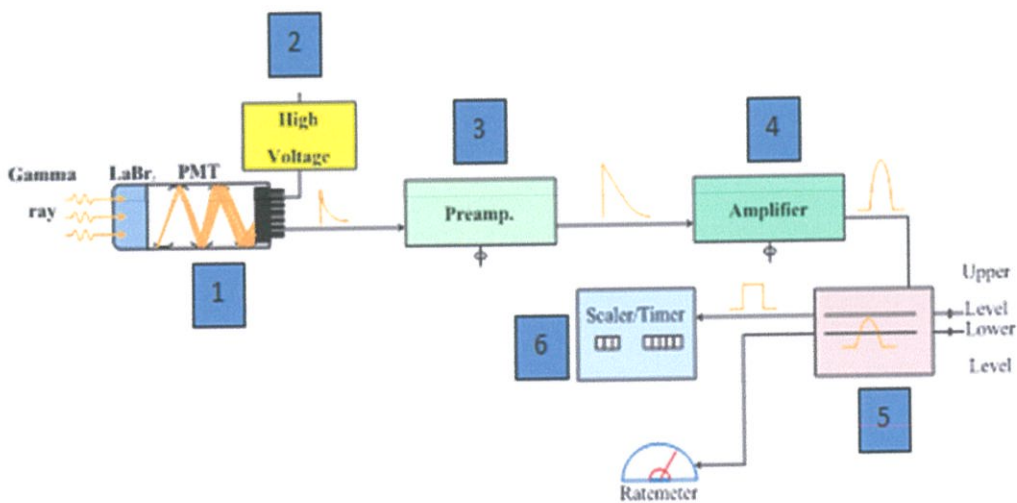
ขั้นตอนการดำเนินงาน

การออกแบบอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสีจากการบำรุงรักษาห้อง เครื่องปฏิกรณ์ปว.-1/1 ซึ่งใช้เก็บน็อคที่เป็นตัวยึดโครงสร้าง Void tank เข้ากับผนังภายในเครื่องปฏิกรณ์ มีขั้นตอนการดำเนินงานดังนี้

1. การศึกษาระบบการนับวัดและการกำบังรังสีแกมมา
2. การศึกษาการเขียนโปรแกรม MCNP
3. ออกแบบรูปทรงตัวกำบังรังสีด้วยโปรแกรม MCNP
4. วัดและวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยโปรแกรม MCNP

3.1 การศึกษาระบบการนับวัดและการกำบังรังสีแกมมา (Gamma-ray Shielding)

3.1.1 ระบบการนับวัดรังสี



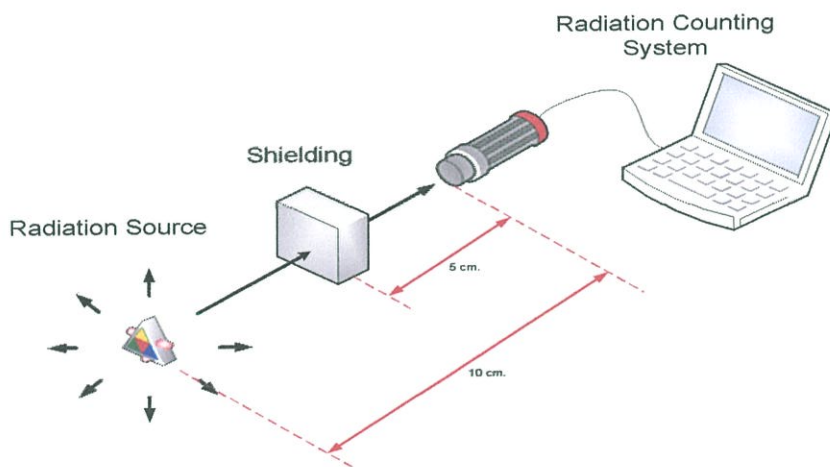
รูปที่ 3.1 ระบบการนับวัดรังสี

เป็นกระบวนการนำผลที่ได้จากหัววัดรังสี ไปสร้างเป็นข้อมูลการวัด และวิเคราะห์ผล ระบบการนับวัดรังสี ดังรูป 3.1 มีส่วนประกอบสำคัญดังนี้

- 1 . Scintillation detector(LaBr₃,PMT) : CANBERRA Model LABR-1.5x1.5 inches
- 2 . High Voltage : Model 2007
- 3 . Preamplifier : Model 2007P
- 4 . Amplifier
- 5 . Pulse-Height Analyzer (PHA)
- 6 . Scaler and Timers

3.1.2 การกำบังรังสีแกมมา

ระบบการกำบังรังสีแกมมาใช้ทดสอบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังแต่ละประเภท ประกอบด้วย ต้นกำเนิดรังสี(Radiation source) ตัวกำบังรังสี(Shielding)และระบบนับวัดรังสี (Radiation counting system) ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงการวัดการส่งผ่านรังสี

3.2 การศึกษาการเขียนโปรแกรม MCNP (Monte Carlo N-particle)

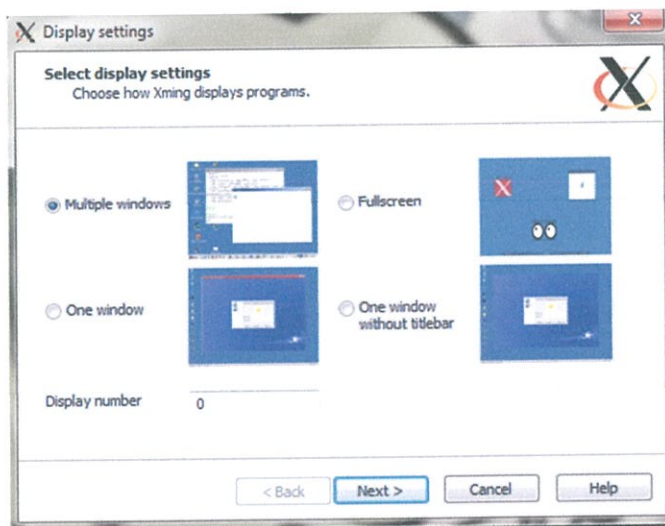
ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษารูปแบบการเขียนโปรแกรมการวัดการส่งผ่านของรังสีแกมมาโดยการจำลองทางโปรแกรม MCNP ก่อนอื่นต้องติดตั้งโปรแกรมเพื่อรองรับการทำงานของโปรแกรม มีขั้นตอนการติดตั้งโปรแกรมดังนี้

การติดตั้งโปรแกรม MCNP และซอฟต์แวร์เสริม

ก่อนดำเนินการใช้โปรแกรม MCNP สำหรับสร้างแบบจำลอง ต้องทำการติดตั้งซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการทำงานและการแสดงผลจากการประมวลผลทางโปรแกรม MCNP ซึ่งมีซอฟต์แวร์ที่ใช้ร่วมกับการจำลองโปรแกรม MCNP ดังนี้

1. ติดตั้งโปรแกรม Xming

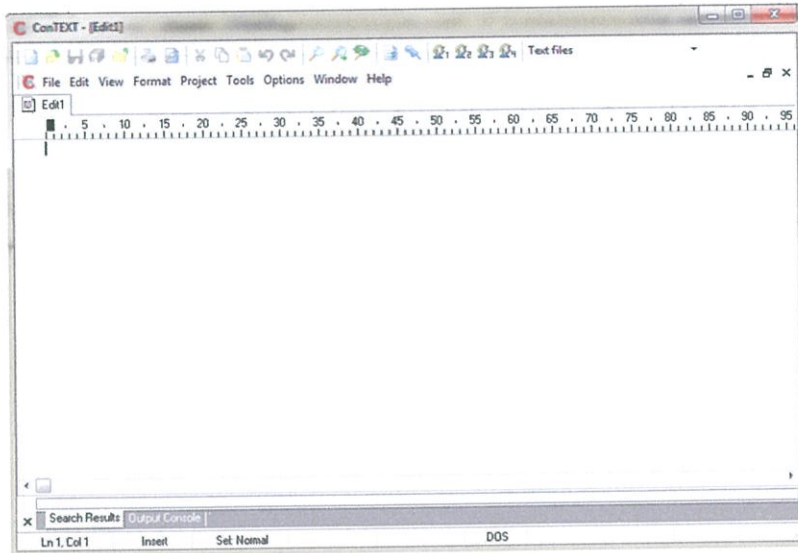
โปรแกรม XLaunch โดย Xming เป็นโปรแกรม Freeware ลักษณะการทำงานของโปรแกรมจะทำหน้าที่แสดงผลต่างจากบนหน้าจอเมื่อโปรแกรม MCNP ประมวลผลเสร็จ โดยหากเปิดหน้าต่างโปรแกรม XLaunch อยู่ภายใต้เพิ่ม Xming ดังรูปที่ 3.3 โดยกดปุ่ม Next 3 ครั้งไม่ต้องเซตค่าใดเพิ่ม และกดปุ่ม Finish สิ้นสุดการตั้งค่าหน้าจอ



รูปที่ 3.3 หน้าต่างโปรแกรม XLaunch

2. ติดตั้งโปรแกรม Context

1. Context เป็นโปรแกรม Freeware ใช้โปรแกรมนี้สำหรับเขียนโปรแกรมมีลักษณะการทำงานคล้ายคลึงกับโปรแกรม Notepad แต่โปรแกรม Context มีรูปแบบการจัดเรียงบรรทัดที่เป็นระเบียบและมีบรรทัดบอกระยะการพิมพ์ตัวอักษร ทำให้สะดวกต่อการเขียนโปรแกรม ลักษณะหน้าต่างโปรแกรม Context ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 หน้าต่าง โปรแกรม Context

3. ติดตั้งโปรแกรม MCNP

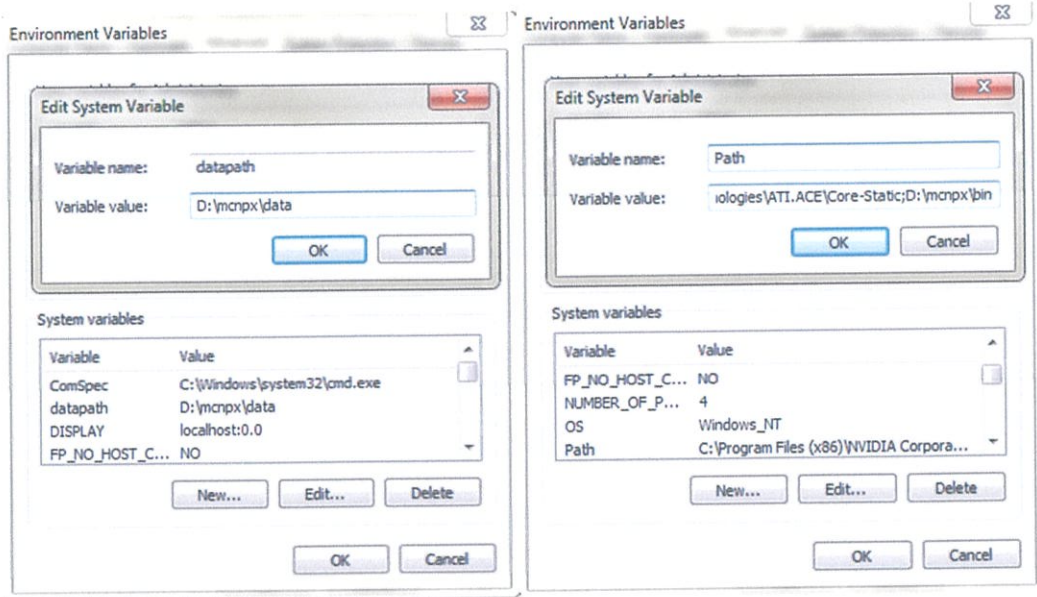
โดยทำการติดตั้งไฟล์เครื่องโปรแกรมจำลอง 2 ไฟล์เครื่องบนไดรฟ์ของคอมพิวเตอร์ ควรเลือกติดตั้งในที่ที่สะดวกต่อการสืบค้นด้วย Command prompt วิธีการตั้งค่าโปรแกรม MCNP มีดังนี้

Set path ของโปรแกรม MCNP

- 1.เข้าเมนู Control panel > System and security > System > Advance system setting > Enviabale Variables
- 2.สร้าง System Variables ใหม่สำหรับการตั้งค่า data path คลิกเลือก New แล้วกรอกข้อมูลดังรูป ที่ 3.5 ก ซึ่งไดรฟ์ที่กรอกควรเป็นที่อยู่ของไฟล์เครื่อง(ชื่อไดรฟ์ : \mcpn\data)
- 3.Edit path แล้วกรอกค่า bin ดังรูปที่ 3.5 ข (ชื่อไดรฟ์ : \mcpn\bin)
- 4.สร้าง System Variables ใหม่ สำหรับการตั้งค่าการแสดงผลบนหน้าจอ คลิกเลือก New แล้วกรอกข้อมูลดังรูปที่ 3.5 ค
- 5.เมื่อตั้งค่าเสร็จให้ทำการ Restart คอมพิวเตอร์ 1 ครั้ง เพื่อค่าต่างๆที่ตั้งไว้ทำงานได้อย่างสมบูรณ์

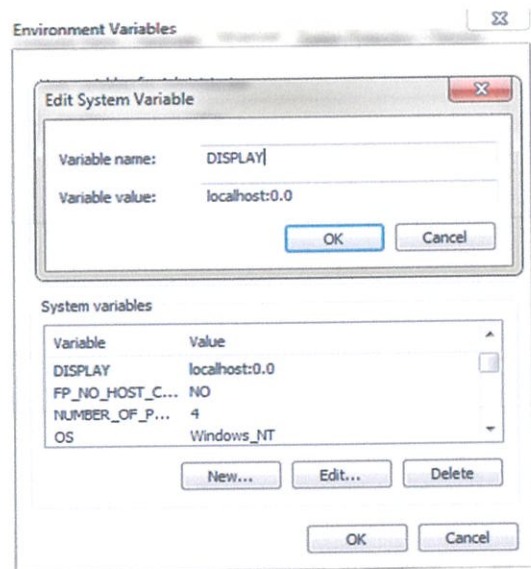
หลังจากทำการติดตั้งโปรแกรมเรียบร้อยแล้ว ถัดมาเป็นขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MCNP

แสดงเป็นแผนภาพการทำงานดังรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 เป็นคำสั่งใช้แสดงโครงสร้างแบบจำลอง



ก.

ข.



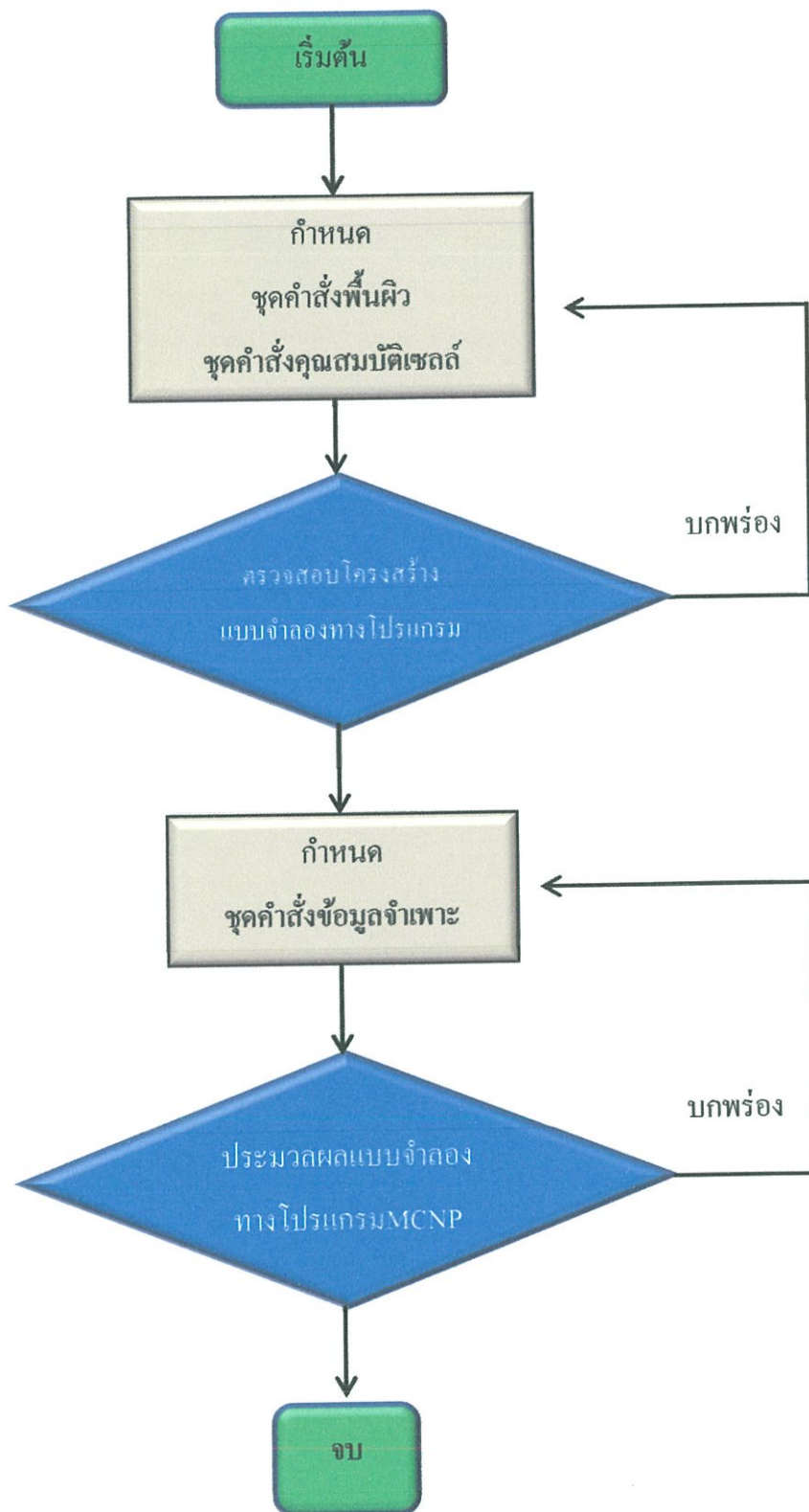
ค.

รูปที่ 3.5 การตั้งค่าโปรแกรม MCNP ใน Environment Variables

ก.ตั้งค่าโฟลเดอร์ data บน Environment Variables

ข.ตั้งค่าโฟลเดอร์ bin บน Environment Variables

ค.ตั้งค่าการแสดงผลบนหน้าจอ Environment Variables



รูปที่ 3.6 แผนภาพ Flow Chart แสดงขั้นตอนการเขียนโปรแกรม MCNP

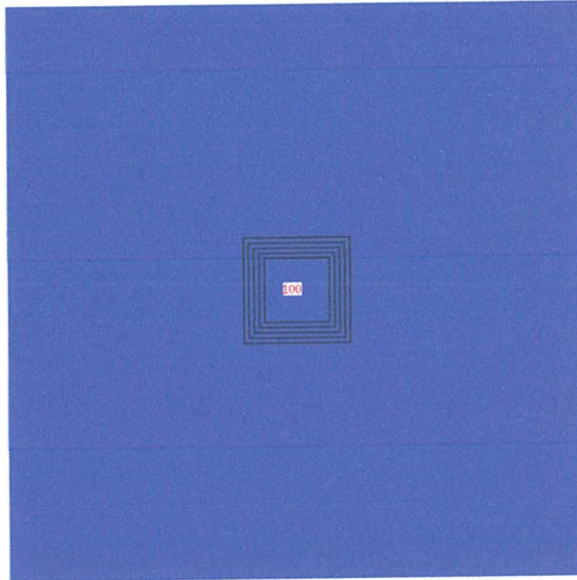
```

probid = 02/03/14 15:03:51
basis: XY
( 1.000000, 0.000000, 0.000000)
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 0.00)
extent = ( 100.00, 100.00)
cell labels are
cell names
    
```

```

Edit    cel    100
                Cell 100
xyz =    0.00, 0.00, 0.00
CURSOR    SCALES 0 CellLine
PostScript ROTATE
COLOR    mat
XY        YZ        ZX
LABEL    off    cel
MBOODY on
    
```

Click here or picture or menu



รูปที่ 3.7 หน้าต่างแสดงโครงสร้างแบบจำลอง MCNP

```

probid = 02/03/14 15:03:51
basis: XY
( 1.000000, 0.000000, 0.000000)
( 0.000000, 1.000000, 0.000000)
origin:
( 0.00, 0.00, 0.00)
extent = ( 100.00, 100.00)
cell labels are
cell names
    
```

แสดงโครงสร้างในระนาบที่ได้

แสดงแบบจากจุดตัดกันของระนาบ
xy,yz,xz

```

Edit    cel    100
                Cell 100
xyz =    0.00, 0.00, 0.00
CURSOR    SCALES 0 CellLine
PostScript ROTATE
COLOR    mat
XY        YZ        ZX
LABEL    off    cel
MBOODY on
    
```

แสดงหมายเลขเซลล์ที่เลือก
โดยคลิกบนแบบจำลอง

แสดงจุดพิกัด x,y,z ที่แบบจำลอง

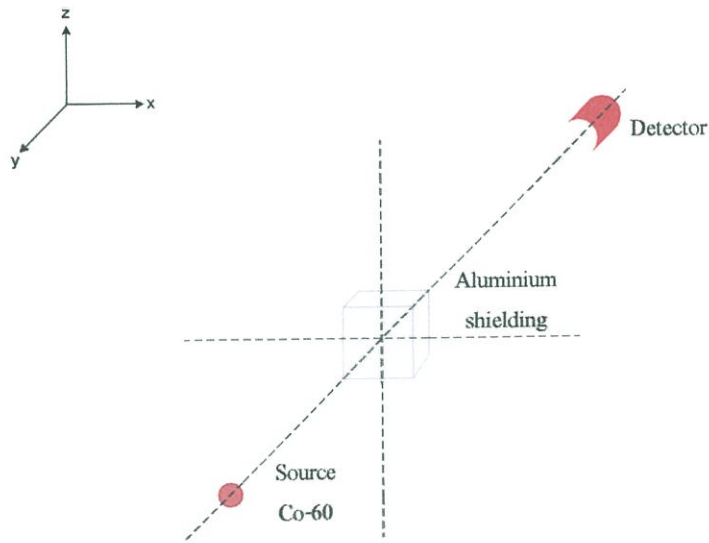
คำสั่งระนาบการแสดงผล

คำสั่งแสดง หมายเลขพื้นผิว
และหมายเลขเซลล์บน

Click here or picture or menu

แสดงโครงสร้างแบบจำลอง
ในระนาบที่ได้เลือกไว้

รูปแบบการเขียนโปรแกรมการวัดอัตราการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียม



รูปที่ 3.8 แบบจำลองอัตราการส่งผ่านของรังสีผ่านอะลูมิเนียมในระบบพิกัด 3 มิติ

Set Lab (Aluminum shielding)

c MCNP input file 16 plate

c Cell Cards :

1	1	-2.7	-1	2	-3	4	5	-6	imp:p=1	\$ Al		
2	2	-0.00125	-7						imp:p=1	\$ dtt		
3	2	-0.00125	#1	#2	(-8	9	-10	11	-12	13)	imp:p=1	\$ air

C Void

4	0	(8	:-9	:10	:-11	:12	:-13)	imp:p=0	\$ srd
---	---	----	-----	-----	------	-----	-------	---------	--------

c

c Surface Cards :

1	px	4	\$ x plane
2	px	-4	\$ x plane
3	pz	4	\$ z plane
4	pz	-4	\$ z plane
5	py	4.2	\$ y plane
6	py	7.4	\$ y plane

```

7 rcc 0 10 0 0 0.1 0 0.1      $ y cylinder
8 px 40                        $ x plane
9 px -40                       $ x plane
10 pz 40                       $ z plane
11 pz -40                      $ z plane
12 py 40                       $ y plane
13 py -40                      $ y plane

mode p

c Materials :

m1  6000  -0.015                $ aluminium
    14000  -0.001
    23000  -0.009
    24000  -0.115
    25000  -0.0015
    26000  -0.8525
    42000  -0.006

m2  6000  -0.000124            $ air
    7000   -0.755267           $ C(Z=6),N(Z=7),O(Z=8),Ar(z=18)
    8000   -0.231781
    18000  -0.012827

c

c Source:                       $ Co-60

sdef ERG=d1 vec=0 1 0 dir=1     $ General Source

SI1 1 1.17 1.33                $ Energy of Co-60

SP1 99.89 99.98                $ %abundance

nps 1E8

c

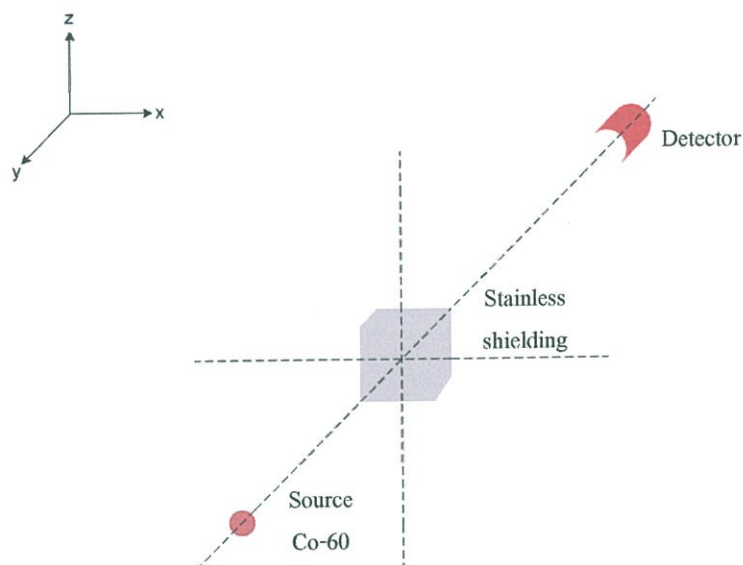
c tally cards:

```

f6:p 2

\$ Energy deposition(cell)

รูปแบบการเขียนโปรแกรมการวัดอัตราการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังสแตนเลส



รูปที่ 3.9 แบบจำลองอัตราการส่งผ่านของรังสีผ่านสแตนเลสในระบบพิกัด 3 มิติ

Set Lab (stainless steel shielding)

c MCNP input file 16 plate

c Cell Cards :

```

1 1 -7.9 -1 2 -3 4 5 -6          imp:p=1 $ St
2 2 -0.00125 -7                imp:p=1 $ dt
3 2 -0.00125 #1 #2 (-8 9 -10 11 -12 13)  imp:p=1 $ air
C Void
4 0 ( 8 : -9 : 10 : -11 : 12 : -13 )    imp:p=0 $ srd

```

c

c Surface Cards :

```

1 px 2.5          $ x plane
2 px -2.5        $ x plane

```

```

3 pz 2.5 $ z plane
4 pz -2.5 $ z plane
5 py 4.2 $ y plane
6 py 7.4 $ y plane
7 rcc 0 10 0 0 0.1 0 0.1 $ y cylinder
8 px 40 $ x plane
9 px -40 $ x plane
10 pz 40 $ z plane
11 pz -40 $ z plane
12 py 40 $ y plane
13 py -40 $ y plane

mode p

c Materials :

m1 14000 -0.005 $ Stainless
    24000 -0.173 $ Si(Z=14),Cr(Z=24),Mn(Z=25)
    25000 -0.01 $ Fe(Z=26),Ni(Z=28)
    26000 -0.714
    28000 -0.098

m2 6000 -0.000124 $ air
    7000 -0.755267 $ C(Z=6),N(Z=7),O(Z=8),Ar(z=18)
    8000 -0.231781
    18000 -0.012827

c

c Source: $ Co-60

sdef ERG=d1 vec=0 1 0 dir=1 $ General Source

SII 1 1.17 1.33 $ Energy of Co-60

SP1 99.89 99.98 $ %abundance

nps 1E8

```

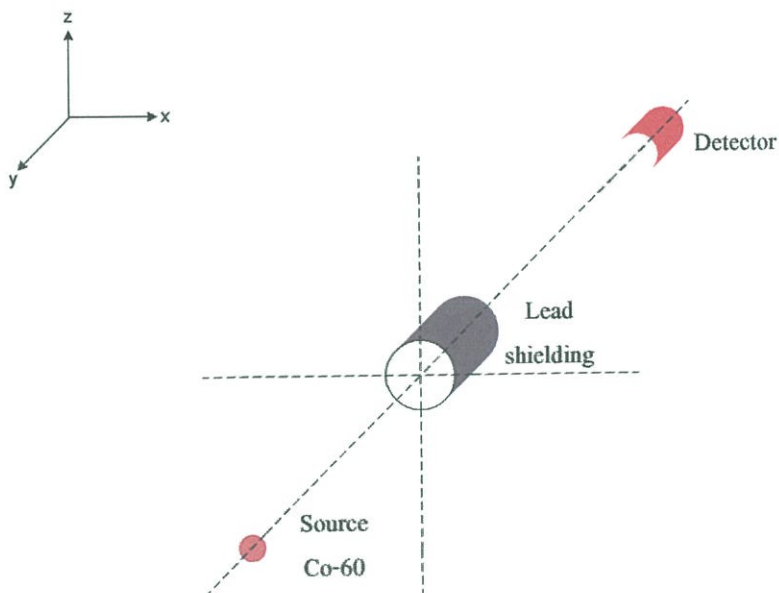
c

c tally cards:

f6:p 2

\$ Energy deposition(cell)

รูปแบบการเขียนโปรแกรมการวัดอัตราการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังตะกั่ว



รูปที่ 3.10 แบบจำลองอัตราการส่งผ่านของรังสีผ่านตะกั่วในระบบพิกัด 3 มิติ

Set Lab (Lead shielding)

c MCNP input file 6 plate

c Cell Cards :

```

1 1 -11.34 -1                                imp:p=1 $ St
2 2 -0.00125 -2                              imp:p=1 $ dt
3 2 -0.00125 #1 #2 (-8 9 -10 11 -12 13)     imp:p=1 $ air
C Void
4 0 ( 8 :-9 :10 :-11 :12 :-13 )             imp:p=0 $ srd

```

c

c Surface Cards :

```

1 rcc 0 4.2 0 0 1.19 0 2                    $ y cylinder

```

```

2 rcc 0 10 0 0 0.1 0 0.1 $ y cylinder
8 px 40 $ x plane
9 px -40 $ x plane
10 pz 40 $ z plane
11 pz -40 $ z plane
12 py 40 $ y plane
13 py -40 $ y plane

mode p

c Materials :

m1 82000 -0.8 $ Pb(Z=82)
m2 6000 -0.000124 $ air
7000 -0.755267 $ C(Z=6),N(Z=7),O(Z=8),Ar(z=18)
8000 -0.231781
18000 -0.012827

c

c Source: $ Co-60

sdef ERG=d1 vec=0 1 0 dir=1 $ General Source

SI1 1 1.17 1.33 $ Energy of Co-60

SP1 99.89 99.98 $ % abundance

nps 1E8

c

c tally cards:

f6:p 2 $ Energy deposition(cell)

```

ลำดับถัดมาเป็นการอธิบายคำสั่งในแต่ละบรรทัดสำหรับการเขียนโปรแกรมการวัดการส่งผ่านรังสี เนื่องจากแบบจำลองทั้ง 3 ประเภทมีรูปแบบการเขียนที่คล้ายคลึงกันจึงอธิบายการส่งผ่านรังสีผ่านอะลูมิเนียมเพียงประเภทเดียว

ส่วนที่ 1 นี้เป็นการเขียนชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์ (Cell card) สามารถอธิบายชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์ในแต่ละบรรทัด ได้ดังนี้

c Cell Cards :

1 1 -2.7 -1 2 -3 4 5 -6	imp:p=1 \$ Al
2 2 -0.00125 -7	imp:p=1 \$ dt
3 2 -0.00125 #1 #2 (-8 9 -10 11 -12 13)	imp:p=1 \$ air
4 0 (8:-9:10:-11:12:-13)	imp:p=0 \$ srd

บรรทัดแรกของชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์เป็นการสร้างตัวกำกับรังสีมีรูปทรงสี่เหลี่ยมสำหรับบรรทัดแรกมีคำอธิบาย ดังนี้

1	หมายเลขเซลล์สำหรับเรียกตัวกำกับอะลูมิเนียม
1	หมายเลขชุดคำสั่งวัสดุ ซึ่งอะลูมิเนียมมีเลขชุดคำสั่งวัสดุ m=1
-2.7	ความหนาแน่นเชิงมวลของตัวกำกับอะลูมิเนียมมีหน่วย (ถ้าความหนาแน่นเป็นเชิง จะใส่เครื่องหมายลบอยู่หน้าตัวเลข แต่ถ้าความหนาแน่นเป็นเชิงอะตอม(atom/cm^3) จะใส่เครื่องหมาย บวกหน้าตัวเลข)
-1 2 -3 4 5 -6	คือ หมายเลขชุดคำสั่งพื้นผิวใช้กำหนดขอบเขตของตัวกำกับ อะลูมิเนียมด้วยวิธีการซ้อนทับกันของพื้นที่ เขียน โปรแกรม โดย การเว้นวรรคระหว่างตัวอักษร (เนื่องจาก เลขพื้นผิวที่ 1-6 นี้ถูกกำหนดเป็นระนาบ ดังนั้นถ้า เครื่องหมายหน้าเลขชุดคำสั่งติดลบจะเป็นการคิดพื้นที่ในทิศทาง ของเส้นจำนวนเต็มลบแต่ถ้าเครื่องหมายเป็นบวก จะคิดพื้นที่ใน ทิศทางของเส้นจำนวนเต็มบวก)
imp:p=1	คือ ชุดคำสั่ง cell important ทำหน้าที่กำหนดความสัมพันธ์ ระหว่างอนุภาคกับเซลล์ โดยกำหนด p=1 หมายถึงให้เซลล์ ดังกล่าวคิดการส่งผ่านของอนุภาคโฟตอนด้วย

บรรทัดที่สองของชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์เป็นการสร้างหัววัดรังสีทรงกระบอก สำหรับบรรทัดที่สองมีคำอธิบาย ดังนี้

2	หมายเลขเซลล์สำหรับเรียกหัววัดรังสี
2	หมายเลขชุดคำสั่งวัสดุ ซึ่งหัววัดรังสีมีเลขชุดคำสั่งวัสดุ $m=2$
-0.00125	ความหนาแน่นเชิงมวลของอากาศมีหน่วย (g/cm^3)
-7	คือ หมายเลขชุดคำสั่งพื้นผิวใช้กำหนดขอบเขตของหัววัดรังสี ด้วยวิธีการเลือกพื้นที่ทั้งหมด (Union Operator) (เนื่องจาก เลขพื้นผิวที่ 7 นี้ถูกกำหนดเป็นทรงกระบอกดังนั้นถ้า เครื่องหมายหน้าเลขชุดคำสั่งคิดลบจะเป็นการคิดพื้นที่ในทิศทาง ของเส้นจำนวนเต็มลบแต่ถ้าเครื่องหมายเป็นบวก จะคิดพื้นที่ใน ทิศทางของเส้นจำนวนเต็มบวก)
imp:p=1	กำหนดให้เซลล์ดังกล่าวคิดการส่งผ่านของอนุภาคโฟตอนด้วย

บรรทัดที่สามของชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์เป็นการสร้างบรรยากาศรอบๆการทดลอง สำหรับบรรทัดที่สามมีคำอธิบาย ดังนี้

3	หมายเลขเซลล์สำหรับเรียกบรรยากาศรอบๆ
2	หมายเลขชุดคำสั่งวัสดุ ซึ่งหัววัดรังสีมีเลขชุดคำสั่งวัสดุ $m=2$
-0.00125	ความหนาแน่นเชิงมวลของอากาศมีหน่วย (g/cm^3)
#1 #2 (-8 9 -10 11 -12 13)	คือ หมายเลขชุดคำสั่งพื้นผิวใช้กำหนดขอบเขตของหัววัดรังสี ด้วยวิธีการซ้อนทับกันของพื้นที่ (Intersection Operator) สำหรับ หมายเลขที่อยู่ในวงเล็บ และวิธีการไม่นำพื้นที่ส่วนที่กำหนดมา คิดด้วย (Complement Operator) จะใช้เครื่องหมาย # นำหน้า หมายเลข
imp:p=1	กำหนดให้เซลล์ดังกล่าวคิดการส่งผ่านของอนุภาคโฟตอนด้วย

การกำหนดขอบเขตนั้นจะสมบูรณ์ก็ต่อเมื่อได้ทำการกำหนดขอบเขตส่วนที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับแบบจำลองซึ่งก็คือชุดคำสั่งบรรทัดที่ 4 เป็นชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์เป็นขอบเขตที่ไม่ได้เกี่ยวข้องกับแบบจำลอง มีคำอธิบาย ดังนี้

- 4 หมายเลขเซลล์สำหรับเรียกขอบเขตส่วนที่ไม่ได้เกี่ยวข้อง
- 0 หมายเลขชุดคำสั่งวัสดุ ซึ่งเป็นขอบเขตที่ไม่ได้เกี่ยวข้องจึงมีเลขชุดคำสั่ง $m=0$
- 8:-9:10:-11:12:-13 คือ หมายเลขชุดคำสั่งพื้นผิวใช้กำหนดขอบเขตพื้นที่ด้วยวิธีการเลือกพื้นที่ทั้งหมด(Union Operator) ซึ่งจะใช้เครื่องหมาย : ขึ้นระหว่างหมายเลขต่าง
- imp:p=0 กำหนดให้เซลล์ดังกล่าวไม่คิดการส่งผ่านของอนุภาคโฟตอนด้วย

ส่วนที่ 2 นี้เป็นการเขียนชุดคำสั่งพื้นผิว(Surface card) สามารถอธิบายชุดคำสั่งพื้นผิวในแต่ละบรรทัด ได้ดังนี้

c Surface Cards :

- 1 px 4 เลข 1 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 1 กำหนดการสร้างระนาบตัดแกน x ระยะ 4 ซม.
- 2 px -4 เลข 2 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 2 กำหนดการสร้างระนาบตัดแกน x ระยะ -4 ซม.
- 3 pz 4 เลข 3 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 3 กำหนดการสร้างระนาบตัดแกน z ระยะ 4 ซม.
- 4 pz -4 เลข 4 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 4 กำหนดการสร้างระนาบตัดแกน z ระยะ-4 ซม.
- 5 py 4.2 เลข 5 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 5 กำหนดการสร้างระนาบตัดแกน y ระยะ 4.2 ซม.
- 6 py 7.4 เลข 6 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 6 กำหนดการสร้างระนาบตัดแกน y ระยะ 7.4 ซม.
- 7 rcc 0 10 0 0 0.1 0 0.1 เลข 7 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 7 กำหนดการสร้างทรงกระบอกมี

- หน้าตัดอยู่ที่ตำแหน่ง(x,y,z=0,10,0) มีเวกเตอร์ความหนา
(x,y,z=0,0.1,0)ในแกน y = 0.1 ซม. รัศมี = 0.1 ซม. ตามลำดับ
- 8 px 40 เลข 8 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 8 กำหนด
การสร้างระนาบตัดแกน x ระยะ 40 ซม.
- 9 px -40 เลข 9 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 9 กำหนด
การสร้างระนาบตัดแกน x ระยะ -40 ซม.
- 10 pz 40 เลข 10 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 10 กำหนด
การสร้างระนาบตัดแกน z ระยะ 40 ซม.
- 11 pz -40 เลข 11 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 11 กำหนด
การสร้างระนาบตัดแกน z ระยะ -40 ซม.
- 12 py 40 เลข 12 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 12 กำหนด
การสร้างระนาบตัดแกน y ระยะ 40 ซม.
- 13 py -40 เลข 13 คือ ชุดคำสั่งพื้นผิวที่ 13 กำหนด
การสร้างระนาบตัดแกน y ระยะ -40 ซม.

หลังจากทำการกำหนดชุดคำสั่งคุณสมบัติของเซลล์และชุดคำสั่งเรียบร้อยแล้ว ถัดมาคือ ส่วนที่ 3 :ซึ่งส่วนนี้เป็นการกำหนดชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะเพื่อให้แบบจำลองมีความสมบูรณ์สามารถอธิบายชุดคำสั่งข้อมูลจำเพาะในแต่ละบรรทัด ได้ดังนี้

mode p กำหนดชนิดของอนุภาคโฟตอน(p)ในแบบจำลองนี้

Source specification card

เป็นคำสั่งที่ใช้ระบุข้อมูลของต้นกำเนิดรัง โดยใช้ชุดคำสั่ง sdef ,SI1,SP1 ซึ่งเป็นคำสั่งระบุต้นกำเนิดรังสี่เบื้องต้น เนื่องจากต้นกำเนิดรังสี่ที่ใช้ประกอบการทดลองวัดอัตราการส่งผ่านนั้นเป็น ^{60}Co ซึ่งให้โฟตอนออกมา 2 ระดับพลังงานที่ 1.17 , 1.33 MeV แสดงรายละเอียดดังนี้

ERG=d1

ระดับพลังงานโฟตอนจากต้นกำเนิด
รังสี่กำหนดให้เป็นd1 เนื่องจากมี
2 ระดับพลังงาน

vec=0 1 0	เวกเตอร์ของรังสีแนวแกน y
dir=1	ทิศทางของรังสี COS(0)=1
SI1 1 1.17 1.33	กำหนดให้ต้นกำเนิดรังสีปลดปล่อยโฟตอน ตอนที่ระดับพลังงาน 1.17,1.33 MeV
SP1 99.89 99.98	ข้อมูล %abundanceของต้นกำเนิดรังสี

Material specification card

เป็นคำสั่งกำหนดวัสดุส่วนผสมของเซลล์ใดๆภายในแบบจำลอง ต้องทำการระบุ เลขอะตอม(ZZZ), เลขมวล(AAA), ร้อยละองค์ประกอบธาตุ ซึ่งแบบจำลองการวัดอัตราการส่งผ่านมีรูปแบบการเขียนดังนี้

Mn ZZZAAA.nnC fraction

m1 คือ หมายเลขวัสดุที่ 1 เป็นวัสดุชนิดอะลูมิเนียมประกอบด้วยส่วนผสมดังนี้

m1	6000	-0.015	ZZZ=6,AAA=0 ; (C) องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 1.5 %
	14000	-0.001	ZZZ=14,AAA=0 ; (Si) องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 0.1 %
	23000	-0.009	ZZZ=23,AAA=0 ; (V) องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 0.9 %
	24000	-0.115	ZZZ=24,AAA=0 ; (Cr) องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 11.5 %
	25000	-0.0015	ZZZ=25,AAA=0 ; (Mn) องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 0.15 %
	26000	-0.8525	ZZZ=26,AAA=0 ; (Fe) องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 85.25 %
	42000	-0.006	ZZZ=42,AAA=0 ; (Mo) องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 0.6 %

m2 คือ หมายเลขวัสดุที่ 2 เป็นวัสดุชนิดอากาศประกอบด้วยส่วนผสมดังนี้

m2	6000	-0.000124	ZZZ=6,AAA=0 ; (C)
			องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 0.000124 %
	7000	-0.755267	ZZZ=7,AAA=0 ; (N ₂)
			องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 75.526 %
	8000	-0.231781	ZZZ=8,AAA=0 ; (O ₂)
			องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 23.17 %
	18000	-0.012827	ZZZ=18,AAA=0 ; (Ar)
			องค์ประกอบธาตุเชิงน้ำหนัก 1.282 %

Tally card

f6:p 2 คือ คำสั่ง Tally ใช้แสดงผลการวัดรังสีของหัววัดรังสีโดยกำหนดให้เซลล์ที่ 2 เป็นหัววัดมีรูปแบบการวัดอนุภาค โฟตอน(p) แบบสะสมพลังงาน(f6)

Cut off

nps 1E8 คือ คำสั่งใช้ในการประมวลผลโดยกำหนดการยิงอนุภาค 1E8 ครั้ง

3.3 ออกแบบรูปทรงตัวกำบังรังสีด้วยโปรแกรม MCNP

ขั้นตอนการออกแบบตัวกำบังรังสีถูกออกแบบออกเป็น 2 หัวข้อ คือ การประเมินทางด้านรังสี และ รูปแบบการเขียน โปรแกรมของการออกแบบตัวกำบังรังสี

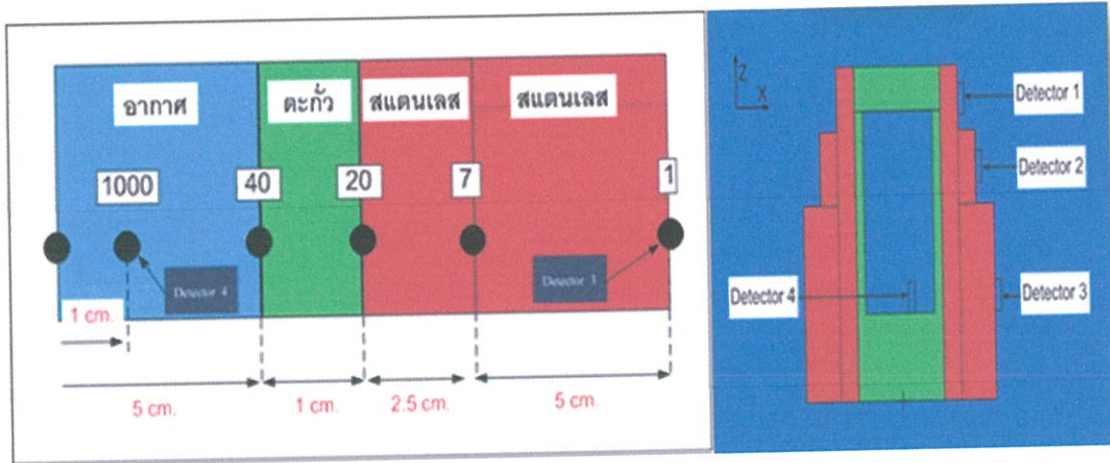
3.3.1 การประเมินทางด้านรังสี

การประเมินรังสีสำหรับการออกแบบความหนาของตัวกำบังทำโดยการกำหนดความเข้มรังสีจากภายในสู่ภายนอกตัวกำบังให้ลดลง 1000 เท่าทุกส่วน จากนั้นระบุความเข้มรังสีตามจุดต่างๆ ภายในตัวกำบังรังสีให้ลดลงเป็นสัดส่วนดังรูป 3.11 แล้วคำนวณหาความหนาจากสมการ 3.1 และสมการ 3.2

$$I_1 d_1^2 = I_2 d_2^2 \quad (3.1)$$

$$I_B = I_A e^{-\mu x} \quad (3.2)$$

สมการ 3.1 ใช้คำนวณหาความเข้มรังสีภายในตัวกำบังในส่วนของอากาศ และสมการที่ 3.2 ใช้คำนวณหาความหนาของตัวกำบังรังสีดังนี้



รูปที่ 3.11 การประเมินผลทางรังสี

อากาศภายในตัวกำบัง

จาก $I_1 d_1^2 = I_2 d_2^2$

$$I_2 = \frac{I_1 d_1^2}{d_2^2}$$

$$I_2 = \frac{(1000)(1^2)}{(5^2)}$$

$$I_2 = 40 \text{ โฟตอน/ชม.วินาที}$$

วัสดุตะกั่วของตัวกำบังรังสี

จาก $I_B = I_A e^{-\mu x}$

$$x = -\frac{\ln\left(\frac{I_B}{I_A}\right)}{\mu}$$

$$x = -\frac{\ln\left(\frac{20}{40}\right)}{0.4}$$

$$x = 1.2 \text{ cm.}$$

วัสดุสแตนเลสของตัวกำบังรังสี

จาก

$$I_B = I_A e^{-\mu x}$$

$$x = -\frac{\ln\left(\frac{I_B}{I_A}\right)}{\mu}$$

$$x = -\frac{\ln\left(\frac{7}{20}\right)}{0.4}$$

$$x = 2.5 \text{ cm.}$$

วัสดุสแตนเลสของตัวกำบังรังสี

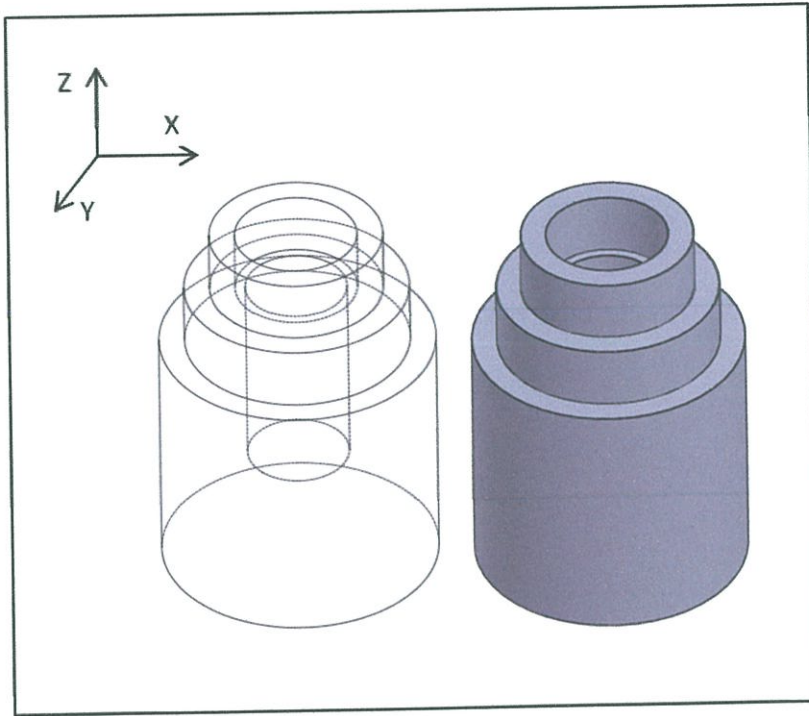
จาก

$$I_B = I_A e^{-\mu x}$$

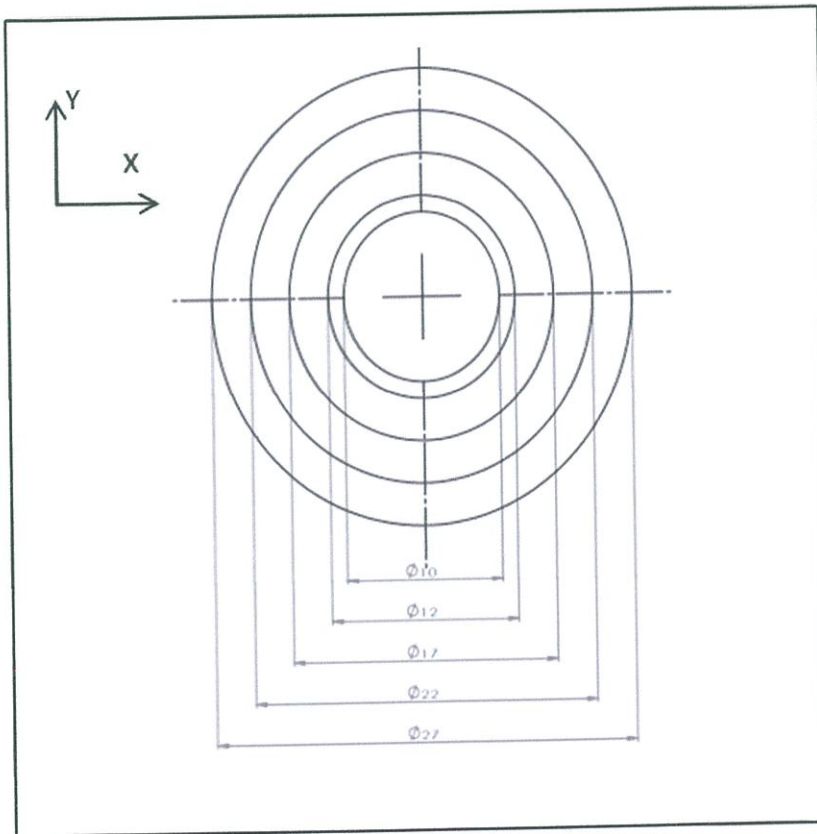
$$x = -\frac{\ln\left(\frac{I_B}{I_A}\right)}{\mu}$$

$$x = -\frac{\ln\left(\frac{1}{7}\right)}{0.4}$$

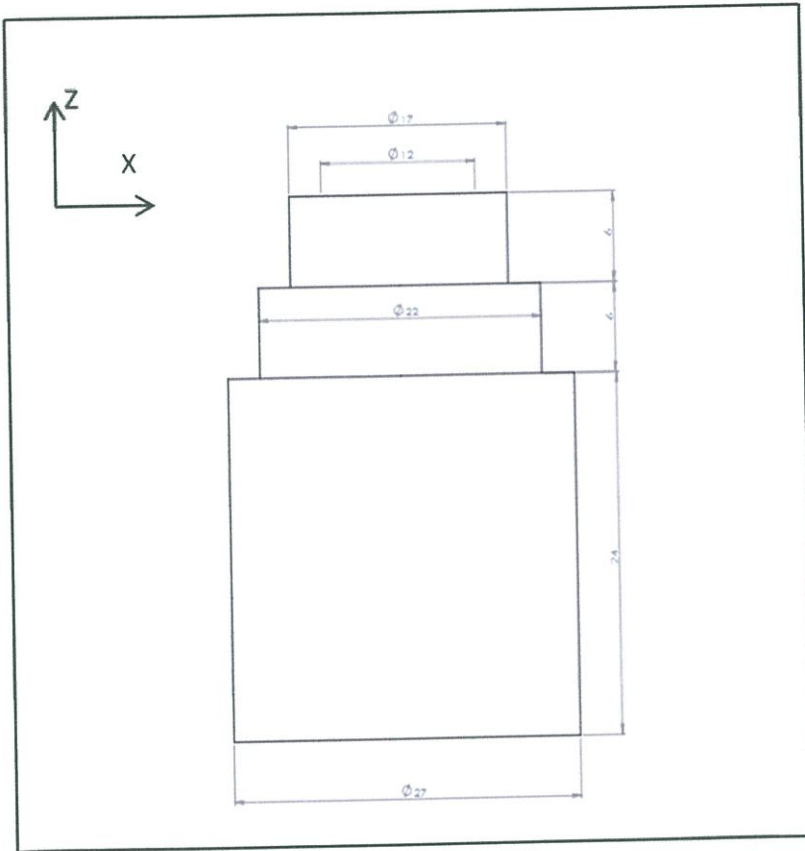
$$x = 5 \text{ cm.}$$



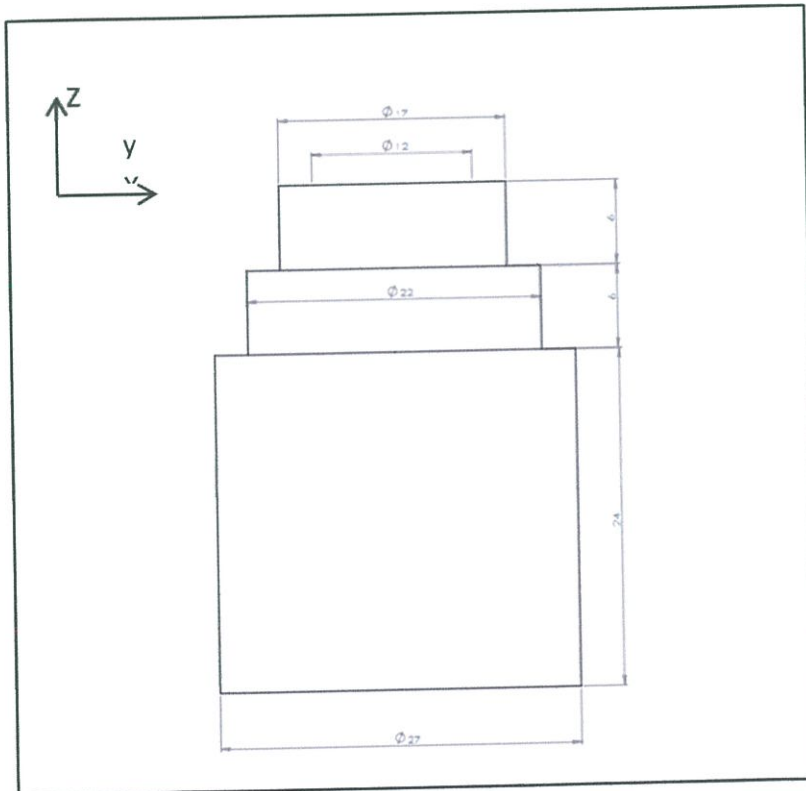
รูปที่ 3.12 ตัวกำบังรังสีทรงกระบอก



รูปที่ 3.13 ก. ภาพฉายตัวกำบังรังสีทรงกระบอก ภาพด้านบน

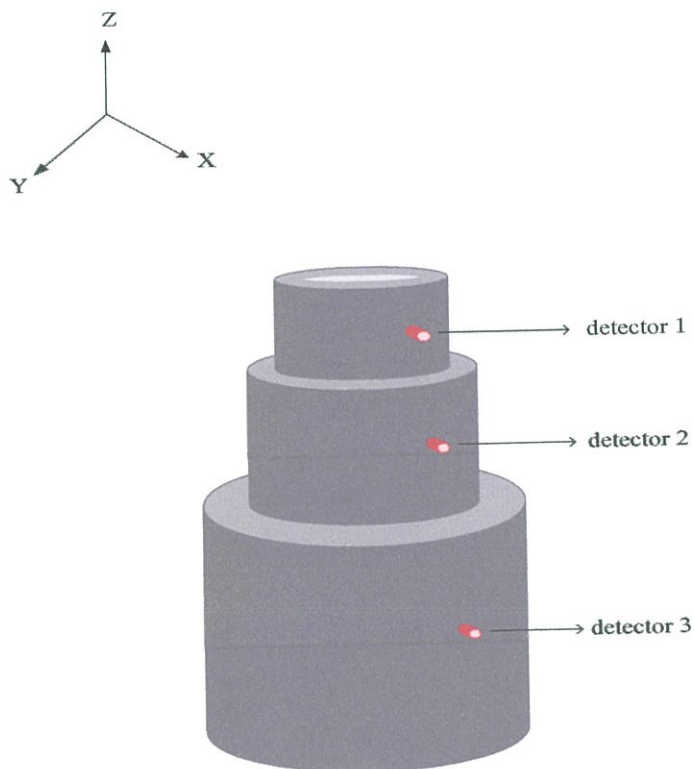


รูปที่ 3.13 ข. ภาพฉายตัวกำบังรังสีทรงกระบอก ภาพด้านหน้า



รูปที่ 3.13 ค. ภาพฉายตัวกำบังรังสีทรงกระบอก ภาพด้านข้าง

3.3.2 รูปแบบการเขียนโปรแกรมของการออกแบบตัวกำบังรังสี



รูปที่ 3.14 ออกแบบตัวกำบังรังสีทรงกระบอก

Design Shielding

c MCNP input

c Cell Cards :

1	1	-0.00125	(-1 10)	imp:p=1	\$ air
2	2	-11.34	(1 -2 10)	imp:p=1	\$ Pb shd
3	2	-11.34	(2 -3 10)	imp:p=1	\$ Pb shd
4	3	-7.9	(3 -4)	imp:p=1	\$ St shd
5	3	-7.9	(4 -5)	imp:p=1	\$ St shd
6	3	-7.9	(4 -6 10)	imp:p=1	\$ St shd
7	1	-0.00125	(-7)	imp:p=1	\$ dtt#1 outside
8	1	-0.00125	(-8)	imp:p=1	\$ dtt#2 outside

9 1 -0.00125 (-9) imp:p=1 \$ dt#3 outside
 10 1 -0.00125 (-10) imp:p=1 \$ dt#4 inside
 100 1 -0.00125 (4 5 6 7 8 9) & imp:p=1
 (-40 50 -60 70 -80 90) imp:p=1 \$ air

c Void

200 0 (40 : -50 : 60 : -70 : 80 : -90) imp:p=0 \$ srd

c

c Surface Cards :

1	rcc	0 0 12	0 0 19	5	\$ z cylinder
2	rcc	0 0 0	0 0 31	6	\$ z cylinder
3	rcc	0 0 0	0 0 36	6	\$ z cylinder
4	rcc	0 0 0	0 0 36	8.5	\$ z cylinder
5	rcc	0 0 24	0 0 6	11	\$ z cylinder
6	rcc	0 0 0	0 0 24	13.5	\$ z cylinder
7	rcc	8.5 0 33	0.1 0 0	1	\$ z cylinder
8	rcc	11 0 27	0.1 0 0	1	\$ z cylinder
9	rcc	13.5 0 12	0.1 0 0	1	\$ z cylinder
10	rcc	1 0 13	0.1 0 0	1	\$ z cylinder
40	px	120			\$ x cylinder
50	px	-120			\$ x cylinder
60	py	120			\$ y cylinder
70	py	-120			\$ y cylinder
80	pz	120			\$ z cylinder
90	pz	-120			\$ z cylinder

mode p

c Materials :

```

m1  6000  -0.000124          $ Air
    7000  -0.755267          $ C(Z=6),N(Z=7),O(Z=8),Ar(z=18)
    8000  -0.231782
    18000 -0.012827

m2  82000  -1                $ Pb(Z=82)

m3  14000  -0.005            $ Stainless
    24000  -0.173            $ Si(Z=14),Cr(Z=24)
    25000  -0.01             $ Mn(Z=25),Fe(Z=26),Ni(Z=28)
    26000  -0.714
    28000  -0.098

c

c Source:                    $ Co-60

sdef POS 0 0 13  ERG=d1      $ General Source

SI1 1 1.17 1.33              $ Energy of Co-60

SP1 99.89 99.98              $ %abundance

nps 1E9

c

c tally cards:

f4:p 7 8 9 10                $ Photon Flux (cell)

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

```

3.4 วัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.1 ระบบการวัดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

ขั้นตอนการทำงาน

1. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง แหล่งกำเนิดรังสี, ตัวกำบังทั้ง 3 ชนิด อะลูมิเนียม สแตนเลส, ตะกั่ว, หัววัด รังสี, คอมพิวเตอร์ที่มีซอฟต์แวร์ Genie 2000 ดังรูป 3.15 -3.17 และตารางที่ 3.1-3.4

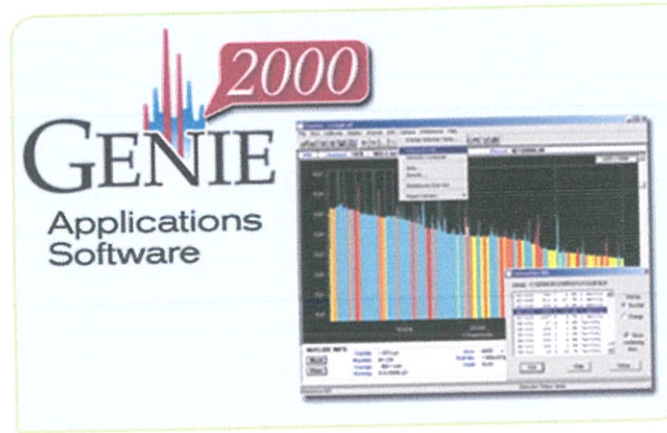


รูป 3.15

รูปที่ 3.15 แสดงแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาแบบปิดผนึก



รูปที่ 3.16 Scintillation Detector $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$



รูปที่ 3.17 โปรแกรม Genie2000

ตารางที่ 3.1 ข้อมูลต้นกำเนิดรังสีมาตรฐาน

Isotope	Half-life	Activity (μCi)	Energy (keV)	Absolute Intensity(%)
Cs-137	30.17 yrs	1.028 (1 Jul 96)	661.66	85.21
Co-60	5.27 yrs	10.32 (1 Sep 92)	1173.24	99.89
			1332.50	99.98

ตารางที่ 3.2 ประเภทตัวกำบังรังสีแกมมา

Type	Cross-section area
Lead	Circle
Stainless steel	Sphere
Aluminum	Sphere

ตารางที่ 3.3 Specification of Scintillation detector(LaBr₃)

Performance		Physical		Environmental	
Resolution	3% at 662 keV (¹³⁷ Cs)	size	1.5 × 1.5 in.	Operating temperature	+4 to +43 °C
Operating Voltage	600 V dc.	Weight	0.43 Kg.	Operating humidity	85% non-condensing

2. วางตำแหน่งของอุปกรณ์โดยกำหนดให้แหล่งกำเนิดรังสี และ window ของหัววัดห่างกันห่างกัน 10 cm และทำการปรับคุณสมบัติของหัววัดจากโปรแกรม Genie2000 ดังตาราง

ตารางที่ 3.4 ข้อมูลคุณสมบัติของหัววัดรังสี

Setup	
High volts	600 V
Range	+1300 V
Volt limit	1300.0 V
Course gain	× 4
Fine gain	1.0000×
Pour gain	1.10×
MCA	1-1024 channel

3. ทำการปรับเทียบพลังงานโดยใช้แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา จาก ^{60}Co กับ ^{137}Cs
4. ทำการวัดค่าความเข้มรังสี I_0 จากต้นกำเนิดรังสี ^{60}Co
5. นำวัสดุกำบังรังสีประเภทอะลูมิเนียม มาวางในตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับหัววัดรังสีแล้วทำการวัดค่า I โดยเพิ่มความหนาของวัสดุกำบังทีละ 0.4 cm ตั้งแต่ 0.4 – 3.2 cm
6. ทำการนับวัดรังสีโดยใช้โปรแกรม Genie 2000 ใช้เวลานับวัดรังสี 600 วินาที/ครั้ง
7. บันทึกผลการทดลอง
8. จากผลการวัดค่า I, I_0 สามารถนำไปคำนวณหาค่า T, μ, HVL, TVL

ได้จากสูตร

$$T = \frac{I}{I_0}$$

$$\mu = -\left(\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x}\right)$$

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad , \quad TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

9. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 5-8 แต่ทำการเปลี่ยนวัสดุกำบังเป็นสแตนเลสและตะกั่ว

10. วิเคราะห์ผลการทดลอง

3.4.2 การจำลองทางโปรแกรม MCNP

ขั้นตอนการทำงาน

1. สร้างแบบจำลอง โดยการเขียนโปรแกรมการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียมก่อนดังรูปที่ 3.9 ให้สอดคล้องกับการทดลองมากที่สุด ใช้โปรแกรม context เขียนไฟล์อินพุต

2. เขียนโปรแกรมให้ตัวกำบังมีความหนาตั้งแต่ 0.4 – 3.2 cm เพิ่มความหนาทีละ 0.4 cm จากที่ไม่มีตัวกำบังรังสี แล้วทำการเซฟไฟล์

3. ตรวจสอบโครงสร้างของแบบจำลองโดยการใช่ cmd เข้าไปยังที่อยู่ของตำแหน่งไฟล์อินพุตจากนั้นพิมพ์คำสั่งลงใน cmd ดังนี้

mcnpx i=ชื่อไฟล์อินพุต.in ip

4. ประมวลผลแบบจำลองโดยการใช่ cmd เข้าไปยังที่อยู่ของตำแหน่งไฟล์อินพุตจากนั้นพิมพ์คำสั่งลงใน cmd ดังนี้

mcnpx i=ชื่อไฟล์อินพุต.in o=ชื่อไฟล์อินพุตที่ตั้งใหม่.ou

5. บันทึกผลการทดลองค่า I, I_0 จากไฟล์อินพุตใหม่นี้

6. จากผลการวัดค่า I, I_0 สามารถนำไปคำนวณหาค่า T, μ, HVL, TVL

ได้จากสูตร

$$T = \frac{I}{I_0}$$

$$\mu = -\left(\frac{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)}{x}\right)$$

$$HVL = \frac{\ln 2}{\mu} \quad , \quad TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

7. ทำการทดลองซ้ำข้อที่ 5-8 แต่ทำการเปลี่ยนวัสดุกำบังเป็นสแตนเลสและตะกั่ว

8. วิเคราะห์ผลการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผล

ผลการทดลองการออกแบบอุปกรณ์ มีการทดลอง 2 ตอน ด้วยกันคือ การวัดและวิเคราะห์ผลด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ตอนที่สอง การวัดและประมวลผลด้วยแบบจำลองทางโปรแกรม MCNP ดังต่อไปนี้

4.1 การวัดและวิเคราะห์ผลด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

ผลการวัดด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ดังตารางที่ 4.1-4.3 แสดงผลการวัดการส่งผ่านของรังสีที่ความหนาต่างๆและค่าพารามิเตอร์ μ, HVL, TVL ของตัวกำบังรังสี 3 ประเภท เมื่อนำผลการทดสอบการส่งผ่านรังสีทั้ง 3 ประเภท ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่งผ่านรังสีกับความหนา ดังรูปที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าวัสดุที่นำมาทดสอบกำบังรังสีได้ดีจากมากไปน้อยตามลำดับดังนี้ ตะกั่ว สแตนเลส และอะลูมิเนียม

4.2 การวัดและวิเคราะห์แบบจำลองทางโปรแกรม MCNP

ผลการวัดทางแบบจำลองการส่งผ่านของรังสีทางโปรแกรม MCNP ดังตารางที่ 4.4-4.6 แสดงผลการส่งผ่านของรังสีที่ความหนาต่างๆและค่าพารามิเตอร์ μ, HVL, TVL ของตัวกำบังรังสี 3 ประเภท แล้วเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบัง อะลูมิเนียม สแตนเลส ตะกั่ว ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งผลที่ได้นั้นเหมือนผลของระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ จากนั้นแสดงแบบจำลองทางโปรแกรมการส่งผ่านรังสี(เฉพาะอะลูมิเนียม) ดังรูปที่ 4.3-4.4

แล้วทำการเปรียบเทียบผลการวัดการส่งผ่านรังสีระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์กับผลการวัดแบบจำลองทางโปรแกรม MCNP ดังรูปที่ 4.5-4.7 ซึ่งผลจากการเปรียบเทียบนั้นมีความสอดคล้องกันมาก

สำหรับผลการออกแบบตัวกำบังรังสีทางโปรแกรม MCNP แสดงดังตารางที่ 4.7 แสดงความแตกต่างของความเข้มรังสีจากการประเมินทางรังสี กับการประมวลผลโปรแกรม ซึ่งผลที่ได้

นั้นมีค่าความแตกต่างน้อยมาก การออกแบบความหนาจึงมีความถูกต้อง และรูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ฟลักซ์ของโฟตอนเทียบกับระยะห่างจากต้นกำเนิด จากนั้นแสดงความเข้มรังสีตามตำแหน่งของหัววัด โดยตำแหน่ง detector 1, 2, 3 ที่วัดได้นั้นลดทอนรังสี 5450 เท่า, 3580 เท่า, 1380 เท่า ตามลำดับ ดังตารางที่ 4.8, รูปที่ 4.9 และรูปที่ 4.10-4.11 แสดงแบบจำลองการออกแบบตัวกำบังรังสีทางโปรแกรม MCNP

ตารางที่ 4.1 แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังประเภทอะลูมิเนียม

จำนวนแผ่น (แผ่น)	ความหนา (cm.)	I(counts/sec):600 sec		I _{รวม} (counts/sec)	Transmittance (T)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{ave}}(\text{cm}^{-1})$	HVL(cm)	TVL(cm)
		พลังงาน 1173.2 keV	พลังงาน 1332.5 keV						
2	0.4	1558	1250	2808	0.92	0.21	0.15	4.5	15.0
4	0.8	1490	1219	2709	0.89	0.15			
6	1.2	1443	1129	2572	0.84	0.14			
8	1.6	1378	1083	2461	0.81	0.13			
10	2	1250	1036	2286	0.75	0.14			
12	2.4	1207	922	2129	0.70	0.15			
14	2.8	1072	941	2013	0.66	0.15			
16	3.2	1040	838	1878	0.62	0.15			

หมายเหตุ : $I_0 = (1173.24 \text{ keV}, 1332.5 \text{ keV}) = 1695 + 1355 = 3050 \text{ counts/sec : 600 sec}$

Aluminium ref : $\mu_{1173 \text{ keV}} = 0.16 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{1332 \text{ keV}} = 0.15 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 4.2 แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังประเภทสแตนเลส

จำนวนแผ่น (แผ่น)	ความหนา (cm.)	I(counts/sec):600 sec		I _{รวม} (counts/sec)	Transmittance (T)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{ave}}(\text{cm}^{-1})$	HVL(cm)	TVL(cm)
		พลังงาน 1173.2 keV	พลังงาน 1332.5 keV						
2	0.4	1411	1193	2604	0.85	0.40	0.39	1.8	6.0
4	0.8	1221	1012	2233	0.73	0.39			
6	1.2	1085	853	1938	0.64	0.38			
8	1.6	927	762	1689	0.55	0.37			
10	2	758	594	1352	0.44	0.41			
12	2.4	683	556	1239	0.41	0.38			
14	2.8	558	465	1023	0.34	0.39			
16	3.2	526	382	908	0.30	0.38			

หมายเหตุ : $I_0 = (1173.24 \text{ keV}, 1332.5 \text{ keV}) = 1695 + 1355 = 3050 \text{ counts/sec : 600 sec}$

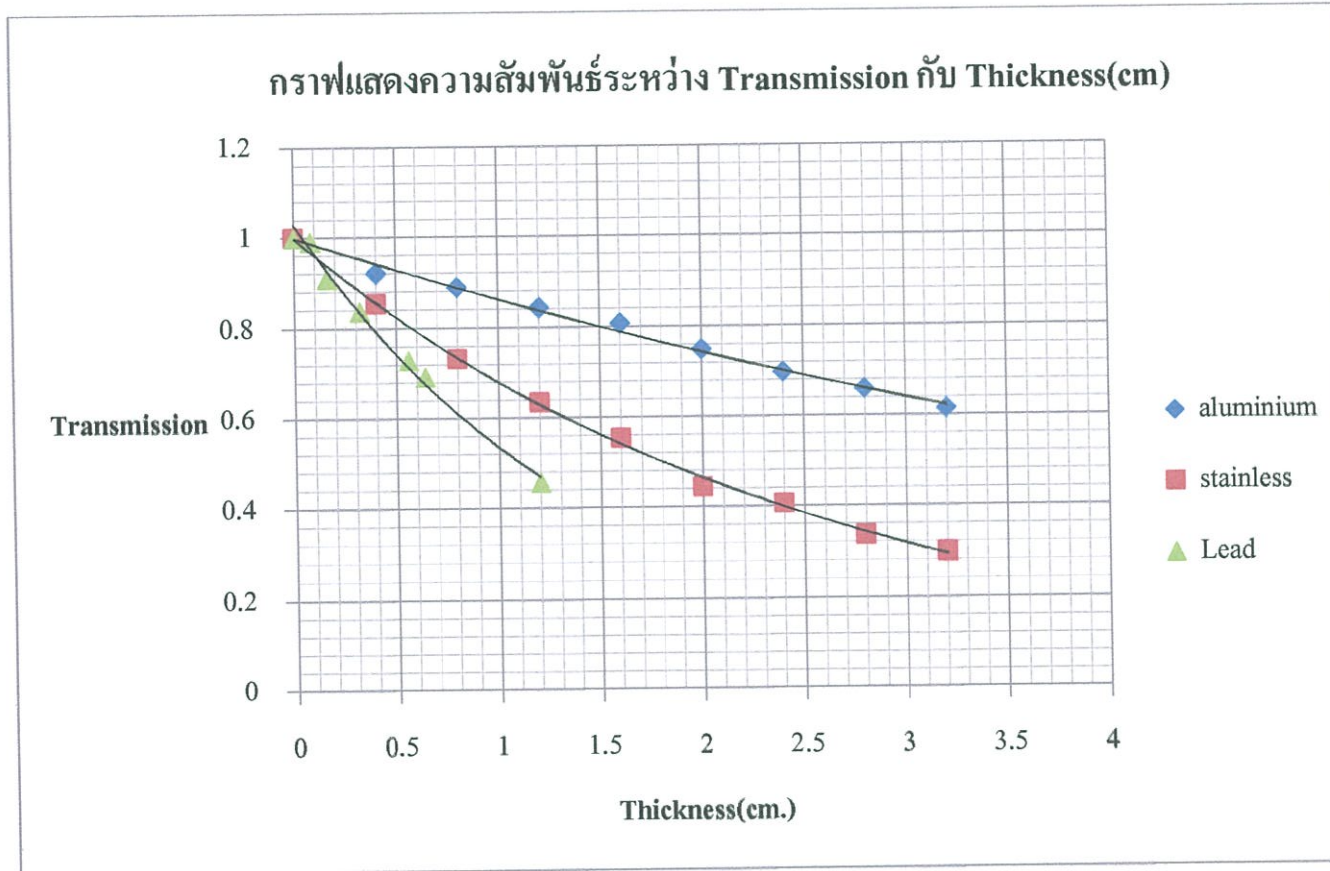
Stainless ref: $\mu_{1173 \text{ keV}} = 0.44 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{1332 \text{ keV}} = 0.41 \text{ cm}^{-1}$

ตารางที่ 4.3 แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังประเภทตะกั่ว

แผ่นที่	ความหนา (cm.)	I(counts/sec):600 sec		I _{รวม} (counts/sec)	Transmittance (T)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{ave}}(\text{cm}^{-1})$	HVL(cm)	TVL(cm)
		พลังงาน 1173.2 keV	พลังงาน 1332.5 keV						
1	0.08	1565	1296	2861	0.99	0.10	0.59	1.2	3.9
2	0.16	1482	1142	2624	0.91	0.59			
3	0.32	1379	1039	2418	0.84	0.55			
1+2+3	0.56	1172	936	2108	0.73	0.56			
4	0.64	1084	916	2000	0.69	0.57			
1+2+3+4	1.20	720	600	1320	0.46	0.65			

หมายเหตุ : $I_0 = (1173.24 \text{ keV}, 1332.5 \text{ keV}) = 1695 + 1355 = 3050 \text{ counts/sec : 600 sec}$

Lead ref: $\mu_{1173 \text{ keV}} = 0.7 \text{ cm}^{-1}$, $\mu_{1332 \text{ keV}} = 0.6 \text{ cm}^{-1}$



รูปที่ 4.1 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังทั้ง 3 ประเภท(การทดลอง)

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังอะลูมิเนียม(แบบจำลองทางโปรแกรมMCNP)

จำนวนแผ่น	ความหนา(cm.)	I(MeV/g)	Transmittance(T)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{ave}}(\text{cm}^{-1})$	HVL(cm)	TVL(cm)
2	0.4	1.00E+00	9.44E-01	1.44E-01	0.14	4.8	16.0
4	0.8	9.45E-01	8.91E-01	1.44E-01			
6	1.2	8.93E-01	8.42E-01	1.44E-01			
8	1.6	8.43E-01	7.95E-01	1.44E-01			
10	2	7.96E-01	7.50E-01	1.44E-01			
12	2.4	7.52E-01	7.09E-01	1.44E-01			
14	2.8	7.10E-01	6.69E-01	1.43E-01			
16	3.2	6.70E-01	6.32E-01	1.43E-01			

หมายเหตุ : tally f6 ; $I_0=1.06056E+00$ MeV/g

ตารางที่ 4.5 แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังสแตนเลส(แบบจำลองทางโปรแกรมMCNP)

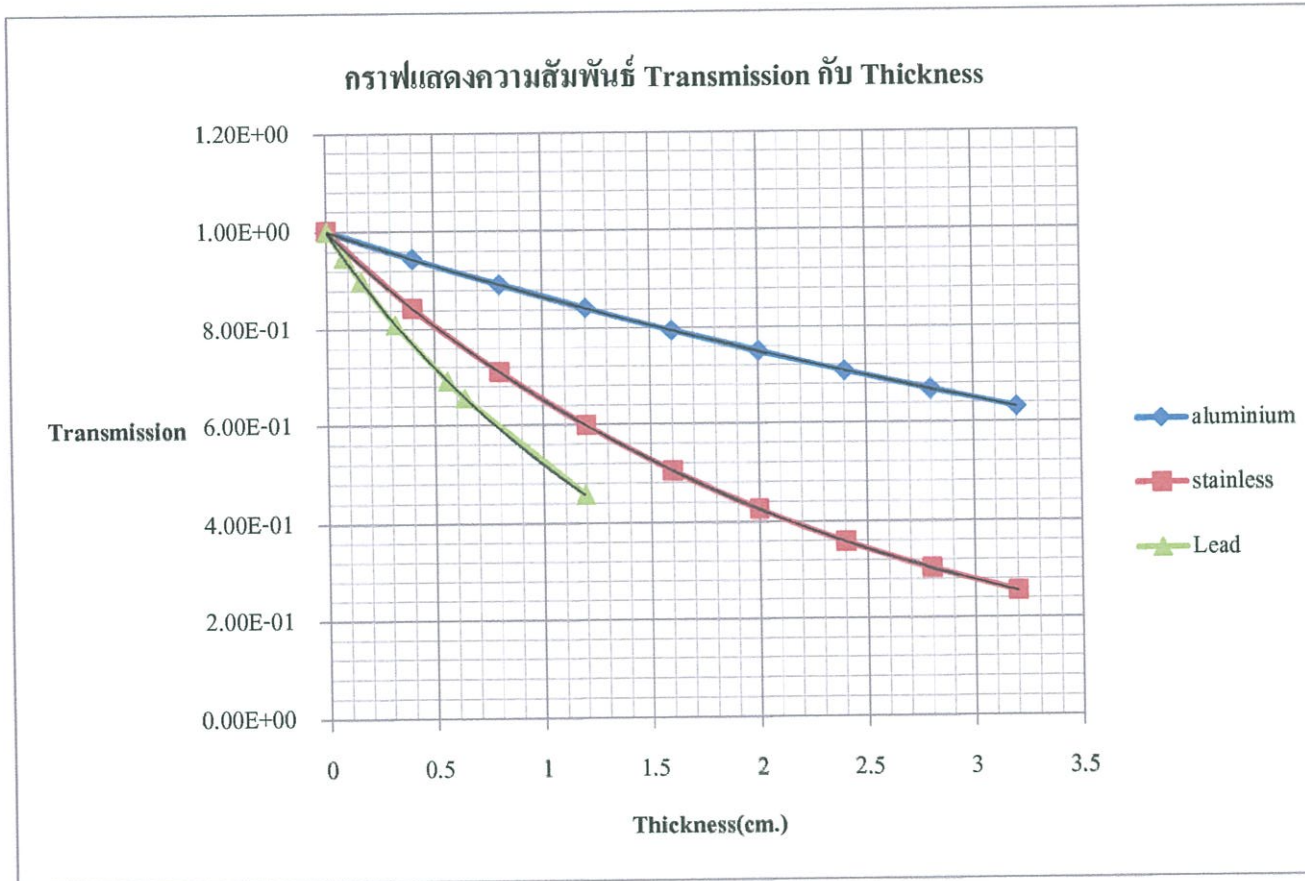
จำนวนแผ่น	ความหนา(cm.)	I(MeV/g)	Transmittance(T)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{ave}}(\text{cm}^{-1})$	HVL(cm)	TVL(cm)
2	0.4	8.94E-01	8.43E-01	4.28E-01	0.43	1.6	5.4
4	0.8	7.53E-01	7.10E-01	4.28E-01			
6	1.2	6.35E-01	5.99E-01	4.28E-01			
8	1.6	5.35E-01	5.04E-01	4.28E-01			
10	2	4.51E-01	4.25E-01	4.28E-01			
12	2.4	3.80E-01	3.58E-01	4.27E-01			
14	2.8	3.21E-01	3.02E-01	4.27E-01			
16	3.2	2.70E-01	2.55E-01	4.27E-01			

หมายเหตุ : tally f6 ; $I_0=1.06056E+00$ MeV/g

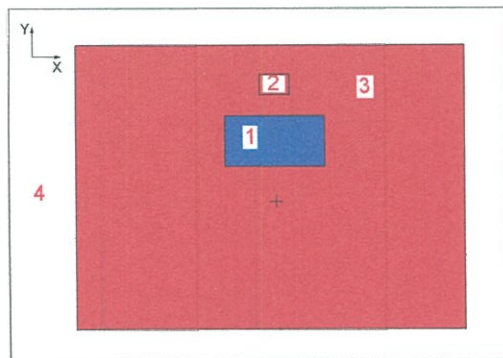
ตารางที่ 4.6 แสดงผลการวัดการส่งผ่านรังสีผ่านตัวกำบังตะกั่ว(แบบจำลองทางโปรแกรมMCNP)

แผ่นที่	ความหนา(cm.)	I(MeV/g)	Transmittance(T)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	$\mu_{\text{ave}}(\text{cm}^{-1})$	HVL(cm)	TVL(cm)
1	0.08	1.01E+00	9.49E-01	6.47E-01	0.66	1.1	3.5
2	0.16	9.55E-01	9.00E-01	6.68E-01			
3	0.32	8.60E-01	8.10E-01	6.62E-01			
1+2+3	0.56	7.34E-01	6.92E-01	6.61E-01			
4	0.64	6.97E-01	6.57E-01	6.62E-01			
1+2+3+4	1.19	4.86E-01	4.58E-01	6.55E-01			

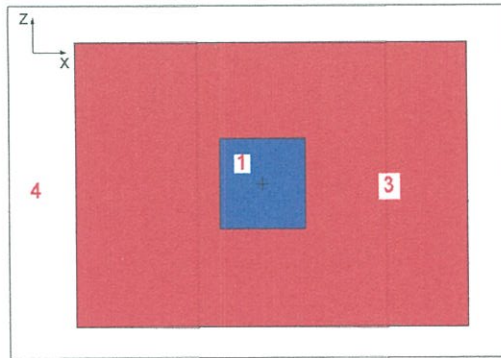
หมายเหตุ : tally f6 ; $I_0=1.06056E+00$ MeV/g



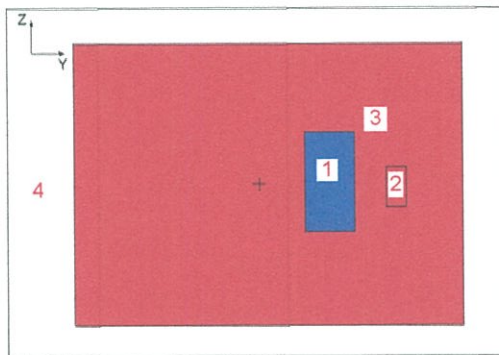
รูปที่ 4.2 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังทั้ง 3 ประเภท(แบบจำลองทางโปรแกรมMCNP)



ก.



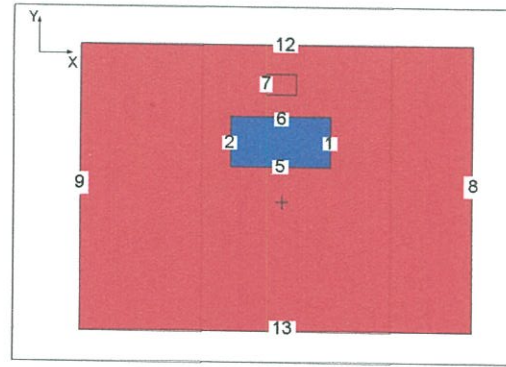
ข.



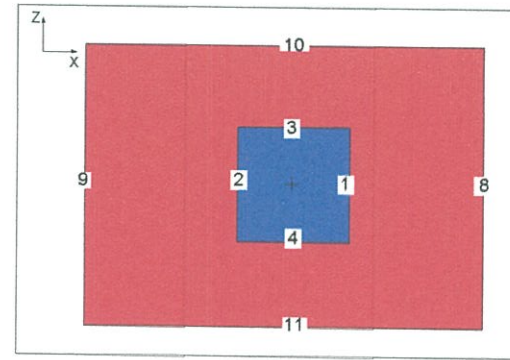
ค.

รูปที่ 4.3 แบบจำลองการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียมทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขเซลล์)

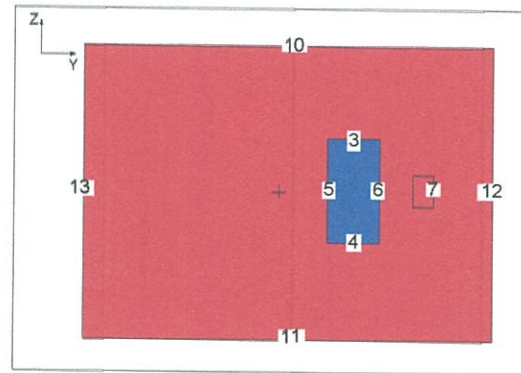
ก.แบบจำลองระนาบ xy ข.แบบจำลองระนาบ xz ค.แบบจำลองระนาบ yz



ก.



ข.

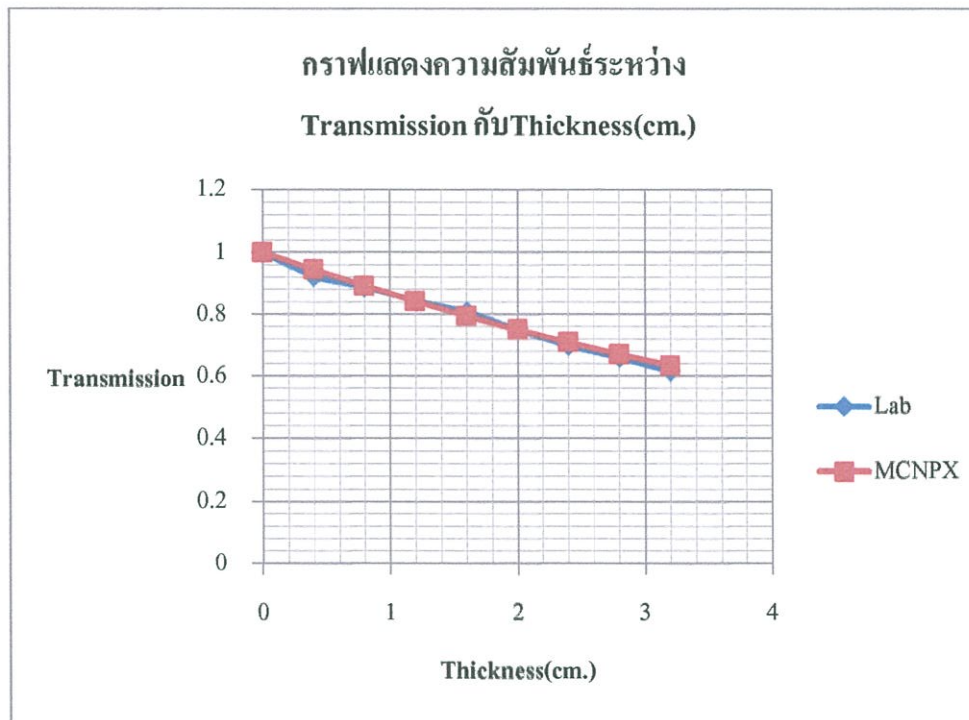


ค.

รูปที่ 4.4 แบบจำลองการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียมทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขพื้นผิว)

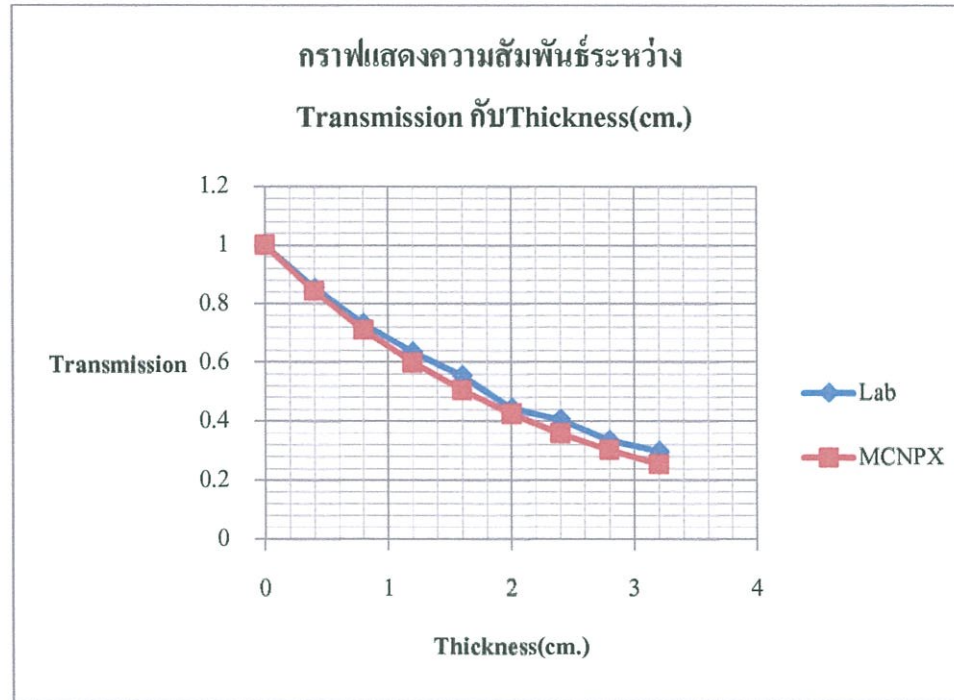
ก.แบบจำลองระนาบ xy ข.แบบจำลองระนาบ xz ค.แบบจำลองระนาบ yz

Aluminium Thickness(cm.)	Transmission(T)	
	Lab	MCNPX
0	1	1.00E+00
0.4	0.92	0.94
0.8	0.89	0.89
1.2	0.84	0.84
1.6	0.81	0.79
2	0.75	0.75
2.4	0.70	0.71
2.8	0.66	0.67
3.2	0.62	0.63



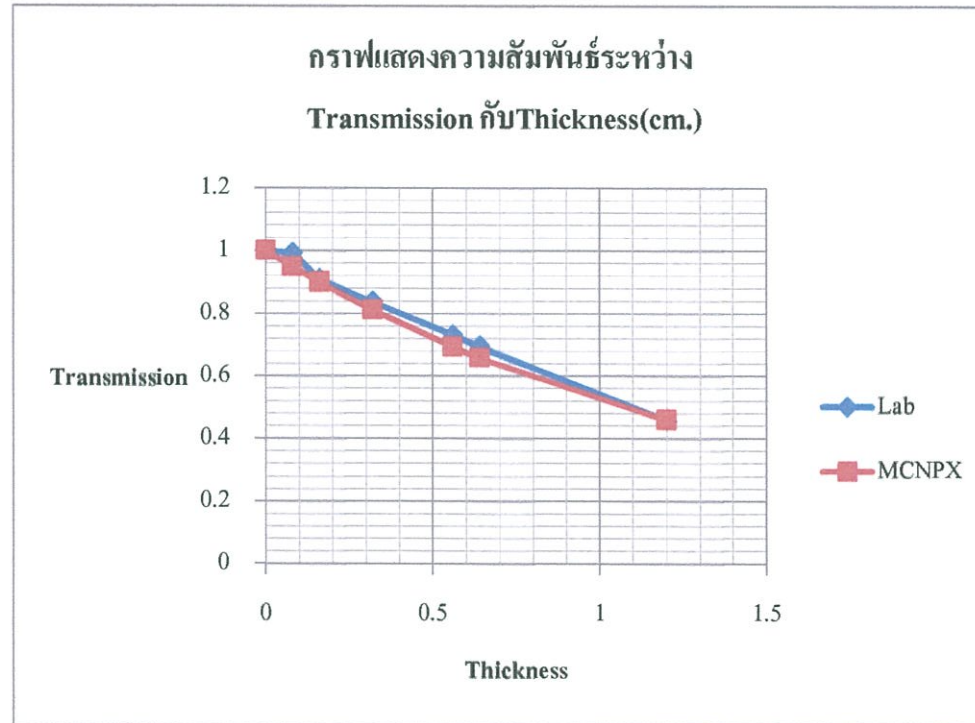
รูปที่ 4.5 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังอะลูมิเนียมเนยมทางการทดลองกับแบบจำลองทางโปรแกรมMCNP

Stainless Thickness(cm.)	Transmission(T)	
	Lab	MCNPX
0	1	1.00E+00
0.4	0.85	0.84
0.8	0.73	0.71
1.2	0.64	0.60
1.6	0.55	0.50
2	0.44	0.43
2.4	0.41	0.36
2.8	0.34	0.30
3.2	0.30	0.25



รูปที่ 4.6 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังสแตนเลสทางการทดลองกับแบบจำลองทางโปรแกรม MCNP

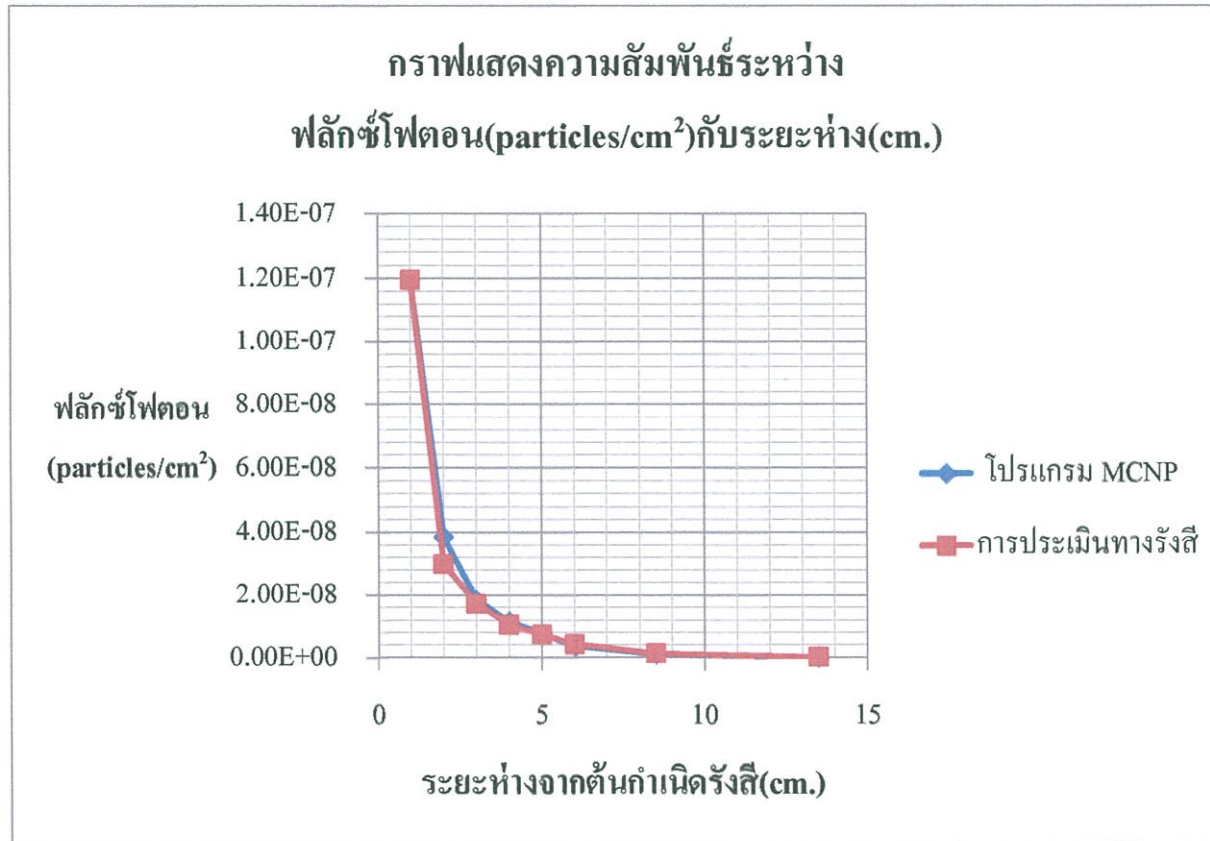
Lead Thickness(cm.)	Transmission(T)	
	Lab	MCNPX
0	1	1.00E+00
0.08	0.99	9.49E-01
0.16	0.91	9.00E-01
0.32	0.84	8.10E-01
0.56	0.73	6.92E-01
0.64	0.69	6.57E-01
1.2	0.46	4.58E-01



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบการส่งผ่านรังสีของตัวกำบังตะกั่วทางการทดลองกับแบบจำลองทางโปรแกรมMCNP

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบความเข้มข้นรังสีจากการประเมินทางรังสีกับ โปรแกรม MCNP

ระยะห่างจากต้นกำเนิด (cm.)	ความเข้มข้นรังสี(particles/cm ²)		ความแตกต่างความเข้มข้นรังสี (particles/cm ²)
	โปรแกรม MCNP	การประเมินทางรังสี	
1	1.19E-07	1.19E-07	0
2	3.85E-08	2.98E-08	0.86E-08
3	1.85E-08	1.71E-08	0.13E-08
4	1.14E-08	1.05E-08	1.05E-09
5	7.59E-09	7.31E-09	0.27E-09
6	3.70E-09	4.16E-09	0.46E-09
8.5	1.10E-09	1.36E-09	0.26E-09
13.5	8.66E-11	1.48991E-10	6.24E-11



รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบความเข้มรังสีจากการประเมินทางรังสีกับ โปรแกรม MCNP

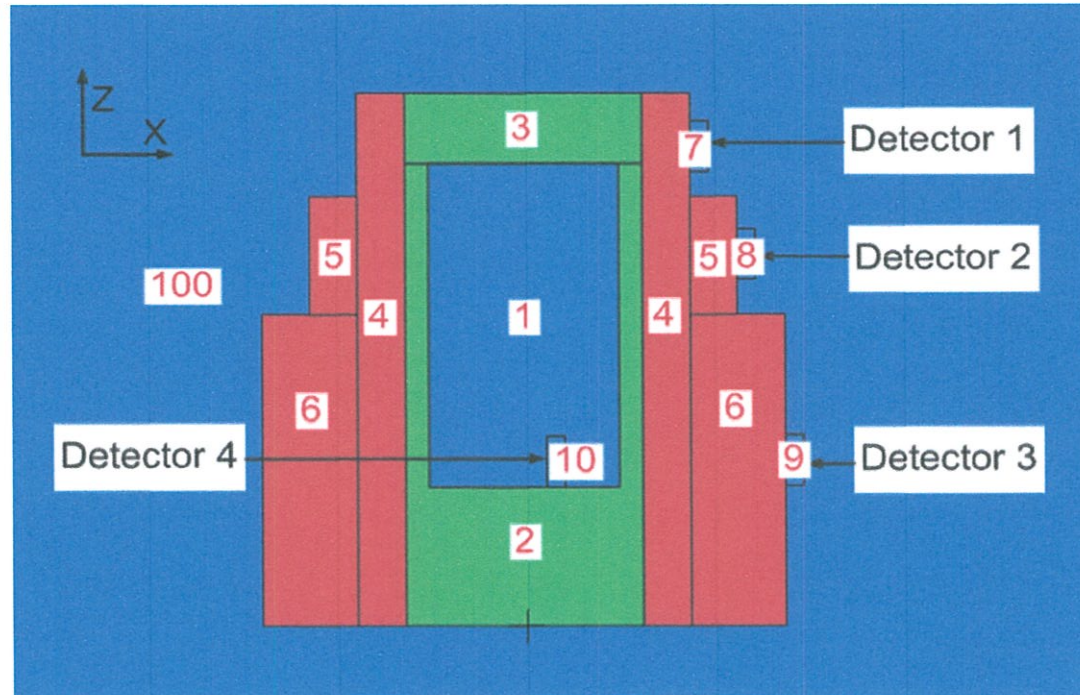
ตารางที่ 4.8 ผลการลดทอนจากการออกแบบตัวกำบังรังสี

ตำแหน่งของหัววัด	ความเข้มรังสี(particle /cm ³)	การลดทอนรังสี(จำนวนเท่า)
detector1(outside)	2.19E-11	5.45E+03
detector2(outside)	3.34E-11	3.58E+03
detector3(outside)	8.66E-11	1.38E+03
detector4(outside)	1.19E-07	-

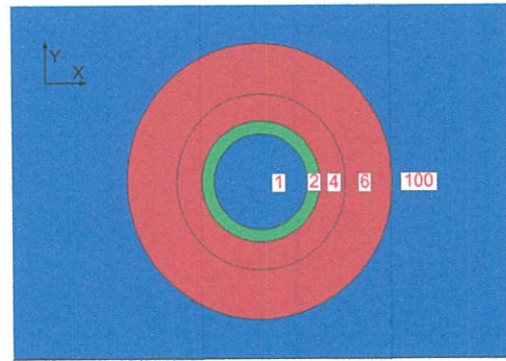
ตารางที่ 4.9 แสดงผลการคิดราคาตัวกำบังรังสีทรงกระบอก

หมายเลขเซลล์	วัสดุ	ปริมาตรวัสดุ(cm ³)	มวล(kg)	ราคา(บาท)	ราคาทั้งหมด(บาท)
2	ตะกั่ว	2013	23	1494	6231
3	ตะกั่ว	565	6	420	
4	สแตนเลส	4098	32	1330	
5	สแตนเลส	918	7	298	
6	สแตนเลส	8290	65	2690	

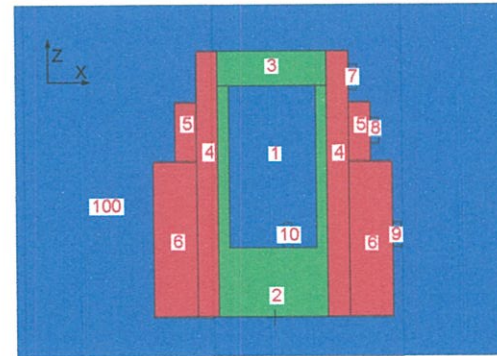
หมายเหตุ : อะลูมิเนียม = 56.48 บาท/กก. , สแตนเลส = 41 บาท/กก. , ตะกั่ว = 65.47 บาท/กก.



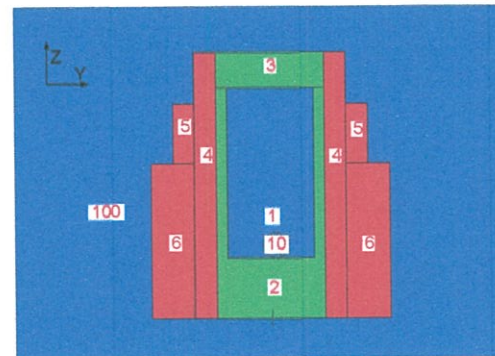
รูปที่ 4.9 ตำแหน่งของหัววัดรังสีในแบบจำลองการออกแบบตัวกำบังทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขเซลล์)



ก.



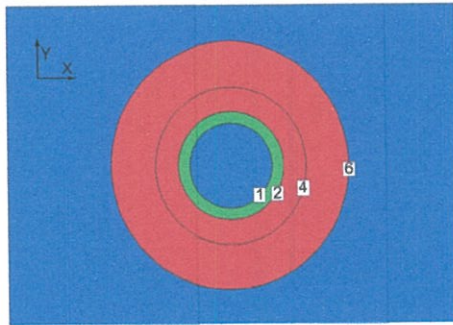
ข.



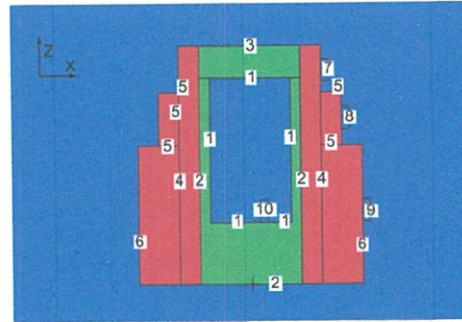
ค.

รูปที่ 4.10 แบบจำลองการออกแบบตัวกำบังรังสีทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขเซลล์)

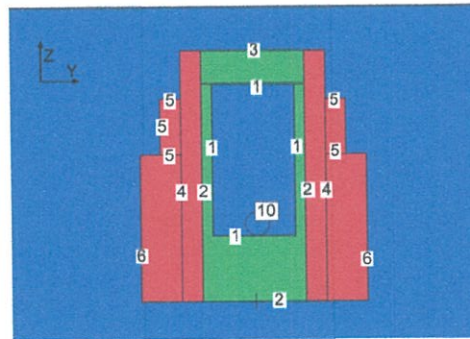
ก.แบบจำลองระนาบ xy ข.แบบจำลองระนาบ xz ค.แบบจำลองระนาบ yz



ก.



ข.



ค.

รูปที่ 4.11 แบบจำลองการออกแบบตัวกำบังรังสีทางโปรแกรม MCNP (หมายเลขพื้นผิว)

ก.แบบจำลองระนาบ xy ข.แบบจำลองระนาบ xz ค.แบบจำลองระนาบ yz

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

โครงการนี้มีจุดประสงค์ในการออกแบบตัวกำบังรังสีด้วยการสร้างแบบจำลองทางโปรแกรม MCNP ขึ้นไว้เป็นแนวคิดรูปแบบหนึ่งเพื่อนำไปต่อยอดสามารถแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน โดยการสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

5.1.1 การวัดรังสีด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์

จากผลการทดสอบการส่งผ่านรังสีด้วยระบบแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ ทำให้สรุปได้ว่า ตะกั่วมีคุณสมบัติการกำบังรังสีได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นวัสดุสแตนเลสและอะลูมิเนียมตามลำดับ โดย มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีของวัสดุดังนี้

$$\mu_{Lead} = 0.59 \text{ cm}^{-1}, \mu_{stainless} = 0.39 \text{ cm}^{-1}, \mu_{aluminium} = 0.15 \text{ cm}^{-1}$$

เมื่อพิจารณาความหนาของวัสดุกำบังรังสี วัสดุตะกั่วใช้ความหนาน้อยที่สุดสำหรับการกำบังรังสี รองลงมาคือ สแตนเลสและอะลูมิเนียมตามลำดับ มีค่า HVL, TVL ของวัสดุทั้ง 3 ดังนี้

$$HVL_{lead}, TVL_{lead} = 1.2, 3.9 \text{ cm}$$

$$HVL_{stainless}, TVL_{stainless} = 1.8, 6 \text{ cm}$$

$$HVL_{aluminium}, TVL_{aluminium} = 4.5, 15 \text{ cm}$$

5.1.2 การออกแบบตัวกำบังรังสีโดยการสร้างแบบจำลองทางโปรแกรม

จากผลการทดสอบวัดการส่งผลของรังสีด้วยแบบจำลองทางโปรแกรม สรุปได้ว่าให้ ให้ผลเช่นเดียวกันกับระบบนับวัดแกมมาสเปกโตรมิเตอร์ เมื่อพล็อตกราฟการส่งผ่านรังสีของวัสดุทั้ง 3

ประเภท มาเปรียบเทียบกันระหว่างแบบจำลองทางโปรแกรมกับระบบเกมมาสเปคโตรมิเตอร์ แสดงให้เห็นถึงความสอดคล้องกันของการทดลองทั้ง 2 ด้าน

จากผลการลดทอนการออกแบบตัวกำบังรังสีทรงกระบอกที่ตำแหน่งของหัววัดต่างๆมีการลดทอนลงดังนี้ 5360 เท่า , 3560 เท่า , 1410 เท่า เรียงลำดับจากหัววัดที่ 1-3 ซึ่งฐานตัวกำบังรังสีทรงกระบอกมีรัศมี 13.5 ซม. และความสูง 36 ซม. คิดเป็นเงินทั้งสิ้น 6052 บาท เนื่องจากตำแหน่งของหัววัดรังสีที่ 1 , 2 ซึ่งสามารถวัดการลดทอนรังสีได้มากเกินจำเป็นถึง 5360 เท่า , 3560 เท่า ตามลำดับ

5.2 ข้อเสนอแนะ

โดยที่วัตถุประสงค์ของโครงการนี้มีแนวคิดของการออกแบบตัวกำบังรังสี ที่สำคัญอยู่ 3 ประการ คือ 1.ลดความเข้มของรังสีให้ได้ 1000 เท่า 2.สามารถจัดเก็บอุปกรณ์เก็บกากกัมมันตรังสีในพื้นที่จำกัดได้แล้ว 3.ใช้ต้นทุนการผลิตให้น้อยที่สุด ดังนั้นถ้าต้องการให้ความเข้มรังสีที่ตำแหน่งของหัววัดที่ 1 , 2 ลดลงเหลือ 1000 เท่า ให้ทำการลดส่วนสูงของตัวกำบังรังสี ผลของการลดส่วนสูงทำให้ใช้วัสดุและต้นทุนการสร้างตัวกำบังรังสีนี้น้อยลงอย่างมาก

บทสรุปทั้งหมดนี้เป็นแนวคิดพื้นฐานสำหรับการออกแบบตัวกำบังรังสี เพื่อนำไปพัฒนาสร้างตัวกำบังรังสีขึ้นมาจริงๆต่อไปภายภาคหน้า

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุวัฒน์ บุนนาค, ‘ การป้องกันอันตรายจากรังสีที่มาจากภายนอกร่างกาย ’ . สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
- [2] นवलวี รุ่งชนเกียรติ.อันตรกิริยาของรังสีนิวเคลียร์กับสสาร.ใน:นवलวี รุ่งชนเกียรติ วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์.พิมพ์ครั้งที่1.กรุงเทพฯ: ศูนย์หนังสือมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2545.187-190
- [3] เขวาลักษณ์ วาหารักษ์, “วัสดุกำบังรังสี” .สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ(องค์การมหาชน)
- [4] ศิริชัย เขียนมีสุข.ศัพทานุกรมนิวเคลียร์.พิมพ์ครั้งที่ 2 .กรุงเทพฯ:สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
- [5] X-5 Monte carlo Team,MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version5
Volume I: Overview and Theory.Los Alamos National Laboratory.24 April 2003
- [6] X-5 Monte carlo Team,MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version5
Volume II: User’s Guide.Los Alamos National Laboratory.24 April 2003
- [7] X-5 Monte carlo Team,MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code Version5
Volume III:Developer’s Guide.Los Alamos National Laboratory.24 April 2003
- [8] [Online].Available:<http://th.wikipedia.org/wiki>
- [9] [Online].Available:<http://www.tint.or.th>
- [10][Online].Available:<http://www.oape.go.th>
- [11][Online].Available:<http://www.google.co.th>