

การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอนโดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252



นายศราวุธ ใจเย็น

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2545

ISBN 974-17-2676-7

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPEMENT OF A PROTOTYPE FOR LOW FLUX THERMAL NEUTRON
RADIOGRAPHY SYSTEM USING CALIFORNIUM-252

Mr. Sarawut Jaiyen

สถาบันวิทยบริการ

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2002

ISBN 974-17-2676-7

ศราวุฑู ใจเย็น : การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยใช้
แคลิฟอร์เนียม-252. (DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE FOR LOW FLUX
THERMAL NEUTRON RADIOGRAPHY SYSTEM USING CALIFORNIUM-252)

อ. ที่ปรึกษา : ผศ.อรรถพร ภัทรสุมันต์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, 121
หน้า. ISBN 974-17-2676-7

ได้ทำการออกแบบและสร้างระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพื่อเป็นต้นแบบสำหรับการ
ตรวจสอบโดยไม่ทำลายผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมบางชนิด โดยเลือกใช้จากเปลี่ยนนิวตรอนชนิด
NE426 เพื่อเปลี่ยนพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยาของนิวตรอนไปเป็นแสงที่ถูกบันทึกได้ด้วยฟิล์มไว
แสง ระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดแคลิฟอร์เนียม-252 ขนาด 20
ไมโครกรัม จุ่มอยู่ที่ระดับลึก 40 ซม. ในถังโพลิเอทีลีนรูปทรงกระบอกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 100
ซม. สูง 100 ซม. ที่เติมน้ำเต็ม ได้ทำการสร้างและทดสอบนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ยาว 30 ซม.
หลายอัน ที่มีค่าอัตราส่วน L/D ระหว่าง 10 – 20 ซึ่งพบว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่มีค่าอัตราส่วน
L/D เท่ากับ 20 และให้อัตราส่วนแคดเมียมเท่ากับ 17 จากการวัดด้วยหัววัดนิวตรอนแบบฉาบด้วย
โบรอน มีความเหมาะสมที่สุด โดยให้ความเข้มข้นนิวตรอนที่ตำแหน่งชิ้นงาน 6.82×10^2 นิวตรอน/
ตร.ซม.-วินาที เพื่อการเปรียบเทียบจึงได้ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ 3
ชนิด คือ ฟิล์ม Ilford HP 5 Plus, ฟิล์มความไวสูง Ilford Delta 3200 และ กระดาษ Fuji FP-
3000B ที่เวลาถ่ายภาพต่าง ๆ กัน ซึ่งพบว่าเวลาถ่ายภาพที่เหมาะสมเพื่อให้ภาพที่มีความดำ
สม่ำเสมอสำหรับแผ่นบันทึกภาพดังกล่าว ควรมากกว่า 6, 2 และ 1 ชั่วโมง ตามลำดับ
นอกจากนั้นยังพบว่าเมื่อนำฟิล์ม Ilford HP 5 Plus ไปฉายแสงเพื่อให้มีความดำเทียบเท่ากับ 0.6
ก่อนการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน สามารถลดเวลาในการถ่ายภาพลงได้ร้อยละ 50 และยังพบว่า
เมื่อทำให้คุณสมบัติของน้ำรอบ ๆ ต้นกำเนิดนิวตรอน และนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ลดลงจาก 23
องศาเซลเซียส เป็น 5 องศาเซลเซียส ภาพถ่ายที่ได้มีความเปรียบต่างเพิ่มขึ้นประมาณร้อยละ 26
เพื่อแสดงให้เห็นข้อดีของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงได้ทดลองถ่ายภาพนาฬิกาข้อมือ นาฬิกา
ปลุก เครื่องคิดเลข สเต็ปปีงมอเตอร์ ไฟฉายขนาดเล็ก และ คอนเนคเตอร์ DB25S เปรียบกับการ
ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งก็พบว่าภาพถ่ายด้วยนิวตรอนให้ภาพถ่ายในส่วนของยางและพลาสติก
ดีกว่า นอกจากนี้ยังได้ทำการถ่ายภาพ ASTM Beam Purity Indicator (BPI) และ Sensitivity
Indicator (SI) ด้วยนิวตรอนจากระบบที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู
วิจัย ปปว-1/1 พบว่าภาพที่ได้เป็นที่น่าพอใจ อย่างไรก็ตามในการใช้งานในอุตสาหกรรมจะต้องใช้
ต้นกำเนิดแคลิฟอร์เนียม-252 ที่มีความแรงสูงกว่านี้ คือ ประมาณ 200 ไมโครกรัม เพื่อลดเวลาใน
การถ่ายภาพลง และเพื่อให้ภาพถ่ายคุณภาพดีขึ้น

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อในสิด.....
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา 2545	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

##4370513521

: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY.

KEY WORD : NEUTRON RADIOGRAPHY / CALIFORNIUM-252 / THERMAL NEUTRON

SARAWUT JAIYEN : DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE FOR LOW FLUX
THERMAL NEUTRON RADIOGRAPHY SYSTEM USING CALIFORNIUM-252.

THESIS ADVISOR : ASST.PROF.ATTAPORN PATTARASUMUNT, THESIS

COADVISOR : ASSOC. PROF.NARES CHANKOW, 121 PP. ISBN 974-17-2676-7.

A neutron radiography (NR) system using ^{252}Cf was designed and constructed as a prototype for nondestructive inspection of some industrial products. An NE426 neutron converter screen was essentially selected to convert the energy produced from the neutron reaction into light photons which could be recorded by light sensitive films. The system consisted of a 20 μg ^{252}Cf neutron source submerged at a depth of 40 cm in a 100 cm diameter, 100-cm height cylindrical polyethylene tank filled with water. Different designs of 30 cm long neutron collimators with the L/D ratios between 10 to 20 were constructed and tested. The collimator with the L/D ratio of 20 and a cadmium ratio of 17, measured with a boron-lined detector, was found to be most suitable and could give a thermal neutron flux of $6.82 \times 10^2 \text{ n/cm}^2\text{-s}$ at the specimen position. For comparison, neutron radiography was performed using 3 types of recording medium namely : Ilford HP 5 Plus film, high speed Ilford Delta 3200 film and Fuji FP-3000B paper at different exposure times. It was found that the suitable exposure times for the recording media used should be greater than 6, 2 and 1 hours respectively in order to give satisfactory uniform film density. Furthermore, it was found that when the Ilford HP 5 Plus film was pre-exposed to light to an equivalent density of 0.6 prior to performing actual NR, the expose time could be reduced by about 50 %. In addition, when water in the vicinity of the source and the collimator were cooled down from 23 °C to 5 °C, the image contrast was improved by about 26 %. To demonstrate the benefit of NR, wrist watches, an alarm clock, a calculator, a stepping motor, a small searchlight and a DB25S connector were radiographed with neutrons and with x-rays for comparison. It was found that NR could give better images for parts containing rubber and plastic. Finally, an ASTM Beam Purity Indicator (BPI) and a Sensitivity Indicator (SI) were radiographed with neutrons from the system in comparison with neutrons from the TRR-1/M1 Research Reactor and the image quality was found to be satisfactory. For industrial use of NR, however, a stronger ^{252}Cf source, preferably about 200 μg , was needed to reduce the exposure time and to improve the image quality.

Department Nuclear Technology Student's signature.....

Field of study Nuclear Technology Advisor's signature.....

Academic year 2002 Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยดูแลให้คำปรึกษาในการทำวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาและข้อคิดในการทำวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชานิเวศศาสตร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ทุกท่าน

ขอขอบคุณ กองฟิสิกส์ สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยนี้

ขอกราบขอบพระคุณ พระเดชพระคุณท่านเจ้าประคุณสมเด็จพระพุทธปาพจนบดี (จินตากรมหาเถระ) ท่านเจ้าคุณพระสาสนโสภณ (อมพโร) ท่านเจ้าคุณพระราชมงคลสุธี (เชมฉนโท) พระครูปลัดสัมพิพัฒน์นรอาจารย์ (จินตมโย) และท่านพระเถรานุเถระทุกรูป วัดราชบพิธสถิตมหาสีมาราม ที่ให้ความดูแลเอาใจใส่ ที่พักอาศัย และการสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นิสิตภาควิชานิเวศศาสตร์เทคโนโลยีทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่สาว ผู้ให้ความรักและให้กำลังใจเป็นอย่างดีในการปฏิบัติงานและเป็นแรงผลักดันทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานจนสำเร็จได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญภาพ.....	ฐ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 บทนำ.....	6
2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน.....	6
2.1.2 ชนิดของนิวตรอน.....	6
2.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร.....	7
2.1.4 ภาคตัดขวางของนิวตรอน.....	10
2.1.5 การลดพลังงานของนิวตรอน.....	12
2.1.6 ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	16
2.1.6.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	16
2.1.6.2 เครื่องเร่งอนุภาค.....	17
2.1.6.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี.....	19
2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	21
2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	22
2.2.2 ส่วนประกอบสำคัญของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	25
2.2.3 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	26

2.2.3.1 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง.....	26
2.2.3.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด.....	27
2.2.3.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์.....	29
2.3 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	30
2.4 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	36
2.4.1 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ.....	36
2.4.1.1 ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาทันที.....	36
2.4.1.2 ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาจากการสลายตัว.....	37
2.4.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง.....	38
2.4.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มแทรก-เอตซ์.....	39
2.5 ฟิล์มและอุปกรณ์แสดงภาพ.....	39
2.6 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน.....	41
2.6.1 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่าย.....	42
2.6.2 การตรวจสอบความเบี่ยงต่างของภาพถ่าย.....	42
2.6.3 การวัดค่าความดำบนฟิล์ม.....	43
2.6.4 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนด้วย	
วัตถุตัวอย่างมาตรฐาน.....	44
2.6.4.1 การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator..	45
2.6.4.2 การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน	
Sensitivity Indicator.....	46
2.6.4.3 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่ายและความไว	
ของการถ่ายภาพด้วย Test strip B.....	48
3. วัสดุและอุปกรณ์วิจัย.....	50
3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	50
3.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	51
3.3 ฟิล์มบันทึกภาพ.....	52
3.4 น้ำยาล้างฟิล์ม.....	53
3.5 ตลับใส่ฟิล์ม.....	53
3.6 ตู้ไฟดูฟิล์ม.....	54

3.7 อุปกรณ์วัดความดำของฟิล์ม.....	54
3.8 ระบบวัดนิวตรอนช้า.....	55
3.9 อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์.....	56
3.10 วัสดุอุปกรณ์ในการสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	57
3.11 วัตถุประสงค์อย่างที่ใช้สำหรับทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	57
3.12 วัตถุประสงค์อย่างมาตรฐานสำหรับทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	58
4. วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย.....	60
4.1 การออกแบบและสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	60
4.1.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	60
4.1.2 ผลการวิจัย.....	61
4.2 การวัดรีเลทีฟลักซ์และอัตราส่วนแคดเมียมของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	62
4.2.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	62
4.2.2 ผลการวัดรีเลทีฟลักซ์.....	63
4.2.3 วิเคราะห์ผลการวัดรีเลทีฟลักซ์.....	64
4.2.4 ผลการหาอัตราส่วนแคดเมียม.....	65
4.2.5 วิเคราะห์ผลการหาอัตราส่วนแคดเมียม.....	66
4.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เหมาะสม.....	67
4.3.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	67
4.3.2 ผลการวิจัย.....	68
4.3.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	74
4.4 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน.....	74
4.4.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	74
4.4.2 ผลการวิจัย.....	75
4.4.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	78
4.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์.....	79
4.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	79
4.5.2 ผลการวิจัย.....	79
4.5.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	81

	หน้า
4.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มความไวสูง.....	82
4.6.1 วิธีดำเนินการวิจัยโดยใช้ฟิล์ม อิลฟอร์ด เดลต้า 3200.....	82
4.6.2 วิธีดำเนินการวิจัยโดยใช้ฟิล์ม ฟุจิ เอฟพี-3000บี.....	82
4.6.3 ผลการวิจัย.....	83
4.6.4 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	84
4.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคลดอุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอน.....	85
4.7.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	85
4.7.2 ผลการวิจัย.....	86
4.7.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	87
4.8 การทดลองลดเวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	87
4.8.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	87
4.8.2 ผลการวิจัย.....	88
4.8.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	89
4.9 การตรวจสอบและเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น กับระบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปและจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	90
4.9.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	90
4.9.2 ผลการวิจัย.....	90
4.9.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	92
4.10 การถ่ายภาพชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิด.....	92
4.10.1 วิธีดำเนินการวิจัย.....	92
4.10.2 ผลการวิจัย.....	93
4.10.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	99
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	100
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	100
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	102
รายการอ้างอิง.....	103
บรรณานุกรม.....	105
ภาคผนวก.....	106
ภาคผนวก ก.	107

สารบัญ (ต่อ)

ฎ

หน้า

ภาคผนวก ข.	108
ภาคผนวก ค.	109
ภาคผนวก ง.	116
ภาคผนวก จ.	119
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	121



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน.....	7
2.2 ค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด.....	13
2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n).....	19
2.4 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนและคุณสมบัติบางประการของธาตุ.....	22
2.5 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV ของไอโซโทปบางชนิด.....	24
2.6 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำจากเปลี่ยนนิวตรอน.....	37
2.7 फिल्मสำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่าง ๆ.....	40
2.8 ความเร็วเปรียบเทียบของฟิล์มรังสีเอกซ์สำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	40
2.9 ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	46
2.10 ค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	47
4.1 คุณสมบัติของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่สร้างขึ้น.....	61
4.2 ผลการทดลองหาค่ารีเลทีฟฟลักซ์ของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	63
4.3 ผลการทดลองหาอัตราส่วนแคดเมียมของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	65
4.4 แสดงรายละเอียดการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เหมาะสม.....	67
4.5 แสดงรายละเอียดการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน.....	75
4.6 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของวัตถุตัวอย่างมาตรฐานจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยและจากระบบที่พัฒนาขึ้น.....	90
4.7 คุณภาพของภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	91
4.8 ความดำของฟิล์มบนวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน BPI	91
4.9 คุณภาพของลำนิวตรอนเปรียบเทียบระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย.....	92

สารบัญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ.....	9
2.2 ลำนิวตรอนกระทบเป้า.....	10
2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค.....	14
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์.....	15
2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนกับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนของตัวหน่วงนิวตรอน.....	16
2.6 ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู.....	17
2.7 อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้เครื่องเร่งอนุภาคแบบแวนเดอกร๊าฟฟ์เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน.....	18
2.8 ลักษณะของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ และ ^{252}Cf	20
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุต่อนิวตรอนเปรียบเทียบกับรังสีเอกซ์.....	21
2.10 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	24
2.11 ส่วนประกอบสำคัญของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	26
2.12 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง.....	27
2.13 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด.....	28
2.14 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์.....	29
2.15 ลักษณะของนิวตรอนคอลลิมเตอร์แบบขนานและแบบไดเวอร์เจนต์.....	30
2.16 ตำแหน่งของคอลลิมเตอร์และส่วนประกอบหลักในระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	31
2.17 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และ ไฮโดรเจน.....	31
2.18 แผนภาพของคอลลิมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ ที่มีช่องเปิดทางเข้า D และความยาวของคอลลิมเตอร์ L.....	31
2.19 แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน.....	33
2.20 ลักษณะของคอลลิมเตอร์ที่ใช้สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์.....	34
2.21 ความเข้มของนิวตรอน อัตราส่วน L/D และเวลาในการถ่ายภาพของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทต่าง ๆ.....	34

ภาพประกอบ	หน้า
2.22 ความเข้มของนิวตรอนและค่า L/D ของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบต่าง ๆ	35
2.23 หลักการทำงานของ Imaging Plates	41
2.24 กราฟระหว่างความดำกับตำแหน่งบนฟิล์มที่ใช้ในการตรวจสอบความคมชัด โดยวิธีของคลาเซนส์.....	42
2.25 Beam Purity Indicator.....	44
2.26 ตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI.....	44
2.27 ASTM Sensitivity Indicator.....	47
2.28 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูปใน ASTM SI.....	48
2.29 Test strip B.....	49
3.1 แผนภาพต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ที่ใช้ในงานวิจัย.....	50
3.2 แผนภาพแสดงระบบบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252.....	51
3.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 และนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่อยู่ในถังโพลิเอทีลีน บรรจุน้ำ.....	51
3.4 ฟิล์มบันทึกภาพอีลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส และ อีลฟอร์ด เดลต้า 3200.....	52
3.5 ตลับใส่ฟิล์ม.....	53
3.6 เครื่องวัดความดำของฟิล์ม.....	54
3.7 ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม.....	55
3.8 ระบบวัดนิวตรอนช้า.....	56
3.9 เครื่องอัด-ขยายภาพ.....	56
3.10 เครื่องตั้งเวลา.....	57
3.11 วัตถุตัวอย่างที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	58
3.12 Beam Purity Indicator (BPI)	58
3.13 Sensitivity Indicator	59
3.14 Test Strip B	59
4.1 แผนภาพแสดงนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น.....	61
4.2 รูปถ่ายนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น.....	62
4.3 กราฟเปรียบเทียบปริมาตรฟลักซ์กับตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอนของนิวตรอน คออลลิเมเตอร์อื่นที่ 1, 2, 3 และ 4.....	64

ภาพประกอบ	หน้า
4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนแคดเมียมกับตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอนของนิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 1, 2, 3 และ 4.....	66
4.5 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 2 (L/D=10) ใช้เวลาถ่ายภาพ 15 ชั่วโมง.....	69
4.6 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 3 (L/D=15) ใช้เวลาถ่ายภาพ 15 ชั่วโมง.....	70
4.7 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 4 (L/D=20) ใช้เวลาถ่ายภาพ 15 ชั่วโมง.....	71
4.8 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มที่ถ่ายภาพจากนิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 2 (L/D=10).....	72
4.9 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มที่ถ่ายภาพจากนิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 3 (L/D=15).....	72
4.10 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มที่ถ่ายภาพจากนิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 4 (L/D=20).....	73
4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าความเปรียบต่างของภาพ.....	73
4.12 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอน.....	76
4.13 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มที่ถ่ายภาพเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน.....	77
4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าความเปรียบต่างของภาพเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน.....	78
4.15 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยไม่ใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์และใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์.....	80
4.16 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์และไม่ใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์.....	81
4.17 ภาพถ่ายโดยใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 เปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยไม่ใช้เทคนิคฟรีเอกซ์โพเซอ์และใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์.....	83
4.18 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 เปรียบเทียบเมื่อใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์ และไม่ใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์.....	84
4.19 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้กระดาษฟูจิ เอฟพี-3000บี ใช้เวลาในการถ่ายภาพ 1 ชั่วโมง.....	84
4.20 ภาพถ่ายเปรียบเทียบเมื่อลดคุณสมบัติของสารหน่วงนิวตรอน.....	86
4.21 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างลดคุณสมบัติและไม่ลดคุณสมบัติของสารหน่วงนิวตรอน.....	87

ภาพประกอบ	หน้า
4.22 โพรไฟล์ค่าความดำของฟิล์มเปรียบเทียบเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพต่างกัน.....	88
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ ระหว่างเวลาในการถ่ายภาพกับค่า Coefficient of variation.....	89
4.24 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของคอนเนคเตอร์ DB25S.....	93
4.25 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของนาฬิกาปลุก.....	94
4.26 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของนาฬิกาข้อมือ.....	95
4.27 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของเครื่องคิดเลข.....	96
4.28 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของสตีปมอเตอร์.....	97
4.29 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของไฟฉายขนาดเล็ก.....	98



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive testing, NDT) เป็นการตรวจสอบวัสดุที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม วัสดุที่ถูกตรวจสอบด้วยวิธีนี้หากไม่พบข้อบกพร่องหรือพบในลักษณะที่ยอมรับได้ก็ยังสามารถนำวัสดุนั้นกลับมาใช้งานได้ ช่วยให้เกิดความประหยัดในโรงงานอุตสาหกรรม การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (X-ray radiography) และการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา (Gamma-ray radiography) ก็เป็นวิธีการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลายวิธีหนึ่ง ซึ่งใช้คุณสมบัติการทะลุทะลวงผ่านวัสดุของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา แต่ถ้านำไปตรวจสอบวัสดุที่มีส่วนประกอบของธาตุบางชนิดเช่น ไฮโดรเจน ลิเทียม โบรอน แกโดลิเนียม ฯลฯ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะให้รายละเอียดที่ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ธาตุเหล่านั้นอยู่ปะปนกับธาตุอื่น ๆ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงมีประโยชน์ในการตรวจสอบวัสดุอุตสาหกรรมบางชนิดที่มีส่วนประกอบเป็นพลาสติก ยาง เรซิน โพลีเมอร์ น้ำมัน น้ำ ตลอดจนองค์ประกอบธาตุเบาอื่น ๆ

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในประเทศไทยยังไม่ถูกนำมาใช้งานในการตรวจสอบวัสดุ แต่มีการศึกษาวิจัยและพัฒนาอุปกรณ์การถ่ายภาพโดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีข้อดีคือ มีความเข้มของนิวตรอนสูง แต่จะมีข้อจำกัดในการใช้งานและไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ดังนั้นการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ไอโซโทปรังสีจึงเป็นที่น่าสนใจในการพัฒนาอย่างกว้างขวาง เพราะประหยัดค่าใช้จ่าย เคลื่อนย้ายได้ และสามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้ ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีที่นิยมใช้สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนคือ แคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) ซึ่งเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนแบบแตกตัวเองให้นิวตรอนออกมาอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง และการปลดปล่อยนิวตรอนสูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีชนิดอื่น อย่างไรก็ตามการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ไอโซโทปรังสีนี้มีข้อเสียในเรื่องของความเข้มของนิวตรอนต่ำ ดังนั้นจึงต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพนานและคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้ไม่ดีนัก

การพัฒนาระบบต้นแบบในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อให้ได้คุณภาพของภาพที่ดีและเวลาในการถ่ายภาพลดลงรวมถึงการนำอุปกรณ์ที่ทำได้ง่ายและราคาถูกลงมาประยุกต์ใช้กับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อให้เกิดความประหยัด และได้ประโยชน์พร้อมทั้งคุณภาพของภาพที่ดีที่สุด จึงมีความจำเป็นในการศึกษาและพัฒนาต่อไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันอุปกรณ์

บันทึกภาพและแสดงภาพมีการพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นอย่างรวดเร็ว การศึกษาวิจัยเรื่องนี้จึงมีทางเลือกเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อออกแบบและสร้างระบบต้นแบบสำหรับการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอน ความเข้มต่ำโดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252
- 1.2.2 เพื่อพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอนความเข้มต่ำ

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์

- 1.3.1 ออกแบบและสร้างระบบต้นแบบสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ขนาด 10 - 40 ไมโครกรัม (5.35 – 21.39 มิลลิคูรี) ซึ่งรวมถึงการออกแบบระบบกำบังรังสี ระบบห่วงพลังงานนิวตรอน และนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron Collimator)
- 1.3.2 พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนความเข้มต่ำประมาณ $10^2 - 10^3$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที สำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 และฟิล์มถ่ายภาพความไวสูง
- 1.3.3 ตรวจสอบและเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับระบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปและจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยสำหรับชิ้นงานมาตรฐาน
- 1.3.4 ทดลองถ่ายภาพชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์ หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิด

1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ออกแบบและสร้างระบบต้นแบบสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252
- 1.4.3 ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนความเข้มต่ำประมาณ $10^2 - 10^3$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีสำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 และฟิล์มถ่ายภาพความไวสูง
- 1.4.4 หาค่าเอกซโพเชอร์ (Exposure time) สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเทคนิคที่พัฒนาขึ้น

- 1.4.5 ถ่ายภาพชิ้นงานมาตรฐานเพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับระบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไป และจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย
- 1.4.6 ถ่ายภาพชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์ หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิด
- 1.4.7 สรุปผลการวิจัยและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้

ได้ระบบต้นแบบและเทคนิคสำหรับการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำที่สามารถนำไปใช้กับการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลายในอุตสาหกรรมได้

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2541 ทิพาพร อติกานต์กุล^[1] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ ได้พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคปกติที่ใช้กันอยู่ พบว่าเทคนิคพีรี-เอกซ์โพสิเจอร์ ใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส พีรี-เอกซ์โพสิเจอร์ด้วยแสงจากเครื่องขยายภาพเป็นเวลา 0.4 ถึง 1.0 วินาที สามารถลดระยะเวลาในการถ่ายภาพได้ถึง 50% การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่อุณหภูมิ -20 ถึง -40 องศาเซลเซียส โดยในใช้นิโตรเจนเหลวในการหล่อเย็นฟิล์มและฉาก ให้ภาพที่มีความดำสูงกว่าภาพโดยเทคนิคปกติเกือบ 2 เท่า การถ่ายภาพด้วยฟิล์มฟูจิ เอฟพี-3000บี สามารถลดระยะเวลาในการถ่ายภาพได้ถึง 20 เท่า และใช้เวลาในกระบวนการสร้างภาพเพียง 15 วินาที ส่วนการถ่ายภาพด้วยเทคนิคกล้องถ่ายภาพแบบทันทีภาพด้วยฟิล์มฟูจิ นีโอแพน 1600 ถ่ายภาพนาน 5 วัน พบว่าไม่เกิดภาพบนฟิล์ม แต่ได้ภาพถ่ายที่มีคุณสมบัติเมื่อใช้นิวตรอนที่มีความเข้ม 7.85×10^5 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 และรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

2. ปี 2523 ประสม สุขสว่าง^[2] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การศึกษาวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นการออกแบบอุปกรณ์เพื่อใช้งานถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเป็นแหล่งกำเนิดเทอร์มัลนิวตรอน และความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอน ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน คือ 2.91×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที วิธีการถ่ายภาพโดยตรงใช้แผ่นเพิ่มความเข้มแกโดลิเนียมวางให้แนบสนิทข้างหลังฟิล์ม ผลการตรวจสอบสามารถเห็นดินสอกระสุนที่บรรจุอยู่ในลูกปืนได้เป็นอย่างดี การถ่ายภาพโดยวิธีถ่ายทอดใช้แผ่นเพิ่มความเข้มอินเดียม และแผ่นเพิ่มความเข้มดิสโพรเซียม ซึ่งจากการทดลอง สามารถเห็นรายละเอียดโครงสร้างภายในของต้นกำเนิดรังสีอิริเดียม-192 ได้อย่างชัดเจน

3. ปี 2538 ศศิพันธุ์ ฤ สงขลา^[3] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นการพัฒนาจากสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ฉากที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยสารเรืองรังสี คือ สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) และสารดูดกลืนนิวตรอน คือลิเทียมเมตาบอเรต โดยมีไอโซบิวทิวอาซิเตตและอะซิโตน เป็นสารยึดเหนี่ยว และได้ทดสอบฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอนที่ผลิตขึ้น โดยทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปปว.-1/1) เปรียบเทียบภาพถ่ายกับ ภาพถ่ายที่ได้จากฉากเรืองรังสีชนิด NE426 และ $Gd_2O_2S(Tb)$ รวมทั้งฉากโลหะแกดโดลิเนียม พบว่าภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากที่พัฒนาขึ้น มีค่าความดำบนแผ่นฟิล์มความไวในการเกิดภาพ และรีโซลูชันของภาพเป็นที่น่าพอใจ

4. ปี 2532 G. L. Baheti และคณะ^[4] ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Optimization Techniques in Low-Flux Neutron Radiography เป็นงานวิจัยเพื่อหาความหนาของสารหน่วงนิวตรอน ความยาวของแคดเมียมในนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ และตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่เหมาะสม พบว่าฟลักซ์จะสูงที่สุดที่ความหนาของสารหน่วงนิวตรอนเท่ากับ 2 เซนติเมตร และตำแหน่งของต้นกำเนิดรังสีอยู่ในแนวเดียวกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคพีเอ็กซ์โพเชอร์ที่ความดำ 0.8 จะช่วยลดระยะเวลาในการถ่ายภาพลง 1/3 ถึง 2/3 ของเวลาเดิม

5. ปี 2544 A.X. da Silva และ V.R. Crispim^[5] ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Study of a neutron radiography system using ^{252}Cf neutron source. เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับสารหน่วงนิวตรอนและนิวตรอนคอลลิเมเตอร์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้ต้นกำเนิดเป็น ^{252}Cf โดยใช้ Monte Carlo (MCNP) ช่วยในการหาฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนและความสม่ำเสมอของฟลักซ์นิวตรอนที่ทางออกจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์สู่แผ่นบันทึกภาพ ในการทดสอบสารหน่วงนิวตรอนต่างชนิดกันจะได้ว่าโพสิเอทีลีนความเข้มข้นสูงมีผลมากที่สุด ซึ่งมีค่าเทอร์มัลไรเซชัน (Thermalization factor) เท่ากับ 56 cm^2 ในการออกแบบส่วนประกอบของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ มีโอกาสเป็นไปได้ที่จะมีค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ เมื่อมีการเทียบค่าแล้วคือ $6 \times 10^{-6} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ต่อนิวตรอนจากต้นกำเนิด ที่ค่า collimator ratio คือ 7.5 หรือ มีค่าฟลักซ์ $3.2 \times 10^{-7} \text{ n cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ต่อนิวตรอนจากต้นกำเนิด ที่ค่า collimator ratio คือ 50

6. ปี 2526 Nobuo WADA และคณะ^[6] ได้เสนองานวิจัยเรื่อง Neutron and gamma simultaneous radiography using a ^{252}Cf isotope neutron source. เป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับการใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนเพื่อถ่ายภาพด้วยนิวตรอนและรังสีแกมมาไปพร้อมกัน ซึ่งการ

บังคับลำรังสีแกมมาคล้ายกับการบังคับลำนิวตรอน ภายในตลับใส่ฟิล์มจะประกอบไปด้วยฟิล์มสำหรับถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาที่ประกบด้วยฉากเพิ่มความเข้มแสง และฟิล์มสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ประกบด้วยฉากเปลี่ยนนิวตรอน และนำไปถ่ายภาพในเวลาเดียวกัน ได้ภาพถ่ายทั้งรังสีแกมมาและนิวตรอนเป็นที่น่าพอใจ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีนี้ใช้ต้นกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf ขนาด 1 mg ซึ่งจะเป็นพื้นฐานสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่สามารถเคลื่อนย้ายได้



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 บทนำ

การพัฒนาาระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในงานวิจัยนี้ได้ใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปบริสุทธิ์ เพื่อให้เข้าใจถึงต้นกำเนิดนิวตรอนที่นำมาใช้งานจึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติและข้อมูลสำคัญที่เกี่ยวกับนิวตรอนเสียก่อน โดยใน ส่วนนี้จะกล่าวถึงนิวตรอนโดยแบ่งเป็นหัวข้อต่างๆ ดังนี้คือ คุณสมบัติของนิวตรอน ชนิดของนิวตรอน อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร ภาคตัดขวางของนิวตรอน และการลดพลังงานของนิวตรอน

2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนถูกค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick)^[7] นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2475 ซึ่งได้ทำการทดลองโดยนำแผ่นพอลโลเนียม (Polonium foil) มารวมไว้กับเบริลเลียม (Beryllium) เมื่ออนุภาคอัลฟาที่ปลดปล่อยออกจากพอลโลเนียมเข้าชนกับแผ่นเบริลเลียม มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมาซึ่งเรียกว่า อนุภาคนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนเป็นอนุภาคมูลฐาน (Elementary particles) ชนิดหนึ่ง ซึ่งอยู่รวมกับโปรตอนเป็นนิวเคลียสอยู่ที่ศูนย์กลางของอะตอม โดยมีอิเล็กตรอนอยู่รอบนอก อนุภาคนิวตรอนใช้สัญลักษณ์แทนด้วย ${}_0^1n$ มีมวล 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit, amu) หรือ 1.67492×10^{-27} กิโลกรัม^[8] มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางจึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตอน อนุภาคอิเล็กตรอนหรืออนุภาคบีตา และอนุภาคแอนตินิวตริโน โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที

2.1.2 ชนิดของนิวตรอน

นิวตรอนไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ เนื่องจากเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุแต่สามารถเลือกช่วงพลังงานในการใช้งานได้ด้วยการหน่วงนิวตรอน (Neutron moderation) ซึ่งเป็นการลดพลังงานของนิวตรอนจากพลังงานตั้งต้น โดยการให้นิวตรอนชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ และโพลีเอทีลีน เป็นต้น อนุภาคนิวตรอนแบ่งตามระดับพลังงานได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งอาจมีช่วงพลังงานที่เหลื่อมกัน

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน^[9]

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	0 eV – 10^3 eV
นิวตรอนเย็น (Cold neutron)	< 0.01 eV
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	0.01 eV – 0.3 eV
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)	0.3 eV – 10^4 eV
เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron)	1eV – 10^2 eV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	10^3 eV – 20 MeV
นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron)	>20 MeV

2.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงไม่เกิดปฏิกิริยากับอิเล็กตรอน เมื่อชนกับอะตอมจะไม่ได้รับผลจากอิเล็กตรอนหรือจากประจุบวกในนิวเคลียส นิวตรอนจึงผ่านกลุ่มอิเล็กตรอนเข้าทำอันตรกิริยาโดยตรงกับนิวเคลียส

นิวตรอนสามารถทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสได้หลายแบบดังนี้

2.1.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) การชนแบบนี้นิวตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่สภาวะปกติ (Ground state) แล้วนิวตรอนกระเจิง (Scatter) ออกมาโดยที่เปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ที่สถานะพื้น การชนกับนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางแบบนี้เป็นเพียงการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสของตัวกลางก่อนชนและหลังชนมีค่าคงที่ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการหน่วงพลังงานนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า บางครั้งเรียกว่า Potential scattering สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n,n)

2.1.3.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมแบบนี้มีลักษณะการชนคล้ายแบบยืดหยุ่น แต่นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชน กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) แล้วปลดปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสลดพลังงานกลับสู่สภาวะปกติ จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ในอันตรกิริยานี้ พลังงานจลน์รวมก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลงเนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปของรังสีแกมมา การชนแบบไม่ยืดหยุ่นเป็น Threshold reaction คือ

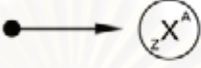




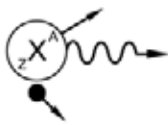


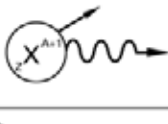


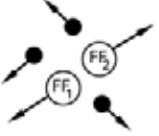


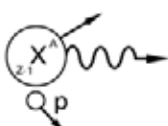


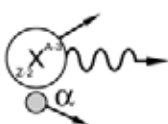






นิวตรอนจะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ อันตรกิริยานี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นลบ เป็นอันตรกิริยาที่มีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าเช่นกัน สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้ คือ (n,n')

2.1.3.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture หรือ radiative capture) หรือปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) อันตรกิริยานิวตรอนจะถูกจับโดยนิวเคลียสของตัวกลางกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) ทำให้นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีพลังงานสูงกว่าสภาวะปกติ จึงปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า Captured gamma – rays หรือ Neutron captured gamma – ray ซึ่งอาจมี 1 ตัวหรือมากกว่า อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนทุกปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยาชนิดคายพลังงาน (Exothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกิริยาเป็นบวก เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) ของนิวเคลียสใหม่มากกว่าพลังงานนิวเคลียสเดิมรวมกับของนิวตรอนเสมอ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis, NAA) สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ (n,γ)

2.1.3.4 ปฏิกิริยาแตกตัวหรือปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-233 ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีพลังงานของนิวตรอนตัวสุดท้ายสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบแตกตัวเป็น 2 ส่วน ได้นิวเคลียสที่มีมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับให้อนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) นิยมใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,f)

2.1.3.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge – particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบแล้วจะปลดปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น อนุภาคอัลฟา โปรตอน ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุนี้มีทั้งแบบปฏิกิริยาชนิดคายพลังงาน และปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน แต่เกิดปฏิกิริยาชนิดคายพลังงานน้อย ได้แก่ปฏิกิริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 (^{10}B) และปฏิกิริยาของนิวตรอนกับลิเทียม-6 (^6Li) ซึ่งมีความสำคัญในเรื่องการวัดนิวตรอนและการกำบังนิวตรอน

2.1.3.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron – producing reaction) ปฏิกิริยานี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 10 MeV เพราะต้องตั้งอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยาจะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา $(n,2n)$ ปฏิกิริยา $(n,3n)$

Reaction	Before	Intermediate	After
Elastic Scattering	(n,n) 		
Inelastic Scattering (n,n') or (n,n',γ)	(n,n') 		
Capture (Radiative Capture) (n,γ) or $(n,n'\gamma)$	(n,γ) 		
Fission	(n,f) 		
Charged Particle Emission	(n,p) 		
	(n,α) 		
Neutron Production	$(n,2n)$ 		
	$(n,3n)$ 		

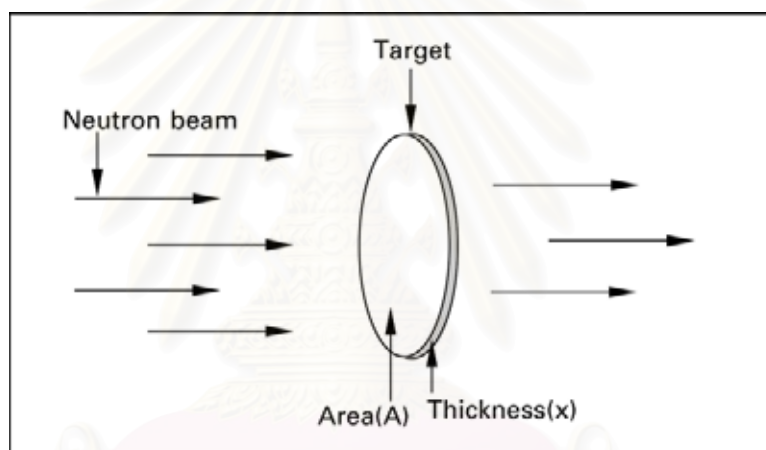
รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ

2.1.4 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลาง แสดงในเทอมของปริมาณที่เรียกว่า ภาคตัดขวาง (Cross section) อธิบายได้โดย พิจารณาแผ่นวัสดุบางชนิดหนึ่ง มีพื้นที่หน้าตัด A มีความหนา x และมีความหนาแน่นอะตอม N อะตอมต่อหน่วยปริมาตร โดยมีลำนิวตรอน (Neutron beam) ตกกระทบ ดังรูปที่ 2.2 ถ้ามีนิวตรอนจำนวน n นิวตรอนต่อหน่วยปริมาตร และมีความเร็ว v ดังนั้น

$$I = nv \quad (2.1)^{[8]}$$

เมื่อ I คือความเข้มของลำนิวตรอน (Intensity of neutron beam)



รูปที่ 2.2 ลำนิวตรอนกระทบเป้า

ถ้า n มีหน่วยเป็นจำนวนนิวตรอนต่อลูกบาศก์เซนติเมตร v มีหน่วยเป็นเซนติเมตรต่อวินาที ดังนั้น I จะมีหน่วยเป็น จำนวนนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (neutron/cm²-sec)

จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้า พื้นที่ A ต่อวินาที เท่ากับ IA แต่จำนวนนิวตรอนที่วิ่งผ่านเป้าไม่ได้ทำอันตรกิริยากับอะตอมของเป้าทุกตัว ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอม ความหนาของเป้า และค่าภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน ดังนั้นจำนวนอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคำนวณได้จาก

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma Ax \quad (2.2)^{[8]}$$

σ คือภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน นิยมใช้หน่วยเป็น บาร์น (barn) โดยที่ 1 บาร์น (b) มีค่า 10^{-24} ตารางเซนติเมตร

เนื่องจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารมีหลายแบบ ดังนั้นค่าภาคตัดขวาง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมจึงมีหลายค่า เช่นเดียวกัน ถ้าให้ σ_t เป็นภาคตัดขวางรวม (Total cross section) ของนิวเคลียสชนิดหนึ่งต่อนิวตรอน จะได้

$$\sigma_t = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n')} + \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,f)} + \dots \quad (2.3)$$

เมื่อ $\sigma_{(n,n)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,n')}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการชนแบบไม่ยืดหยุ่น

$\sigma_{(n,\gamma)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแบบจับนิวตรอน

$\sigma_{(n,\alpha)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคอัลฟา

$\sigma_{(n,p)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคโปรตอน

$\sigma_{(n,f)}$ คือ ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาแตกตัว

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก กลุ่มแรก คือ ภาคตัดขวางการกระเจิง (Scattering cross section, σ_s) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่น กลุ่มที่สองคือ ภาคตัดขวางการดูดกลืน (Absorption cross section, σ_a) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของอันตรกิริยาอื่นๆ นอกเหนือจากอันตรกิริยาในกลุ่มแรก

พิจารณาสมการ (2.2) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma_t Ax \quad (2.4)$$

เมื่อ Ax คือปริมาตรของเป้า

ดังนั้น จำนวนอันตรกิริยาต่อปริมาตรต่อวินาที ซึ่งเรียกว่าความหนาแน่นของอันตรกิริยา (Collision density, F) เขียนได้ดังนี้

$$F = IN\sigma_t \quad (2.5)$$

ผลคูณ $N\sigma$ ใช้สัญลักษณ์เป็น Σ เรียกว่าภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น cm^{-1} ผลคูณของ $N\sigma_i$ ในสมการ (2.5) จึงใช้สัญลักษณ์เป็น Σ_i เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาครวม (Macroscopic total cross section) และสามารถเขียนสมการ (2.5) ในเทอมของภาคตัดขวางมหภาครวม ได้เป็น

$$F = I\Sigma_t \quad (2.6)$$

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Sigma_{mix} &= \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots \\ \Sigma_{mix} &= N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots \end{aligned} \quad (2.7)$$

Σ_{mix} คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุ

$\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ...

ตามลำดับ

N_1, N_2, N_3, \dots คือ คือความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ...

ตามลำดับ

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทปหรือธาตุที่

1, 2, 3, ... ตามลำดับ

2.1.5 การลดพลังงานของนิวตรอน

นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีที่นำมาใช้มีพลังงานสูงอยู่ระหว่าง 2 MeV ถึง 14 MeV ในขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องการนิวตรอนในช่วงพลังงาน 0.01 ถึง 10 keV เท่านั้น จึงจำเป็นต้องลดพลังงานของนิวตรอนให้อยู่ในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้สารหน่วงนิวตรอน (Neutron moderator) ที่เหมาะสม ซึ่งมีภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ เบริลเลียม โพลีเอทีลีน

นิวตรอนเร็วที่ปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนถูกลดพลังงานลงโดยการชนกับตัวหน่วงนิวตรอนจะทำให้ความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน (Peak thermal neutron flux) ในตัวหน่วงนิวตรอนลดลงประมาณ 50 ถึง 500 เท่าของอัตราการผลิตนิวตรอนเร็วจาก

ต้นกำเนิด อัตราส่วนการลดลงของความเข้มข้นนิวตรอนนี้เรียกว่า “เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์” (Thermalization factor) โดย

$$\text{เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน (n/s)}}{\text{เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุดในสารหน่วงนิวตรอน (n/cm}^2\text{-s)}}$$

ค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้

(1) ชนิดของต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วต่างชนิดกันจะปลดปล่อยนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานต่างกัน ในสารหน่วงนิวตรอนชนิดเดียวกันต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าจะให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนสูงกว่า เมื่อมีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเท่ากัน ดังรูปที่ 2.3 และ 2.4

(2) ชนิดของสารหน่วงนิวตรอน

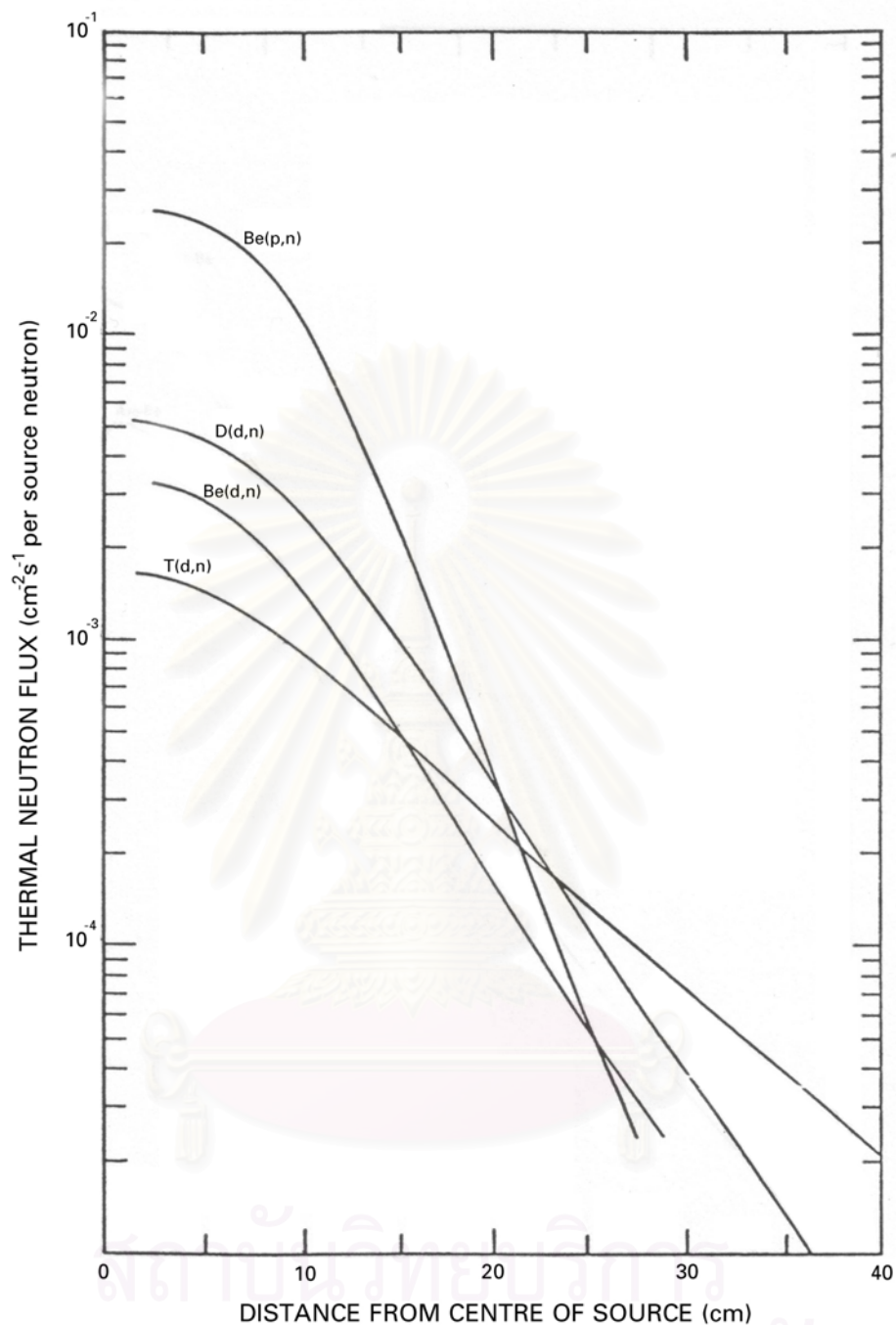
ธาตุที่สามารถหน่วงพลังงานนิวตรอนได้ดีที่สุดคือ ไฮโดรเจน ดังนั้น สารหน่วงนิวตรอนที่เป็นสารประกอบไฮโดรเจน ที่มีความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนสูง จะให้ความเข้มข้นสูงสุดของนิวตรอนช้าสูงกว่า ดังรูปที่ 2.5

ตารางที่ 2.2 ค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด^[9]

พลังงานนิวตรอน	ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน	เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์
0.024 MeV	¹²⁴ Sb-Be	⁹ Be(γ ,n)Be	50
2 MeV	²⁵² Cf	self fission	100
4.5 MeV	²⁴¹ Am-Be	⁹ Be(α ,n) ¹² C	200
6.5 MeV*	เครื่องเร่งอนุภาค	⁹ Be(d,n) ¹⁰ B	300
14 MeV**	เครื่องเร่งอนุภาค	³ T(d,n) ⁴ He	650

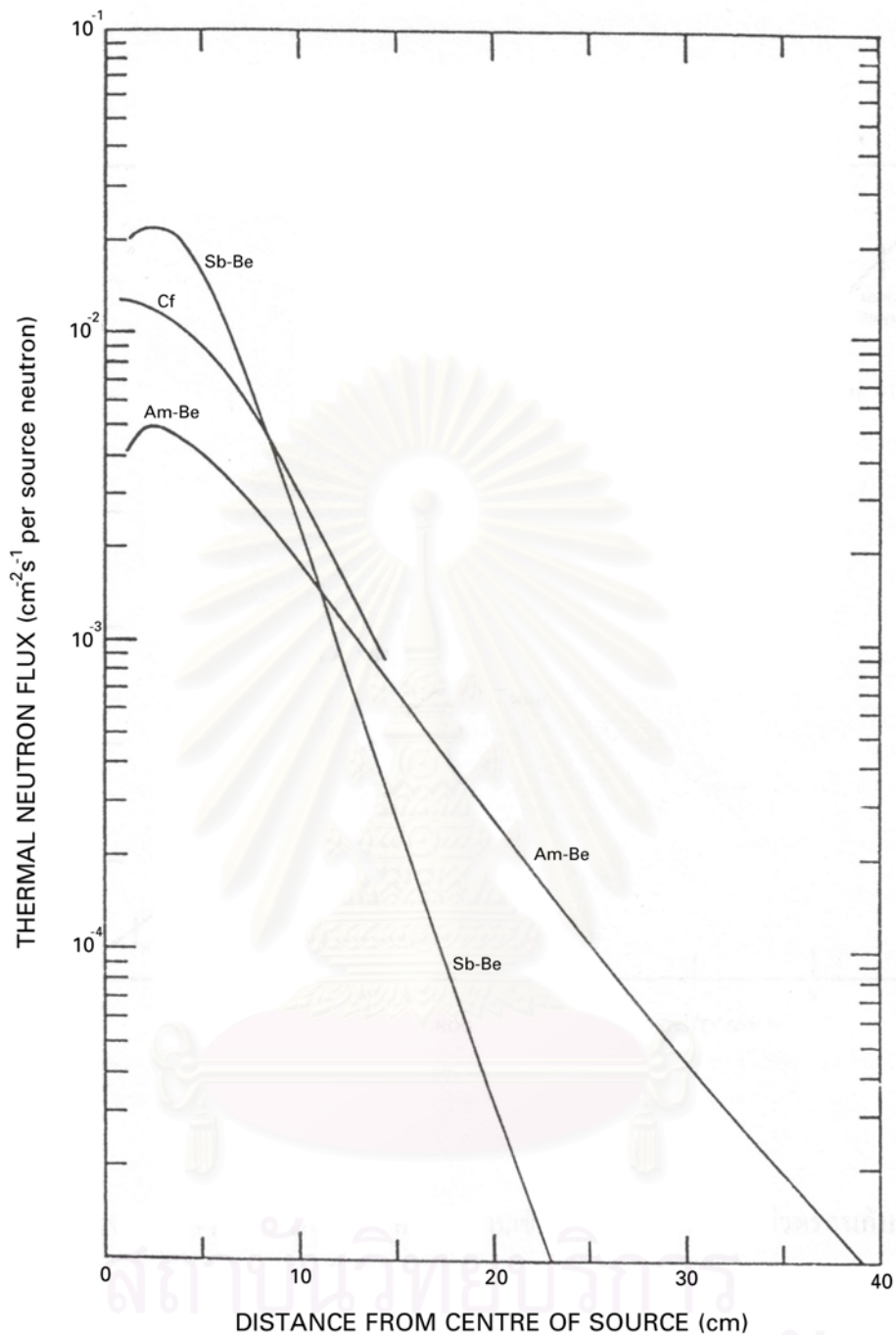
หมายเหตุ *เมื่อพลังงานของอนุภาคดีวทีรอนเท่ากับ 2.8 MeV

**เมื่อพลังงานของอนุภาคดีวทีรอนเท่ากับ 150 MeV



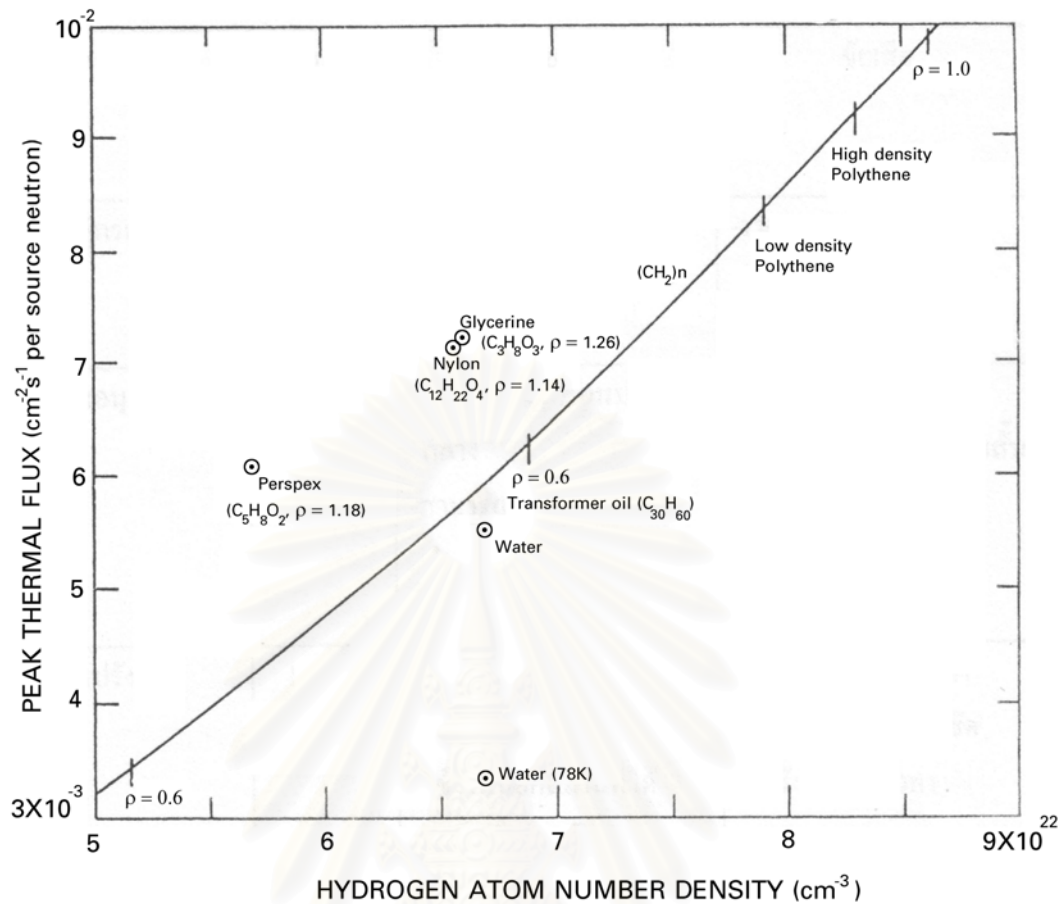
Thermal neutron flux distributions (experimental) produced by various accelerator neutron sources in a water moderator. The beryllium-target reactions refer to a bombarding ion energy of 2.8 MeV and a thick stainless-steel target chamber of 6 cm outside diameter, the hydrogen-target reactions refer to a bombarding energy of 150 keV and a light aluminium target chamber 2.5 cm in outside diameter.

รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค^[10]



Thermal neutron flux distributions (experimental) produced by various radioisotope neutron sources in a water moderator. The source strengths used were 0.05 Ci (Sb-Be), 10mCi (²⁵²Cf), and 1 Ci (Am-Be), the larger source required for neutron radiography will depress the normalized centre flux considerably in the case of Sb-Be and Am-Be but not in the case of ²⁵²Cf.

รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี^[10]



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนกับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนของตัวหน่วงนิวตรอน^[10]

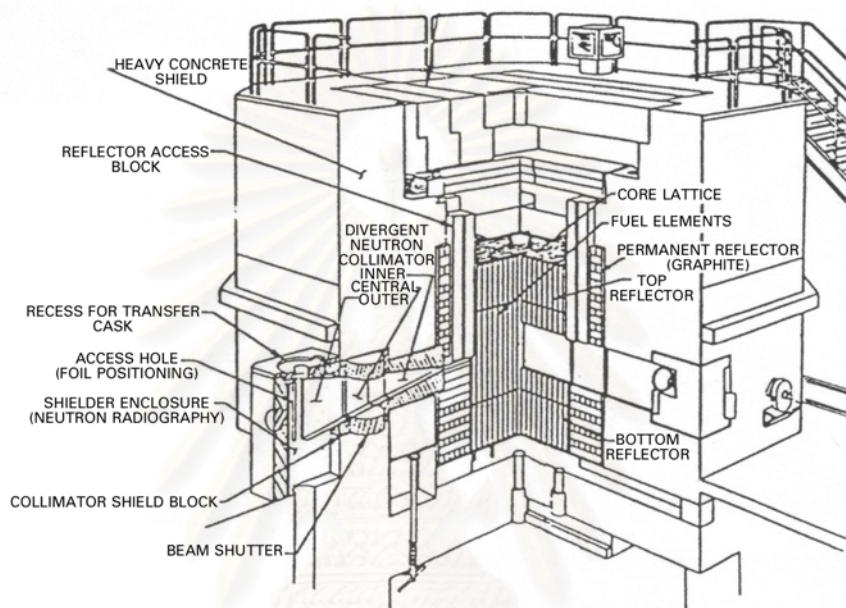
2.1.6 ต้นกำเนิดนิวตรอน

ลำนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแบ่งตามลักษณะและวิธีการปลดปล่อยนิวตรอนออกได้เป็น 3 ประเภท คือ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear Research Reactor) เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) และไอโซโทปรังสี (Radioisotopes)

2.1.6.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear Research Reactor)

ต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มของนิวตรอนสูงสุดโดยนิวตรอนที่ได้เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของ ยูเรเนียม-235 ซึ่งเป็นปฏิกิริยาแบบลูกโซ่ (Chain Reaction) พลังงานของนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวมีค่าประมาณ 2 MeV แล้วถูกลดพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งมีน้ำเป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอน การควบคุมปริมาณนิวตรอนที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์สามารถทำได้โดยการสอดแท่งควบคุมซึ่งทำจากวัสดุที่มีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนสูงเข้าไปในแกนปฏิกรณ์เพื่อควบคุมปฏิกิริยาลูกโซ่ และทำการปรับระยะการใส่

แห่งควบคุมให้เหมาะสมเพื่อรักษากำลังของเครื่องปฏิกรณ์ให้สม่ำเสมอ ความเข้มนิวตรอนหรือ นิวตรอนฟลักซ์ในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าประมาณ 10^2 นิวตรอนต่อตารางเมตรต่อวินาที เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ดีที่สุดและมีการใช้แพร่หลายที่สุดสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในปัจจุบัน เพราะสามารถนำนิวตรอนเข้าในช่วงความเข้มสูง 10^5 ถึง 10^8 นิวตรอนต่อ ตารางเซนติเมตรต่อวินาทีมาใช้ในการถ่ายภาพ จึงใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้นโดยให้ความคมชัดของภาพสูง



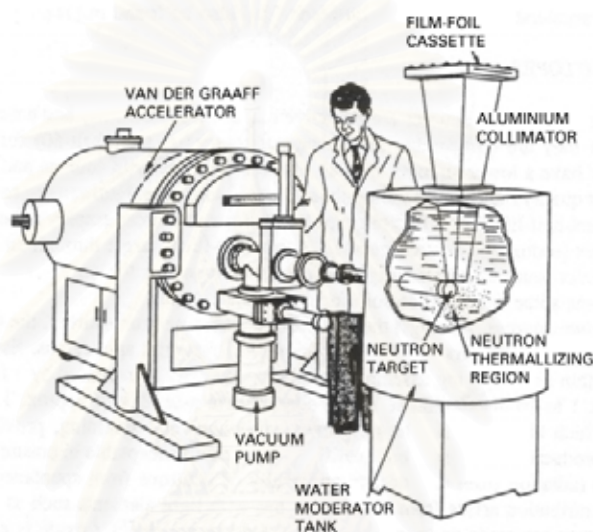
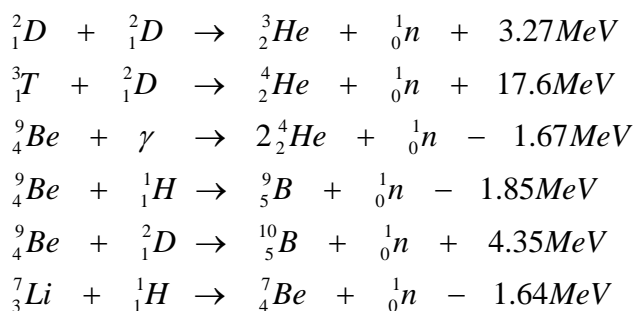
รูปที่ 2.6 ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู^[11]

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ได้แก่

- (1) แกนเครื่องปฏิกรณ์ (Reactor core)
- (2) นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator) ซึ่งบางครั้งรวมอยู่กับอุปกรณ์กรองนิวตรอน (Neutron filtering device)
- (3) ระบบชัตเตอร์ (Shutter system)
- (4) สถานที่สำหรับถ่ายภาพ รวมทั้งอุปกรณ์กำบังรังสี

2.1.6.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator)

เป็นเครื่องผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยอุปกรณ์ชนิดนี้ ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในการเร่งอนุภาคที่มีประจุหรือนิวเคลียสชนิดหนึ่งให้มีพลังงานสูงเพื่อไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่งที่เป็นเป้า (Target) แล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยนิวตรอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกมา ปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่



รูปที่ 2.7 อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้เครื่องเร่งอนุภาคแบบแวนเดอร์กราฟฟ์
เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน^[7]

เครื่องเร่งอนุภาคหลายประเภทถูกนำมาใช้เป็นเครื่องกำเนิดนิวตรอน (Neutron generator) เครื่องเร่งอนุภาคที่เป็นพื้นฐานของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็ว (Fast neutron generator) และอุปกรณ์สำหรับหน่วงนิวตรอนเร็ว เพื่อหน่วงนิวตรอนภายในนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เครื่องเร่งอนุภาคที่นิยมใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมากที่สุด ได้แก่

- (1) เครื่องเร่งอนุภาคศักดาไฟฟ้าต่ำ (Low voltage accelerator)
- (2) เครื่องเอกซเรย์พลังงานสูง (High energy x-ray machine)
- (3) เครื่องเร่งอนุภาคแวนเดอร์กราฟฟ์ (Van de Graaff accelerator)

- (4) เครื่องเร่งอนุภาคเชิงเส้นพลังงานสูง (High energy linear accelerator) และไซโคลตรอน (Cyclotrons)

2.1.6.3 ต้นกำเนิดแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotope neutron source)

มี 3 ประเภทได้แก่

(1) ประเภท (α, n)

เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตจากปฏิกิริยา (α, n) ประกอบด้วยไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคอัลฟา เช่น พอลโลเนียม-210 (^{210}Po) เรเดียม-226 (^{226}Ra) พลูโทเนียม-238 (^{238}Pu) อะเมริเชียม-241 (^{241}Am) โดยสลายตัวให้อนุภาคอัลฟาพลังงาน 4-6 MeV ผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำ เช่น เบริลเลียม และโบรอน โดยเฉพาะเบริลเลียม-9 เป็นไอโซโทปของธาตุเบริลเลียมที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV โดยทั่วไปจึงนิยมใช้เบริลเลียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ประมาณ 2.2×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของธาตุกัมมันตรังสี ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n) บางไอโซโทป แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n)^[7,10,12]

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต (Half-life)	นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี
$^{210}\text{Po}-\text{Be}$	138.00 วัน	3.0×10^6
$^{226}\text{Ra}-\text{Be}$	1,620.00 ปี	1.5×10^7
$^{238}\text{Pu}-\text{Be}$	86.40 ปี	2.2×10^6
$^{239}\text{Pu}-\text{Be}$	2.43 ปี	1.6×10^6
$^{241}\text{Am}-\text{Be}$	458.00 ปี	2.2×10^6

(2) ประเภท (γ, n)

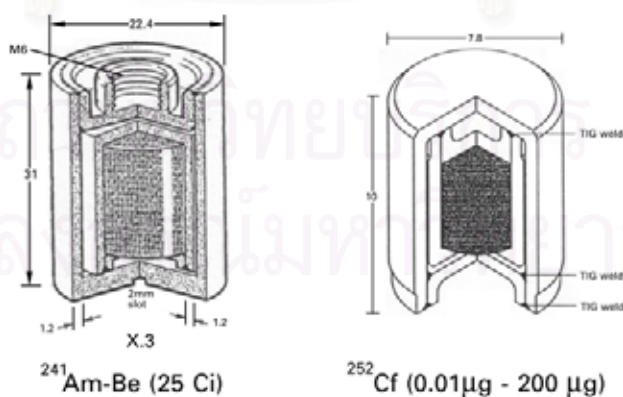
เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา (γ, n) โดยการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV ผสมกับเบริลเลียม เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบริลเลียม-9 จะมีนิวตรอนหลุดออกมา โดยปกติใช้พลวง-124 (Antimony-124, ^{124}Sb) ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.70 MeV ผสมกับเบริลเลียม อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี $^{124}\text{Sb}-\text{Be}$ ประมาณ 1.3×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี ของ ^{124}Sb ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้กันนักเนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมาก และมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน แต่สามารถผลิตขึ้นได้ง่ายจากการนำ ^{123}Sb ไปอาบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์

นิวเคลียร์เพื่อผลิต ^{124}Sb จากปฏิกิริยา $^{123}\text{Sb}(n,\gamma)^{124}\text{Sb}$ ถึงแม้ว่า ^{124}Sb สลายตัวเร็วก็สามารถนำไปอบรังสีนิวตรอนและนำกลับมาใช้ใหม่ได้

(3) ประเภทแตกตัวเอง (Self fission หรือ Spontaneous fission)

ต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ได้แก่ ธาตุหนักบางชนิดตั้งแต่ ทอเรียม ขึ้นไป ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง ลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะให้นิวตรอนออกมาครั้งละหลายตัว เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252, ^{252}Cf) ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี จะมีการสลายตัวด้วยการแตกตัวเองประมาณร้อยละ 3.2 การแตกตัวแต่ละครั้งจะปล่อยนิวตรอนออกมาเฉลี่ย 3.76 ตัว อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 สูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภท (α, n) และ (γ, n) คือประมาณ 4.3×10^9 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของแคลิฟอร์เนียม-252 หรือประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาที ต่อแคลิฟอร์เนียม-252 จำนวน 1 กรัม จากกราฟรูปที่ 2.4 สำหรับต้นกำเนิดรังสีแคลิฟอร์เนียม-252 ที่ระยะ 5 เซนติเมตร เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำมีค่าเท่ากับ 10^{-2} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ถ้าต้นกำเนิดรังสีแคลิฟอร์เนียม-252 มีความแรง 1 คูรี เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์จะมีค่าเท่ากับ $10^{-2} \times 4.3 \times 10^9 = 4.3 \times 10^7$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

นอกจากแคลิฟอร์เนียม-252 แล้ว ยังมีธาตุอื่นที่สามารถแตกตัวเองให้นิวตรอนได้ ได้แก่ พลูโทเนียม-236 (^{236}Pu) พลูโทเนียม-238 (^{238}Pu) ยูเรเนียม-238 (^{238}U) พลูโทเนียม-240 (^{240}Pu) พลูโทเนียม-242 (^{242}Pu) คูเรียม-242 (^{242}Cm) พลูโทเนียม-244 (^{244}Pu) คูเรียม-244 (^{244}Cm) และ แคลิฟอร์เนียม-254 (^{254}Cf)

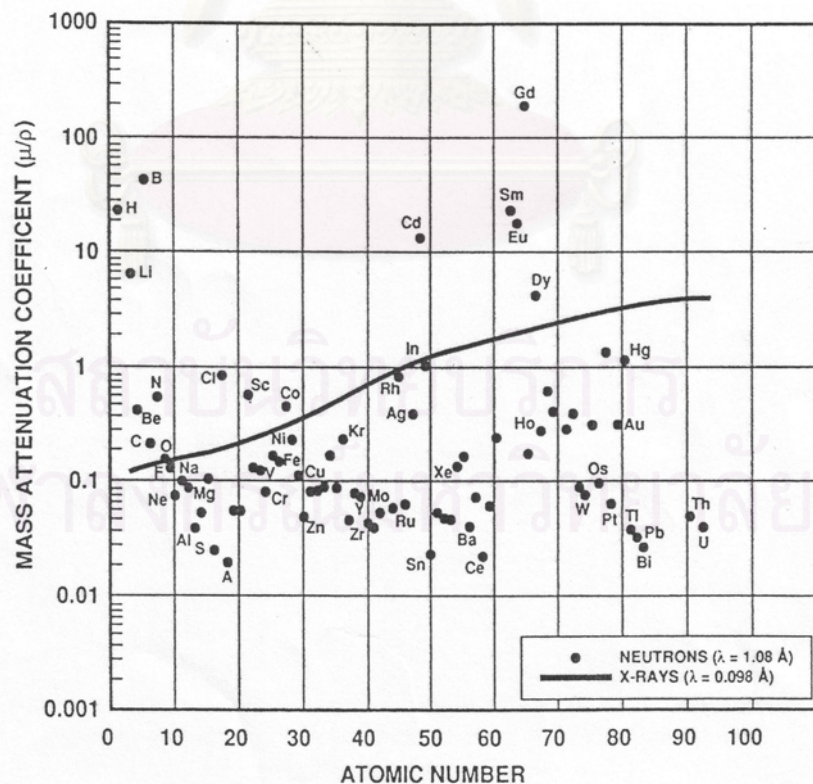


รูปที่ 2.8 ลักษณะของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{241}\text{Am-Be}$ และ ^{252}Cf [13]

2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron Radiography)

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารเกิดขึ้นที่นิวเคลียสของอะตอม สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลต่อนิวตรอนขึ้นกับภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวไคลด์ของแต่ละธาตุ ซึ่งไม่สัมพันธ์กับมวลอะตอม ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนและคุณสมบัติบางประการของธาตุแสดงในตารางที่ 2.4 ส่วนรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมากับสสารเกิดขึ้นที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีจึงขึ้นกับมวลอะตอมของธาตุ ซึ่งมีลักษณะแตกต่างจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารดังแสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงให้รายละเอียดของภาพแตกต่างจากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของนิวตรอนสำหรับไอโซโทปของธาตุเดียวกันยังมีค่าแตกต่างกันด้วย เพราะไอโซโทปของธาตุเดียวกันมีจำนวนโปรตอนเท่ากัน (เท่ากับอิเล็กตรอน) แต่มีจำนวนนิวตรอนต่างกัน จะทำอันตรกิริยากับนิวตรอนต่างกัน จึงทำให้การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสามารถแสดงความแตกต่างของไอโซโทปที่ต่างกันของธาตุได้ ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนสำหรับไอโซโทปบางชนิดแสดงในตารางที่ 2.5



รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุต่อนิวตรอนเปรียบเทียบกับรังสีเอกซ์^[14]

2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนอาศัยหลักการส่งผ่านลำนิวตรอนผ่านวัตถุตัวอย่าง แล้วบันทึกความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุออกมาเป็นภาพฉาย (Projection) ความเข้มของนิวตรอนเปลี่ยนไปเนื่องจาก อันตรกิริยาการดูดกลืน (Absorption) และการกระเจิง (Scattering) ระหว่างนิวตรอนกับวัตถุตัวอย่าง ความเข้มของนิวตรอนที่ลดลงขึ้นอยู่กับภาคตัดขวางของวัสดุ และความหนาของวัสดุภายในวัตถุตัวอย่าง ภาพถ่ายที่ได้จึงแสดงโครงสร้างภายใน ตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านวัตถุตัวอย่างออกมา ดังแสดงในรูปที่ 2.10

ตารางที่ 2.4 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนและคุณสมบัติบางประการของธาตุ^[7]

Atomic number	Element	Density g.cm ⁻³	Nuclei cm ⁻³ .10 ²⁴	Macroscopic cross-section, cm ⁻¹			Absorption coefficient cm ² .g ⁻¹		
				absorption	Scattering	Total	Absorption	Scattering	Total
1	H	8.99x10 ⁻⁵	5.37x10 ⁻⁵	1.7x10 ⁻⁵	2x10 ⁻³	10x10 ⁻³	0.189	22.2	22.38
2	He	1.78x10 ⁻⁴	2.68x10 ⁻⁵	2x10 ⁻⁷	2.1x10 ⁻³	2.1x10 ⁻⁵	0	0.1	0.1
3	Li	0.534	0.046	3.27	0.065	3.33	6.1	0.1	6.2
4	Be	1.84	0.123	1.24x10 ⁻³	0.865	0.865	0.0067	0.47	0.48
5	B	2.45	0.136	104.3	0.549	104.8	42.57	0.22	42.78
6	C	1.60	0.080	2.6x10 ⁻⁴	0.385	0.385	0.00018	0.24	0.24
7	N	1.25x10 ⁻³	5.38x10 ⁻⁵	9.9x10 ⁻⁴	5x10 ⁻⁴	6x10 ⁻⁴	0.081	0.43	0.51
8	O	1.43x10 ⁻³	5.38x10 ⁻⁵	-	2.1x10 ⁻⁴	2.1x10 ⁻⁴	<7x10 ⁻⁴	0.16	0.16
9	F	1.7x10 ⁻³	5.39x10 ⁻⁵	10 ⁻⁷	2x10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁴	<3x10 ⁻⁴	0.12	0.12
10	Ne	9.0x10 ⁻⁴	2.69x10 ⁻⁵	2.6x10 ⁻⁵	6.2x10 ⁻⁵	8.9x10 ⁻⁵	0.0009	0.072	0.073
11	Na	0.971	0.025	0.013	0.102	0.115	0.0139	0.10	0.11
12	Mg	1.74	0.043	3x10 ⁻³	0.155	0.158	0.0016	0.089	0.091
13	Al	2.7	0.060	1.4x10 ⁻²	8.4x10 ⁻²	9.8x10 ⁻²	0.0053	0.031	0.036
14	Si	2.35	0.050	7x10 ⁻³	8.9x10 ⁻²	9.6x10 ⁻²	0.0034	0.036	0.039
15	P	1.83	0.036	7x10 ⁻³	0.177	0.184	0.0039	0.10	0.10
16	S	2.1	0.040	1.9x10 ⁻²	4.3x10 ⁻²	6.2x10 ⁻²	0.0098	0.021	0.031
17	Cl	3.2x10 ⁻³	5.45x10 ⁻⁵	2x10 ⁻³	8x10 ⁻⁴	2.8x10 ⁻³	0.58	0.27	0.85
18	As	1.78x10 ⁻³	2.68x10 ⁻⁵	2.6x10 ⁻⁵	3.9x10 ⁻⁵	5.5x10 ⁻⁵	0.0099	0.02	0.03
19	K	0.87	0.013	2.6x10 ⁻³	2x10 ⁻³	4.8x10 ⁻³	0.0318	0.023	0.053
20	Ca	1.54	0.020	1x10 ⁻²	7x10 ⁻²	8x10 ⁻²	0.0066	0.046	0.053
21	Sc	3.0	0.034	1.089	0.941	1.59	0.36	0.31	0.67
22	Ti	4.5	0.057	0.328	0.226	0.555	0.072	0.05	0.12
23	V	5.96	0.071	0.359	0.352	0.711	0.059	0.059	0.118
24	Cr	6.92	0.080	0.238	0.247	0.485	0.036	0.035	0.071
25	Mn	7.42	0.081	1.04	0.181	1.22	0.141	0.025	0.166
26	Fe	7.86	0.085	0.215	0.933	1.15	0.0282	0.12	0.15
27	Co	8.71	0.089	3.38	0.509	3.89	0.38	0.57	0.44
28	Ni	8.75	0.090	0.42	1.6	2.02	0.047	0.18	0.23
29	Cu	8.94	0.085	0.313	0.611	0.924	0.036	0.068	0.104
30	Zn	7.14	0.066	7x10 ⁻²	0.237	0.307	0.0102	0.033	0.043
31	Ga	5.90	0.051	0.142	0.204	0.346	0.0241	0.036	0.060
32	Ge	5.46	0.045	0.105	0.134	0.239	0.02030	0.025	0.045
33	As	3.70	0.030	0.189	0.277	0.466	0.035	0.048	0.083
34	Se	4.5	0.034	0.431	0.403	0.835	0.089	0.084	0.173
35	Br	3.12	0.024	0.155	0.41	0.296	0.052	0.045	0.097
36	Kr	3.71x10 ⁻³	2.67x10 ⁻³	7.3x10 ⁻⁴	7x10 ⁻⁴	1.4x10 ⁻³	0.22	0.052	0.27
37	Rb	1.53	0.011	8x10 ⁻³	0.13	0.138	0.051	0.039	0.044
38	Sr	2.54	0.018	2x10 ⁻²	0.175	0.195	0.0083	0.069	0.077
39	Y	5.51	0.037	4.8x10 ⁻²	0.112	0.160	0.0089	0.0203	0.0292
40	Zr	6.44	0.043	8x10 ⁻³	0.338	0.346	0.0012	0.053	0.054
41	Nb	8.4	0.055	6x10 ⁻²	0.272	0.333	0.0075	0.032	0.039
42	Mo	10.2	0.064	0.16	0.448	0.608	0.017	0.044	0.061
43	Tc					0.13			
44	Ru	12.1	0.072	0.179	0.436	0.615	0.016	0.035	0.05
45	Rh	12.4	0.073	11	0.36	11.4	0.88	0.029	0.91
46	Pd	12.2	0.069	0.551	0.248	0.799	0.045	0.020	0.065

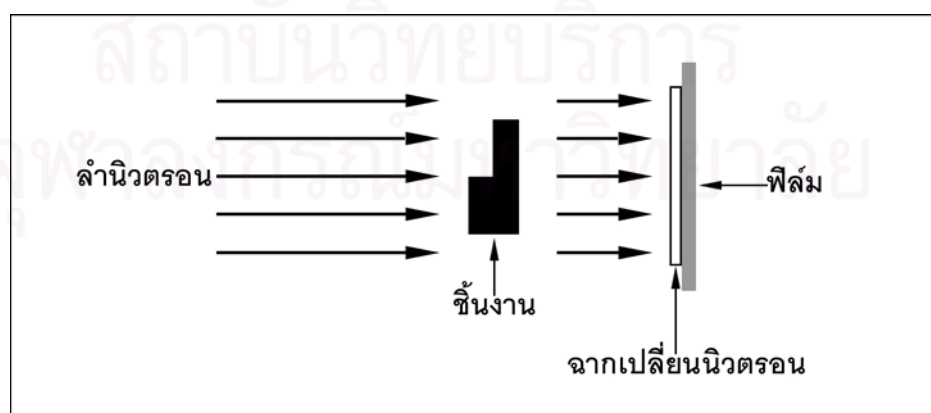
ตารางที่ 2.4 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนและคุณสมบัติบางประการของธาตุ (ต่อ)

Atomic number	Element	Density g.cm ⁻³	Nuclei cm ⁻³ .10 ²⁴	Macroscopic cross-section,cm ⁻¹			Absorption coefficient cm ² .g ⁻¹		
				absorption	Scattering	Total	Absorption	Scattering	Total
47	Ag	10.5	0.059	3.63	0.325	3.98	0.349	0.033	0.382
48	Cd	8.65	0.046	116.7	0.264	117.0	13.5	0.031	13.53
49	In	7.28	0.038	7.42	0.10	7.52	1.02	0.014	1.03
50	Sn	7.29	0.037	2x10 ⁻²	0.132	0.152	0.0031	0.020	0.023
51	Sb	6.22	0.031	0.182	0.142	0.324	0.0282	0.0213	0.0495
52	Te	6.02	0.028	0.133	0.148	0.281	0.0221	0.024	0.046
53	I	4.94	0.024	0.157	0.084	0.241	0.034	0.017	0.051
54	Ke	5.85x10 ⁻³	2.68x10 ⁻⁵	10 ⁻³	1.2x10 ⁻⁴	1.1x10 ⁻³	0.34	0.020	0.36
55	Cs	1.87	8.5x10 ⁻³	0.246	0.170	0.416	0.128	0.032	0.160
56	Ba	3.5	0.015	1.8x10 ⁻²	0.123	0.141	0.0052	0.035	0.040
57	La	6.15	0.027	0.239	0.403	0.642	0.0386	0.040	0.079
58	Ge	6.9	0.030	2.1x10 ⁻²	0.262	0.283	0.0031	0.012	0.015
59	Pr	6.48	0.028	0.324	0.116	0.44	0.048	0.017	0.065
60	Nd	6.96	0.029	1.33	0.464	1.79	0.208	0.066	0.274
61	Pm						0.249	-	0.249
62	Sm	7.54	0.032	170.78	0.56	172.8	23	-	23
63	Eu	5.22	0.021	96.6	0.168	96.8	18.5	0.032	18.53
64	Gd	7.95	0.031	1479	3.86	1482.8	187.2	0.74	188
65	Tb	8.33	0.032	1.39	-	1.39	0.18	-	0.18
66	Dy	8.56	0.032	29.8	2.86	32.7	3.5	0.34	0.384
67	Ho	8.76	0.032	2.078	0.275	2.353	0.236	0.031	0.267
68	Er	4.77	0.017	5.44	0.495	5.98	0.58	-	0.58
69	Tm	9.35	0.033	3.49	0.22	3.71	0.37	0.0237	0.40
70	Yb	7.01	0.024	0.878	0.293	1.17	0.128	0.04	0.17
71	Lu	9.74	0.036	3.62	-	3.62	0.38	-	0.38
72	Hf	13.3	0.045	4.71	0.359	5.07	0.341	0.27	0.61
73	Ta	16.6	0.055	1.18	0.277	1.46	0.070	0.017	0.087
74	W	18.9	0.062	2.21	0.316	1.53	0.063	0.016	0.079
75	Re	29.15	0.095	5.58	0.93	6.51	0.28	0.045	0.33
76	Os	22.5	0.073	1.05	0.783	1.83	0.049	0.049	0.098
77	Ir	22.4	0.078	30.2		30.2	1.37	-	1.37
78	Pt	21.4	0.066	0.535	0.660	1.19	0.027	0.031	0.058
79	Au	19.3	0.060	5.9	0.46	6.36	0.305	0.0238	0.329
80	Hg	13.6	0.041	14.7	0.814	15.5	1.12	0.06	1.18
81	Tl	11.9	0.035	0.115	0.489	0.604	0.010	0.041	0.051
82	Pb	11.1	0.033	6x10 ⁻³	0.363	0.369	4.9x10 ⁻⁴	0.032	0.032
83	Bi	9.7	0.028	10 ⁻³	0.264	0.265	9.8x10 ⁻⁵	0.026	0.026
84	Po	9.24	0.027						
85	At								
86	Rn	9.73x10 ⁻³	2.64x10 ⁻⁵						
87	Fr								
88	Ra	5	0.013	0.266		0.266	0.053	-	0.053
89	Ac						1.35	-	1.35
90	Th	11.5		0.205	0.366	0.571	0.019	0.032	0.051
91	P	15.4		10.4	-	10.4	0.675	-	0.675
92	U	18.7	0.047	0.364	0.397	0.761	0.0193	0.0209	0.0402

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.5 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV ของไอโซโทปบางชนิด^[15]

Element	A	%Abundance	σ_s	σ_a
Li	Natural		1.40	70.5000
	6	7.5	0.98	940.0000
	7	82.5	1.44	0.0454
B	Natural		5.01	767.000
	10	20	0.98	3837.000
	11	80	5.80	0.006
Al	27	100	1.506	0.231
Fe	Natural		11.66	2.560
	54	5.8	2.20	2.300
	56	91.72	12.80	2.600
	57	2.20	<1.00	2.500
	58	0.28	28.00	1.280
Cd	Natural		5.7	2520.00
	106	1.25		1.00
	108	0.89		1.10
	110	12.51		11.00
	111	12.81		24.00
	112	24.13	7.0	2.20
	113	12.22		20600.00
	114	28.72	5.3	0.34
	116	7.47	6.5	0.07
In	Natural		2.75	194.00
	113	4.28	3.80	12.00
	115	95.72	2.60	202.00
Gd	Natural			49000.00
	152	0.2		1100.00
	154	2.1		85.00
	155	14.8		60900.00
	156	20.6		1.50
	157	15.7		254000.00
	158	24.8		2.00
	160	21.8		0.77
Pb	Natural		11.11	0.1700
	204	1.4		0.6600
	206	24.1		0.0305
	207	22.1		0.7090
	208	52.4		0.0049



รูปที่ 2.10 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เมื่อนิวตรอนผ่านวัตถุตัวอย่างความเข้มของนิวตรอนจะลดลงตามภาคตัดขวางและความหนาของวัตถุ ดังสมการ

$$-\frac{d\phi}{dx} = \phi\sigma N \quad (2.8)$$

- เมื่อ ϕ คือ ความเข้มของนิวตรอน (Neutron intensity) หรือจำนวนนิวตรอนต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา ($n/cm^2 \cdot s$)
 x คือ ความหนาของวัตถุตัวอย่าง (cm)
 σ คือ ภาคตัดขวางจุลภาค
 N คือ จำนวนนิวไคลด์ต่อปริมาตร ($atom/cm^3$) ของธาตุในวัตถุตัวอย่าง

เขียนสมการที่ (2.8) ในรูปของเอกซโพเนนเชียลได้ ดังนี้

$$\phi = \phi_0 e^{-N\sigma x} \quad (2.9)$$

- เมื่อ ϕ คือ ความเข้มนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัตถุตัวอย่าง ($n/cm^2 \cdot s$)
 ϕ_0 คือ ความเข้มนิวตรอนที่ตกกระทบวัตถุตัวอย่าง ($n/cm^2 \cdot s$)

$$\phi = \phi_0 e^{-\Sigma x} \quad (2.10)$$

เมื่อ Σ คือภาคตัดขวางมหภาคเป็นค่าแสดงโอกาสในการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนของวัตถุขนาด 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร สำหรับวัตถุที่มีความหนาแน่น ρ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร (g/cm^3) จะมีสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient) เป็น

$$\mu_m = \frac{\Sigma}{\rho} \quad (2.11)$$

2.2.2 ส่วนประกอบสำคัญของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญดังนี้

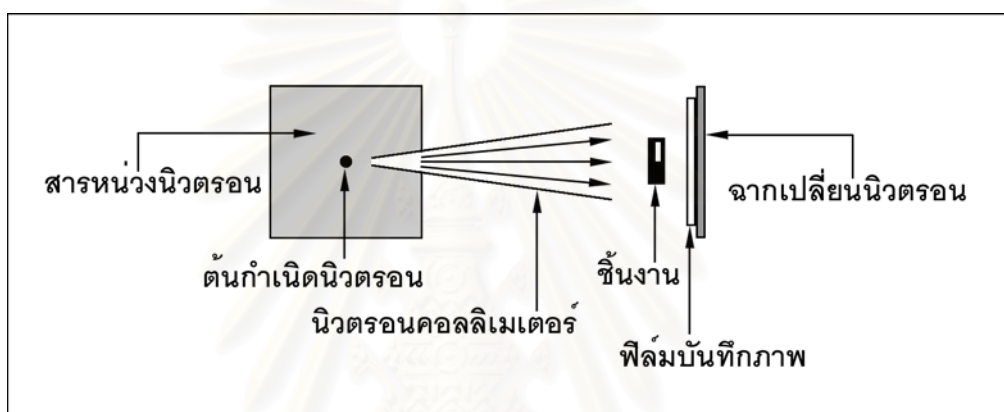
- (1) ระบบผลิตนิวตรอนช้า ประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วชนิดใดชนิดหนึ่งและสารหน่วงนิวตรอน (Neutron moderator) ทำหน้าที่ลดพลังงานหรือความเร็วของนิวตรอนเร็ว

ให้เป็นนิวตรอนช้า เนื่องจากนิวตรอนที่ได้จากต้นกำเนิดนิวตรอนมีพลังงานสูงมาก ในขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องการนิวตรอนพลังงาน 0.03-10 keV เท่านั้น

(2) นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator) คือท่อสำหรับนำลำนิวตรอนออกมากจากระบบผลิตนิวตรอนช้าเพื่อใช้ในการถ่ายภาพ

(3) ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen) ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมาให้เป็นแสง รังสี หรืออนุภาคที่เหมาะสมกับอุปกรณ์บันทึกภาพ

(4) ฟิล์มและอุปกรณ์บันทึกภาพ ทำหน้าที่บันทึกภาพหรือแสดงภาพ ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมาได้



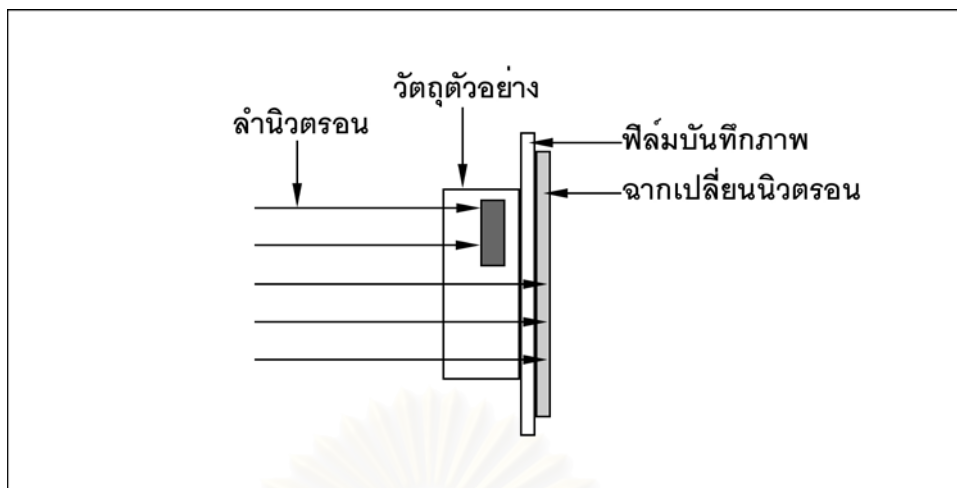
รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบสำคัญของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

2.2.3 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแบ่งตามกระบวนการในการบันทึกภาพได้หลายวิธี แต่จะวิธีใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนและการบันทึกภาพที่แตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีการในการถ่ายภาพขึ้นอยู่กับฟลักซ์ของนิวตรอน พลังงานของนิวตรอน วัตถุประสงค์อย่างที่ต้องการถ่ายภาพ ความแรงของรังสีแกมมาบริเวณที่ทำการถ่ายภาพ ความเร็วที่ต้องการทราบผล และคุณภาพของภาพถ่าย เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแยกตามวิธีการในการบันทึกภาพได้ 3 วิธีใหญ่ๆ ดังนี้

2.2.3.1 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง (Direct technique)

เป็นการถ่ายภาพโดยวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนประกบไว้ด้านหลังฟิล์มบันทึกภาพ ในบริเวณที่ลำนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่าน โดยมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการตรวจสอบวางไว้หน้าฟิล์มบันทึกภาพ ดังรูปที่ 2.12



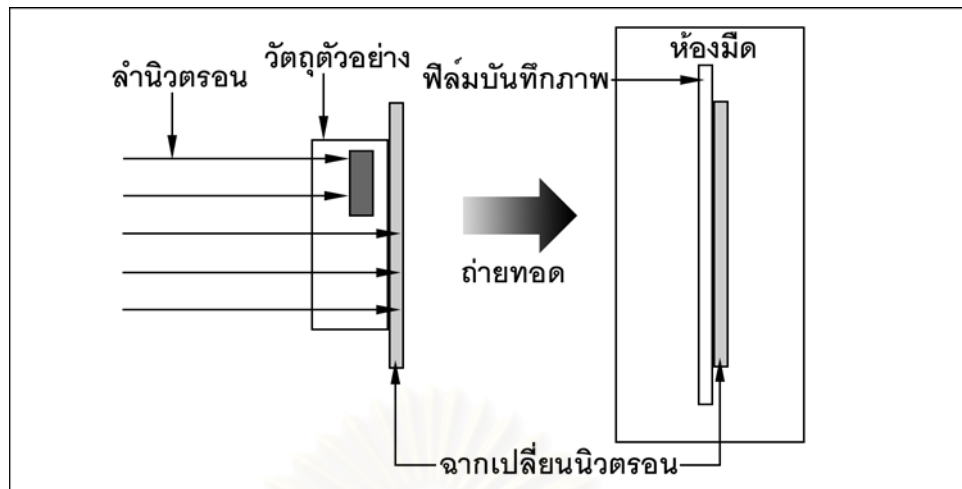
รูปที่ 2.12 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง

เมื่อลำนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านวัตถุและฟิล์มมาตกกระทบฉากเปลี่ยนนิวตรอน ฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะดูดกลืนนิวตรอน แล้วปลดปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมา ทำให้เกิดภาพแฝง (Latent image) บนแผ่นฟิล์ม ในขณะที่อยู่ในตำแหน่งของลำนิวตรอน ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้กับการถ่ายภาพโดยเทคนิคถ่ายตรงนี้ จึงเป็นชนิดที่ปลดปล่อยรังสีออกมาแบบฉับพลันเมื่อดูดกลืนนิวตรอน เช่น ฉากโลหะแกโดลิเนียม (Gd) ฉากโลหะแคดเมียม (Cd) และฉากเรืองแสง (Scintillation converter screen)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรงมีวิธีปฏิบัติง่าย และสามารถทราบผลได้รวดเร็ว แต่มีข้อจำกัดในกรณีที่ต้องการถ่ายภาพวัตถุที่มีกัมมันตภาพรังสีหรือในตำแหน่งที่ทำการถ่ายภาพมีรังสีแกมมาปะปนสูง ความเข้มของรังสีแกมมาจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้ฟิล์มชุ่นเนื่องจากรังสีแกมมา (Gamma fogged) ความเปรียบต่างและความคมชัดของภาพจึงลดลง

2.2.3.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด (Transfer technique)

เป็นการถ่ายภาพโดยวางเฉพาะฉากเปลี่ยนนิวตรอนไว้ด้านหลังวัตถุที่ต้องการตรวจสอบในบริเวณที่ลำนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่าน เมื่อลำนิวตรอนผ่านวัตถุและทำปฏิกิริยากับฉากเปลี่ยนนิวตรอน จะทำให้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนมีกัมมันตรังสี แล้วจึงนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนไปประกบกับฟิล์ม ดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นบริเวณที่ดูดกลืนนิวตรอนได้มากจะมีกัมมันตภาพรังสีสูง ทำให้ฟิล์มดำมาก และฉากเปลี่ยนนิวตรอนบริเวณที่ดูดกลืนนิวตรอนน้อยจะมีกัมมันตภาพรังสีต่ำ ทำให้ฟิล์มดำน้อย



รูปที่ 2.13 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพ

เมื่อฉากเปลี่ยนนิวตรอนได้รับนิวตรอนจะมีกัมมันตภาพรังสีเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ได้รับนิวตรอน สามารถคำนวณหาปริมาณกัมมันตภาพรังสีได้จาก

$$A = \phi N \sigma (1 - e^{-\lambda t}) \quad (2.12)$$

- เมื่อ A คือ กัมมันตภาพรังสีของฉากเปลี่ยนนิวตรอน
 ϕ คือ นิวตรอนฟลักซ์ที่ตกกระทบฉากเปลี่ยนนิวตรอน
 N คือ จำนวนอะตอมของธาตุที่นำมาใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน
 σ คือ ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยาของฉากเปลี่ยนนิวตรอน
 λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของธาตุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนเท่ากับ $0.693/T_{1/2}$
 เมื่อ $T_{1/2}$ คือค่าครึ่งชีวิตของธาตุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน
 t คือ เวลาในการอบรังสี (เวลาในการถ่ายภาพ)

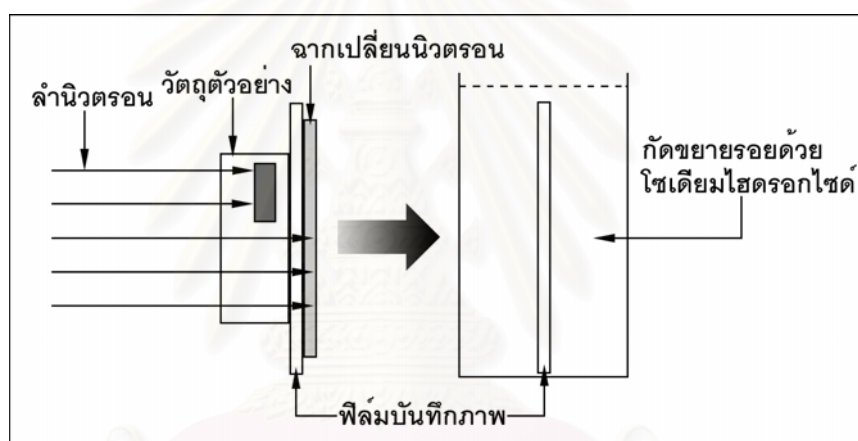
ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพนี้ ต้องใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีคุณสมบัติปลดปล่อยกัมมันตภาพรังสี เมื่อได้รับนิวตรอน ซึ่งได้แก่ ฉากโลหะดีสโพรเซียม (Dy) ฉากโลหะอินเดียม (In) และฉากโลหะทอง (Au) เป็นต้น ส่วนฟิล์มที่ใช้ในการบันทึกภาพจำเป็นต้องใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ชนิดความไวสูง (High speed film) เนื่องจากรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากโลหะแต่ละชนิดมีกัมมันตภาพรังสีจำกัด ตามครึ่งชีวิตของแต่ละไอโซโทป

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีนี้มีประโยชน์ในการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีกัมมันตภาพรังสีเช่น ต้นกำเนิดรังสีต่างๆ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และสามารถถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในบริเวณที่มีปริมาณรังสีแกมมาสูงๆ ได้ เนื่องจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนไม่เกิดปฏิกิริยากับรังสีแกมมา

2.2.3.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ (Track-etch technique)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ มีกระบวนการคล้ายกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง แต่ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่างกัน การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์อาศัยหลักการที่ไอออน (อนุภาคมีประจุ) พลังงานสูงวิ่งผ่านวัสดุบางชนิด เช่น ไมกา แก้ว และ พลาสติก แล้วทำให้วัสดุนั้นๆ เกิดรอย (Track) ถ้านำวัสดุนั้นไปกัดขยายรอย (Etching) ด้วยสารละลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นรอยชัดเจนขึ้น

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ผลิตจากวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคอัลฟา ส่วนฟิล์มบันทึกภาพ ใช้ฟิล์มพลาสติก เช่นฟิล์มไนโตรเซลลูโลส หรือ ฟิล์มโพลีคาร์บอเนต



รูปที่ 2.14 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์

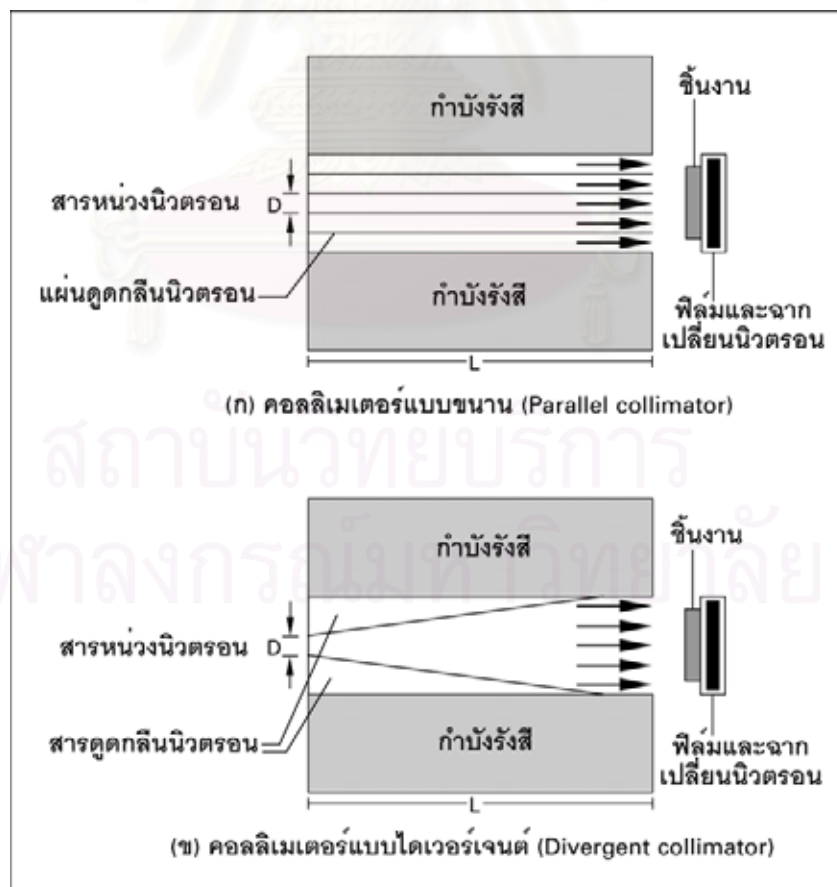
การกัดขยายรอยฟิล์มพลาสติกชนิดไนโตรเซลลูโลสและโพลีคาร์บอเนต ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2.5 นอร์มัล (2.5 N NaOH) กัดขยายรอย อุณหภูมิในการกัดขยายรอย 60 องศาเซลเซียส นาน 30 นาที จากนั้นใช้น้ำสะอาดล้างสารละลายออก และหากจำเป็นก็สามารถนำมากัดขยายรอยได้อีกส่วนวัสดุไมกาและแก้วใช้กรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) หรือกรดกัดแก้ว เป็นสารกัดขยายรอยอนุภาค

เนื่องจากฟิล์มบันทึกภาพที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ไม่ไวต่อรังสีแกมมา จึงสามารถถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างที่มีกัมมันตภาพรังสีหรือถ่ายภาพในบริเวณที่มีรังสีแกมมาสูงได้ เช่นเดียวกับเทคนิคถ่ายทอดแต่มีข้อดีกว่า คือ ใช้เวลาน้อยกว่า เนื่องจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง และผู้ปฏิบัติงานไม่ได้รับรังสีจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน นอกจากนี้ยังสามารถอ่านฟิล์มและบันทึกภาพได้หลายระดับ เนื่องจากสามารถล้างฟิล์มเดิมซ้ำได้หลายครั้ง

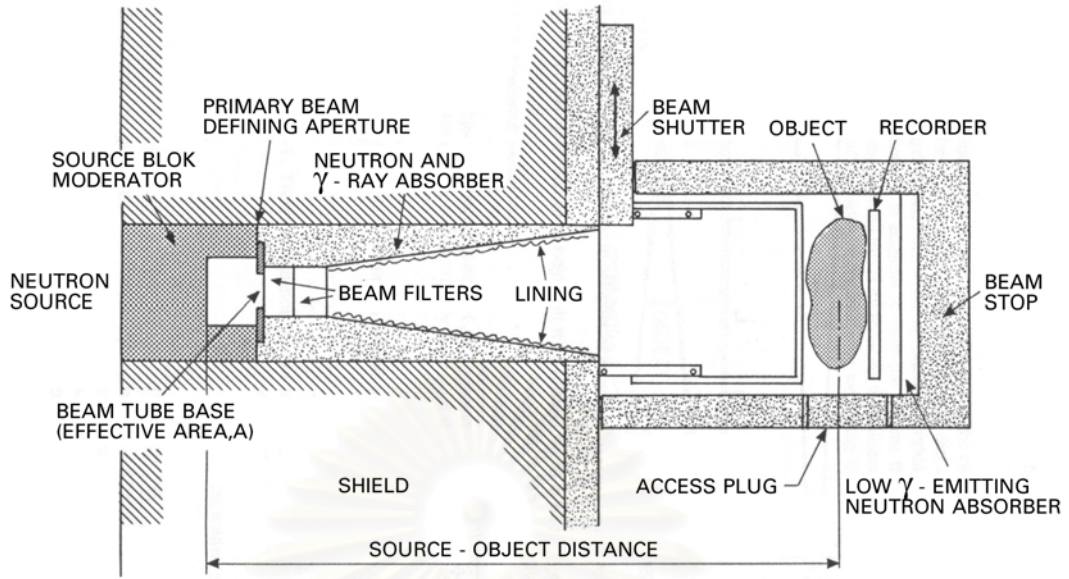
2.3 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator)

นิวตรอนคอลลิเมเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นำลำนิวตรอนจากระบบห่วงพลังงานนิวตรอน (Neutron moderation system) ของต้นกำเนิดนิวตรอนออกมาใช้ในการถ่ายภาพ ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อาจมีลักษณะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.15 แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เรียกว่า ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ (Divergent collimator)

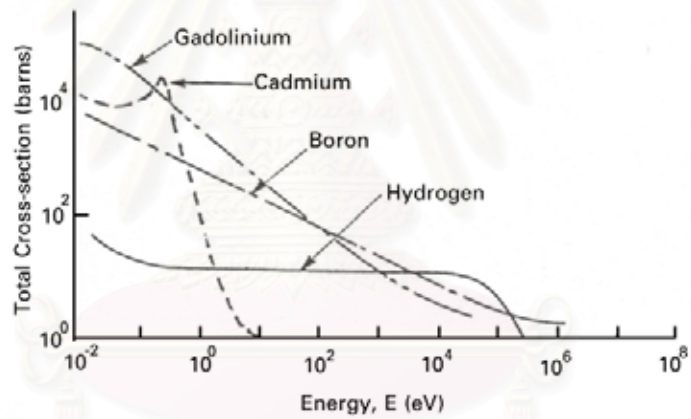
ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ มีลักษณะเป็นกรวยหรือพีรามิดตัด ปลายด้านที่อยู่ในสารห่วงนิวตรอนมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าด้านนอกที่อยู่ใกล้ชิ้นงาน โดยพื้นที่หน้าตัดอาจเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้า หรือวงกลม ผนังของคอลลิเมเตอร์ผสมด้วยสารดูดจับนิวตรอน เช่น โบรอน ลิเทียม แคลเดียม แกโดลิเนียม เพื่อดูดจับนิวตรอนไม่ให้เข้าสู่คอลลิเมเตอร์ทางด้านข้าง และผนังด้านในของคอลลิเมเตอร์อาจฉาบด้วยสารดูดจับนิวตรอนเพื่อดูดจับนิวตรอนในคอลลิเมเตอร์ที่ชนผนังไม่ให้กระเจิงกลับเข้าไปในคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่วิ่งออกมาตามแนวแกนนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ในลักษณะลำแสงที่บานออกวิ่งไปกระทบชิ้นงาน



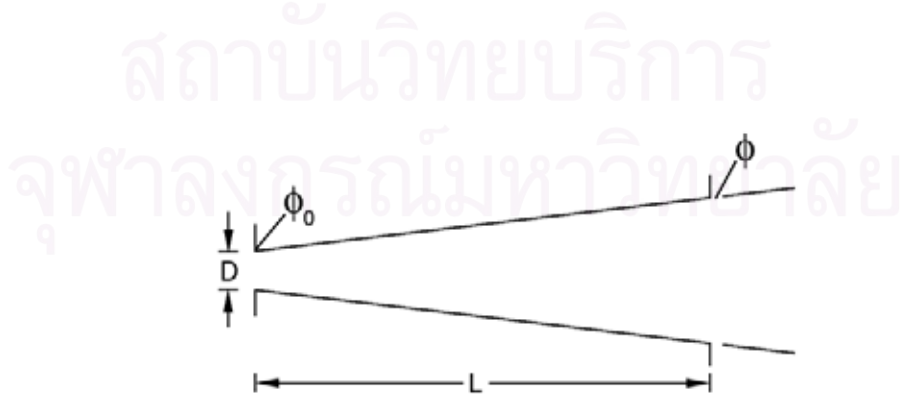
รูปที่ 2.15 ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์แบบขนานและแบบไดเวอร์เจนต์



รูปที่ 2.16 ตำแหน่งของคอลลิเมเตอร์และส่วนประกอบหลักในระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[7]



รูปที่ 2.17 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และ ไฮโดรเจน^[16]



รูปที่ 2.18 แผนภาพของคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ ที่มีช่องเปิดทางเข้า D และความยาวของคอลลิเมเตอร์ L^[7]

จากรูปที่ 2.18 นิวตรอนฟลักซ์ (ϕ) ที่ปลายท่อบังคับลำนิวตรอนตรงตำแหน่ง
ซึ่งงานสามารถคำนวณได้จาก

$$\phi = \frac{\phi_0 A}{4\pi L^2} \quad (2.13)^{[7]}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นทางที่นิวตรอนเข้าคอลลิเมเตอร์

สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่มีหน้าตัดแบบวงกลม

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.14)$$

ดังนั้นสมการ (2.14) สามารถเขียนได้เป็น

$$\phi = \frac{\phi_0 D^2}{16L^2} = \frac{\phi_0}{16} \left(\frac{D}{L}\right)^2 \quad (2.15)^{[7]}$$

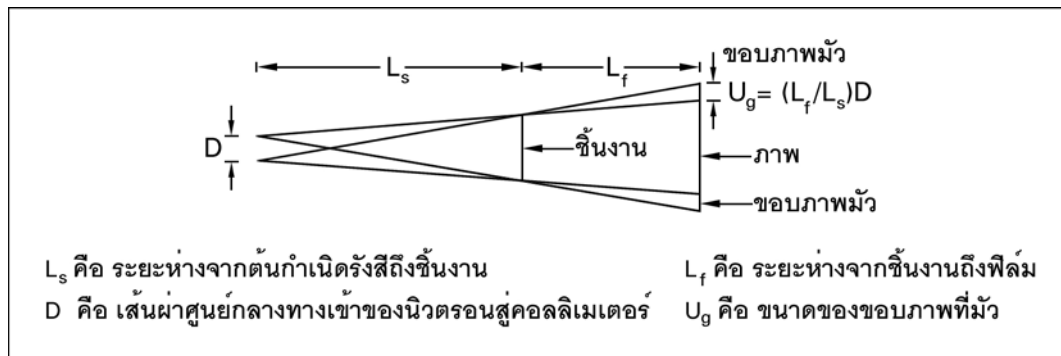
L/D เรียกว่า อัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ (Collimator ratio) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดง
ลักษณะเฉพาะของแต่ละคอลลิเมเตอร์

อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทางเข้าและทางออกของคอลลิเมเตอร์ เป็น

$$\frac{\text{Flux at entrance}}{\text{Flux at exit}} = \frac{\phi_0}{\phi} = 16 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \quad (2.16)^{[7]}$$

จากสมการ (2.16) จะเห็นได้ชัดว่านิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกของคอลลิเมเตอร์จะ
ลดลง เมื่อคอลลิเมเตอร์มีความยาว (L) เพิ่มขึ้น และ ขนาดของทางเข้า (D) ลดลง

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ระยะเวลาสั้น จำเป็นต้องให้นิวตรอนฟลักซ์ที่
ตกกระทบวัตถุมีค่าสูง ซึ่งสามารถทำได้โดยลดความยาวของคอลลิเมเตอร์ และเพิ่มขนาดทางเข้า
ของนิวตรอน แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ความคมชัดของภาพถ่ายลดลง



รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน^[7]

จากรูปที่ 2.19 จะได้

$$U_g = \frac{D}{L_s} L_f \quad (2.17)^{[7]}$$

โดยปกติจะวางฟิล์มติดกับชิ้นงาน ทำให้ $L_f \approx L_s$ และ $L_s \approx L$ ดังนั้นสมการ (2.17) สามารถเขียนได้เป็น

$$U_g = \left(\frac{D}{L} \right) L_f \quad (2.18)^{[7]}$$

จะเห็นได้ว่า ขนาดของขอบภาพที่มัว ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ L/D โดยที่ขนาดของขอบภาพที่มัวจะลดลงเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ ดังนั้นเพื่อให้ได้ภาพถ่ายนิวตรอนที่คมชัด จึงจำเป็นต้องเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์และวางวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพให้อยู่ชิดกับฟิล์มบันทึกภาพมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ สำหรับการเพิ่มอัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ สามารถทำได้โดยการเพิ่มความยาวของคอลลิเมเตอร์ (L) หรือ ลดขนาดทางเข้าของนิวตรอน (D) ซึ่งทั้งสองกรณีนี้มีผลทำให้นิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกของคอลลิเมเตอร์ลดลง จึงต้องใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น

ในกรณีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนต่ำ คือ ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี อัตราส่วนคอลลิเมเตอร์มีค่าต่ำ ความคมชัดของภาพจึงไม่ค่อยดี เนื่องจากถ้าเพิ่มความยาวของคอลลิเมเตอร์ (L) จะทำให้ความเข้มของนิวตรอนที่ปลายคอลลิเมเตอร์ด้านที่ติดกับชิ้นงานลดลง อย่างไรก็ตาม ถ้าส่วนของคอลลิเมเตอร์ด้านใกล้ต้นกำเนิดรังสีทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวทวนงนิวตรอน เช่น พาราฟิน โพลีเอทิลีน ฯลฯ โดยไม่มีส่วนผสมของสารดูดกลืนนิวตรอน เหมือนกับส่วนอื่นๆ จะทำให้ความเข้มของนิวตรอนที่ปลายคอลลิเมเตอร์ด้านที่ติดกับชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากที่คำนวณจากสมการ (2.15) เป็น

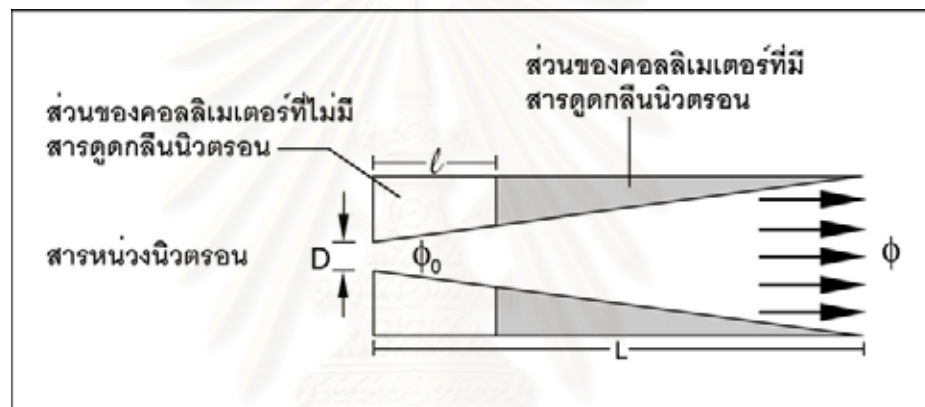
$$\phi = \left[\frac{\phi_0}{16(L/D)^2} \right] \left[1 + \frac{2l}{L} \right] \quad (2.19)^{[13]}$$

เมื่อ l คือ ความยาวของคอลลิเมเตอร์ส่วนที่ไม่มีสารดูดกลืนนิวตรอน

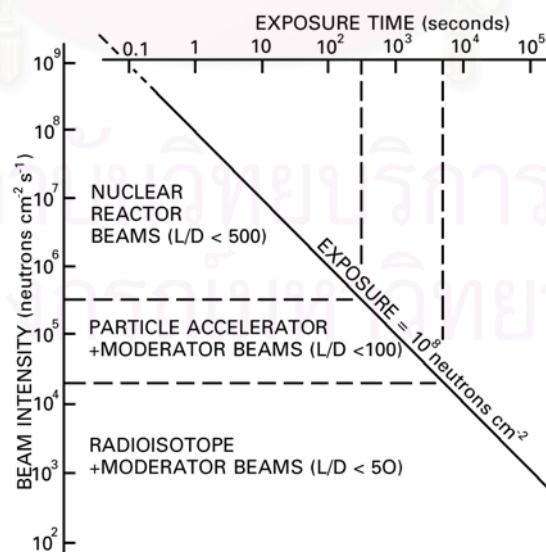
ถ้า l มีค่าเป็น 2 เท่าของ D สมการ (2.19) จะเปลี่ยนเป็น

$$\phi = \left[\frac{\phi_0}{16(L/D)^2} \right] \left[1 + \frac{2 \times 2D}{L} \right]$$

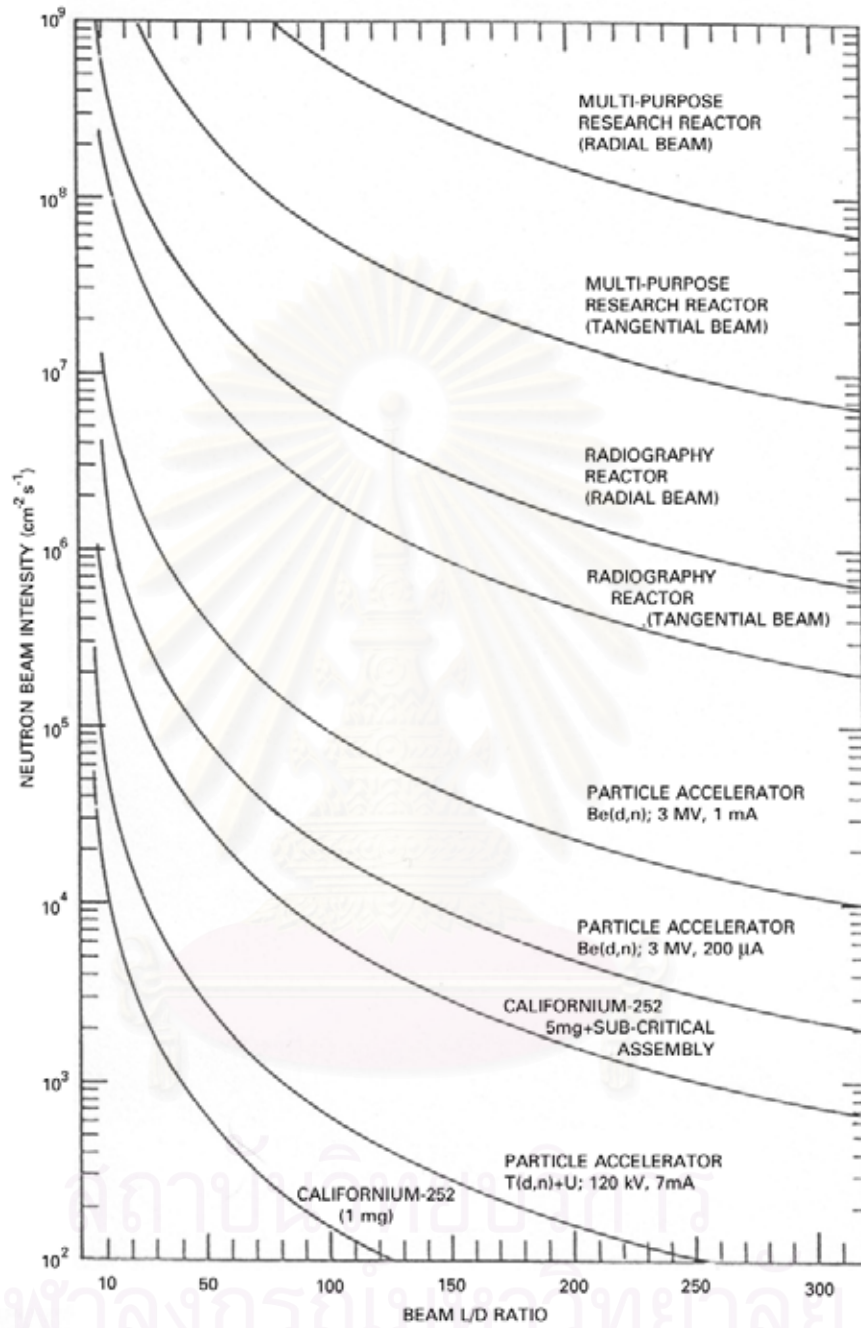
$$\phi = \frac{\phi_0}{16} \left[\left(\frac{D}{L} \right)^2 + 4 \left(\frac{D}{L} \right)^3 \right] \quad (2.20)$$



รูปที่ 2.20 ลักษณะของคอลลิเมเตอร์ที่ใช้สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์^[13]



รูปที่ 2.21 ความเข้มของนิวตรอน อัตราส่วน L/D และเวลาในการถ่ายภาพของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทต่าง ๆ^[7]



รูปที่ 2.22 ความเข้มของนิวตรอนและค่า L/D ของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบต่าง ๆ^[10]

2.4 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่เกิดปฏิกิริยาโดยตรงกับฟิล์ม การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงจำเป็นต้องมีฉากเปลี่ยนนิวตรอน วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนต้องมีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนได้ดี และสามารถปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิ (Secondary radiation) ที่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มได้ เช่น รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา รังสีบีตา หรือรังสีอัลฟา เมื่อรังสีทุติยภูมิตกกระทบฟิล์มซึ่งประกบอยู่กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้เกิดภาพบนฟิล์มได้ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่นิยมใช้มี 3 ประเภทคือ

2.4.1 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ (Metallic foil neutron converter screen)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะเป็นแผ่นโลหะชนิดที่มีภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุแล้วจะมีการปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิในรูปของรังสีแกมมา รังสีบีตา และอิเล็กตรอน แบ่งออกเป็น 2 ประเภท ตามเทคนิคในการถ่ายภาพ

2.4.1.1 ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาทันที (Prompt radiation)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดนี้จะปลดปล่อยอนุภาคหรือรังสีออกมาทันทีที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอน ซึ่งได้แก่ ฉากโลหะแกโดลิเนียม (Gadolinium, Gd) และ แคดเมียม (Cadmium, Cd) แกโดลิเนียมธรรมชาติมีภาคตัดขวางนิวตรอนประมาณ 48,000 บาร์น ไอโซโทปแกโดลิเนียม-155 (^{155}Gd) และแกโดลิเนียม-157 (^{157}Gd) มีภาคตัดขวางของนิวตรอนสูงถึง 58,000 บาร์น และ 240,000 บาร์น ตามลำดับ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^{155}\text{Gd}(n, \gamma)^{156}\text{Gd}$ และ $^{157}\text{Gd}(n, \gamma)^{158}\text{Gd}$ ได้ผลผลิตคือ แกโดลิเนียม-155 (^{155}Gd) และแกโดลิเนียม-158 (^{158}Gd) ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เสถียร แต่เนื่องจากรังสีแกมมาที่เกิดขึ้นมีพลังงานต่ำอยู่ในช่วง 100 keV และเกิดอินเทอร์เนลคอนเวอร์ชัน (Internal conversion) ได้คอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนที่มีพลังงานประมาณ 70 – 80 keV ออกมา ซึ่งคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนมีผลต่อการเกิดภาพมากกว่ารังสีแกมมา

สำหรับฉากโลหะแคดเมียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^{113}\text{Cd}(n, \gamma)^{114}\text{Cd}$ และมีภาคตัดขวางนิวตรอนประมาณ 20,000 บาร์น เมื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอนจะให้รังสีแกมมาออกมาทันที มีพลังงานประมาณ 550 – 1,300 keV และได้ ^{114}Cd ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เสถียร

ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำจากเปลี่ยนนิวตรอน^[14]

วัสดุ	ปฏิกิริยา	ภาคตัดขวางของ การเกิดปฏิกิริยากับ นิวตรอน (barn)	ครึ่งชีวิต	รังสีที่ ปลดปล่อย	พลังงานของ รังสี (MeV)
ลิเทียม	${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$	941	prompt	α T	2.05 2.74
โบรอน	${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$	3838	prompt	α Li	1.47 0.84
โรเดียม	${}^{103}\text{Rh}(n, \gamma){}^{104}\text{Rh}$ ${}^{103}\text{Rh}(n, n){}^{103m}\text{Rh}$ ${}^{103}\text{Rh}(n, \gamma){}^{104m}\text{Rh}$	1454 11	43 s 57m 4.4m	β X-ray β	2.41 0.02 0.5
เงิน	${}^{107}\text{Ag}(n, \gamma){}^{108}\text{Ag}$ ${}^{109}\text{Ag}(n, \gamma){}^{110}\text{Ag}$ ${}^{109}\text{Ag}(n, \gamma){}^{110m}\text{Ag}$	38 91 3	2.4m 24.5s 254d	β β β	1.64,0.43 2.87 1.5
แคดเมียม	${}^{113}\text{Cd}(n, \gamma){}^{114}\text{Cd}$	20600	Prompt	γ	9
อินเดียม	${}^{115}\text{In}(n, \gamma){}^{116}\text{In}$ ${}^{115}\text{In}(n, \gamma){}^{116m}\text{In}$	45 154	14s 54m	β β	3.3,0.44 1.0,0.42
ซามาเรียม	${}^{149}\text{Sm}(n, \gamma){}^{150}\text{Sm}$ ${}^{152}\text{Sm}(n, \gamma){}^{153}\text{Sm}$	40140 206	Prompt 46.7h	γ β	 0.8,0.1
แกโดลิเนียม	${}^{155}\text{Gd}(n, \gamma){}^{156}\text{Gd}$ ${}^{157}\text{Gd}(n, \gamma){}^{158}\text{Gd}$	60900 254000	Prompt Prompt	Electron Electron	0.14 0.13
ดิสโพรเซียม	${}^{164}\text{Dy}(n, \gamma){}^{165}\text{Dy}$ ${}^{164}\text{Dy}(n, \gamma){}^{165m}\text{Dy}$	800 2000	2.3h 1.26m	β β	1.29,0.095 1.04,1.108
ทอง	${}^{197}\text{Au}(n, \gamma){}^{198}\text{Au}$	98.65	2.7d	β	0.962,0.412

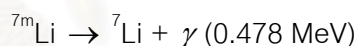
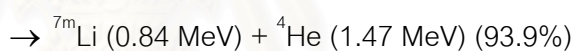
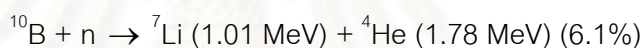
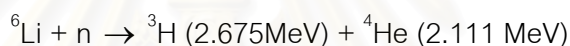
2.4.1.2 ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาจากการสลายตัว

ฉากโลหะชนิดนี้เป็นธาตุเมื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอนจะเกิดเป็นไอโซโทปรังสี รังสีและอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ด้วยเหตุนี้ฉากชนิดนี้จึงสามารถใช้ในการถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอดได้ด้วย กล่าวคือ สามารถถ่ายภาพชิ้นงานโดยนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนประกบกับชิ้นงานก่อน แล้วจึงนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีรังสีไปประกบฟิล์มในภายหลัง วิธีถ่ายทอนนี้มีประโยชน์มากในกรณีที่ชิ้นงานเป็นวัสดุกัมมันตรังสี เช่น แท่งเชื้อเพลิง เป็นต้น ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่นิยมใช้ได้แก่ ดิสโพรเซียม (Dysprosium, Dy) อินเดียม (Indium, In) และทองคำ (Gold, Au)

ฉากดิสโพรเซียมเป็นฉากที่ดีที่สุดสำหรับการถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอด ไอโซโทป ดิสโพรเซียม-164 (^{164}Dy) มีภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา (n, γ) เท่ากับ 800 และ 2,000 บาร์น สำหรับผลผลิตที่ได้คือ ดิสโพรเซียม-165 (^{165}Dy) และดิสโพรเซียม-165m (^{165m}Dy) มีครึ่งชีวิต 2.3 ชั่วโมง และ 1.26 นาที ตามลำดับ

2.4.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง (Light emitting neutron converter screen)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสงนำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นชนิดแรกและเป็นฉากที่มีความไวในการถ่ายภาพมากที่สุด ประกอบด้วยส่วนประกอบพื้นฐาน 2 ชนิด คือ สารดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorber material) และสารเรืองแสง (Phosphorescent material) สารดูดกลืนนิวตรอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ลิเทียม-6 (^6Li) และโบรอน-10 (^{10}B) เนื่องจากดูดกลืนนิวตรอนแล้วให้รังสีอัลฟาลังงานสูง แต่มีพิสัยต่ำ โดยมีปฏิกิริยาดังนี้



ส่วนสารเรืองแสงที่นิยมใช้ คือ สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) [$\text{ZnS}(\text{Ag})$] ซึ่งให้แสงในช่วงแสงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ภายหลังจากการถูกกระตุ้นด้วยรังสีอัลฟาจากลิเทียม-6 หรือ โบรอน-10 แสงที่มีความยาวคลื่นช่วงนี้จะทำปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมกับฟิล์มไวแสงชนิดออร์โธโครมาติก (Orthochromatic photographic film) หรือ ฟิล์มรังสีเอกซ์ (X-radiographic film)

ตัวอย่างของฉากเรืองแสงนี้ได้แก่ NE421, NE425, NE426 ผลิตโดยบริษัท Nuclear Enterprises Ltd. ประเทศอังกฤษ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนทั้ง 3 ชนิดนี้มีองค์ประกอบหลักเหมือนกัน คือ ใช้ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ที่เพิ่มความเข้มข้นของลิเทียม-6 เป็นสารดูดกลืนนิวตรอน และใช้สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) เป็นสารเรืองแสง แต่มีอัตราส่วนแตกต่างกัน ส่วนสารยึดเหนี่ยวที่ใช้สำหรับฉาก NE425 และ NE426 คือโพลีเอทีลีน

นอกจากนี้ยังมีการพัฒนานำธาตุหายาก (Rare earth elements) มาผลิตฉากเปลี่ยนนิวตรอน ซึ่งออกซิซัลไฟด์ของธาตุหายาก (Rare earth oxysulphides) สามารถเรืองแสงได้ดี ฉาก $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}(\text{Tb})$ หรือที่เรียกว่า GTS ซึ่งดูดกลืนนิวตรอนได้สูงกว่าฉากที่ใช้ลิเทียมเป็นสารดูดกลืนนิวตรอน จึงให้รายละเอียดของภาพสูง แต่มีข้อจำกัดคือ ความไวต่ำกว่าฉาก NE ทั้ง 3

ชนิด และไวต่อรังสีแกมมา นอกจากนี้เทอร์เปียม (Tb) ที่ใช้เป็นสารเรืองแสงในฉากรังสีนี้ยังให้แสงในช่วงแสงสีเขียว ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตร จึงต้องใช้ฟิล์มบันทึกภาพชนิดพิเศษที่ไวต่อแสงสีเขียว (Green-sensitive film)

ฉากรังสีชนิดหนึ่ง ได้แก่ NE905 ประกอบด้วยลิเทียม-6 ปริมาณสูงถึง 6% และใช้ cerium oxide-activated silicate glass เป็นสารเรืองแสง ซึ่งให้แสงในช่วงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ข้อดีของฉากรังสีชนิดนี้ คือเป็นฉากรังสีที่ให้ความไวสูงเหมาะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนความเข้มต่ำ ช่วยให้มีประหยัดเวลาในการถ่ายภาพ

2.4.3 ฉากรังสีเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มแทรค-เอตช์ (Track-etch neutron converter screen)

เป็นฉากรังสีที่นำคุณสมบัติของการดูดกลืนนิวตรอนแล้วเปลี่ยนเป็นอนุภาคอัลฟาของโบรอน-10 และ ลิเทียม-6 ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) และลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) เมื่อดูดกลืนนิวตรอนแล้ว จะให้อนุภาคอัลฟา จากปฏิกิริยา $^{10}B(n, \alpha)^7Li$ และ $^6Li(n, \alpha)^3H$ เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านฟิล์มบางของวัสดุบางชนิดเช่น ไมกา แก้ว และพลาสติก จะเกิดรอยอนุภาคและเมื่อนำวัสดุนั้นไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นภาพถ่ายชัดเจนขึ้น

ฉากรังสีประเภทนี้ได้แก่ BN1 และ BE-10 ของบริษัท Kodak Pathe' ประเทศฝรั่งเศส BN1 เป็นโบรอนไนไตรด์ที่มี โบรอน-10 ตามธรรมชาติ ส่วน BE-10 เป็นโบรอนคาร์ไบด์ (Boron carbide, B_4C) ที่มีโบรอน-10 เสริมสมรรถนะร้อยละ 93 (Enriched 93% ^{10}B) ฉากรังสี BE-10 เหมาะสำหรับฟิล์มเซลลูโลสไนเตรต และเซลลูโลสอะซิเตต

2.5 ฟิล์มและอุปกรณ์แสดงภาพ

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน นิยมใช้ฟิล์มที่มีความไวแสง รังสี หรืออนุภาคที่ปลดปล่อยออกจากฉากรังสีเปลี่ยนนิวตรอน เป็นอุปกรณ์รับภาพ เนื่องจากมีขั้นตอนการปฏิบัติไม่ยุ่งยากและสามารถเก็บไว้เป็นหลักฐานได้ ซึ่งฟิล์มที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน อาจแบ่งตามประเภทฉากรังสีเปลี่ยนนิวตรอนได้ 3 ประเภทดังนี้

(1) ฉากรังสีเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ ฉากรังสีชนิดนี้จะปลดปล่อยรังสีบีตา อิเล็กตรอน หรือรังสีแกมมา ซึ่งสามารถทำให้ฟิล์มรังสีเอกซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial x-ray film) ดำได้ รังสีบีตาและอิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดภาพสูงกว่ารังสีแกมมา เพราะมีอำนาจในการทำให้เงินโปรไมด์ (Silver bromide, AgBr) แตกตัวเป็นประจุสูงกว่า ความเร็ว

เปรียบเทียบ (Relative speed) ของฟิล์มรังสีเอกซ์บางชนิดที่ใช้ในการถ่ายภาพนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.8

(2) หากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง สามารถใช้ได้ทั้งฟิล์มถ่ายรูป (Photographic film) และฟิล์มรังสีเอกซ์ ในปัจจุบันฟิล์มถ่ายภาพความเร็วสูง เช่น ASA400, ASA800 และ ASA1600 สามารถหาซื้อได้ง่าย ทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพลดลงได้มาก อย่างไรก็ตามฟิล์มที่มีความเร็วสูงจะให้ภาพที่ได้มีความคมชัดและมีรายละเอียดน้อยลง เช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา การใช้ฟิล์มถ่ายรูปหรือฟิล์มไวแสงมีข้อดีกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์ตรงที่ไวต่อรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาน้อยกว่ามาก ภาพที่ได้จึงมีการรบกวนจากรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาน้อย ทั้งนี้เนื่องจากชั้นอิมัลชัน (Emulsion) ของฟิล์มถ่ายรูปบางกว่ามากนั่นเอง

(3) หากเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มแทรก-เอตซ์ โดยทั่วไปใช้ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรตที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับกรดไนตริก (HNO_3) และกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งมีความไวในการบันทึกรอยอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากปฏิกิริยา ^{10}B และ ^6Li กับนิวตรอน ฟิล์มชนิดนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 (10%NaOH) ล้างกักรอยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 20-40 นาที

ตารางที่ 2.7 ฟิล์มสำหรับหากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่าง ๆ

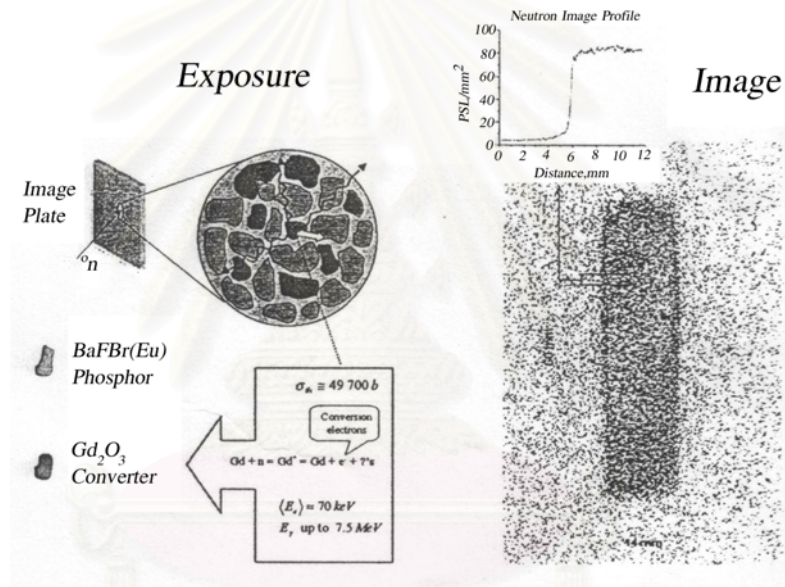
หากเปลี่ยนนิวตรอน	ฟิล์มบันทึกภาพ
หากชนิดแผ่นโลหะ	ฟิล์มรังสีเอกซ์
หากชนิดปลดปล่อยแสง	ฟิล์มรังสีเอกซ์ ฟิล์มถ่ายรูป
หากสำหรับฟิล์มแทรก-เอตซ์	เซลลูโลสไนเตรต เซลลูโลสอะซิเตต

ตารางที่ 2.8 ความเร็วเปรียบเทียบของฟิล์มรังสีเอกซ์สำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[7]

Kodak	Relative Exposure Time	Agfa	Relative Exposure Time	Du Pont	Relative Exposure Time
AA	100	D7	1.0	NDT75	1.0
T	180	D5	1.6	NDT55	2.5
M	400	D4	2.8	NDT35*	9.3
SR*	1600	D3	5.0		
		D2	10.0		

*single coated film

ในปัจจุบันอุปกรณ์บันทึกภาพที่เรียกว่า Imaging Plates ซึ่งเป็นอุปกรณ์บันทึกภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แผ่นบันทึกภาพนี้จะใช้ Gd_2O_3 ผสมกับผลึก $BaFBr(Eu)$ เคลือบอย่างสม่ำเสมอบนฐานรองรับโพไลเอสเตอร์ที่มีความยืดหยุ่นโดย Gd_2O_3 จะทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนเป็นคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน และจะถ่ายเทพลังงานให้กับผลึก $BaFBr(Eu)$ ซึ่งจะเก็บพลังงานนี้ไว้ในระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน และเมื่อใช้เลเซอร์ชนิด He-Ne (633 nm) สแกนผ่านแผ่น Imaging Plates ที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมาแล้ว จะทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานนั้นถูกปลดปล่อยออกมา พร้อมให้โฟตอนที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร กระบวนการนี้เรียกว่าการกระตุ้นการเกิดแสง (photo stimulate luminescence) แสงสีน้ำเงินที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกเก็บไว้และนำไปสร้างภาพในลักษณะที่เป็นดิจิทัล



รูปที่ 2.23 หลักการทำงานของ Imaging Plates

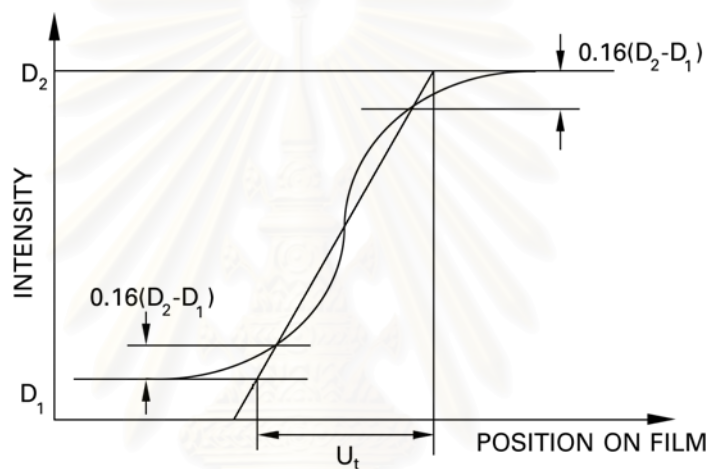
2.6 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน

จากกระบวนการทั้งหมดของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ได้ผลขั้นสุดท้ายเป็นภาพถ่ายซึ่งแสดงรูปร่างและลักษณะของวัตถุตัวอย่างที่ต้องการศึกษาวิเคราะห์ เทคนิคและอุปกรณ์การถ่ายภาพทุกขั้นตอนมีผลต่อภาพถ่ายที่ได้ ภาพถ่ายที่มีคุณภาพจะทำให้การศึกษาวินิจฉัยวัตถุตัวอย่างมีความสะดวกและถูกต้องแม่นยำ

ภาพถ่ายที่ดีคือ ภาพที่มีความคมชัด มีความเปรียบต่างสูง มีความดำพอเหมาะและไม่บิดเบือน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

2.6.1 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่าย

ความคมชัดสามารถตรวจสอบได้โดยใช้วิธีของคลาเซนส์ (Klasens' method) โดยการถ่ายภาพแผ่นวัสดุที่เป็นสารดูดกลืนนิวตรอน เช่น แคลเมียม โบรอน แกโดลิเนียม ซึ่งมีขอบตัดตรง แล้วสแกน (scan) อ่านความดำของพื้นที่รอยต่อระหว่างบริเวณที่ปิดและไม่ปิดด้วยแผ่นดูดกลืนนิวตรอน ซึ่งจะได้กราฟระหว่างความดำกับตำแหน่งบนฟิล์มดังรูปที่ 2.24 ค่าความชันของกราฟในช่วง $D_1 + 0.16(D_2 - D_1)$ ถึง $D_2 - 0.16(D_2 - D_1)$ คือความไม่คมชัด (Unsharpness, U) ความไม่คมชัดของภาพจากระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนระบบหนึ่งๆ เกิดจากปัจจัยทางเรขาคณิตฟิล์ม และฉากเปลี่ยนนิวตรอน



รูปที่ 2.24 กราฟระหว่างความดำกับตำแหน่งบนฟิล์มที่ใช้ในการตรวจสอบความคมชัดโดยวิธีของคลาเซนส์^[10]

ถ้าให้ U_t คือ ความไม่คมชัดรวม

U_g คือ ความไม่คมชัดเนื่องจากปัจจัยทางเรขาคณิต

U_{ff} คือ ความไม่คมชัดเนื่องจากฟิล์มและฉากเปลี่ยนนิวตรอน

$$\text{จะได้ } U_t = (U_g^3 + U_{ff}^3)^{\frac{1}{3}} \quad (2.21)$$

2.6.2 การตรวจสอบความเปรียบต่างของภาพถ่าย

ความเปรียบต่างของการถ่ายภาพคือ ผลต่างของค่าความดำของฟิล์ม ณ จุด 2 จุดบนฟิล์มบันทึกภาพเดียวกัน ซึ่งเป็นผลมาจากความเปรียบต่างของความเข้มรังสีที่ตกกระทบ

ฟิล์ม ความเปรียบต่างของชิ้นงาน (Subject contrast) และความเปรียบต่างของฟิล์ม (Film contrast)

ความเปรียบต่างของรังสีที่ตกกระทบฟิล์ม คือปริมาณรังสีที่ผ่านวัตถุตัวอย่าง ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุภายในตัวอย่าง พลังงานของรังสี และความเข้มของรังสีที่กระเจิง

ความเปรียบต่างของฟิล์ม มีค่าเป็นไปตามความชันของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม ซึ่งขึ้นกับชนิดของฟิล์ม ชนิดของฉากเปลี่ยนนิวตรอน และกระบวนการล้างฟิล์ม ดัชนีความเปรียบต่าง (Contrast index) สามารถหาได้โดยวิธีง่าย ๆ คือ อ่านค่าความดำของฟิล์ม ณ จุด 2 จุดที่มีความดำต่างกัน นำค่าความดำของจุด 2 จุดที่อ่านได้ลบกัน ผลลัพธ์ที่ได้คือดัชนีความเปรียบต่างโดยมีข้อกำหนดว่า จุดที่เลือกทั้ง 2 จุดนั้นต้องมีค่าความดำอยู่ในช่วงเส้นตรงของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม

2.6.3 การวัดค่าความดำบนฟิล์ม

การวัดค่าความดำบนฟิล์มเป็นการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของอนุภาค รังสี หรือแสง กับฟิล์ม หรือในกรณีของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ค่าความดำบนฟิล์มที่เกิดขึ้นหมายถึงความสามารถในการเปลี่ยนรังสีนิวตรอนเป็นรังสีทุติยภูมิของฉาก หรือความสามารถในการทำปฏิกิริยาระหว่างรังสีทุติยภูมิจับผลึกเงินเฮไลด์ของฟิล์ม อุปกรณ์ที่ใช้วัดค่าความดำบนฟิล์ม คือ เครื่องเดนซิโตมิเตอร์ (Densitometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการเปลี่ยนค่าความทึบแสงของวัตถุให้เป็นค่าที่อ่านได้โดยใช้หลักการทะลุผ่าน (Transmission) ของแสง เรียกความดำนี้ว่าออปติคัล เดนซิตี (Optical Density, OD) หาได้จากสูตร

$$\text{optical density} = d = 0.43Na \quad (2.22)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเม็ดของเงินเฮไลด์ที่เกิดการสร้างภาพ (grain/cm²)

a คือ ค่าเฉลี่ยพื้นที่ตัดขวางของเม็ดเงินเฮไลด์ 1 เม็ด (cm²)

หรือหาได้จาก

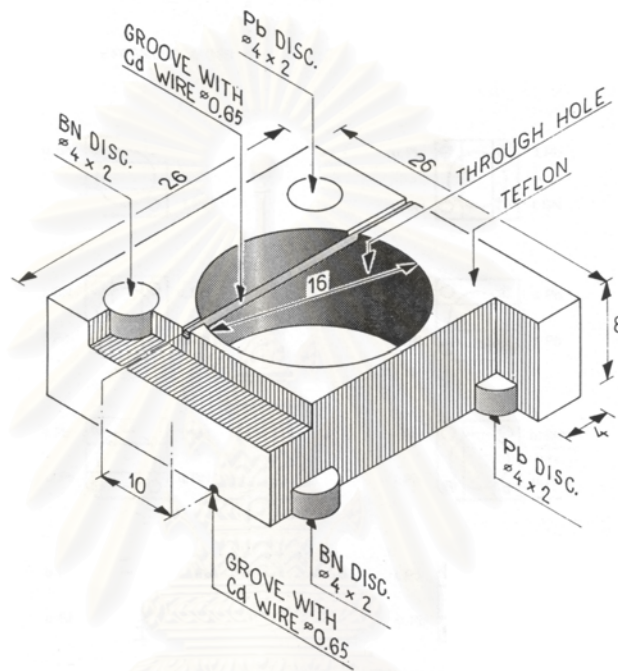
$$\text{optical density} = d = \log \frac{I_0}{I} \quad (2.23)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบฟิล์ม

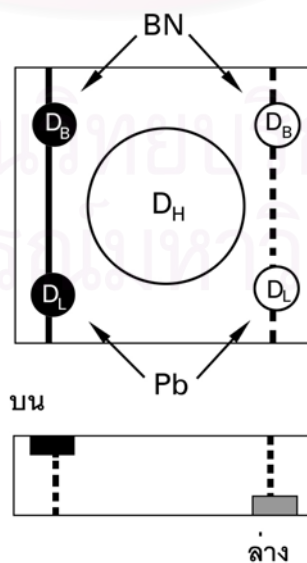
I คือ ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านฟิล์ม

2.6.4 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน

วัตถุตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นวัตถุตัวอย่างที่ได้รับ การออกแบบสำหรับทดสอบคุณภาพของการถ่ายภาพและอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยคุณภาพของภาพถ่าย การถ่ายภาพเพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยทั่วไปใช้ Beam Purity Indicator (BPI), Sensitivity Indicator (SI) และ Test Strip B ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังนี้



รูปที่ 2.25 Beam Purity Indicator^[7]



รูปที่ 2.26 ตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI^[7]

2.6.4.1 การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator (BPI)

Beam Purity Indicator ผลิตจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนต่ำ จัดทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25.4 x 25.4 ตารางมิลลิเมตรหนา 8 มิลลิเมตร ตรงกลางเจาะเป็นรูปกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.9 มิลลิเมตร ได้รับการออกแบบมาสำหรับทดสอบและวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอนจากคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่บน BPI ได้แก่ โบรอนไนไตรด์ (BN) และตะกั่ว จับทำเป็นรูปเหรียญกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ลวดแคดเมียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร ยาว 12 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 2.25

การวิเคราะห์ทำได้โดยการถ่ายภาพ Beam Purity Indicator แล้ววัดความเข้มแต่ละตำแหน่งบนฟิล์ม ตามรูปที่ 2.26 โดย

- D_B คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์
- D_L คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว
- D_H คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู
- D_T คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน
- ΔD_L คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น
- ΔD_B คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น

ความเข้มของฟิล์มที่วัดได้สามารถใช้คำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอนได้ดังนี้

- 1) ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน (Effective thermal neutron, NC)

$$NC = \frac{D_H - (highD_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad (2.24)^{[7]}$$

- 2) ปริมาณนิวตรอนกระเจิง (Effective scatter neutron content, S)

$$S = \left(\frac{\Delta D_B}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.25)^{[7]}$$

- 3) ปริมาณรังสีแกมมา (Effective gamma content, γ)

$$\gamma = \left(\frac{D_T - lowD_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.26)^{[7]}$$

- 4) ปริมาณรังสีจาก Pair production (Effective pair production content, P)

$$P = \left(\frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.27)^{[7]}$$

2.6.4.2 การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Sensitivity Indicator (SI)

อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ (SI) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการมองเห็นรายละเอียดของภาพโดยสังเกตจากรู (Hole) ที่เจาะเป็นช่องกลม และช่องว่าง (Gap) ตามแนวยาวที่เล็กที่สุดที่ภาพถ่ายสามารถแสดงรายละเอียดได้

อุปกรณ์วัดความไว SI ของ ASTM ประกอบด้วยวัสดุหลักต่างๆ คือ อะครีลิกเรซิน (Acrylic resin) อะลูมิเนียม และตะกั่ว โดยมีความหนาขนาดของรูและช่องว่างต่างๆ กัน ตารางที่ 2.9 แสดงขนาดของช่องว่างที่เล็กที่สุดที่ต้องการมองเห็นในภาพถ่ายนิทรรศการทุกช่วงความหนา และตารางที่ 2.10 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่กว้างที่สุดที่ต้องการมองเห็นในความหนาต่างๆ กันของ SI

ตารางที่ 2.9 ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI

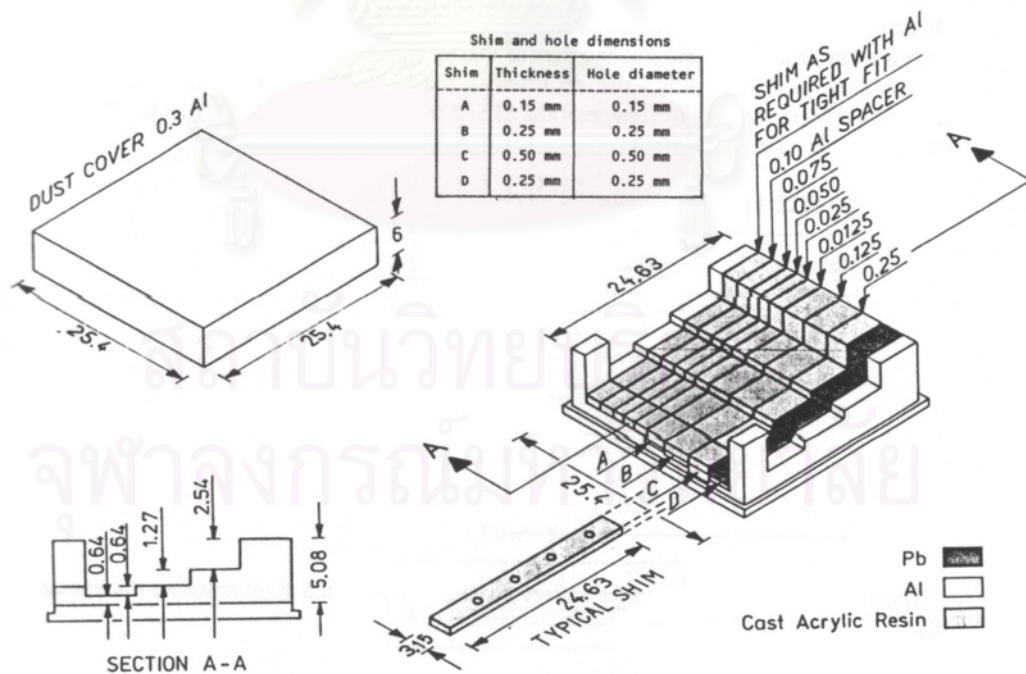
Value of G	Gap size, mm.*
1	0.25
2	0.13
3	0.10
4	0.076
5	0.051
6	0.025
7	0.013

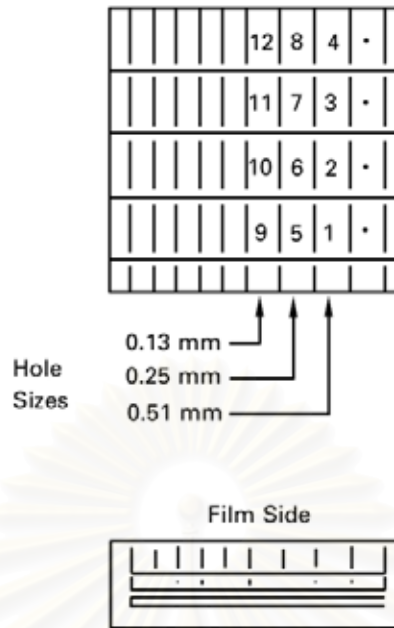
* เป็นช่องว่างที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ในทุกช่วงความหนาของภาพ ASTM SI

ตารางที่ 2.10 ค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI

Value of H	Gap size, mm.*	Absorber thickness, mm.
1	0.51	0.64
2	0.51	1.27
3	0.51	2.54
4	0.51	5.08
5	0.25	0.64
6	0.25	1.27
7	0.25	2.54
8	0.25	5.08
9	0.13	0.64
10	0.13	1.27
11	0.13	2.54
12	0.13	5.08

* เป็นขนาดของรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดที่มองเห็นได้ในภาพถ่าย ASTM SI

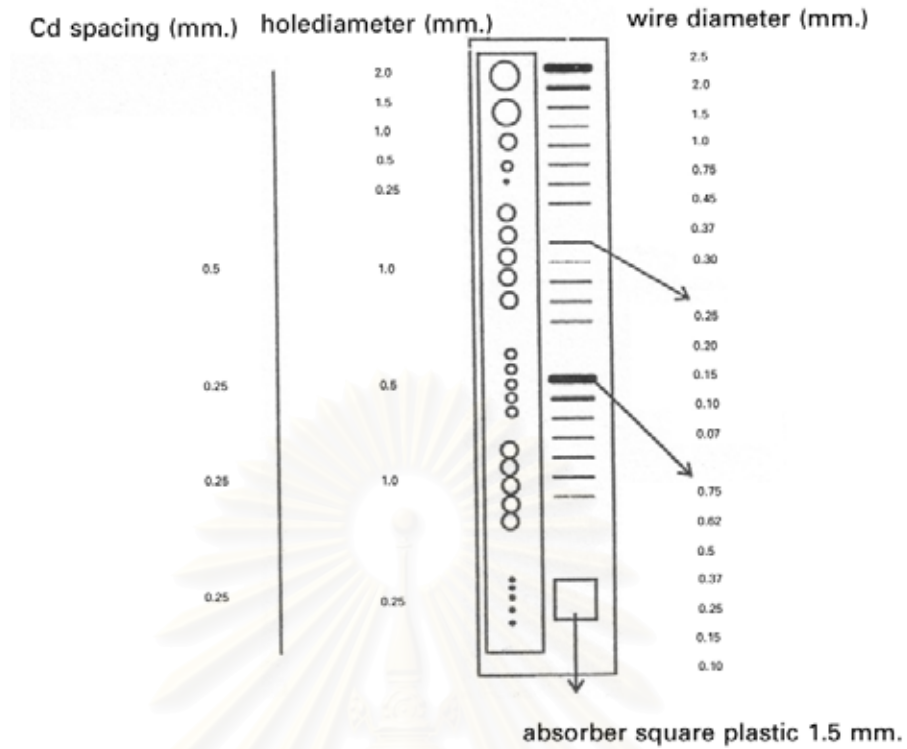
รูปที่ 2.27 ASTM Sensitivity Indicator^[7]



รูปที่ 2.28 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูใน ASTM SI^[7]

2.6.4.3 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่ายและความไวของการถ่ายภาพ
ด้วย Test strip B

Test strip B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ความคมชัดและความเปรียบต่างของภาพจากขนาดของวัตถุที่มองเห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ประกอบด้วย แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตรเป็นฐาน แผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตรเจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 มิลลิเมตร 1 ชุด และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0, 0.5, 1.0, 0.25 มิลลิเมตร ขนาดละ 5 รู ขนาดของรูที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ คือ รัศมีชั้นของภาพ เส้นพลาสติกยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆ กัน 13 เส้น ได้แก่ 2.5, 2.0, 1.5, 1.0, 0.75, 0.45, 0.37, 0.30, 0.25, 0.20, 0.15, 0.10, 0.07 มิลลิเมตร เส้นพลาสติกเส้นเล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้นำมาพิจารณารัศมีชั้นและความเปรียบต่างของภาพ เส้นแคดเมียมมีความยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างต่างๆ กัน 7 เส้น ได้แก่ 0.75, 0.62, 0.5, 0.37, 0.25, 0.15, 0.1 มิลลิเมตร และแผ่นพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 เซนติเมตร × 1.5 เซนติเมตร ซึ่งนำมาพิจารณาความเปรียบต่างของภาพ



รูปที่ 2.29 Test strip B^[1]

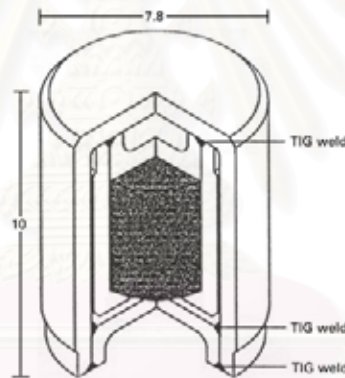
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุและอุปกรณ์วิจัย

3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน

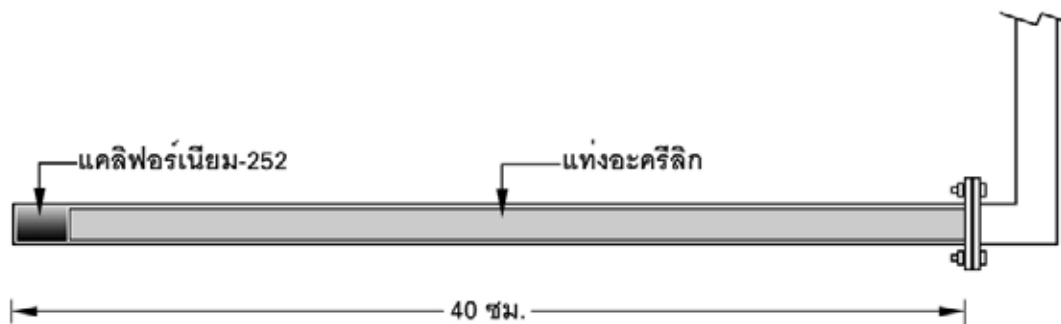
ต้นกำเนิดนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือแคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) ขนาด 20 ไมโครกรัม หรือ 10.7 มิลลิคูรี ณ เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2545 มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอน 4.58×10^7 นิวตรอนต่อวินาที แคลิฟอร์เนียม-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทแตกตัวเอง (Spontaneous fission) มีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี การแตกตัวแต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยนิวตรอนออกมาโดยเฉลี่ย 3.76 ตัว พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนประมาณ 2 MeV มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกสูง 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนภาพต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ที่ใช้ในงานวิจัย

ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียมที่ใช้ในงานวิจัยถูกบรรจุอยู่ในท่ออะลูมิเนียมที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้น โดยมีลักษณะเป็นรูปตัวแอล (L) เพื่อให้ต้นกำเนิดนิวตรอนเข้าชิดปลายนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ได้มากที่สุด ท่ออะลูมิเนียมนี้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร โดยมีแผ่นอะลูมิเนียมรูปวงกลมปิดเพื่อกันน้ำเข้าสู่ภายใน และภายในท่ออะลูมิเนียมมีแท่งอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร ยาว 39 เซนติเมตร ต้นกำเนิดนิวตรอนไว้ให้อยู่ที่ตำแหน่งเดิม และลดช่องว่างภายในท่ออะลูมิเนียม ดังแสดงในรูปที่

3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงระบบบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252

ท่ออะลูมิเนียมซึ่งบรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียมได้จุ่มอยู่ในถังพลาสติกซ้อนกันสองถัง ถังนอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 เซนติเมตร สูง 122 เซนติเมตร (ปริมาตร 1,500 ลิตร) ถังในมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 เซนติเมตร สูง 105 เซนติเมตร (ปริมาตร 1,000 ลิตร) เพื่อความปลอดภัยในกรณีถึงรั่ว ถังในบรรจุน้ำเพื่อทำหน้าที่เป็นสารหน่วงนิวตรอนและกำบังรังสี



รูปที่ 3.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 และนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่อยู่ในถังโพลีเอทิลีนบรรจุน้ำ

3.2 จากเปลี่ยนนิวตรอน

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นรังสีชนิดอื่นที่สามารถทำปฏิกิริยากับฟิล์มบันทึกภาพได้ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 ซึ่งเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดเรืองแสง ผลิตโดยบริษัท NE Technology ประเทศอังกฤษ มีส่วนผสมเป็นลิเทียมฟลูออไรด์และสังกะสีซัลไฟด์ (LiF/ZnS) เมื่อดูดกลืนนิวตรอนแล้วจะปล่อยแสงออกมาใช้สำหรับ

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายภาพ และใช้ได้กับฟิล์มบันทึกภาพทั้งฟิล์มถ่ายรูปและฟิล์มรังสีเอกซ์ เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีประสิทธิภาพสูง การถ่ายภาพใช้เวลาสั้นกว่าการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดอื่น จึงเหมาะสำหรับการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอนความเข้มต่ำ

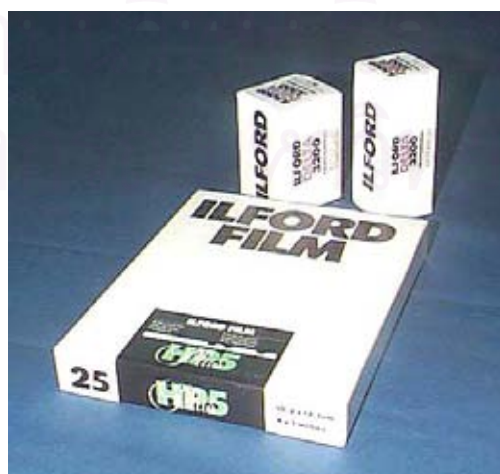
3.3 ฟิล์มบันทึกภาพ

(1) ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส (Ilford HP5 plus)

ผลิตโดยบริษัทอิลฟอร์ดประเทศอังกฤษ เป็นฟิล์มถ่ายภาพขาวดำ ขนาดกว้าง 10.2 เซนติเมตร ยาว 12.7 เซนติเมตร เป็นฟิล์มที่ไวต่อแสงทุกสี (Colour sensitivity) ในสเปกตรัมความยาวคลื่นแสงไม่เกิน 670 นาโนเมตร ความไวแสง (Speed) ปกติของฟิล์มชนิดนี้คือ ISO400/27° แต่สามารถทำให้มีความไวอยู่ในช่วง EI200/24° ถึง EI3200/36° โดยกระบวนการล้างฟิล์ม ฟิล์มชนิดนี้เป็นฟิล์มชนิดเคลือบอิมัลชันด้านเดียว (Single coat) โดยชั้นอิมัลชันเป็นสารไวแสงผลึกเงินโบรไมด์ (Silver bromide) เม็ดละเอียดเคลือบอยู่บนฐานรองรับโพลีเอสเตอร์ (Polyester) หนา 0.18 มิลลิเมตร

(2) ฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 (Ilford Delta 3200 Professional)

ผลิตโดยบริษัทอิลฟอร์ดประเทศอังกฤษ เป็นฟิล์มถ่ายภาพขาวดำความไวสูง ซึ่งโดยปกติฟิล์มชนิดนี้มีความไวแสง ISO3200/36° แต่สามารถทำให้มีความไวอยู่ในช่วง EI400/27° ถึง EI25000/45° ด้วยกระบวนการล้างฟิล์ม ชั้นของสารไวแสงเคลือบไว้บนฐานรองรับอะซิเตท (Acetate base) หนา 0.125 มิลลิเมตร โดยฟิล์มชนิดนี้มีอยู่ 2 ขนาดคือ ฟิล์ม 35 มิลลิเมตร เป็นฟิล์มแบบม้วนที่ใช้กับกล้องถ่ายรูปทั่วไป และขนาด 120 เป็นฟิล์มแบบม้วนเช่นกันมีขนาดกว้าง 6.1 เซนติเมตร



รูปที่ 3.4 ฟิล์มบันทึกภาพอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส และ อิลฟอร์ด เดลต้า 3200

(3) กระจกฟูจิ เอฟพี-3000บี (FP-3000B super speed)

ผลิตโดยบริษัทฟูจิโฟโต้ฟิล์มประเทศญี่ปุ่น เป็นกระจกขาวดำชนิดแพนโครมาติก แบบล้างได้ทันทีขนาด 8.5×10.8 เซนติเมตร กระจกชนิดนี้มีความไว EI 3200/36° มีความไวในกระบวนการสร้างภาพเพียง 15 วินาที ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส นิยมเรียกกระจกชนิดนี้ว่า กระจกโพรารอยด์ (Polaroid)

3.4 น้ำยาล้างฟิล์ม

น้ำยาล้างฟิล์มสำหรับฟิล์มอีลฟอร์ดเอชพี 5 พลัส และ อีลฟอร์ด เดลต้า 3200 ได้แก่

(1) น้ำยาสร้างภาพ (Developer solution) ใช้อีลฟอร์ด ไอดี-11 (Ilford ID-11) ของบริษัทอีลฟอร์ด ประเทศอังกฤษ เป็นน้ำยาสร้างภาพสำหรับฟิล์มขาวดำชนิดละเอียด (Fine grain film)

(2) น้ำยาคงสภาพ (Fixer solution) ใช้อีลฟอร์ด ไฮปาม (Ilford HYPAM & HARDENER) ของบริษัทอีลฟอร์ด ประเทศอังกฤษ เป็นน้ำยาคงสภาพสำหรับฟิล์ม และกระจกขาวดำ ซึ่งอยู่ในรูปของเหลว

3.5 ตลับใส่ฟิล์ม (Film cassette)

ตลับใส่ฟิล์ม เป็นอุปกรณ์สำหรับบรรจุฟิล์มบันทึกภาพ และฉากเปลี่ยนนิวตรอนรวมทั้งติดตั้งวัตถุตัวอย่างในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ตลับใส่ฟิล์มที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้ประดิษฐ์ขึ้นจากแผ่นโลหะอะลูมิเนียม ขนาดกว้าง 33 เซนติเมตร ยาว 33 เซนติเมตร และหนา 0.8 เซนติเมตร



รูปที่ 3.5 ตลับใส่ฟิล์ม

3.6 ตู้ไฟดูฟิล์ม (Viewing box)

เป็นตู้แสงสว่างสำหรับส่องดูฟิล์ม เพื่อตรวจสอบภาพถ่ายและใช้สำหรับวางฟิล์มในการวัดค่าความดำโดยใช้เครื่องเดนสิโตมิเตอร์

3.7 อุปกรณ์วัดความดำของฟิล์ม

(1) เดนสิโตมิเตอร์ (Densitometer) รุ่น PDA-81 ของโคนิก้า (Konica) ผลิตโดยบริษัทโคนิก้า ประเทศญี่ปุ่น เป็นเครื่องวัดความเข้มฟิล์มแบบส่องผ่าน (Transmission densitometer) ชนิดมือถือ (Handy portable type) สำหรับฟิล์มขาวดำ เส้นผ่านศูนย์กลางพื้นที่ในการวัด 3 มิลลิเมตร ช่วงความเข้ม 0.0 – 4.0 D ความแม่นยำในการวัด $\pm 0.05 D$



รูปที่ 3.6 เครื่องวัดความดำของฟิล์ม

(2) ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม ที่พัฒนาโดยภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เป็นอุปกรณ์ที่สามารถอ่านค่าความดำโดยอัตโนมัติ ควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ และข้อมูลโพรไฟล์ที่อ่านได้จะถูกบันทึกไว้บนฮาร์ดดิสก์ โดยใช้เครื่องวัดความดำรุ่น PDA-81 ของซากุระ (Sakura) ประเทศญี่ปุ่น สำหรับอ่านค่าความดำ แล้วส่งข้อมูลไปยังเครื่องคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะแสดงค่าความดำของฟิล์มในแนวที่สแกน ในรูปของโพรไฟล์ของค่าความดำสัมพัทธ์ (Relative Optical Density) ซึ่งเป็นค่าที่สัมพันธ์กับค่าความดำ แต่ไม่ใช่ค่าความดำที่แท้จริงของฟิล์ม



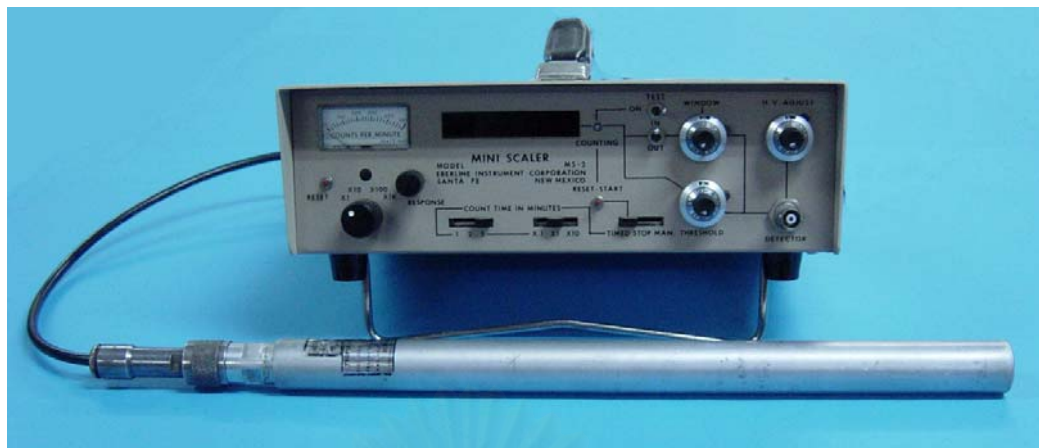
รูปที่ 3.7 ระบบสแกนวัดความดําของฟิล์ม

3.8 ระบบวัดนิวตรอนช้า

ระบบวัดนิวตรอนช้าที่ใช้ในการวัดริเลทีฟลักซ์และหาอัตราส่วนแคดเมียมใช้อุปกรณ์ดังนี้

(1) หัววัดรังสีนิวตรอนแบบฉาบโบรอน (Boron lined detector) เป็นหัววัดรังสีที่ใช้โบรอน-10 ฉาบที่ผนังด้านในของหัววัดหนาประมาณ 0-3 mg/cm² อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ อนุภาคอัลฟาที่เกิดขึ้นจะทำให้ก๊าซที่บรรจุในหัววัดแตกตัวเป็นไอออนเกิดเป็นพัลส์ก๊าซที่บรรจุเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซอาร์กอนกับคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งทำให้สามารถใช้ศักย์ไฟฟ้าเพียง 600-800 โวลต์ แต่ให้พัลส์สูงถึง 10-15 mV

(2) เครื่องนับวัดของ Eberline รุ่น Mini Scaler MS-2 ผลิตโดยบริษัท Eberline Instrument Corporation ซึ่งมีเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว (Single Channel Analyzer, SCA) เครื่องนับวัดและตั้งเวลา (Counter/timer) และแหล่งจ่ายไฟศักย์สูง (High voltage power supply) รวมอยู่ในเครื่องแล้ว โดยสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากหัววัดรังสีนิวตรอนแบบฉาบโบรอน จะถูกส่งไปยังภาคขยายหลัก (Amplifier) ซึ่งทำหน้าที่ขยายสัญญาณที่เกิดขึ้นจากหัววัด จากนั้นจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว แล้วเข้าสู่เครื่องนับวัดโดยมีวงจรตั้งเวลาเป็นตัวกำหนดเวลาในการนับวัด



รูปที่ 3.8 ระบบวัดนิวตรอนช้า

3.9 อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเชอร์

(1) เครื่องปรับความเข้มแสง (Dimmer) ของภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ใช้เพื่อลดความเข้มแสงของเครื่องอัด-ขยายภาพ

(2) เครื่องอัด-ขยายภาพ ของ Warszawa รุ่น Krokus color 67 ประเทศโปแลนด์



รูปที่ 3.9 เครื่องอัด-ขยายภาพ

(3) เครื่องตั้งเวลา (Timer) ของ VIPO COMBI รุ่น B6 ประเทศสหพันธ์สาธารณรัฐเชค และสโลวาเกีย (Czechoslovakia)



รูปที่ 3.10 เครื่องตั้งเวลา

3.10 วัสดุและอุปกรณ์ในการสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์

- (1) โพลีเอทีลีนชนิดที่มีความเข้มข้นของไฮโดรเจนสูง
- (2) กรดบอริก (Boric acid) ชนิดผงใช้เป็นสารดูดจับนิวตรอน เพื่อไม่ให้นิวตรอนเข้าสู่คอลลิเมเตอร์ทางผนังด้านข้างได้
- (3) แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตร ใช้ทำแม่พิมพ์สำหรับสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์

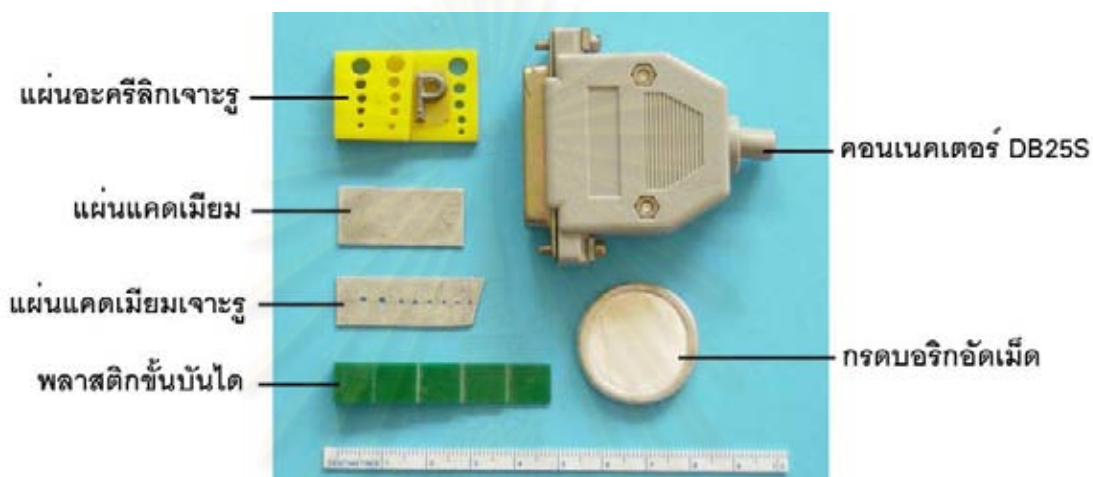
3.11 วัสดุตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

- (1) แผ่นแคดเมียม ขนาดความกว้าง 13.5 มิลลิเมตร ยาว 28.8 มิลลิเมตร ความหนา 0.7 มิลลิเมตร
- (2) แผ่นแคดเมียมรูปสี่เหลี่ยมคางหมู สูง 11.2 มิลลิเมตร ด้านคู่ขนานยาว 34.2 และ 31.1 มิลลิเมตร หนา 0.7 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5, 1.0, 1.2, 1.5 มิลลิเมตร ขนาดละ 2 รู
- (3) พลาสติกชั้นบันได 5 ชั้น ทำจากแผ่นอะครีลิก (Acrylic sheet) หนา 1.05 มิลลิเมตร แต่ละชั้นมีขนาด 12 × 12 ตารางมิลลิเมตร ชั้นแรกหนา 1.05 มิลลิเมตร และหนาเพิ่มขึ้นอีก 1.05 มิลลิเมตร ในแต่ละชั้น
- (4) พลาสติกที่มีความหนา 2 ชั้น ชั้นแรกหนา 2.55 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4, 2.0, 2.45, 2.8 และ 4.65 มิลลิเมตร และติดตัวอักษรตะกั่วรูปตัว P ชั้นที่ 2 หนา

5.1 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.4, 2.0, 2.45 และ 4.65 มิลลิเมตร ขนาดละ 2 รู โดยเจาะทะลุตลอดความหนา 5.1 มิลลิเมตร ขนาดละ 1 รู และเจาะลึกลงไปเพียง 2.05 มิลลิเมตร ขนาดละ 1 รู

(5) กรดบอริก (Boric acid) ชนิดผงอัดเป็นเม็ดอยู่ในวงแหวนอะลูมิเนียมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25 มิลลิเมตร หนา 3 มิลลิเมตร

(6) คอนเนคเตอร์ (Connector) DB25S



รูปที่ 3.11 วัตถุตัวอย่างที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

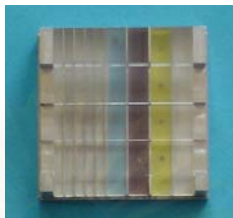
3.12 วัตถุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[13]

(1) Beam Purity Indicator (BPI) ผลิตโดย American Society for Testing and Material ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นวัตถุตัวอย่างสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพื่อทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ และอุปกรณ์ในการบันทึกภาพ โดยวิเคราะห์จากความเข้มของฟิล์มจากภาพถ่าย



รูปที่ 3.12 Beam Purity Indicator

(2) Sensitivity Indicator (SI) ผลิตโดย American Society for Testing and Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นวัตถุตัวอย่างสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยสังเกตจากรายละเอียดที่สามารถมองเห็นและความคมชัดของภาพถ่าย



รูปที่ 3.13 Sensitivity Indicator

(3) Test Strip B ผลิตโดย Argonne National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นวัตถุตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยสังเกตจากรายละเอียดที่สามารถมองเห็นได้จากภาพถ่าย ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่มีความเปรียบต่างสูง ได้แก่ แคดเมียม และวัสดุที่มีความเปรียบต่างต่ำกว่า ได้แก่ พลาสติก



รูปที่ 3.14 Test Strip B

บทที่ 4

วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

การดำเนินการวิจัยเพื่อพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ได้แบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้

4.1 การออกแบบและสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์

4.1.1 วิธีดำเนินการวิจัย

นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่พัฒนาขึ้นมีลักษณะเป็นแบบไดเวอร์เจนต์ รูปทรงพีรามิดตัด มีความยาว 30 เซนติเมตร และบริเวณถ่ายภาพมีพื้นที่ 11×11 ตารางเซนติเมตร จำนวน 4 อัน ซึ่งแต่ละอันมีสารดูดกลืนนิวตรอน และขนาดช่องเปิดด้านล่าง (D) แตกต่างกัน

การสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์เริ่มจากสร้างแม่พิมพ์ โดยนำแผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตร มาตัดเป็นรูปทรงพีรามิดตัด ทั้งด้านนอกและด้านใน แล้วยึดด้วยเทปกาวอะลูมิเนียม โดยแม่พิมพ์อะลูมิเนียมด้านนอกมีพื้นที่ช่องเปิดด้านล่าง 7×7 ตารางเซนติเมตร และขนาดพื้นที่ช่องเปิดด้านบน 15×15 ตารางเซนติเมตร จากนั้นละลายโพลียูรีเทน และโพลียูรีเทนผสมกรดบอริกชนิดผงในอัตราส่วน 1:1 แล้วเทลงในช่องว่างระหว่างแผ่นอะลูมิเนียมแม่พิมพ์ที่เตรียมไว้ โดยเทโพลียูรีเทนให้มีความสูงตามต้องการ รอจนกระทั่งโพลียูรีเทนเริ่มแข็งตัว แล้วจึงเทโพลียูรีเทนผสมกรดบอริกชนิดผงลงไปให้เต็มแม่พิมพ์ ทิ้งไว้จนสารละลายแข็งตัวจึงแกะออกจากแม่พิมพ์ โดยมีรายละเอียดในการสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์แต่ละอันดังนี้

นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 1 แม่พิมพ์อะลูมิเนียมด้านในมีช่องเปิดด้านล่าง 3×3 ตารางเซนติเมตร เทสารละลายโพลียูรีเทนให้มีความสูง 5 เซนติเมตร แล้วเทสารละลายโพลียูรีเทนผสมกรดบอริกชนิดผงจนเต็มแม่พิมพ์อะลูมิเนียม

นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 แม่พิมพ์อะลูมิเนียมด้านในมีช่องเปิดด้านล่าง 3×3 ตารางเซนติเมตร เทสารละลายโพลียูรีเทนให้มีความสูง 10 เซนติเมตร แล้วเทสารละลายโพลียูรีเทนผสมกรดบอริกชนิดผงจนเต็มแม่พิมพ์อะลูมิเนียม

นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 3 แม่พิมพ์อะลูมิเนียมด้านในมีช่องเปิดด้านล่าง 2×2 ตารางเซนติเมตร เทสารละลายโพลียูรีเทนให้มีความสูง 10 เซนติเมตร แล้วเทสารละลายโพลียูรีเทนผสมกรดบอริกชนิดผงจนเต็มแม่พิมพ์อะลูมิเนียม

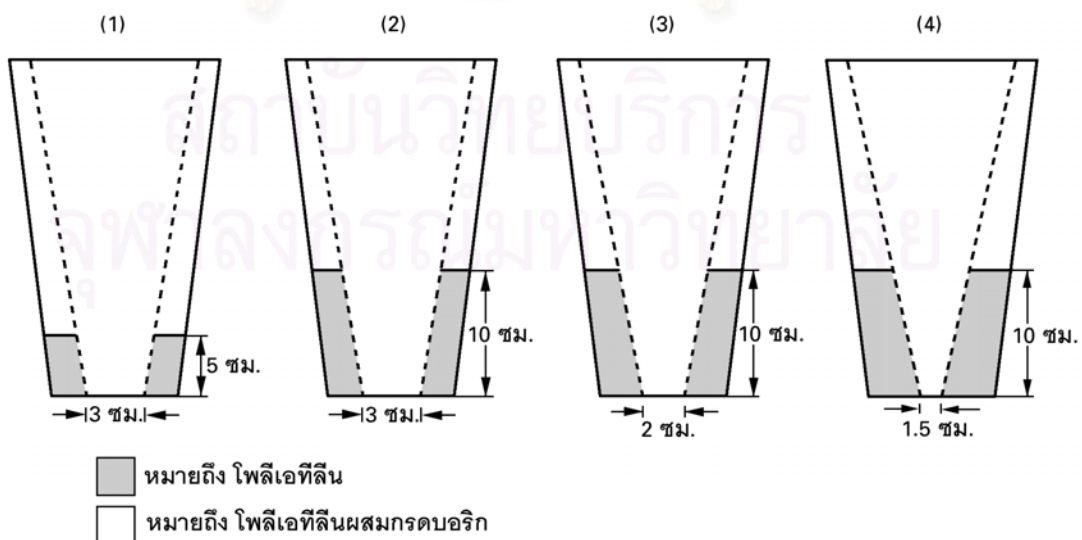
นิวตรอนคอลลีเมเตอร์อันที่ 4 แม่พิมพ์อะลูมิเนียมด้านบนมีช่องเปิดด้านล่าง 1.5×1.5 ตารางเซนติเมตร เทสารละลายโพลีเอทีลีนให้มีความสูง 10 เซนติเมตร แล้วเทสารละลายโพลีเอทีลีนผสมกรดบอริกชนิดผงจนเต็มแม่พิมพ์อะลูมิเนียม

4.1.2 ผลการวิจัย

จากการออกแบบและสร้างนิวตรอนคอลลีเมเตอร์ จะได้นิวตรอนคอลลีเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ รูปทรงพีรามิดตัด ที่สร้างจากโพลีเอทีลีนและโบรอนทั้งหมด 4 อัน โดยแต่ละอันมีลักษณะแตกต่างกันเพื่อนำไปทดสอบการถ่ายภาพ และเลือกนิวตรอนคอลลีเมเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต่อไป คุณสมบัติของนิวตรอนคอลลีเมเตอร์ที่สร้างขึ้นแสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 คุณสมบัติของนิวตรอนคอลลีเมเตอร์ที่สร้างขึ้น

นิวตรอนคอลลีเมเตอร์อันที่	ความยาวของคอลลีเมเตอร์ (ซม.)	ส่วนของโพลีเอทีลีน (P.E.) (ซม.)	ส่วนของโพลีเอทีลีนผสมโบรอน(ซม.)	ทางเข้าของนิวตรอน (ซม.)	อัตราส่วน L/D
1	30	5	25	3.0	10
2	30	10	20	3.0	10
3	30	10	20	2.0	15
4	30	10	20	1.5	20



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงนิวตรอนคอลลีเมเตอร์ที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4.2 รูปถ่ายนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่ได้สร้างขึ้น

4.2 การวัดรีเลทีฟฟลักซ์และอัตราส่วนแคดเมียมของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์

4.2.1 วิธีดำเนินการวิจัย

(1) จัดระบบวัดนิวตรอนช้าโดยใช้หัววัดนิวตรอนแบบฉาบโบรอน (Boron lined detector) และใช้เครื่องวัดรังสีของ Eberline ซึ่งมีเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว เครื่องนับวัด วงจรตั้งเวลา และแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักย์สูงอยู่ภายในเครื่องแล้ว

(2) วัดรีเลทีฟฟลักซ์โดยใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อื่นที่ 1 วัด 3 ตำแหน่งโดยแต่ละตำแหน่งใช้เวลานับ 5 นาที แล้วนำแผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตร มาปิดหัววัดไว้ วัดแต่ละตำแหน่งนาน 5 นาทีเช่นกัน

(3) เปลี่ยนตำแหน่งระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอน กับปลายนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ครั้งละ 2 เซนติเมตร ตั้งแต่ 0 ถึง 24 เซนติเมตร แล้วทำการวัดเหมือนข้อ (2)

(4) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีเลทีฟฟลักซ์กับตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน

(5) คำนวณอัตราส่วนแคดเมียม โดย

$$\text{อัตราส่วนแคดเมียม} = \frac{\text{จำนวนนับนิวตรอนเมื่อไม่มีแคดเมียมปิด}}{\text{จำนวนนับนิวตรอนเมื่อมีแผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตร ปิด}}$$

(6) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคดเมียมที่คำนวณได้ กับตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน

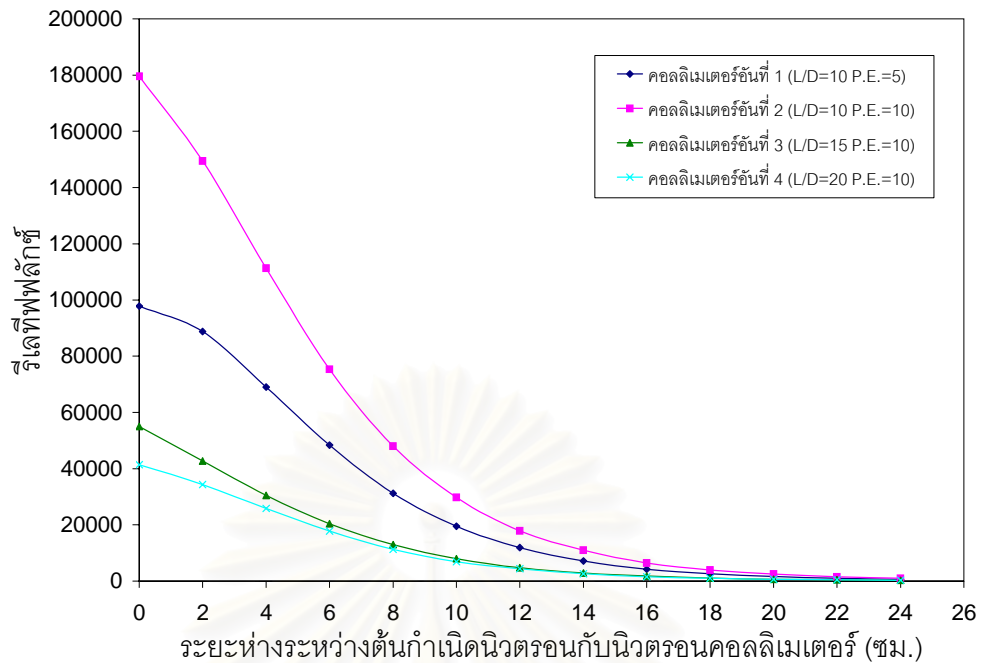
(7) ใช้นิวตรอนคออลิเมเตอร์อื่นที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ ทำการนับนิวตรอนและสร้างกราฟเช่นเดียวกับการวิจัยเมื่อใช้นิวตรอนคออลิเมเตอร์อื่นที่ 1

4.2.2 ผลการวัดรีเลทีฟฟลักซ์

จากการทดลองวัดรีเลทีฟฟลักซ์ของนิวตรอนคออลิเมเตอร์ทั้ง 4 อัน โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลิเมเตอร์ ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.2 และสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ของค่ารีเลทีฟฟลักซ์กับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนและนิวตรอนคออลิเมเตอร์อื่นที่ 1, 2, 3 และ 4 ได้ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาค่ารีเลทีฟฟลักซ์ของนิวตรอนคออลิเมเตอร์

ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลิเมเตอร์ (ซม.)	รีเลทีฟฟลักซ์ (Count/5min)			
	คออลิเมเตอร์อื่นที่ 1	คออลิเมเตอร์อื่นที่ 2	คออลิเมเตอร์อื่นที่ 3	คออลิเมเตอร์อื่นที่ 4
	(L/D=10,P.E.=5)	(L/D=10,P.E.=10)	(L/D=15,P.E.=10)	(L/D=20,P.E.=10)
0	97843	179599	54941	41438
2	88749	149472	42741	34353
4	69042	111294	30521	25837
6	48389	75355	20370	17809
8	31243	47969	12993	11239
10	19525	29772	7930	6890
12	11893	17888	4769	4370
14	7170	10996	2903	2565
16	4187	6445	1819	1561
18	2603	3893	1078	982
20	1618	2504	664	607
22	961	1530	468	423
24	643	975	312	300



รูปที่ 4.3 กราฟเปรียบเทียบวีเลทีฟลักซ์กับตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอนของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 1, 2, 3 และ 4

4.2.3 วิเคราะห์ผลการวัดวีเลทีฟลักซ์

เมื่อพิจารณาผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 พบว่าค่าวีเลทีฟลักซ์ของนิวตรอนแปรผกผันกับตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนคือ เมื่อระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้น ค่าวีเลทีฟลักซ์มีค่าลดลง

ค่าวีเลทีฟลักซ์ของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่มีส่วนประกอบต่างกันจะมีค่าต่างกันด้วย เช่น นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 มีค่าวีเลทีฟลักซ์มากกว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 1 เนื่องจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 มีส่วนของโพลิเอทีลีนยาว 10 เซนติเมตร ส่วนนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 1 มีความยาวของโพลิเอทีลีนเพียง 5 เซนติเมตร ความยาวของโพลิเอทีลีนนี้ ทำให้นิวตรอนสามารถเข้าสู่นิวตรอนคอลลิเมเตอร์จากผนังด้านข้างได้ จึงทำให้มีค่าวีเลทีฟลักซ์สูง

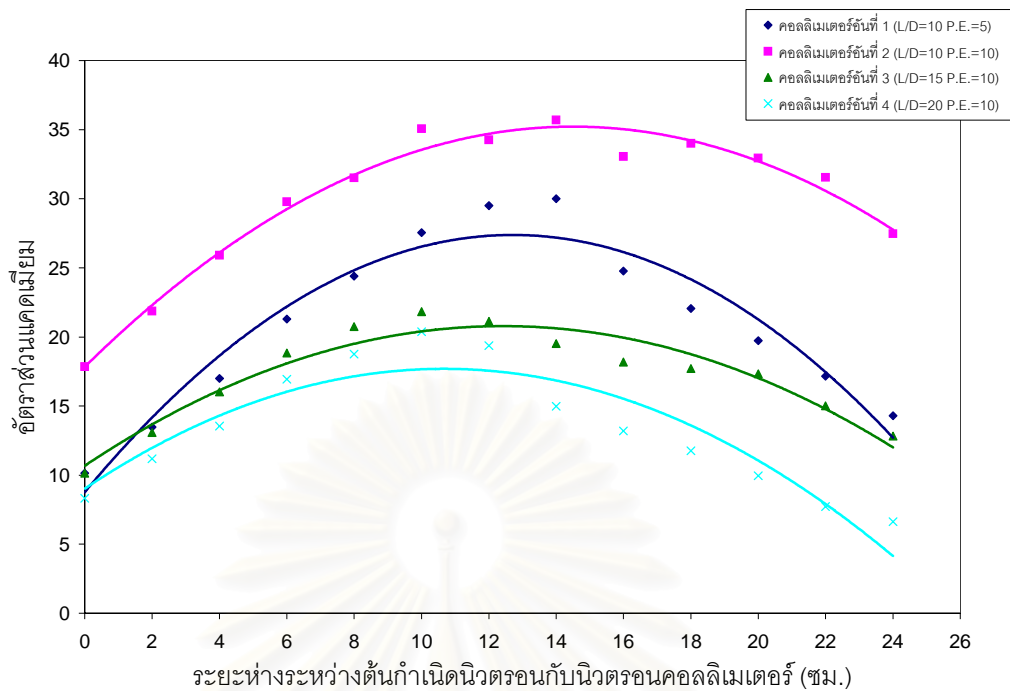
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าวีเลทีฟลักซ์ของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งมีความสูงของโพลิเอทีลีนเท่ากัน คือ 10 เซนติเมตร แต่มีค่า L/D ต่างกัน ค่าวีเลทีฟลักซ์ของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 มีค่ามากกว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 3 และ 4 ตามลำดับสรุปได้ว่าเมื่อ L/D มีค่ามากขึ้น จะทำให้ค่าวีเลทีฟลักซ์ลดลง เนื่องจาก L/D มีค่ามากขึ้นจะทำให้ช่องเปิดด้านล่างของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์มีขนาดเล็กลง หรือมีความยาวมากขึ้น นิวตรอนจึงเข้าสู่คอลลิเมเตอร์ได้น้อยลง

4.2.4 ผลการหาอัตราส่วนแคดเมียม

จากการทดลองวัดค่ารีเลทีฟลักซ์ของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ทั้ง 4 อัน โดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ แล้วนำมาคำนวณหาอัตราส่วนแคดเมียม ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.3 และสามารถเขียนกราฟเปรียบเทียบของค่าอัตราส่วนแคดเมียมของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ทั้ง 4 อันได้ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.3 ผลการทดลองหาอัตราส่วนแคดเมียมของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์

ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (ซม.)	อัตราส่วนแคดเมียม			
	คอลลิเมเตอร์อันที่ 1	คอลลิเมเตอร์อันที่ 2	คอลลิเมเตอร์อันที่ 3	คอลลิเมเตอร์อันที่ 4
	(L/D=10,P.E.=5)	(L/D=10,P.E.=10)	(L/D=15,P.E.=10)	(L/D=20,P.E.=10)
0	10.14	17.85	10.15	8.32
2	13.47	21.88	13.08	11.18
4	17.00	25.91	16.03	13.55
6	21.30	29.77	18.83	16.94
8	24.41	31.52	20.74	18.76
10	27.54	35.07	21.83	20.38
12	29.51	34.27	21.13	19.38
14	30.00	35.70	19.53	14.98
16	24.78	33.05	18.19	13.20
18	22.06	34.00	17.72	11.76
20	19.73	32.95	17.32	9.95
22	17.16	31.55	15.01	7.73
24	14.29	27.46	12.82	6.63



รูปที่ 4.4 กราฟเปรียบเทียบระหว่างอัตราส่วนแคดเมียมกับตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอนของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 1, 2, 3 และ 4

4.2.5 วิเคราะห์ผลการหาอัตราส่วนแคดเมียม

อัตราส่วนแคดเมียมที่คำนวณได้จากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 2 มีค่ามากที่สุด และมีค่าลดลงเมื่อใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 1, 3 และ 4 ตามลำดับที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนเดียวกัน นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่มีค่ารีเลทีฟฟลักซ์สูง จะมีจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มากกว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่มีค่ารีเลทีฟฟลักซ์ต่ำ ซึ่งอัตราส่วนแคดเมียมสามารถบอกถึงจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ดังนั้นนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 2 จึงมีจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มากกว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 1, 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองวัดรีเลทีฟฟลักซ์ในข้อ 4.2.2

เมื่อเปลี่ยนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ค่าอัตราส่วนแคดเมียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุด ๆ หนึ่งแล้วจึงมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเลื่อนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ให้มากขึ้นจะทำให้มีความหนาของสารหน่วงนิวตรอนเพิ่มขึ้น นิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดนิวตรอนจึงสามารถลดพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงความหนาของสารหน่วงนิวตรอนค่าหนึ่ง อัตราส่วนแคดเมียมจะเริ่มลดลงเมื่อเลื่อนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ออกไปอีก เนื่องจากเทอร์มัลนิวตรอนที่เกิดขึ้นไม่มีพลังงานเพียงพอที่จะผ่านความหนาของสารหน่วงนิวตรอนนั้นมาเข้าสู่ นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ได้

ดังนั้นการเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลลิเมเตอร์เพื่อใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จึงควรเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้อัตราส่วนแคดเมียมสูงสุด แต่จะมีข้อเสียคือ ทำให้ค่ารีเลทีฟลักซ์มีค่าลดลงไป ด้วยเหตุนี้จึงควรเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนให้เหมาะสม

4.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่เหมาะสม

4.3.1 วิธีดำเนินการวิจัย

การเลือกนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่เหมาะสม นอกจากจะพิจารณาค่ารีเลทีฟลักซ์และอัตราส่วนแคดเมียมที่ได้จากการวิจัยข้อ 4.2 แล้วจำเป็นต้องนำนิวตรอนคออลลิเมเตอร์มาทดลองถ่ายภาพเพื่อตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้ โดยมีรายละเอียดการทดลองดังนี้

(1) ทดลองถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างโดยใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ในการบันทึกภาพ ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 15 ชั่วโมงเท่ากัน เลือกใช้นิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่ 2, 3 และ 4 ซึ่งมีความสูงของโพลิเอทีลีน 10 ซม. เท่ากัน โดยมีรายละเอียดของการถ่ายภาพดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงรายละเอียดการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่เหมาะสม

ฟิล์มที่	นิวตรอนคออลลิเมเตอร์อันที่	L/D	ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ (x) (ซม.)	ค่ารีเลทีฟลักซ์ (Count/5นาที)	อัตราส่วนแคดเมียม
1	2	10	0	179599	17.85
2	2	10	4	111294	25.91
3	2	10	8	47969	31.52
4	3	15	0	54941	10.15
5	3	15	4	30521	16.03
6	3	15	8	12993	20.74
7	4	20	0	41438	8.32
8	4	20	4	25837	13.55
9	4	20	8	11239	18.76

(2) นำฟิล์มทั้งหมดไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มในห้องมืดโดยไม่เปิดไฟนิรภัย (Safe light) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ล้างน้ำยาสร้างภาพ ID-11 นาน 9 นาที โดยเขย่าทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลา 15 วินาที เพื่อให้ฟิล์มทำปฏิกิริยากับน้ำยาได้ทั่วถึง ล้างน้ำเพื่อหยุดการสร้างภาพ นาน 1 นาที ล้างน้ำยาคงสภาพ HYPAM นาน 3 นาที จากนั้นนำไปล้างน้ำนาน 15 นาที เพื่อให้ น้ำยาคงสภาพออกไปจากฟิล์ม และทิ้งไว้ให้แห้ง

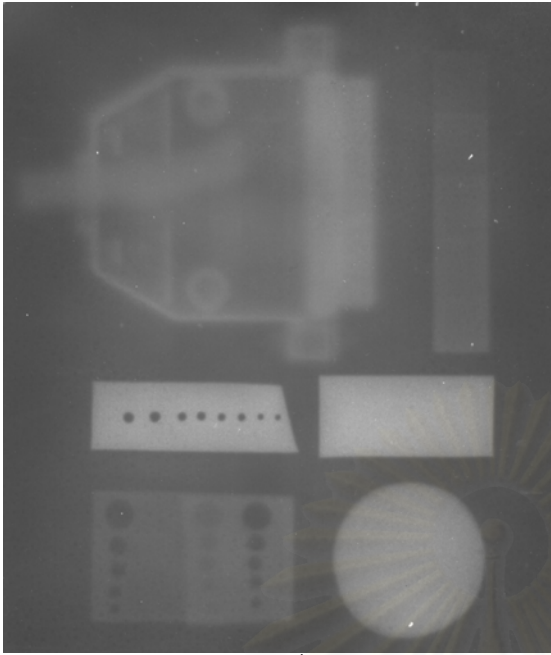
(3) สแกนค่าความดำสัมพัทธ์ของฟิล์มทั้งหมด โดยสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจอร์มาไรต์ เพื่อเปรียบเทียบความดำ และความแปรปรวนต่าง โดยใช้ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม

(4) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำสัมพัทธ์ของฟิล์ม กับ ตำแหน่งที่สแกน

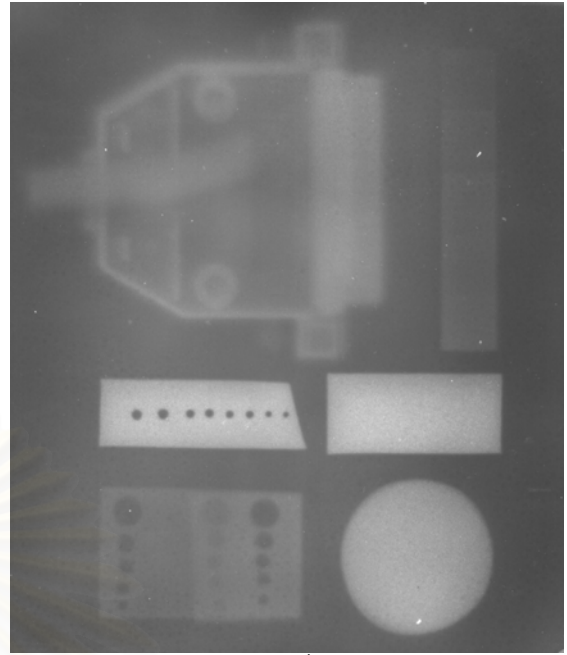
4.3.2 ผลการวิจัย

เมื่อถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์และตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนต่างกัน ได้ภาพถ่ายดังรูปที่ 4.5, 4.6 และ 4.7

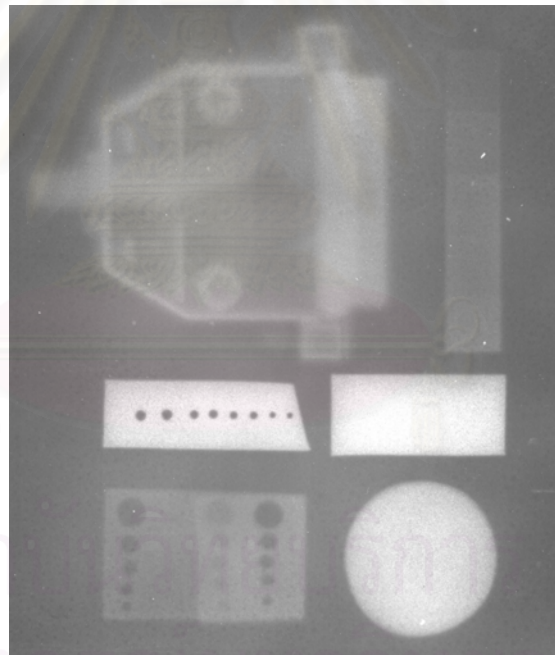
นำภาพถ่ายด้วยนิวตรอนจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อื่นที่ 2, 3 และ 4 ไปสแกนอ่านค่าความดำสัมพัทธ์ด้วยระบบสแกนค่าความดำของฟิล์ม โดยสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจอร์มาไรต์ แล้วนำค่าความดำสัมพัทธ์ไปสร้างกราฟ จะได้โพรไฟล์ค่าความดำสัมพัทธ์ดังรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10



ฟิล์มที่ 1



ฟิล์มที่ 2



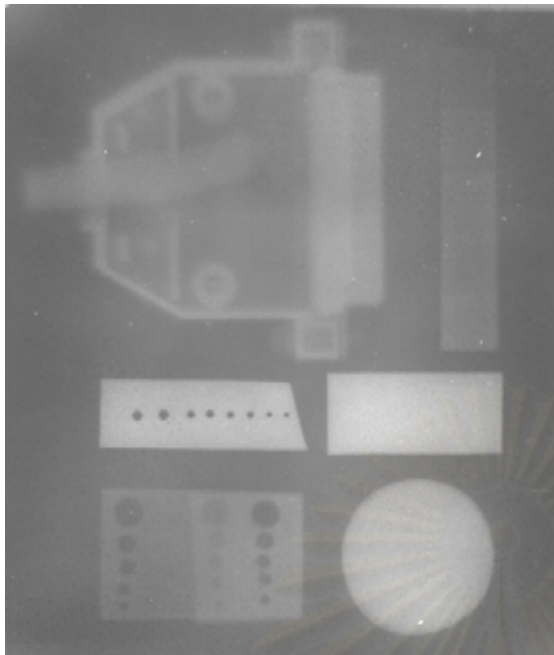
ฟิล์มที่ 3

ฟิล์มที่ 1 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 0 ซม.

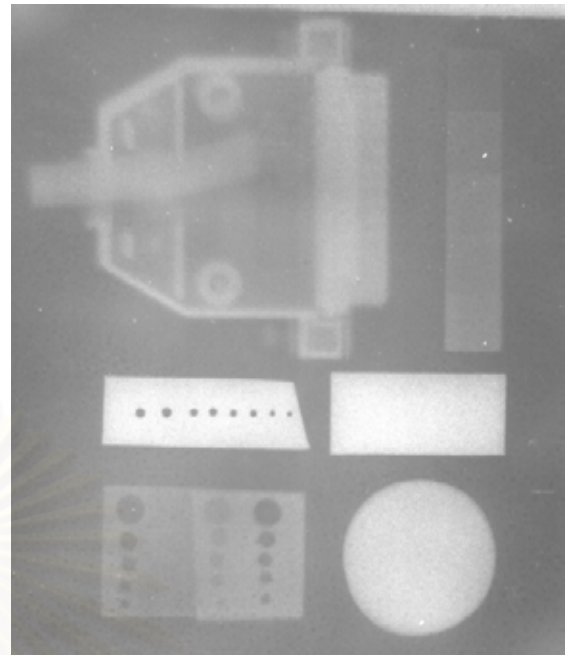
ฟิล์มที่ 2 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 4 ซม.

ฟิล์มที่ 3 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 8 ซม.

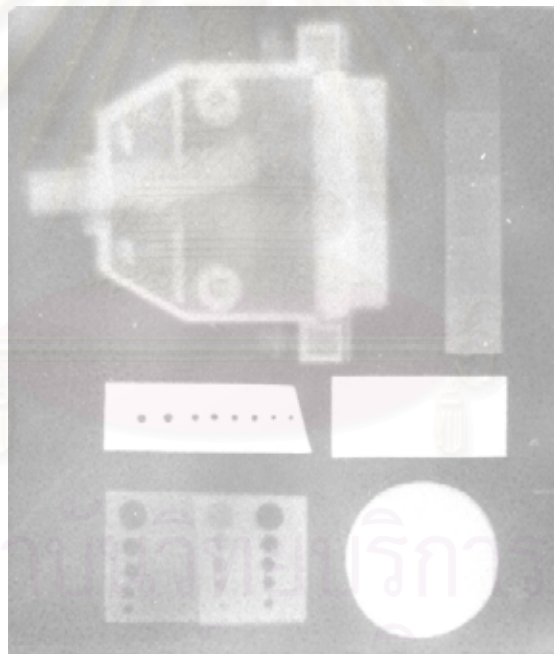
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 ($L/D=10$) ใช้เวลาถ่ายภาพ
15 ชั่วโมง



ฟิล์มที่ 4



ฟิล์มที่ 5



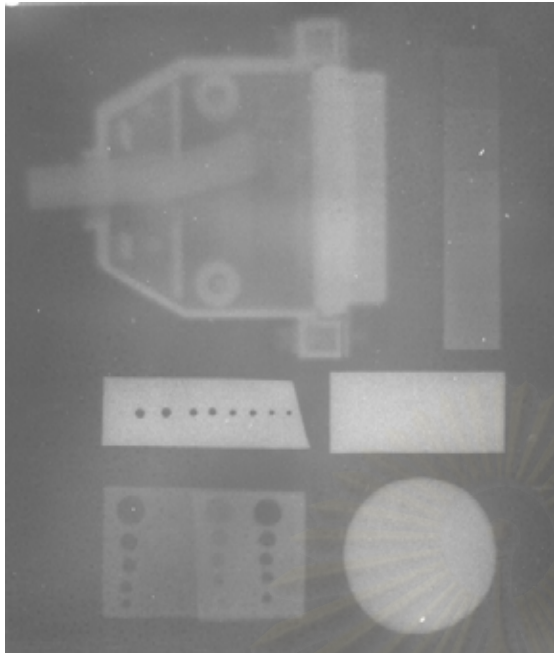
ฟิล์มที่ 6

ฟิล์มที่ 4 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 0 ซม.

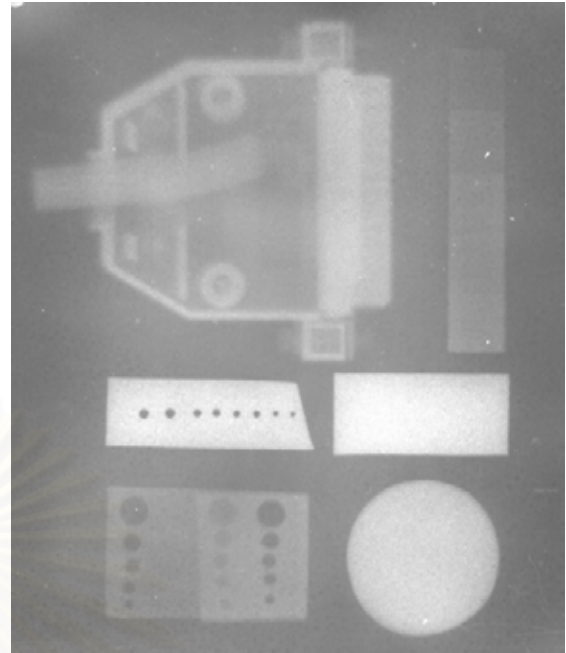
ฟิล์มที่ 5 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 4 ซม.

ฟิล์มที่ 6 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 8 ซม.

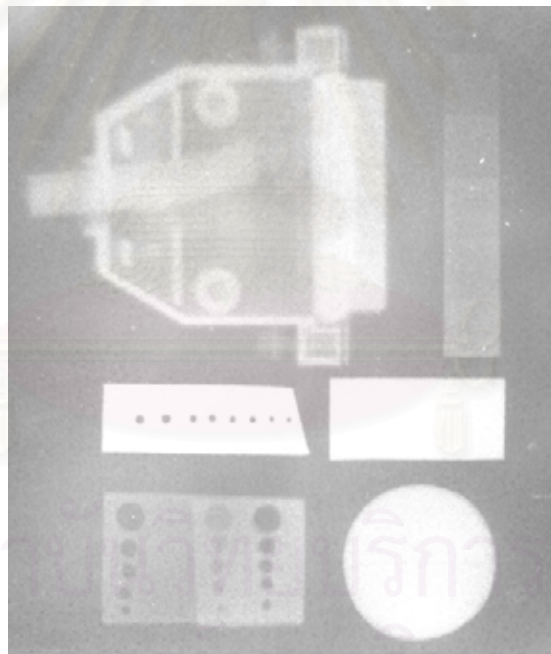
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ขั้นที่ 3 ($L/D=15$) ใช้เวลาถ่ายภาพ 15 ชั่วโมง



ฟิล์มที่ 7



ฟิล์มที่ 8



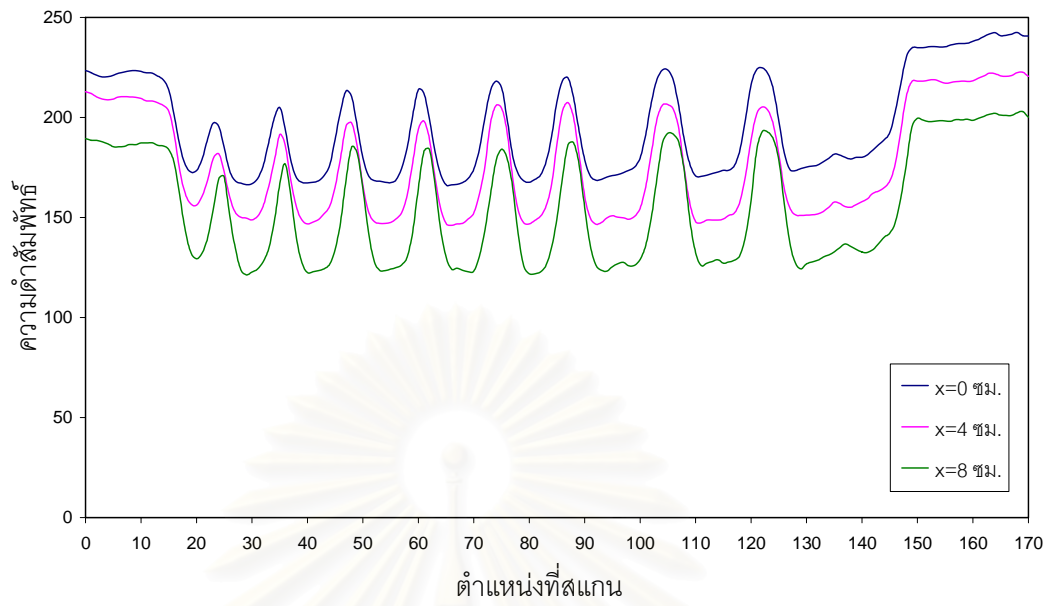
ฟิล์มที่ 9

ฟิล์มที่ 7 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 0 ซม.

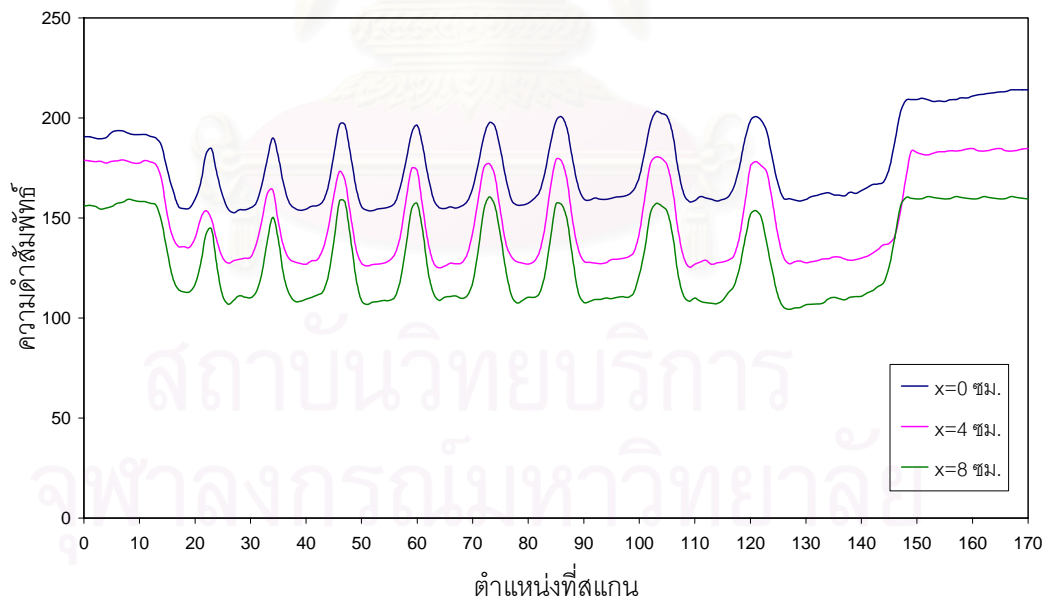
ฟิล์มที่ 8 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 4 ซม.

ฟิล์มที่ 9 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 8 ซม.

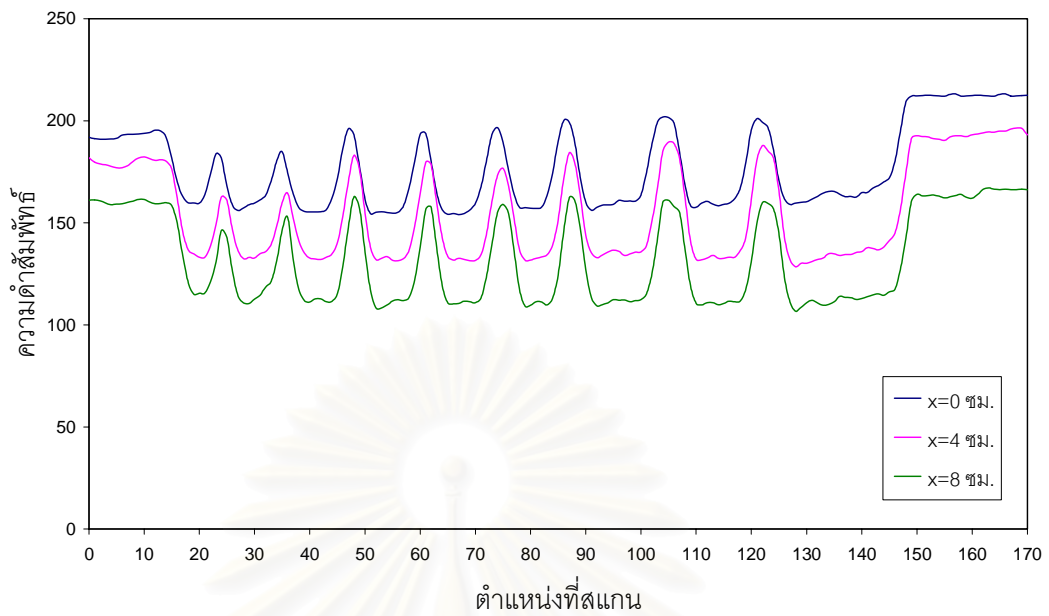
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ขั้นที่ 4 ($L/D=20$) ใช้เวลาถ่ายภาพ 15 ชั่วโมง



รูปที่ 4.8 ความเข้มแสงของฟิล์มที่ถ่ายภาพจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 2 ($L/D=10$)

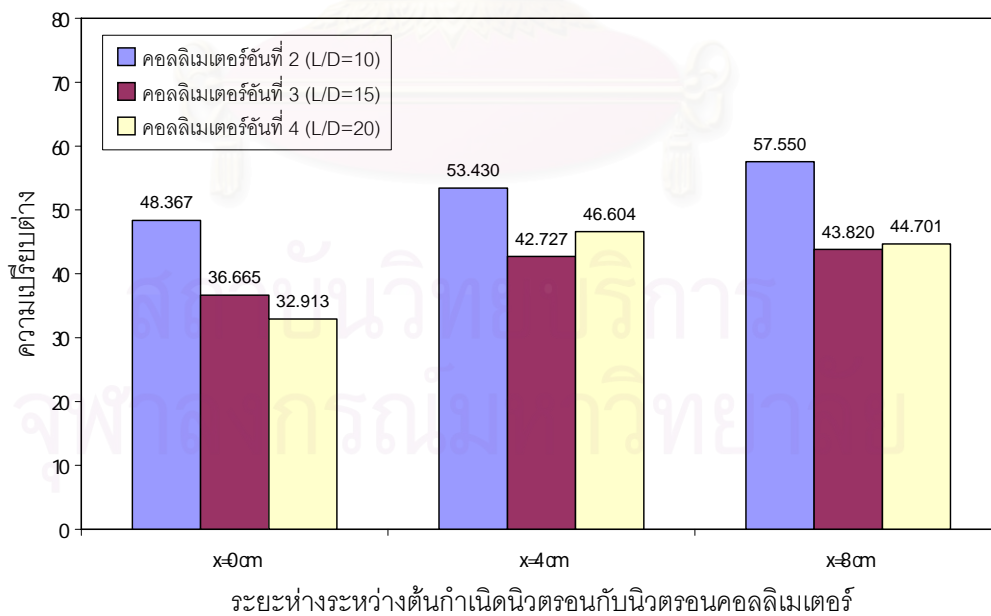


รูปที่ 4.9 ความเข้มแสงของฟิล์มที่ถ่ายภาพจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 3 ($L/D=15$)



รูปที่ 4.10 ความเข้มแสงของฟิล์มที่ถ่ายภาพจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันดับที่ 4 ($L/D=20$)

เมื่อพิจารณาโปรไฟล์ค่าความเข้มของฟิล์มทั้ง 9 ภาพ สามารถนำมาหาค่าความเปรียบต่างระหว่างแบบคร่าวด์และแผ่นแคดเมียมได้กราฟดังรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟเปรียบเทียบค่าความเปรียบต่างของภาพ

4.3.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากการทดลองหานิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพ เมื่อพิจารณาโพสไฟล์ความดำของฟิล์มรูปที่ 4.8, 4.9 และ 4.10 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 ($L/D=10$) มีค่าความดำสัมพัทธ์มากกว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 3 ($L/D=15$) และ 4 ($L/D=20$) อย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 มีค่ารีเลทีฟฟลักซ์สูงกว่ามาก ซึ่งสังเกตได้จากผลการทดลองดังรูปที่ 4.3 ส่วนนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 3 และ 4 มีค่าความดำใกล้เคียงกันก็เนื่องจากมีค่ารีเลทีฟฟลักซ์ใกล้เคียงกันนั่นเอง

สำหรับความเปรียบเทียบต่างของภาพที่ได้จากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ทั้ง 3 อันสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.11 ระยะเวลาห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์มีผลกับความเปรียบเทียบและความดำของภาพ เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง $x=4$ ซม. ซึ่งเป็นตำแหน่งที่ให้ความดำของภาพเหมาะสม นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 4 ($L/D=20$) ให้ความเปรียบเทียบต่าง 46.604 ซึ่งมากกว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 3 ที่มีค่า 42.727

เมื่อพิจารณานิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 2 ($L/D=10$) มีค่าความเปรียบเทียบและความดำของภาพมากกว่านิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 3 ($L/D=15$) และ 4 ($L/D=20$) แต่เมื่อสังเกตภาพถ่ายของคอนเนคเตอร์ DB25S ภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัดต่ำมากเมื่อเทียบกับภาพถ่ายที่ได้จากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 3 และ 4 เนื่องจากค่า L/D ของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์มีผลกับความคมชัดของภาพนั่นเอง ดังนั้นจึงเลือกนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 4 ไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

4.4 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน

4.4.1 วิธีดำเนินการวิจัย

นอกจากการเลือกนิวตรอนคอลลิเมเตอร์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแล้ว การเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนก็เป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องทำการทดลองเพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดของการทดลองดังนี้

(1) ทดลองถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างโดยใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์อันที่ 4 ($L/D=20$) ใช้ฟิล์มอีลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ในการบันทึกภาพ ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 18 ชั่วโมงเท่ากัน โดยมีรายละเอียดของการถ่ายภาพดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 แสดงรายละเอียดการทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน

ฟิล์มที่	ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (x) (ซม.)	ค่ารีเลทีฟฟลักซ์ (Count/5นาที)	อัตราส่วนแคดเมียม
10	0	41438	8.32
11	2	34353	11.18
12	4	25837	13.55
13	6	17809	16.94
14	8	11239	18.76

(2) นำฟิล์มทั้งหมดไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนวิธีดำเนินการวิจัยข้อ 4.3.1

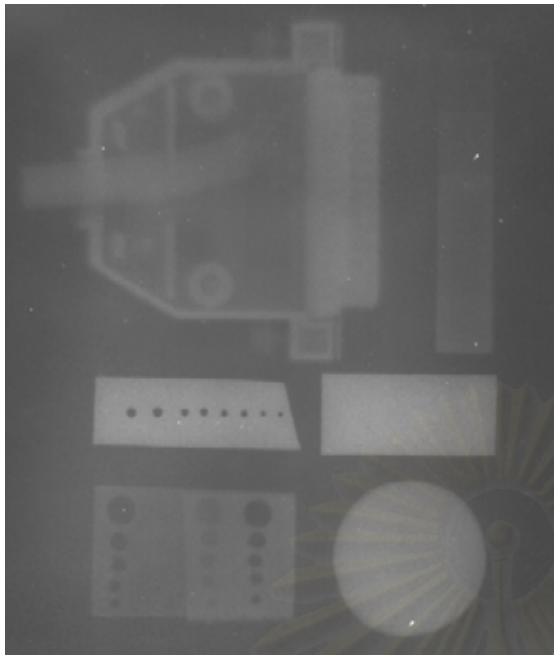
(3) สแกนค่าความดำสัมพันธ์ของฟิล์มทั้งหมด โดยสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจาะรู เพื่อเปรียบเทียบความดำ และความแปรปรวนต่าง โดยใช้ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม

(4) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำสัมพันธ์ของฟิล์มกับตำแหน่งที่สแกน

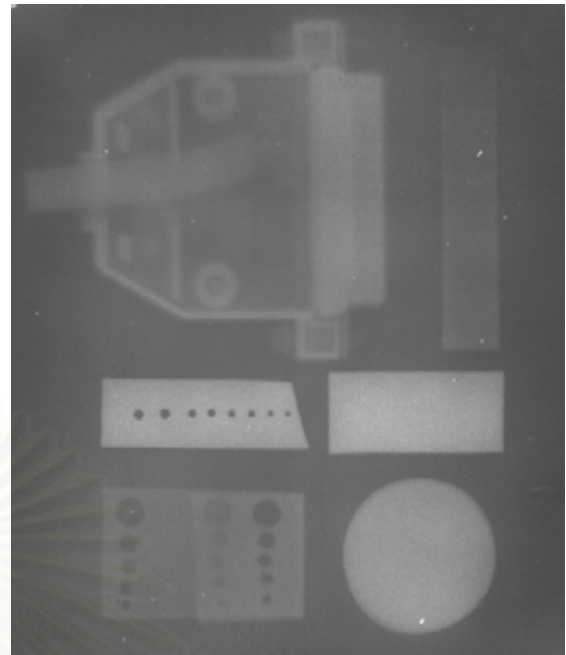
4.4.2 ผลการวิจัย

เมื่อถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเปลี่ยนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ได้ภาพดังแสดงในรูปที่ 4.12 และนำภาพไปสแกนอ่านค่าความดำสัมพันธ์ด้วยระบบสแกนค่าความดำฟิล์ม โดยสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจาะรู แล้วนำค่าความดำสัมพันธ์ไปสร้างกราฟเพื่อเปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 4.13 จากนั้นนำโพรไฟล์ค่าความดำของฟิล์มทั้งหมด มาหาค่าความแปรปรวนต่าง ได้กราฟแสดงในรูป 4.14

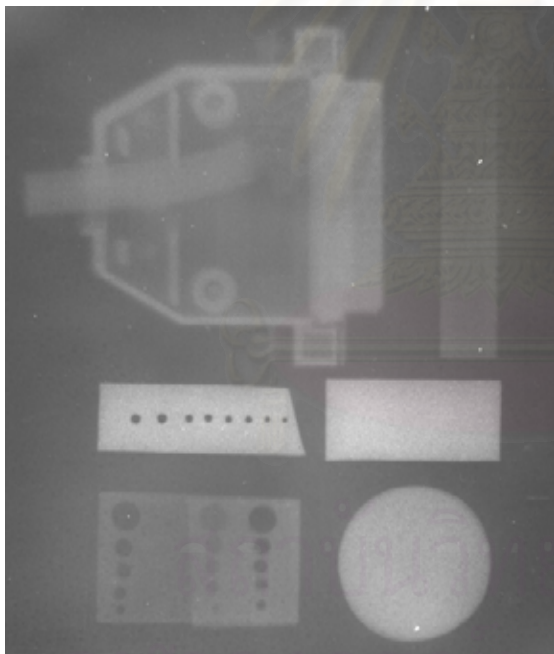
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



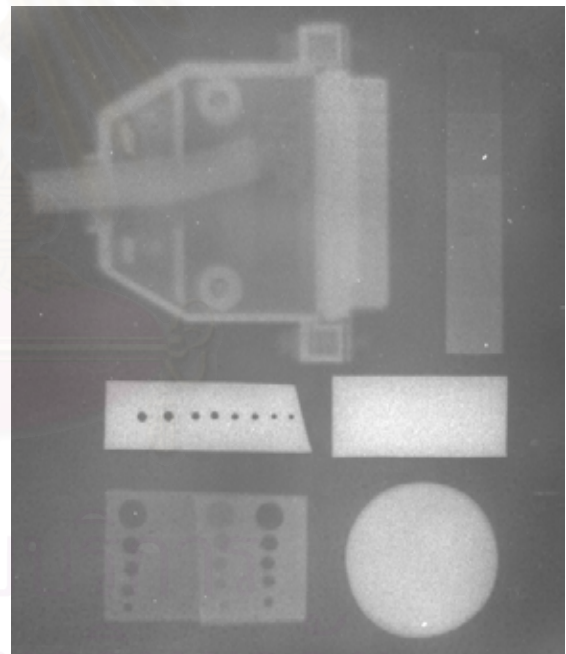
ฟิล์มที่ 10



ฟิล์มที่ 11



ฟิล์มที่ 12



ฟิล์มที่ 13

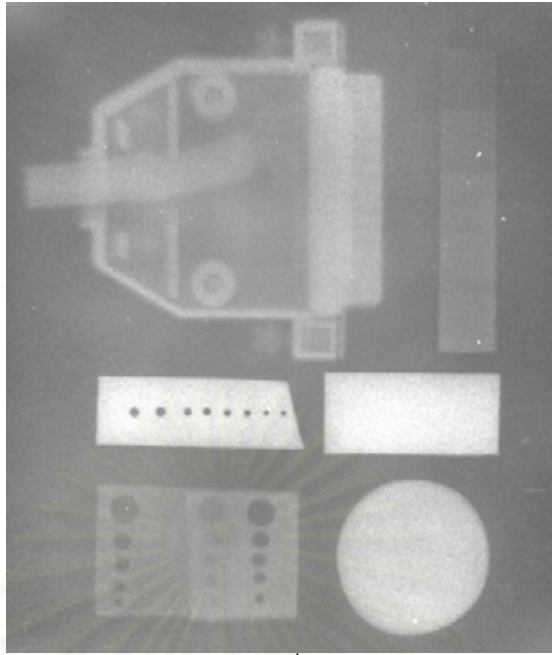
ฟิล์มที่ 10 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ = 0 ซม.

ฟิล์มที่ 11 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ = 2 ซม.

ฟิล์มที่ 12 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ = 4 ซม.

ฟิล์มที่ 13 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ = 6 ซม.

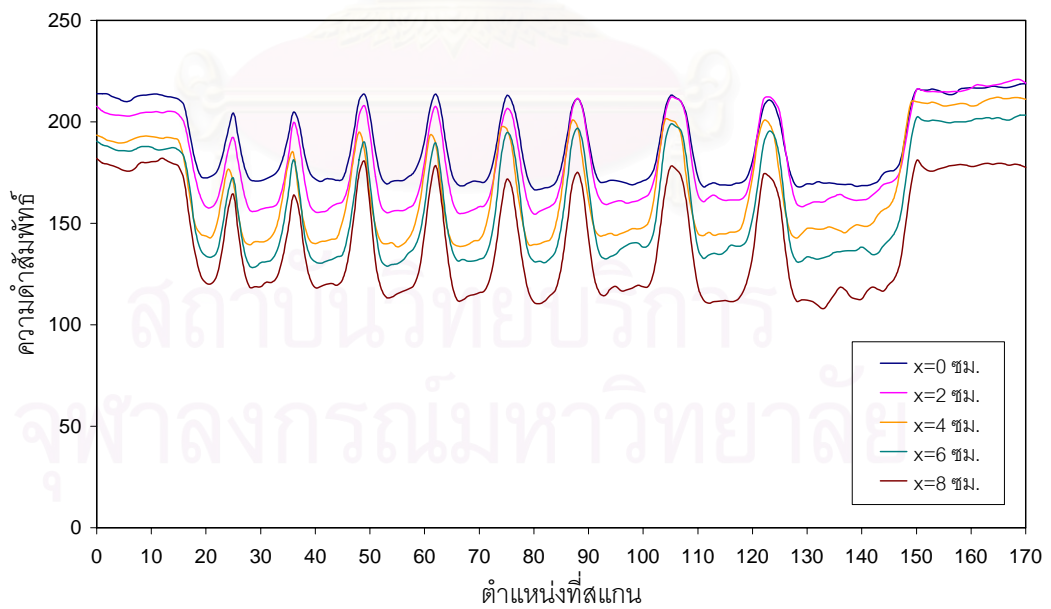
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอน



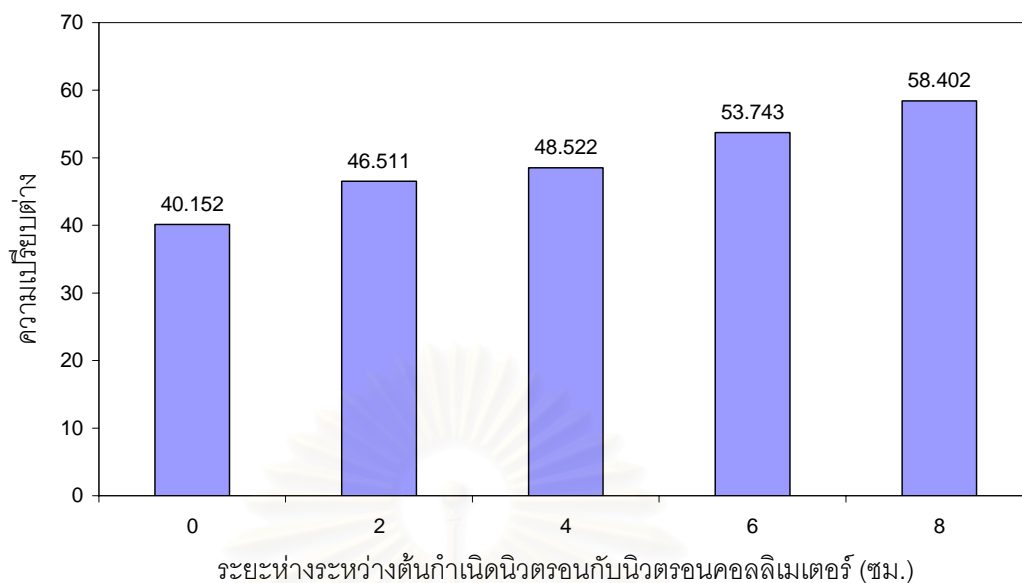
ฟิล์มที่ 14

ฟิล์มที่ 14 ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ = 8 ซม.

รูปที่ 4.12 (ต่อ)



รูปที่ 4.13 ความดำสัมพัทธ์ของฟิล์มที่ถ่ายภาพเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน



รูปที่ 4.14 กราฟเปรียบเทียบค่าความเปรียบเทียบของภาพเมื่อเปลี่ยนตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน

4.4.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากผลการทดลองหาตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน ได้โพรไฟล์ค่าความดำสัมพันธ์ของฟิล์มดังรูปที่ 4.13 ที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนชิดปลายนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ($x=0$ ซม.) ให้ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มสูงสุด และความดำสัมพันธ์ของฟิล์มลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับนิวตรอนคอลลิเมเตอร์เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อระยะห่างเพิ่มขึ้นค่ารีเลทีฟลักซ์จะมีค่าลดลง ซึ่งสัมพันธ์กับผลการทดลองในรูปที่ 4.3

เมื่อพิจารณารูปที่ 4.14 ค่าความเปรียบเทียบของฟิล์มที่ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน $x=8$ ซม. ให้ภาพที่มีความเปรียบเทียบสูงสุด และที่ตำแหน่ง $x=0$ ซม. ให้ภาพที่มีความเปรียบเทียบต่ำสุด เนื่องจากที่ตำแหน่ง $x=8$ ซม. เป็นตำแหน่งที่มีจำนวนเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงกว่าที่ตำแหน่ง $x=0$ ซม., $x=2$ ซม., $x=4$ ซม. และ $x=6$ ซม. ตามลำดับ ซึ่งสังเกตได้จากอัตราส่วนแคดเมียมในรูปที่ 4.4 แต่ที่ตำแหน่ง $x=8$ ซม. ให้ภาพที่มีความดำน้อยมากเมื่อเทียบกับภาพถ่ายที่ตำแหน่งอื่น ๆ ดังนั้นการเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนจึงควรเลือกตำแหน่งที่มีความเปรียบเทียบต่ำและความดำของภาพที่เหมาะสม

4.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์

การฟรี-เอกซ์โพสฟิล์มในการทดลองนี้ใช้แสงจากเครื่องอัด-ขยายภาพ เนื่องจากให้แสงกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งฟิล์ม ซึ่งเป็นคุณสมบัติพื้นฐานของเครื่องอัด-ขยายภาพ และการทำงานมีความสะดวกและรวดเร็ว

4.5.1 วิธีดำเนินการวิจัย

(1) หาเวลาในการฉายแสงจากเครื่องอัดขยายภาพเพื่อให้ความดำของฟิล์มมีความดำอยู่ในช่วง **toe** หรือมีค่าความดำประมาณ **0.4-0.8**^{[1][4]} โดยตัดฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ให้มีขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 5 เซนติเมตร แล้วนำไปฉายแสงที่เวลาต่าง ๆ กัน

(2) นำฟิล์มทั้งหมดไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนวิธีดำเนินการวิจัยข้อ

4.3.1

(3) นำฟิล์มทั้งหมดอ่านค่าความดำด้วยเครื่องวัดความดำของฟิล์ม บันทึกค่าความดำของฟิล์มและเวลาที่ใช้ในการฉายแสง

(4) นำฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส มาฉายแสงด้วยเครื่องอัดขยายภาพ โดยใช้เวลาฉายแสงที่ทำให้ได้ความดำของฟิล์มเท่ากับ **0.6**

(5) นำฟิล์มที่ผ่านกระบวนการฟรี-เอกซ์โพเซอ์ไปถ่ายภาพ โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 6 ชั่วโมง และนำฟิล์มที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการฟรี-เอกซ์โพเซอ์ไปถ่ายภาพ โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 6 ชั่วโมงและ 12 ชั่วโมง

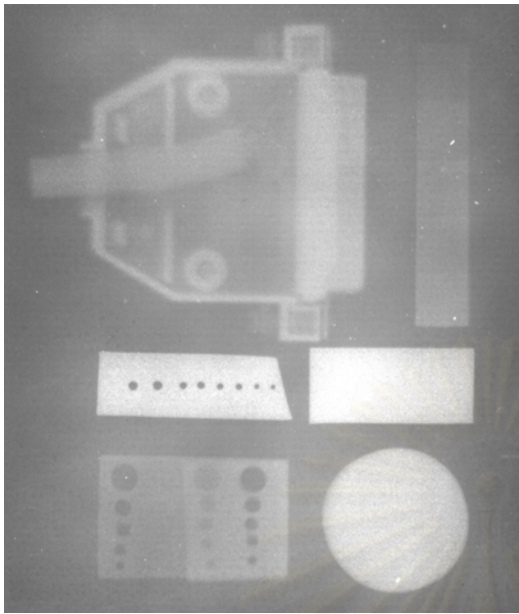
(6) นำฟิล์มที่ได้จากข้อ (5) ไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนวิธีดำเนินการวิจัยข้อ 4.3.1 โดยล้างพร้อมกันทั้งหมด

(7) สแกนค่าความดำสัมพัทธ์ของฟิล์ม โดยสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจาะรูเพื่อเปรียบเทียบความดำและความเบี่ยงต่าง โดยใช้ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม

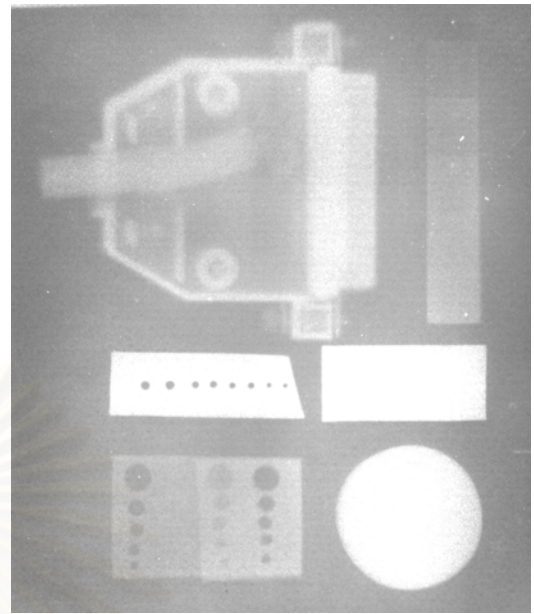
(8) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำสัมพัทธ์ของฟิล์ม กับตำแหน่งที่สแกน

4.5.2 ผลการวิจัย

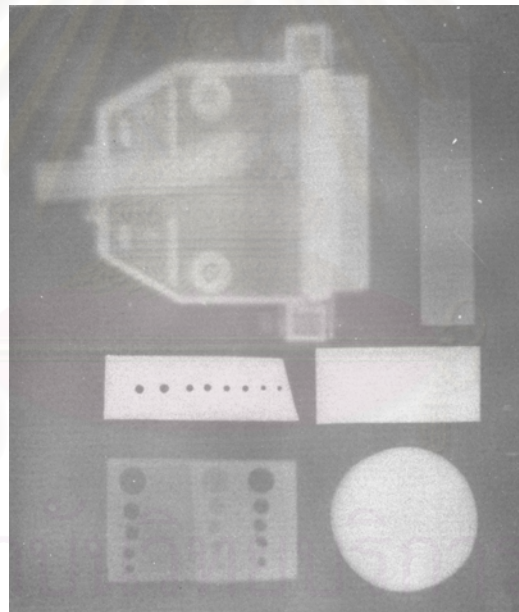
เมื่อถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์ที่ความดำเท่ากับ **0.6** ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 6 ชั่วโมง และไม่ใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอ์ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 12 ชั่วโมงและ 6 ชั่วโมง ได้ภาพดังแสดงในรูปที่ 4.15 และนำไปสแกนอ่านค่าความดำสัมพัทธ์และนำมาสร้างกราฟเปรียบเทียบกัน ได้กราฟแสดงในรูปที่ 4.16



ฟิล์มที่ 15



ฟิล์มที่ 16



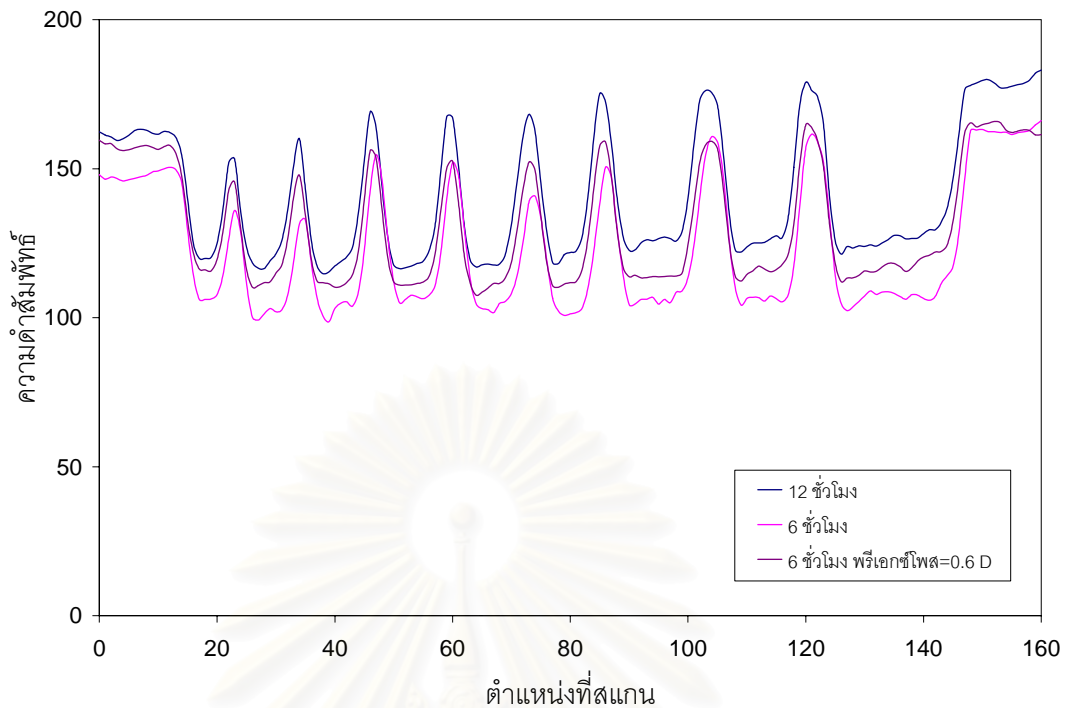
ฟิล์มที่ 17

ฟิล์มที่ 15 ใช้เวลาถ่ายภาพนาน 12 ชั่วโมง

ฟิล์มที่ 16 ใช้เวลาถ่ายภาพนาน 6 ชั่วโมง

ฟิล์มที่ 17 ปรเอกซ์โพสฟิล์มให้มีความดำ 0.6 และใช้เวลาถ่ายภาพนาน 6 ชั่วโมง

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยไม่ใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอร์และใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอร์



รูปที่ 4.16 ความดำสัมพัทธ์ของฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคฟริ-เอกซ์โพเซชันและไม่ใช้เทคนิคฟริ-เอกซ์โพเซชัน

4.5.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคฟริ-เอกซ์โพเซชันที่ความดำ 0.6 ทำให้ได้ภาพที่มีความดำสูงกว่าภาพถ่ายด้วยนิวตรอนที่ไม่ใช้เทคนิคฟริ-เอกซ์โพเซชัน เมื่อพิจารณารูปที่ 4.15 ฟิล์มที่ 15 และฟิล์มที่ 17 มีความดำใกล้เคียงกันแต่ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคฟริ-เอกซ์โพเซชันใช้เวลาในการถ่ายภาพเพียง 6 ชั่วโมง ในขณะที่ภาพถ่ายที่ไม่ใช้เทคนิคฟริ-เอกซ์โพเซชันใช้เวลาในการถ่ายภาพถึง 12 ชั่วโมง เนื่องจากการฟริ-เอกซ์โพเซชันเป็นการทำให้ฟิล์มทำปฏิกิริยากับแสงทำให้มีความดำอยู่ในช่วง toe ซึ่งไม่มีผลต่อการเกิดภาพบนฟิล์มมากนักแต่ใช้เวลาในการเอกซ์โพสด้วยนิวตรอนนาน ดังนั้นการฟริเอกซ์โพสด้วยต้นกำเนิดแสงจึงสามารถช่วยลดระยะเวลาในการเกิดภาพในช่วง toe เมื่อนำฟิล์มไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจึงใช้เวลาในการถ่ายภาพน้อยลง

เมื่อสังเกตกราฟรูปที่ 4.16 การใช้เทคนิคฟริ-เอกซ์โพเซชันจะทำให้ภาพถ่ายมีความเปรียบต่างลดลงเนื่องจากฟิล์มจะมีความเข้มของแบคกราวด์เพิ่มขึ้นทำให้เห็นความแตกต่างระหว่างแบคกราวด์กับชิ้นงานน้อยลง

4.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มความไวสูง

การทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มความไวสูงนี้ใช้ฟิล์ม อิลฟอร์ด เดลต้า 3200 และกระดาษฟูจิ เอฟพี-3000บี ซึ่งมีความไวสูงถึง 3200/36°

4.6.1 วิธีดำเนินการวิจัย โดยใช้ฟิล์ม อิลฟอร์ด เดลต้า 3200

(1) ฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 เป็นฟิล์มแบบม้วน จึงต้องนำมาตัดให้มีขนาดยาว 10.5 เซนติเมตร กว้าง 6.1 เซนติเมตร

(2) นำฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 ไปหาเวลาในการฟรีเอกซ์โพส เพื่อให้ได้ความดำ 0.6 ซึ่งทำการทดลองเหมือนวิธีการดำเนินการวิจัยข้อ 4.5.1

(3) นำฟิล์มที่ผ่านกระบวนการฟรี-เอกซ์โพเซอ์ที่มีความดำ 0.6 ไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง และนำฟิล์มที่ไม่ผ่านกระบวนการฟรี-เอกซ์โพเซอ์ไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนาน 2 ชั่วโมงและ 4 ชั่วโมง

(4) นำฟิล์มในข้อ (3) ไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนวิธีการดำเนินการวิจัยข้อ 4.3.1

(5) สแกนค่าความดำของฟิล์ม โดยสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจอร์คู เพื่อเปรียบเทียบความดำและความแปรปรวนต่าง โดยใช้ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม

(6) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำของฟิล์มกับตำแหน่งที่สแกน

4.6.2 วิธีดำเนินการวิจัย โดยใช้กระดาษฟูจิ เอฟพี-3000บี^[1]

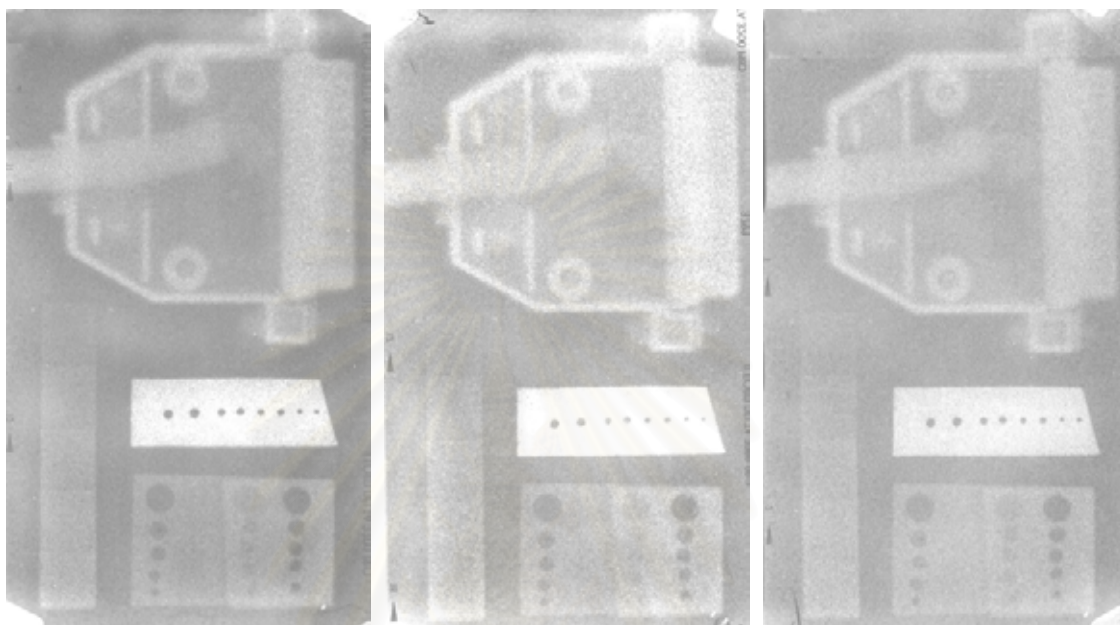
(1) ค่อย ๆ ดึงกระดาษฟูจิ เอฟพี-3000บี แผ่นแรกออกจากกล่อง ซึ่งฟิล์มจะมีด้าน พอซิทีฟและเนกาทีฟ กางฟิล์มออกและวางลงในตลับใส่ฟิล์มโดยให้ด้านเนกาทีฟซึ่งบางและอ่อนกว่าประกบกับฉากเปลี่ยนนิวตรอน ส่วนด้านพอซิทีฟให้อยู่ด้านหลังของด้านเนกาทีฟ

(2) นำฟิล์มที่อยู่ภายในตลับใส่ฟิล์มไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 1 ชั่วโมง

(3) เมื่อครบเวลา นำฟิล์มมาตีเวลลอปในห้องมืด ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส โดยประกบฟิล์มด้านพอซิทีฟและเนกาทีฟเข้าด้วยกัน สอดปลายด้านบนของฟิล์มซึ่งกระเปาะน้ำยาเข้าไปในลูกกลิ้งของแท่นรีดน้ำยา ดึงฟิล์มผ่านลูกกลิ้งโดยเร็ว ทิ้งไว้ 15 วินาที จึงดึงฟิล์มออกจากกัน จะเกิดภาพที่ฟิล์มด้านพอซิทีฟ

4.6.3 ผลการวิจัย

ภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์ม อิลฟอร์ด เดลต้า 3200 แสดงดังรูปที่ 4.17 และเมื่อนำฟิล์มไปสแกนอ่านค่าความดำจะได้โปรไฟล์ค่าความดำสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และเมื่อใช้กระดาษฟูจิ เอพี-3000 ไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะได้ภาพดังแสดงในรูปที่ 4.19



ฟิล์มที่ 18

ฟิล์มที่ 19

ฟิล์มที่ 20

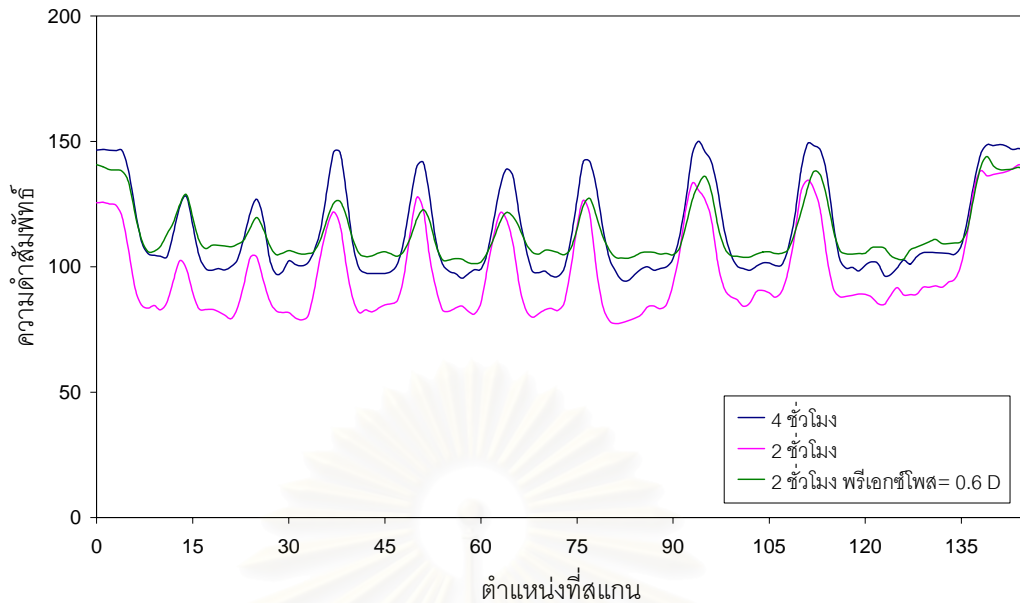
ฟิล์มที่ 18 ใช้เวลาถ่ายภาพนาน 4 ชั่วโมง

ฟิล์มที่ 19 ใช้เวลาถ่ายภาพนาน 2 ชั่วโมง

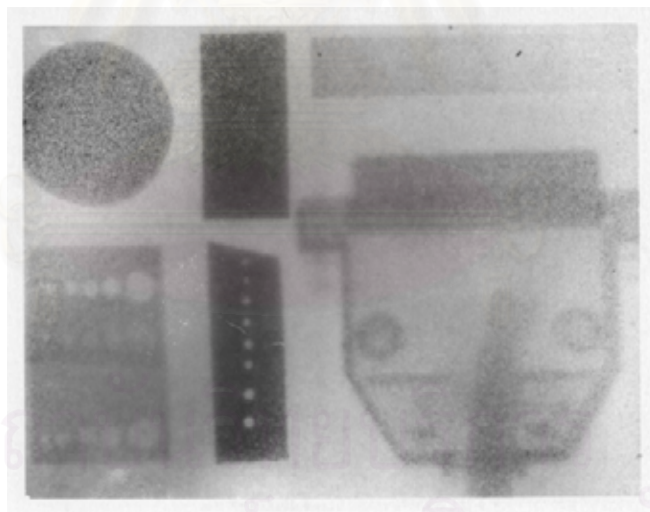
ฟิล์มที่ 20 ปรเอกซ์โพสฟิล์มให้มีความดำ 0.6 และใช้เวลาถ่ายภาพนาน 2 ชั่วโมง

รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายโดยใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 เปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยไม่ใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอร์และใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 ความดำสัมพันธ์ของฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 เปรียบเทียบเมื่อใช้เทคนิคพรี-เอกซ์โพเซอร์ และไม่ใช้เทคนิคพรี-เอกซ์โพเซอร์



รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้กระดาษฟูจิ เอฟพี-3000บี ใช้เวลาถ่ายภาพนาน 1 ชั่วโมง

4.6.4 วิเคราะห์ผลการวิจัย

ฟิล์มความไวสูงอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 เป็นฟิล์มแบบม้วน ก่อนที่จะนำมาใช้ถ่ายภาพจึงต้องตัดให้เป็นแผ่น และฟิล์มมีขนาดเล็กจึงทำให้มีพื้นที่ในการถ่ายภาพน้อย เมื่อสังเกตโปรไฟล์ค่าความดำสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.16 ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ใช้เวลาถ่ายภาพ

นาน 6 ชั่วโมงจึงจะมีค่าความดำสัมพันธ์ใกล้เคียงกับฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 ที่ใช้เวลาในการถ่ายภาพเพียง 4 ชั่วโมง ซึ่งสามารถสังเกตได้จากโพรไฟล์ค่าความดำสัมพันธ์ในรูปที่ 4.18 เนื่องจากฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 มีความไวสูงกว่าจึงใช้เวลาในการถ่ายภาพน้อย

เมื่อนำฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 มาผ่านกระบวนการฟรี-เอกซ์โพเชอร์จะทำให้ภาพถ่ายที่ได้มีความดำสูงขึ้นเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพเท่าเดิม แต่ความเปรียบต่างจะลดลงอย่างมาก เนื่องจากคุณสมบัติของฟิล์มความไวสูงมีช่วง toe สั้นมาก

การถ่ายภาพโดยใช้กระดาษความไวสูง ฟุจิ เอพี-3000 ได้ภาพถ่ายที่สามารถแสดงรายละเอียดของวัตถุตัวอย่างและสามารถมองเห็นรูของแผ่นแคดเมียมขนาด 0.5 มิลลิเมตรได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.19 ซึ่งใช้เวลาในการถ่ายภาพเพียง 1 ชั่วโมง และการใช้งานของฟิล์มชนิดนี้มีความสะดวกและรวดเร็ว เพราะไม่ต้องผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนฟิล์มทั่วไป

4.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคลดอุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอน

4.7.1 วิธีดำเนินการวิจัย

(1) สร้างกล่องเพื่อจำกัดปริมาตรของน้ำที่ใช้เป็นสารห้วงนิวตรอนโดยใช้แผ่นอะคริลิกหนา 3 มิลลิเมตร กล่องมีขนาดกว้าง 15 เซนติเมตร ยาว 55 เซนติเมตร และสูง 35 เซนติเมตร โดยมีฝาด้านบนเปิด แล้วนำไปสวมต้นกำเนิดนิวตรอนและนิวตรอนคออลิเมเตอร์ให้อยู่ภายในกล่องนี้

(2) ภายในกล่องติดตั้งปั๊มขนาดเล็กเพื่อให้ น้ำหมุนเวียนภายในกล่อง และเทอร์โมมิเตอร์เพื่อวัดอุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอน

(3) ตัดฟิล์มอิลฟอร์ด เดลต้า 3200 ขนาดยาว 10.5 เซนติเมตร กว้าง 6.1 เซนติเมตร นำไปใส่ในตลับใส่ฟิล์มแล้วนำไปถ่ายภาพโดยใช้เวลานาน 2 ชั่วโมง

(4) นำฟิล์มอีก 1 แผ่นเหมือนข้อ (3) ไปถ่ายภาพนาน 2 ชั่วโมง ซึ่งลดอุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอนโดยใช้น้ำแข็ง และบันทึกอุณหภูมิทุก ๆ 10 นาที แล้วนำมาหาอุณหภูมิเฉลี่ย

(5) นำฟิล์มในข้อ (3) และ (4) ทั้งสองแผ่นไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนข้อ 4.3.1

(6) สแกนค่าความดำของฟิล์ม โดยสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจาะรู เพื่อเปรียบเทียบความดำและความเปรียบต่าง โดยใช้ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม

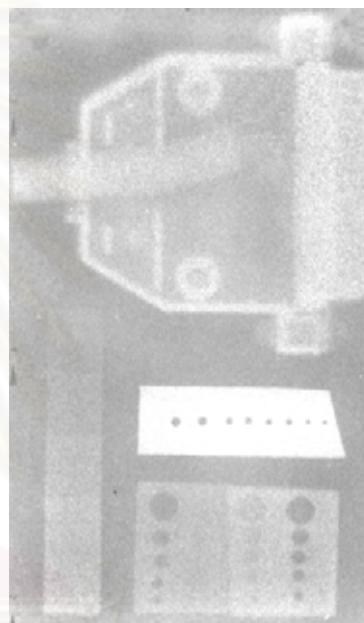
(7) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำของฟิล์มกับตำแหน่งที่สแกน

4.7.2 ผลการวิจัย

จากการทดลองถ่ายภาพเพื่อเปรียบเทียบระหว่างลดอุณหภูมิและไม่ลดอุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอนจะได้ภาพดังแสดงในรูปที่ 4.20 ก่อนจะลดอุณหภูมิ สารห้วงนิวตรอนมีอุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส และเมื่อลดอุณหภูมิ สารห้วงนิวตรอนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 5 องศาเซลเซียส ซึ่งสามารถลดอุณหภูมิลงไปได้ถึง 23 องศาเซลเซียส และเมื่อนำฟิล์มที่ได้ไปสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจาะรู จะได้โพรไฟล์ของค่าความดำสัมพันธ์เปรียบเทียบกันดังแสดงในรูปที่ 4.21



ฟิล์มที่ 21

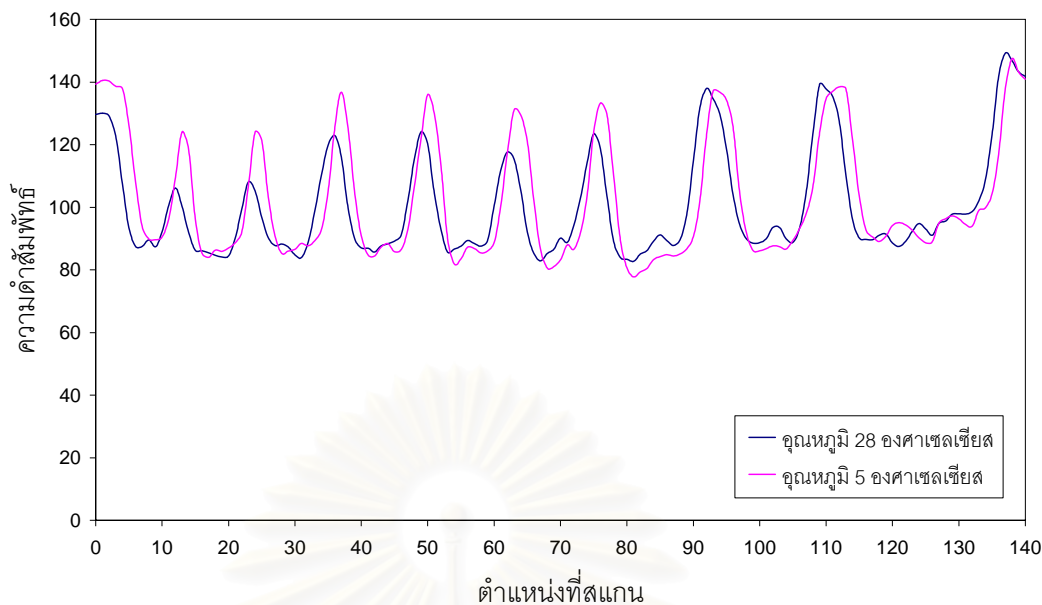


ฟิล์มที่ 22

ฟิล์มที่ 21 ถ่ายภาพที่อุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอน 28 องศาเซลเซียส

ฟิล์มที่ 22 ถ่ายภาพที่อุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอน 5 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายเปรียบเทียบเมื่อลดอุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอน



รูปที่ 4.21 ความดำสัมพัทธ์ของฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างลดอุณหภูมิและไม่ลดอุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอน

4.7.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากผลการทดลองเมื่อลดอุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอนได้ภาพดังแสดงในรูปที่ 4.20 เมื่อสังเกตภาพที่ได้จะเห็นว่าภาพถ่ายทั้งสองมีลักษณะใกล้เคียงกัน แต่เมื่อนำไปสแกนผ่านแผ่นแคดเมียมเจาะรูจะได้โพรไฟล์ดังแสดงในรูปที่ 4.21 ภาพถ่ายที่อุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอนเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสมีความเปรียบต่างสูงกว่าภาพถ่ายที่อุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอนเท่ากับ 28 องศาเซลเซียส หรือเมื่อถ่ายภาพที่อุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอนลดลง 23 องศาเซลเซียส จะมีความเปรียบต่างเพิ่มขึ้นประมาณ 25.8% ซึ่งจากสมการของ The Maxwellian Distribution คือ $E=(3/2)kT$ เมื่ออุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอนลดลงพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนจะลดลงด้วย และจากการคำนวณเมื่ออุณหภูมิของสารหน่วงนิวตรอนลดลง 23 องศาเซลเซียส พลังงานของนิวตรอนจะลดลง 8.27% เมื่อถ่ายภาพจะทำให้มีความเปรียบต่างเพิ่มขึ้นถึง 25.8% นั้นเอง

4.8 การทดลองลดเวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

4.8.1 วิธีดำเนินการวิจัย

(1) ตัดฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 ฟิล์ม ขนาดกว้าง 3 เซนติเมตร ยาว 10.2 เซนติเมตร จำนวน 4 แผ่น

(2) นำฟิล์มที่ตัดไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ใช้เวลาในการถ่ายนาน 10, 6, 4 และ 2 ชั่วโมงตามลำดับ นำฟิล์มไปประกบกับฉากเปลี่ยนนิวตรอนแล้วนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยไม่ใช้วัตถุตัวอย่างในการถ่ายภาพ

(3) นำฟิล์มที่ได้จากข้อ (2) ไปผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนข้อ 4.3.1

(4) สแกนค่าความดำของฟิล์ม โดยใช้ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์มที่มีความละเอียดในการอ่านสูงถึง 0.05 มิลลิเมตร อ่านจำนวน 1300 จุด

(5) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำของฟิล์มกับตำแหน่งที่สแกน โดยสแกนฟิล์มที่ตำแหน่งเดียวกันทุกแผ่น

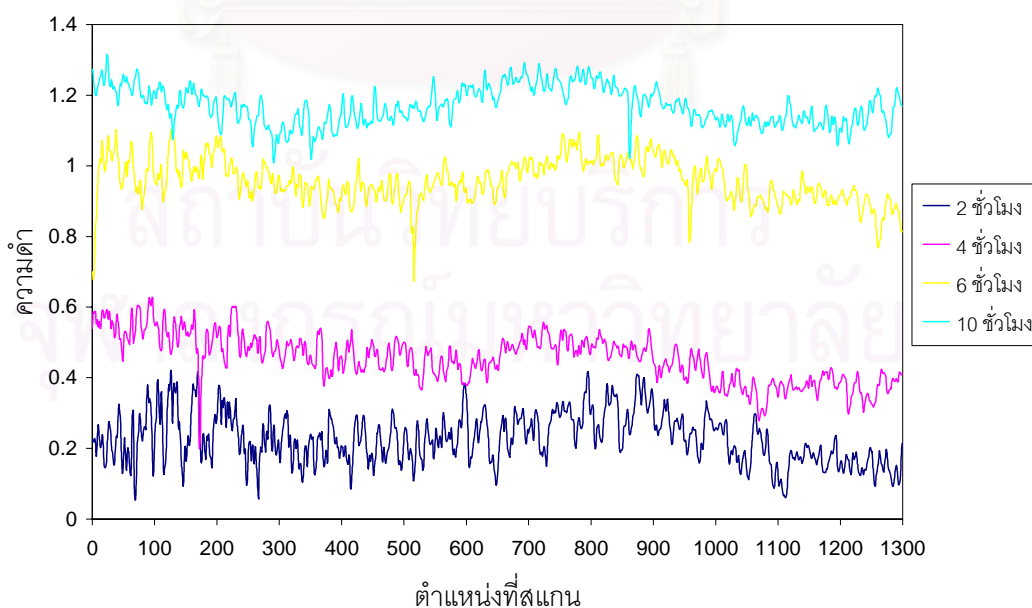
(6) นำข้อมูลที่ได้จากการสแกนของฟิล์มแต่ละแผ่นมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

(7) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการถ่ายภาพกับค่า

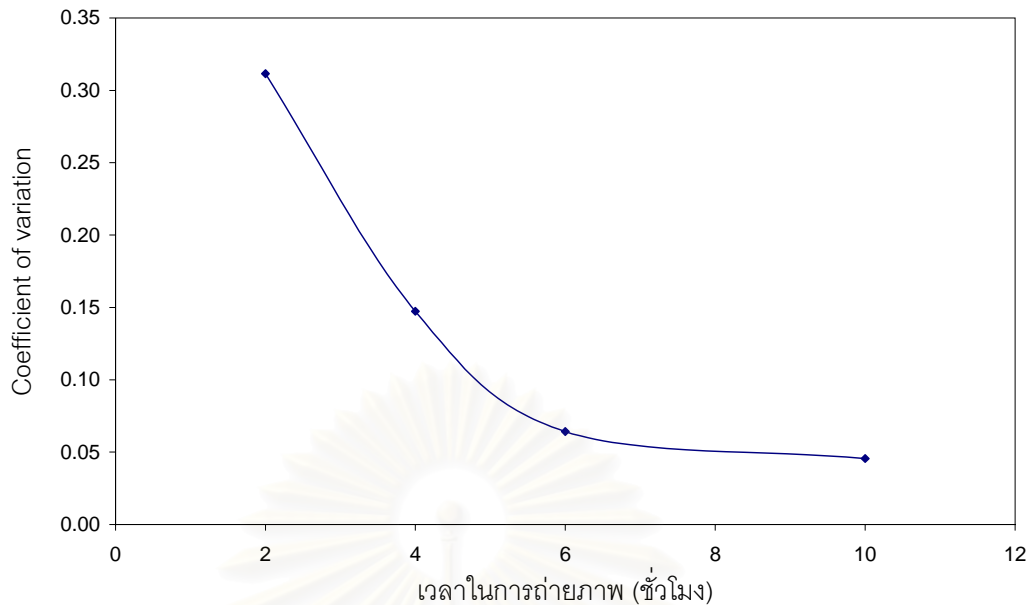
Coefficient of variation

4.8.2 ผลการวิจัย

เมื่อนำข้อมูลค่าความดำจากการสแกนฟิล์มได้โพรไฟล์ของค่าความดำเปรียบเทียบระหว่างการใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 2, 4, 6 และ 10 ชั่วโมงดังแสดงในรูปที่ 4.22 เมื่อนำข้อมูลมาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานแล้วนำมาคำนวณหาค่า Coefficient of variation จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในกราฟรูปที่ 4.23



รูปที่ 4.22 โพรไฟล์ค่าความดำของฟิล์มเปรียบเทียบเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพต่างกัน



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการถ่ายภาพกับค่า Coefficient of variation

4.8.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

เวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะมีผลต่อความดำของฟิล์มและการกระจายของค่าความดำบนฟิล์ม ซึ่งเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภูายน้อยจะสังเกตเห็นฟิล์มมีความดำเป็นจุด ๆ ทั่วทั้งฟิล์ม แต่ถ้าใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น ค่าความดำจะเป็นจุดที่ละเอียดขึ้น สามารถอธิบายในรูปของความแปรปรวนของข้อมูล เมื่อนำข้อมูลที่ได้จากการสแกนด้วยระบบสแกนฟิล์มความละเอียดสูงถึง 0.05 มิลลิเมตร ได้โพรไฟล์ของค่าความดำดังแสดงในรูปที่ 4.22 และเมื่อนำข้อมูลที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานจะสามารถคำนวณหาค่า Coefficient of variation ได้ ซึ่งค่านี้สามารถนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกันได้ เมื่อสังเกตกราฟรูปที่ 4.23 ที่เวลาในการถ่ายภาพ 2 ชั่วโมง จะมีค่า Coefficient of variation สูง และจะมีค่าลดลงเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น ซึ่งหมายถึง เมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพ 2 ชั่วโมง จะสังเกตเห็นฟิล์มมีความดำเป็นจุด ๆ ทั่วทั้งฟิล์ม และถ้าใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น จุดดำบนฟิล์มจะละเอียดขึ้นและดำทั่วทั้งฟิล์มในที่สุด

ดังนั้นการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนควรถ่ายภาพที่มีค่า Coefficient of variation เริ่มคงที่คือประมาณ 6 ชั่วโมงเป็นต้นไป และจะแตกต่างกันไปเมื่อใช้ฟิล์มชนิดต่างกันและขึ้นอยู่กับความไวของฟิล์มด้วย


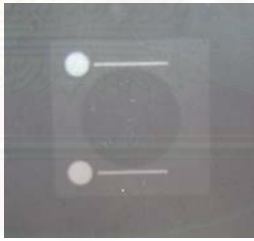
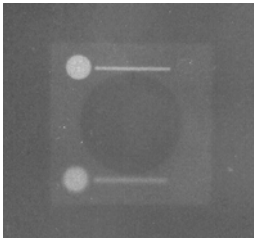


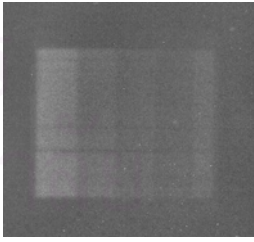


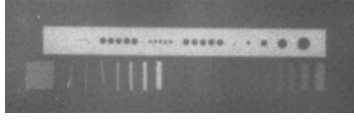
4.9 การตรวจสอบและเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้นกับระบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปและจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

4.9.1 วิธีดำเนินการวิจัย

ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้วัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Beam Purity Indicator, Sensitivity Indicator และ Test Strip B ใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 และใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 15 ชั่วโมง และนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายที่ได้จากการใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยที่ใช้กำลังเดินเครื่อง 700 กิโลวัตต์ ใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 เช่นกัน และใช้เวลาในการถ่ายภาพ 10 วินาที ได้ภาพดังแสดงในตารางที่ 4.6

4.9.2 ผลการวิจัย

ตารางที่ 4.6 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของวัตถุตัวอย่างมาตรฐานจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยและจากระบบที่พัฒนาขึ้น

วัตถุตัวอย่างมาตรฐาน	เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ^[14]	ระบบที่พัฒนาขึ้น
		
		
		

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Test Strip B จากระบบที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยในตารางที่ 4.6 สามารถทราบคุณภาพของภาพถ่ายดังแสดงในตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 คุณภาพของภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

คุณภาพของภาพถ่าย	เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ^[14]	ระบบที่พัฒนาขึ้น
ความเปรียบเทียบต่าง	0.73	0.32
ขนาดของลวดแคดเมียมที่เล็กที่สุด	0.10 mm	0.10mm
ขนาดของลวดพลาสติกที่เล็กที่สุด	0.45 mm	1.50 mm
รูของแผ่นแคดเมียมที่เล็กที่สุด	0.50 mm	0.50 mm

เมื่อพิจารณาวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน BPI และนำมาหาค่าความดำของฟิล์มบนจุดต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.26 แสดงในตารางที่ 4.8

ตารางที่ 4.8 ความดำของฟิล์มบนวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน BPI

ตำแหน่ง	ความดำของฟิล์ม	
	เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ^[14]	ระบบที่พัฒนาขึ้น
D _H	2.02	1.22
D _{B1}	1.01	0.95
D _{B2}	1.01	0.90
D _{L1}	1.74	1.19
D _{L2}	1.70	1.19
D _T	1.84	1.19

นำค่าความดำของฟิล์มจากตารางที่ 4.8 ไปคำนวณหาคุณภาพของลำนิวตรอนได้จากสมการที่ 2.24, 2.25, 2.26 และ 2.27 จะได้ค่าดังแสดงในตารางที่ 4.9

ตารางที่ 4.9 คุณภาพของลำนิวตรอนเปรียบเทียบระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัย

คุณภาพของลำนิวตรอน	เครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัย ^[14]	ระบบที่พัฒนาขึ้น
ปริมาณนิวตรอน	48.02	22.13
ปริมาณนิวตรอนกระเจิง	0	4.09
ปริมาณรังสีแกมมา	6.93	0
ปริมาณ pair production	1.98	0

4.9.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

พิจารณาภาพถ่ายด้วยนิวตรอนจากตารางที่ 4.6 และข้อมูลในตารางที่ 4.7 เมื่อเปรียบเทียบกันระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัย ความแตกต่างของภาพถ่ายจากเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัยมีค่าสูงกว่า และขนาดของลวดพลาสติกที่สังเกตเห็นได้จากภาพถ่ายด้วยเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัยก็เห็นได้เล็กกว่า ส่วนขนาดของลวดแคดเมียมและรูที่เจาะบนแผ่นแคดเมียม จากภาพที่สังเกตเห็นมีขนาดเท่ากันคือ 0.1 และ 0.5 มิลลิเมตรตามลำดับ ซึ่งบอกถึงค่าเรโซลูชันของภาพถ่ายมีค่าเท่ากันคือ 0.5 มิลลิเมตร

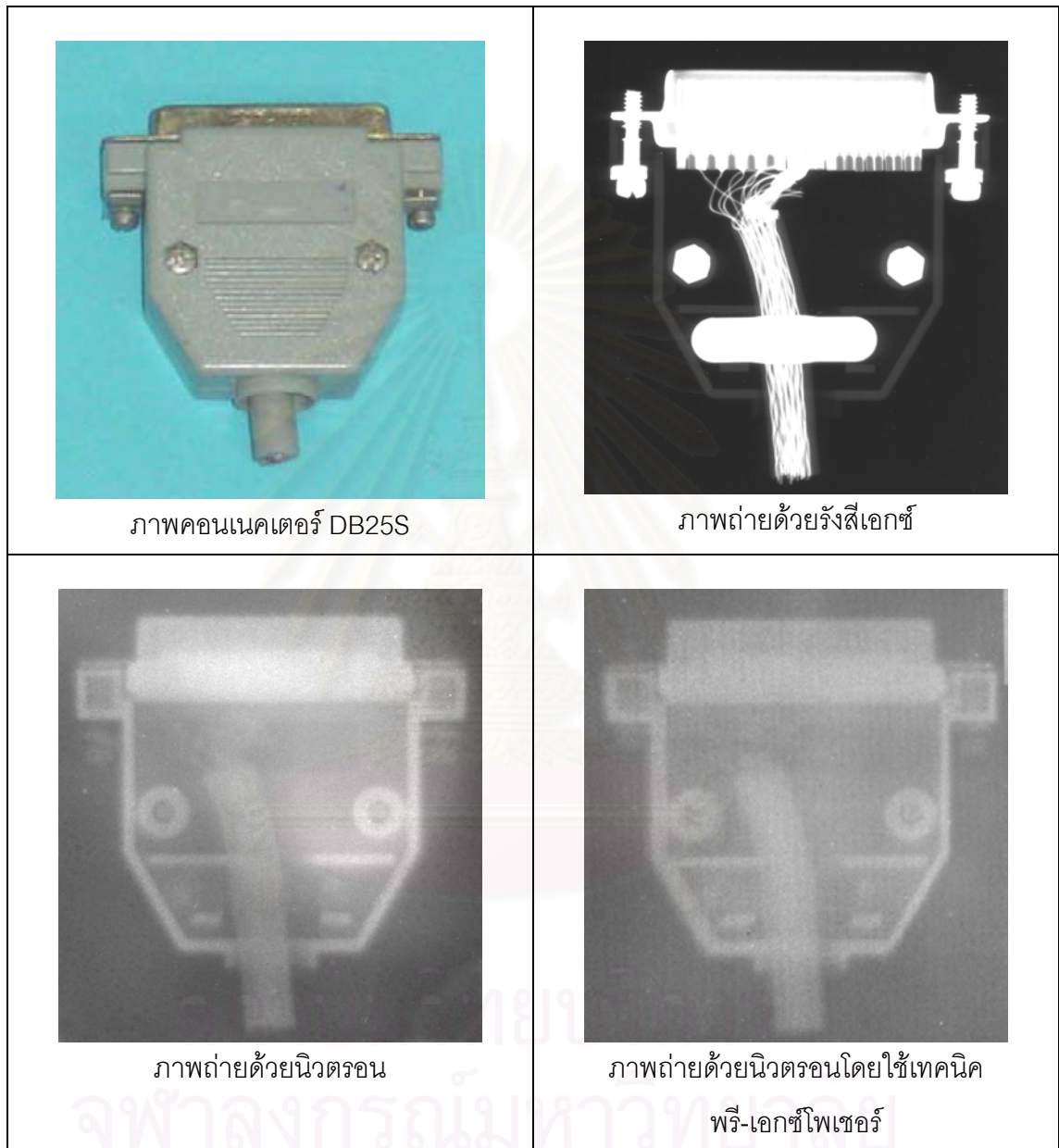
คุณภาพของลำนิวตรอนเปรียบเทียบกันระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นกับเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณวิจัยดังแสดงในตารางที่ 4.9 ปริมาณนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณมีค่ามากกว่าปริมาณนิวตรอนจากระบบที่พัฒนาขึ้น ปริมาณนิวตรอนกระเจิงของลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปริมาณไม่มีแต่จากระบบที่พัฒนาขึ้นมีเพียงเล็กน้อย ส่วนปริมาณรังสีแกมมาและปริมาณ pair production จากระบบที่พัฒนาขึ้นนั้นไม่มี ซึ่งเป็นผลดีต่อคุณภาพของภาพถ่าย

4.10 การถ่ายภาพชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิด

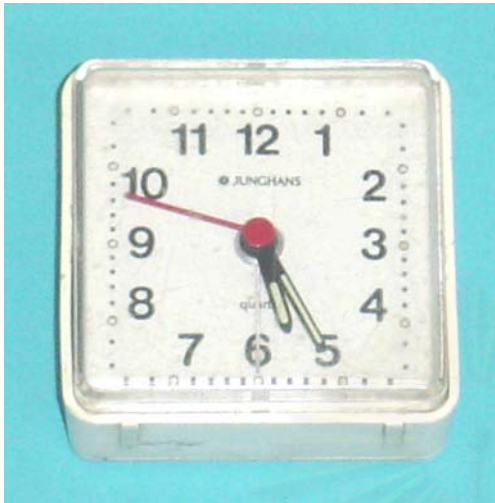
4.10.1 วิธีดำเนินการวิจัย

จากระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่พัฒนาขึ้นได้นำมาทดสอบการถ่ายภาพชิ้นงานที่เป็นผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมได้แก่ คอนเนคเตอร์ DB25S, นาฬิกาปลุก, นาฬิกาข้อมือแบบตัวเรือนเป็นโลหะและแบบตัวเรือนเป็นพลาสติก, เครื่องคิดเลข, สเต็ปมอเตอร์ และไฟฉายขนาดเล็ก โดยใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 15 ชั่วโมง สำหรับคอนเนคเตอร์ DB25S และนาฬิกาปลุกใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเชอร์ใช้เวลาถ่ายภาพเพียง 6 ชั่วโมง มีอัตราส่วนแคดเมียมที่ตำแหน่งถ่ายภาพเท่ากับ 16.94 และนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์

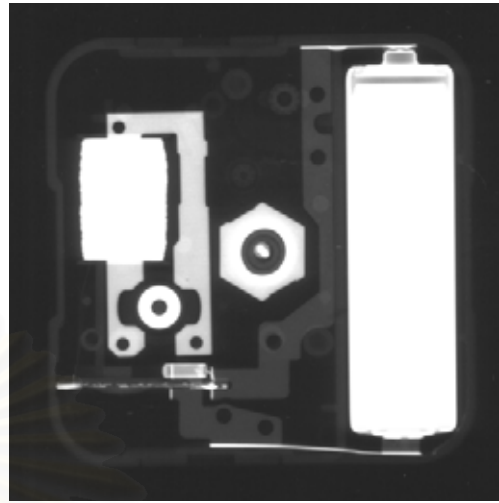
4.10.2 ผลการวิจัย



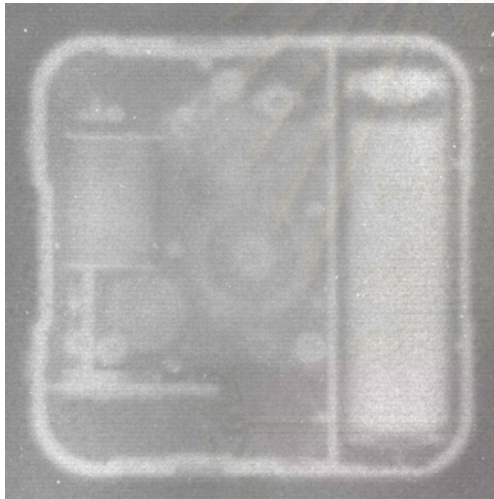
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของคอนเนคเตอร์ DB25S



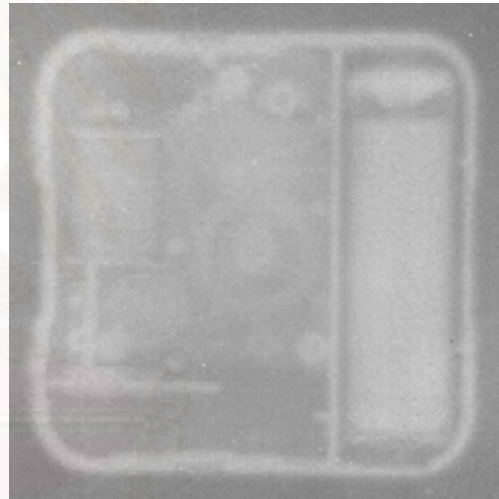
ภาพนาฬิกาปลุก



ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์



ภาพถ่ายด้วยนิวตรอน

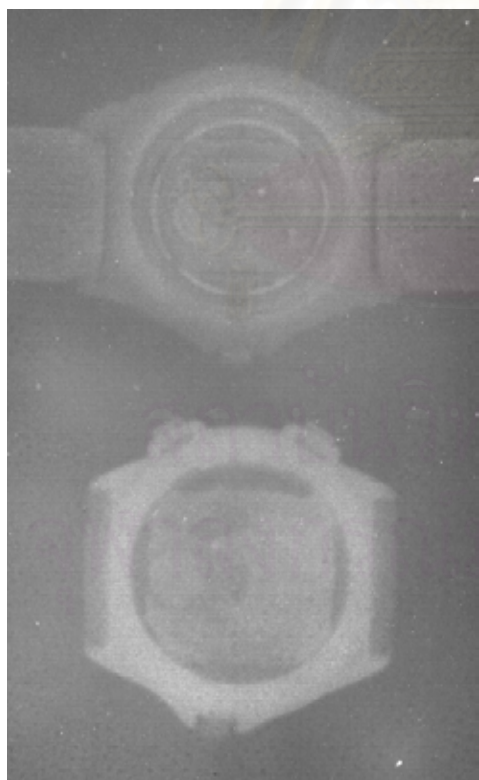


ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิค
ฟรี-เอกซ์โพเซอ์

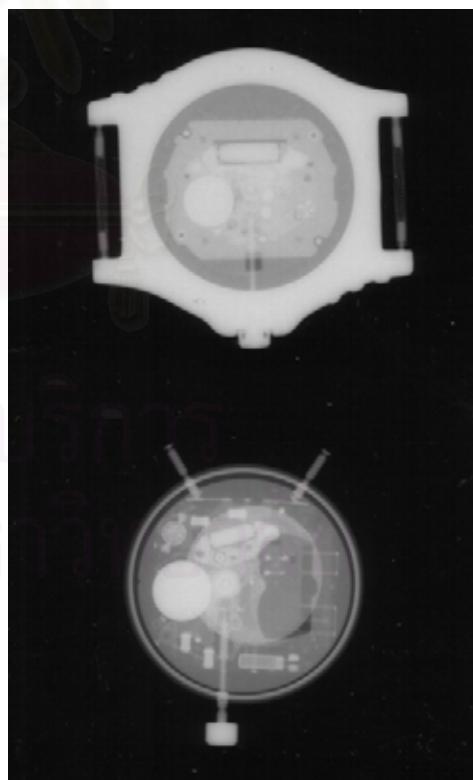
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของนาฬิกาปลุก
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาพนาฬิกาข้อมือ



ภาพถ่ายด้วยไมโครนอน

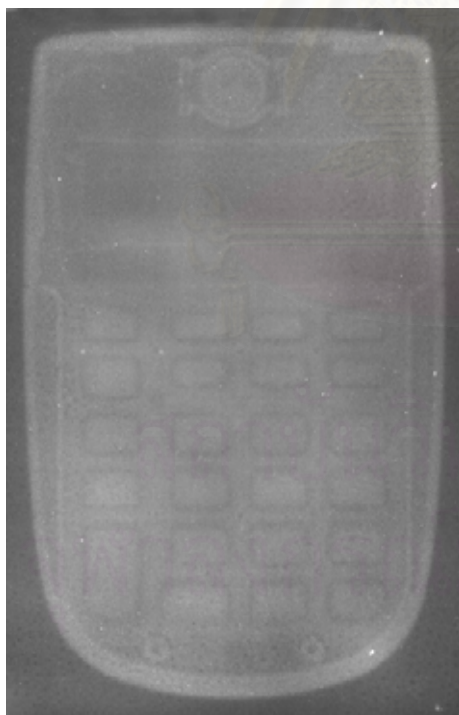


ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายด้วยไมโครนอนและรังสีเอกซ์ของนาฬิกาข้อมือ



ภาพเครื่องคิดเลข

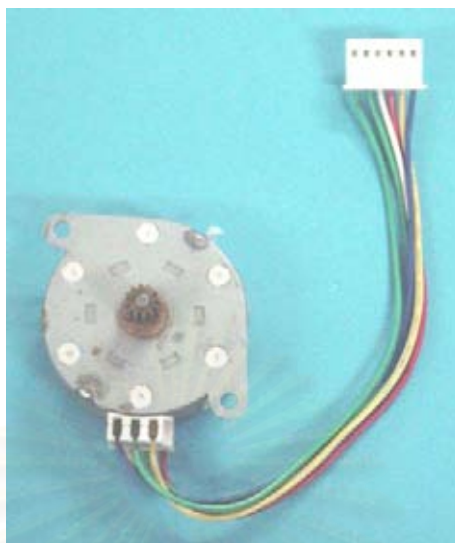


ภาพถ่ายด้วยไมโครรอน

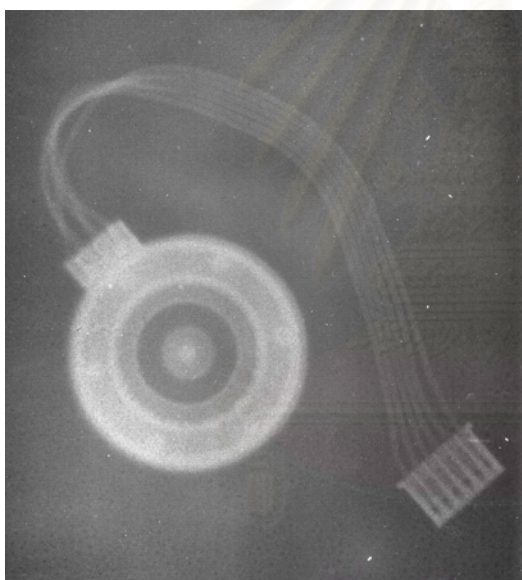


ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

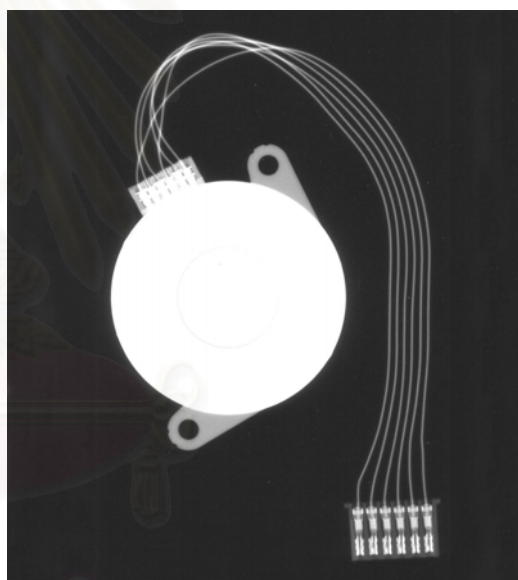
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายด้วยไมโครรอนและรังสีเอกซ์ของเครื่องคิดเลข



ภาพสเต็ปมอเตอร์



ภาพถ่ายด้วยนิวตรอน

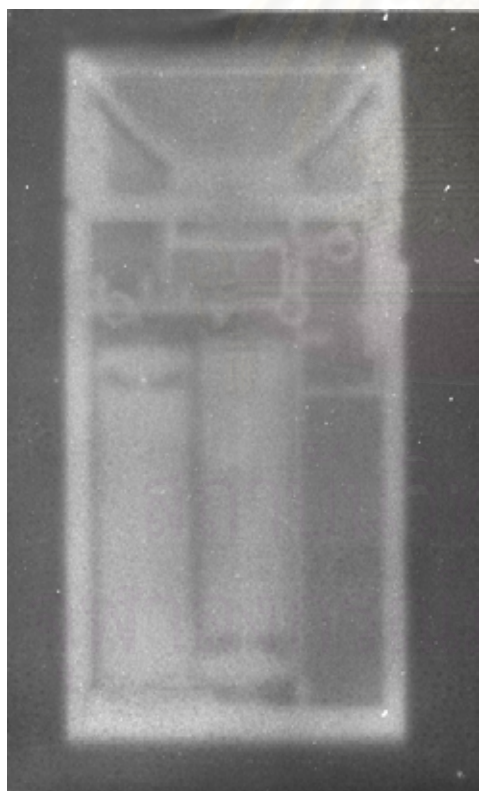


ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของสเต็ปมอเตอร์



ภาพไฟฉายขนาดเล็ก



ภาพถ่ายด้วยนิวตรอน



ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์ของไฟฉายขนาดเล็ก

4.10.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากผลการทดลองสังเกตได้ว่าภาพถ่ายด้วยนิวตรอนกับภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ แสดงรายละเอียดของภาพที่แตกต่างกัน ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของคอนเนคเตอร์ DB25S แสดงรายละเอียดของส่วนที่เป็นพลาสติกและยางที่หุ้มลวดทองแดงของสายไฟ ส่วนภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ให้ภาพที่แสดงเส้นลวดทองแดง นี้อต และตัวยึดสายไฟ ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของนาฬิกาปลุกแสดงให้เห็นกล่องพลาสติกครอบนอก เฟืองพลาสติก ส่วนภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์จะให้ภาพของส่วนที่เป็นโลหะต่าง ๆ และน็อตยึดกล่องพลาสติก

ส่วนนาฬิกาข้อมือแบบตัวเรือนเป็นโลหะสามารถมองเห็นยาที่เป็นวงกลมสำหรับกันน้ำเข้านาฬิกา และนาฬิกาข้อมือแบบตัวเรือนเป็นพลาสติก ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนที่ได้จะแสดงให้เห็นตัวเรือนที่เป็นพลาสติกอย่างชัดเจน แต่ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ไม่สามารถมองเห็นตัวเรือนที่เป็นพลาสติกได้เลย โดยเห็นเฉพาะแผงวงจรภายในของนาฬิกา เช่นเดียวกับเครื่องคิดเลขภาพถ่ายด้วยนิวตรอนจะเห็นตัวเครื่องคิดเลขที่เป็นพลาสติกและปุ่มกดที่เป็นยาง แต่ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์จะเห็นวงจรและสายไฟภาพในเครื่อง

ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของสแตมป์มอเตอร์จะแสดงรายละเอียดภายในซึ่งส่วนใหญ่เป็นพลาสติก และแสดงยางหุ้มสายไฟได้ดีกว่าภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ ส่วนภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์จะแสดงลวดภายในสายไฟ ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของไฟฉายขนาดเล็กจะแสดงให้เห็นโครงสร้างภายในที่เป็นพลาสติก แต่ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์จะแสดงให้เห็นถึงส่วนที่เป็นโลหะและหลอดไฟ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 สามารถนำไปใช้ถ่ายภาพผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิดเพื่อการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่างได้ ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยคือ ประหยัดค่าใช้จ่าย สะดวกในการเคลื่อนย้าย และสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมได้ จากงานวิจัยและพัฒนาระบบต้นแบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1.1 ระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ขนาด 20 ไมโครกรัม บรรจุอยู่ในท่ออะลูมิเนียมแล้วจุ่มอยู่ในถังพลาสติกบรรจุน้ำที่ทำหน้าที่เป็นสารหน่วงนิวตรอน นิวตรอนคออลลิเมเตอร์ทำขึ้นจากโพไลเอทีลีนและกรดบอริกชนิดผง และใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 ที่ตำแหน่งถ่ายภาพมีเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์เท่ากับ 6.82×10^2 n/cm²/sec

5.1.2 การถ่ายภาพเพื่อเลือกตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนและนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่เหมาะสมพบว่านิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่ให้ความคมชัดของภาพมากที่สุดคือนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ที่มีค่า L/D=20 และส่วนของโพไลเอทีลีนยาว 10 เซนติเมตร ตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอนห่างจากปลายนิวตรอนคออลลิเมเตอร์ 6 เซนติเมตร ซึ่งจะให้อัตราส่วนแคดเมียมที่ตำแหน่งถ่ายภาพเท่ากับ 16.94

5.1.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคฟรี-เอกซ์โพเชอร์ด้วยแสงจากเครื่องอัดขยายภาพที่ความดำเท่ากับ 0.6 โดยใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส พบว่าสามารถเพิ่มความดำของภาพถ่าย จึงช่วยลดเวลาในการถ่ายภาพลงได้ถึง 50% แต่เมื่อฟรี-เอกซ์โพสให้ความดำมากเกินไปจะทำให้ความเปรียบต่างของภาพถ่ายลดลง

5.1.4 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มถ่ายภาพความไวสูง อิลฟอร์ด เดลต้า 3200 ให้ภาพถ่ายที่มีความดำมากกว่าฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส เมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพเท่ากัน

และฟิล์มชนิดนี้ใช้เวลาในการถ่ายภาพเพียง 2 ชั่วโมง และเมื่อใช้กระดาษความไวสูง Fujifilm 3000pi ใช้เวลาในการถ่ายภาพเพียง 1 ชั่วโมง และยังมีความสะดวกและง่ายในการใช้งาน เพราะไม่ต้องผ่านกระบวนการล้างฟิล์มเหมือนฟิล์มทั่วไป

5.1.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเมื่อลดอุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอนลง 23 องศาเซลเซียส พบว่ามีความดำของภาพใกล้เคียงกัน แต่ให้ความเปรียบต่างของภาพสูงขึ้น 25.8% การถ่ายภาพโดยลดอุณหภูมิของสารห้วงนิวตรอนจึงช่วยให้คุณภาพของภาพถ่ายดีขึ้น

5.1.6 การทดลองลดเวลาของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน พบว่าเวลาในการถ่ายภาพมีผลต่อความดำของฟิล์ม และการกระจายตัวของความดำบนฟิล์ม คือเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพน้อย จะสังเกตเห็นฟิล์มมีความดำเป็นจุด ๆ ทั่วทั้งฟิล์ม แต่เมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้นจุดดำบนฟิล์มจะละเอียดขึ้นและดำทั่วทั้งฟิล์ม ซึ่งฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ควรใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 6 ชั่วโมงขึ้นไป

5.1.7 ความไวของฟิล์มที่ใช้ดีพอสำหรับการบันทึกภาพถ่ายด้วยนิวตรอน แต่ปริมาณนิวตรอนที่ตกกระทบบนฉากเปลี่ยนนิวตรอนมีค่าน้อยจึงทำให้เกิดการกระจายตัวของความดำบนฟิล์มไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นจึงควรพัฒนาฉากเปลี่ยนนิวตรอนให้มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนนิวตรอนได้มากขึ้น และควรเพิ่มความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ให้มากขึ้น

5.1.8 จากคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถสังเกตเห็นขนาดของลวดแคดเมียมและรูที่เจาะบนแผ่นแคดเมียมขนาด 0.1 และ 0.5 มิลลิเมตร และขนาดของลวดพลาสติก 0.45 มิลลิเมตร ภาพถ่ายจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่าวิโซลูชันของภาพเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับวิโซลูชันของภาพถ่ายจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

คุณภาพของลำนิวตรอนจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีข้อดีกว่าลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยคือ ไม่มีรังสีแกมมาปะปน แต่ปริมาณนิวตรอนมีค่าน้อยและมีปริมาณนิวตรอนกระเจงอยู่บ้าง

5.1.9 จากระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปถ่ายภาพชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิดได้เช่น คอนเนคเตอร์ DB25S นาฬิกาปลุก นาฬิกาข้อมือ เครื่องคิดเลข สเต็ปมอเตอร์ และไฟฉายขนาดเล็ก เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ พบว่าสามารถแสดงรายละเอียดของภาพได้แตกต่างกันเป็นที่น่าพอใจ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนควรใช้สารหน่วงนิวตรอนที่มีความเข้มข้นของธาตุที่ใช้หน่วงพลังงานของนิวตรอนสูง ซึ่งจะทำให้ได้ความเข้มสูงสุดของนิวตรอนช้า เช่น โพลีเอทิลีนที่มีความเข้มข้นสูง (High density Polythene) กรีเซอริน (Glycerine) และน้ำมันบางชนิด

5.2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเมื่อลดคุณสมบัติของสารหน่วงนิวตรอนทำให้ได้ภาพมีความเปรียบต่างสูงขึ้น จึงควรพัฒนาระบบลดคุณสมบัติของสารหน่วงนิวตรอนที่สามารถลดคุณสมบัติได้ต่ำและควบคุมคุณสมบัติให้คงที่

5.2.3 อุปกรณ์บันทึกภาพนอกจากฟิล์มแล้ว ควรเลือกใช้อุปกรณ์บันทึกภาพชนิดอื่น เช่น Imaging Plate เพราะเป็นอุปกรณ์บันทึกภาพที่มีความไวในการถ่ายภาพสูง ใช้เวลาในการถ่ายภาพน้อย และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ช่วยให้ประหยัดค่าใช้จ่าย และสะดวกในการใช้งานมากเพราะแสงสว่างไม่มีผลต่อ Imaging Plate จึงไม่จำเป็นต้องใช้ห้องมืดในการปฏิบัติงาน

5.2.4 ความเข้มของลำนิวตรอนมีผลต่อคุณภาพและเวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ดังนั้นถ้าต้องการนำไปใช้ในอุตสาหกรรม ต้องเพิ่มความแรงของต้นกำเนิดนิวตรอนให้สูงกว่านี้คือประมาณ 200 ไมโครกรัม

5.2.5 ใช้หัววัดนิวตรอนขนาดเล็กวัดความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ก่อนใช้ฟิล์มบันทึกภาพจริง เพื่อหาเวลาในการถ่ายภาพ

5.2.6 ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนสองแผ่นประกบฟิล์มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้นิวตรอนเปลี่ยนเป็นแสงได้มากขึ้น ซึ่งจะช่วยเพิ่มการกระจายตัวของความดำบนฟิล์มและลดเวลาในการถ่ายภาพ

รายการอ้างอิง

1. ทิพาพร อติกานต์กุล. การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2543.
2. ประสม สุขสว่าง. การศึกษาวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2533.
3. ศศิพันธุ์ ณ สงขลา. การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
4. Baheti, G.L. et al. Optimization Techniques in Low Flux Neutron Radiography. The Third World Conference on Neutron Radiography, Osaka, Japan, 1989, pp. 1-12. Japan, 1989.
5. Da Silva, A.X. and Crispim, V.R. Study of a neutron radiography system using ^{252}Cf neutron source. Radiation Physics and Chemistry, 61(2001), pp. 515-517, 2001.
6. Nobuo WADA et al. Neutron and gamma simultaneous radiography using a ^{252}Cf isotopic neutron source. Neutron Radiography. pp. 681-688, 1983.
7. Domanus, J.C., ed. Practical Neutron Radiography. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic Publishers, 1992.
8. Lamarsh, J.R., Introduction to Nuclear Engineering. 2nd ed. Massachusetts : Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1983.
9. Garrett, D.A., and Berger, H. The Technological Development of Neutron Radiography. Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977): 125-141.
10. Hawkesworth, M.R., Neutron radiography : Equipment and methods. Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) : 169-220.
11. Ross, A.M., Neutron radiographic inspection of nuclear fuels. Atomic Energy Review 15 Japan, 1989, p.482. Japan, 1989.
12. Berger, H., Neutron Radiography. Amsterdam : Elsevier Publishing Company, 1975.
13. นเรศร์ จันทน์ขาว. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน. กรุงเทพมหานคร : ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

- 14.วิเชียร รตนธงชัย. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบีอี-10. วิทยานิพนธ์
ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- 15.Koester, L. and Yelon, W.B., Summary of low energy neutron scattering lengths and
crosssections. Neutron Diffraction Newsletter., 1982. Cited in Domanus, J.C., ed,
Practical Neutron Radiography. Dordrecht, Netherlands : Kluwer Academic
Publishers, 1992.
- 16.Harms, A.A., Physical process and mathematical methods in neutron radiography.
Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977) : 147.



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

อรรถจักร กิตติกุล. การพัฒนาระบบวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์โดยใช้ท่อนำแสงเคลือบปลายด้วยซินทิลเลเตอร์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.

นิวัฒน์ ตะโพนทอง. การศึกษาวีธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรก-เอตซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาามหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2531.

ภาษาอังกฤษ

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

Lamarsh J.R. Introduction to Nuclear Engineering. New York: Addison-Wesley publishing company, 1982.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

รายละเอียดของต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252

Sources

Californium-252

Spontaneous Fission Neutron Sources

Nuclear Data
Californium-252 decays by α -emission and spontaneous fission emitting neutrons.

- Half-life (α -decay): 2.73 years
- Half-life (spontaneous fission): 85.5 years
- Half-life (effective): 2.65 years
- Neutron emission: 2.3×10^9 n/sec per mg
- Average neutron energy: ~2MeV
- Equilibrium γ -exposure rate (from unshielded source): 1.6×10^7 mR/h at 1m per mg
-Air kerma rate at 1m of 1.4mGy/h per mg
- Neutron dose rate: ~2.3rem/h at 1m per mg
-23mSv/h at 1m per mg
-20GBq/mg, ~536mCi/mg
- Specific activity:

Composition
Californium-252 is incorporated in ceramic material.

Encapsulation
The radioactive material is doubly-encapsulated in welded stainless steel capsules.

Nominal ²⁵² Cf content	Nominal ²⁵² Cf content activity	Nominal activity*	Emission n/sec*	Capsule	Code
0.01 μ g	0.2MBq	5 μ Ci	0.023×10^6	X.1	CVN.101
0.1 μ g	2MBq	54 μ Ci	0.23×10^6	X.1	CVN.1
0.5 μ g	10MBq	268 μ Ci	1.15×10^6	X.1	CVN.2
1.0 μ g	20MBq	536 μ Ci	2.3×10^6	X.1	CVN.3
2.0 μ g	40MBq	1.07mCi	4.6×10^6	X.1	CVN.4
5 μ g	100MBq	2.7mCi	1.15×10^7	X.1	CVN.5
10 μ g	200MBq	5.4mCi	2.3×10^7	X.1	CVN.6
20 μ g	400MBq	10.7mCi	4.6×10^7	X.1	CVN.7
50 μ g	1GBq	27mCi	1.15×10^8	X.1	CVN.10
100 μ g	2GBq	54mCi	2.3×10^8	X.1	CVN.11
200 μ g	4GBq	107mCi	4.6×10^8	X.1	CVN.12

*Tolerance -10, +20%

Recommended working life: 15 years

Quality Control
Wipe test A
Bubble test D
Immersion test L

Neutron emission measured against standard using BF₃/wax moderator system.

The test report includes a statement of the neutron emission.

Neutron spectrum

Americium 241/beryllium source made and measured at AEA Technology using a stilbene crystal and pulse shape discrimination.

Spectrum reproduced by courtesy of LORCH, E.A.
Int. J. Appl. Radiat. Isotopes, 24, 588-9, 1973.

X.1

United Kingdom: 329 Harwell, Didcot, OX11 0QJ, Tel: +44 1235 431267
 United States: 40 North Avenue, Burlington, MA 01803, Tel: 781-272-2000
 Germany: GmbH, Gieselweg 1, D-38110 Braunschweig, Tel: 0049 - (0) 5307 - 932113
 Hong Kong: Suite 1208 12/E Central Plaza, 18 Harbour Road, Wanchai, Tel: 00 852 2519 3966

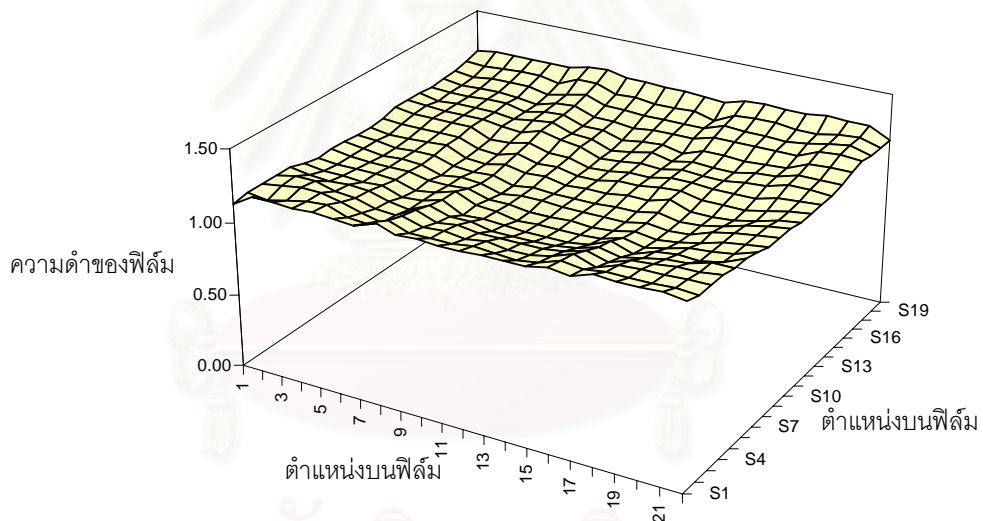
AEA Technology is a business name of AEA Technology plc

B15

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์การกระจายของนิวตรอน

นิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพออกมาจากนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ โดยลำนิวตรอนที่มีการกระจายความเข้มของนิวตรอนสม่ำเสมอทั้งหน้าตัดจะทำให้แต่ละจุดบนวัตถุตัวอย่างที่ถ่ายภาพได้รับปริมาณนิวตรอนที่เท่ากัน การตรวจสอบการกระจายความเข้มของนิวตรอนใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยไม่ใช้วัตถุตัวอย่าง ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 และใช้ฟิล์มอีลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส บันทึกภาพ ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 6 ชั่วโมง จะได้พื้นที่ในการถ่ายภาพขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 11 เซนติเมตร จากนั้นนำฟิล์มไปล้างตามกระบวนการล้างฟิล์ม แล้วนำมาอ่านค่าความดำโดยการวัดทุกระยะ 0.5 เซนติเมตร เขียนกราฟความเข้มของฟิล์มในแต่ละตำแหน่งดังแสดงในรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 กราฟความเข้มฟิล์มจากการวัดความสม่ำเสมอของนิวตรอน

จากกราฟในรูปที่ ข.1 ฟิล์มมีค่าความดำซึ่งคิดเป็นค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลมีค่าเท่ากับ 6.48% แสดงว่านิวตรอนมีฟลักซ์ที่แต่ละตำแหน่งแตกต่างกันน้อยซึ่งเมื่อสังเกตด้วยตาเปล่าจะไม่สามารถแยกความแตกต่างของความเข้มฟิล์มได้

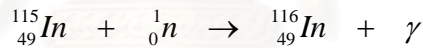
ภาคผนวก ค.

การวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์โดยวิธี Foil Activation

แผ่นโลหะบางหรือแผ่นฟอยล์โลหะที่ใช้ในการวัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ ควรมีคุณสมบัติ ดังนี้

1. เป็นค่าที่มีภาคตัดขวางสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนสูงเพื่อให้เกิดไอโซโทปรังสีได้ดี
2. มีค่าครึ่งชีวิตที่เหมาะสมที่จะได้ใช้เวลาไม่มากนักในการอบนิวตรอนเพื่อให้ได้ค่าความแรงสูงสุด และมีการสลายตัวของไอโซโทปรังสีที่เกิดขึ้นต้องไม่เร็วหรือช้าเกินไป
3. แผ่นโลหะควรมีความหนาแน่นน้อย ๆ เพื่อลดปัญหาในด้านการกำบังตัวเอง (Self-Shielding) อย่างไรก็ตามโดยปกติต้องมีการแก้ค่าการกำบังตัวเองเสมอ

ในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นอินเดียมเป็นตัววัดเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ เมื่อนำแผ่นอินเดียมไปอบรังสีในต้นกำเนิดนิวตรอนที่ปลายคอลลิเมเตอร์ในบริเวณที่ต้องการทราบค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างแผ่นอินเดียมและเทอร์มัลนิวตรอนแบบ (n, γ) ดังสมการ



อัตราการเกิดปฏิกิริยาดูดกลืนนิวตรอนที่ทุกพลังงาน = $N\sigma_a\phi = A_0$

$$\text{ดังนั้น} \quad \phi = \frac{A_0}{N\sigma_{act}} \quad (1)$$

เมื่อ N คือจำนวนอะตอมทั้งหมดของแผ่นอินเดียมที่ทำปฏิกิริยากับนิวตรอนแล้ว
เกิดเป็นธาตุกัมมันตรังสี
 σ_{act} คือภาคตัดขวางจุลภาคของการดูดกลืนมีหน่วยเป็นบารน์
 ϕ คือนิวตรอนฟลักซ์มีหน่วยเป็น $\text{n/cm}^2/\text{sec}$

เมื่อนำแผ่นอินเดียมไปอบรังสีเป็นเวลานานเพียงพอจะเกิดสภาวะคงที่ คือ อัตราการเกิดและการสลายมีค่าเท่ากัน ในสภาวะนี้เรียกว่า ความแรงรังสีอิ่มตัว (Saturation Activity) เป็นความแรงรังสีสูงสุด

ดังนั้นอัตราการแผ่รังสีของอินเดียมที่อบรังสีในเวลา T ดังสมการ

$$A_T = A_0(1 - e^{-\lambda T})$$

- เมื่อ A_0 คืออัตราการแผ่รังสีของอินเดียมเมื่ออาบรังสีจนอิ่มตัว
 T คือเวลาที่ใช้ในการอาบรังสีมีหน่วยเป็นวินาที
 λ คือค่าคงที่การสลายตัวของอินเดียม

เมื่อนำแผ่นอินเดียมที่อาบรังสีแล้วออกมาจากนิวตรอนฟลักซ์ แล้วนำเข้าระบบวัดในเวลา t ต่อมา รังสีบางส่วนจะสลายตัวไป ดังนั้นค่าที่วัดได้จะน้อยกว่าที่เป็นจริง จึงแก้ด้วยเทอม $e^{-\lambda t}$

$$A_T = A_0(1 - e^{-\lambda T})e^{-\lambda t} \quad (2)$$

- เมื่อ t คือเวลาในระหว่างนำแผ่นอินเดียมออกจากการอาบนิวตรอนมายังเครื่องวัด มีหน่วยเป็นวินาที

จากสมการ

$$\phi = \frac{A_0}{N\sigma_{act}}$$

ดังนั้น

$$\phi = \frac{A_T}{N\sigma_{act}(1 - e^{-\lambda T})e^{-\lambda t}} \quad (3)$$

ในกรณีที่ใช้เวลาในการอาบรังสีนานมาก ค่า $e^{-\lambda T}$ จะมีค่าน้อยลงจนใกล้ศูนย์ ความแรงรังสีของแผ่นอินเดียม (A_T) ในสมการ (3) สามารถคำนวณได้จาก

$$A_T = \frac{cps}{\varepsilon} \quad (4)$$

- เมื่อ cps คือจำนวนนับรังสีต่อวินาที
 ε คือประสิทธิภาพของระบบวัดรังสีต่อรังสีที่นับ

ประสิทธิภาพระบบวัดรังสีแกมมา ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมา ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดกับหัววัด รูปร่างของต้นกำเนิดรังสี ชนิด และขนาดของหัววัดรังสี

การคำนวณประสิทธิภาพหัววัดรังสี NaI(Tl)

ทำการคำนวณโดยใช้พื้นที่ใต้กราฟได้จาก Co-60 ผลิตเมื่อวันที่ 1 เมษายน 1989 มีความ
แรงแรังสี 1.187 μCi ได้ทำการวัดเมื่อวันที่ 12 เมษายน 2003 โดยใช้หัววัด NaI(Tl)
เส้นผ่าศูนย์กลาง 2 นิ้ว ทำการวัดเป็นเวลา 1000 วินาที

เมื่อ t เป็นเวลาที่ทำให้รังสีบางส่วนจากต้นกำเนิดรังสีสลายตัว ตั้งแต่วันที่ผลิตจนถึงวันที่
ทำการวัด

$$t = (14 \times 365 \times 24 \times 3600) + (7 \times 24 \times 3600) \text{ วินาที}$$

$$t = 4.421 \times 10^8 \text{ วินาที}$$

$$\text{เมื่อ } A_0 = 1.187 \times 10^{-6} \times 3.7 \times 10^{10} = 43919 \text{ dps}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{5.27 \times 365 \times 24 \times 3600} = 4.169 \times 10^{-9} \text{ วินาที}^{-1}$$

จะได้ความแรงแรังสีดังนี้

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ &= 43919 \times e^{(-4.169 \times 10^{-9} \times 4.421 \times 10^8)} \\ &= 6953.41 \text{ dps} \end{aligned}$$

เมื่อ %Abundance ของ Co-60 = 99.99%

$$\text{ดังนั้น } A = \frac{6953.41 \times 99.99}{100} = 6952.71$$

ดังนั้นการหาประสิทธิภาพของหัววัด โดยใช้ Co-60 ที่พลังงาน 1.17 และ 1.33 MeV เป็น
ดังนี้

1. ที่พลังงาน 1.17 MeV มีค่า Area = 206774/1000 sec = 206.774 cps

$$\% \text{Efficiency} = \frac{\text{cps} \times 100}{\text{dps}} = \frac{206.774 \times 100}{6952.71} = 2.97\%$$

นอกจากนี้ความแรงรังสีของแผ่นอินเดียม (A_T) ยังขึ้นอยู่กับขนาดของแผ่นอินเดียมด้วย เนื่องจากอินเดียมมีภาคตัดขวางนิวตรอนสูง ฟลักซ์นิวตรอน (ϕ) ในแผ่นอินเดียมลดลงตามความหนา กล่าวคืออะตอมอินเดียมส่วนที่อยู่ลึก ๆ จากผิวเข้าไปจะทำปฏิกิริยากับนิวตรอนน้อยกว่าส่วนที่อยู่ผิวทำให้ A_T มีค่าน้อยกว่าที่เป็นจริงจึงต้องแก้ค่า ϕ ที่ได้ด้วยค่าแฟคเตอร์กำกับตัวเอง (Self-Shielding Factor, f_{th}) ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นอินเดียม ดังนี้

$$\phi_m = f_{th}\phi$$

เมื่อ ϕ_m คือนิวตรอนฟลักซ์ที่วัดได้

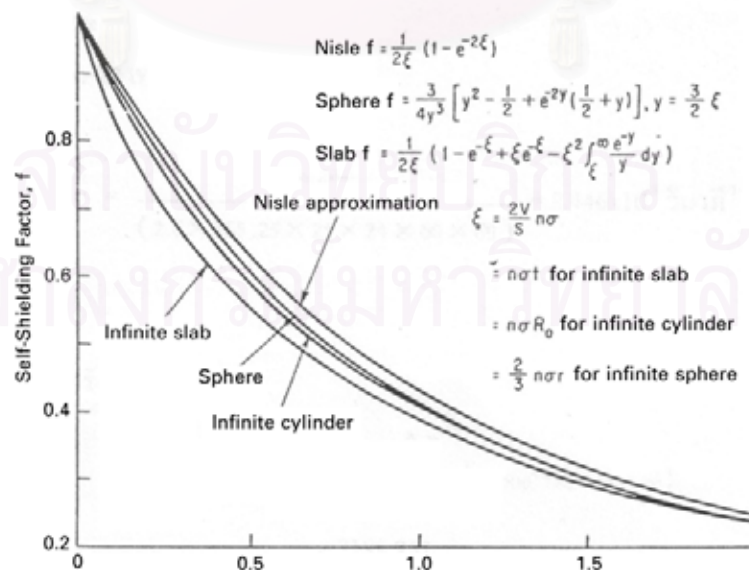
$$f_{th} = \frac{1}{2\xi}(1 - e^{-2\xi}) \quad (5)$$

โดย $\xi = \left(\frac{2V}{S}\right)\Sigma_a$

เมื่อ V คือปริมาตรของแผ่นอินเดียม

S คือพื้นที่ผิวของแผ่นอินเดียม

Σ_a คือภาคตัดขวางมหภาคของการดูดกลืน



รูปที่ ค.1 แสดงค่า Self-Shielding Factors ตามสมการของ Nisle และสมการสำหรับ Slab, Cylinder และ Sphere (ในงานวิจัยนี้ใช้แผ่นอินเดียมเป็นแบบ Slab)

2. ที่พลังงาน 1.33 MeV มีค่า Area = 190463/1000 sec = 190.463 cps

$$\% \text{Efficiency} = \frac{\text{cps} \times 100}{\text{dps}} = \frac{190.463 \times 100}{6952.71} = 2.74\%$$

ทำการ Interpolate ที่พลังงาน 1.097 MeV จะได้

$$\begin{aligned} \% \text{Efficiency} &= 2.97 + \left[\frac{(2.97 - 2.74) \times (1.17 - 1.097)}{1.33 - 1.17} \right] \\ &= 2.97 + \left[\frac{0.23 \times 0.073}{0.16} \right] = 3.07\% \end{aligned}$$

ทำการ Interpolate ที่พลังงาน 1.297 MeV จะได้

$$\begin{aligned} \% \text{Efficiency} &= 2.74 + \left[\frac{(2.97 - 2.74) \times (1.33 - 1.294)}{1.33 - 1.17} \right] \\ &= 2.74 + \left[\frac{0.23 \times 0.036}{0.16} \right] = 2.79\% \end{aligned}$$

วิธีการคำนวณหาเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์โดยใช้วิธี Foil Activation

อินเดียมฟอล์ยขนาด 1×1 ตารางเซนติเมตร จำนวน 3 แผ่น

น้ำหนักอินเดียมฟอล์ยรวม 0.29404 กรัม

ทำการอบนิวตรอนเป็นเวลา 2 วัน จนแผ่นอินเดียมมีความแรงรังสีอิ่มตัวแล้วปล่อยให้

รังสีสลายตัว 1 นาที หลังจากนั้นจึงเริ่มทำการวัดนาน 2,000 วินาที

$$\text{AREA} = 6880 \text{ count}/2,000 \text{ sec}$$

$$\lambda = \frac{0.693}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{3,252} = 2.131 \times 10^{-4}$$

$$T_{1/2} \text{ ของ In-116} = 54.2 \text{ นาที} = 54.2 \times 60 = 3,252 \text{ วินาที}$$

$$\begin{aligned}
 N_{60-2060} &= \int_{60}^{2060} N_0 e^{-\lambda t} dt = \frac{-N_0}{\lambda} \left[e^{-\lambda t} \right]_{60}^{2060} \\
 &= \frac{-N_0}{2.131 \times 10^{-4}} \left[e^{-2.131 \times 10^{-4} \times 2060} - e^{-2.131 \times 10^{-4} \times 60} \right] \\
 &= \frac{-N_0}{2.131 \times 10^{-4}} [0.645 - 0.987] \\
 &= 1606.29 N_0
 \end{aligned}$$

ดังนั้น

$$N_0 = \frac{N_{60-2060}}{1606.29} = \frac{6880}{1606.29} = 4.28 \text{ cps}$$

เมื่อ

$$E(\%) = \frac{(3.07 \times 0.56) + (2.79 \times 0.84)}{1.4} = 2.9\%$$

$$dps = \frac{4.28}{0.029} = 147.59$$

เทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์ (ϕ_{th}) เท่ากับ

$$\phi_{th} = \frac{A \times M}{W \times k \times N_A \times \sigma_{act} \times (1 - e^{-\lambda t})}$$

$$= \frac{147.59 \times 114.82}{0.29404 \times 0.957 \times 6.02 \times 10^{23} \times 162.37 \times 10^{-24}}$$

$$= 616.104 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$$

เมื่อ A = Activity(dps)

k = %abundance ของ In-115

σ_{act} = 162.37 บาร์น

การคำนวณแก้ค่า Self-Shielding Factor

ความหนาของแผ่นอินเดียมพอลีย (t) หาได้จาก

$$t = \frac{m}{A \times \rho} = \frac{0.29404}{3 \times 7.28} = 0.01346$$

เมื่อ m คือมวลของอินเดียมพอลียมีหน่วยเป็น g

A คือพื้นที่หน้าตัดของอินเดียม มีหน่วยเป็น cm^2

ρ คือความหนาแน่นของอินเดียม มีหน่วยเป็น g/cm^3

$$\begin{aligned}\xi &= \frac{2V}{S} n\sigma \\ &= n\sigma t \text{ สำหรับ infinite slab} \\ &= \Sigma_a t \\ &= 7.75 \times 0.01346 = 0.1043\end{aligned}$$

แทนค่า ξ ลงในสมการ (5)

$$\begin{aligned}f_{th} &= \frac{1}{2\xi} (1 - e^{-2\xi}) \\ &= \frac{1}{2 \times 0.1043} (1 - e^{-2(0.1043)}) \\ &= 0.9026\end{aligned}$$

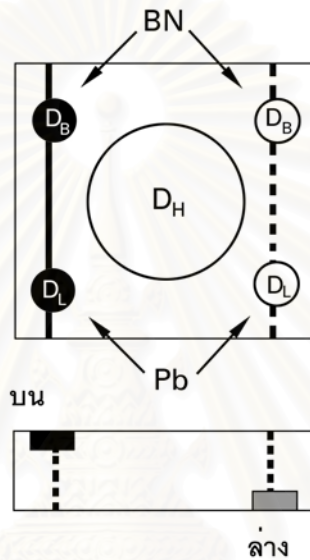
ดังนั้นเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์มีค่าเท่ากับ

$$\phi_{th} = \frac{616.104}{0.9026} = 682.588 \text{ n/cm}^2/\text{sec}$$

ภาคผนวก ง.

การคำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอน

จากภาพถ่ายของวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Beam Purity Indicator สามารถนำมาคำนวณปริมาณรังสีแต่ละชนิด จากความเข้มของฟิล์มที่ตำแหน่งของวัตถุตามรูปที่ ง.1



รูปที่ ง.1 ตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI

โดย	D_B	คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์
	D_L	คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว
	D_H	คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู
	D_T	คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน
	ΔD_L	คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองขึ้น
	ΔD_B	คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองขึ้น

ตารางที่ ง.1 ความดำของฟิล์มบนวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน BPI

ตำแหน่ง	ความดำของฟิล์ม	
	เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย	ระบบที่พัฒนาขึ้น
D_H	2.02	1.22
D_{B1}	1.01	0.95
D_{B2}	1.01	0.90
D_{L1}	1.74	1.19
D_{L2}	1.70	1.19
D_T	1.84	1.19

จากความดำของฟิล์มที่วัดได้สามารถนำไปคำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอนได้ดังนี้

1. ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน (Effective thermal neutron content, NC)

$$NC = \frac{D_H - (highD_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100$$

จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

$$NC = \frac{2.02 - (1.01 + 0.04)}{2.02} \times 100 = 48.02$$

จากระบบที่พัฒนาขึ้น

$$NC = \frac{1.22 - (0.95 + 0)}{1.22} \times 100 = 22.13$$

2. ปริมาณนิวตรอนกระเจิง (Effective scatter neutron content, S)

$$S = \left(\frac{\Delta D_B}{D_H} \right) \times 100$$

จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

$$S = \frac{0}{2.02} \times 100 = 0$$

จากระบบที่พัฒนาขึ้น

$$S = \frac{0.05}{1.22} \times 100 = 4.09$$

3. ปริมาณรังสีแกมมา (Effective gamma content, γ)

$$\gamma = \left(\frac{D_T - lowD_L}{D_H} \right) \times 100$$

จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

$$\gamma = \frac{(1.84 - 1.70)}{2.02} \times 100 = 6.93$$

จากระบบที่พัฒนาขึ้น

$$\gamma = \frac{(1.19 - 1.19)}{1.22} \times 100 = 0$$

4. ปริมาณรังสีจาก Pair production (Effective pair production content, P)

$$P = \left(\frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100$$

จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

$$P = \left(\frac{0.04}{2.02} \right) \times 100 = 1.98$$

จากระบบที่พัฒนาขึ้น

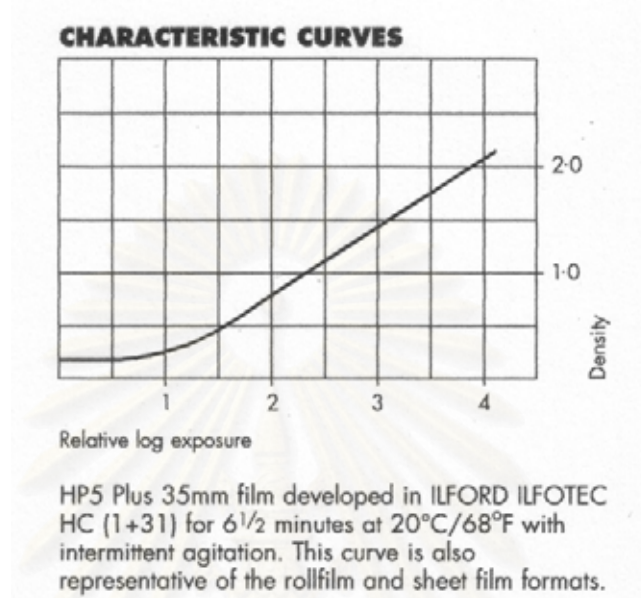
$$P = \left(\frac{0}{1.22} \right) \times 100 = 0$$

ตารางที่ ง.2 คุณภาพของลำนิวตรอนเปรียบเทียบระหว่างระบบที่พัฒนาขึ้นและจากเครื่องปฏิกรณ์
ปรมาณูวิจัย

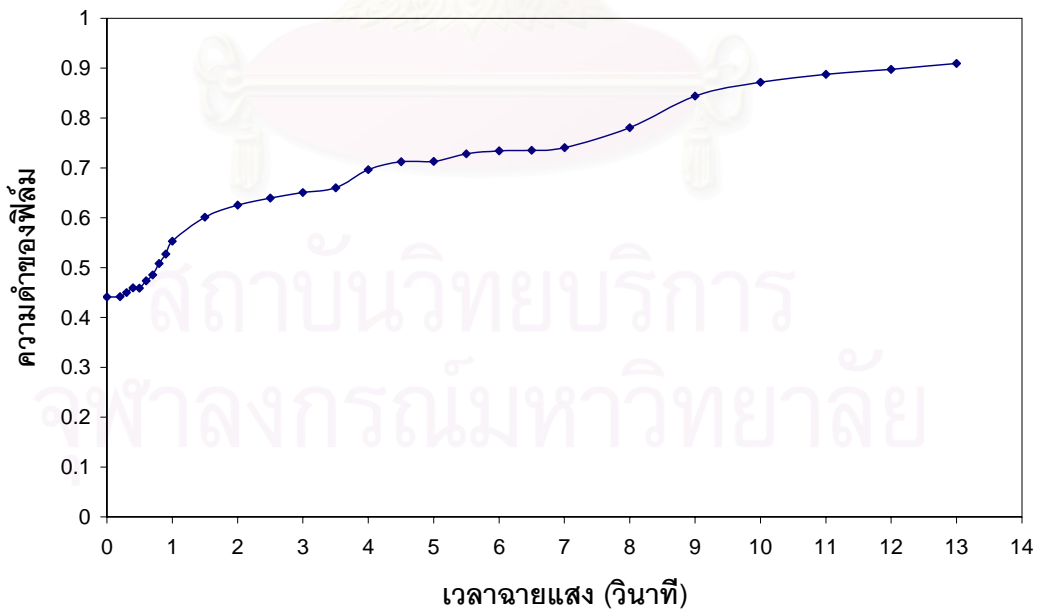
คุณภาพของลำนิวตรอน	เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย	ระบบที่พัฒนาขึ้น
ปริมาณนิวตรอน	48.02	22.13
ปริมาณนิวตรอนกระเจิง	0	4.09
ปริมาณรังสีแกมมา	6.93	0
ปริมาณ pair production	1.98	0

ภาคผนวก จ.

กราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม (Film characteristic curve)

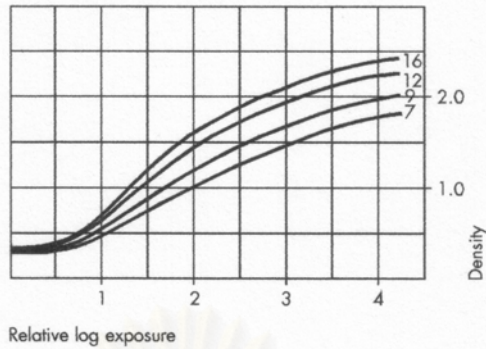


รูปที่ จ.1 กราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส

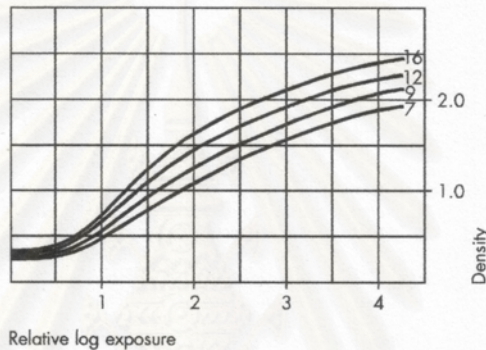


รูปที่ จ.2 เวลาในการฉายแสงและความดำบนฟิล์มเมื่อทำฟรี-เอกซ์โพเชอร์ของฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส

CHARACTERISTIC CURVES

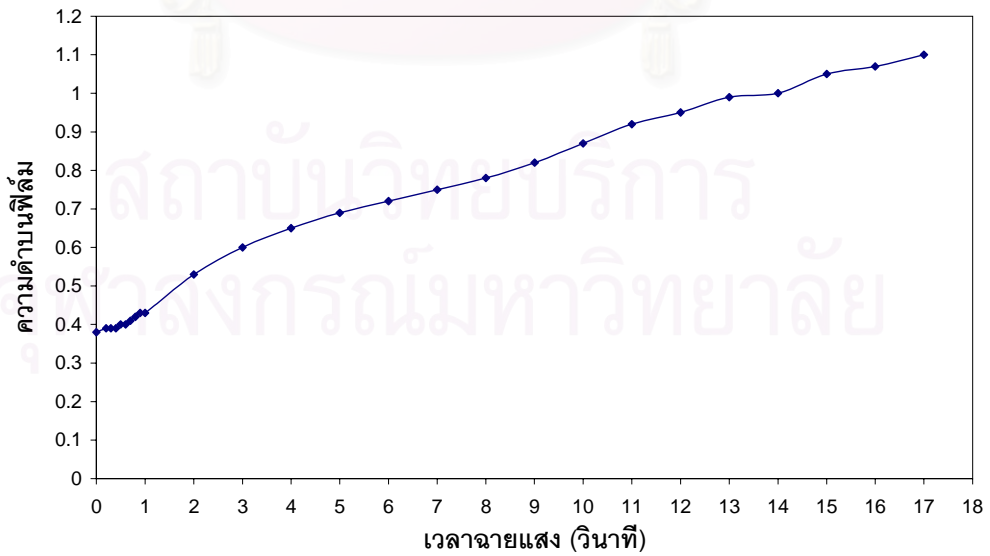


DELTA 3200 Professional film developed in ILFORD ILFOTEC DD-X 1+4 for 7, 9, 12 and 16 minutes at 20°C/68°F with intermittent agitation.



DELTA 3200 Professional film developed in ILFORD MICROPHEN stock for 7, 9, 12 and 16 minutes at 20°C/68°F with intermittent agitation.

รูปที่ ๑.3 กราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์มอีลฟอร์ด เดลต้า 3200



รูปที่ ๑.4 เวลาในการฉายแสงและความดำบนฟิล์มเมื่อทำฟรี-เอกซ์โพเชอร์ของฟิล์มอีลฟอร์ด เดลต้า 3200

พลัส

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศรารุช ใจเย็น เกิดเมื่อวันที่ 9 เมษายน พ.ศ. 2520 ที่อำเภอเกาะคา จังหวัดลำปาง สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ในปีการศึกษา 2542 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย