

การพัฒนาทำบัตรรังสีแบบโปร่งแสงชนิดใหม่สำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำโดยมีอะคริลิกและ
ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นองค์ประกอบ



นางสาวนัฐพร คำวัง

ศูนย์วิทยทรัพยากร จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต


สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF INNOVATIVE TRANSLUCENT LOW-ENERGY GAMMA-RAY SHIELD
COMPOSING OF ACRYLIC AND DEPLETED URANIUM



Ms. Natthaporn Kamwang

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การพัฒนาทำบั้งรังสีแบบโปร่งแสงชนิดใหม่สำหรับรังสี
แกมมาพลังงานต่ำโดยมีอะคริลิกและยูเรเนียมด้อย
สมรรถนะเป็นองค์ประกอบ

โดย

นางสาวนัฐพร คำวัง

สาขาวิชา

นิวเคลียร์เทคโนโลยี

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

อาจารย์ ดร.ดุลยพงศ์ วงศ์แสง

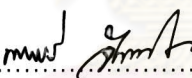
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม


ดร.พิภัทร พฤกษาโรจนกุล


คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร.บุญสม เลิศธีรวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(อาจารย์ ดร.ดุลยพงศ์ วงศ์แสง)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ดร.พิภัทร พฤกษาโรจนกุล)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)


..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปถัมภ์)

นัฐพร คำวัง : การพัฒนากำบังรังสีแบบโปร่งแสงชนิดใหม่สำหรับรังสีแกมมา พลังงานต่ำโดยมีอะคริลิกและยูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นองค์ประกอบ. (DEVELOPMENT OF INNOVATIVE TRANSLUCENT LOW-ENERGY GAMMA-RAY SHIELD COMPOSING OF ACRYLIC AND DEPLETED URANIUM) อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: อ.ดร.ดุจดยพงศ์ วงศ์แสง, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ดร.พิภัทร พฤกษาโรจนกุล, 78 หน้า.

ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นส่วนที่เหลือจากกระบวนการเสริมสมรรถนะยูเรเนียมในกระบวนการผลิตเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ ซึ่งยากแก่การกำจัดและมีการนำมาใช้ประโยชน์บ้าง เช่น ทำเกราะกำบังรังสีสำหรับเครื่องฉายรังสี งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะนำยูเรเนียมด้อยสมรรถนะซึ่งเป็นธาตุที่มีค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมสูงมาเป็นส่วนประกอบเพื่อผลิตอะคริลิกกำบังรังสี โดยนำยูเรเนียมด้อยสมรรถนะมาสังเคราะห์เป็นยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรท แล้วนำสารที่สังเคราะห์นี้ขึ้นมาผสมกับเมทิลเมทาคริเลทเพื่อขึ้นรูปเป็นอะคริลิกกำบังรังสี โดยวัสดุที่ผลิตขึ้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมต่อการลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรทปริมาณ 45% โดยน้ำหนัก แผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นได้มีสีเหลืองใส เมื่อนำไปทดสอบความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมาที่พลังงานระหว่าง 60-364 keV พบว่าสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้ดีกว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่มีขายอยู่ทั่วไป โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของรังสีแกมมาพลังงานต่ำจะสูงกว่าของรังสีแกมมาพลังงานสูง และเมื่อนำแผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นนี้ไปวัดปริมาณรังสี พบว่าที่ระยะ 40 เซนติเมตร จะได้รับปริมาณรังสีเท่ากับสิ่งแวดล้อม จากผลการวิจัยดังกล่าวสรุปได้ว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สังเคราะห์ขึ้นจากยูเรเนียมด้อยสมรรถนะมีคุณสมบัติในการลดทอนปริมาณรังสีได้มากกว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่มีขายอยู่ทั่วไป

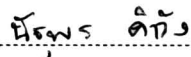


ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อนิสิต..... นัฐพร คำวัง.....
 สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา...2553..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

5170350621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEYWORDS : DEPLETED URANIUM / ACRYLIC / LOW-ENERGY GAMMA-RAY SHIELD

NATTHAPORN KAMWANG: DEVELOPMENT OF INNOVATIVE TRANSLUCENT LOW-ENERGY GAMMA-RAY SHIELD COMPOSING OF ACRYLIC AND DEPLETED URANIUM. THESIS ADVISOR: DOONYAPONG WONGSAWAENG, Ph.D. THESIS CO-ADVISOR: PHIPHAT PHRUKSAROJANAKUN, Ph.D., 78 pp.

Depleted uranium is a radioactive by-product from the uranium enrichment process in the fuel fabrication process. It is hard to eliminate and has been utilized in certain applications such as radiation shielding for irradiators. This research, therefore, used depleted uranium, an element with high density and high atomic number, as a constituent to fabricate acrylic for radiation shielding. This was accomplished by synthesizing uranium nitrate hexahydrate from depleted uranium metal, and then mixing with methyl methacrylate to fabricate acrylic shielding. The fabricated product exhibited an appropriate property to shield low-energy gamma ray. This research work produced acrylic sheets with 45% uranium nitrate hexahydrate by weight. Fabricated acrylic sheets exhibited a translucent yellow color. When tested for the ability to attenuate gamma ray with energy between 60-364 keV, it was found that the attenuation was better than that of conventional lead acrylic available commercially. The linear attenuation coefficient of low-energy gamma ray was higher than that of high-energy gamma ray. Radiation dose measurement of the fabricated acrylic sheet revealed that, at 40 cm distance, the dose was equal to the background level. It can be concluded from the studied results that acrylic shielding composing of uranium nitrate hexahydrate synthesized from depleted uranium exhibits a better gamma ray attenuation than lead acrylic shielding available commercially.

Department : .. Nuclear Technology	Student's Signature .. 
Field of Study : .. Nuclear Technology	Advisor's Signature .. 
Academic Year : .. 2010	Co-Advisor's Signature .. 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ สามารถสำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือและสนับสนุนจาก ดร.ดุลยพงศ์ วงศ์แสวง อาจารย์ที่ปรึกษา และ ดร.พิภัทร พุกษาโรจนกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงที่กรุณาแนะนำ ให้คำปรึกษาและตรวจสอบรายงานการวิจัยจนได้เล่ม วิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์

ผลการวิจัยภายใต้โครงการนี้ได้รับการสนับสนุนจากเงินอุดหนุนโครงการความร่วมมือกับสถาบันอุดมศึกษาในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภายใต้โครงการความร่วมมือในการผลิตนักวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

ขอขอบพระคุณ บริษัท แพนเอเชียอุตุสาหกรรม จำกัด ที่ช่วยเหลือในการทำวิจัย และให้ใช้สถานที่ ตลอดจนการให้ความอนุเคราะห์ทางด้านอุปกรณ์การขึ้นรูป สารเคมีและข้อมูล ความรู้ที่จำเป็นต่าง ๆ ในการขึ้นรูปแผ่นอะคริลิก จนได้แผ่นอะคริลิกที่มียูเรเนียมด้อยสมรรถนะ เป็นองค์ประกอบที่สมบูรณ์

และขอขอบคุณคณะอาจารย์ประจำภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี และเจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้คำแนะนำ สนับสนุนงานวิจัยนี้

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อ มารดา ผู้ซึ่งให้ความเมตตากรุณาเป็น กำลังใจให้การศึกษาของผู้เขียนสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	1
1.4 คำสำคัญที่ใช้ในหัวข้อการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 แนวคิดและทฤษฎี.....	3
2.1.1 รังสีแกมมา.....	3
2.1.1.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร.....	3
2.1.1.1.1 ปฏิกิริยาการแผ่รังสีโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect).....	3
2.1.1.1.2 ปฏิกิริยาการกระเจิงคอมป์ตัน (Compton effect).....	4
2.1.1.1.3 ปฏิกิริยาการผลิตคู่ (Pair Production).....	6
2.1.1.2 การลดทอนรังสีแกมมา.....	7
2.1.2 พอลิเมทิลเมทาครีเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA).....	12
2.1.2.1 คุณสมบัติที่น่าสนใจของอะคริลิกพลาสติก.....	12
2.2.2.2 การหล่อแผ่นอะคริลิก.....	13

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
2.2.2.2.1 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous casting process).....	13
2.2.2.2.2 กระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่อง (Continuous casting process).....	14
2.1.3 ยูเรเนียม.....	16
2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	19
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	22
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	22
3.1.1 สารตั้งต้นหลักและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท.....	22
3.1.2 สารตั้งต้นหลักและอุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นรูปแผ่นอะคริลิก.....	24
3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบแผ่นอะคริลิก.....	28
3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล.....	29
3.2.1 การสังเคราะห์ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท.....	29
3.2.2 การหาสัดส่วนของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สามารถผสมอยู่ในอะคริลิกได้ในปริมาณที่มากที่สุด.....	31
3.2.3 การขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท....	31
3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	34
3.3.1 การทดสอบการลดทอนรังสี.....	34
3.3.2 การวัดการส่องผ่านของแสง.....	35
3.3.3 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท.....	35
4. ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	36
4.1 ผลการวิเคราะห์.....	36
4.1.1 การหาสัดส่วนของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สามารถผสมอยู่ในอะคริลิกได้ในปริมาณที่มากที่สุด.....	36
4.1.2 การทดสอบการลดทอนรังสี.....	37

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4.1.3 การวัดการส่องผ่านของแสง.....	44
4.1.4 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮก ซะไฮเดรท.....	45
4.2 ผลการเปรียบเทียบ.....	46
4.2.1 การทดสอบการลดทอนรังสี.....	46
4.2.2 การวัดการส่องผ่านของแสง.....	49
5. สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	50
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	50
5.1.1 การทดสอบการลดทอนรังสี.....	50
5.1.2 การส่องผ่านของแสง.....	51
5.1.3 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮก ซะไฮเดรท.....	51
5.2 อภิปรายผลการวิจัย.....	52
5.2.1 การลดทอนรังสีแกมมา.....	53
5.2.2 การส่องผ่านของแสง.....	54
5.2.3 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮก ซะไฮเดรท.....	54
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	55
รายการอ้างอิง.....	57
ภาคผนวก.....	59
ภาคผนวก ก.....	60
ภาคผนวก ข.....	65
ภาคผนวก ค.....	73
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	78

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัสดุต่าง ๆ ของรังสีแกมมาในหน่วย $\text{cm}^2/\text{กรัม}$ 9
2.2	ระดับพลังงานที่ K-edge และพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น ($K\alpha$ X-rays) ของ วัสดุชนิดต่าง ๆ..... 11
2.3	ครึ่งชีวิตของไอโซโทปต่าง ๆ ของยูเรเนียมธรรมชาติ..... 17
4.1	การหาสัดส่วนของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สามารถผสมอยู่ในอะคริลิก.... 36
4.2	ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Am-241 พลังงาน 60 keV..... 37
4.3	ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-57 พลังงาน 122 keV..... 38
4.4	ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-57 พลังงาน 136 keV..... 39
4.5	ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Eu-152 พลังงาน 244 keV..... 40
4.6	ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี I-131 พลังงาน 284 keV..... 41
4.7	ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี I-131 พลังงาน 364 keV..... 42
4.8	ผลการทดสอบการส่องผ่านของแสง..... 44
4.9	ผลการวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮ เดรท..... 45
4.10	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของชิ้นงานที่พลังงาน 60, 122, 136, 244, 284 และ 364 keV..... 46
4.11	การเปรียบเทียบค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นกับค่าของ บริษัท Wardray Premise..... 47
4.12	การเปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงของแผ่นอะคริลิก..... 49

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ก.1	ผลการทดลองการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Am-241 (60 keV) และ Co-57 (122 keV, 136 keV).....	61
ก.2	ผลการทดลองการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Eu-152 (244keV) และ I-131 (284 keV, 364 keV).....	62
ก.3	ผลการวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ระยะต่าง ๆ.....	63
ข.1	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของตะกั่ว.....	66
ข.2	ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของยูเรเนียม.....	69



 ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	3
2.2	ทิศทางการเคลื่อนที่ของแกมมาโฟตอนจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	5
2.3	ปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	5
2.4	การเกิดแฟร์โบรด์กั้นและแอนนิฮิเลชัน.....	7
2.5	ช่วงความสำคัญของอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก คอมป์ตัน และแฟร์โบรด์กั้น ที่ขึ้นกับเลขเชิงอะตอมของตัวกลาง และพลังงานของรังสีแกมมา.....	7
2.6	สัมประสิทธิ์การลดเชิงมวลในตะกั่วของรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ.....	8
2.7	เมื่อรังสีแกมมาความเข้ม I_0 กระทบสสารหนา x และมีความเข้มหลังผ่านสสาร I	10
2.8	ความสัมพันธ์ของค่า HVL กับพลังงานของโฟตอนโดยเปรียบเทียบระหว่างอะลูมิเนียม ($Z = 13$) และทองแดง ($Z = 29$).....	11
2.9	โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตและพอลิเมทิลเมทาคริเลตหรือพีเอ็มเอ็มเอ.....	12
2.10	เครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous casting process).....	14
2.11	การหล่อพลาสติกแบบเซลล์ (Cell Casting Process).....	15
2.12	โครงสร้างของอะตอมยูเรเนียม.....	16
2.13	การสลายตัวของยูเรเนียม-238.....	17
3.1	โลหะยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ.....	22
3.2	กรดไนตริก.....	23
3.3	เครื่องชั่ง.....	23
3.4	เครื่องให้ความร้อน.....	23
3.5	กระจกแม่พิมพ์.....	25
3.6	ประกันพีวีซี.....	25
3.7	ตัวยึดจับ.....	26
3.8	เครื่องปั่น.....	26
3.9	เครื่องทำสุญญากาศ.....	26
3.10	อ่างน้ำร้อน.....	27

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.11	ดูรูป..... 27
3.12	หัววัดรังสี High purity germanium..... 28
3.13	เครื่องวัดการส่องผ่านของแสง..... 28
3.14	เครื่องวัดปริมาณรังสีโซเดียมไอโอไดด์ (ทลเลียม)..... 29
3.15	กรดไนตริกขณะทำปฏิกิริยากับโลหะยูเรเนียมด้วยสมรรถนะ..... 29
3.16	การกรองสารละลายยูเรเนียม..... 30
3.17	การต้มสารละลายยูเรเนียม..... 30
3.18	ผลึกยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท..... 30
3.19	การเตรียมแม่พิมพ์..... 31
3.20	แม่พิมพ์ที่บรรจุสารละลายยูเรเนียม..... 32
3.21	แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สมบูรณ์..... 34
3.22	ระบบวัดรังสีโดยใช้หัววัด HPGe Detector..... 34
4.1	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมา พลังงาน 60 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน..... 37
4.2	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมา พลังงาน 122 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน..... 38
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมา พลังงาน 136 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน..... 39
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมา พลังงาน 244 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน..... 40
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมา พลังงาน 284 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน..... 41
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมา พลังงาน 364 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน..... 42
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิก (มิลลิเมตร) กับเปอร์เซ็นต์ การทะลุผ่านของรังสีแกมมา..... 43

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.8	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิก (มิลลิเมตร) กับเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีแกมมา.....	43
4.9	การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ระยะต่าง ๆ.....	45
4.10	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ.....	46
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่นอะคริลิกและความหนาเทียบเท่าตะกั่ว.....	48
5.1	การสร้างพันธะของสารประกอบโลหะกับเมทิลเมทาคริเลท.....	52
ข.1	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของตะกั่ว.....	66
ข.2	สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของยูเรเนียม.....	69
ค.1	สเปกตรัมของสารมาตรฐานยูเรเนียมออกไซด์.....	75
ค.2	สเปกตรัมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท.....	76
ค.3	สเปกตรัมของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท.....	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันมีแผ่นอะคริลิกสำหรับกำบังรังสีแกมมาพลังงานต่ำโดยมีตะกั่วเป็นองค์ประกอบขายอยู่มากมาย ทั้งที่ใช้ในทางอุตสาหกรรมและในโรงพยาบาล จึงมีแนวคิดว่าจะสามารถผลิตแผ่นอะคริลิกสำหรับกำบังรังสีแกมมาพลังงานต่ำโดยมียูเรเนียมเป็นองค์ประกอบด้วยเหตุผลยูเรเนียมมีค่าเลขอะตอม (Z) และค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) สูงกว่าตะกั่ว ในปริมาณโลหะหนักที่ผสมอยู่ที่เท่ากัน วัสดุที่มียูเรเนียมผสมอยู่จะสามารถลดทอนปริมาณรังสีได้มากกว่า ทำให้ผู้ใช้งานได้รับปริมาณรังสีน้อยลงหรือสามารถใช้สารกัมมันตรังสีที่มีความแรงรังสีมากขึ้นโดยได้รับปริมาณรังสีเท่าเดิม จึงเป็นที่มาของงานวิจัยนี้ที่จะพัฒนาขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกสำหรับกำบังรังสีแกมมาพลังงานต่ำแบบใหม่โดยมียูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นองค์ประกอบ โดยใส่ยูเรเนียมในโครงทรงแท่งไฮดรอกซีอะคริลิกจากยูเรเนียมด้อยสมรรถนะลงไปในส่วนตั้งต้นระหว่างขั้นตอนการพอลิเมอไรเซชัน สำหรับรังสีที่ปลดปล่อยออกมาจากยูเรเนียมนั้นมีปริมาณน้อยมากเนื่องจากยูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นสารกัมมันตรังสีที่ปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา (มีครึ่งชีวิตราว 4.5×10^9 ปี) และเกือบทั้งหมดจะถูกกำบังไว้โดยแผ่นอะคริลิกเอง ดังนั้นการใช้ยูเรเนียมจึงไม่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณรังสีแก่ผู้ใช้งาน

งานวิจัยนี้เป็นการสร้างนวัตกรรมใหม่ ถ้าสำเร็จด้วยดี จะสามารถจดสิทธิบัตรได้ และสามารถขยายงานวิจัยต่อในเชิงพาณิชย์ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนากำบังรังสีแบบโปร่งแสงชนิดใหม่สำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำโดยมีอะคริลิกและยูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นองค์ประกอบ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมด้อยสมรรถนะขนาดไม่เกิน 20 เซนติเมตรx20 เซนติเมตร หนาไม่เกิน 5 มิลลิเมตร

- 1.3.2 หาสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดของยูเรเนียม ที่สามารถผสมอยู่ในอะคริลิกได้ใน ปริมาณที่มากที่สุด
- 1.3.3 ประเมินความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมาของแผ่นอะคริลิก โดยใช้ต้น กำเนิดรังสีที่มีพลังงานไม่เกิน 500 keV

1.4 คำสำคัญที่ใช้ในหัวข้อการวิจัย

ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ อะคริลิก กำบังรังสีแกมมาพลังงานต่ำ

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้เจ็อนไขในการพัฒนากำบังรังสีแบบโปร่งแสงชนิดใหม่สำหรับรังสีแกมมา พลังงานต่ำโดยมีอะคริลิกและยูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นองค์ประกอบ

1.6 วิธีดำเนินการวิจัย

- 1.5.2 ศึกษาค้นคว้างานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.5.2 ดำเนินการจัดซื้อวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่จำเป็น
- 1.5.3 ออกแบบระบบขึ้นรูปแผ่นอะคริลิก
- 1.5.4 สังเคราะห์สารประกอบยูเรเนียมที่สามารถผสมในอะคริลิกได้
- 1.5.5 ทดลองขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกโดยใช้ยูเรเนียมในปริมาณต่าง ๆ กัน เพื่อหาสัดส่วน ของสารประกอบยูเรเนียมที่เหมาะสมที่สุดและสามารถผสมอยู่ในอะคริลิกได้ใน ปริมาณที่มากที่สุด
- 1.5.6 วัดอัตราการลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพการ ทำงาน
- 1.5.7 สรุปผลการทดลอง และเขียนวิทยานิพนธ์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 แนวคิดและทฤษฎี

2.1.1 รังสีแกมมา [1, 2]

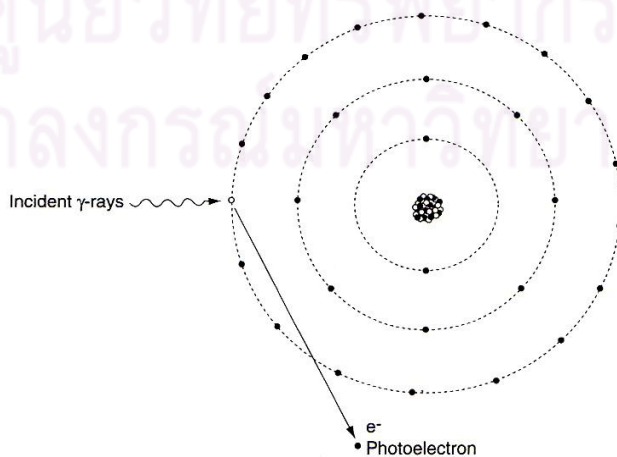
รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคลื่นสั้น ไม่มีมวล เคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 3×10^8 เมตรต่อวินาที ในสุญญากาศ เป็นรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงสามารถทะลุผ่านวัสดุได้ โดยความสามารถทะลุทะลวงขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสี และชนิดของวัสดุ เมื่อรังสีแกมมาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง สามารถทำให้อะตอมของตัวกลางแตกตัวเป็นประจุได้จากการชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา หากได้รับรังสีในปริมาณมากอาจเป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต

2.1.1.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

2.1.1.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเกิดขึ้น เมื่อแกมมาฟotonกระทบสสาร แล้วถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนของสสาร ทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากอะตอม เรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) โดยมีพลังงาน (E_e) เท่ากับผลต่างของพลังงานของแกมมาฟoton ($h\nu$) กับพลังงานยึดเหนี่ยว ($B.E.$) ดังสมการ

$$E_e = h\nu - B.E. \quad (1)$$



ภาพที่ 2.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

สำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูง โฟโตอิเล็กตรอนจะมีทิศทางในแนวเดียวกับแกมมาโฟตอน และจะทำมุมกับทิศทางเดิม เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่ำ อันตรกิริยานี้มักเกิดขึ้นกับอิเล็กตรอนวงใน (K) และขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา (E) และเลขอะตอมของสสาร (Z) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

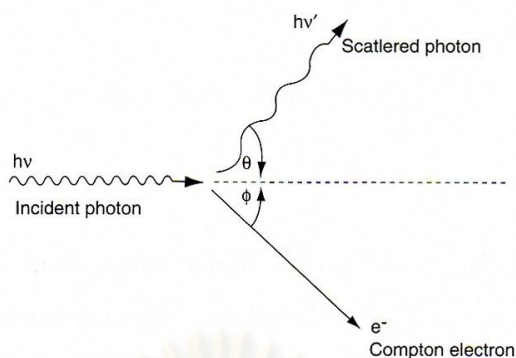
$$\text{โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก} \approx \text{ค่าคงที่} (Z^n/E^3) \quad (2)$$

n มีค่าตั้งแต่ 3 สำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ถึง 5 MeV สำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูง จากความสัมพันธ์ดังกล่าว เห็นได้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกจะเกิดมากขึ้น เมื่อรังสีแกมมามีพลังงานลดต่ำลง และในตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง โดยอันตรกิริยานี้มีความสำคัญเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานน้อยกว่า 1 MeV กระทั่งกับตัวกลางที่มีเลขอะตอมสูง ๆ แต่ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอมแล้ว อิเล็กตรอนจะไม่หลุดออกจากอะตอม ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในอะตอม จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก หลังจากโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกไปแล้ว อิเล็กตรอนจากวงโคจรรอบนอกจะเข้ามาแทนที่ โดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ ดังนั้น จึงสรุปได้ว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเป็นการดูดกลืนรังสีแกมมาทั้งหมดแล้วให้อิเล็กตรอนและรังสีเอกซ์ออกมา

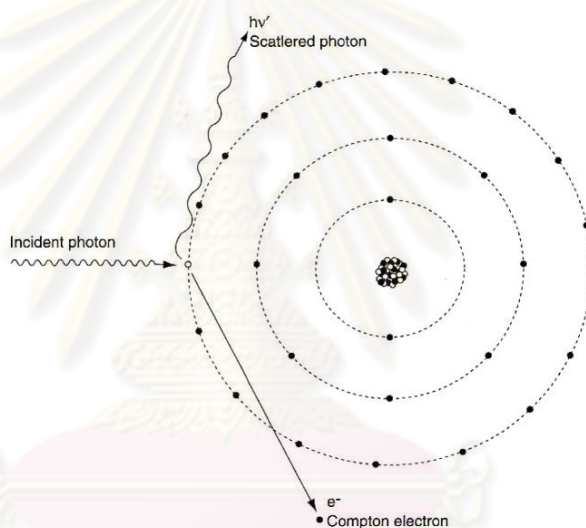
2.1.1.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton effect)

ในปรากฏการณ์คอมป์ตัน แกมมาโฟตอนเข้าชนกับอิเล็กตรอนในอะตอมของสสารแบบยืดหยุ่น ในการชนแบบนี้ ทั้งโมเมนตัมและพลังงานจะไม่สูญหาย โฟตอนจะสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรไปในทิศทางทำมุม ϕ กับทิศทางการเคลื่อนที่เดิมของโฟตอน เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปนี้ว่า **คอมป์ตันอิเล็กตรอน** (Compton electron) ส่วนโฟตอนที่มีพลังงานลดลงจะเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ไป โดยทำมุม θ กับทิศทางเดิม และมีความยาวคลื่นมากขึ้น ดังภาพที่ 2.2 และ 2.3 โดยพลังงานของโฟตอนที่เข้าชน ($h\nu$) และพลังงานของโฟตอนที่สะท้อนออกไป ($h\nu'$) มีความสัมพันธ์กันดังสมการ

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/mc^2)(1 - \cos \theta)} \quad (3)$$



ภาพที่ 2.2 ทิศทางการเคลื่อนที่ของแกมมาฟotonจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน



ภาพที่ 2.3 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน

เมื่อ λ และ λ' เป็นความยาวคลื่นของโฟตอนที่เข้าชน และโฟตอนที่สะท้อนออกไปตามลำดับ และ m เป็นมวลของอิเล็กตรอน ความยาวคลื่นของโฟตอนที่เปลี่ยนไป ($\lambda' - \lambda$) คำนวณจากสมการ

$$\lambda' - \lambda = c \left(\frac{1}{\nu'} - \frac{1}{\nu} \right)$$

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta) \quad (4)$$

เรียกความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไป ($\lambda' - \lambda$) นี้ว่าความยาวคลื่นคอมป์ตัน (Compton wavelength)

จะเห็นได้ว่าความยาวคลื่นที่เปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับมุมสะท้อนของโฟตอน ไม่เกี่ยวข้องกับพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ ปรากฏการณ์คอมป์ตันเกิดขึ้นได้ดีกับสสารที่มีค่าเลขอะตอมสูง และลดลงเมื่อพลังงานโฟตอนสูงขึ้น ซึ่งประมาณได้ว่า

$$\text{โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์คอมป์ตัน} \approx \text{ค่าคงที่ } (Z/E) \quad (5)$$

ข้อแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก กับปรากฏการณ์คอมป์ตัน ก็คือโฟโตอิเล็กทริกเป็นการดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดที่มากกระทบ ส่วนปรากฏการณ์คอมป์ตัน เพียงแต่ลดปริมาณของพลังงานเดิมของโฟตอน โฟตอนที่มีพลังงานลดต่ำลงนี้ อาจจะทำอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกได้อีก เนื่องจากอันตรกิริยานี้เกิดได้ง่ายขึ้น เมื่อโฟตอนมีพลังงานต่ำ

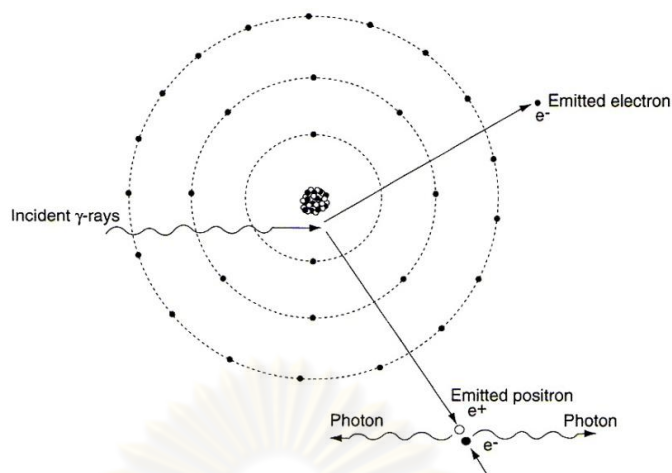
2.1.1.1.3 ปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน (Pair Production)

อันตรกิริยาแพร์โปรดักชันเป็นแบบหนึ่งของการดูดกลืนแกมมาโฟตอน เกิดขึ้นได้เมื่อโฟตอนมีพลังงานอย่างน้อย 1.022 MeV เมื่อวิ่งเข้าใกล้นิวเคลียสของอะตอม โฟตอนจะหายไป โดยใช้พลังงานไปในการสร้างอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนขึ้นมาหนึ่งคู่ เนื่องจากมวลของอิเล็กตรอนกับโพสิตรอนมีค่าเทียบเท่ากับพลังงาน 1.022 MeV ดังนั้น แกมมาโฟตอนต้องมีพลังงานไม่ต่ำกว่า 1.02 MeV พลังงานที่เกินส่วนใหญ่จะเปลี่ยนไปเป็นพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนและโพสิตรอน มีบางส่วนเท่านั้นที่ถ่ายเทให้กับนิวเคลียสของอะตอม โอกาสของการเกิดอันตรกิริยาแพร์โปรดักชันขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา และเลขอะตอมของสสารโดย

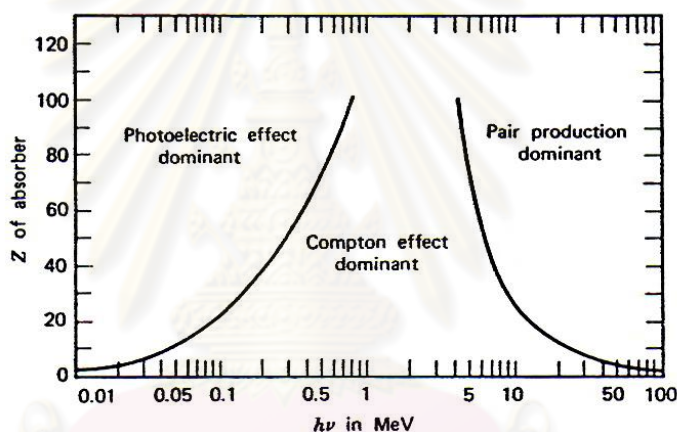
$$\text{โอกาสของการเกิดปรากฏการณ์แพร์โปรดักชัน} \approx \text{ค่าคงที่ } Z^2 (E-1.022) \quad (6)$$

หลังจากการเกิดแพร์โปรดักชัน โพสิตรอนอาจจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนอื่น แล้วให้โฟตอน 2 ตัว ซึ่งมีพลังงานตัวละ 0.511 MeV เรียกว่า **แอนนิฮิเลชัน** (Annihilation) ดังภาพที่ 2.4 แต่อย่างไรก็ตามโฟตอนพลังงานต่ำนี้มีพลังงานต่ำ และกระจัดกระจายไปทุกทิศทุกทาง

จากสมการที่ 6 แสดงว่า อันตรกิริยาแพร์โปรดักชันเพิ่มขึ้น สำหรับสสารที่มีเลขอะตอมของสสารและพลังงานของโฟตอนที่เกินกว่า 1.022 MeV เมื่อพลังงานของรังสีแกมมาเพิ่มขึ้น อันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก และคอมป์ตันจะลดลง แต่แพร์โปรดักชันเพิ่มขึ้น สำหรับสสารที่มีเลขอะตอมสูงและรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 5 MeV แล้ว แพร์โปรดักชันเป็นกระบวนการดูดกลืนโฟตอนที่มีความสำคัญที่สุดดังภาพที่ 2.5



ภาพที่ 2.4 การเกิดเพอร์โปรดักชันและแอนนิฮิเลชัน



ภาพที่ 2.5 ช่วงความสำคัญของอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก คอมป์ตัน และเพอร์โปรดักชัน ที่ขึ้นกับเลขอะตอมของตัวกลาง และพลังงานของรังสีแกมมา

2.1.1.2 การลดทอนรังสีแกมมา

เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในสสารหรือตัวกลางใด ๆ บางส่วนของรังสีถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยาต่าง ๆ ที่กล่าวมาแล้ว บางส่วนจะกระเจิงไป และบางส่วนผ่านออกมาได้ ความเข้มของรังสีแกมมาลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล เมื่อพิจารณารังสีแกมมาพลังงานเดียว (Monoenergetic gamma rays) เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง การสูญเสียความเข้มของรังสีในความหนา dx ของตัวกลางที่จุดใด ๆ เป็นปฏิภาคโดยตรงกับความเข้มของรังสีที่จุดนั้น กับความหนาของตัวกลาง นั่นคือ

$$dI = -\mu dx$$

$$\frac{dI}{I} = -\mu dx \quad (7)$$

- เมื่อ I คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอน หน่วย โฟตอน/ซม- วินาที
- μ คือ สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient) หน่วย ซม.⁻¹

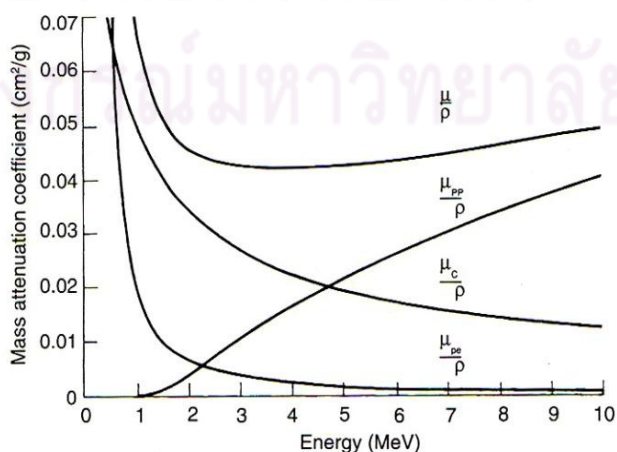
เมื่อรังสีแกมมากระทบตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยาทั้ง 3 ประเภท อันได้แก่ การดูดกลืนเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก แพร่โปรดักชัน และการกระเจิงจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน ค่า μ ที่ใช้ในสมการที่ 7 จึงเป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนเนื่องจากแต่ละอันตรกิริยา ดังสมการ

$$\mu = \mu_{pe} + \mu_c + \mu_{pp} \quad (8)$$

เมื่อ μ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นรวม และ $\mu_{pe}, \mu_c, \mu_{pp}$ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น เนื่องจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริก คอมป์ตัน และแพร่โปรดักชันตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนนี้ อาจกล่าวในพจน์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) ซึ่งมีหน่วย ซม.²/กรัม โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\mu_{pe}}{\rho} + \frac{\mu_c}{\rho} + \frac{\mu_{pp}}{\rho} \quad (9)$$

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาและชนิดของสสารที่รังสีแกมมาทำอันตรกิริยา ดังตารางที่ 2.1 และภาพที่ 2.6 แสดงสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในตะกั่วของรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ ค่า μ_{pe}/ρ และ μ_c/ρ มีค่ามาก เมื่อรังสีแกมมา มีพลังงานต่ำ และลดลงเมื่อพลังงานมีค่ามากขึ้น ส่วน μ_{pp}/ρ มีค่าเพิ่มขึ้นตามค่าพลังงาน และ μ/ρ เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลรวม ซึ่งมีค่าต่ำสุดเมื่อรังสีแกมมา มีพลังงานประมาณ 3.5 MeV

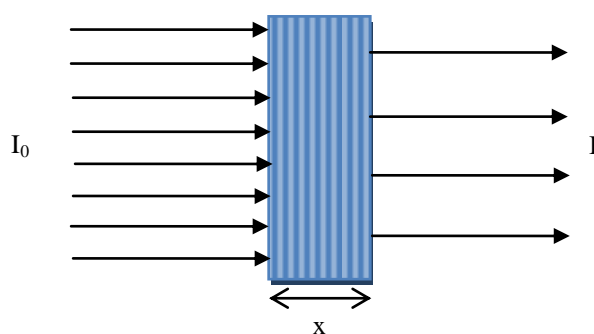


ภาพที่ 2.6 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในตะกั่วของรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ

ตารางที่ 2.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลในวัสดุต่าง ๆ ของรังสีแกมมาในหน่วย ซม.²/กรัม

Material	Gamma-Ray Energy, MeV														
	0.1	0.15	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.8	1	1.25	1.5	2	3	4	5
H	.295	.265	.243	.212	.189	.173	.160	.140	.126	.113	.103	.0691	.0691	.0579	.0502
Be	.132	.119	.109	.0945	.0847	.0773	.0715	.0628	.0565	.0504	.0459	.0313	.0313	.0266	.0234
C	.149	.134	.122	.106	.0953	.087	.0805	.0707	.0636	.0568	.0518	.0356	.0356	.0304	.0270
N	.15	.134	.123	.106	.0955	.0869	.0805	.0707	.0636	.0568	.0517	.0357	.0357	.0306	.0273
O	.151	.134	.123	.107	.0953	.087	.0806	.0708	.0636	.0568	.0518	.0359	.0359	.0309	.0276
Na	.151	.13	.118	.102	.0912	.0833	.0770	.0676	.0608	.0546	.0496	.0348	.0348	.0303	.0274
Mg	.16	.135	.122	.106	.0944	.0860	.0795	.0699	.0627	.0560	.0512	.0360	.0360	.0315	.0286
Al	.161	.134	.12	.103	.0922	.0840	.0777	.0683	.0614	.0548	.0500	.0353	.0353	.0310	.0282
Si	.172	.139	.125	.107	.0954	.0869	.0802	.0706	.0635	.0567	.0517	.0367	.0367	.0323	.0296
P	.174	.137	.122	.104	.0928	.0846	.0780	.0685	.0617	.0551	.0502	.0358	.0358	.0316	.0290
S	.188	.144	.127	.108	.0958	.0874	.0806	.0707	.0635	.0568	.0519	.0371	.0371	.0328	.0302
Ar	.188	.135	.117	.0977	.0867	.0790	.7030	.0638	.0573	.0512	.0468	.0338	.0338	.0301	.0279
K	.215	.149	.127	.106	.0938	.0852	.0786	.0689	.0618	.0552	.0505	.0365	.0365	.0327	.0305
Ca	.238	.158	.132	.109	.0965	.0876	.0809	.0708	.0634	.0566	.0518	.0376	.0376	.0338	.0316
Fe	.344	.183	.138	.106	.0919	.0828	.0762	.0664	.0595	.0531	.0485	.0361	.0361	.0330	.0313
Cu	.427	.206	.147	.108	.0916	.082	.0751	.0651	.0585	.0521	.0476	.0357	.0357	.0330	.0316
Mo	1.03	.389	.225	.13	.0998	.0851	.0761	.0648	.0575	.0510	.0467	.0365	.0365	.0349	.0344
Sn	1.58	.563	.303	.153	.109	.0886	.0776	.0647	.0568	.0510	.0459	.0367	.0367	.0355	.0355
I	1.83	.648	.339	.165	.114	.0913	.0792	.0653	.0571	.0502	.0460	.0370	.0370	.0360	.0361
W	4.21	1.44	.708	.293	.174	.125	.101	.0763	.0640	.0544	.0492	.0405	.0405	.0402	.0409
Pt	4.75	1.64	.795	.324	.191	.135	.107	.0800	.0659	.0554	.0501	.0414	.0414	.0411	.0418
Tl	5.16	1.8	.866	.346	.204	.143	.112	.0824	.0675	.0563	.0508	.0420	.0420	.0416	.0423
Pb	5.29	1.84	.896	.356	.208	.145	.114	.0836	.0684	.0569	.0512	.0421	.0421	.0420	.0426
U	10.6	2.42	1.17	.452	.259	.176	.136	.0952	.0757	.0615	.0548	.0445	.0445	.0440	.0446
Air	.151	.134	.123	.106	.0953	.0868	.0804	.0706	.0636	.0567	.0517	.0357	.0357	.0307	.0274
Nal	1.57	.568	.305	.155	.111	.0901	.0789	.0657	.0577	.0508	.0465	.0367	.0367	.0351	.0347
H ₂ O	.167	.149	.136	.118	.106	.0966	.0896	.0786	.0706	.0630	.0575	.0396	.0396	.0339	.0301
Concrete	.169	.139	.124	.107	.0954	.087	.0804	.0706	.0635	.0567	.0517	.0363	.0363	.0317	.0287
Tissue	.163	.144	.132	.115	.100	.0936	.0867	.0761	.0683	.0600	.0556	.0384	.0384	.0329	.0292

ถ้า I_0 เป็นความเข้มเดิมของรังสีแกมมาพลังงานเดี่ยวที่เป็นลำขนานแคบ ๆ เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนา x เซนติเมตร ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านตัวกลางออกมาได้ คือ I ดังภาพที่ 2.7 สามารถคำนวณหาค่า I ได้จากการอินทิเกรตสมการที่ 7 ได้ผลดังสมการที่ 10



ภาพที่ 2.7 เมื่อรังสีแกมมาความเข้ม I_0 กระทบสสารหนา x และมีความเข้มหลังผ่านสสาร I

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (10)$$

- เมื่อ
- I_0 คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอนก่อนผ่านสสาร
 - I คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอนหลังผ่านสสารโดยไม่เกิดอันตรกิริยาใด ๆ
 - x คือ ความหนาของสสาร
 - μ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)

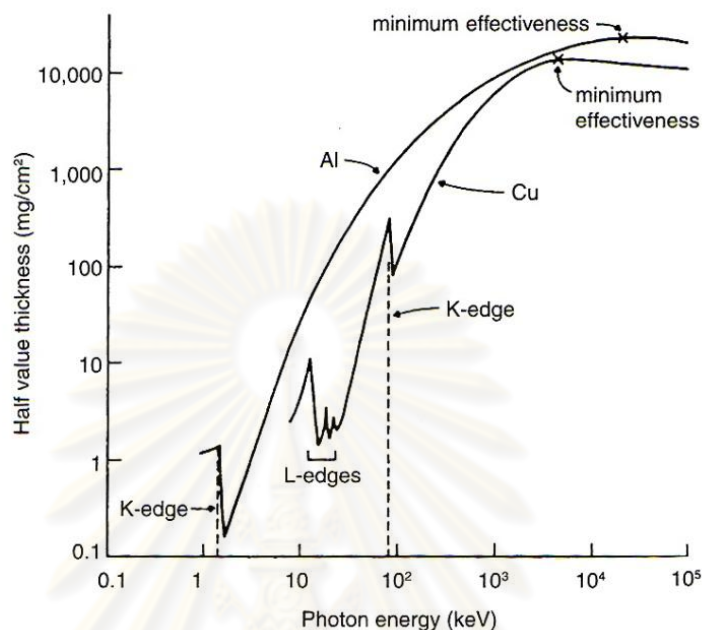
จากค่า μ สามารถคำนวณค่า HVL (half value layer) และ TVL (tenth value layer) ซึ่งหมายถึง ความหนาของตัวกลางที่ทำให้ความเข้มของรังสีแกมมาลดลง 1/2 เท่า และ 1/10 เท่า ของความเข้มเดิม ได้จากสมการ

$$HVL = \frac{0.693}{\mu} \quad (11)$$

$$TVL = \frac{2.3}{\mu} \quad (12)$$

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งมีอำนาจทะลุทะลวงสูง ในการเลือกวัสดุกำบังรังสีแกมมา อาจพิจารณาได้จากค่า HVL โดยวัสดุที่เหมาะสม จะมีค่า HVL ต่ำ ภาพที่ 2.8 แสดงความสัมพันธ์ของ HVL กับพลังงานของโฟตอน เปรียบเทียบอะลูมิเนียม ($Z = 13$) ซึ่งมีเลขอะตอมต่ำ และทองแดง ($Z = 29$) ซึ่งมีเลขอะตอมสูงกว่า เส้นกราฟปรากฏรอยหยัก แสดงถึงระดับพลังงานที่ต้องใช้ในการผลิตอิเล็กตรอนออกจากวงโคจร เช่น ที่ K-edge แสดงระดับพลังงานที่ใช้เพื่อผลิตอิเล็กตรอนในวง (K) ออกจากอะตอม หลังจากอิเล็กตรอนหลุดออกไป อิเล็กตรอนที่วงนอกจะเข้ามาแทนที่ ทำให้มีการปล่อยรังสีเอกซ์ โดยรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานของโฟตอนที่ผลิตอิเล็กตรอนออกไป (ตารางที่ 2) จะเห็นได้ว่า วัสดุที่มีเลขอะตอมสูง

แม้ว่าจะเหมาะสมกับการกำบังรังสีแกมมา แต่ก็ปล่อยรังสีเอกซ์ออกมาด้วย ดังนั้นในการกำบังรังสีแกมมา จึงต้องคำนึงถึงรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นด้วย



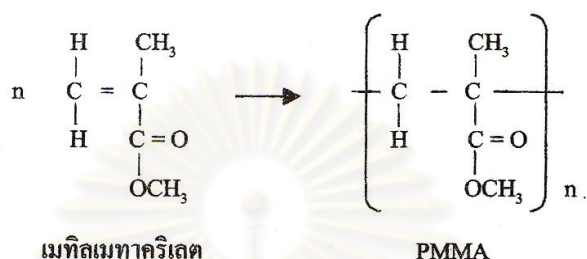
ภาพที่ 2.8 ความสัมพันธ์ของค่า HVL กับพลังงานของโฟตอนโดยเปรียบเทียบระหว่างอะลูมิเนียม ($Z = 13$) และทองแดง ($Z = 29$)

ตารางที่ 2.2 ระดับพลังงานที่ K-edge และพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น ($K\alpha$ X-rays) ของวัสดุชนิดต่าง ๆ

วัสดุ	เลขอะตอม	K-edge (keV)	$K\alpha$ X-rays (keV)
Al	13	1.56	1.49
Fe	26	7.1	6.4
Co	27	7.7	6.9
Ni	28	8.3	7.5
Cu	29	9	8
Zn	30	9.7	8.6
Ga	31	10.4	9.2
Sn	50	29	25
Pb	82	88	75
U	92	116	98

2.1.2 พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate, PMMA) [3-6]

พอลิเมทิลเมทาคริเลต, PMMA ,อะคริลิก (Acrylic), เพลกลิกลาส (Plexiglas), ลูไซต์ (Lucite) หรือเปอร์สเปกซ์ (Perspex) ตามชื่อทางการค้า ผลิตได้จากเมทิลเมทาคริเลต ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ภาพที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตและพอลิเมทิลเมทาคริเลตหรือพีเอ็มเอ็มเอ

พอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นพลาสติกที่โปร่งใสมาก จนมีการเรียกกันว่าเป็นแก้วอินทรีย์ (Organic glass) มีความเหนียวและแข็งแรงทนทานมาก สามารถใช้ทำกระจกที่ไม่แตก (Unbreakable window) หน้าต่างเครื่องบิน แผงหน้าปัดต่าง ๆ ที่ใช้ในรถยนต์ หน้าปัดนาฬิกา เมื่อมีการผสมสีลงไปมีการใช้ทำที่ครอบพลาสติกสำหรับไฟสัญญาณรถยนต์ แผ่นพลาสติกถูกนำไปตัดเป็นตัวหนังสือของป้ายร้านค้า ป้ายโฆษณา ฯลฯ

2.1.2.1 คุณสมบัติที่น่าสนใจของอะคริลิกพลาสติก

1. มีความหนาแน่นประมาณ 1.15-1.19 กรัม/ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ 130-140 องศาเซลเซียส และจุดเดือดที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส
3. มีความทนทานต่อการกระแทก (impact strength) สูงกว่าแก้วและโพลิสไตรีน แต่ต่ำกว่าโพลีคาร์บอเนตและพลาสติกวิศวกรรมชนิดอื่น
4. อะคริลิกพลาสติกมีเนื้ออ่อนจึงเกิดรอยขีดได้ง่าย
5. แสงสว่างสามารถส่องผ่านเนื้อพลาสติกได้ถึงร้อยละ 92 และมีการสะท้อนกลับที่ผิวประมาณร้อยละ 4
6. มีความทนทานต่อสภาพแวดล้อมดีกว่าพลาสติกชนิดอื่นเช่น โพลีคาร์บอเนต จึงนิยมใช้อะคริลิกพลาสติกกับงานกลางแจ้งด้วย
7. อะคริลิกพลาสติกไม่ทนทานต่อตัวทำละลายหลายชนิด

2.2.2.2 การหล่อแผ่นอะคริลิก [7]

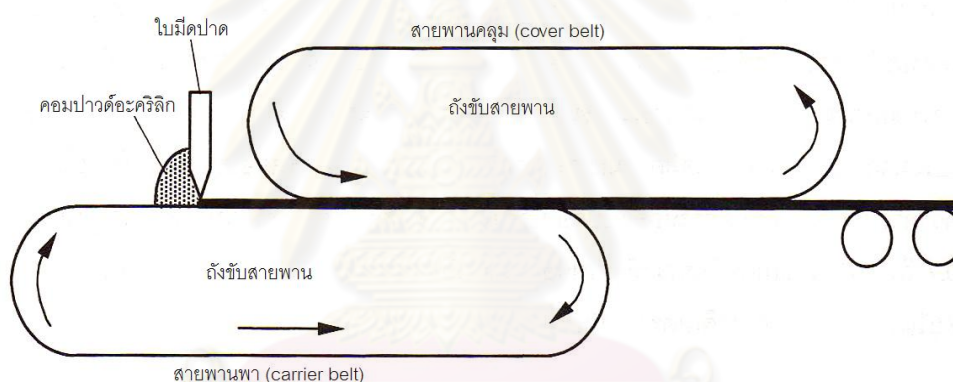
แผ่นอะคริลิกมักนิยมขึ้นรูปด้วยกระบวนการการหล่อ ทั้งนี้เนื่องจากแผ่นอะคริลิกที่เตรียมได้จากกระบวนการหล่อจะมีคุณสมบัติเชิงกล และคุณสมบัติด้านความโปร่งแสงที่ดี อีกทั้งยังสามารถนำไปแปรรูปต่อด้วยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มได้ขึ้นงานพลาสติกที่มีคุณภาพดี โดยทั่วไปกระบวนการหล่อแผ่นอะคริลิกสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous Casting Process) และกระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch Casting Process) ที่นิยมเรียกว่ากระบวนการหล่อแบบเซลล์ (cell casting process) กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่องนั้นจะทำระหว่างสายพานลำเลียงสองเส้นที่กำลังเคลื่อนที่ ส่วนกระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่องจะทำในเบ้าหล่อหรือในแม่พิมพ์ที่อาจจะมีหลายรูปแบบ และสำหรับในงานวิจัยนี้จะทำการเตรียมแผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตโดยใช้กระบวนการขึ้นรูปแบบไม่ต่อเนื่องเพื่อให้ได้แผ่นพอลิเมทิลเมทาคริเลตที่มีความโปร่งแสงคล้ายแก้ว

2.2.2.2.1 กระบวนการหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous casting process)

วัตถุดิบของการหล่อ คือมอนอเมอร์ (เมทิลเมทาคริเลต) และอาจผสมด้วยโค-มอนอเมอร์บางชนิด เพื่อปรับปรุงสมบัติของแผ่นอะคริลิกที่ได้ กล่าวคือมีการเติมมอนอเมอร์อะคริลิกชนิดอื่นๆ เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของแผ่นอะคริลิกให้ทนความร้อนดีขึ้น นอกจากนี้อาจจะเติมไดเมทิลอะคริเลต เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงบางส่วนในแผ่นพลาสติก ซึ่งส่งผลให้แปรรูปโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มแล้วได้ชิ้นงานที่มีความสม่ำเสมอขึ้นและทนต่อสารเคมีและความร้อนมากขึ้น

หลังจากผสมมอนอเมอร์และโคมอนอเมอร์แล้วต้องทำให้สารผสมมีความหนืดสูงขึ้นถึงจะทำการหล่อแบบต่อเนื่องได้ มีวิธีการเพิ่มความหนืด 2 วิธี คือการผสมพอลิเมอไรต์ (PMMA) โดยละลายในสารละลายผสม โดยเติม PMMA ประมาณ 40% โดยน้ำหนัก อีกวิธีของการเพิ่มความหนืดคือการให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันบางส่วน โดยใช้สารเปอร์ออกไซด์เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) โดยปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจนกว่าจะได้ระดับความหนืดที่ต้องการ หลังจากนั้นทำการผสมสารเติมแต่ง (additives) ชนิดต่าง ๆ ลงไป เช่น สี สารดูดกลิ่นแสงอัลตราไวโอเล็ต และสารเร่งปฏิกิริยา (catalyst) เป็นต้น สารเร่งปฏิกิริยาทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิ 77 ถึง 88 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงต้องเก็บของผสมไว้ที่อุณหภูมิต่ำ (ประมาณ 10 ถึง 16 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการเกิดปฏิกิริยาก่อนเริ่มกระบวนการหล่อ หลังจากนั้นทำการไล่อากาศที่แฝงตัวอยู่ในสารละลายหนืดออก เนื่องจากการมีฟองอากาศ จะทำให้เกิดจุดบกพร่องบนแผ่นอะคริลิกได้

หลังจากนั้นส่งของผสมไปยังเครื่องหล่อ เติมสารผสมเข้าระหว่างสายพานหล่อซึ่งทำจากเหล็กกล้าไร้สนิมผิวมันสองชุด สายพานชุดล่าง เรียกว่า "สายพานพา (carrier - belt)" ซึ่งมีหน้าที่ในการนำวัสดุเคลือบเข้าสู่ช่องว่างที่เกิดขึ้นจากสายพานชุดนี้กับสายพานคลุม (cover belt) ซึ่งอยู่ด้านบนซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิของสายพานที่ 77 ถึง 88 องศาเซลเซียส เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงต้องมีการควบคุมอุณหภูมิอย่างมีประสิทธิภาพ หลังจากปล่อยให้หมอนอเมอร์เปลี่ยนเป็นพอลิเมอร์ ประมาณ 95% แล้วเพิ่มอุณหภูมิให้อยู่ในช่วง 116 ถึง 127 องศาเซลเซียส เพื่อให้หมอนอเมอร์เปลี่ยนไปเป็นพอลิเมอร์ถึง 99% กล่าวคือให้เหลือหมอนอเมอร์ที่ไม่เกิดปฏิกิริยา 1% เพื่อให้ทำหน้าที่เป็นพลาสติกไซเซออร์ หากให้พอลิเมอร์เกิดปฏิกิริยา 100% จะทำให้ได้แผ่นอะคริลิกที่เปราะมาก หลังจากทำการหล่อเย็นแล้ว จึงตัดขนาดแผ่นพลาสติกตามต้องการ



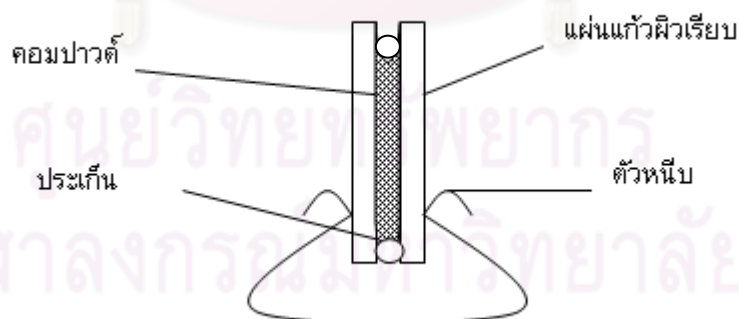
ภาพที่ 2.10 เครื่องหล่อแบบต่อเนื่อง (Continuous casting process)

2.2.2.2.2 กระบวนการหล่อแบบไม่ต่อเนื่อง (Continuous casting process)

การหล่อแบบไม่ต่อเนื่องเริ่มใช้กันตั้งแต่ปี ค.ศ. 1965 แต่การหล่อแบบเซลล์มีการใช้งานมาก่อนหน้านั้น กล่าวคือ ประมาณปี ค.ศ. 1930 การหล่อโดยเทคนิคนี้ทำในแก้วที่เป็นผิวเรียบหน้ากว้างประกบกันสองชิ้น ซึ่งทำให้มีเนื้อที่ของการหล่อจำกัด ซึ่งแตกต่างกับกรณีการหล่อแบบต่อเนื่องซึ่งจำกัดเฉพาะความกว้างเท่านั้น (ประมาณ 2.75 เมตร) แต่มีความยาวไม่จำกัด ความหนาของการหล่อโดยเทคนิคนี้ จะหนากว่าการหล่อด้วยเทคนิคการหล่อแบบต่อเนื่อง กล่าวคือมีความหนาของแผ่นอะคริลิกอยู่ในช่วง 0.7 ถึง 100 มิลลิเมตร ในขณะที่การหล่อแบบต่อเนื่องสามารถผลิตแผ่นพลาสติกที่มีความหนาอยู่ในช่วง 0.2 ถึง 10 มิลลิเมตรเท่านั้น

การหล่อพลาสติกโดยเทคนิคแบบเซลล์ เบ้าที่ใช้ในเทคนิคนี้คือแผ่นแก้วเรียบ และสะอาดประกบกันด้วยตัวหนีบแบบสปริง เพื่อให้เกิดการบีบตัวของแผ่นแก้ว เพื่อลดเซยการหดตัวของพลาสติกเนื่องจากการพอลิเมอไรเซชัน และการหล่อเย็นหลังจากการผสมสารเติมแต่ง (สี สารเร่งปฏิกิริยา และสารอื่น ๆ) ลงในมอนอเมอร์ หรือพรีพอลิเมอร์แล้วเติมสารประกอบลงในเซลล์ แล้วนำไปอบ ใช้เวลาในการอบนาน 12 ถึง 16 ชั่วโมง โดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้นการอบ 45 องศาเซลเซียส จนถึงสูงสุดการอบที่ 95 องศาเซลเซียส การผลิตแผ่นอะคริลิกหนากว่า 20 มิลลิเมตร จะใช้เวลาในการอบนานกว่าปกติ

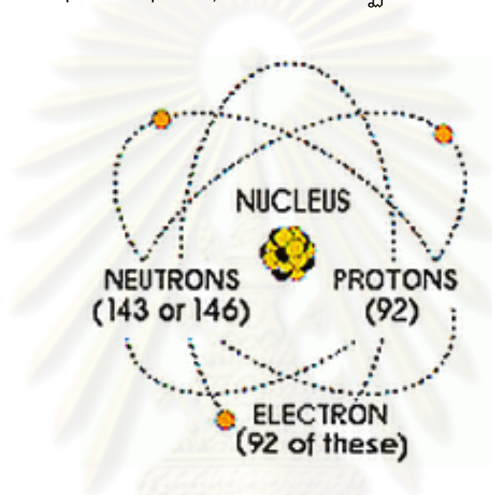
การผลิตแผ่นอะคริลิกด้วยเทคนิคนี้ สามารถผลิตได้ในหลายลักษณะทั้งผลิตภัณฑ์ที่โปร่งแสงและทึบแสง สามารถผลิตได้หลากหลายสี และมีผิวหน้าหลายรูปแบบทั้งมันและไม่มัน การผลิตแผ่นอะคริลิกที่มีความหนาน้อยกว่า 0.6 มิลลิเมตรด้วยเทคนิคนี้ มีปริมาณการผลิต ลดลงมากในช่วงสิบปีที่ผ่านมา เนื่องจากมักจะใช้เทคนิคการอัดรีดในการผลิตแทน แต่การผลิตโดยการอัดรีดมีข้อจำกัดในเรื่องสี เนื่องจากการเปลี่ยนสีในกระบวนการอัดรีดทำได้ยาก นอกจากนี้ ในการอัดรีดไม่สามารถทำให้เกิดการเชื่อมโยงเช่นเดียวกับการหล่อ ทำให้คุณสมบัติเชิงกลและคุณสมบัติทางกายภาพของพลาสติกด้อยกว่าการผลิตแผ่นพลาสติกจากการหล่อซึ่งสามารถแปรรูปโดยเทคนิคเทอร์โมฟอร์มได้ชิ้นงานที่มีคุณสมบัติดีกว่า นอกจากนี้แผ่นอะคริลิกที่มีความหนามากกว่า 0.6 มิลลิเมตร มีความสะดวกในการผลิตด้วยเทคนิคการหล่อมากกว่าการอัดรีด



ภาพที่ 2.11 การหล่อพลาสติกแบบเซลล์ (Cell Casting Process)

2.1.3 ยูเรเนียม [8, 9]

ยูเรเนียมเป็นธาตุโลหะสีเงิน มีจุดหลอมเหลว $1,132.3 \pm 0.8$ °C ($2,070.1 \pm 1.4$ °F) จุดเดือด $2,818$ °C ($5,104$ °F) และมีความหนาแน่นประมาณ 18.95 กรัม/ ลูกบาศก์เซนติเมตร ($\sim 1,183.01$ ปอนด์/ ลูกบาศก์ฟุต) ค้นพบเมื่อ ค.ศ. 1789 โดยชาวเยอรมันชื่อ มาร์ติน คลัฟโรท (Martin Klaproth) ยูเรเนียมเป็นธาตุใน อนุกรมแอกทิไนด์ (Actinide series) และยังเป็นธาตุกัมมันตรังสี (Radioactive element) ซึ่งในปัจจุบันยูเรเนียมเป็นเชื้อเพลิงหลักที่ใช้ในโรงไฟฟ้าพลังงานนิวเคลียร์ (Nuclear power plant) และเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Research reactor)

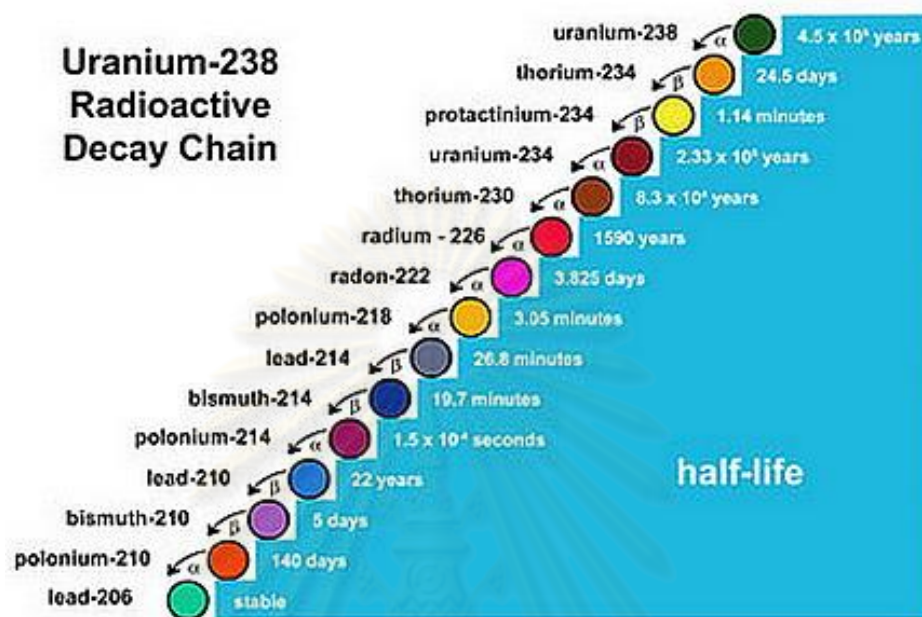


ภาพที่ 2.12 โครงสร้างของอะตอมยูเรเนียม

ยูเรเนียมมีเลขอะตอมเท่ากับ 92 กล่าวคือ ในโครงสร้างของอะตอมยูเรเนียมมีโปรตอนและอิเล็กตรอนอย่างละ 92 อนุภาค เท่ากัน สำหรับไอโซโทปยูเรเนียม-238 ภายในนิวเคลียสมีนิวตรอนจำนวน 146 อนุภาค โดยอยู่ร่วมกับโปรตอน ทั้งนี้จำนวนนิวตรอนแตกต่างกันได้ระหว่าง 141 ถึง 146 อนุภาค ยูเรเนียมที่พบตามธรรมชาติในเปลือกโลกมีไอโซโทปหลักคือ ยูเรเนียม-238 ประมาณ 99.27 เปอร์เซ็นต์ ยูเรเนียม-235 ประมาณ 0.72 เปอร์เซ็นต์ อีกไอโซโทปหนึ่งที่เหลือซึ่งมีปริมาณน้อยมาก คือ ยูเรเนียม-234

เนื่องจากยูเรเนียมเป็นธาตุกัมมันตรังสี นิวเคลียสจึงไม่เสถียรและในธรรมชาติเกิดการสลายกัมมันตรังสี (Radioactive decay) โดยการปลดปล่อยอนุภาคต่าง ๆ พร้อมกับแปรไปเป็นธาตุอื่นเป็นทอด ๆ อยู่ตลอดเวลา ยกตัวอย่างยูเรเนียม-238 เริ่มต้นการสลายโดยการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา พร้อมกับแปรธาตุเป็นทอเรียม-234 จากนั้นทอเรียม-234 ก็สลายต่อไปโดยการ ปลดปล่อยอนุภาคบีตาแล้วแปรธาตุเป็นโพแทสเซียม-234 ซึ่งก็สลายเป็นธาตุอื่นเป็นทอด ๆ ต่อไป จนในที่สุดเมื่อแปรธาตุเป็นตะกั่ว-206 ซึ่งเป็นธาตุเสถียรแล้ว ก็หยุดการสลาย

กัมมันตรังสี กลุ่มของธาตุในกระบวนการสลายกัมมันตรังสีเหล่านี้เรียกว่า อนุกรมการสลายกัมมันตรังสี (Decay series)



ภาพที่ 2.13 การสลายตัวของยูเรเนียม-238

การสลายตามธรรมชาติของยูเรเนียม-238 เป็นไปอย่างช้า ๆ โดยมีครึ่งชีวิต (Half life หมายถึง ระยะเวลาที่ธาตุสลายไป จนเหลือครึ่งหนึ่งของปริมาณเริ่มต้น) เท่า ๆ กับอายุของโลก คือประมาณ 4.5×10^9 ปี อย่างไรก็ตาม การสลายนี้ปลดปล่อยพลังงานออกมา เป็นความร้อนราว 0.1 วัตต์ต่อตัน ซึ่งก็มากพอที่จะทำให้แกนของโลกยังคงร้อนระอุอยู่ได้ อนึ่งยูเรเนียม-235 จะสลายเร็วกว่าเล็กน้อย โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 7×10^8 ปี และการที่ยูเรเนียมสลายโดยการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาด้วยอัตราคงที่ แร่ยูเรเนียมจึงมีประโยชน์ในการหาอายุของหินและใช้กำหนดอายุของโลก

ตารางที่ 2.3 ครึ่งชีวิตของไอโซโทปต่าง ๆ ของยูเรเนียมธรรมชาติ

ไอโซโทป	ครึ่งชีวิต
U-238	4.468×10^9 ปี
U-235	7.038×10^8 ปี
U-234	2.455×10^5 ปี

ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ หรือ Depleted Uranium

คือแร่ของธาตุยูเรเนียมที่มีสัดส่วนของยูเรเนียม-238 สูงขึ้นและยูเรเนียม-235 มีสัดส่วนลดลงกว่ายูเรเนียมที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงนิวเคลียร์ในเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ จึงไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้านิวเคลียร์

เนื่องจากยูเรเนียมธรรมชาติมีสัดส่วนของ U-235 น้อยอยู่แล้ว จึงต้องมีกระบวนการเสริมสมรรถนะ (enrichment) ซึ่งจะทำให้มี depleted uranium เกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ตัวอย่างเช่น การผลิตยูเรเนียมเสริมสมรรถนะ (enriched uranium) 5% จำนวน 1 กิโลกรัม ต้องใช้ยูเรเนียมธรรมชาติ 11.8 กิโลกรัม ทำให้มี depleted uranium ที่มี U-235 อยู่ 0.3% จำนวน 10.8 กิโลกรัม

สำหรับการแพร่กระจายกัมมันตรังสีนั้นอยู่ในระดับต่ำจึงเก็บรักษาได้ง่าย เนื่องจากการสลายตามธรรมชาติของยูเรเนียม-238 เป็นไปอย่างช้า ๆ โดยมีครึ่งชีวิตเท่า ๆ กับอายุของโลกคือประมาณ 4.5×10^9 ปี กล่าวคือแทบไม่มีกัมมันตรังสี โดยมีกัมมันตรังสีต่ำกว่าไอโซโทปอีกหลายชนิดที่มีอยู่ในหินในทราย

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.2.1 ปี 2532 ISRAEL CABASSO, JOHANNES SMID และ SURESH K. SAHNI ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Radiopaque Miscible Systems Composed of Poly(Methyl Methacrylate) and Transition and Nontransition Metal Salts: Spectroscopic, Thermal, and Radiographic Characterization. [10] เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการเข้ากันได้ของ พอลิเมทิลเมทาคริเลท (polymethyl methacrylate, PMMA) กับ cupric nitrate, manganese chloride, praseodymium chloride และ uranyl nitrate เนื่องจากเกลือสามารถผสมเข้ากันได้กับโมโนเมอร์และเข้าสู่กระบวนการพอลิเมอไรเซชันได้ จึงมีแนวคิดที่จะผสมเกลือโลหะหนักเข้าไปในโมโนเมอร์ของพลาสติกเพื่อใช้เป็นอุปกรณ์กำบังรังสีสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ โดยศึกษาถึงคุณสมบัติการกำบังรังสี ความร้อน และสเปกตรัมอินฟราเรด รวมถึงการการสังเคราะห์ประกอบเชิงซ้อนระหว่างขั้วบวก (cations) และหมู่คาร์บอนิล(carbonyl function) ของพอลิเมอร์ พบว่า เกลือพอลิเมอร์ (salt-containing polymers) มีค่าการส่งผ่านความร้อนสูงกว่าพอลิเมอร์ที่ไม่มีเกลือเป็นส่วนประกอบ (salt-free polymers) โดยจะขึ้นกับคุณสมบัติและความเข้มข้นของเกลือโลหะ (metal salt) เองด้วย สำหรับการเข้ากันได้ของ PMMA และยูเรเนียมไนเตรท (PMMA-uranyl nitrate systems) นั้น พบว่ามีความโปร่งใส (transparent) เป็นพลาสติกที่ใสเหมือนแก้ว(glassy plastics) และยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรท (uranyl nitrate hexahydrate) 11% โดยน้ำหนักนั้นมีความที่รังสีเทียบเท่ากับอะลูมิเนียม

2.2.2 ปี 2533 ISRAEL CABASSO, JOHANNES SMID และ SURESH K. SAHNI ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Radiopaque Polymers Based on Acrylated Phosphonate Esters Derived from Polyols. [11] เป็นงานวิจัยที่ศึกษาการเข้ากันได้ของเกลือโลหะกับพอลิเมอร์ (metal salt-polymer systems) ของ acrylated phosphonates ที่ได้จาก polyols หลาย ๆ ชนิด เช่น glycerol, D-mannitol, D-sorbitol, pentaerythritol, และ dipentaerythritol กับเกลือโลหะหนัก (heavy metal salts) คือ บิสมัทโบรไมด์และยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรท จนกลายเป็นพอลิเมอร์ที่มีลักษณะใสเหมือนแก้ว และศึกษาถึงคุณสมบัติการกำบังรังสี ความร้อน และสเปกตรัมอินฟราเรดรวมถึงการสังเคราะห์พันธะระหว่างพอลิเมอร์กับออกซิเจนของหมู่ฟอสฟอรัส (phosphoryl's oxygen) ของ polymer-salt systems นี้ด้วย ผลการทดลองพบว่า ยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรท (uranyl nitrate hexahydrate) 11% โดยน้ำหนักและบิสมัทโบรไมด์ 12.5% โดยน้ำหนักนั้นมีความที่รังสีเทียบเท่ากับอะลูมิเนียม และพบว่าเกลือพอลิเมอร์มีค่า glass transition temperatures (T_g) สูงกว่า พอลิเมอร์ที่ไม่มีเกลือเป็นส่วนประกอบ โดยค่า T_g values นั้นจะขึ้นกับคุณสมบัติทาง

เคมีของพอลิเมอร์ ความเข้มข้นของเกลือโลหะ และการเกิด crosslinking ของพอลิเมอร์กับอะตอมของโลหะ

2.2.3 ปี 2526 John E. Aldrich, Ph.D. และ John W. Andrew, Ph.D. ได้เสนองานวิจัยเรื่อง The Design of Shielding Windows Using Lead Glass, Lead Acrylic, and Plate Glass. [12] ได้ศึกษาเปรียบเทียบคุณสมบัติ ราคา และการนำไปใช้เป็นวัสดุกำบังรังสี พบว่า อะคริลิกที่เจือตะกั่ว (Lead acrylic) มีความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุกำบังรังสีสำหรับใช้ในภาคสนาม เนื่องจากเป็นวัสดุที่ค่อนข้างเบาทำให้สามารถใช้งานได้สะดวกกว่ากระจกตะกั่วเมื่อเทียบกับการกำบังรังสีได้เท่ากัน

2.2.4 ปี 2552 A. A. Plionis, S. R. Garcia, E. R. Gonzales, D. R. Porterfield และ D. S. Peterson ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Replacement of lead bricks with non-hazardous polymer-bismuth for low-energy gamma shielding. [13] เป็นงานวิจัยที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการกำบังรังสีสำหรับหัววัดรังสี HPGe ระหว่างตะกั่ว (Lead) กับโพลีเอทิลีนที่มีส่วนผสมของบิสมีท (Polyethylene-based-bismuth) ในการลดทอนรังสีแกมมา (50-1400 keV) พบว่า พอลิเมอร์-บิสมีทสามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงานต่ำ (<400 keV) ได้ใกล้เคียงกับตะกั่ว

2.2.5 ปี 2549 Matveev V.Z., Morenko A.I. และ Shapovalov V.I. ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Design of Transport Casks with Depleted Uranium Gamma Shield and Advanced Safety. [14] ได้ออกแบบภาชนะสำหรับขนส่งกากกัมมันตรังสีโดยใช้ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะสำหรับกำบังรังสีโดยเปรียบเทียบระหว่าง High-strength pig iron, Steel 1020 และ Depleted Uranium alloy พบว่า Depleted Uranium เป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับทำเป็นโครงสร้างและกำบังรังสี เนื่องจากมีค่าความหนาแน่นของวัสดุที่สูงกว่าและสามารถทนต่อความเค้นได้มากกว่า นอกจากนี้ยังเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นภาชนะขนาดเล็กกำบังรังสี

2.2.6 ปี 2548 ปฐมาภรณ์ วัฒนพันธุ์ และ วีรนุช ม่วงเกษม ได้ทำวิทยานิพนธ์เรื่อง การผลิตแผ่นอะคริลิกที่เติมด้วยตะกั่วเสตริยเรทที่มีคุณสมบัติป้องกันรังสีเอกซ์ [15] โดยการนำตะกั่วเสตริยเรทมาเติมในเมทิลเมทาคริเลทโมโนเมอร์ ซึ่งสามารถหาได้ภายในประเทศ ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นอะคริลิก โดยแผ่นอะคริลิกที่ผลิตได้มีปริมาณตะกั่วเสตริยเรท 0.05, 1, 1.5, 5 และ 10 phr (น้ำหนักตะกั่วเสตริยเรทต่อ 100 ส่วนน้ำหนักของเมทิลเมทาคริเลทโมโนเมอร์) จากการทดสอบด้วยรังสีเอกซ์ที่มีความต่างศักย์ 40 และ 50 กิโลโวลต์ พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) มีค่ามากขึ้นเมื่อชิ้นงานมีปริมาณตะกั่วเสตริยเรทสูงขึ้น

นอกจากนี้จากการทดลองยังพบอีกว่าค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นเมื่อทดสอบด้วยรังสีเอกซ์ที่ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ ยังมีค่าสูงกว่าที่ 50 กิโลโวลต์ และเมื่อนำแผ่นอะคริลิกไปทดสอบความขุ่น พบว่า ชิ้นงานมีความขุ่นมากขึ้นเมื่อเติมตะกั่วเสตริยเรทมากขึ้น อย่างไรก็ตาม ความแข็งของแผ่นอะคริลิกจะไม่ขึ้นกับปริมาณตะกั่วเสตริยเรท



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

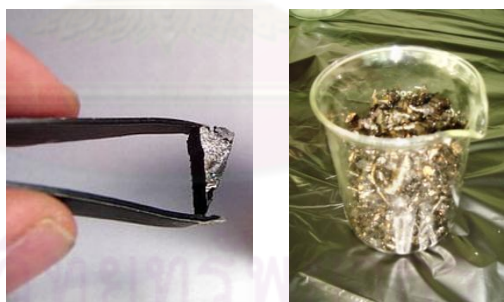
วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 สารตั้งต้นหลักและอุปกรณ์ที่ใช้ในการสังเคราะห์ยูเรเนียมในเตาพกพาไฮดรอลิก

3.1.1.2 โลหะยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ (Depleted uranium metal)

ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ มีสัญลักษณ์ U มีเลขอะตอม 92 เป็นโลหะหนักที่มีไอโซโทป ^{238}U เป็นหลัก อยู่ในอนุกรม actinide เป็นธาตุกัมมันตรังสีโดยธรรมชาติ ยูเรเนียมบริสุทธิ์จะมีสีขาวเงิน เป็นโลหะที่มีกัมมันตภาพรังสีอ่อน มีความแข็งน้อยกว่าเหล็กเล็กน้อย มีความอ่อนตัว บิดงอได้ มีความเป็นแม่เหล็กเล็กน้อย โลหะยูเรเนียมมีความหนาแน่นสูงมาก โดยมีความหนาแน่นมากกว่าตะกั่ว 65% แต่มีความหนาแน่นน้อยกว่าทอง เมื่อโลหะยูเรเนียมถูกอากาศจะทำปฏิกิริยากับความชื้น ทำให้เกิดยูเรเนียมออกไซด์สีดำเกาะบนผิว ยูเรเนียมด้อยสมรรถนะที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีสัดส่วนของไอโซโทป ^{238}U สูงถึง 99.76 % และมีสัดส่วนของไอโซโทป ^{235}U อยู่เพียง 0.24% (หาปริมาณไอโซโทป ^{235}U โดยเทียบกับสารมาตรฐานยูเรเนียมออกไซด์: U_3O_8 ความบริสุทธิ์ 99% และมีความเข้มข้นของไอโซโทป ^{235}U เท่ากับ 0.4%) [16]

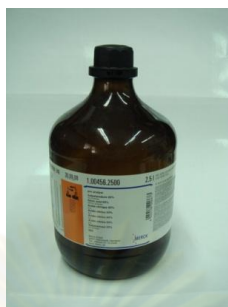


ภาพที่ 3.1 โลหะยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ

3.1.1.2 กรดไนตริก (Nitric Acid)

กรดไนตริก (HNO_3) เป็นของเหลวที่กัดกร่อนและไม่มีสี เป็นกรดที่มีพิษที่สามารถทำให้เกิดแผลไฟไหม้อย่างรุนแรง กรดไนตริกมีความสามารถสูงมากในการทำปฏิกิริยาออกซิไดซ์ สามารถทำปฏิกิริยากับสารอินทรีย์หลายชนิด ปฏิกิริยาอาจรุนแรงจนสามารถระเบิดได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรด อุณหภูมิ และตัวลดยกออกซิเจน (ในปฏิกิริยาที่มีออกซิเจนเกี่ยวข้อง) สามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้กับโลหะแทบทุกชนิดยกเว้นตระกูลโลหะมีค่า (ทองคำ, เงิน, แพลททินัม,

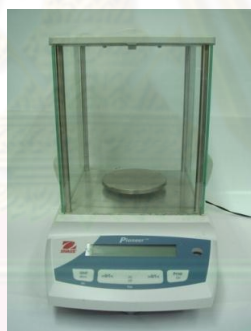
พลาลาเดียม, รูทีเนียม, โรเดียม, ออสเมียม, อิริเดียม) และโลหะผสมบางชนิด (อัลลอย) โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กรดไนตริกที่ผลิตโดยบริษัท เมอร์ค เคจีเอเอ ประเทศเยอรมัน ความเข้มข้น 65%



ภาพที่ 3.2 กรดไนตริก

3.1.1.3 เครื่องชั่ง (Balance)

ใช้เครื่องชั่งยี่ห้อ OHAUS ซึ่งมีความละเอียดโดยมีทศนิยม 4 ตำแหน่ง สำหรับชั่งสารตั้งต้นต่าง ๆ ที่จะใช้ในการสังเคราะห์ยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรท



ภาพที่ 3.3 เครื่องชั่ง

3.1.1.4 เครื่องให้ความร้อน (Hot plate)

ใช้เครื่องให้ความร้อนยี่ห้อ Whatman รุ่น HPMS สำหรับต้มสารละลายยูเรเนียมไนเตรทเฮกซะไฮเดรท เพื่อกำจัดน้ำออกไปและเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย



ภาพที่ 3.4 เครื่องให้ความร้อน

3.1.2 สารตั้งต้นหลักและอุปกรณ์ที่ใช้ขึ้นรูปแผ่นอะคริลิก

3.1.2.1 เมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ (Methyl methacrylate monomer, MMA)

เมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ เป็นสารประกอบอินทรีย์ มีสูตรโมเลกุลคือ $\text{CH}_2=\text{C}(\text{CH}_3)\text{COOCH}_3$ เป็นของเหลวใสไม่มีสี เมื่อโมเลกุลของเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์แต่ละโมเลกุลเกิดพันธะเชื่อมต่อกันจะเกิดเป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ขึ้นเรียกว่า พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethyl methacrylate) หรือ PMMA

น้ำยาเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ เมื่อนำเข้าจากต่างประเทศจำเป็นต้องมี สารเคมีที่เรียกว่าอินฮิบิเตอร์ (inhibitor) ใส่เข้ามาเพื่อป้องกันการเกิด self-polymerization โดยปกติถ้าขนส่งมาในถังขนาด 190 kg. จะใส่อยู่ที่ 25-50 ppm แต่ถ้าขนส่งเป็นจำนวนมากในระวางของเรือ จะใส่สารเคมีที่ 10-25 ppm ดังนั้น ในกระบวนการผลิต ถ้าต้องการให้แผ่นอะคริลิกที่ได้มีคุณภาพสูง จะต้องมีการกลั่นเพื่อแยกตัว inhibitor ออกเสียก่อน แต่ถ้ามีการใส่มาเพียง 10 ppm ก็อาจนำไปทำแผ่นอะคริลิกได้เลย โดยทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นลดลงต่ำกว่ามาตรฐานไม่มากนัก

เมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแพนเอเชียจำกัดและบริษัทไทยเอ็มเอ็มเอจำกัด

3.1.2.2 ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต (Uranyl nitrate hexahydrate)

ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต มีสูตรโครงสร้างโมเลกุลคือ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ มีมวลโมเลกุล 502.18 g/mol ประกอบด้วยน้ำ (H_2O) 21.53%, ยูเรเนียม (U) 47.41%, ยูเรเนียมออกไซด์ (UO_2) 53.78% และ ไนโตรเจนไดรอกไซด์ (NO_3) 24.69% มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลือง-เขียว ความหนาแน่น 2.807 g/cm³ จุดหลอมเหลว 60 องศาเซลเซียส และจุดเดือด 118 องศาเซลเซียส

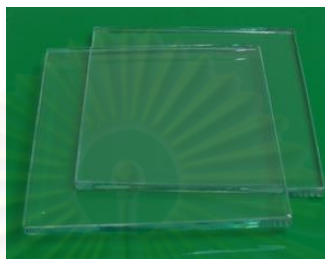
3.1.2.3 สารเริ่มปฏิกิริยา (Initiator)

สารเริ่มปฏิกิริยา เป็นสารเคมีที่จำเป็นต้องเติมลงไปเพื่อกระตุ้นให้เกิดปฏิกิริยา polymerization ภายใน เมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ โดยปริมาณที่ใช้จะขึ้นอยู่กับปริมาณ inhibitor ที่มีการเติมมาใน เมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์นั้น ๆ

สารเริ่มปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ 2, 2'-Azobis-(2, 4-dimethylvaleronitrile) หรือ (ABVN) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแพนเอเชียจำกัด

3.1.2.4 กระจกแม่พิมพ์ (Mould)

กระจกแม่พิมพ์ (Mould) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแพนเอเชียจำกัด ซึ่งจะใช้เป็นตัวกำหนดขนาด ความสวยงาม และความสมบูรณ์ของแผ่นอะคริลิกที่ผลิตได้ ถ้าแม่พิมพ์มีความเรียบมันไม่มีตำหนิหรือรอยขีดข่วน ไม่โก่ง ไม่โค้งงอ แผ่นอะคริลิกที่ผลิตได้จะเรียบ มัน สวยงาม และไม่มีตำหนิ



ภาพที่ 3.5 กระจกแม่พิมพ์

3.1.2.5 ประเก็นพีวีซี (PVC)

ประเก็นพีวีซี (PVC) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแพนเอเชียจำกัด เป็นวัสดุสำหรับกั้นกลางระหว่างกระจกแม่พิมพ์ที่จะใช้ขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกเพื่อป้องกันสารละลายอะคริลิกรั่วไหล และเป็นตัวกำหนดความหนาของแผ่นอะคริลิก เช่น 2 มิลลิเมตร, 3 มิลลิเมตร, 5 มิลลิเมตร, 10 มิลลิเมตร, 30 มิลลิเมตร และ 50 มิลลิเมตร เป็นต้น



ภาพที่ 3.6 ประเก็นพีวีซี

3.1.2.6 ตัวยึดจับ (Clamp)

ตัวยึดจับที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัทแพนเอเชียจำกัด ใช้เป็นตัวหนีบให้กระจกแม่พิมพ์กระชับกับประเก็น PVC ตลอดทั้งแนว โดยจัดตัวยึดจับให้เพียงพอ กับขนาดของกระจกแม่พิมพ์ที่ใช้ เพื่อป้องกันสารละลายอะคริลิกรั่วไหลออกมา และเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศรั่วเข้าไปในแผ่นได้ เนื่องจากสภาพภายในกระจกจะต้องเป็นสุญญากาศเสมอจึงจะทำให้แผ่นอะคริลิกที่ผลิตได้มีผิวหน้าเรียบและมีความหนาที่สม่ำเสมอทั้งแผ่น



ภาพที่ 3.7 ตัวยึดจับ

3.1.2.7 เครื่องปั่น (Stirrer)

ใช้เครื่องปั่นยี่ห้อ Whatman โมเดล HPMS เพื่อปั่นสารละลายอะคริลิกจนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน



ภาพที่ 3.8 เครื่องปั่น

3.1.2.8 เครื่องทำสุญญากาศ (Vacuum pump)

เนื่องจากในกระบวนการปั่นสารละลายอะคริลิกจะทำให้ส่วนผสมเกิดฟองอากาศแทรกอยู่ในสารผสม จึงต้องนำส่วนผสมไปเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็นสุญญากาศ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้เครื่องทำสุญญากาศยี่ห้อ HAILEA รุ่น ACO-009 เพื่อกำจัดฟองอากาศออกจากสารผสม



ภาพที่ 3.9 เครื่องทำสุญญากาศ

3.1.2.9 อ่างน้ำร้อน (Hot water bath)

ใช้อ่างน้ำร้อนสำหรับแช่สารตั้งต้นอะคริลิกเพื่อเป็นการกระตุ้นให้สารตั้งต้นอะคริลิกเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ขึ้น โดยจะแช่ในน้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส โดยในงานวิจัยนี้จะใช้อ่างน้ำร้อนยี่ห้อ GFL ในการแช่สารตั้งต้นอะคริลิก



ภาพที่ 3.10 อ่างน้ำร้อน

3.1.2.10 ตู้อบ (Oven)

เนื่องจากแผ่นอะคริลิกที่ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชันแล้วนั้น ตามทฤษฎีแล้ว จะมีความแข็งประมาณ 85-90% เนื่องจากยังคงมี monomer ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ ทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (residual stress) ในพลาสติก ดังนั้นจึงต้องมีการอบแผ่นอะคริลิกที่ได้จากการต้มในอ่างน้ำร้อน โดยในงานวิจัยนี้จะใช้ตู้อบยี่ห้อ Binder รุ่น R3-Controller Series เพื่ออบแผ่นอะคริลิกโดยใช้อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส



ภาพที่ 3.11 ตู้อบ

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบแผ่นอะคริลิก

3.1.3.1 การวัดการลดทอนรังสี

3.1.3.1.1 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา (gamma source)

ในงานวิจัยนี้จะใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีพลังงานไม่เกิน 400 keV ดังนี้ Am-241 ให้รังสีแกมมาพลังงาน 60 keV, Co-57 ให้รังสีแกมมาพลังงาน 122 keV และ 136 keV, Eu-152 ให้รังสีแกมมาพลังงาน 244 keV และ I-131 ให้รังสีแกมมาพลังงาน 284 keV และ 364 keV

3.1.3.1.2. หัววัดรังสี High purity germanium (HPGe)

หัววัดรังสี High purity germanium (HPGe) ถูกใช้อย่างกว้างขวางในการวัดและวิเคราะห์ รังสีแกมมา ที่สลายตัวจากสารกัมมันตรังสีในธรรมชาติหรือที่มนุษย์ผลิตขึ้น เนื่องจากเป็นหัววัดที่มี Energy Resolution ที่ดีมาก แต่ต้องอาศัยความเย็นจากไนโตรเจนเหลวระหว่างการใช้งาน โดยไนโตรเจนเหลวต้องเก็บในถังขนาด 10 ลิตร ดังภาพที่ 3.12



ภาพที่ 3.12 หัววัดรังสี High purity germanium

3.1.3.2 เครื่องวัดการส่องผ่านของแสง

นำแผ่นอะคริลิกที่ผลิตได้ไปทดสอบการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องวัดการส่องผ่านของแสงของบริษัท GretagMacbethTH ที่ห้องวิจัยบริษัทแพนเอเชียจำกัด



ภาพที่ 3.13 เครื่องวัดการส่องผ่านของแสง

3.1.3.3 เครื่องวัดปริมาณรังสีโซเดียมไอโอดีด (ทัลเลียม)

ใช้หัววัดปริมาณรังสีโซเดียมไอโอดีด (ทัลเลียม) ยี่ห้อ Thermo Eberline รุ่น E600 สำหรับวัดปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาจากแผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นที่ระยะต่าง ๆ



ภาพที่ 3.14 เครื่องวัดปริมาณรังสีโซเดียมไอโอดีด (ทัลเลียม)

3.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลเพื่อพัฒนากำบังรังสีแบบโปร่งแสงชนิดใหม่สำหรับรังสีแกมมา พลังงานต่ำโดยมีอะคริลิกและยูเรเนียมด้อยสมรรถนะเป็นองค์ประกอบได้แบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การสังเคราะห์ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท

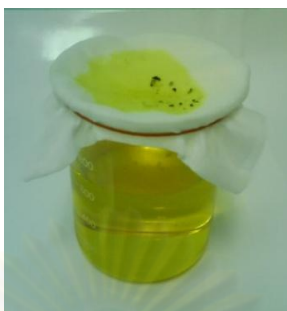
การสังเคราะห์ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทมีขั้นตอนดังนี้

3.2.1.1 ผสมยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ 100 กรัม เข้ากับกรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 32.5% ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ในขั้นตอนนี้กรดไนตริกจะทำปฏิกิริยากับโลหะยูเรเนียมด้อยสมรรถนะอย่างรุนแรง โดยขณะที่เกิดปฏิกิริยานี้อุณหภูมิของสารละลายจะสูงขึ้นถึง 80-120 องศาเซลเซียส และมีฟองก๊าซเกิดขึ้นมากมาย



ภาพที่ 3.15 กรดไนตริกขณะทำปฏิกิริยากับโลหะยูเรเนียมด้อยสมรรถนะ

3.2.1.2 กรองสารละลายยูเรเนียมที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างกรดไนตริกกับโลหะยูเรเนียมด้วยผ้ากรอง 2 ชั้น เพื่อกำจัดเศษตะกอนที่เหลืออยู่ออกไป



ภาพที่ 3.16 การกรองสารละลายยูเรเนียม

3.2.1.3 นำสารละลายยูเรเนียมที่ได้จากการกรองไปต้มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (จุดหลอมเหลวของยูเรเนียมไนเตรท) เพื่อกำจัดน้ำออกไปและเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย จนกระทั่งสารละลายมีปริมาตรลดลงเหลือเพียง 1 ใน 3 ของปริมาตรเริ่มต้น



ภาพที่ 3.17 การต้มสารละลายยูเรเนียม

3.2.1.4 รอให้สารละลายตกผลึกยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรตที่อุณหภูมิห้องดังภาพที่ 3.18



ภาพที่ 3.18 ผลึกยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรต

3.2.2 การหาสัดส่วนของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สามารถผสมอยู่ในอะคริลิกได้ในปริมาณที่มากที่สุด

ทำการผสมเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ (Methyl methacrylate monomer) กับ ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สังเคราะห์ได้โดยผสมที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องปั่น (Magnetic stirrer) ที่อัตราส่วนเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ต่อยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ 50:50, 60:40, 70:30, 80:20 และ 90:10 ตามลำดับ

3.2.3 การขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท

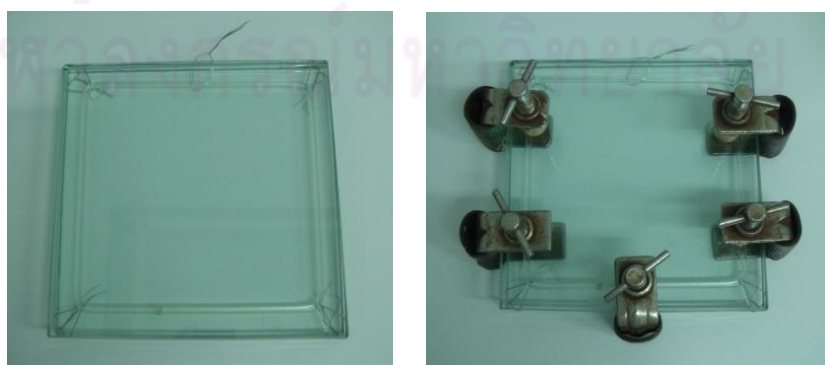
การขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท มีขั้นตอนดังนี้

3.2.3.1 การผสมสารเคมีตั้งต้น

ผสมเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ (Methyl methacrylate monomer) สารเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) และยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท (Uranyl nitrate hexahydrate) 45% โดยน้ำหนัก เข้าด้วยกันโดยนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นจนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งในกระบวนการนี้จะทำให้ส่วนผสมเกิดฟองอากาศแทรกอยู่ในสารผสม จึงต้องนำส่วนผสมไปเข้าสู่กระบวนการทำให้เป็นสุญญากาศเพื่อกำจัดฟองอากาศออกจากสารผสม

3.2.3.2 การเตรียมแม่พิมพ์ (Mould preparing)

การเตรียมแม่พิมพ์ทำได้โดย นำกระจก 2 แผ่นประกบเข้าหากัน โดยมีประเก็นพีวีซี (PVC) เป็นตัวกั้นกลางเพื่อป้องกันสารละลาย รั่วไหล เป็นตัวกำหนดขนาดและความหนาของแผ่นอะคริลิกอีกด้วย หลังจากนั้นจึงใช้ตัวยึดจับ (clamp) เป็นตัวหนีบให้กระจกกระชับกับประเก็น PVC ตลอดทั้งแนว



ภาพที่ 3.19 การเตรียมแม่พิมพ์

3.2.3.3 การเท (Pouring)

สำหรับการเทหรือใส่สารละลายที่เตรียมมาเป็นอย่างดีแล้วเข้าไปในแม่พิมพ์ ปริมาณสารละลายที่จะเทลงไปในแม่พิมพ์นั้น จะขึ้นอยู่กับขนาดและความหนาของแผ่น การเทสารละลายลงในแม่พิมพ์นั้นจะต้องทำด้วยความแม่นยำ หากขาดหรือเกินกว่าปริมาณที่คำนวณไว้ก็จะส่งผลต่อความหนาของแผ่นเมื่อแข็งตัว

3.2.3.4 การไล่อากาศและการวัดความหนา (Air expelling and gauging)

เมื่อเทสารละลายลงไปในแม่พิมพ์ซึ่งอยู่ในลักษณะตั้งเอียงได้ตามปริมาณที่ต้องการแล้ว จึงมีการจัดเก็บประเก็น PVC ด้านที่เทสารละลายลงไปให้เข้าในตำแหน่งที่ต้องการ แล้วจึงติด clamp ให้ครบถ้วนก่อนจะวางแม่พิมพ์ให้อยู่ในแนวนอน หลังจากนั้นจึงใช้เหล็กแหลมสอดเข้าไปในระหว่างกระจกกับประเก็น PVC เพื่อไล่อากาศที่อยู่ในกระจกออกมา เพื่อให้สารละลายกระจายได้เต็มแผ่น แล้วจึงจัด clamp ให้เพียงพอเพื่อป้องกันไม่ให้อากาศรั่วกลับเข้าไปในแผ่นได้อีก ในขณะที่ทำการไล่อากาศออกนั้น อาจใช้เครื่องกดหรือรีดไปบนกระจกเพื่อให้อากาศไหลออกได้เร็วขึ้นก็ได้ แต่มีข้อแม้ว่าการกดหรือยืดจะต้องกระทำต่อพื้นที่ผิวหลังกระจกอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งบริเวณกึ่งกลางแผ่น เพราะเมื่อไล่อากาศออกหมดแล้วสภาพภายในกระจกจะกลายเป็นสุญญากาศ ถ้ากดจนกระจกแอ่นตรงกลางแล้ว จะไม่สามารถทำให้ได้ระนาบตามเดิมได้ เพราะแรงกดจากอากาศภายนอกจะกดเอาไว้ ซึ่งทำให้ความหนาบบริเวณกลางแผ่นลดลง



ภาพที่ 3.20 แม่พิมพ์ที่บรรจุสารละลายยูเรเนียม

3.2.3.5 การพอลิเมอไรเซชันในอ่างน้ำร้อน (Polymerization in hot water bath)

เมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์จะแข็งตัวเป็นแผ่นได้ โดยผ่านกระบวนการ polymerization ดังนั้นหลังจากเทสารละลายลงในกระจกแม่พิมพ์เรียบร้อยแล้ว จึงต้องนำกระจก

ไปแช่น้ำร้อนอุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เพื่อเป็นการกระตุ้นให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามน้ำจะเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิภายในแผ่นไม่เกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง โดยระยะเวลาในขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่น เช่น แผ่นหนา 1.5-3.0 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 3 ชั่วโมง แผ่นหนา 10 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง แผ่นหนา 30 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 10-12 ชั่วโมง และแผ่นหนา 60 มิลลิเมตร ใช้เวลาประมาณ 72 ชั่วโมง เป็นต้น เนื่องจากแผ่นที่มีความหนามาก จะต้องพยายามควบคุมความร้อนจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นให้เกิดอย่างช้า ๆ เพราะถ้าไม่สามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้จะก่อให้เกิดความเสียหายแก่แผ่นที่ผลิตในทันที

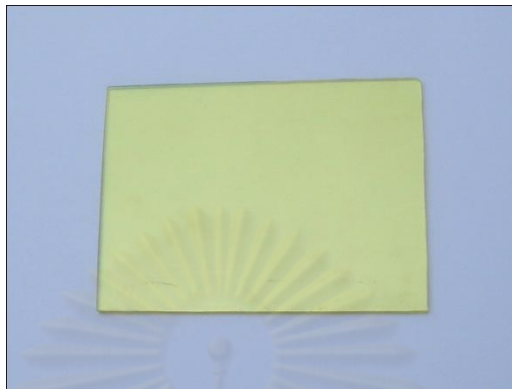
3.2.3.6 การอบ (annealing)

แผ่นที่ผ่านกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน (Polymerization) แล้วนั้น ปกติจะไม่แข็งถึง 100% ตามค่าทางทฤษฎี ทั้งนี้เนื่องจากยังคงมีเมทิลเมทาคริเลทที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ ทำให้เกิดความเค้นตกค้าง (residual stress) ในพลาสติก ซึ่งอาจทำให้แผ่นพลาสติกบิดงอ หรือเสียรูปร่างในภายหลังได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการอบ ซึ่งทำได้โดยการอบหรือทิ้งไว้ที่อุณหภูมิสูงขึ้น โดยจะใช้วิธีการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทั้งนี้แผ่นที่ถูกนำขึ้นมาจากบ่อน้ำร้อนก่อนเข้าอบในลมร้อนจะมีความแข็งประมาณ 85-90%

3.2.3.7 การทำให้เย็น (cooling)

เมื่อนำสารละลายเทไสในกระจกแม่พิมพ์ซึ่งขณะนั้นยังมีสภาพเป็นของเหลว จนเมื่อแข็งสมบูรณ์แบบแล้วผิวหน้าของพลาสติกและกระจกจะยึดติดกันจนจะเป็นเนื้อเดียวกัน พลาสติกสามารถขยายตัวหรือหดตัวตามกระจกแม่พิมพ์ได้ตลอดเวลา ดังนั้นเมื่อนำเอาออกจากเตาอบจะต้องทำให้เย็นตัวลง ซึ่งกระจกจะเย็นตัวลงก่อน ส่วนพลาสติกที่อยู่ภายในจะยังคงร้อนอยู่ ดังนั้นการเย็นตัวของแผ่นอะคริลิกจะต้องได้รับการดูแลอย่างดี คือต้องทำให้เย็นอย่างสม่ำเสมอ เพราะถ้าทำไม่ดีแล้วแผ่นก็จะเกิดการหดตัวไม่เท่ากัน ส่วนที่เย็นตัวก่อนก็จะหดตัวก่อน ส่วนที่ยังคงร้อนก็จะยังขยายตัวอยู่ ทำให้เกิดการฉีกหรือฉีกตัวออกตามแนวของแรงที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าเกิดบริเวณริมกระจกมีรอยแผล หรือมีฟองอากาศบริเวณริมประเก็น PVC หรือ PVC ไม่เลื่อนไหลตามแรงหดตัวเพราะยึดติดกับผิวหน้ากระจก และมีความแตกต่างของความหนาของแผ่นในบริเวณนั้น จุดอ่อนเหล่านี้จะเป็นสาเหตุให้แผ่นอะคริลิกที่นำออกจากเตาอบแตกทั้งชิ้น ดังนั้นการทำให้เย็นจึงเป็นเรื่องสำคัญอย่างหนึ่งในการทำให้แผ่นที่นำออกมาสวยงามหรือเสียหาย

เมื่อสิ้นสุดกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้แล้ว จะได้แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตาเซกซ์ไฮเดรทที่สมบูรณ์ดังแสดงในภาพที่ 3.21



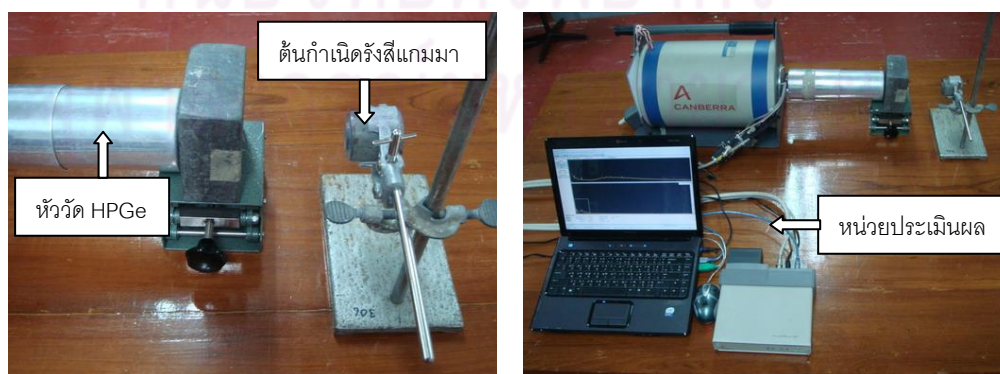
ภาพที่ 3.21 แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตาเซกซ์ไฮเดรทที่สมบูรณ์

3.3 การวิเคราะห์ข้อมูล

3.3.1 การทดสอบการลดทอนรังสี

นำแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตาเซกซ์ไฮเดรทไปทดสอบการลดทอนรังสีโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา ($Am-241$, $Co-57$, $Eu-152$ และ $I-131$) ร่วมกับระบบการวัดรังสีดังนี้

3.3.1.1 จัดระบบวัดดังภาพที่ 3.22 โดยวางต้นกำเนิดรังสี $Am-241$ หน้าหัววัด High purity germanium (HPGe) และทำการนับวัดจนกระทั่งเกิดสเปกตรัมพลังงาน แล้วสร้าง ROI (Region of Interest) ให้ครอบคลุม peak ที่พลังงาน 60 keV บันทึกข้อมูลพื้นที่ใต้ peak ไว้เป็นค่า I_0



ภาพที่ 3.22 ระบบวัดรังสีโดยใช้หัววัด HPGe Detector

3.3.1.2 นำแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทไปทดสอบการลดทอนรังสี โดยวางแผ่น อะคริลิกไว้ระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับหัววัด แล้วนับวัดรังสีโดยใช้เวลาเท่ากับการนับวัดรังสีของ I_0 แล้วบันทึกข้อมูลพื้นที่ใต้ peak เป็นค่า I

3.3.1.3 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.3.1.2 โดยเพิ่มความหนาของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทขึ้นตามลำดับ

3.3.1.4 นำต้นกำเนิดรังสี และแผ่นอะคริลิกออก แล้วนับวัดรังสีโดยใช้เวลาเท่ากับการนับวัดรังสีของ I_0 และ I แล้วบันทึกพื้นที่ใต้ peak ไว้เป็นค่า background

3.3.1.4 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.3.1.1- 3.3.1.4 ตามลำดับ โดยเปลี่ยนต้นกำเนิดรังสีแกมมา เป็น Co-59, Eu-152 และ I-131 ตามลำดับ และทำการทดสอบการลดทอนรังสีของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท แล้วบันทึกที่พลังงานพื้นที่ใต้ peak ที่พลังงาน 122, 136, 244, 284 และ 364 keV ตามลำดับ

3.3.2 การวัดการส่องผ่านของแสง

3.3.2.1 นำอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท ความหนา 3 มิลลิเมตร ไปวัดการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องวัดการส่องผ่านของแสงของ GretagMacbethTH

3.3.2.2 บันทึกผลการทดลองและหาค่าเฉลี่ยการส่องผ่านของแสงของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท

3.3.3 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท

3.3.3.1 นำอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ขึ้นรูปได้ขนาด 14 เซนติเมตร x 10.5 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ไปวัดปริมาณรังสีที่แผ่ออกมาจากแผ่นอะคริลิกด้วยหัววัดไซเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ที่ระยะประชิดกับแผ่นอะคริลิกแล้วบันทึกผลการทดลอง

3.3.3.2 ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3.3.3.1 โดยเพิ่มระยะห่างระหว่างแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทกับหัววัดเป็นระยะ 10, 20, 30 และ 40 เซนติเมตร แล้วบันทึกผลการทดลอง

3.3.3.3 วัดปริมาณรังสีบริเวณเดิมที่ทำการทดลองโดยไม่มีอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท แล้วบันทึกไว้เป็นค่า background

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

4.1 ผลการวิเคราะห์

4.1.1 การหาสัดส่วนของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สามารถผสมอยู่ในอะคริลิกได้ในปริมาณที่มากที่สุด

เมื่อผสมเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ (Methyl methacrylate monomer) และ ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท (Uranyl nitrate hexahydrate) ที่สังเคราะห์ได้ด้วยสัดส่วนตั้งแต่ 10-50% โดยน้ำหนักของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท โดยผสมสารละลายที่อุณหภูมิห้องด้วย เครื่องปั่น (Stirrer) ได้ผลการทดลองดังนี้

ตารางที่ 4.1 การหาสัดส่วนของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่สามารถผสมอยู่ในอะคริลิก

Methyl methacrylate : Uranyl nitrate hexahydrate	ผลการทดลอง
90:10	ไม่มีตะกอน
80:20	ไม่มีตะกอน
70:30	ไม่มีตะกอน
60:40	ไม่มีตะกอน
50:50	มีตะกอน

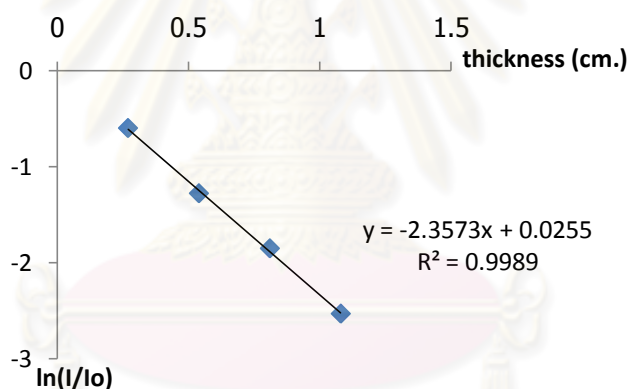
จากการทดลอง พบว่าที่สัดส่วน 50:50 ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทไม่สามารถละลายในเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ได้หมด ขณะที่สัดส่วน 60:40 70:30 80:20 และ 90:10 ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทสามารถละลายในเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ได้ทั้งหมด จึงทำการหา สัดส่วนอย่างละเอียดในช่วง 40-50% โดยน้ำหนักของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทอีกครั้ง จากการ ทดลองพบว่าสามารถละลายยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทในเมทิลเมทาคริเลตโมโนเมอร์ได้ใน ปริมาณสูงสุดถึง 45% โดยน้ำหนัก

4.1.2 การทดสอบการลดทอนรังสี

จากการทดลองตามข้อ 3.3.1 ได้ผลการทดลองการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Am-241(60 keV), Co-57 (122 keV, 136 keV), Eu-152 (244 keV) และ I-131 (284 keV, 364 keV) แสดงดังตารางที่ 4.2-4.7

ตารางที่ 4.2 ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Am-241 พลังงาน 60 keV

Acrylic thickness	I_0	I	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	%attenuation	lead equivalent (mm.)
0.27 cm.	62795	34447	0.5485	-0.6004	45.1437	0.10545
0.54 cm.	62795	17475	0.2782	-1.2791	72.1713	0.22464
0.81 cm.	62795	9854	0.1569	-1.8519	84.3076	0.32526
1.08 cm.	62795	4997	0.0795	-2.5310	92.0423	0.44452



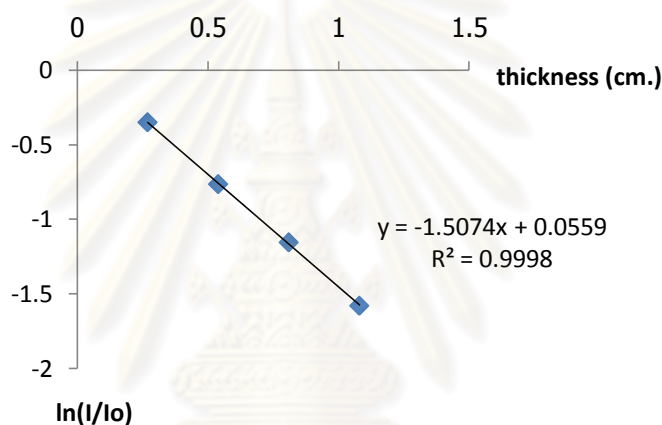
ภาพที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน

จากการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Am-241 พลังงาน 60 keV กับชิ้นงานที่มีความหนา 2.7, 5.4, 8.1 และ 10.8 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จะสามารถลดทอนรังสีได้มากขึ้น โดยที่ความหนา 0.27 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีแกมมา ได้ 45.14% และเมื่อแผ่นอะคริลิกมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 1.08 เซนติเมตร จะสามารถลดทอนรังสีรังสีแกมมาได้ถึง 92.04%

จากภาพที่ 4.1 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) ของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ได้เท่ากับ 2.3573 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.9989$

ตารางที่ 4.3 ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-57 พลังงาน 122 keV

Acrylic thickness	I_0	I	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	%attenuation	lead equivalent (mm.)
0.27 cm.	78053	54965	0.7042	-0.3506	29.5799	0.07743
0.54 cm.	78053	36343	0.4656	-0.7643	53.4380	0.16878
0.81 cm.	78053	24621	0.3154	-1.1537	68.4560	0.25477
1.08 cm.	78053	16117	0.2064	-1.5775	79.3512	0.34833



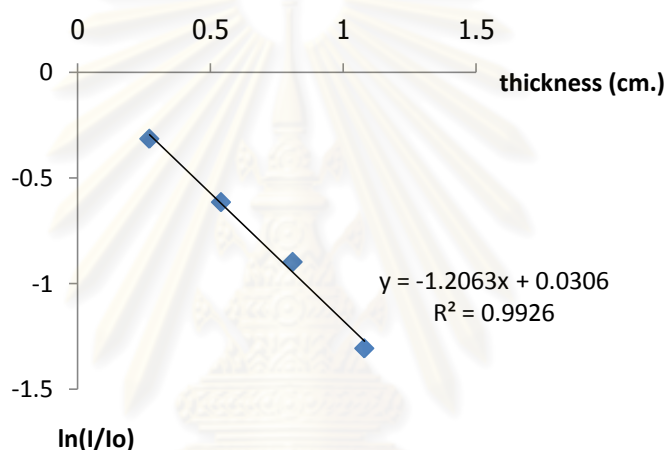
ภาพที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมาพลังงาน 122 keV ที่ผ่านชิ้นงาน [$\ln(I/I_0)$] และความหนาของชิ้นงาน

จากการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Co-57 พลังงาน 122 keV กับชิ้นงานที่มีความหนา 2.7, 5.4, 8.1 และ 10.8 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จะสามารถลดทอนรังสีได้มากขึ้น โดยที่ความหนา 0.27 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีแกมมา ได้ 29.54% และเมื่อแผ่นอะคริลิกมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 1.08 เซนติเมตร จะสามารถลดทอนรังสีรังสีแกมมาได้ถึง 74.99%

จากภาพที่ 4.2 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) ของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 122 keV ได้เท่ากับ 1.5074 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.9998$

ตารางที่ 4.4 ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Co-57 พลังงาน 136 keV

Acrylic thickness	I_0	I	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	%attenuation	lead equivalent (mm.)
0.27 cm.	10237	7470	0.7297	-0.3151	27.0294	0.09250
0.54 cm.	10237	5535	0.5406	-0.6149	45.9314	0.18052
0.81 cm.	10237	4171	0.4074	-0.8978	59.2556	0.26358
1.08 cm.	10237	2772	0.2707	-1.3064	72.9217	0.38353



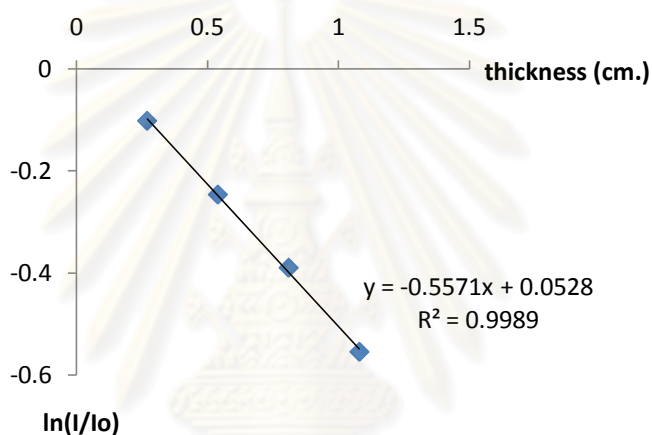
ภาพที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมาพลังงาน 136 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน

จากการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Co-57 พลังงาน 136 keV กับชิ้นงานที่มีความหนา 2.7, 5.4, 8.1 และ 10.8 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จะสามารถลดทอนรังสีได้มากขึ้น โดยที่ความหนา 0.27 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีแกมมา ได้ 27.03% และเมื่อแผ่นอะคริลิกมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 1.08 เซนติเมตร จะสามารถลดทอนรังสีรังสีแกมมาได้ถึง 70.97%

จากภาพที่ 4.3 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) ของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 136 keV ได้เท่ากับ 1.2063 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.9926$

ตารางที่ 4.5 ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี Eu-152 พลังงาน 244 keV

Acrylic thickness	I_0	I	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	%attenuation	lead equivalent (mm.)
0.27 cm.	9991	9026	0.9034	-0.1015	9.65869	0.12161
0.54 cm.	9991	7809	0.7816	-0.2464	21.83965	0.29502
0.81 cm.	9991	6764	0.6770	-0.3900	32.29906	0.46702
1.08 cm.	9991	5735	0.5740	-0.5550	42.59833	0.66461



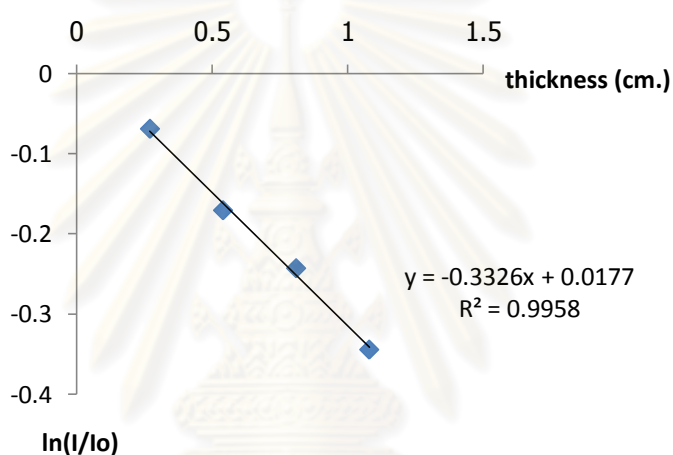
ภาพที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมาพลังงาน 244 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน

จากการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Eu-152 พลังงาน 244 keV กับชิ้นงานที่มีความหนา 2.7, 5.4, 8.1 และ 10.8 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จะสามารถลดทอนรังสีได้มากขึ้น โดยที่ความหนา 0.27 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีแกมมา ได้ 9.65% และเมื่อแผ่นอะคริลิกมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 1.08 เซนติเมตร จะสามารถลดทอนรังสีรังสีแกมมาได้ 42.59%

จากภาพที่ 4.4 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) ของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 244 keV ได้เท่ากับ 0.5571 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.998$

ตารางที่ 4.6 ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี I-131 พลังงาน 284 keV

Acrylic thickness	I_0	I	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	%attenuation	lead equivalent (mm.)
0.27 cm.	14410	13448	0.9332	-0.0690	6.6759	0.12225
0.54 cm.	14410	12149	0.8430	-0.1706	15.6904	0.30200
0.81 cm.	14410	11302	0.7843	-0.2429	21.5683	0.42987
1.08 cm.	14410	10212	0.7086	-0.3443	29.1325	0.60932



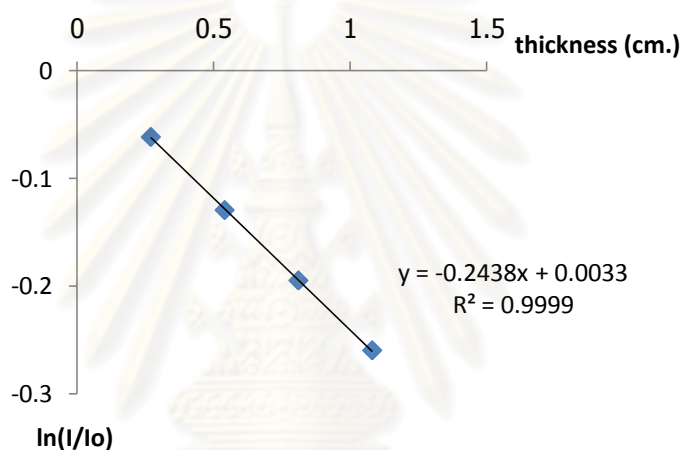
ภาพที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมาพลังงาน 284 keV ที่ผ่านชิ้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชิ้นงาน

จากการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี I-131 พลังงาน 284 keV กับชิ้นงานที่มีความหนา 2.7, 5.4, 8.1 และ 10.8 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความหนาของชิ้นงานเพิ่มมากขึ้น จะสามารถลดทอนรังสีได้มากขึ้น โดยที่ความหนา 0.27 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีแกมมา ได้ 6.67% และเมื่อแผ่นอะคริลิกมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 1.08 เซนติเมตร จะสามารถลดทอนรังสีรังสีแกมมาได้ 29.13%

จากภาพที่ 4.5 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) ของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 284 keV ได้เท่ากับ 0.3326 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.9958$

ตารางที่ 4.7 ผลการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสี I-131 พลังงาน 364 keV

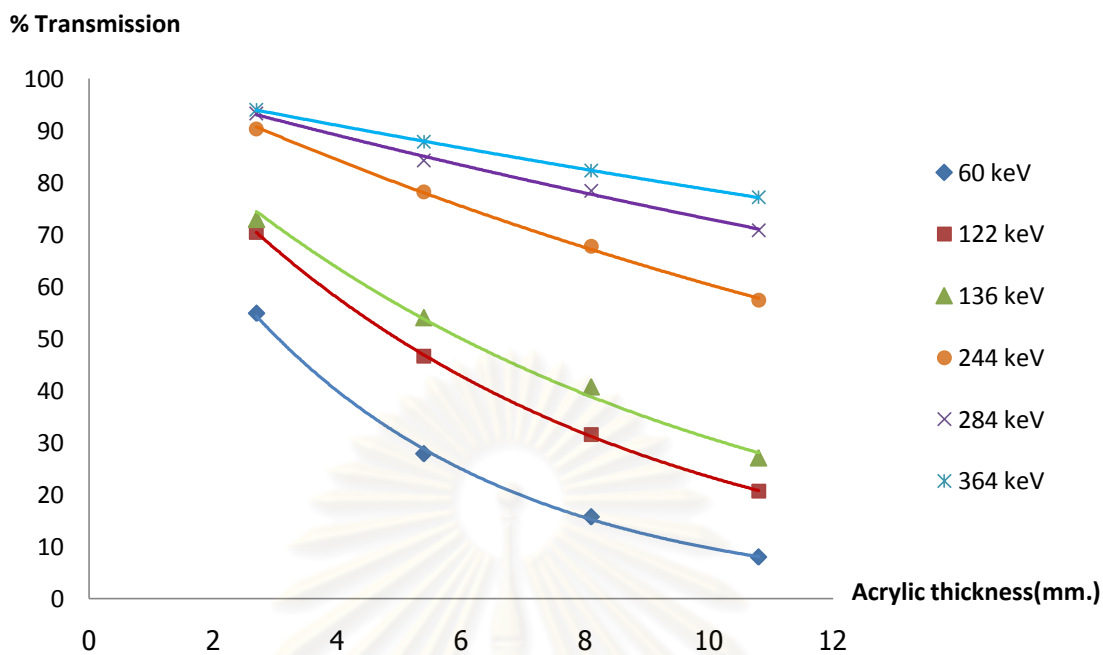
Acrylic thickness	I_0	I	I/I_0	$\ln(I/I_0)$	%attenuation	lead equivalent (mm.)
0.27 cm.	168602	158524	0.9402	-0.0616	5.9773	0.18500
0.54 cm.	168602	148142	0.8786	-0.1293	12.1350	0.38831
0.81 cm.	168602	138789	0.8231	-0.1945	17.6824	0.58406
1.08 cm.	168602	130090	0.7715	-0.2593	22.8419	0.77835



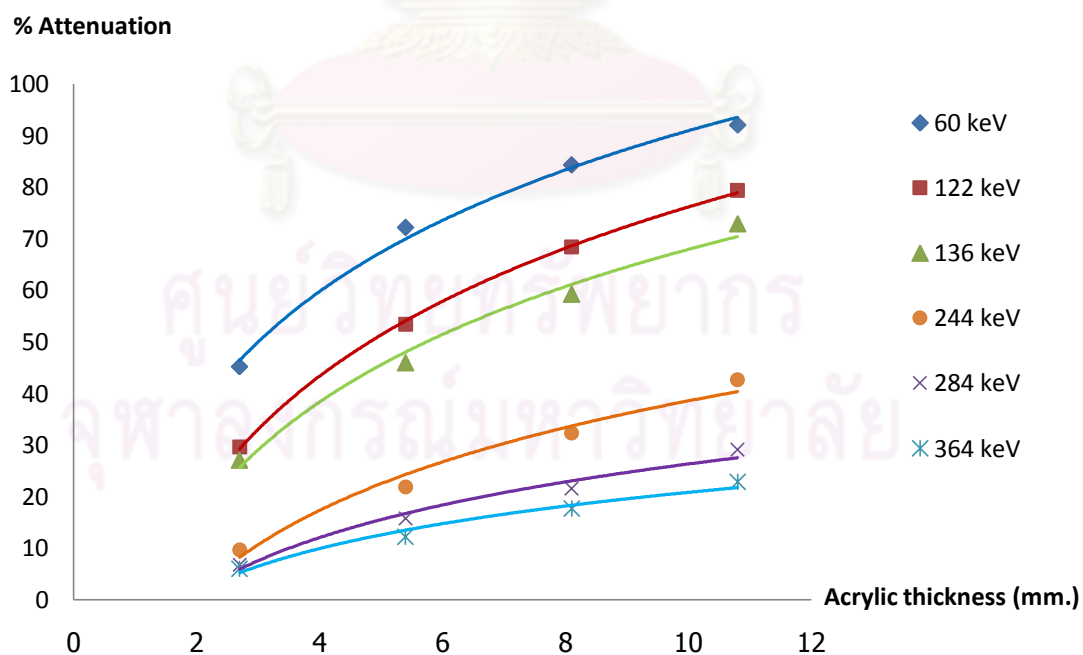
ภาพที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมาพลังงาน 364 keV ที่ผ่านชั้นงาน $[\ln(I/I_0)]$ และความหนาของชั้นงาน

จากการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี I-131 พลังงาน 364 keV กับชั้นงานที่มีความหนา 2.7, 5.4, 8.1 และ 10.8 มิลลิเมตร พบว่าเมื่อความหนาของชั้นงานเพิ่มมากขึ้น จะสามารถลดทอนรังสีได้มากขึ้น โดยที่ความหนา 0.27 เซนติเมตร สามารถลดทอนรังสีแกมมา ได้ 5.97% และเมื่อแผ่นอะคริลิกมีความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 1.08 เซนติเมตร จะสามารถลดทอนรังสีรังสีแกมมาได้ 22.84%

จากภาพที่ 4.6 สามารถหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) ของชั้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงาน 364 keV ได้เท่ากับ 0.2438 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.9999$



ภาพที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิก (มิลลิเมตร) กับเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของรังสีแกมมา



ภาพที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิก (มิลลิเมตร) กับเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีแกมมา

จากภาพที่ 4.7 เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิก (มิลลิเมตร) กับเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของรังสีแกมมา และภาพที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นอะคริลิก (มิลลิเมตร) กับเปอร์เซ็นต์การลดทอนรังสีแกมมา พบว่า เมื่อความหนาของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทเพิ่มมากขึ้น เปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาจะลดลง หรือหมายความว่าความสามารถในการลดทอนรังสีได้มากขึ้นในทุก ๆ พลังงาน โดยที่แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรททุก ๆ ความหนาจะสามารถลดทอนรังสีแกมมาที่พลังงานต่ำได้ดี และความสามารถในการลดทอนรังสีจะลดลงเมื่อใช้กำบังรังสีที่มีพลังงานสูงขึ้น

4.1.3 การวัดการส่องผ่านของแสง

จากการทดลองตามข้อ 3.3.2 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ผลการทดสอบการส่องผ่านของแสง

ตัวอย่าง (3 mm.)	การส่องผ่านของแสง (%)
แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท แผ่นที่ 1	64.86
แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท แผ่นที่ 2	64.63
แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท แผ่นที่ 3	64.52
แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท แผ่นที่ 4	64.65
แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท แผ่นที่ 5	64.14
แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท แผ่นที่ 6	64.80

เมื่อนำแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทความหนา 3 มิลลิเมตร จำนวน 6 แผ่น ไปวัดการส่องผ่านของแสงด้วยเครื่องวัดการส่องผ่านของแสงของ GretagMacbethTH ผลการทดลองพบว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทความหนา 3 มิลลิเมตร มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงเท่ากับ 64.60 ± 0.23 %

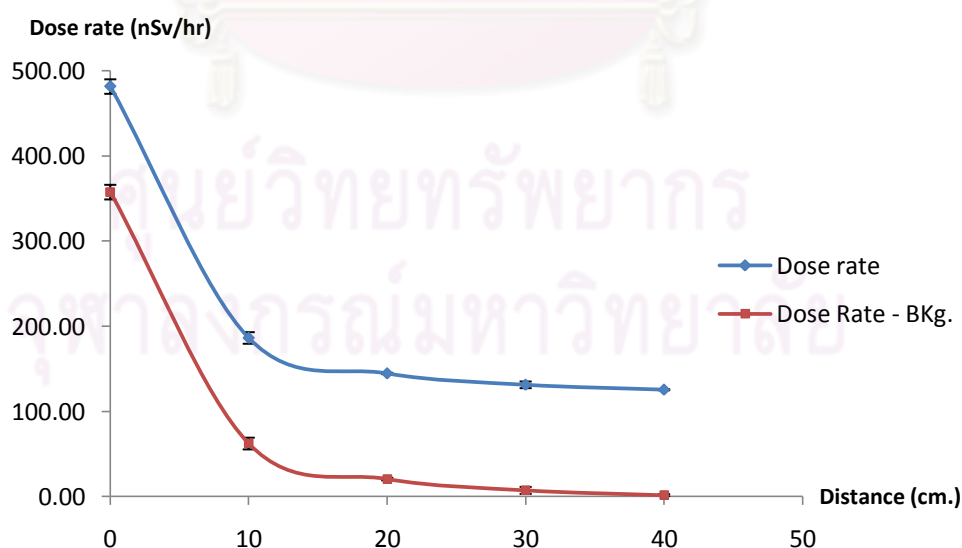
4.1.4 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท

จากการทดลองตามข้อ 3.3.3 ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 ผลการวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท

ระยะห่างจากแผ่นอะคริลิก cm.	ปริมาณรังสีที่ได้รับ (nSv/hr)	ปริมาณรังสี – Background (nSv/hr)
0	481.67±8.51	357.67±8.59
10	186.40±6.79	62.40±8.89
20	144.70±0.79	20.70±1.46
30	131.37±3.93	7.37±4.11
40	125.60±0.62	1.60±1.38
background	124.00±1.23	0±1.74

เมื่อนำแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท ขนาด 14 เซนติเมตร x 10.5 เซนติเมตรหนา 3 มิลลิเมตร ไปวัดปริมาณรังสีที่ระยะต่าง ๆ ด้วยหัววัดโซเดียมไอโอไดต์ (ทึลเลียม) ผลการทดลองพบว่าปริมาณรังสีจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มมากขึ้น และที่ระยะทางประมาณ 20 เซนติเมตร จะได้รับปริมาณรังสีเท่ากับค่า background



ภาพที่ 4.9 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ระยะต่าง ๆ

4.2 ผลการเปรียบเทียบ

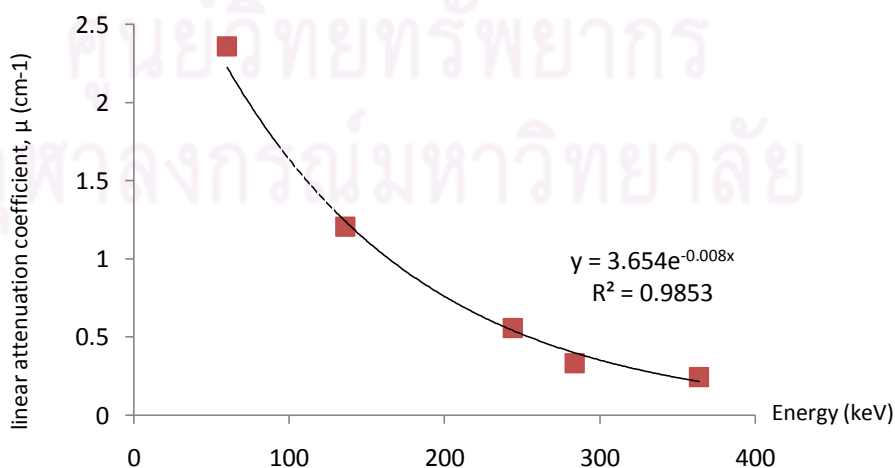
4.2.1 การทดสอบการลดทอนรังสี

จากการทดสอบการลดทอนรังสี ได้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient, μ) ของชิ้นงานที่พลังงาน 60, 122, 136, 244, 284 และ 364 keV แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของชิ้นงานที่พลังงาน 60, 122, 136, 244, 284 และ 364 keV

Energy (keV)	Linear attenuation coefficient, μ (cm ⁻¹)
60	2.3573
122	1.5074
136	1.2063
244	0.5571
284	0.3326
364	0.2438

สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ [17] เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นที่พลังงาน 150 keV แล้วนำไปหาค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของชิ้นงาน เพื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอะคริลิกตะกั่วที่มีขายในท้องตลาดของบริษัท Wardray Premise [18]



ภาพที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ

เนื่องจากที่พลังงาน 115.6 keV เป็นช่วงของค่า K absorption edge ของยูเรเนียมซึ่งเป็นธาตุหลักของแผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้น มีค่าใกล้เคียงกับพลังงาน 122 keV ของ Co-57 ดังนั้นจึงไม่นำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นที่พลังงานนี้มาสร้างกราฟ โดยจะสร้างเส้นแนวโน้มของกราฟโดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นที่พลังงาน 60, 136, 244, 284 และ 364 keV ดังภาพที่ 4.10 และได้ค่าความสัมพันธ์ของสมการคือ $y = 3.654e^{-0.008x}$ ที่ค่า $R^2 = 0.9853$

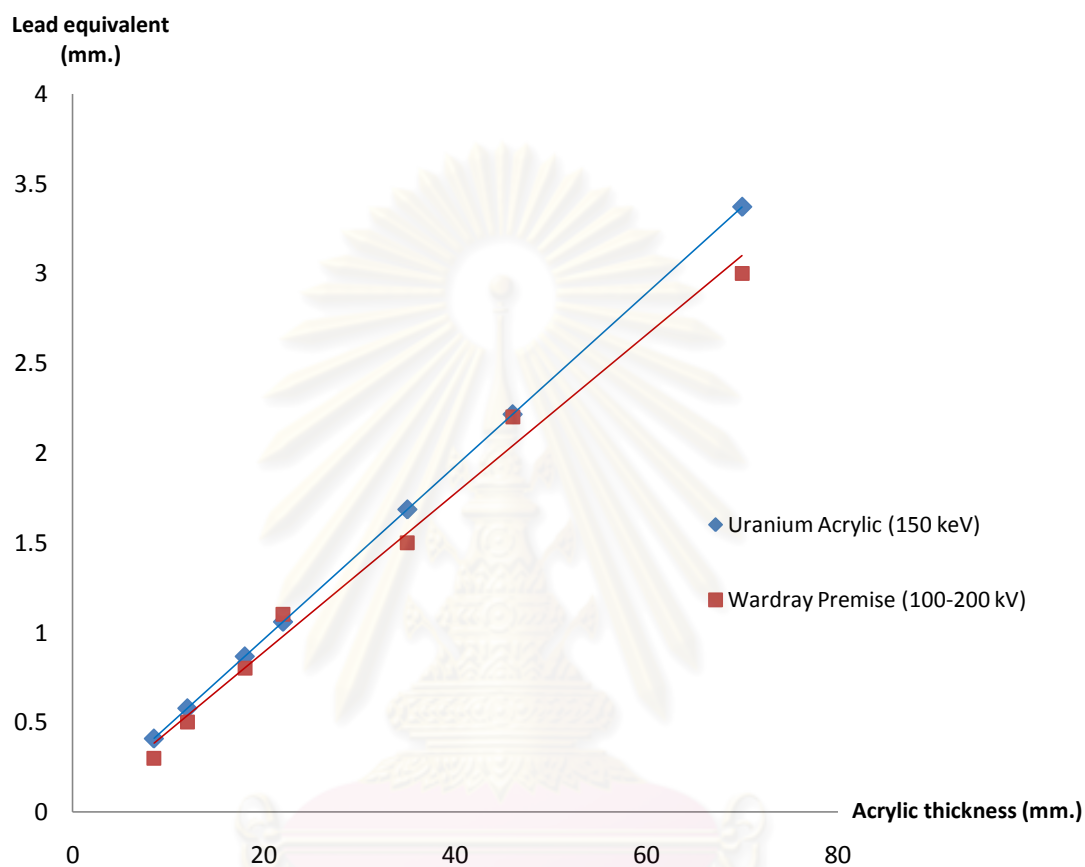
อ่านค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นของรังสีแกมมาพลังงาน 150 keV ซึ่งเป็นค่ากึ่งกลางของช่วงพลังงานเอกซเรย์ 100-200 kV ที่บริษัท Wardray Premise ใช้กำหนดหาค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของแผ่นอะคริลิก มาหาค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นมา เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของแผ่นอะคริลิกทั้งสอง ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.11

ตารางที่ 4.11 การเปรียบเทียบค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของชิ้นงานที่ผลิตขึ้นกับค่าของบริษัท Wardray Premise

Thickness (mm)	Lead equivalent (mm)		%Difference
	Uranium acrylic (150keV)*	Wardray Premise (100-200 kV) [18]	
8.5	0.409	0.3	36.533
12	0.578	0.5	15.652
18	0.867	0.8	8.424
22	1.060	1.1	-3.623
35	1.687	1.5	12.439
46	2.217	2.2	0.757
70	3.373	3.0	12.439

* ค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของแผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นสำหรับพลังงาน 150 keV ได้มาจาก $(\mu \text{ ของชิ้นงาน} \times \text{ความหนาของชิ้นงาน}) / \mu \text{ ของตะกั่ว}$ [19]

จากตารางที่ 4.11 แสดงให้เห็นว่า โดยรวมแล้วแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเร-
 นิลในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตขึ้น มีค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่ว มากกว่าของบริษัท Wardray
 Premise



ภาพที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความหนาของแผ่นอะคริลิกและความหนาเทียบเท่าตะกั่ว

ศูนย์วิทยทรัพยากร
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.2.2 การวัดการส่องผ่านของแสง

ทำการเปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทกับแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วของบริษัท China.CN [20]

ตารางที่ 4.12 การเปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงของแผ่นอะคริลิก

ความหนาของแผ่นอะคริลิก (mm.)	การส่องผ่านของแสง (%)	
	แผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้น	China.CN [20]
3	64.60±0.23	≥ 85
6		≥ 80
8		≥ 80
12		≥ 75

เมื่อนำแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทความหนา 3 มิลลิเมตร ไปเปรียบเทียบการส่องผ่านของแสงกับแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วของบริษัท China.CN พบว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตขึ้นได้มีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงน้อยกว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วของบริษัท China.CN เป็นอย่างมากถึง 21%

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การทดสอบการลดทอนรังสี

จากการทดสอบการลดทอนรังสี โดยการนำแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทไปทดสอบการลดทอนรังสีโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมา (Am-241, Co-59, Eu-152 และ I-131) ร่วมกับระบบการวัดรังสีโดยใช้หัววัด High purity germanium (HPGe) พบว่าเมื่อความหนาของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทเพิ่มมากขึ้นเปอร์เซ็นต์การทะลุผ่านของรังสีแกมมาจะลดลง หรือหมายความว่าความสามารถในการลดทอนรังสีเพิ่มมากขึ้นในทุก ๆ พลังงาน โดยที่แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรททุก ๆ ความหนาจะสามารถลดทอนรังสีแกมมาที่พลังงานต่ำได้ดีและความสามารถในการลดทอนรังสีจะลดลงเมื่อใช้กำบังรังสีที่มีพลังงานสูงขึ้น โดยที่พลังงาน 60 keV ที่ความหนา 2.7 มิลลิเมตรสามารถลดทอนรังสีได้ 45% และเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 10.8 มิลลิเมตร จะสามารถลดทอนรังสีได้ถึง 92 % ในขณะที่พลังงาน 364 keV ที่ความหนา 2.7 มิลลิเมตร สามารถลดทอนรังสีได้เพียง 5.9% และเมื่อความหนาเพิ่มขึ้นเป็น 10.8 มิลลิเมตร ก็จะสามารถลดทอนรังสีได้เพียง 22.8% เท่านั้น

เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (linear attenuation coefficient, μ) ของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ โดยการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าลอการิทึมฐานธรรมชาติของสัดส่วนรังสีแกมมาพลังงานต่าง ๆ ที่ผ่านชิ้นงาน $\ln(I/I_0)$ และความหนาของชิ้นงาน พบว่าสำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นสูงกว่าค่าที่รังสีแกมมาพลังงานสูง โดยที่พลังงาน 60 keV แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตได้มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นเท่ากับ 2.3573 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.9989$ ในขณะที่พลังงาน 364 keV แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตได้มีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นเท่ากับ 0.2438 เซนติเมตร⁻¹ ที่ค่า $R^2 = 0.9999$

เมื่อนำค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น ของชิ้นงานที่พลังงาน 60, 136, 244, 284 และ 364 keV มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ เพื่อหาค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วของชิ้นงานเพื่อเปรียบเทียบกับแผ่นอะคริลิกตะกั่วของบริษัท Wardray Premise ซึ่งระบุช่วงพลังงานเอกซเรย์ที่ใช้ทดสอบที่ 100-200 kV โดยเลือกรังสีแกมมาที่พลังงาน 150 keV มาพิจารณา

เปรียบเทียบพบว่า แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตขึ้น มีค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วมากกว่าแผ่นอะคริลิกที่มีขายอยู่ทั่วไปของบริษัท Wardray Premise

5.1.2 การส่องผ่านของแสง

จากการทดสอบหาค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงโดยเปรียบเทียบระหว่างแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตขึ้นได้กับแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วของบริษัท China.CN จะเห็นว่าที่ ความหนา 3 มิลลิเมตรของแผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นได้มีค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงน้อยกว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วของบริษัท China.CN ที่ทุก ๆ ความหนา จึงสามารถกล่าวได้ว่าที่ทุก ๆ ความหนาแผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นได้นั้นจะมีเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านของแสงน้อยกว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่มีขายอยู่ทั่วไป

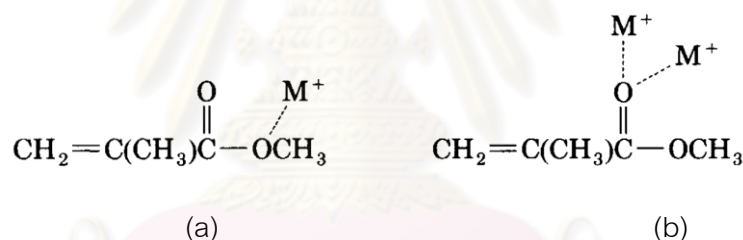
5.1.3 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท

เมื่อนำแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท ขนาด 14x10.5 เซนติเมตร หนา 3 มิลลิเมตร ไปวัดปริมาณรังสีที่ระยะห่างจากแผ่นอะคริลิก 0, 10, 20, 30 และ 40 เซนติเมตร ด้วยหัววัดซีเดียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ผลการทดลองพบว่าที่ ปริมาณรังสีจะลดลงเมื่อระยะห่างจะแผ่นอะคริลิกเพิ่มขึ้น และที่ระยะ 20 เซนติเมตร จะได้รับปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกเท่ากับปริมาณรังสีในสิ่งแวดล้อม

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

การขึ้นรูปแผ่นอะคริลิกโดยการผสมสารประกอบโลหะลงไปในเมทิลเมทาคริเลท (MMA) แล้วทำให้เกิดการพอลิเมอไรเซชัน ทำได้โดยการเติมสารเริ่มปฏิกิริยา ลงไปในสารตั้งต้นทั้งสอง จากนั้นเทสารละลายที่ได้ใส่ในกระจกแม่พิมพ์แล้วนำไปต้มในอ่างน้ำร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3-5 ชั่วโมง เพื่อให้สารตั้งต้นเกิดการพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งไม่สามารถใช้ลมร้อนแทนอ่างน้ำร้อนได้ เนื่องจากการควบคุมอุณหภูมิที่ 60 องศาเซลเซียสนั้น น้ำจะเป็นตัวถ่ายเทความร้อนให้แก่แผ่นอะคริลิก ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นอุณหภูมิภายในแผ่นจะพุ่งสูงขึ้นถึงจุดเดือดที่ 102 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ น้ำจะเป็นตัวควบคุมอุณหภูมิภายในแผ่นไม่ให้เกิน 60 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาเป็นไปอย่างช้า ๆ และต่อเนื่อง

สารประกอบโลหะยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผสมลงไปในเมทิลเมทาคริเลทนั้น ขณะที่เกิดการพอลิเมอไรเซชัน สารประกอบโลหะจะสร้างพันธะกับอะตอมออกซิเจนของคาร์บอนิลออกซิเจน (Carbonyl oxygen) (5.1a) หรือเมทิลออกซิเจน (Methoxy oxygen) (5.1b) ของเมทิลเมทาคริเลท ดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 การสร้างพันธะของสารประกอบโลหะกับเมทิลเมทาคริเลท

อย่างไรก็ตามแผ่นที่ถูกนำขึ้นมาจากอ่างน้ำร้อนปกติจะไม่แข็งถึง 100% ตามค่าทางทฤษฎี (มีความแข็งประมาณ 85-90%) เนื่องจากยังคงมีเมทิลเมทาคริเลท ที่ยังไม่ทำปฏิกิริยาหลงเหลืออยู่ ทำให้เกิดความเค้นตึงค้ำ ในแผ่นอะคริลิกซึ่งอาจทำให้แผ่นอะคริลิกบิดงอ หรือเสียรูปร่างในภายหลังได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการอบที่อุณหภูมิสูง โดยใช้วิธีการอบด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เนื่องจากเมื่อเอาสารละลายเทใส่ในกระจกแม่พิมพ์ซึ่งขณะนั้นยังมีสภาพเป็นของเหลว ผิวหน้าของพลาสติกและกระจกจะยึดติดแทบจะเป็นเนื้อเดียวกัน พลาสติกสามารถที่จะขยายตัวหรือหดตัวตามกระจกแม่พิมพ์ได้ตลอดเวลา เมื่อทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันจนพลาสติกแข็งตัว ตัวพลาสติกเองก็จะหดตัวเพราะการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพของตัวเองประมาณ 20% จากสภาพของเหลวมาเป็นของแข็ง และเมื่ออะคริลิกผ่านการอบจนแข็งสมบูรณ์แบบแล้วเมื่อเอาออกจากเตาอบจะต้องทำให้เย็นตัวลง ซึ่ง

กระจกจะเป็นตัวล่งก่อน ส่วนพลาสติกที่อยู่ภายในจะยังคงร้อนอยู่ เนื่องจากที่ค่าความยืดและหดตัว (modulus) ต่างกันประมาณ 1:12 จึงทำให้ผิวหน้าของพลาสติกค่อย ๆ หลุดร่อนจากหน้ากระจกแม่พิมพ์ได้

5.2.1 การลดทอนรังสีแกมมา

เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในตัวกลางใด ๆ บางส่วนของรังสีจะถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยา 3 ประเภทได้แก่ การดูดกลืนเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก ($\mu_{pe} \approx k_1 Z^n/E^3$) การกระเจิงจากปรากฏการณ์คอมป์ตัน ($\mu_c \approx k_2 Z/E$) และแฟร์โปรดักชัน ($\mu_{pp} \approx k_3 Z^2(E-1.02)$) โดยรังสีบางส่วนจะกระเจิงออกไป และบางส่วนผ่านออกมาได้ โดยความเข้มของรังสีแกมมาจะลดลงในลักษณะเอกซ์โพเนนเชียล

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient, μ) ของวัสดุกำบังรังสีใด ๆ เป็นผลรวมของสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีแกมมาอันเนื่องมาจากแต่ละอันตรกิริยา ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าเลขอะตอม (Z) ของวัสดุกำบังรังสีดังสมการที่ 13

$$\mu = k_1 (Z^n/E^3) + k_2 (Z/E) + k_3 Z^2(E-1.02) \quad (13)$$

เมื่อ k_1 , k_2 และ k_3 คือค่าคงที่ของอันตรกิริยาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก การกระเจิงจากปรากฏการณ์คอมป์ตันและแฟร์โปรดักชัน ตามลำดับ n มีค่าตั้งแต่ 3 สำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ ถึง 5 MeV สำหรับรังสีแกมมาพลังงานสูง Z คือค่าเลขอะตอมของตัวกลางใด ๆ และ E คือพลังงานของรังสีแกมมา ดังนั้นความสามารถในการลดทอนรังสีจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อใช้กำบังรังสีแกมมาพลังงานต่ำและวัสดุที่มีค่าเลขอะตอมสูง แผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นนี้มีส่วนผสมของยูเรเนียมซึ่งเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ($Z=92$) กว่าแผ่นอะคริลิกที่มีขายอยู่ทั่วไปที่มีส่วนผสมของตะกั่ว ($Z=82$) เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้น (μ) ของชิ้นงานสำหรับรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง ๆ จึงพบว่าสำหรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงเส้นสูงกว่ารังสีแกมมาพลังงานสูง

จากการทดสอบการลดทอนรังสี พบว่าเมื่อความหนาของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการลดทอนรังสีจะมีมากขึ้นสำหรับทุก ๆ พลังงาน และเมื่อนำค่าความหนาของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่มีความหนาต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลองมาเปรียบเทียบกับค่าความหนาของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่มีขายอยู่ในท้องตลาดจะพบว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเร-

นิลในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตขึ้นมีค่าความหนาเทียบเท่าตะกั่วมากกว่าแผ่นอะคริลิกที่มี ส่วนผสมของตะกั่วจากบริษัทต่าง ๆ ที่ทุกความหนาของแผ่นอะคริลิกแม้ว่ายูเรนิลในเตรทเฮกซะ- ไฮเดรทจะสามารถผสมเข้ากับเมทิลเมทาคริเลท ได้มากที่สุดที่ 45% หรือมียูเรเนียมอยู่เพียง 21.33% เท่านั้น ในขณะที่แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่มีขายอยู่ทั่วไปจะมีปริมาณตะกั่ว สูงถึง 30% แต่ด้วยคุณสมบัติของยูเรเนียมที่มีค่าความหนาแน่นและเลขอะตอมที่สูงกว่า จึงทำให้ แผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตขึ้นมาี้มีคุณสมบัติในการ ลดทอนปริมาณรังสีได้มากกว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของตะกั่วที่มีขายอยู่ทั่วไป

5.2.2 การส่องผ่านของแสง

ด้วยคุณสมบัติของยูเรนิลในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่มีลักษณะเป็นผลึกสีเหลือง- เขียว ดังนั้นเมื่อนำไปผสมกับเมทิลเมทาคริเลท (MMA) แล้วทำให้เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน เพื่อขึ้นรูปเป็นแผ่นอะคริลิก จึงทำให้แผ่นอะคริลิกที่ได้มีสีสีเหลือง-เขียวด้วย ส่งผลให้แผ่นอะคริลิก ที่ได้มีคุณสมบัติด้านการส่องผ่านของแสงลดลง

5.2.3 การวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรนิลในเตรทเฮกซะไฮเดรท

ด้วยคุณสมบัติของยูเรเนียมด้อยสมรรถนะที่นำมาผลิตเป็นยูเรนิลในเตรทเฮก- ซะไฮเดรท เป็นสารกัมมันตภาพรังสีอ่อน ๆ ดังนั้นเมื่อนำมาเป็นส่วนประกอบในแผ่นอะคริลิกจึง ส่งผลให้แผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นได้ปลดปล่อยรังสีออกมาด้วย ดังนั้นเมื่อนำไปใช้งานจึงควร หลีกเลี่ยงการใช้งานในระยะประชิด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

5.3 ข้อเสนอแนะ

แม้ว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทจะมีความสามารถในการลดทอนรังสีแกมมา แต่ก็มีข้อจำกัดหลายอย่างดังนี้

5.3.1 ความสามารถในการละลายของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท

เนื่องจากยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทซึ่งเป็นประกอบสารอนินทรีย์ (Inorganic) มีความสามารถในการละลายในเมทิลเมทาคริเลทได้มากที่สุด 45% หรือมียูเรเนียมอยู่เพียง 21.33% เท่านั้น โดยถ้ามีปริมาณยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทมากไปกว่านี้จะไม่สามารถละลายในเมทิลเมทาคริเลทได้ จึงเสนอให้มีการใช้สารประกอบยูเรเนียมอินทรีย์ (Organouranium) ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ เช่นเดียวกับเมทิลเมทาคริเลท ซึ่งจะมีความสามารถในการละลายในเมทิลเมทาคริเลทได้มากกว่า เช่นเดียวกันกับแผ่นอะคริลิกที่มีขายอยู่ทั่วไปที่ใช้สารประกอบตะกั่วอินทรีย์ (Organolead) ซึ่งสามารถผสมอยู่ในเมทิลเมทาคริเลท โดยมีสัดส่วนของตะกั่วอยู่ในแผ่นอะคริลิกสูงถึง 30%

5.3.2 การลดทอนรังสีและการปลดปล่อยรังสีของยูเรเนียมด้วยสมรรถนะ

ด้วยคุณสมบัติทางรังสีของยูเรเนียมด้วยสมรรถนะ ที่เป็นสารกัมมันตภาพรังสีอ่อน ๆ ดังนั้นแม้ว่าแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทจะสามารถลดทอนรังสีแกมมาได้สูงเนื่องจากยูเรเนียมเป็นธาตุที่มีค่าความหนาแน่นและเลขอะตอม (Z) สูง แต่ในตัวชิ้นงานเองก็จะปลดปล่อยรังสีออกมาด้วย ซึ่งถ้าต้องการสร้างวัสดุกำบังรังสีอะคริลิกที่มีความเสถียรหรือไม่ปลดปล่อยรังสีออกมาด้วยนั้น นอกจากวัสดุที่มักนำมาใช้อย่างแพร่หลายคือ สารประกอบตะกั่วแล้ว อาจจะเสนอให้มีการใช้สารประกอบบิสมัทที่สามารถละลายเข้ากับเมทิลเมทาคริเลทได้ เช่น บิสมัทโบรไมด์ และบิสมัทไทรเฮไลด์ เนื่องจากบิสมัทเป็นธาตุที่มีเลขอะตอมที่สูงกว่าตะกั่ว ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกาย และยังเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่อย่างไรก็ตาม ทั้งตะกั่วและบิสมัทก็มีความหนาแน่นและอะตอมต่ำกว่ายูเรเนียม

5.3.3 การส่องผ่านของแสง

เนื่องจากยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรทที่ผลิตได้เป็นผลึกสีเหลือง - เขียว เมื่อนำไปผสมในเมทิลเมทาคริเลท เพื่อขึ้นรูปแผ่นอะคริลิก จะทำให้แผ่นอะคริลิกที่ได้มีคุณสมบัติด้านการส่องผ่านของแสงลดลง จึงเสนอให้มีการใช้สารประกอบยูเรเนียมอินทรีย์ ซึ่งมีคุณสมบัติเช่นเดียวกันกับสารประกอบตะกั่วอินทรีย์ ที่ใช้ผลิตแผ่นอะคริลิกตะกั่วที่มีขายอยู่ทั่วไป ซึ่งมีความใสและความสามารถในการส่องผ่านของแสงสูงกว่า

5.3.4 ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ

ควรตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) ของแผ่นอะคริลิกที่ผลิตขึ้นด้วย เช่น ความหนาแน่น (Density), ความสามารถในการทนต่อแรงดึง (Tensile Strength), ความยืดหยุ่น (Elongation) และความแข็งแรง (Impact Strength) ของวัสดุ



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

- [1] นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.
- [2] Glenm F. Knoll. Radiation Detection and Measurement. Toronto: John Wiley & Sons, Inc, 1979.
- [3] นิทัศน์ จิระอรุณ. วัสดุพอลิเมอร์. เชียงใหม่ : หน่วยงานพิมพ์เอกสารและตำรา ภาควิชาเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2543.
- [4] อรุษา สรวารี. สารเติมแต่งพอลิเมอร์. เล่ม 1. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2546.
- [5] Robert O. Ebewe. Polymer Science and Technology. Florida: CRC Press LLC, 2000.
- [6] บุญรักษ์ กาญจนวรวณิชย์. อะคริลิกพลาสติก: คู่แข่งกระจกแก้ว. [ออนไลน์]. 2551. แหล่งที่มา: http://www.mtec.or.th/index.php?option=com_content&task=view&id=577&Itemid=36. [2552, สิงหาคม 10]
- [7] เจริญ นาคะสวรรค. กระบวนการแปรรูปพลาสติก. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์นิติธรรม, 2542.
- [8] สุรศักดิ์ พงศ์พันธุ์สุข. ยูเรเนียม. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://www.tint.or.th/nkc/nkc52/nstkc027.html>. [2552, ตุลาคม 11]
- [9] สมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย. ยูเรเนียม. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา: <http://www.nst.or.th/article/article494/article49405.htm>. [2553, กุมภาพันธ์ 20]
- [10] Israel Cabasso, Johannes Smis and Suresh K. Sahni. Radiopaque Miscible Systems Composed of Poly(Methyl Methacrylate) and Transition and Nontransition Metal Salts: Spectroscopic, Thermal, and Radiographic Characterization. Journal of Applied Polymer Science. 38 (1989): 1653-1666.
- [11] Israel Cabasso, Johannes Smis and Suresh K. Sahni. Radiopaque Polymers Based on Acrylated Phosphonate Esters Derived from Polyols. Journal of Applied Polymer Science. 41(1990): 3025-3042.
- [12] John E. Aldrich, Ph.D. and John W. Andrew, Ph.D. The Design of Shielding Windows Using Lead Glass, Lead Acrylic, and Plate Glass. Radiology. 146 (January 1983): 247.

- [13] A. A. Plionis, S. R. Garcia, E. R. Gonzales, D. R. Porterfield and D. S. Peterson. Replacement of lead bricks with non-hazardous polymer-bismuth for low-energy gamma shielding. J Radioanal Nucl Chem. 282 (2009): 239–242.
- [14] Matveev V.Z. et al. Design of Transport Casks with Depleted Uranium Gamma Shield and Advanced Safety. IHLRWM. (2006): 858-865.
- [15] ปฐมภรณ์ วัฒนพันธุ์ และ วีรนุช ม่วงเกษม. การผลิตแผ่นอะคริลิกที่เติมด้วยตะกั่วสเตรียเรทที่มีคุณสมบัติป้องกันรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล, 2548.
- [16] หทัย พาณิชการ. การหาปริมาณไอโซโทปยูเรเนียม-235 โดยวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี. วิทยานิพนธ์หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- [17] Mark J. Rivaxd, David S. Waid, and Jacek G. Wierzbickit. Mass Attenuation Coefficients of Clear-Pb[®] for Photon from ¹²⁵I, ¹⁰³Pd, ^{99m}Tc, ¹⁹²Ir, ¹³⁷Cs and ⁶⁰Co. Health Phys. 77(5) (1999): 571-578.
- [18] Wardray Premise. Premac[®] Lead Acrylic. [Online]. (n.d.). Available from: <http://www.wardray-premise.com/structural/materials/premac.html>. [2009, November 20]
- [19] J. H. Hubbell and S. M. Seltzer. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. The National Institute of Standards and Technology (NIST). [Online]. 2010. Available from: <http://www.nist.gov/physlab/data/xraycoef/index.cfm>. [2010, August 22]
- [20] China.CN. Lead Acrylic.X-ray Shielding Lead Acrylic. [Online]. (n.d.). Available from: <http://precisionoptical.en.china.cn/selling-leads/detail,1099293542,Lead-AcrylicX-ray-Shielding-Lead-Acrylic.html>. [2009, November 20]



ภาคผนวก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ก

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 ผลการทดลองการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Am-241 (60 keV) และ Co-57 (122 keV, 136 keV)

Am-241 (60 keV)						
Thickness (mm.)	30 sec.		transmission (I/I ₀)	ln(I/I ₀)	%attenuation	lead equivalent (mm.)
	I ₀	I				
2.7	62795	34447	0.549	-0.600	45.144	0.105
5.4	62795	17475	0.278	-1.279	72.171	0.225
8.1	62795	9854	0.157	-1.852	84.308	0.325
10.8	62795	4997	0.079	-2.531	92.042	0.445
Co-57 (122 keV)						
Thickness (mm.)	60 sec.		transmission (I/I ₀)	ln(I/I ₀)	%attenuation	lead equivalent (mm.)
	I ₀	I				
2.7	78053	54965	0.704	-0.351	29.580	0.077
5.4	78053	36343	0.466	-0.764	53.438	0.169
8.1	78053	24621	0.315	-1.154	68.456	0.255
10.8	78053	16117	0.206	-1.578	79.351	0.348
Co-57 (136 keV)						
Thickness (mm.)	60 sec.		transmission (I/I ₀)	ln(I/I ₀)	%attenuation	lead equivalent (mm.)
	I ₀	I				
2.7	10237	7470	0.730	-0.315	27.029	0.093
5.4	10237	5535	0.541	-0.615	45.931	0.181
8.1	10237	4171	0.407	-0.898	59.255	0.264
10.8	10237	2772	0.271	-1.306	72.922	0.384

ตารางที่ ก.2 ผลการทดลองการทดสอบการลดทอนรังสีแกมมาของต้นกำเนิดรังสี Eu-152 (244keV) และ I-131 (284 keV, 364 keV)

Eu-152 (244keV)						
Thickness (mm.)	1800 sec.		transmission (I/ I ₀)	ln(I/ I ₀)	%attenuation	lead equivalent (mm.)
	I ₀	I				
2.7	9991	9026	0.903	-0.102	9.659	0.122
5.4	9991	7809	0.782	-0.246	21.840	0.295
8.1	9991	6764	0.677	-0.390	32.299	0.467
10.8	9991	5735	0.574	-0.555	42.598	0.665
I-131 (284 keV)						
Thickness (mm.)	60 sec.		transmission (I/ I ₀)	ln(I/I ₀)	%attenuation	lead equivalent (mm.)
	I ₀	I				
2.7	14410	13448	0.933	-0.069	6.676	0.122
5.4	14410	12149	0.843	-0.171	15.690	0.302
8.1	14410	11302	0.784	-0.243	21.568	0.430
10.8	14410	10212	0.709	-0.344	29.133	0.609
I-131 (364 keV)						
Thickness (mm.)	60 sec.		transmission (I/ I ₀)	ln(I/ I ₀)	%attenuation	lead equivalent (mm.)
	I ₀	I				
2.7	168602	158524	0.940	-0.062	5.977	0.185
5.4	168602	148142	0.879	-0.130	12.135	0.388
8.1	168602	138789	0.823	-0.195	17.682	0.584
10.8	168602	130090	0.772	-0.259	22.842	0.778

ตารางที่ ก.3 ผลการวัดปริมาณรังสีจากแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตรทเฮกซะไฮเดรท
ที่ระยะต่าง ๆ

ระยะห่างจากแผ่นอะคริลิก (cm.)	ปริมาณรังสีที่ได้รับ (nSv/hr)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
0	485.0	472.0	488.0	481.67±8.51
10	189.0	178.7	191.5	186.40±6.79
20	143.8	145.3	145.0	144.70±0.79
30	127.0	134.6	132.5	131.37±3.93
40	125.8	126.1	124.9	125.60±0.62
background	124.9	122.6	124.5	124.00±1.23

ตัวอย่างการคำนวณ

จากสมการ $I = I_0 e^{-\mu x}$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอนก่อนผ่านสสาร

I คือ ความเข้มของแกมมาโฟตอนหลังผ่านสสาร

x คือ ความหนาของสสาร

μ คือ สัมประสิทธิ์การลดเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)

ค่า %attenuation หาได้จากสมการ

$$\%attenuation = \frac{I_0 - I}{I_0} = e^{-\mu x}$$

ดังนั้น $\%attenuation = \left(\frac{I_0 - I}{I_0} \right) \times 100$

ค่า Lead equivalent (x) หาได้จากสมการ

จากค่า Transmission $\frac{I}{I_0} = e^{-\mu x}$

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

ตัวอย่างการหาค่า %attenuation

ที่ความหนาของแผ่นอะคริลิก 1.08 cm. สามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{จากสมการ } \% \text{attenuation} &= \left(\frac{I_0 - I}{I_0} \right) \times 100 \\ \% \text{attenuation} &= \left(\frac{62795 - 4997}{62795} \right) \times 100 \\ \% \text{attenuation} &= 92.042 \end{aligned}$$

ดังนั้น แผ่นอะคริลิกหนา 1.08 cm. สามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ได้ 92.042%

ตัวอย่างการหาค่า Lead equivalent

ที่ความหนาของแผ่นอะคริลิก 10.8 cm. สามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ได้เทียบเท่ากับ
กับความหนาของตะกั่วดังนี้

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

เมื่อ $\frac{\mu}{\rho}$ คือค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตะกั่วที่พลังงาน 60 keV เท่ากับ 5.021 cm²/g

และ ρ คือค่าความหนาแน่นของตะกั่วมีค่าเท่ากับ 11.34 g/cm³

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

$$x = \frac{\ln \left(\frac{4997}{62795} \right)}{- (5.021 \times 11.34)}$$

$$x = 0.044 \text{ cm.}$$

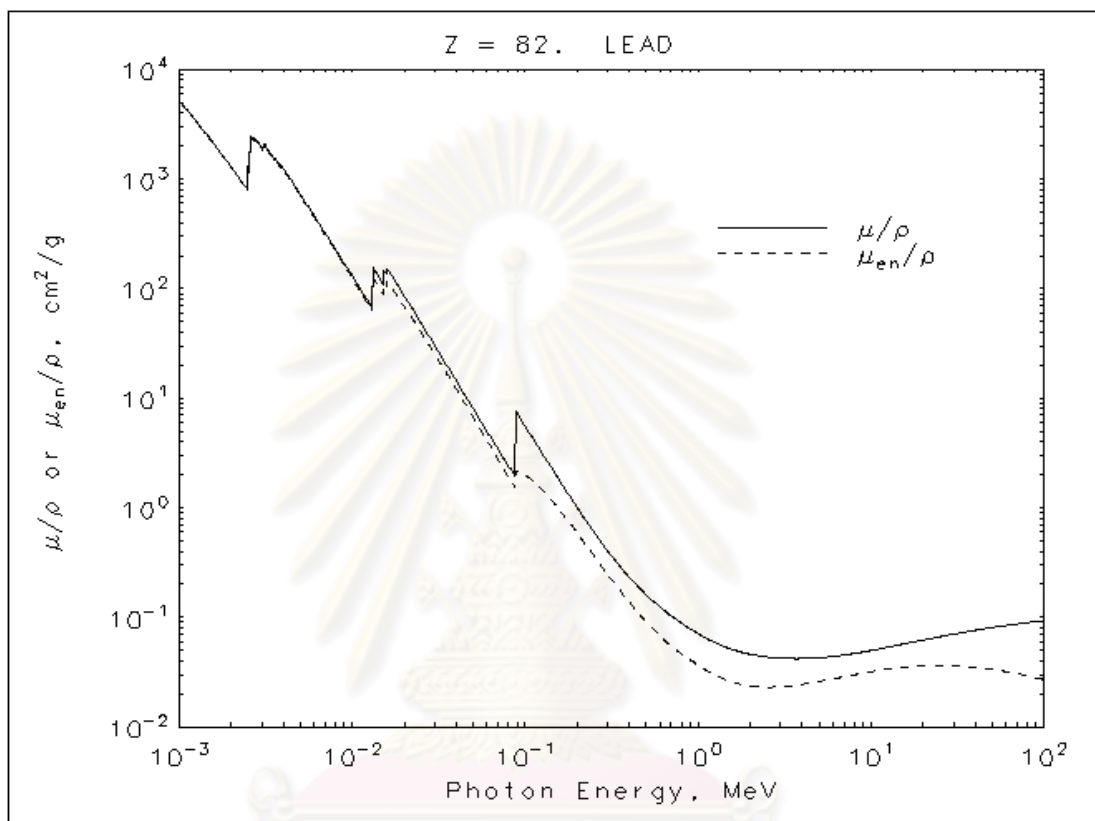
ดังนั้น ที่ความหนาของแผ่นอะคริลิก 10.8 cm. สามารถลดทอนรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV ได้
เทียบเท่ากับตะกั่วหนา 0.444 mm.



ภาคผนวก ข

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Lead
 $Z = 82$
 Density = 11.35 g/cm^3



ภาพที่ ข.1 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของตะกั่ว [19]

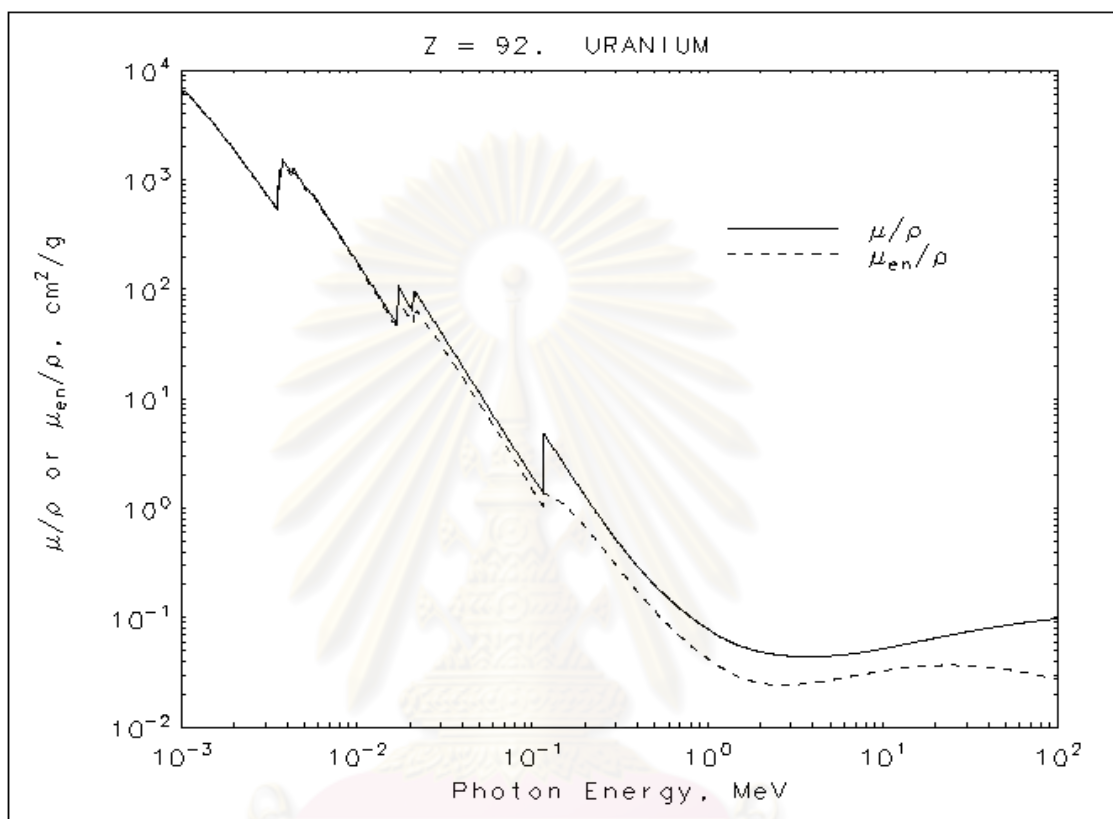
ตารางที่ ข.1 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของตะกั่ว [19]

Energy (MeV)	$\mu\rho$ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
1.00000E-03	5.210E+03	5.197E+03
1.50000E-03	2.356E+03	2.344E+03
2.00000E-03	1.285E+03	1.274E+03
2.48400E-03	8.006E+02	7.895E+02
M5 2.48400E-03	1.397E+03	1.366E+03
2.53429E-03	1.726E+03	1.682E+03

	2.58560E-03	1.944E+03	1.895E+03
M4	2.58560E-03	2.458E+03	2.390E+03
	3.00000E-03	1.965E+03	1.913E+03
	3.06640E-03	1.857E+03	1.808E+03
M3	3.06640E-03	2.146E+03	2.090E+03
	3.30130E-03	1.796E+03	1.748E+03
	3.55420E-03	1.496E+03	1.459E+03
M2	3.55420E-03	1.585E+03	1.546E+03
	3.69948E-03	1.442E+03	1.405E+03
	3.85070E-03	1.311E+03	1.279E+03
M1	3.85070E-03	1.368E+03	1.335E+03
	4.00000E-03	1.251E+03	1.221E+03
	5.00000E-03	7.304E+02	7.124E+02
	6.00000E-03	4.672E+02	4.546E+02
	8.00000E-03	2.287E+02	2.207E+02
	1.00000E-02	1.306E+02	1.247E+02
	1.30352E-02	6.701E+01	6.270E+01
L3	1.30352E-02	1.621E+02	1.291E+02
	1.50000E-02	1.116E+02	9.100E+01
	1.52000E-02	1.078E+02	8.807E+01
L2	1.52000E-02	1.485E+02	1.131E+02
	1.55269E-02	1.416E+02	1.083E+02
	1.58608E-02	1.344E+02	1.032E+02
L1	1.58608E-02	1.548E+02	1.180E+02
	2.00000E-02	8.636E+01	6.899E+01
	3.00000E-02	3.032E+01	2.536E+01
	4.00000E-02	1.436E+01	1.211E+01
	5.00000E-02	8.041E+00	6.740E+00

	6.00000E-02	5.021E+00	4.149E+00
	8.00000E-02	2.419E+00	1.916E+00
	8.80045E-02	1.910E+00	1.482E+00
K	8.80045E-02	7.683E+00	2.160E+00
	1.00000E-01	5.549E+00	1.976E+00
	1.50000E-01	2.014E+00	1.056E+00
	2.00000E-01	9.985E-01	5.870E-01
	3.00000E-01	4.031E-01	2.455E-01
	4.00000E-01	2.323E-01	1.370E-01
	5.00000E-01	1.614E-01	9.128E-02
	6.00000E-01	1.248E-01	6.819E-02
	8.00000E-01	8.870E-02	4.644E-02
	1.00000E+00	7.102E-02	3.654E-02
	1.25000E+00	5.876E-02	2.988E-02
	1.50000E+00	5.222E-02	2.640E-02
	2.00000E+00	4.606E-02	2.360E-02
	3.00000E+00	4.234E-02	2.322E-02
	4.00000E+00	4.197E-02	2.449E-02
	5.00000E+00	4.272E-02	2.600E-02
	6.00000E+00	4.391E-02	2.744E-02
	8.00000E+00	4.675E-02	2.989E-02
	1.00000E+01	4.972E-02	3.181E-02
	1.50000E+01	5.658E-02	3.478E-02
	2.00000E+01	6.206E-02	3.595E-02

Uranium
 $Z = 92$
 Density = 18.95 g/cm^3



ภาพที่ ข.2 สัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของยูเรเนียม [19]

ตารางที่ ข.2 ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนรังสีเชิงมวลของยูเรเนียม [19]

	Energy (MeV)	$\mu\rho$ (cm^2/g)	μ_{en}/ρ (cm^2/g)
	1.00000E-03	6.626E+03	6.612E+03
	1.02220E-03	6.375E+03	6.360E+03
	1.04490E-03	6.127E+03	6.112E+03
N3	1.04490E-03	6.519E+03	6.504E+03
	1.15314E-03	5.446E+03	5.431 +03
	1.27260E-03	4.526E+03	4.511E+03

N2	1.27260E-03	4.589E+03	4.575E+03
	1.35409E-03	4.065E+03	4.051E+03
	1.44080E-03	3.598E+03	3.584E+03
N1	1.44080E-03	3.668E+03	3.654E+03
	1.50000E-03	3.382E+03	3.368E+03
	2.00000E-03	1.865E+03	1.852E+03
	3.00000E-03	7.692E+02	7.578E+02
M5	3.55170E-03	5.257E+02	5.151E+02
	3.55170E-03	1.266E+03	1.220E+03
	3.63859E-03	1.188E+03	1.142E+03
M4	3.72760E-03	1.112E+03	1.072E+03
	3.72760E-03	1.582E+03	1.517E+03
	4.00000E-03	1.329E+03	1.277E+03
M3	4.30340E-03	1.110E+03	1.068E+03
	4.30340E-03	1.292E+03	1.242E+03
	5.00000E-03	8.891E+02	8.569E+02
M2	5.18220E-03	8.118E+02	7.825E+02
	5.18220E-03	8.611E+02	8.301E+02
	5.36198E-03	7.915E+02	7.632E+02
M1	5.54800E-03	7.282E+02	7.022E+02
	5.54800E-03	7.592E+02	7.322E+02
	6.00000E-03	6.284E+02	6.062E+02
L3	8.00000E-03	3.108E+02	2.989E+02
	1.00000E-02	1.791E+02	1.711E+02
	1.50000E-02	6.528E+01	6.084E+01
	1.71663E-02	4.663E+01	4.293E+01
L3	1.71663E-02	1.070E+02	7.980E+01
	2.00000E-02	7.106E+01	5.496E+01

	2.09476E-02	6.300E+01	4.914E+01
L2	2.09476E-02	8.838E+01	6.222E+01
	2.13487E-02	9.515E+01	5.959E+01
	2.17574E-02	8.023E+01	5.715E+01
L1	2.17574E-02	9.222E+01	6.487E+01
	3.00000E-02	4.128E+01	3.149E+01
	4.00000E-02	1.983E+01	1.576E+01
	5.00000E-02	1.121E+01	9.034E+00
	6.00000E-02	7.035E+00	5.678E+00
	8.00000E-02	3.395E+00	2.695E+00
	1.00000E-01	1.954E+00	1.502E+00
	1.15606E-01	1.378E+00	1.027E+00
K	1.15606E-01	4.893E+00	1.382E+00
	1.50000E-01	2.591E+00	1.083E+00
	2.00000E-01	1.298E+00	6.746E-01
	3.00000E-01	5.192E-01	3.050E-01
	4.00000E-01	2.922E-01	1.732E-01
	5.00000E-01	1.976E-01	1.152E-01
	6.00000E-01	1.490E-01	8.494E-02
	8.00000E-01	1.016E-01	5.574E-02
	1.00000E+00	7.896E-02	4.241E-02
	1.25000E+00	6.370E-02	3.351E-02
	1.50000E+00	5.587E-02	2.891E-02
	2.00000E+00	4.878E-02	2.523E-02
	3.00000E+00	4.447E-02	2.434E-02
	4.00000E+00	4.392E-02	2.546E-02
	5.00000E+00	4.463E-02	2.689E-02
	6.00000E+00	4.583E-02	2.829E-02

8.00000E+00	4.879E-02	3.068E-02
1.00000E+01	5.195E-02	3.259E-02
1.50000E+01	5.927E-02	3.552E-02
2.00000E+01	6.512E-02	3.662E-02



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การคำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณไอโซโทปยูเรเนียม-235

คำนวณหาเปอร์เซ็นต์ปริมาณไอโซโทปยูเรเนียม-235 โดยวิธีแกมมาสเปกโตรเมตรี

$$\text{สูตร} \quad y_2 = y_1 \times \frac{U_1}{U_2} \times \frac{w_1}{c_1} \times \frac{c_2}{w_2}$$

เมื่อ y_1 = เปอร์เซ็นต์ยูเรเนียม-235 ของสารมาตรฐาน

y_2 = เปอร์เซ็นต์ยูเรเนียม-235 ของสารประกอบตัวอย่าง

U_1 = ความเข้มข้นยูเรเนียมของสารมาตรฐาน

U_2 = ความเข้มข้นยูเรเนียมของสารประกอบตัวอย่าง

w_1 = น้ำหนักของสารมาตรฐาน

w_2 = น้ำหนักของสารประกอบตัวอย่าง

c_1 = พื้นที่ใต้ peak ที่พลังงาน 185.7 keV จากไอโซโทปยูเรเนียม-235 ของสารมาตรฐาน

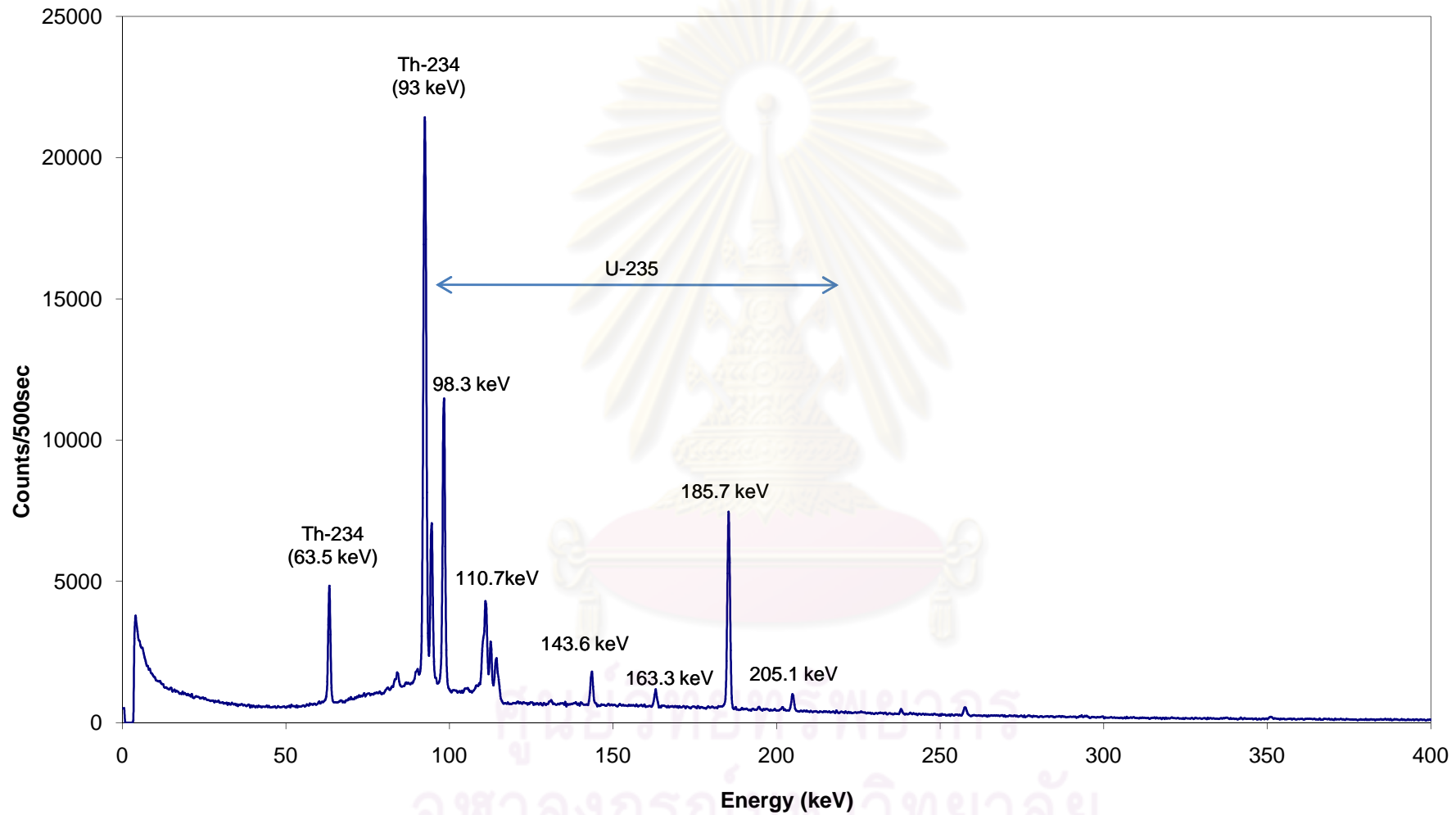
c_2 = พื้นที่ใต้ peak ที่พลังงาน 185.7 keV จากไอโซโทปยูเรเนียม-235 ของสารประกอบตัวอย่าง

หาปริมาณไอโซโทป ^{235}U จากสารประกอบยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรท: $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ น้ำหนัก 6.6448 กรัม ที่สังเคราะห์ขึ้น ซึ่งประกอบด้วยยูเรเนียม (U) 47.41% มาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานยูเรเนียมออกไซด์: U_3O_8 ความบริสุทธิ์ 99% ที่ประกอบด้วยยูเรเนียม (U) 84.80% และมีความเข้มข้นของไอโซโทป ^{235}U เท่ากับ 0.4%) [16] โดยใช้ U_3O_8 3.9499 กรัม

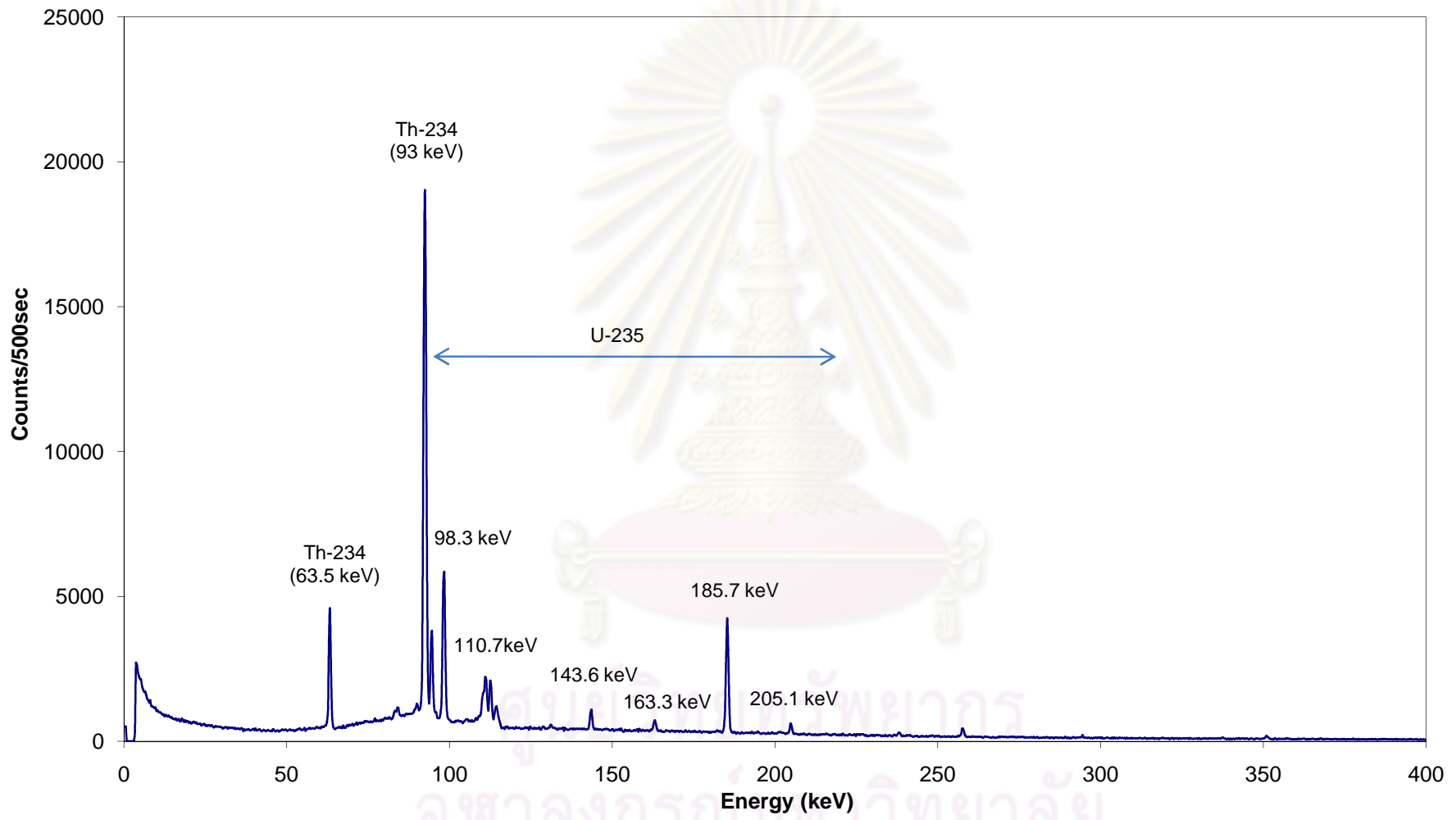
จากภาพที่ ค.1 และ ค.2 อ่านค่าพื้นที่ใต้ peak ที่พลังงาน 185.7 keV จากไอโซโทปยูเรเนียม-235 ของ U_3O_8 และ $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ได้ 21599 counts/500sec. และ 12150 counts/500sec. ตามลำดับ ดังนั้นสามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ปริมาณไอโซโทปยูเรเนียม-235 ของสารประกอบ ยูเรนิลไนเตรทเฮกซะไฮเดรทได้ดังนี้

$$y_2 = 0.40 \times \frac{84.80}{47.41} \times \frac{3.9499 \text{ g}}{21599 \text{ counts} / 500 \text{ sec}} \times \frac{12150 \text{ counts} / 500 \text{ sec}}{6.6448 \text{ g}}$$

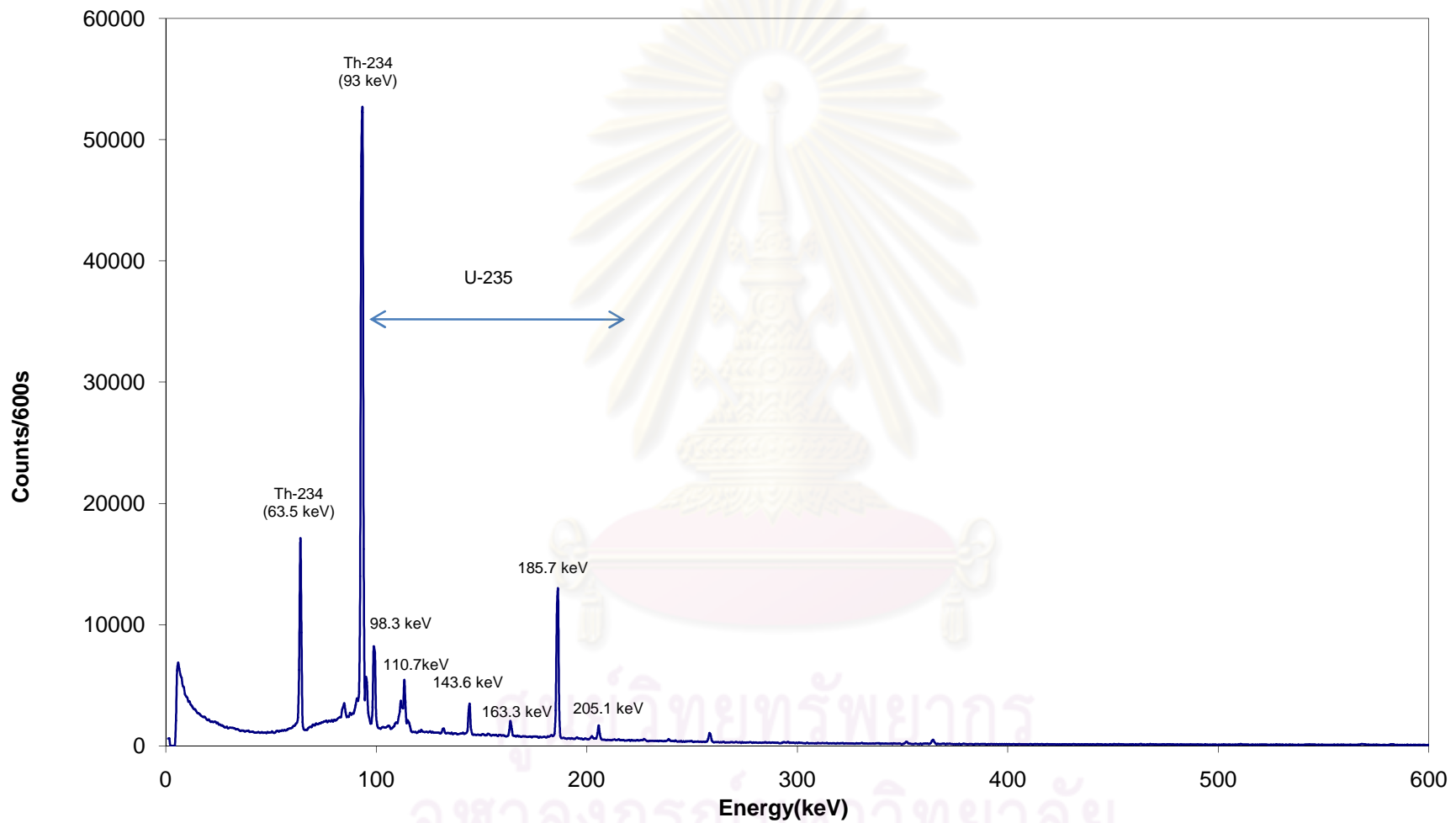
$$y_2 = 0.24 \%$$



ภาพที่ ค.1 สเปกตรัมของสารมาตรฐานยูเรเนียมออกไซด์



ภาพที่ ค.2 สเปกตรัมของยูเรเนียมในเตาไฮดรอลิก



ภาพที่ ค.3 สเปกตรัมของแผ่นอะคริลิกที่มีส่วนผสมของยูเรเนียมในเตาไฮดรอลิก

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวนัฐพร คำวัง เกิดเมื่อวันที่ 26 กันยายน พ.ศ. 2526 ที่จังหวัดน่าน สำเร็จ การศึกษาวิทยาศาสตร์บัณฑิต (รังสีเทคนิค) จากคณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เมื่อปีการศึกษา 2548 และเข้าทำงานในตำแหน่งนักรังสีการแพทย์ ที่หน่วยเวชศาสตร์นิวเคลียร์ ภาควิชารังสีวิทยา คณะแพทยศาสตร์โรงพยาบาลรามาธิบดี เป็นระยะเวลา 2 ปี แล้วเข้าศึกษาต่อ ในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยเมื่อปี พ.ศ. 2551



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย