

การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสีชนิด PI-200
ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

นายศิวาวุธ ชูรักษา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2555
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)
เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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

DEVELOPMENT OF A NEUTRON RADIOGRAPHY SYSTEM
USING PI-200 FLUORESCENT SCREEN COUPLED WITH DIGITAL CAMERA

Mr. Siwawut Chooraksa

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

Department of Nuclear Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2012

Copyright of Chulalongkorn University

ศิวาวุธ ชูรักษา : การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสีชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล.(DEVELOPMENT OF A NEUTRON RADIOGRAPHY SYSTEM USING PI-200 FLUORESCENT SCREEN COUPLED WITH DIGITAL CAMERA)

อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : รศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, อ. ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม : ผศ. อรรถพร ภัทรสุมันต์, 80 หน้า

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยทั่วไปใช้วิธีบันทึกภาพด้วยฟิล์มและแผ่นบันทึกภาพ ส่วนระบบถ่ายภาพที่สามารถแสดงผลทางจอภาพที่ใช้งานกันอยู่มีราคาสูงมาก การวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่สามารถแสดงผลทางจอภาพโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียมออกซิซัลไฟด์ (เทอร์เบียม) ชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล เนื่องจากมีต้นทุนไม่สูงจากนั้นได้ทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นกับลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 ที่มีความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนประมาณ 10^6 นิวตรอน/ตร.ซม.-วินาที โดยใช้เงื่อนไขต่าง ๆ เช่น การปรับค่ารับแสง ความไวแสง และเวลาในการถ่ายภาพต่าง ๆ กัน พบว่าเมื่อตั้งค่าความไวแสงสูงและใช้เวลาในการถ่ายภาพนานมีสัญญาณรบกวนบนภาพมากขึ้นจากปฏิกิริยาของรังสีแกมมากับชิปซีมอสที่ทำหน้าที่รับภาพ จากนั้นจึงได้เลือกปรับกล้องถ่ายภาพที่ค่ารับแสง 5.6, ความไวแสง 100 และใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 3 นาทีในการถ่ายภาพชิ้นงานเนื่องจากให้ภาพถ่ายที่สามารถมองเห็นรายละเอียดภายในของวัตถุที่ตรวจสอบได้เป็นที่น่าพอใจโดยมีสัญญาณรบกวนต่ำ สามารถใช้ในการตรวจสอบวัสดุได้ ถึงแม้ว่าภาพที่ได้มีคุณภาพด้อยกว่าที่ได้จากแผ่นบันทึกภาพ นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อนำภาพที่ถ่ายสองภาพหรือมากกว่าที่ถ่ายภายใต้เงื่อนไขเดียวกันมารวมกันจะได้ภาพถ่ายที่มีคุณภาพดีขึ้น เมื่อเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายกับเมื่อใช้ฉากเรืองรังสีชนิด DRZ Std และ NE426 พบว่าภาพถ่ายมีคุณภาพทัดเทียมกันโดยฉากชนิด PI-200 มีความเร็วสูงสุด ฉาก DRZ Std มีความเร็วต่ำที่สุดแต่มีความคมชัดดีที่สุด ส่วนฉากชนิด NE426 ให้ภาพที่ภาพมีความเปรียบต่างสูงที่สุดแต่มีความคมชัดน้อยสุด

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

##5370348621: MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY.

KEYWORDS : NEUTRON RADIOGRAPHY / GADOLINIUM OXYSULFIDE (GOS)
FLUORESCENT SCREEN / THERMAL NEUTRON

SIWAWUT CHOORAKSA : DEVELOPMENT OF A NEUTRON RADIOGRAPHY
SYSTEM USING PI-200 FLUORESCENT SCREEN COUPLED WITH DIGITAL
CAMERA. ADVISOR : ASSOC. PROF.NARES CHANKOW,
CO-ADVISOR : ASST.PROF.ATTAPORN PATTARASUMUNT, 80 pp.

Neutron radiography (NR) is normally performed by using film or imaging plate as recording medium. A system for displaying neutron radiographic image on a monitor is still costly. This research thus aims to develop a low-cost system to display neutron radiographic image on a monitor using PI-200 gadolinium oxysulfide (terbium) neutron converter screen coupled with a digital camera. The developed system was tested by using the neutron beam from the Thai Research Reactor TRR1/M1 having neutron flux of approximately 10^6 n cm⁻² s⁻¹ under various camera settings such as aperture(f), ISO and exposure time. It was found that noisy signal seen on the image increased with increasing of the ISO value and the exposure time caused by interaction of gamma-rays with the CMOS chip image sensor. Test specimens were then radiographed using f = 5.6, ISO = 100 and 3 minutes exposure time. The image quality was found to be satisfactory with low noisy signal which was applicable for inspection of materials. However, the image quality was found to be inferior to those obtained from the imaging plate. The image quality could be further improved by summing the two or more images taken at the same condition. In comparison to the images obtained from DRZ Std and NE426 screens, the image quality was nearly the same but the PI-200 screen had the fastest speed while the DRZ Std screen had the lowest speed. It was also indicated that DRZ screen gave the best resolution among the three screens while the NE426 gave the best image contrast with poorest resolution.

Department : NUCLEAR ENGINEERING Student's Signature

Field of Study : NUCLEAR TECHNOLOGY Advisor's Signature

Academic Year : 2012 Co-Advisor's Signature

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสีชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล
โดย	นายศิวาวุธ ชูรักษา
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.....กรรมการ
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

.....กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ศรินรัตน์ วงษ์ลี)

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของ รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา ซึ่งคอยดูแลให้คำปรึกษาในการทำวิจัยและ เขียนวิทยานิพนธ์ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษา และข้อคิดและแนวทางในการทำวิจัยมา รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้

ขอขอบคุณ ดร. ศรีนรัตน์ วงษ์ลี นักวิทยาศาสตร์นิวเคลียร์ กลุ่มวิจัย และพัฒนานิวเคลียร์ สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) และกองฟิสิกส์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้วัสดุ ตัวอย่างมาตรฐานสำหรับตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอนและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณเฉลิมพงษ์ โพธิ์ลี ที่ให้ความช่วยเหลือด้วยดีมาตลอด

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน ๆ พี่ ๆ และน้อง ๆ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมนิวเคลียร์ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และพี่ชาย เป็นแรงใจและกำลังใจ เป็นอย่างดีในการปฏิบัติงานและเป็นแรงผลักดันทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานจนสำเร็จลุล่วงได้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ.....	ฉ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการวิจัยนี้.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. หลักการและทฤษฎี.....	5
2.1 คุณสมบัติของนิวตรอน	5
2.1.1 ชนิดของนิวตรอน	5
2.1.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร	6
2.1.3 ภาคตัดขวางของนิวตรอน	9
2.1.4 ระบบผลิตนิวตรอนช้า	13
2.1.5 ต้นกำเนิดนิวตรอน	18
2.1.5.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย	18
2.1.5.2 เครื่องเร่งอนุภาค.....	18
2.1.5.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี	19
2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	20
2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	21
2.2.2 อุปกรณ์ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน	22

2.2.3 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน	23
2.2.3.1 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง	23
2.2.3.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด	24
2.2.3.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์.....	25
2.3 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	26
2.4 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน	32
2.4.1 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ	33
2.4.1.1 ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาทันที	33
2.4.1.2 ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาจากการสลายตัว.....	34
2.4.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง	34
2.4.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มแทรก-เอตซ์.....	35
2.5 ฟิล์มและอุปกรณ์แสดงผล.....	36
2.6 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน	39
2.6.1 การวัดค่าความดำบนฟิล์ม	39
2.6.2 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนด้วยวัตถุ	
ตัวอย่างมาตรฐาน	40
2.6.2.1 การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator	40
2.6.2.2 การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน	
Sensitivity Indicator	42
2.6.2.3 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่ายและความไว	
ของการถ่ายภาพด้วย Test strip B	45
3. วัสดุและอุปกรณ์วิจัย.....	46
3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน	46
3.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน	47
3.3 อุปกรณ์บันทึกภาพ.....	48
3.4 ซอฟต์แวร์ปรับแต่งภาพ	49
3.5 กล้องทึบแสง	50

3.6	วัตถุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	51
3.7	วัตถุตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน	53
4.	วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย	55
4.1	การทดสอบความสว่างของฉากเมื่อได้รับนิวตรอน	55
4.1.1	วิธีดำเนินการวิจัย	55
4.1.2	ผลการวิจัย	56
4.1.3	วิเคราะห์ผลการวิจัย	57
4.2	การหาค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากเรืองรังสีและสัญญาณรบกวนที่ ISO ต่างกัน	57
4.2.1	วิธีดำเนินการวิจัย	57
4.2.2	ผลการวิจัย	57
4.2.3	วิเคราะห์ผลการวิจัย	59
4.3	การหาค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากเรืองรังสีและสัญญาณรบกวนที่เวลาต่างกัน.....	60
4.3.1	วิธีดำเนินการวิจัย	60
4.3.2	ผลการวิจัย.....	60
4.3.3	วิเคราะห์ผลการวิจัย	61
4.4	การหาปริมาณสัญญาณรบกวนบริเวณถ่ายภาพ.....	62
4.4.1	วิธีดำเนินการวิจัย	62
4.4.2	ผลการวิจัย.....	62
4.4.3	วิเคราะห์ผลการวิจัย	63
4.5	เปรียบเทียบขนาดรูรับแสงที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่าย.....	63
4.5.1	วิธีดำเนินการวิจัย	63
4.5.2	ผลการวิจัย.....	64
4.5.3	วิเคราะห์ผลการวิจัย	65
4.6	เปรียบเทียบภาพถ่ายที่ถ่ายนาน 3 นาทีนำมาซ้อนทับกันกับภาพที่ถ่ายนาน 6 นาที...	65
4.6.1	วิธีดำเนินการวิจัย	65
4.6.2	ผลการวิจัย.....	65
4.6.3	วิเคราะห์ผลการวิจัย	67

4.7 การหาปริมาณแก๊สที่ปะปนมากับนิวตรอนที่ปรากฏในภาพถ่าย	67
4.7.1 วิธีดำเนินการวิจัย	67
4.7.2 ผลการวิจัย	68
4.7.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย	68
4.8 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างมาตรฐานด้วยนิวตรอน	69
4.8.1 วิธีดำเนินการวิจัย	69
4.8.2 ผลการวิจัย	69
4.8.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย	71
4.9 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่าง	72
4.9.1 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสีชนิดต่าง ๆ และการบันทึกภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยแผ่นบันทึกภาพ	72
4.9.2 ผลการวิจัย	72
4.9.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย	75
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	76
5.1 สรุปผลการวิจัย	76
5.2 ข้อเสนอแนะ	77
รายการอ้างอิง	78
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	80

สารบัญตาราง

ฎ

ตารางที่	หน้า
2.1	การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับช่วงพลังงาน5
2.2	ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่างๆ12
2.3	ค่าเทอร์มัลไลเซนชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด14
2.4	ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี20
2.5	ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่างๆที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน35
2.6	ฟิล์มสำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่าง ๆ37
2.7	ความเร็วเปรียบเทียบของฟิล์มรังสีเอกซ์สำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการถ่ายภาพ ด้วยนิวตรอน37
2.8	ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....43
2.9	แสดงค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM.....43
3.1	คุณสมบัติฉากเปลี่ยนนิวตรอน PI-20048
3.2	คุณสมบัติของกล้องดิจิตอล49
4.1	ค่าเฉลี่ยความสว่าง และสัญญาณรบกวนที่ ISO ต่าง ๆ58
4.2	ค่าเฉลี่ยความสว่าง และสัญญาณรบกวนที่เวลาต่างกัน60
4.3	สัญญาณรบกวนที่เวลาต่างกัน62
4.4	ปริมาณสัญญาณรบกวนของภาพแบบซ้อนทับ67
4.5	เปรียบเทียบความคมชัด และความไวของภาพถ่าย69

สารบัญภาพ		ฎ
ภาพที่		หน้า
2.1	อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่างๆ.....	8
2.2	ลำนิวตรอนกระทบเป้า	9
2.3	ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนกับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนของตัวหน่วงนิวตรอน	15
2.4	ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค.....	16
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์ตี	17
2.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์พลังงาน 125 MeV และนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV กับเลขอะตอมของธาตุ	21
2.7	หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	21
2.8	การวางระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนพร้อมกับระบบรับภาพ.....	23
2.9	การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพตรง	24
2.10	การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพทอด	25
2.11	การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์.....	26
2.12	ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคลเดเมียม โบรอน และไฮโดรเจน	27
2.13	การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์.....	27
2.14	การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยคอลลิเมเตอร์แบบขนาน.....	28
2.15	แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน	29
2.16	ลักษณะของคอลลิเมเตอร์ที่ใช้สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์ตี	30
2.17	ความเข้มของนิวตรอน อัตราส่วน L/D และเวลาในการถ่ายภาพของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทต่าง ๆ.....	31
2.18	ความเข้มของนิวตรอนและค่า L/D ของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบต่างๆ.....	32
2.19	แสดงลักษณะการเกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพ.....	38
2.20	แสดงลักษณะการอ่านภาพบนแผ่นบันทึกภาพ.....	38

ภาพที่	หน้า
2.21	เปรียบเทียบคุณลักษณะความไวรังสีของแผ่นบันทึกภาพและฟิล์มถ่ายภาพรังสีโดยใช้ต้นกำเนิดฟอสฟอรัส-32 ซึ่งให้พลังงานของรังสีเบตา 1.7 MeV 39
2.22	Beam Purity Indicator..... 40
2.23	ตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI..... 41
2.24	ASTM Sensitivity Indicator 44
2.25	แสดงตำแหน่งและขนาดของรูปใน ASTM SI..... 44
2.26	Test strip B 45
3.1	ส่วนประกอบภายในท่อนำนิวตรอน 46
3.2	ฉากเปลี่ยนนิวตรอนฟลูออเรสเซนซ์ รุ่น PI-200 47
3.3	กล่องคิจิตอลแคนอน รุ่น 500D 48
3.4	สายต่อ และUSB HUB 48
3.5	Tool bar โปรแกรม image J 50
3.6	กล่องทึบแสง 51
3.7	Beam Purity Indicator 51
3.8	Sensitivity Indicator 52
3.9	Test Strip B 52
3.10	พระพุทธรูป..... 53
3.11	Connector RS232 25-pin 53
3.12	กระบอกไฟฉาย 54
4.1	การติดตามเรื่องรังสี 55
4.2	อุปกรณ์ป้องกันรังสีให้กับกล้อง..... 56
4.3	สีของฉากเรื่องรังสีทั้ง 3 ชนิดเมื่อโดนนิวตรอน 56
4.4	โพรไฟล์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากทั้ง 3 ชนิด..... 57
4.5	ความสว่างของฉากที่ ISO ต่าง ๆ..... 58
4.6	กราฟแสดงค่าเฉลี่ยความสว่างเทียบกับค่า ISO 58
4.7	กราฟแสดงปริมาณสัญญาณรบกวนเทียบกับค่า ISO 59

ภาพที่	หน้า
4.8	ขนาด pixel ของสัญญาณรบกวนต่อพื้นที่ที่ ISO เท่ากับ 100 59
4.9	ขนาด pixel ของสัญญาณรบกวนต่อพื้นที่ที่ ISO เท่ากับ 6400 59
4.10	ความสว่างของฉากที่เวลาต่าง ๆ 60
4.11	กราฟค่าเฉลี่ยความสว่างเทียบกับเวลา..... 61
4.12	กราฟปริมาณสัญญาณรบกวนเทียบกับเวลา..... 61
4.13	กราฟปริมาณสัญญาณรบกวนเทียบกับเวลา..... 63
4.14	โพรไฟล์ภาพถ่ายที่ค่ารับแสงต่างกัน..... 64
4.15	ภาพถ่าย 3 นาที..... 66
4.16	ภาพถ่าย 3 นาที 2 ภาพซ้อนทับกัน 66
4.17	ภาพถ่าย 6 นาที..... 66
4.18	ภาพถ่ายที่ไม่มีแผ่นแคดเมียมบัง..... 68
4.19	ภาพถ่ายวัตถุที่มีแผ่นแคดเมียมบัง 68
4.20	ภาพที่เกิดจากการนำ 2 ภาพมาลบกัน 68
4.21	โพรไฟล์เปรียบเทียบความไวของภาพถ่ายของฉากชนิดต่าง ๆ 70
4.22	โพรไฟล์เปรียบเทียบความคมชัดของภาพถ่ายของฉากชนิดต่าง ๆ 71
4.23	พระพุทธรูป โพรไฟล์ภาพถ่ายตามแนวเส้น X-Y ที่ลากผ่านของ IP, PI200, DRZ Std และNE426..... 73
4.24	Connector RS232 โพรไฟล์ภาพถ่ายตามแนวเส้น A-B ที่ลากผ่านของ IP, PI200, DRZ Std และNE426..... 74
4.25	กระบอกไฟฉาย โพรไฟล์ภาพถ่ายตามแนวเส้น M-N ที่ลากผ่านของ IP, PI200, DRZ Std และNE426..... 75

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

รังสีได้เข้ามามีบทบาททางด้านการทดสอบแบบไม่ทำลาย (Non-destructive testing) ในทางอุตสาหกรรมมากกว่า 50 ปี เช่น การถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งการถ่ายภาพด้วยรังสีที่กล่าวมานั้นจะไม่ทำให้ชิ้นงานที่นำมาถ่ายภาพเกิดความเสียหาย และยังสามารถนำชิ้นงานนั้นกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ทั้งยังประหยัดเวลาในการวิเคราะห์ปัญหา รวมทั้งยังทำให้เห็น โครงสร้างภายในที่มีความละเอียด และซับซ้อนของชิ้นงาน ซึ่งการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา และรังสีเอกซ์จะให้รายละเอียดของภาพที่ดีกับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นสูง จำพวกวัสดุที่เป็น โลหะที่มีเนื้อเดียวกัน และมีความหนา แต่ถ้าชิ้นงานนั้นมีวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ จำพวกพลาสติก ยางธรรมชาติ ยางสังเคราะห์ และของเหลว ประกอบอยู่ในชิ้นงานที่ต้องการถ่ายภาพอยู่ด้วย ก็จะทำให้ได้ภาพที่ออกมาดูนั้นแสดงองค์ประกอบของวัสดุเหล่านั้นไม่ชัดเจน อันเนื่องมาจากสัมประสิทธิ์การลดทอนของรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาในวัสดุเหล่านี้ต่ำมาก แต่สามารถแก้ปัญหาเหล่านั้นได้ โดยการถ่ายภาพวัตถุที่สนใจด้วยนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำ (Thermal neutron) ร่วมกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา ซึ่งจะทำให้ได้รายละเอียดของภาพทั้งในส่วนที่เป็นโลหะวัตถุ และในส่วนของธาตุเบา อย่างไรก็ตามการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ที่สามารถแสดงผลได้ทันทีหรือในระยะเวลาสั้น โดยมากใช้ฟิล์มหรือแผ่นบันทึกภาพ (Imaging plate) จะมีประโยชน์ในทางปฏิบัติเป็นอย่างมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีในการถ่ายภาพมีความก้าวหน้าไปมาก มีความไว และให้ความละเอียดของภาพสูงขึ้น และสามารถตั้งเวลาถ่ายภาพนานได้ตามต้องการ

การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen) ชนิด แกโดลิเนียมออกไซด์ซัลไฟด์ (Gadolinium oxysulfide, GOS) ร่วมกับกล้องถ่ายภาพเพื่อใช้รับภาพด้วยนิวตรอน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ฉากเรืองรังสีแกโดลิเนียมออกไซด์ไฟต์ (เทอร์เบียม) $[Gd_2O_2S(Tb)]$ ชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ออกแบบ และสร้างระบบถ่ายภาพที่ใช้ฉากเรืองรังสีแกโดลิเนียมออกไซด์ไฟต์ (เทอร์เบียม) $[Gd_2O_2S(Tb)]$ ชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัลเพื่อนำไปใช้กับท่อนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1
2. หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ได้แก่ เวลาในการบันทึกภาพ ขนาดรูรับแสง และความไวแสง เป็นต้น
3. ทดลองถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยระบบที่พัฒนาขึ้น เปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีอื่น

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าเอกสาร และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบ โครงสร้าง และสร้างระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่จะนำไปใช้กับท่อนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1
3. ทำการทดลองถ่ายภาพกับชิ้นงานอุตสาหกรรมโดยใช้อุปกรณ์ และระบบที่ทำการพัฒนาขึ้นมา
4. ทำการเปรียบเทียบด้านคุณสมบัติทางการถ่ายภาพของระบบที่พัฒนากับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีอื่น และการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์
5. สรุปผล และจัดทำวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ฉากเรืองรังสีแกโดลิเนียมออกไซด์ไฟต์ (เทอร์เบียม) $[Gd_2O_2S(Tb)]$ ชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัลที่สามารถแสดงผลได้อย่างรวดเร็ว และประหยัด

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2538 ศศิพันธุ์ ณ สงขลา^[1] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นการพัฒนาจากสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากที่พัฒนาขึ้น ประกอบด้วยสารเรืองรังสี คือ สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) และสารดูดกลืนนิวตรอน คือลิเทียมเมตาบอเรต โดยมีไอโซบิวทิวาซิเตด และอะซิโตน เป็นสารยึดเหนี่ยว และได้ทดสอบจากเปลี่ยนรังสีนิวตรอนที่ผลิตขึ้น โดยทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 ปบว.-1/1 เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายที่ได้จากฉากเรืองรังสีชนิด NE426 และ $Gd_2O_2S(Tb)$ รวมทั้งฉากโลหะแกโดลิเนียม พบว่าภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากที่พัฒนาขึ้น มีค่าความดำบนแผ่นฟิล์ม ความไวในการเกิดภาพ และริโซลูชันของภาพเป็นที่น่าพอใจ

2. ปี 2545 สราวุธ ใจเย็น^[2] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252 โดยทดลองหานิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพที่มีขนาด $L/D = 20$ และส่วนของช่องเปิดด้านล่างมีโพลิเอทีลีนสูง 10 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างค้ำกำเนิดนิวตรอนห่างจากปลายคอลลิเมเตอร์ 6 เซนติเมตร โดยใช้ค้ำกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ขนาด 10-40 ไมโครกรัม (5.35 – 21.39 มิลลิคูรี) และใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 จากคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น พบว่าสามารถสังเกตเห็นขนาดของลวดแคดเมียม และรูที่เจาะบนแผ่นแคดเมียมขนาด 0.1 และ 0.5 มิลลิเมตร และขนาดของลวดพลาสติก 0.45 มิลลิเมตร ภาพถ่ายจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีค่าริโซลูชันของภาพเท่ากับ 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งมีค่าเท่ากับริโซลูชันของภาพถ่ายจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยคุณภาพของลำนิวตรอนจากระบบที่พัฒนาขึ้นมีข้อดีกว่าลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยคือ ไม่มีรังสีแกมมาปะปน แต่ปริมาณนิวตรอนมีค่าน้อย และมีปริมาณนิวตรอนกระเจิงอยู่บ้าง

3. ปี 2541 ทิพาพร อติกานต์กุล^[3] ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ ได้พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคปกติที่ใช้กันอยู่ พบว่าเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซเจอร์ใช้ฟิล์มอิลฟอร์ดเอชพี 5 พลาสติกฟรี-เอกซ์โพสด้วยแสงจากเครื่องขยายภาพเป็นเวลา 0.4 ถึง 1.0 วินาที สามารถลดระยะเวลาในการถ่ายภาพได้ถึง 50% การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่อุณหภูมิ -20 ถึง -40 องศาเซลเซียส โดยในใช้ในโตรเจนเหลวในการหล่อเย็นฟิล์ม และฉากให้ภาพที่มีความดำสูงกว่าภาพจากเทคนิคปกติเกือบ 2

เท่า การถ่ายภาพด้วยฟิล์มฟูจิ เอฟพี-3000บี สามารถลดระยะเวลาในการถ่ายภาพได้ถึง 20 เท่า และใช้เวลาในกระบวนการสร้างภาพเพียง 15 วินาที ส่วนการถ่ายภาพด้วยเทคนิคกล้องถ่ายภาพรูปแบนที่ภาพด้วยฟิล์มฟูจิ นีโอแพน 1600 ถ่ายภาพนาน 5 วัน พบว่าไม่เกิดภาพบนฟิล์ม แต่ได้ภาพถ่ายที่มีคุณสมบัติเมื่อใช้นิวตรอนที่มีความเข้ม 7.85×10^5 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 และรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์

4. ปี 2550 M. A. Abou Mandour^[4] ได้ทำการวิจัยเรื่อง Characterization and Application of the Thermal Neutron Radiography Beam in the Egyptian Second Experimental and Training Research Reactor (ETRR-2) ได้ใช้วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์ เพื่อทดสอบพารามิเตอร์ที่ใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ออกแบบ กับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (ETRR-2) ซึ่งสามารถผลิตเทอร์มัลนิวตรอน 1.5×10^7 n /cm²·s มีอัตราส่วน n_{th}/γ เท่ากับ 0.1×10^6 n ·cm⁻² · mR⁻¹, อัตราส่วนของแคดเมียมเท่ากับ 10.26 และ L/D = 117.3 ซึ่งได้ภาพออกมาเป็นที่น่าพอใจ

บทที่ 2

หลักการและทฤษฎี

2.2 คุณสมบัติของนิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนถูกค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick)^[5] นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2475 ซึ่งได้ทำการทดลองโดยนำแผ่นฟอโลเนียม (Polonium foil) มารวมไว้กับเบริลเลียม (Beryllium) เมื่ออนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยออกจากฟอโลเนียมเข้าชนกับแผ่นเบริลเลียม มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมา ซึ่งเรียกว่า อนุภาคนิวตรอนที่เป็นอนุภาคมูลฐาน (Elementary particles) ซึ่งอยู่ร่วมกับโปรตรอนเป็นนิวเคลียสอยู่ที่ศูนย์กลางของอะตอม โดยมีอิเล็กตรอนอยู่รอบนอก อนุภาคนิวตรอนใช้สัญลักษณ์แทนด้วย n มีมวล 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit, amu) หรือ 1.67492×10^{-27} กิโลกรัม^[5] มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางจึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตรอน อนุภาคอิเล็กตรอนหรืออนุภาคบีตา และอนุภาคแอนตินิวตริโน มีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที

2.1.1 ชนิดของนิวตรอน

นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุหรือเป็นกลางทางไฟฟ้าจึงไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้ แต่สามารถเลือกช่วงพลังงานในการใช้งานได้ด้วยการหน่วงนิวตรอน (Neutron moderation) ซึ่งเป็นการลดพลังงานของนิวตรอน โดยการให้นิวตรอนชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ และโพลิเอทีลิน เป็นต้น อนุภาคนิวตรอนแบ่งตามระดับพลังงานได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งอาจมีช่วงพลังงานที่เหลื่อมกัน

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับช่วงพลังงาน^[6]

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)	1 eV – 10^2 eV
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	10^3 eV – 20 MeV
นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron)	> 20 MeV

2.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร

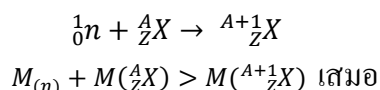
นิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ และเป็นกลางทางไฟฟ้า นิวตรอนจึงไม่ได้รับผลกระทบจากกลุ่มอิเล็กตรอนของอะตอม และโปรตอนในนิวเคลียสของอะตอม อันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสกับสสารเกิดขึ้นได้หลายแบบดังนี้

2.1.3.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) การชนของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอม ที่เป็นการชนแบบการแลกเปลี่ยน โมเมนตัม โดยที่พลังงานรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสมีค่าคงที่ หรือกล่าวได้ว่าพลังงานรวมของนิวตรอน และนิวเคลียสทั้งก่อน และหลังการชนมีค่าคงที่ แต่ยังคงสภาวะให้นิวเคลียสที่ถูกชนอยู่ที่สภาวะปกติ (Ground state) แต่นิวตรอนได้กระเจิง (Scatter) ออกไปโดยมีทิศทาง และความเร็วที่เปลี่ยนไป อันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่นนี้มีความสำคัญในการลดทอนพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าใช้สัญลักษณ์แทนเป็น (n, n)

2.1.2.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering) นิวตรอนที่เข้าชนกับนิวเคลียสจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชนเป็นกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound nucleus) และนิวตรอนตัวหนึ่งจะถูกปลดปล่อยออกมาจากนิวเคลียส โดยที่นิวเคลียสจะอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา นิวเคลียสจะกลับสู่สภาวะปกติ เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปจากการปลดปล่อยรังสีแกมมา ทำให้อันตรกิริยาแบบนี้พลังงานจลน์รวมก่อนชนกับหลังชนมีค่าต่างกันคือ พลังงานจลน์รวมหลังการชนมีค่าลดลง การชนแบบไม่ยืดหยุ่นเป็น Threshold reaction คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานมากพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ ปฏิกริยาแบบนี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน (Endothermic reaction) ค่า Q ของปฏิกริยาเป็นลบ ปฏิกริยาที่มีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วเช่นกัน นิยมใช้สัญลักษณ์ของปฏิกริยาเป็น (n, n')

2.1.2.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture หรือ Radiative capture) หรือปฏิกริยาดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorption reaction) เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนวิ่งชนนิวเคลียสจะถูกนิวเคลียสจับไว้ ทำให้นิวเคลียสในอะตอมมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 การรวมตัวของนิวตรอนกับนิวเคลียสจะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า “Captured gamma-rays” หรือ “Neutron captured gamma” ซึ่งจะปลดปล่อยแกมมาออกมา 1 ตัวหรือมากกว่า อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอนทุกปฏิกริยาเป็น (Exothermic reaction) แบบคายพลังงาน คือมีค่า Q ของปฏิกริยาเป็นบวก เพราะค่าพลังงานยึดเหนี่ยว

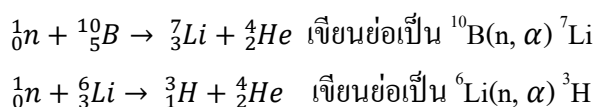
(Binding energy) ของนิวเคลียสใหม่จะมากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวเคลียสเดิมรวมกับนิวตรอนอิสระ



ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสี และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคนิวตรอนแอกติเวชัน (Neutron activation analysis, NAA) สัญลักษณ์ของปฏิกิริยานี้คือ (n, γ)

2.1.2.4 ปฏิกิริยาฟิชชันหรือปฏิกิริยาแตกตัว (Fission reaction) เกิดเมื่อนิวตรอนเข้าไปรวมกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิดได้แก่ ยูเรเนียม-235 ยูเรเนียม-238 เป็นต้น เกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ แล้วจากนั้น จะแบ่งตัวออกเป็น 2 ส่วนออกมาได้นิวเคลียสที่มีขนาดต่างกัน และมีเลขมวลรวมของ 2 นิวเคลียส เท่ากับนิวเคลียสเดิม พร้อมกับมีอนุภาคนิวตรอน 2-3 ตัวหลุดออกมา ปฏิกิริยาแบบฟิชชัน เป็นปฏิกิริยาที่ให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู โดยปฏิกิริยาแบบฟิชชันมีทั้งที่เป็น Threshold reaction และไม่เป็น Threshold reaction มักใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n, f)

2.1.2.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคมีประจุ (Charged- particle emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด จะเกิดเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ แล้วจะปลดปล่อยอนุภาคมีประจุออกมา เช่น อนุภาคแอลฟา โปรตอน ทั้งที่เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน และปฏิกิริยาแบบดูดความร้อนแต่ปฏิกิริยาแบบประเภทที่เป็น Exothermic reaction จะเกิดขึ้นได้น้อย และมีความสำคัญมากเรื่องการวัดนิวตรอน และการกำบังนิวตรอน เช่น ปฏิกิริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 (^{10}B) และปฏิกิริยาของนิวตรอนกับลิเทียม-6 (^6Li)



2.1.2.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron-producing reaction) ปฏิกิริยาแบบนี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง และเป็นปฏิกิริยาแบบดูดพลังงาน ซึ่งผลของปฏิกิริยาจะให้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n, 2n) ปฏิกิริยา (n, 3n) โดยที่ปฏิกิริยา (n, 2n) เป็นปฏิกิริยาที่สำคัญในเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูชนิดที่ใช้น้ำมวลหนัก (Heavy Water)

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,n)		
Fission	(n,f)		
Charged Particle Emission	(n,p)		
	(n,α)		
Neutron Production	$(n,2n)$		
	$(n,3n)$		

รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่าง ๆ ^[11]

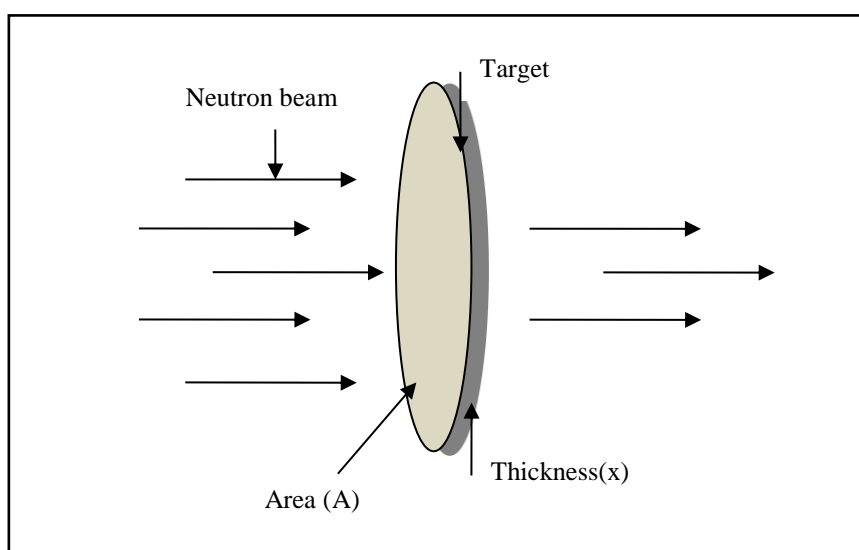
2.1.3 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section)

การเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสจะจัดอยู่ในรูปเชิงปริมาณ หรือที่เรียกว่า ภาคตัดขวาง (Cross section) โดยพิจารณาจากนิวตรอนเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มีความหนา X มีพื้นที่หน้าตัด A และในกระแสนิวตรอนมีความหนาแน่นของนิวตรอน จำนวน N อะตอมต่อลูกบาศก์เซนติเมตรและมีความเร็ว v เซนติเมตรต่อวินาที จะได้ตามสมการ 2.1

$$I = Nv \quad (2.1)^{[7]}$$

เมื่อ I คือความเข้มของกระแสนิวตรอน (Intensity of neutron beam)

มีหน่วยเป็น neutron/cm² - sec



รูปที่ 2.2 ลำนิวตรอนกระทบเป้า

จำนวนของนิวตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านเป้าที่มีขนาดพื้นที่ A ในเวลา 1 วินาที มีค่าเท่ากับ IA โดยที่นิวตรอนจะไม่ทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของเป้าทุกตัว ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของเป้า และค่าภาคตัดขวางจุลภาคของนิวตรอน

$$\text{จำนวนอันตรกิริยาต่อวินาที} = IN\sigma Ax \quad (2.2)^{[7]}$$

σ คือ ภาคตัดขวางจุดภาคของนิวตรอน มีหน่วยเป็น บาร์น (barn; b) โดยที่ 1 บาร์น มีค่า 10^{-24} ตารางเซนติเมตร

เนื่องจากอันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสารมีหลายแบบ ดังนั้นค่าภาคตัดขวาง ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสของอะตอมจึงมีหลายค่าเช่นเดียวกัน 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 ภาคตัดขวางของปฏิกิริยาการเกิดอนุภาคแอลฟา

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

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

ค่าภาคตัดขวางสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลักคือ กลุ่มแรก “ภาคตัดขวางการกระเจิง (Scattering cross section, σ_s)” ซึ่งหมายถึงอันตรกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น และ ไม่ยืดหยุ่น กลุ่มที่สอง “ภาคตัดขวางการดูดกลืน (Absorption cross section, σ_a)” ซึ่งหมายถึงอันตรกิริยาอื่นๆ 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 เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) มีหน่วยเป็น cm^{-1} ผลคูณของ $N\sigma_t$ ในสมการ (2.5) จึงใช้สัญลักษณ์เป็น Σ_t เรียกว่า ภาคตัดขวางมหภาครวม (Macroscopic total cross section) และสามารถเขียนสมการ (2.5) ในเทอมของภาคตัดขวางมหภาครวมได้เป็น

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

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทป และหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

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

เมื่อ 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 ความหนาแน่นอะตอมของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ตามลำดับ
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots$ คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทป หรือธาตุที่ 1, 2, 3, ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่างๆ^[8]

Material	Atomic or Molecular Weight	Density (g/cm ³)	Cross Section							
			E = 0.0253 eV				E = 1 MeV			
			σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_a (cm ⁻¹)	Σ_t (cm ⁻¹)	σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_t (cm ⁻¹)	Σ_a (cm ⁻¹)
Al	27	2.7	1.61	0.232	0.097	0.014	2.37	0.000	0.143	0.000
B	10	2.3	3845	3843	533	532	2.68	0.189	0.371	0.026
B	11	2.3	5.28	0.005	0.655	0.0006	2.13	0.000	0.268	0.000
Be	9	9	6.35	0.01	3.82	0.006	3.25	0.003	1.96	0.002
C	12	1.9	4.95	0.003	0.472	0.0003	2.58	0.000	0.246	0.000
Nat Ca	40.08	1.55	3.46	0.433	0.081	0.101	1.14	0.004	0.027	0.000
Cd	112	8.7	2470	2462	115.5	115.2	6.5	0.058	0.304	0.003
Nat Cl	34.45	Gas	50.2	33.4	Gas	Gas	2.3	0.001	Gas	Gas
Nat Cu	63.55	8.94	12.5	3.8	1.06	0.322	3.4	0.011	0.288	0.001
F	19	Gas	3.72	0.01	Gas	Gas	3.15	0.000	Gas	Gas
Fe	56	7.9	14.07	2.56	1.19	0.217	5.19	0.003	0.441	0.000
Nat Gd	157.25	7.95	49153	48981	1496	1491	7.33	0.223	0.223	0.007
H	1	Gas	30.62	0.33	Gas	Gas	4.26	0.000	Gas	Gas
H	2	Gas	4.25	0	Gas	Gas	2.87	0.000	Gas	Gas
He	3	Gas	5337	5336	Gas	Gas	2.87	0.879	Gas	Gas
He	4	Gas	0.86	0	Gas	Gas	7.08	0.000	Gas	Gas
Li	6	0.534	938	937	50.3	50.2	1.28	0.230	0.069	0.012
Li	7	0.534	1.16	0.036	0.053	0.0017	1.57	0.000	0.072	0.000
Nat Mg	24.31	1.74	3.47	0.063	0.15	0.0027	2.66	0.001	0.115	0.000
Mn	55	7.2	14.5	13.2	1.14	1.04	3.17	0.003	0.25	0.000
N	14	Gas	12.22	1.9	Gas	Gas	2.39	0.021	Gas	Gas
Na	23	0.971	3.92	0.529	0.1	0.0134	3.17	0.000	0.081	0.000
Ni	59	8.9	23.08	4.58	2.1	0.416	3.66	0.001	0.322	0.000
O	16	Gas	3.87	0.000	Gas	Gas	8.22	0.000	Gas	Gas
Pb	204	11.34	11.40	0.18	0.381	0.006	4.39	0.003	0.147	0.000
Pu	238.05	19.6	599.3	562.0	29.72	27.87	6.66	0.190	0.330	0.0094
Pu	239.05	19.6	1021	270	50.4	13.3	7.01	0.026	0.364	0.0013
Pu	240.05	19.6	294	293	14.5	14.4	7.15	0.108	0.352	0.0053
Pu	241.06	19.6	1390	362	68.1	17.7	7.98	0.117	0.391	0.0057
Pu	242.06	19.6	26.7	18.9	1.30	0.922	7.31	0.098	0.357	0.0048
Nat Si	28.09	2.42	2.24	0.161	0.116	0.0084	4.43	0.01	0.230	0.0001
Th	232	11.3	20.4	7.50	0.598	0.220	7.00	0.135	0.205	0.0040

ตารางที่ 2.2 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron cross section) ของวัสดุต่างๆ (ต่อ)

Material	Atomic or Molecular Weight	Density (g/cm ³)	Cross Section							
			E = 0.0253 eV				E = 1 MeV			
			σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_a (cm ⁻¹)	Σ_t (cm ⁻¹)	σ_t (b)	σ_a (b)	Σ_a (cm ⁻¹)	Σ_t (cm ⁻¹)
U	234.04	19.1	116	103	5.70	5.07	8.02	0.363	0.394	0.0178
U	235.04	19.1	703	96.9	34.3	4.74	6.84	0.117	0.335	0.0057
U	236.05	19.1	13.3	5.16	0.648	0.251	7.73	0.363	0.377	0.177
U	237.05	19.1	487.5	476.4	23.6	23.1	6.72	0.135	0.326	0.0066
U	238.05	19.1	11.63	2.71	0.562	0.131	7.10	0.123	0.343	0.0059
Nat U	238.05	19.1	16.49	3.39	0.797	0.1637	7.01	0.120	0.343	0.0058
Nat W	183.85	19.3	23.08	18.05	1.459	1.141	6.95	0.057	0.439	0.0036
CH ₂	14	0.94			2.68	0.027			0.449	0.000
H ₂ O	18	1.0			2.18	0.022			0.560	0.000
D ₂ O	20	1.1			0.410	0.000			0.420	0.000
Average Fission Products of:										
²³⁵ U	117		4496	4486			7.43	0.0004		
²³⁹ Pu	119		2087	2086			7.48	0.0009		

2.1.4 ระบบผลิตนิวตรอนช้า

นิวตรอนที่ผลิตได้มาจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ เครื่องเร่งอนุภาคหรือไอโซโทปรังสีจะเป็นนิวตรอนที่มีพลังงานสูง (Fast neutron) ที่มีช่วงพลังงานอยู่ที่ 2 MeV ถึง 14 MeV แต่ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะใช้นิวตรอนช้าที่มีช่วงพลังงานอยู่ที่ 0.01 eV ถึง 100 keV ดังนั้นจึงต้องทำการลดพลังงานของนิวตรอนให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพ โดยใช้ตัวหน่วงนิวตรอน (Neutron moderator) เป็นตัวลดพลังงานของนิวตรอน เช่น น้ำมวลหนัก กราไฟต์ พาราฟิน โพลีเอทีลีน เป็นต้น ซึ่งจะประกอบเป็นชิ้นส่วนเดียวกันกับท่อที่ใช้ลำเลียงนิวตรอนหรือที่เรียกว่า นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator) นิวตรอนเร็วที่ปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดนิวตรอนถูกลดพลังงานลงโดยการชนกับตัวหน่วงนิวตรอน จะทำให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน (Peak thermal neutron flux) ในตัวหน่วง นิวตรอนลดลงประมาณ 50 ถึง 500 เท่าของอัตราการผลิตนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิด อัตราส่วนการลดลงของความเข้มข้นนิวตรอนนี้เรียกว่า “เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ (Thermalization factor)”

$$\text{เทอร์มัล ไลเซชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน (n/s)}}{\text{เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุดในสารหน่วงนิวตรอน (n/cm}^2\cdot\text{s)}}$$

ค่าเทอร์มัล ไลเซชันแฟกเตอร์ขึ้นกับปัจจัยต่อไปนี้

(1) ชนิดของต้นกำเนิดนิวตรอน

ต้นกำเนิดนิวตรอนเร็วต่างชนิดกันจะปลดปล่อยนิวตรอนเร็วที่มีพลังงานต่างกัน ในสารหน่วงนิวตรอนชนิดเดียวกันต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าจะให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนสูงกว่าเมื่อมีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเท่ากัน

(2) ชนิดของสารหน่วงนิวตรอน

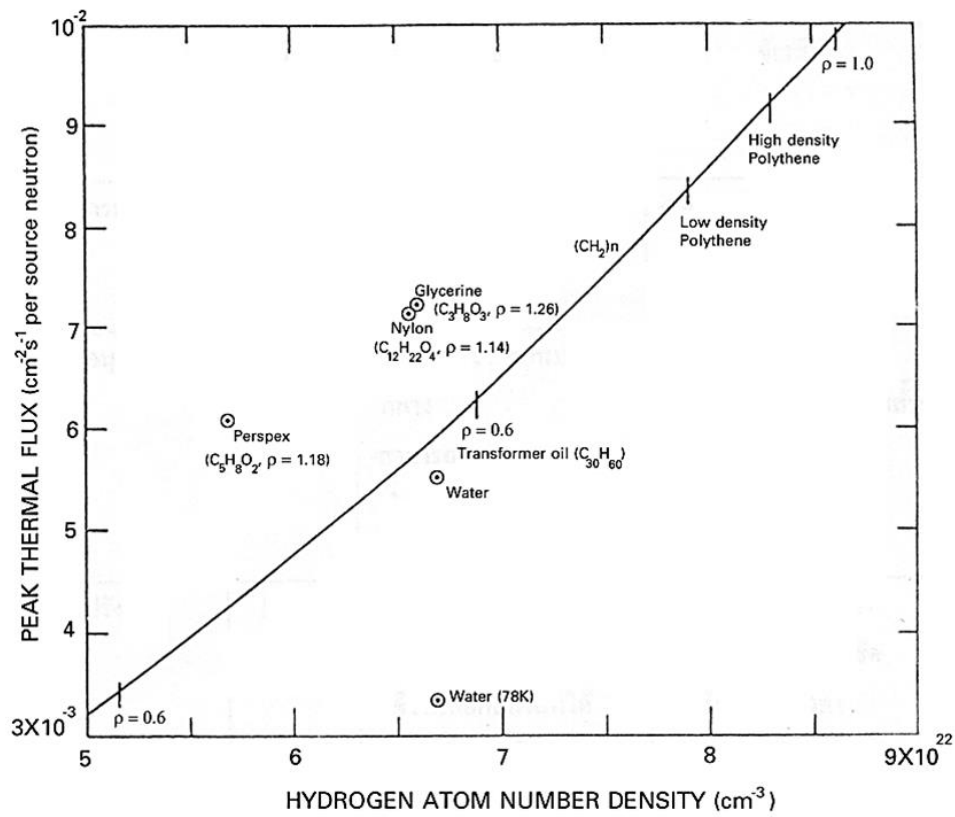
ธาตุที่สามารถหน่วงพลังงานนิวตรอนได้ดีที่สุดคือ ไฮโดรเจน ดังนั้นสารหน่วงนิวตรอนที่เป็นสารประกอบไฮโดรเจน ที่มีความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนสูง จะให้ความเข้มข้นสูงสุดของนิวตรอนช้าสูงกว่า

ตารางที่ 2.3 ค่าเทอร์มัล ไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด^[6]

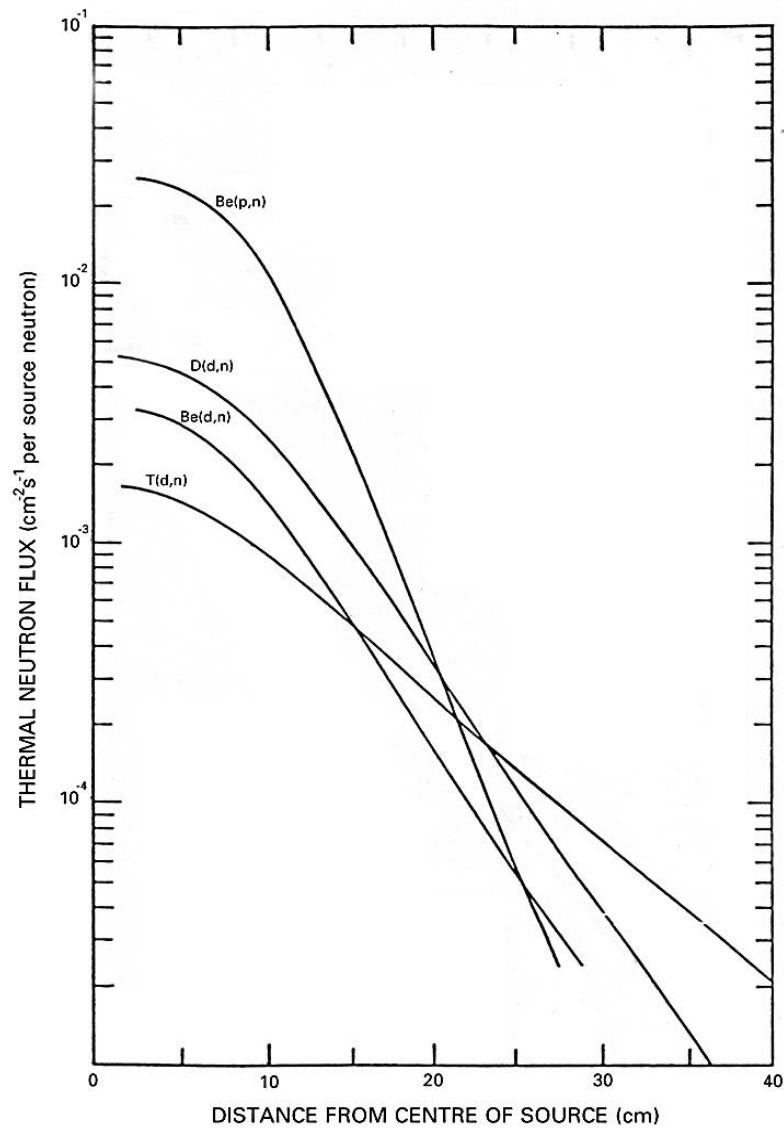
พลังงานนิวตรอน	ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน	เทอร์มาไลเซชันแฟกเตอร์
0.024 MeV	¹²⁴ Sb-Be	⁹ Be(γ, n)Be	50
2 MeV	²⁵² Cf	self-fission	100
4.5 MeV	²⁴¹ Am-Be	⁹ Be(α, n) ¹² C	200
6.5 MeV*	เครื่องเร่งอนุภาค	⁹ Be(d, n) ¹⁰ B	300
14 MeV**	เครื่องเร่งอนุภาค	³ T(d, n) ⁴ He	650

หมายเหตุ *เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 2.8 MeV

**เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 150 MeV

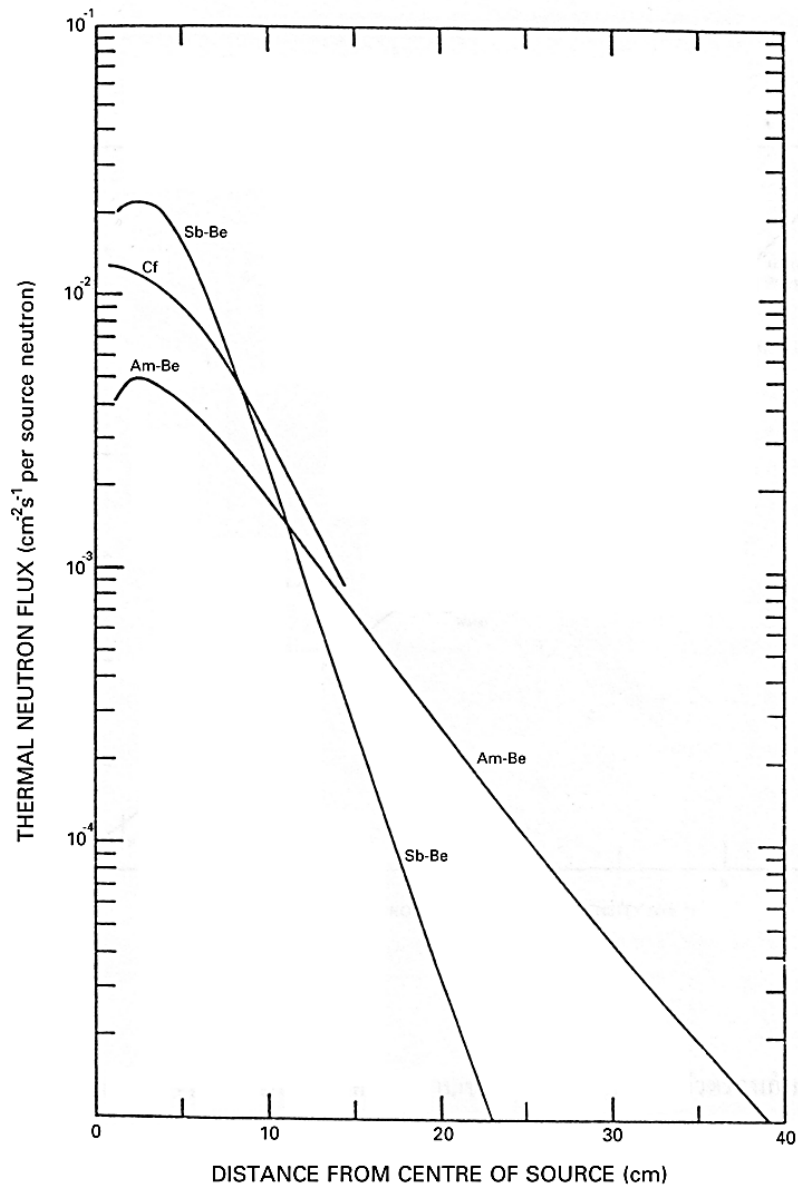


รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนกับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนของตัวหน่วงนิวตรอน^[10]



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 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่ง
อนุภาค^[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 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์^[10]

2.1.5 ต้นกำเนิดนิวตรอน

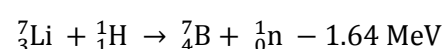
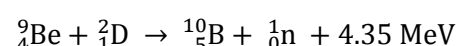
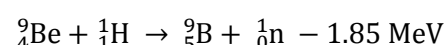
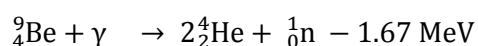
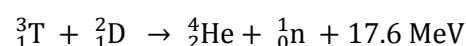
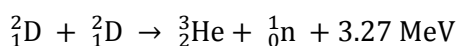
ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (Neutron source) แบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear Research reactor) เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) และไอโซโทปรังสี (Radioisotope neutron source)

2.1.5.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย

คืออุปกรณ์ผลิตความร้อนชนิดหนึ่งที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาฟิชชันแล้วมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของพลังงานความร้อน และคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความถี่ต่างๆโดยอาศัยการปฏิกิริยาการแตกตัวของเม็ดเชื้อเพลิงที่เป็นยูเรเนียม-235 ทำอันตรกิริยากับนิวตรอนช้าแล้วมีการปล่อยนิวตรอนเร็วประมาณ 2-3 ตัว ที่นิวตรอนแต่ละตัวมีค่าพลังงานประมาณ 2 MeV แล้วถูกลดพลังงานลงให้เป็นนิวตรอนช้าโดย น้ำมวลหนัก น้ำมวลเบา หรือ กราไฟต์ ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องปฏิกรณ์ เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มของกระแสนิวตรอนสูงสุดในช่วง 10^{10} - 10^{14} n/cm²·s และยังเป็นแหล่งกำเนิดที่ดี และเหมาะสมกับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพราะสามารถผลิตนิวตรอนช้าที่มีความเข้มของกระแสนิวตรอนที่ 10^5 - 10^8 n/cm²·s จึงทำให้ระยะเวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนช้าสั้นและยังให้ความคมชัดของภาพ (Image sharpness) ออกมาดีมาก

2.1.5.2 เครื่องเร่งอนุภาค

เป็นเครื่องผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ โดยการเร่งอนุภาคหรือนิวเคลียสชนิดหนึ่งให้มีพลังงานสูง แล้วให้ไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่งที่เป็นเป้า (Target) แล้วทำให้เกิดการปลดปล่อยนิวตรอนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาออกมา ปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่



เครื่องเร่งอนุภาคจะให้ความเข้มของกระแสนิวตรอนน้อยกว่าเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ และมีข้อด้อยในเรื่องความคงที่ของกระแสนิวตรอนที่ผลิตออกมา ต้องมีการเปลี่ยนเป้าตามอายุการใช้งาน

จึงทำให้ได้ภาพที่ถ่ายออกมามีคุณภาพน้อยกว่าการใช้เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอน

2.1.5.3 ต้นกำเนิดแบบไอโซโทปรังสี

แหล่งกำเนิดนิวตรอนที่เป็นแบบไอโซโทปรังสีที่สามารถแบ่งเป็นปฏิกิริยา 3 ประเภทคือ

(1) ประเภท (α , n)

เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตจากปฏิกิริยา (α , n) ด้วยการสลายตัวของไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เช่น พอลอเนียม-210 (^{210}Po) เรเดียม-226 (^{226}Ra) พลูโทเนียม-238 (^{238}Pu) อะเมริเชียม-241 (^{241}Am) โดยจะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 4-6 MeV เมื่อผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำบางชนิด เช่น เบริลเลียม และ โบรอน โดยเฉพาะเบริลเลียม-9 เป็นไอโซโทปของเบริลเลียมที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV โดยทั่วไปจึงนิยมใช้เบริลเลียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้น คือ $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้มีค่าประมาณ 2.2×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของธาตุกัมมันตรังสี ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α , n) บางไอโซโทป แสดงในตารางที่ 2.4

(2) ประเภท (γ , n)

เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตจากปฏิกิริยา (γ , n) โดยการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV ผสมกับเบริลเลียม-9 เมื่อรังสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบริลเลียมจะมีนิวตรอนหลุดออกมา โดยปกติใช้พลวง-124 (Antimony-124; ^{124}Sb) ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.70 MeV ผสมกับเบริลเลียม อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสี ^{124}Sb -Be ประมาณ 1.3×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี ของ ^{124}Sb ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้กันมากนักเนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมาก และมีค่าครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน แต่สามารถผลิตได้ง่ายจากการนำ ^{123}Sb ไปอบรังสีนิวตรอนในเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เพื่อผลิต ^{124}Sb จากปฏิกิริยา $^{123}\text{Sb}(n, \gamma)^{124}\text{Sb}$

(3) ประเภทแตกตัวเอง (Self-fission หรือ Spontaneous fission)

ต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ได้แก่ ธาตุหนักบางชนิดตั้งแต่ ทอเรียม ขึ้นไป ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง ลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ และต่อเนื่อง ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะให้นิวตรอนออกมา 2-3 ตัว เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252; ^{252}Cf)

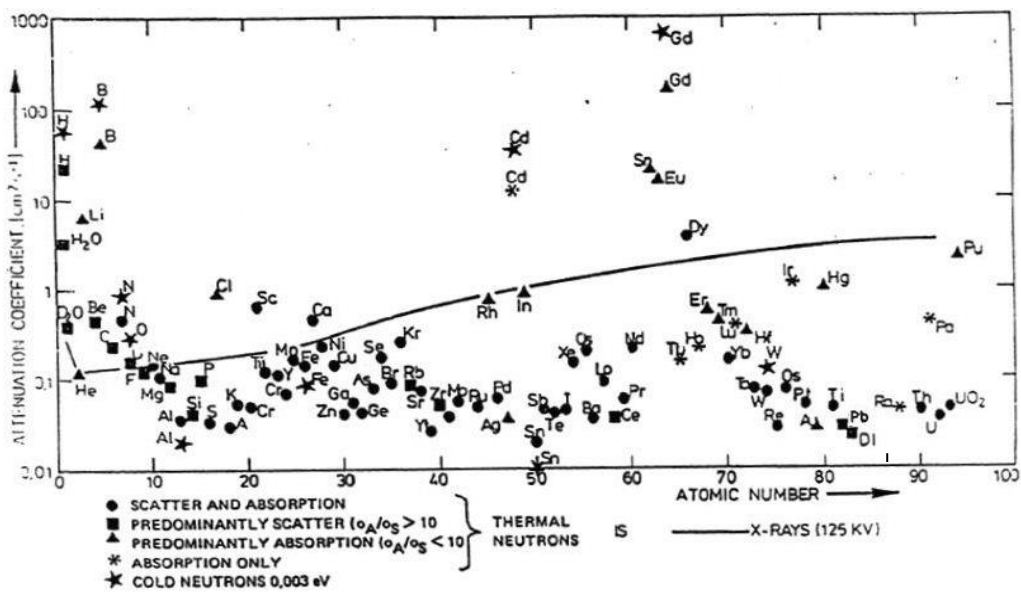
ซึ่งมีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 มีค่าประมาณ 4.3×10^9 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี หรือประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี ต่อแคลิฟอร์เนียม-252 จำนวน 1 กรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภท (γ, n) และ (α, n)

ตารางที่ 2.4 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงลิ^[6,7]

ต้นกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต	ปฏิกิริยา	นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรี	พลังงานของนิวตรอน
²⁴¹ Am-Be	458 ปี	α, n	2.2×10^6	4 MeV
²⁵² Cf	2.65 ปี	Self-fission	4.3×10^9	2.3 MeV

2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron Radiography)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้นจะอาศัยหลักการส่งผ่านนิวตรอนผ่านเข้าไปในชิ้นงานที่สนใจแล้วบันทึกความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกมา โดยที่ความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกมามีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของชนิดของวัสดุที่นำมาถ่ายภาพซึ่งเป็นหลักการเดียวกันกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของวัสดุที่นำมาถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมานั้นจะแปรผันตามเลขอะตอมของธาตุ นั้นหมายความว่ายิ่งวัสดุที่นำมาถ่ายภาพมีองค์ประกอบของธาตุที่มีเลขอะตอมมาก ความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านออกจากวัสดุก็จะมีค่าความเข้มน้อยเนื่องจากพลังงานของรังสีได้ถูกลดทอนลงไปในเนื้อของวัสดุ แต่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนนั้นค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนของธาตุในวัสดุจะไม่แปรตามเลขอะตอมของธาตุ เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุจึงทำให้อันตรกิริยาของอนุภาคนิวตรอนที่ส่งผ่านไปยังเนื้อวัสดุเกิดขึ้นนิวเคลียสของอะตอม ซึ่งจะต่างกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา โดยที่อันตรกิริยาของรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาจะเกิดขึ้นที่ชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนจึงทำให้การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแตกต่างจากการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ทำให้ได้ภาพถ่ายออกมาเป็นธาตุต่างชนิดที่แปรตามค่าสัมประสิทธิ์การลดทอน และความหนาของวัสดุ

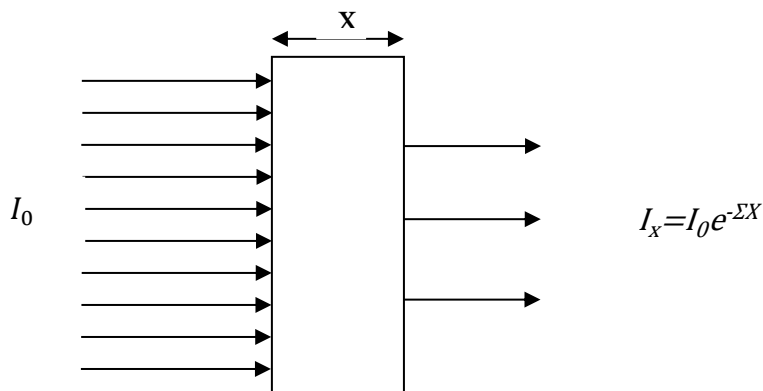


รูปที่ 2.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของรังสีเอกซ์พลังงาน 125 MeV และ นิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV กับเลขอะตอมของธาตุ^[5]

2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน (Neutron radiography)

ความเข้มของนิวตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านวัสดุขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่าน และความหนาของวัสดุตามสมการ

$$I_x = I_0 e^{-\Sigma X} \tag{2.8}$$



รูปที่ 2.7 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เมื่อ I_x คือความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุโดยไม่เกิดอันตรกิริยา

I_0 คือความเข้มของนิวตรอนก่อนเคลื่อนผ่านวัสดุ

Σ คือสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านวัสดุของนิวตรอนที่พลังงานต่าง มีหน่วยเป็นต่อ

เซนติเมตร (1/cm)

X คือค่าความหนาของวัสดุมีหน่วยเป็นเซนติเมตร

ค่า Σ เรียกว่า ค่าตัดภาคตัดขวางมหภาค (Macroscopic cross section) ของวัสดุต่อนิวตรอน ซึ่ง Σ จะมีค่าเฉพาะของแต่ละไอโซโทปที่อยู่ในธาตุหรือวัสดุเหล่านั้น และค่า Σ ของแต่ละไอโซโทปสามารถหาได้จากสมการ

$$\Sigma = N\sigma \quad (2.9)$$

เมื่อ N คือ ความหนาแน่นจำนวนอะตอมของไอโซโทปมีหน่วยเป็น อะตอม/ ซม³

σ คือ ค่าภาคตัดขวางจุลภาค (microscopic cross section) ของอะตอมของแต่ละไอโซโทป มีหน่วยเป็น บาร์น (barn, b) โดยที่ 1 บาร์นเท่ากับ 10^{-24} ตารางเซนติเมตร

2.2.2 อุปกรณ์ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

อุปกรณ์การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนร่วมกับอุปกรณ์รับภาพที่เป็นกล้องดิจิตอลจะประกอบไปด้วยระบบที่สำคัญ 5 ส่วนด้วยกัน คือ

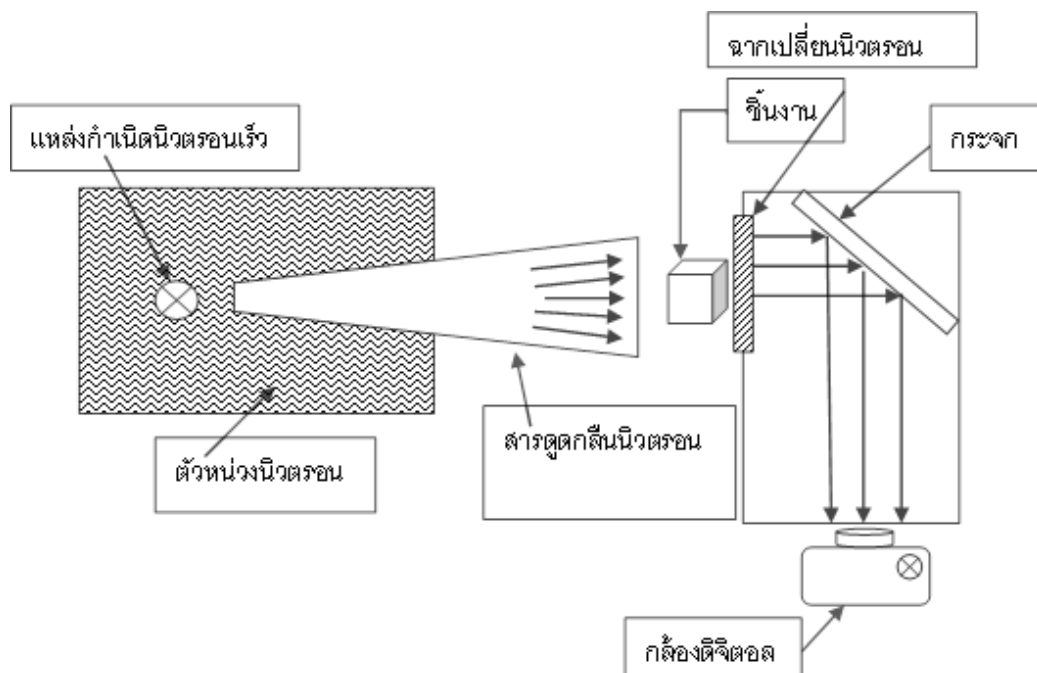
(1) ระบบผลิตนิวตรอนช้า จะต้องเป็นแหล่งกำเนิดนิวตรอนเร็วเช่น เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยหรือไอโซโทปรังสี

(2) ระบบนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator) ทำหน้าที่ลำเลียงนิวตรอนจากระบบแหล่งพลังงานนิวตรอนเร็ว พร้อมกับทำหน้าที่ดูดจับนิวตรอน และลดการกระเจิงของนิวตรอนเข้ากลับไปในคอลลิเมเตอร์

(3) ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron convertor screen) ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุให้เป็นแสงหรืออนุภาครังสีที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพหรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกภาพ

(4) อุปกรณ์รับภาพ ทำหน้าที่บันทึกภาพหรือแสดงภาพที่สอดคล้องกับความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านวัสดุออกมา เช่น ฟิล์มหรือกล้องดิจิตอล

(5) กระจกทำหน้าที่สะท้อนภาพที่เกิดจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนไปยังอุปกรณ์รับภาพที่เป็นกล้องดิจิตอล โดยที่ฉากเปลี่ยนนิวตรอน อุปกรณ์รับภาพ และกระจกจะประกอบเข้ากับกล่องที่ภายในมีดีเพื่อป้องกันแสงจากภายนอกไปรบกวนภาพที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2.8 การวางระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนพร้อมกับระบบรับภาพ

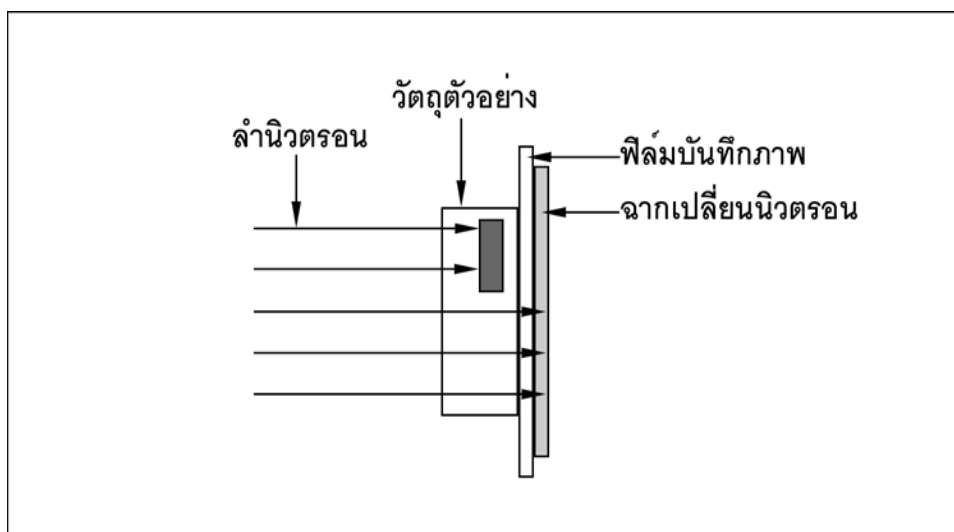
2.2.3 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแยกตามวิธีการในการบันทึกภาพได้ 3 วิธีใหญ่ ๆ ดังนี้

2.2.3.1 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง (Direct technique)

เป็นการถ่ายภาพโดยการประกอบฉากเปลี่ยนนิวตรอนเข้ากับฟิล์มบันทึกภาพ แล้วนำไปจัดวางที่หน้าแหล่งกำเนิดนิวตรอน โดยมีวัตถุประสงค์ที่ต้องการทดสอบวางไว้หน้าฟิล์มบันทึกภาพ ดังรูปที่

2.9



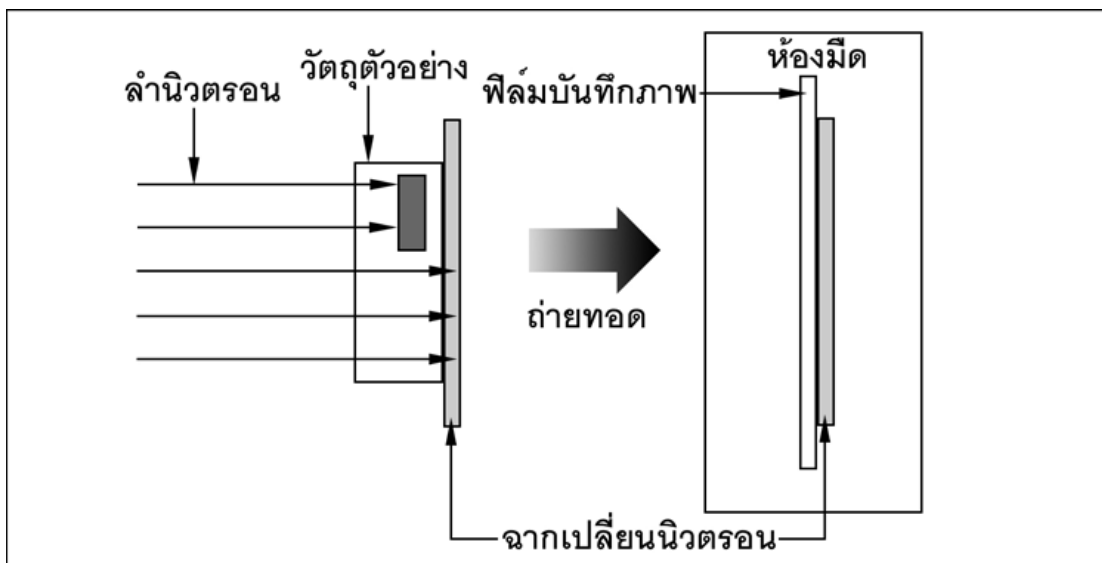
รูปที่ 2.9 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรง

เมื่อลำรังสีนิวตรอนเคลื่อนที่ไปจนกระทบฉากเปลี่ยนนิวตรอน จะปลดปล่อยอนุภาคหรือแสงออกมาทันที ทำให้เกิดภาพแฝง (Latent image) บนแผ่นฟิล์ม ฉากที่นิยมใช้ในการถ่ายภาพโดยเทคนิคถ่ายตรง ได้แก่ ฉากโลหะแกโดลิเนียม (Gd) ฉากโลหะแคดเมียม (Cd) และฉากเรืองแสง (Scintillation converter screen)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายตรงมี ข้อจำกัดในกรณีที่ต้องการถ่ายภาพวัตถุที่มีกัมมันตภาพรังสีหรือในตำแหน่งที่ทำการถ่ายภาพมีรังสีแกมมาปะปนสูง ความเข้มของรังสีแกมมาจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้ฟิล์มจู่ มีผลทำให้ความเปรียบต่าง และความคมชัดของภาพลดลง

2.2.3.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด (Transfer technique)

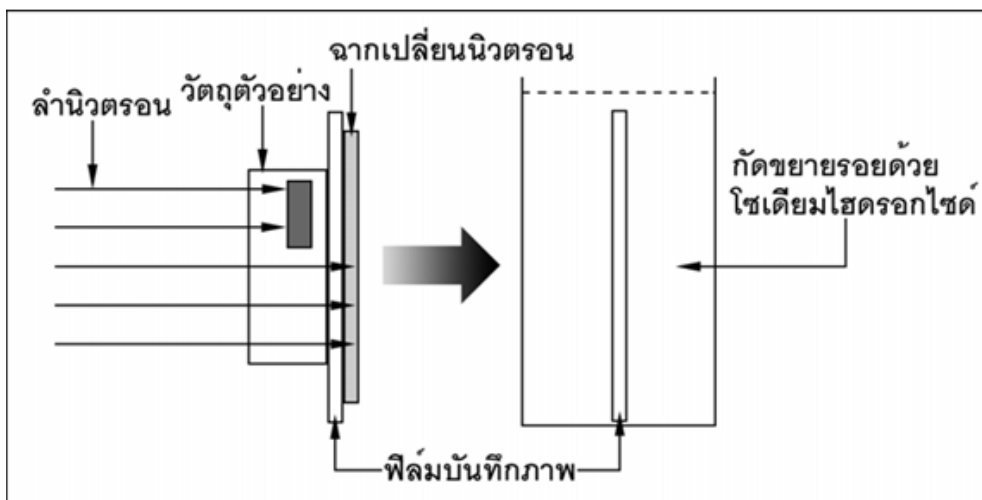
การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด จะมีเพียงฉากเปลี่ยนนิวตรอนเท่านั้นที่จะรับลำรังสีนิวตรอนโดยตรง โดยจัดวางฉากเปลี่ยนนิวตรอนให้อยู่ในแนวของลำรังสี เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับฉากเปลี่ยนนิวตรอนจะปลดปล่อยกัมมันตภาพรังสีที่มีครึ่งชีวิตนานออกมา ซึ่งได้แก่ ฉากโลหะดิสโพรเซียม (Dy) ฉากโลหะอินเดียม (In) และฉากโลหะทอง (Au) เป็นต้น ส่วนการบันทึกภาพจะใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ชนิดความเร็วสูง (High speed film) เนื่องจากรังสีที่ปลดปล่อยออกจากฉากโลหะแต่ละชนิดมีค่าครึ่งชีวิตตามแต่ละไอโซโทป การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีนี้มีประโยชน์ในการถ่ายภาพวัตถุที่มีกัมมันตภาพรังสีเช่น ดันกำเนิดรังสีต่างๆ เชื้อเพลิงนิวเคลียร์ และสามารถถ่ายภาพในบริเวณที่มีปริมาณรังสีแกมมาสูงได้ เนื่องจากฉากเปลี่ยนนิวตรอนไม่เกิดปฏิกิริยากับรังสีแกมมา



รูปที่ 2.10 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายทอด

2.2.3.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ (Track-etch technique)

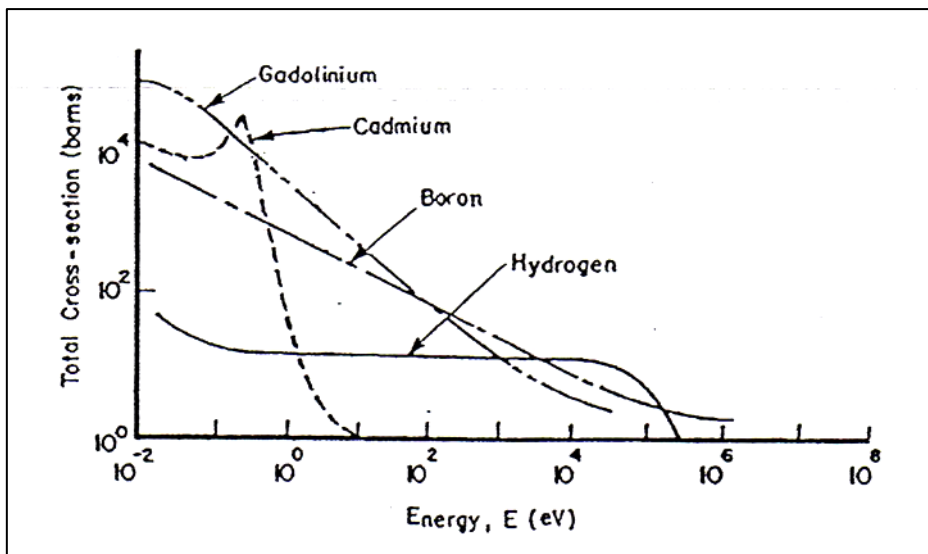
การถ่ายภาพโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ จะอาศัยไอออน (อนุภาคมีประจุ) พลังงานสูงวิ่งผ่านวัสดุบาง เช่น ไมกาแก้ว และพลาสติก ซึ่งจะทำให้วัสดุนั้นๆ เกิดรอย (Track) จากนั้นนำวัสดุบางไปกัดขยายรอย (Etching) ด้วยสารละลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นรอยชัดเจนขึ้น การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ใช้จากเปลี่ยนนิวตรอนที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา ส่วนฟิล์มบันทึกภาพจะใช้ฟิล์มพลาสติกชนิด ฟิล์มไนโตรเซลลูโลส หรือ ฟิล์มโพลีคาร์บอเนต เป็นต้น ซึ่งการกัดขยายของรอยของฟิล์มชนิดไนโตรเซลลูโลส หรือ ฟิล์มโพลีคาร์บอเนต จะจุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เช่นจุ่มลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 45 -50 นาที ข้อดีของฟิล์มบันทึกภาพที่ใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตช์ คือไม่ไวต่อรังสีแกมมา จึงสามารถนำไปถ่ายภาพในบริเวณที่มีกัมมันตภาพรังสีหรือถ่ายภาพในบริเวณที่มีรังสีแกมมาสูงได้ และยังสามารถอ่านฟิล์ม และบันทึกภาพได้หลายระดับโดยล้างการฟิล์มเดิมซ้ำๆ



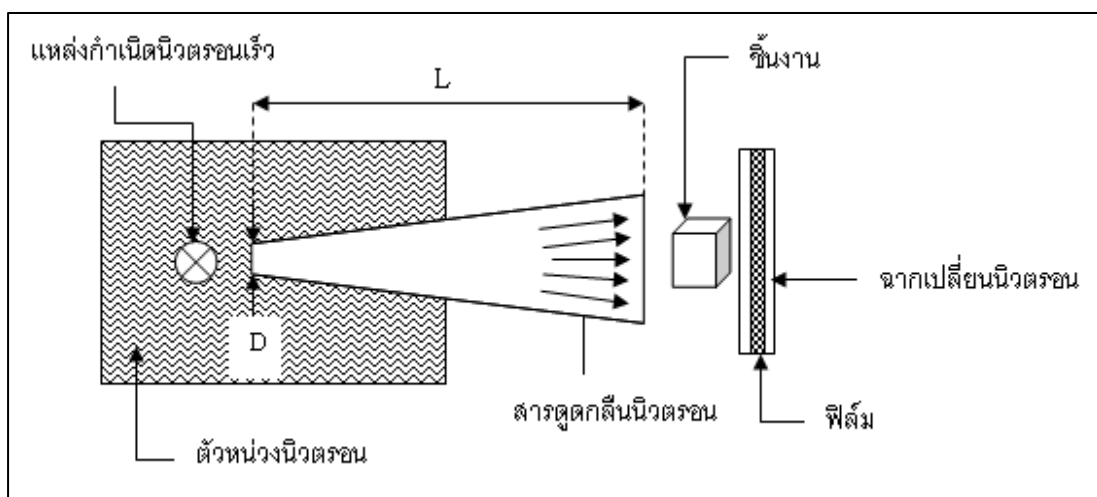
รูปที่ 2.11 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์

2.3 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron collimator)

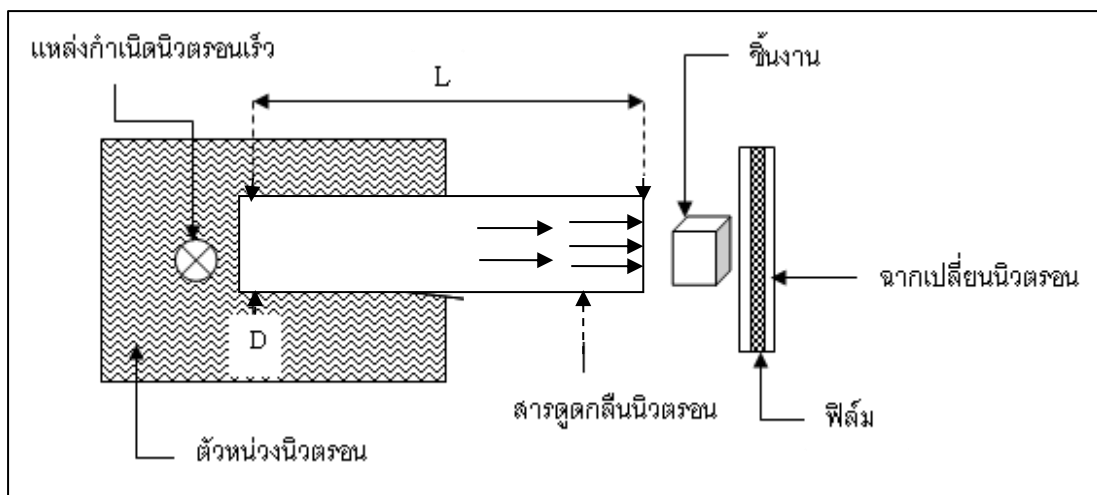
การที่จะนำนิวตรอนออกมาจากระบบห่วงพลังงานของนิวตรอนเร็วได้นั้นจะต้องมีระบบที่ทำหน้าที่ลำเลียงกระแสนิวตรอนเพื่อออกมาใช้ถ่ายภาพ ซึ่งก็คือ คอลลิเมเตอร์ ที่ผนังชั้นในของคอลลิเมเตอร์จะผสมสารที่ทำหน้าที่ดูดจับนิวตรอนที่แตกต่างกันไปดังแสดงในรูปที่ 2.12 เพื่อบังคับไม่ให้นิวตรอนเข้ามาที่คอลลิเมเตอร์ทางด้านข้าง และป้องกันไม่ให้นิวตรอนกระเจิงกลับเข้าไปในคอลลิเมเตอร์ ซึ่งสารที่ทำหน้าที่ดูดจับนิวตรอนได้แก่ ลิเทียม โบรอน แกโดลิเนียม และแคดเมียม ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่นิยมใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะเป็นแบบ ไดเวอร์เจนต์คอลลิเมเตอร์ (Divergent collimator) ที่มีลักษณะเป็นรูปทรงกรวยที่ปลายด้านหนึ่งจะอยู่ในระบบห่วงนิวตรอน และมีพื้นที่หน้าตัดเล็กกว่าด้านที่อยู่ใกล้ชิ้นงาน โดยมีพื้นที่หน้าตัดเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส สี่เหลี่ยมผืนผ้าหรือวงกลมดังแสดงในรูป 2.13



รูปที่ 2.12 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และไฮโดรเจน^[9]



รูปที่ 2.13 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยคอลลิเมเตอร์แบบไควเวอร์เจนต์



รูปที่ 2.14 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยคอลลิเมเตอร์แบบขนาน

นิวตรอนฟลักซ์ (ϕ) ที่ปลายท่อบังคับลำนิวตรอนตรงตำแหน่ง
 ซึ้นงานสามารถคำนวณได้จาก

$$\phi = \frac{\phi_0 A}{4\pi L^2} \quad (2.10)^{[5]}$$

เมื่อ A คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นทางที่นิวตรอนเข้า
 คอลลิเมเตอร์

สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่มีหน้าตัดแบบวงกลม

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.11)^{[5]}$$

ดังนั้นสมการ (2.10) สามารถเขียนได้เป็น

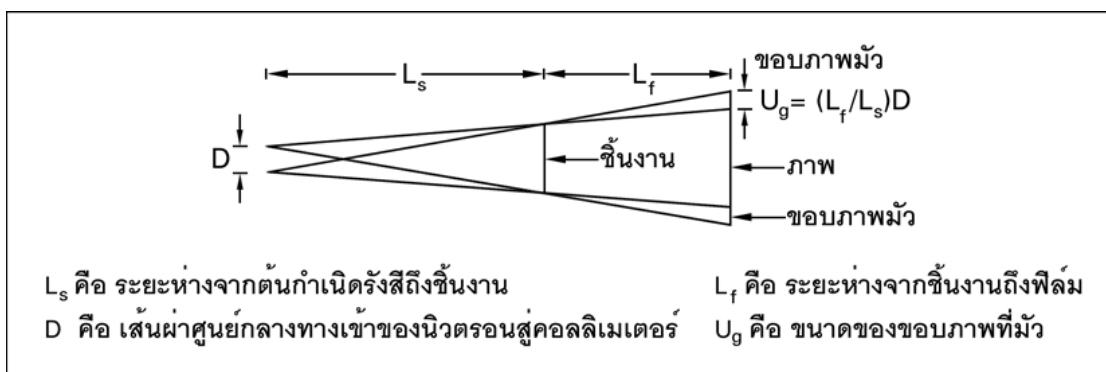
$$\phi = \frac{\phi_0 D^2}{16L^2} = \frac{\phi_0}{16} \left(\frac{D}{L}\right)^2 \quad (2.12)^{[5]}$$

L/D เรียกว่า อัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ (Collimator ratio) เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะของ
 แต่ละคอลลิเมเตอร์

อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทางเข้า และทางออกของคอลลิเมเตอร์ เป็น

$$\frac{\text{Flux at entrance}}{\text{Flux at exit}} = \frac{\phi_0}{\phi} = 16 \left(\frac{D}{L}\right)^2 \quad (2.13)^{[5]}$$

จากสมการ (2.13) เมื่อคอลลิเมเตอร์มีความยาว (L) เพิ่มขึ้น และขนาดของทางเข้า (D) ลดลงจะได้ค่านิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกของคอลลิเมเตอร์ลดลง ซึ่งในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ระยะเวลาสั้น จำเป็นต้องให้นิวตรอนฟลักซ์ที่มีค่าสูง ซึ่งสามารถทำได้โดยลดความยาวของคอลลิเมเตอร์ และเพิ่มขนาดทางเข้าของนิวตรอน แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ความคมชัดของภาพถ่ายลดลง



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน^[5]

จากรูปที่ 2.15 จะได้

$$U_g = \frac{D}{L_s} L_f \quad (2.16)^{[5]}$$

โดยทั่วไปจะวางชิ้นงานติดกับฟิล์มจึงทำให้ $L_f \gg L_s$ และ $L_s \approx L$ ดังนั้นสมการ...เขียนใหม่ได้

$$U_g = \left(\frac{D}{L}\right) L_f \quad (2.17)^{[5]}$$

จากสมการนี้จะได้ว่า อัตราส่วนของคอลลิเมเตอร์ L/D มีผลต่อขนาดขอบภาพที่มัว ยิ่งอัตราส่วนของคอลลิเมเตอร์มีค่ามากจะทำให้ภาพที่ถ่ายออกมามีความคมมากยิ่งขึ้นสามารถทำได้ โดยการเพิ่มความยาวของคอลลิเมเตอร์ (L) หรือ ลดขนาดของทางเข้าของลำนิวตรอน (D) ซึ่งทั้งสองตัวแปรนี้จะมีผลต่อนิวตรอนฟลักซ์ที่ออกมาปริมาณลดลง จึงทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น และในทางตรงกันข้ามภาพถ่ายจะมัวมากขึ้นเมื่ออัตราส่วนของคอลลิเมเตอร์มีค่าน้อยลง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะจัดวางตำแหน่งของวัตถุให้ชิดกับฉากรับภาพ ซึ่งจะสามารถลดปัญหาภาพมัวที่ขอบได้

กรณีถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนต่ำ คือ ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปปรังสี และอัตราส่วนของ L/D มีค่าต่ำกว่า 30 จะส่งผลให้ความคมชัดของภาพไม่ดี

เนื่องจากถ้าเพิ่มความยาวของคอลลิเมเตอร์ (L) จะทำให้ความเข้มของนิวตรอนที่ปลายคอลลิเมเตอร์ด้านที่ติดกับชิ้นงานลดลง อย่างไรก็ดี ถ้าส่วนของคอลลิเมเตอร์ด้านใกล้ต้นกำเนิดรังสีทำด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นตัวหน่วงนิวตรอน เช่น พาราฟิน โพลีเอทีลีน ฯลฯ โดยไม่มีส่วนผสมของสารดูดกลืนนิวตรอน เหมือนกับส่วนอื่นๆ จะทำให้ความเข้มของนิวตรอนที่ปลายคอลลิเมเตอร์ด้านที่ติดกับชิ้นงานเพิ่มขึ้นจากที่คำนวณจากสมการ (2.12) เป็น

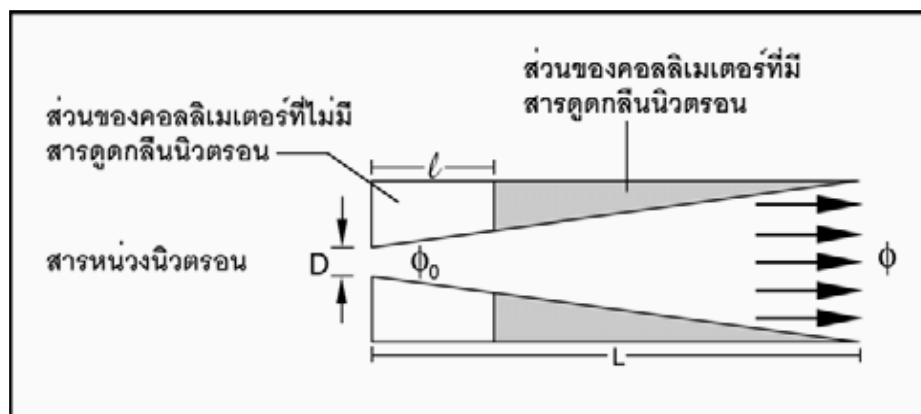
$$\phi = \left[\frac{\phi_0}{16(L/D)^2} \right] \left[1 + \frac{2L}{L} \right] \quad (2.18)^{[12]}$$

เมื่อ l คือ ความยาวของคอลลิเมเตอร์ส่วนที่ไม่มีสารดูดกลืนนิวตรอน

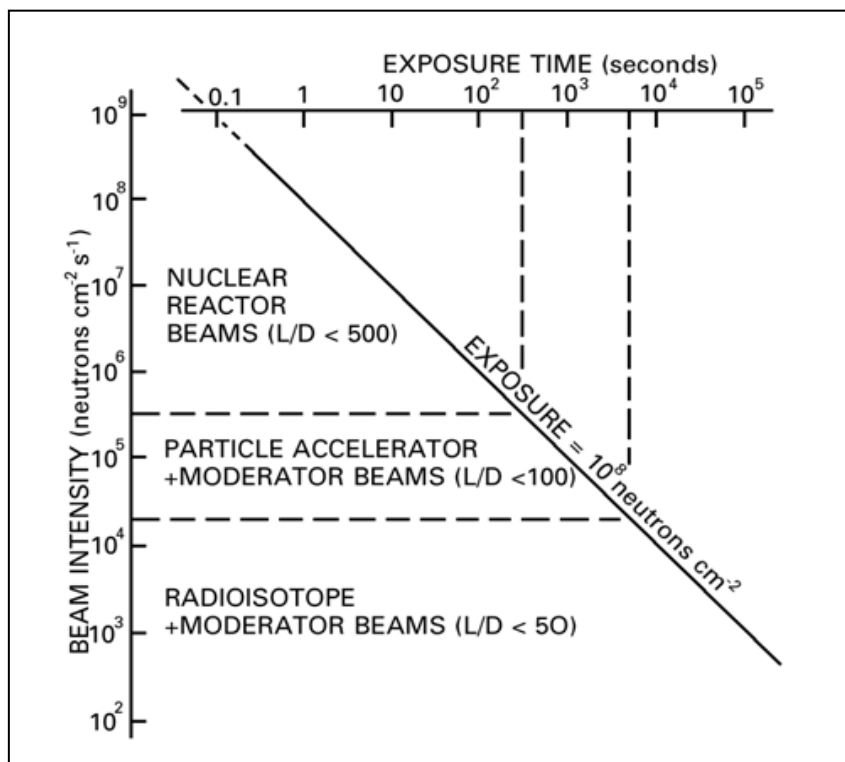
ถ้า l มีค่าเป็น 2 เท่าของ D สมการ (2.18) จะเปลี่ยนเป็น

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

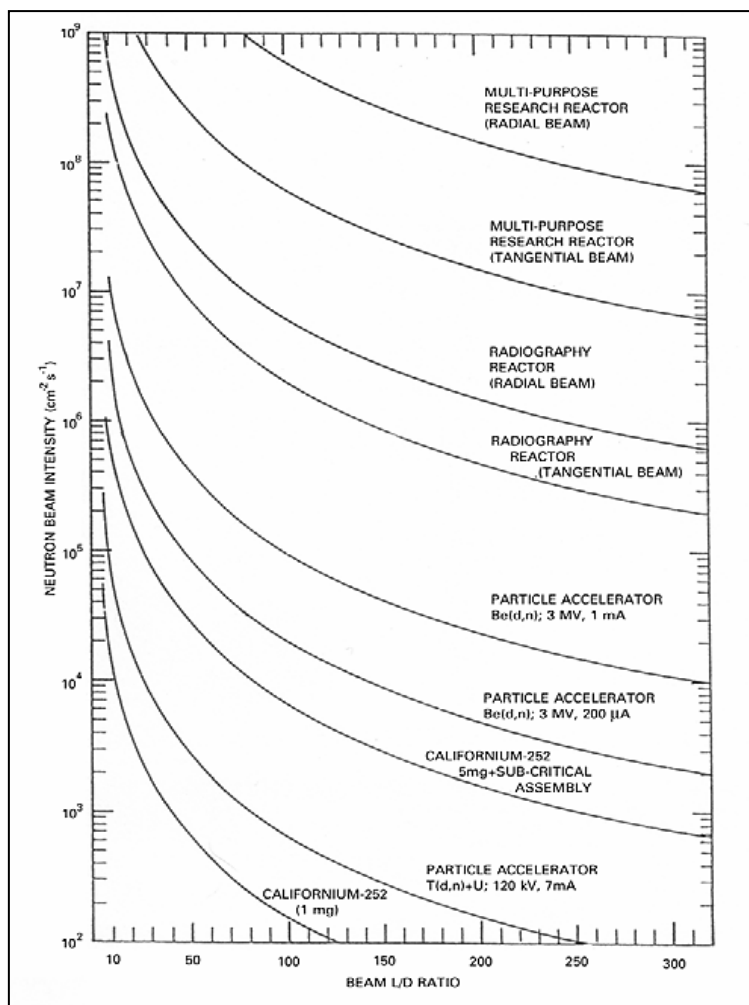
$$\phi = \frac{\phi_0}{16} \left[\left(\frac{D}{L} \right)^2 + 4 \left(\frac{D}{L} \right)^3 \right] \quad (2.19)$$



รูปที่ 2.16 ลักษณะของคอลลิเมเตอร์ที่ใช้สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี^[12]



รูปที่ 2.17 ความเข้มของนิวตรอน อัตราส่วน L/D และเวลาในการถ่ายภาพของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทต่าง ๆ^[5]



รูปที่ 2.18 ความเข้มของนิวตรอน และค่า L/D ของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบต่างค่าเบอรั่มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิดๆ^[9]

2.4 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron convertor screen)

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุจึงทำให้การบันทึกภาพไม่สามารถทำได้ เนื่องจากนิวตรอนไม่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มดังนั้นจึงต้องมีฉากเปลี่ยนนิวตรอนเพื่อเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นแสงหรือรังสีที่เหมาะสมกับการภาพ และอุปกรณ์ที่จะนำมาบันทึกภาพ ซึ่งสามารถแบ่งฉากเปลี่ยนนิวตรอนออกเป็น 3 ประเภทคือ

1. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดโลหะ (Metallic foil neutron convertor screen)
2. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปล่อยแสง (Light emitting neutron convertor screen)
3. ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดฟิล์มแทรค-เอตช์ (Neutron convertor screen for track-etch)

2.4.1 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดนี้จะเป็นแผ่นโลหะที่มีภาคตัดขวางดูดกลืนนิวตรอนสูงเมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับนิวเคลียสของธาตุแล้วจะปลดปล่อยอนุภาคหรือรังสีในรูปของอนุภาคบีตา รังสีแกมมา อิเล็กตรอน โดยมีปฏิกิริยาที่สำคัญสำหรับฉากชนิดนี้คือ ปฏิกิริยา (n,γ) ซึ่งฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดโลหะสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิดคือ

2.4.1.1 ฉากโลหะชนิดที่ให้รังสีออกมาทันที (Prompt radiation)

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

สำหรับฉากโลหะแคดเมียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^{113}\text{Cd}(n, \gamma) ^{114}\text{Cd}$ และมีภาคตัดขวางนิวตรอนประมาณ 20,000 บาร์น เมื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอนจะให้รังสีแกมมาทันที และมีพลังงานประมาณ 550 - 1300 keV ออกมาทันที และได้ ^{114}Cd ซึ่งเป็นไอโซโทปที่เสถียร

2.4.1.2 ฉากชนิดที่ให้รังสีออกมาจากการสลายตัว

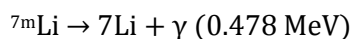
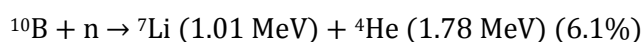
ฉากโลหะชนิดนี้เป็นธาตุเมื่อนำไปทำปฏิกิริยากับนิวตรอนจะเกิดเป็นไอโซโทปรังสี รังสีและอนุภาคที่เกิดขึ้นจากการสลายตัวจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ด้วยเหตุนี้ฉากชนิดนี้จึงสามารถใช้ในการถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอดได้ด้วย กล่าวคือ สามารถถ่ายภาพชิ้นงานโดยนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนประกบกับชิ้นงานก่อน แล้วจึงนำฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่มีรังสีไปประกบฟิล์มในภายหลัง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

ฉากดิสโพรเซียมเป็นฉากที่ดีที่สุดสำหรับการถ่ายภาพด้วยวิธีถ่ายทอด ไอโซโทปดิสโพรเซียม-164 (^{164}Dy) มีภาคตัดขวางสำหรับปฏิกิริยา (n, γ) เท่ากับ 800 และ 2,000 บาร์น

สำหรับผลผลิตที่ได้คือ ดิสโพรเซียม-165 (^{165}Dy) และดิสโพรเซียม-165m ($^{165\text{m}}\text{Dy}$) มีครึ่งชีวิต 2.3 ชั่วโมง และ 1.26 นาที ตามลำดับ

2.4.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง (Light emitting neutron converter screen)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนเข้าไปเป็นแสงเพื่อให้สามารถบันทึกได้ด้วยฟิล์มหรือใช้กระจกสะท้อนภาพแล้วส่งภาพเข้าสู่กล้องดิจิตอล ส่วนประกอบหลักของฉากประเภทนี้คือ คือ สารดูดกลืนนิวตรอน (Neutron absorber material) และสารเรืองแสง (Phosphorescent material) ที่มีภาคตัดขวางของปฏิกิริยา (n, α) ซึ่งได้แก่ธาตุ โบรอน (Boron, B) และ ลิเทียม (Lithium, Li) ซึ่งแต่ละธาตุจะมีค่าภาคตัดขวางในการเกิดปฏิกิริยา (n, α) 3,840 และ 935 บาร์น ตามลำดับ เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับโบรอน-10 (^{10}B) หรือ ลิเทียม-6 (^6Li) จะทำให้เกิดอนุภาคแอลฟาขึ้น ซึ่งเมื่อวิ่งชนกับสารเรืองรังสีจะเกิดแสงขึ้น ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ทำให้เกิดแสงมีปฏิกิริยาดังนี้



ตัวอย่างฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง ได้แก่

2.4.2.1 ฉาก ZnS(Ag) เป็นฉากที่ผสมโบรอนหรือลิเทียม ที่ใช้กันมากที่สุดคือฉาก NE426 ซึ่งมีส่วนผสมหลักคือ สารเรืองรังสี ZnS(Ag) กับลิเทียม เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้งานถ่ายภาพทั่วไปและมีความไวสูงสุด

2.4.2.2 ฉากแก้วเรืองรังสีที่มีซีเรียม (Cerium activated glass scintillator) ผสมกับลิเทียมได้แก่ ฉาก NE905 ซึ่งเป็นแก้วเรืองรังสีที่ผสมกับลิเทียม ^6Li ที่เสริมสมรรถนะร้อยละ 95 ผสมอยู่ในฉากร้อยละ 6.6

2.4.2.3 ฉากแกโดลิเนียมผสมกับสารเรืองรังสี ฉากเปลี่ยนนิวตรอนประเภทนี้ได้แก่ ฉากที่มีส่วนผสมของแกโดลิเนียมออกไซด์ (Gd_2O_3) กับ ZnS(Ag) และฉากแกโดลิเนียมออกไซด์ ซัลไฟด์ (เทอร์เบียม) [Gadolinium oxysulfide (Terbium): $\text{Gd}_2\text{O}_3\text{S}(\text{Tb})$] ฉากชนิดนี้เป็นฉากเรืองรังสีที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูง และยังสามารถใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนได้ เนื่องจากแกโดลิเนียมทำปฏิกิริยากับนิวตรอนเกิดคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอนขึ้นจะทำให้เกิดแสง

2.4.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มเทรค-เอตช์ (Track-etch neutron converterscreen)

เป็นฉากที่นำคุณสมบัติของการดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมา ซึ่งเป็นฉากที่ประกอบด้วยโบรอน-10 และ/หรือ ลิเทียม-6 ซึ่งอยู่ในรูปของสารประกอบโบรอนคาร์ไบด์ (B_4C) และลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) เมื่อดูดกลืนนิวตรอนแล้ว จะให้อนุภาคแอลฟา จากปฏิกิริยา $^{10}B(n, \alpha) ^7Li$ และ $^6Li(n, \alpha) ^3H$ เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านฟิล์มบางของวัสดุบางชนิดเช่น ไมกา แก้ว และพลาสติก จะเกิดรอยอนุภาคและเมื่อนำวัสดุนั้นไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายที่เหมาะสม จะทำให้เห็นภาพถ่ายชัดเจนขึ้นฉากประเภทนี้ได้แก่ BN1 และ BE-10 ของบริษัท Kodak Pathe' ประเทศฝรั่งเศส BN1 เป็นโบรอนไนไตรด์ที่มี โบรอน-10 ตามธรรมชาติ ส่วน BE-10 เป็นโบรอนคาร์ไบด์ (Boroncarbide, B_4C) ที่มี โบรอน-10 เสริมสมรรถนะร้อยละ 93 (Enriched 93% ^{10}B) ฉาก BE-10 เหมาะสำหรับฟิล์มเซลลูโลสไนเตรต และเซลลูโลสอะซิเตต

ตารางที่ 2.5 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่างๆที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[5]

Material	Isotope	Abundance	Reaction	Thermal neutron crosssection (barn)	Half life	Method*
LiF	6Li	7.5	$^6Li(n, \alpha)^3H$	940	NA	D,R
H_3BO_3	^{10}B	19.8	$^{10}B(n, \alpha)^7Li$	3838	NA	D
Metal	^{103}Rh	100	$^{103}Rh(n, \gamma) ^{104}Rh$	140	42s	D
			$^{103}Rh(n, \gamma) ^{104m}Rh$	11	4.5m	D,T
			$^{103}Rh(n, n') ^{103m}Rh$	-	57m	D,T
Metal	^{107}Ag	51.8	$^{107}Ag(n, \gamma) ^{108}Ag$	37	2.4m	D
	^{109}Ag	48.2	$^{109}Ag(n, \gamma) ^{110}Ag$	107	24.5s	D
			$^{109}Ag(n, \gamma) ^{110m}Ag$	4	254d	D
Metal	^{113}Cd	12.3	$^{113}Cd(n, \gamma) ^{114}Cd$	19,600	NA	D
Metal	^{115}In	95.7	$^{115}In(n, \gamma) ^{116}In$	155	54m	D,T
			$^{115}In(n, \gamma) ^{116m}In$	42	14s	D
Metal or Oxide	^{149}Sm	13.8	$^{149}Sm(n, \gamma) ^{150}Sm$	42,000	NA	D
	^{152}Sm	26.7	$^{152}Sm(n, \gamma) ^{153}Sm$	210	47h	D
Metal or Oxide	^{151}Eu	47.8	$^{151}Eu(n, \gamma) ^{152m}Eu$	3,200	9.2h	D,T

ตารางที่ 2.5 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่างๆที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[5](ต่อ)

Material	Isotope	Abundance	Reaction	Thermal neutron crosssection (barn)	Half life	Method*
Metal or GadoliniumOxysulfide	¹⁵⁵ Gd	14.9	¹⁵⁵ Gd(n, γ) ¹⁵⁶ Gd	61,000	NA	D,R
	¹⁵⁷ Gd	15.7	¹⁵⁷ Gd (n, γ) ¹⁵⁸ Gd	255,000	NA	D,R
Metal or Oxide	¹⁶⁴ Dy	28.2	¹⁶⁴ Dy(n, γ) ¹⁶⁵ Dy	900	2.35h	D,T
			¹⁶⁴ Dy(n, γ) ^{165m} Dy	1800	1.25m	D
Metal	¹⁹⁷ Au	100	¹⁹⁷ Au(n, γ) ¹⁹⁸ Au	98.8	2.965d	D,T

*D= direct method, T=transfer method, R=real time.

2.5 ฟิล์มและอุปกรณ์แสดงภาพ

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน นิยมใช้ฟิล์มที่มีความไวแสง รังสี หรืออนุภาคที่ปลดปล่อยออกจากฉากเปลี่ยนนิวตรอน เป็นอุปกรณ์รับภาพ เนื่องจากมีขั้นตอนการปฏิบัติไม่ยุ่งยาก และสามารถเก็บไว้เป็นหลักฐานได้ ซึ่งฟิล์มที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน อาจแบ่งตามประเภทฉากเปลี่ยนนิวตรอนได้ 3 ประเภทดังนี้

(1) ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ ฉากชนิดนี้จะปลดปล่อยรังสีบีตาอิเล็กตรอนหรือรังสีแกมมา ซึ่งสามารถทำให้ฟิล์มรังสีเอกซ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรม (Industrial x-ray film) ดำได้ รังสีบีตา และอิเล็กตรอนมีประสิทธิภาพในการทำให้เกิดภาพสูงกว่ารังสีแกมมา เพราะมีอำนาจในการทำให้เงินโปรไมด์ (Silver bromide, AgBr) แตกตัวเป็นประจุสูงกว่า ความเร็วเปรียบเทียบ (Relative speed) ของฟิล์มรังสีเอกซ์บางชนิดที่ใช้ในการถ่ายภาพนิวตรอนแสดงไว้ในตารางที่ 2.6

(2) ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง สามารถใช้ได้ทั้งฟิล์มถ่ายรูป (Photographic film) และฟิล์มรังสีเอกซ์ ในปัจจุบันฟิล์มถ่ายภาพความเร็วสูง เช่น ASA400, ASA800 และ ASA1600 สามารถหาซื้อได้ง่าย ทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพลดลงได้มาก อย่างไรก็ตามฟิล์มที่มีความเร็วสูงจะให้ภาพที่ได้มีความคมชัด และมีรายละเอียดคน้อยลง เช่นเดียวกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา การใช้ฟิล์มถ่ายรูปหรือฟิล์มไวแสงมีข้อดีกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์

ตรงที่ไวต่อรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาน้อยกว่ามาก ภาพที่ได้จึงมีการรบกวนจากรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมาน้อย ทั้งนี้เนื่องจากชั้นอิมัลชัน (Emulsion) ของฟิล์มถ่ายรูปร่างกว่ามากนั่นเอง

(3) ฉากเปลี่ยนนิวตรอนสำหรับฟิล์มแทรก-เอตซ์โดยทั่วไปใช้ฟิล์มเซลลูโลสในเตรตที่ได้จากปฏิกิริยาของเซลลูโลสกับกรดไนตริก (HNO_3) และกรดกำมะถัน (H_2SO_4) ซึ่งมีความไวในการบันทึกรอยอนุภาคแอลฟาที่เกิดจากปฏิกิริยา ^{10}B และ ^6Li กับนิวตรอน ฟิล์มชนิดนี้ใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 (10%NaOH) ล้างก็รอยที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ประมาณ 20-40 นาที

ตารางที่ 2.6 ฟิล์มสำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่าง ๆ

ฉากเปลี่ยนนิวตรอน	ฟิล์มบันทึกภาพ
ฉากชนิดแผ่นโลหะ	ฟิล์มรังสีเอกซ์
ฉากชนิดปลดปล่อยแสง	ฟิล์มรังสีเอกซ์ ฟิล์มถ่ายรูปร่าง
ฉากสำหรับฟิล์มแทรก-เอตซ์	เซลลูโลสในเตรต เซลลูโลสอะซิเตต

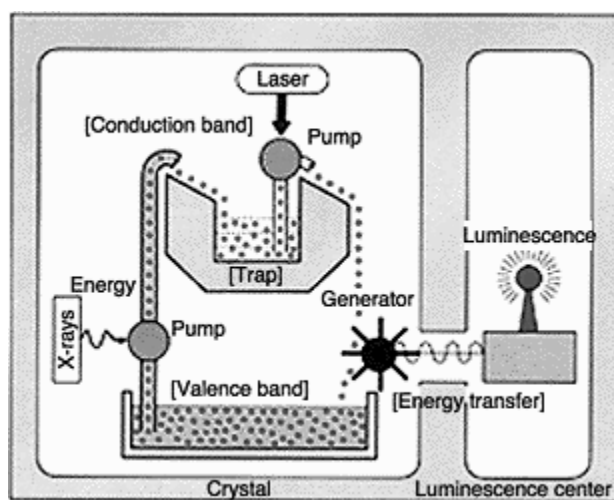
ตารางที่ 2.7 ความเร็วเปรียบเทียบของฟิล์มรังสีเอกซ์สำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน^[5]

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		

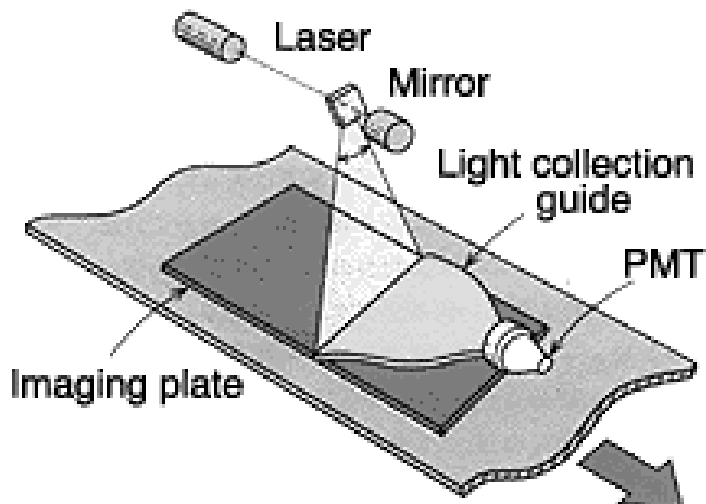
*single coated film

(4) Image plate เป็นแผ่นบันทึกภาพสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน จะใช้ Gd_2O_3 ผสมกับผลึก $\text{BaFBr}(\text{Eu})$ เคลือบอย่างสม่ำเสมอบนฐานรองโพลิเอสเตอร์ที่มีความยืดหยุ่น โดย Gd_2O_3 จะทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนเป็นคอนเวอร์ชันอิเล็กตรอน และจะถ่ายเทพลังงานให้กับผลึก $\text{BaFBr}(\text{Eu})$ ซึ่งจะเก็บพลังงานนี้ไว้ในระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอน และเมื่อใช้แสงเลเซอร์ชนิด He-Ne ความยาวคลื่นประมาณ 633 นาโนเมตร จากหลอดกำเนิดแสงเลเซอร์ สแกน

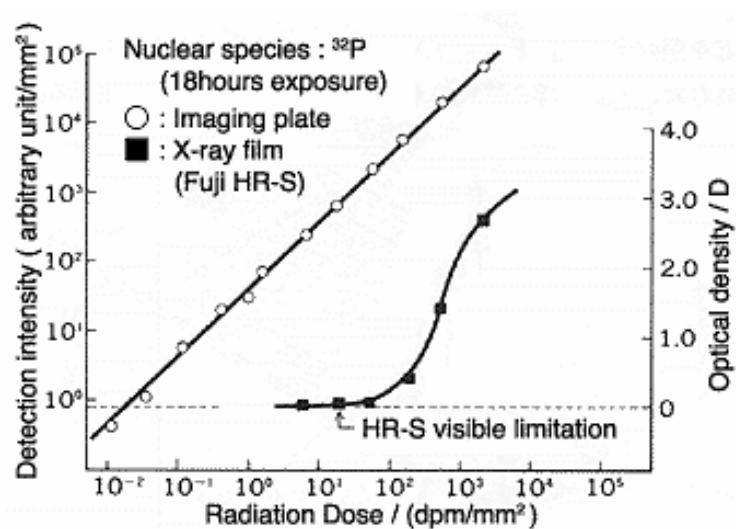
ผ่านแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ผ่านการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนแล้ว จะทำให้อิเล็กตรอนในระดับชั้นพลังงานนั้นถูกปลดปล่อยออกมา พร้อมให้โฟตอนที่มีความยาวคลื่น 400 นาโนเมตร กระบวนการนี้เรียกว่า การกระตุ้นการเกิดแสง (Photo Stimulate Luminescence) แสงที่ปลดปล่อยออกมาจะถูกเก็บไว้ และนำไปสร้างภาพในลักษณะที่เป็นดิจิทัลต่อไป



รูปที่ 2.19 แสดงลักษณะการเกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพ^[12]



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการอ่านภาพบนแผ่นบันทึกภาพ



รูปที่ 2.21 เปรียบเทียบคุณลักษณะความไวรังสีของแผ่นบันทึกภาพ และฟิล์มถ่ายภาพรังสีโดยใช้
ต้นกำเนิดฟอสฟอรัส-32 ซึ่งให้พลังงานของรังสีเบตา 1.7 MeV ^[5]

2.6 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน

จากกระบวนการทั้งหมดของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ได้ผลขั้นสุดท้ายเป็นภาพถ่าย ซึ่งแสดงรูปร่าง และลักษณะของวัตถุตัวอย่างที่ต้องการศึกษาวิเคราะห์ เทคนิค และอุปกรณ์การถ่ายภาพทุกขั้นตอนมีผลต่อภาพถ่ายที่ได้ ภาพถ่ายที่มีคุณภาพจะทำให้การศึกษาวิเคราะห์วัตถุตัวอย่างมีความสะดวก และถูกต้องแม่นยำ

ภาพถ่ายที่ดีคือ ภาพที่มีความคมชัด มีความเปรียบต่างสูง มีความดำพอเหมาะ และไม่บิดเบือน ซึ่งสามารถตรวจสอบได้โดยวิธีการดังต่อไปนี้

2.6.1 การวัดค่าความดำบนฟิล์ม

อุปกรณ์ที่ใช้วัด และบอกค่าความดำบนฟิล์ม คือ เดนซิโตมิเตอร์ (Densitometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้วัดค่าความดำบนฟิล์มเป็นการวัดความสามารถในการทำปฏิกิริยาของอนุภาค รังสี หรือแสง กับฟิล์ม โดยการเปลี่ยนค่าความทึบแสงของวัตถุให้เป็นค่าที่อ่านได้โดยใช้หลักการทะลุผ่าน ของแสง เรียกความดำนี้ว่าออปติคัล เดนซิตี (Optical Density, OD) หาได้จากสูตร

$$\text{optical density} = OD = 0.43Na \quad (2.20)$$

เมื่อ N คือ จำนวนเม็ดของเงินเฮไลด์ที่เกิดการสร้างภาพ (grain/cm²)

a คือ ค่าเฉลี่ยพื้นที่ตัดขวางของเม็ดเงินเฮไลด์ 1 เม็ด (cm²)

หรือหาได้จาก

$$\text{optical density} = OD = \log \frac{I_0}{I} \quad (2.21)$$

เมื่อ I_0 คือความเข้มของแสงที่ตกกระทบฟิล์ม

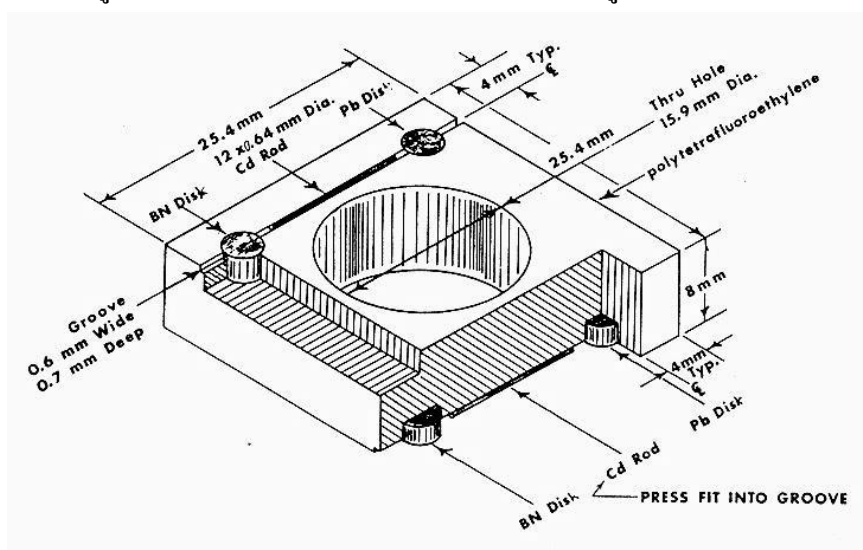
I คือความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านฟิล์ม

2.6.2 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน

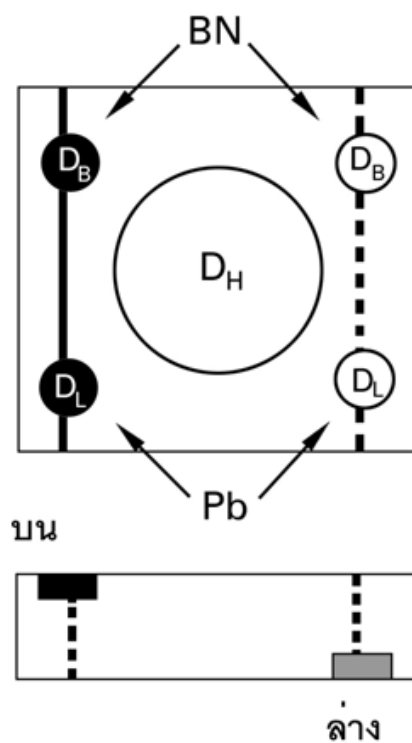
วัตถุตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้สำหรับทดสอบคุณภาพของการถ่ายภาพ และอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนซึ่งแสดงให้เห็นคุณภาพของภาพถ่าย การทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยทั่วไปใช้วัตถุตัวอย่างมาตรฐานเช่น Beam Purity Indicator (BPI), Sensitivity Indicator (SI) และ Test Strip B ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังนี้

2.6.2.1 การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator (BPI)

Beam Purity Indicator ออกแบบมาสำหรับทดสอบ และวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอนจากคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่บน BPI ได้แก่ โบรอนไนไตรด์ (BN) และตะกั่ว ทำเป็นรูปทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มิลลิเมตร หนา 2 มิลลิเมตร ลวดแคดเมียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 มิลลิเมตร ยาว 12 มิลลิเมตรดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 Beam Purity Indicator^[5]



รูปที่ 2.23 ตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI^[5]

การวิเคราะห์ทำได้โดยการถ่ายภาพ Beam Purity Indicator แล้ววัดความเข้มแต่ละตำแหน่งบนฟิล์ม ตามรูปที่ 2.23 โดย

D_B คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์

D_L คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว

D_H คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลาง

D_T คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน

ΔD_L คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น

ΔD_B คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น

ความบริสุทธิ์ของลำนิวตรอนคำนวณได้ดังนี้

- 1) ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน (Effective thermal neutron, NC)

$$NC = \frac{D_H - (\text{highest } D_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad (2.22)^{[5]}$$

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

$$S = \left(\frac{\Delta D_B}{\Delta D_H} \right) \times 100 \quad (2.22)^{[5]}$$

- 3) ปริมาณรังสีแกมมา (Effective gamma content, γ)

$$\gamma = \left(\frac{D_T - \text{low } D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.22)^{[5]}$$

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

$$P = \left(\frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.22)^{[5]}$$

2.6.2.2 การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Sensitivity Indicator (SI)

อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ (SI) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการมองเห็นรายละเอียดของภาพโดยสังเกตจากรู (Hole) และช่องว่าง (Gap) ตามแนวยาวที่เล็กที่สุดที่ภาพถ่ายสามารถแสดงรายละเอียดได้ อุปกรณ์วัดความไว SI ของ ASTM ประกอบด้วยวัสดุหลักต่างๆ คือ อะครีลิคเรซิน (Acrylic resin) อะลูมิเนียม และตะกั่ว โดยมีความหนาขนาดของรู และช่องว่างต่างๆ กัน ตารางที่ 2.9 แสดงขนาดของช่องว่างที่เล็กที่สุดที่ต้องการมองเห็นในภาพถ่ายนิวตรอนทุกช่วงความหนา และตารางที่ 2.10 แสดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูที่กว้างที่สุดที่ต้องมองเห็นในความหนาต่างๆ กันของ SI

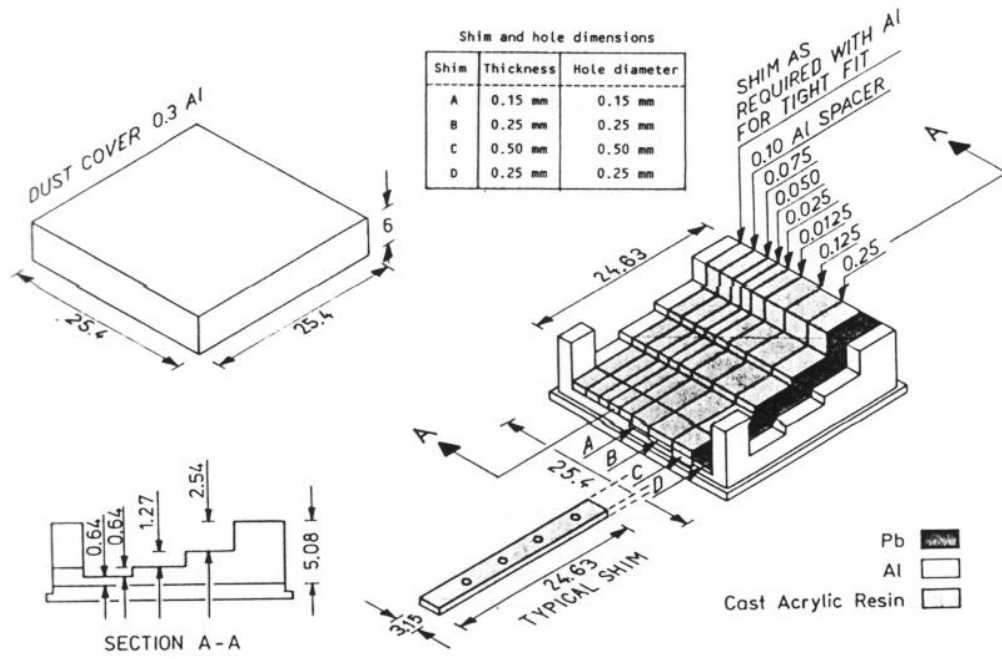
ตารางที่ 2.8 ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI

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

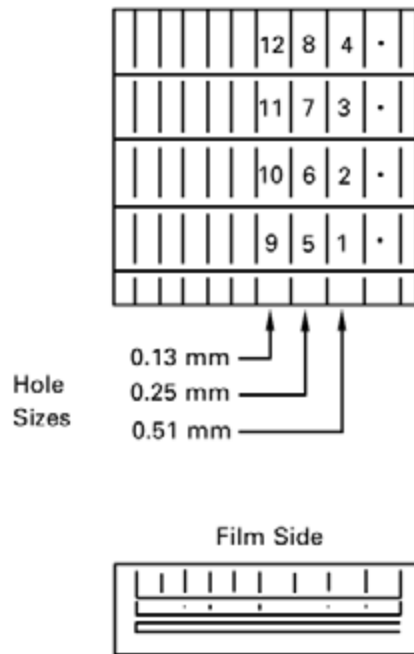
* เป็นช่องว่างที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ในทุกช่วงความหนาของภาพ ASTM SI

ตารางที่ 2.9 แสดงค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI ^[5]

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



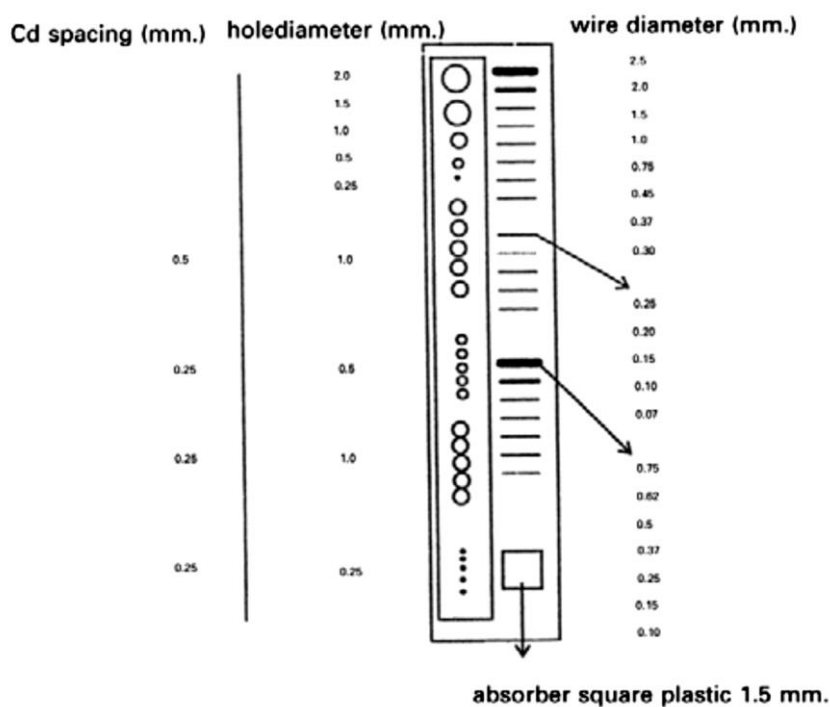
รูปที่ 2.24 ASTM Sensitivity Indicator^[5]



รูปที่ 2.25 แสดงตำแหน่ง และขนาดของรูปใน ASTM SI^[5]

2.6.2.3 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่าย และความไวของการถ่ายภาพด้วย Test strip B

Test strip B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ความคมชัด และความเปรียบต่างของภาพ ประกอบด้วย แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มิลลิเมตรเป็นฐาน แผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตร เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 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 หมายถึง รัศมีลูชันของภาพ เส้นพลาสติกยาว 5 มิลลิเมตรขนาดความกว้างต่างๆ 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 เส้นพลาสติกเส้นเล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้นำมาพิจารณา รัศมีลูชัน และความเปรียบต่างของภาพ เส้นแคดเมียมความยาว 5 มิลลิเมตร ความกว้างขนาดต่างๆ กัน 7 เส้น ได้แก่ 0.75, 0.62, 0.5, 0.37, 0.25, 0.15, 0.1 มิลลิเมตร และแผ่นพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 เซนติเมตร \times 1.5 เซนติเมตร ซึ่งนำมาพิจารณาความเปรียบต่างของภาพ



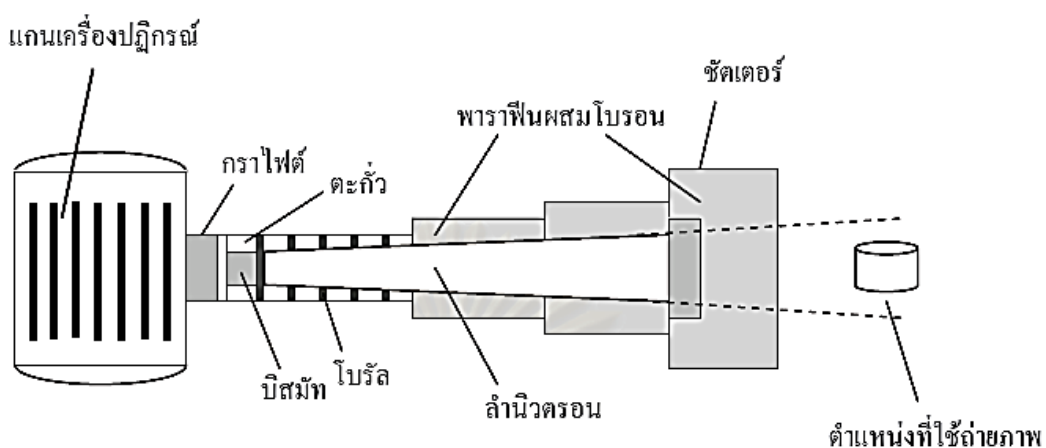
รูปที่ 2.26 Test strip B^[5]

บทที่ 3

วัสดุและอุปกรณ์วิจัย

3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอน

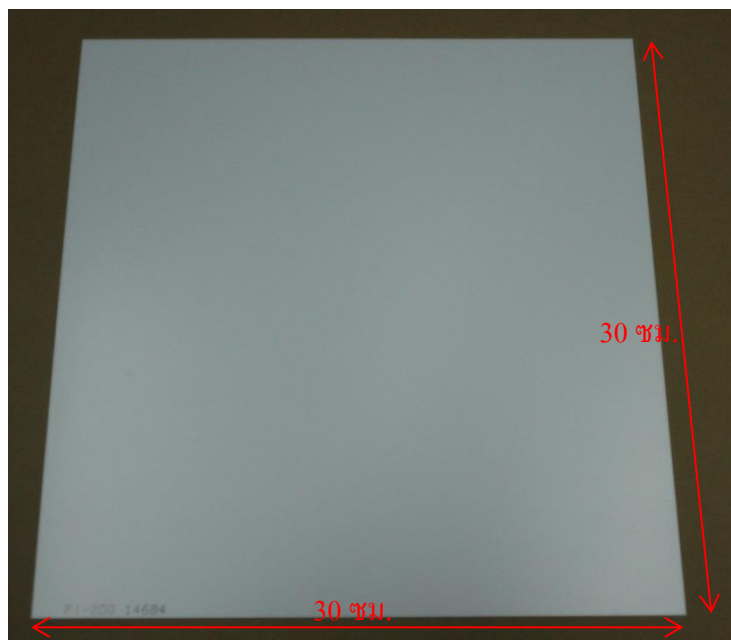
นิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ได้จากปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission) ของยูเรเนียม - 235 ในแท่งเชื้อเพลิงของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 ซึ่งเป็นเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูรุ่น TRIGA MARK III มีกำลังในการเดินเครื่องสูงสุด 2 เมกกะวัตต์ โดยท่อนำเทอร์มัลนิวตรอนนี้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 นิ้ว และมีความยาว 265 เซนติเมตร ซึ่งภายในท่อประกอบไปด้วย กราไฟต์สำหรับลดพลังงานของนิวตรอน บิสมัทสำหรับลดปริมาณของรังสีแกมมา และ โบรล (Boral) ซึ่งเป็นโลหะผสมระหว่างอลูมิเนียม และ โบรอนสำหรับบังคับลำนิวตรอนปลายด้านนอกของท่อมีชัตเตอร์ ทำหน้าเปิด-ปิดท่อนำนิวตรอน ทำด้วยโพลีเอทิลีน (Polyethylene) หุ้มด้วยเหล็ก โดยมี อัตราส่วนความยาวของท่อนำนิวตรอนต่อความกว้างของช่องเปิดด้านในของท่อ (L/D Ratio) มีค่า 50 และ 60 ในงานวิจัยนี้ได้ทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในขณะที่เดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูที่กำลัง 1200 กิโลวัตต์ ซึ่ง มีความเข้มข้นนิวตรอนภายในแกนปฏิกรณ์ 2.9×10^{13} นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งลำนิวตรอนที่ส่งผ่านออกมายังตำแหน่งถ่ายภาพซึ่งห่างจากปากท่อนำนิวตรอน 1 เมตรเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 20 เซนติเมตร \times 17 เซนติเมตร มีความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนประมาณ 1×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที



รูปที่ 3.1 ส่วนประกอบภายในท่อนำนิวตรอน

3.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน

ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้เป็นฉากชนิด PI-200 จากบริษัท มิตซูบิชิ เคมีคัล คอร์ปอเรชั่น ประเทศญี่ปุ่น เป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนนิวตรอนให้เป็นรังสีชนิดอื่นที่สามารถ ทำปฏิกิริยากับสารที่เป็นองค์ประกอบของฉากแล้วปล่อยแสงออกมาทำให้เกิดภาพบนฉาก และฉากชนิดนี้ยังสามารถถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานสูง



รูปที่ 3.2 ฉากเปลี่ยนนิวตรอนฟลูออเรสเซนต์ รุ่น PI-200

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติจากเปลี่ยนนิวตรอน PI-200^[13]

Name	Composition		Relative Brightness	MTF	
				at 1 Lp/mm	at 2 Lp/mm
PI-200 (Gd ₂ O ₂ S:Tb)	Protective Layer	PET 6 μ m	122%	0.35 (80)	0.11 (70)
	Phosphor Layer	436 μ m, 200mg/cm ²			
	Supporting Layer	Plastic Base 188 μ m			
	Total	630 μ m			

3.3 อุปกรณ์บันทึกภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการรับภาพ และแสดงผลภาพจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะใช้กล้องดิจิทัล Canon EOS รุ่น 500D ซึ่งรับภาพเป็นแบบซีมอส (CMOS) โดยใช้เลนส์มาตรฐาน 18 - 55 มม. และสายส่งสัญญาณยูเอสบี (USB) พร้อมกับ USB HUB ทำหน้าที่เพิ่มกำลังส่งสัญญาณให้เพิ่มมากขึ้น ต่อเข้ากับกล้องดิจิทัล และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเพื่อใช้ในการควบคุมการถ่ายภาพจากระยะไกลเพื่อป้องกันอันตรายจากการรับรังสีโดยไม่จำเป็นของผู้ทำการวิจัย



รูปที่ 3.3 กล้องดิจิทัลแคนอน รุ่น 500D



รูปที่ 3.4 สายต่อ และUSB HUB

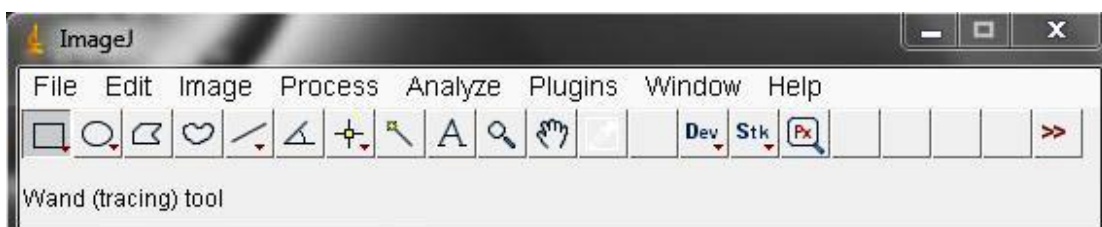
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติของกล้องดิจิทัล

Canon EOS 500D / Kiss X3	
Effective pixels	15.1 million
Sensor size	22.3 x 14.9 mm (3.32 cm ²)
Pixel density	4.5 MP/cm ²
ISO rating	Auto, 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 (6400-12800 expandable)
Auto Focus	Multi-BASIS TTL, 9 focus points
Min shutter	30 sec
Max shutter	1/4000 sec
Flash range	13 m (ISO 100)
Exposure compensation	-2 to +2 EV in 1/3 EV or 1/2 EV steps
Metering	35 area eval, center weighted, partial, spot
Continuous Drive	Yes, 3.4 fps, 170 JPEG
Movie Clips	Yes, 1920 x 1080 @ 20 fps, 1280 x 720 @ 30 fps, 640 x 480 @ 30 fps
Viewfinder	Optical (Pentamirror, 95% coverage, 0.87x magnification)
LCD	3 "
LCD Dots	920,000
HDMI	Yes
Weight (inc. batteries)	520 g (18.3 oz)
Dimensions	129 mm x 98 mm x 62 mm (5.1 in. x 3.9 in. x 2.4 in.)

3.4 ซอฟต์แวร์ปรับแต่งภาพ

โปรแกรม image J คือโปรแกรมในการวิเคราะห์ภาพถ่าย ตัวโปรแกรมมีความเป็นมาจากการสร้างของ National Institutes of Health (NIH) พัฒนาศักยภาพของสถาบัน National Institute of Mental Health (NIMH) ตัวโปรแกรมสามารถทำงานได้โดยมีคำสั่ง Analyze, Process และคำสั่งอื่น และสามารถบันทึกไฟล์ในรูปแบบ 8-bit, 16-bit, 32-bit และสามารถอ่านไฟล์นามสกุลเหล่านี้คือ

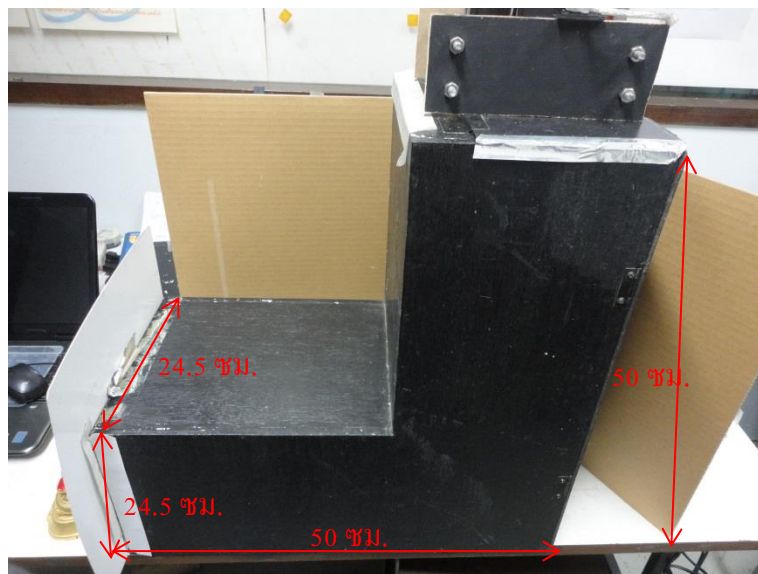
TIFF, GIF, JPEG, BMP, DICOM, FITS และ raw โปรแกรมสามารถเปิดภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์พร้อม ๆ กันหลายภาพได้ในเวลาเดียวกัน โปรแกรม imageJ ยังสามารถคำนวณ Fraction Area หรือสัดส่วนพื้นที่ และสามารถหาพื้นที่ในการวัดได้ สามารถหาค่าได้ทั้งในหน่วยพื้นที่ เช่น ตารางมิลลิเมตร หรือ ค่าในหน่วย pixel ของรูปนั้น สามารถจัดทำค่าต่าง ๆ ในรูปสถิติได้ วัดระยะความยาวของเซลล์วัดความหนาแน่นของรูปภาพแล้วแสดงในรูปแบบแผนภูมิแท่งหรือ Histograms และยังสามารถสนับสนุน Function ต่าง ๆ และตัว Plugin โปรแกรมสามารถกำหนด Scale, Rotate, Flips ของภาพ และยังสามารถซูมภาพที่ถูกควบคุมโดย Magnification Factor และสามารถเปิดพร้อมกันหลายๆภาพได้โดยขึ้นอยู่กับขนาดของ RAM ที่มีในเครื่องคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.5 Tool bar โปรแกรม image J

3.5 กล้องทึบแสง

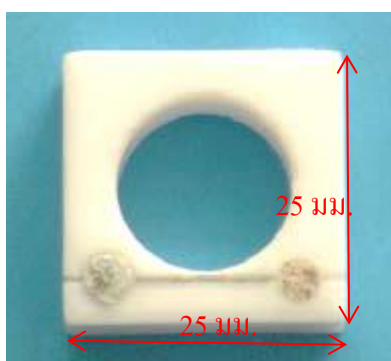
การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้กับฉากเรืองรังสีต้องมีอุปกรณ์ที่สามารถป้องกันการรบกวนจากแสงสว่างภายนอกที่จะส่งผลกับความสว่างของฉากเรืองรังสีขณะที่ทำการถ่ายภาพ ซึ่งแสงสว่างภายนอกจะทำให้ภาพแฟงบนฉากเรืองรังสีมีความคมชัดน้อยลง จึงต้องมีกล่องที่ทำหน้าที่ป้องกันแสงสว่างจากภายนอกที่มีรูปทรงเป็นตัวแอล ซึ่งผนังด้านในของกล่องจะถูกแผ่นด้วยสีดำชนิดที่มีความมันวาวน้อยเพื่อลดการสะท้อนของแสงสว่างที่เกิดขึ้นจากแผ่นเรืองรังสีขณะทำการถ่ายภาพ และต้องมีกระจกที่วางทำมุม 45 องศา กับฉากเรืองรังสี เพื่อทำหน้าที่สะท้อนภาพจากฉากเรืองรังสีเข้าสู่กล้อง และป้องกันไม่ให้กล้องดิจิตอลรับรังสีโดยตรงซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกับกล้องดิจิตอลได้



รูปที่ 3.6 กล่องทึบแสง

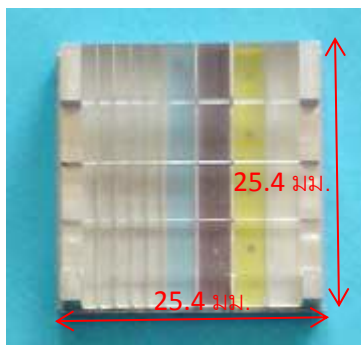
3.6 วัตถุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับทดสอบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

3.6.1 Beam Purity Indicator (BPI) เป็นวัตถุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับทดสอบ และวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอน และคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพ และอุปกรณ์ในการบันทึกภาพ โดยวิเคราะห์จากความเข้มของฟิล์มจากภาพถ่าย



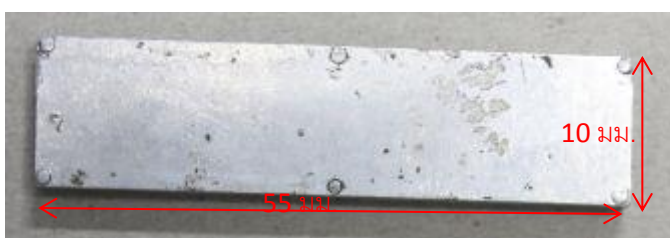
รูปที่ 3.7 Beam Purity Indicator

3.6.2 Sensitivity Indicator (SI) เป็นวัตถุตัวอย่างมาตรฐานสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยสังเกตจากรายละเอียดที่สามารถมองเห็น และความคมชัดของภาพถ่าย



รูปที่ 3.8 Sensitivity Indicator

3.6.3 Test Strip B วัสดุตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยสังเกตจากรายละเอียดที่สามารถมองเห็นได้จากภาพถ่าย ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่มีความเปรียบต่างสูง ได้แก่ แกดเมียม และวัสดุที่มีความเปรียบต่างต่ำกว่า ได้แก่พลาสติก



รูปที่ 3.9 Test Strip B

3.7 วัตถุตัวอย่างที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน



รูปที่ 3.10 พระพุทธรูป



รูปที่ 3.11 Connector RS232 25-pin



รูปที่ 3.12 กระบอกไฟฉาย

บทที่ 4

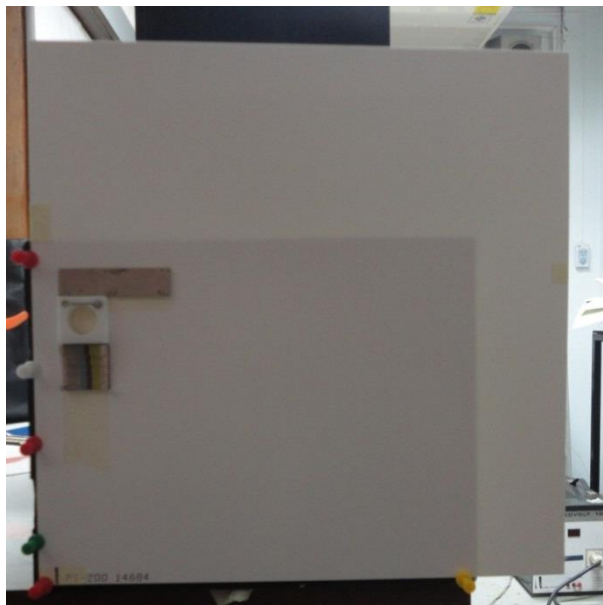
วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

ในการดำเนินงานวิจัยนี้ ได้ทำการพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ฉากเรืองรังสีแกโดลิเนียมออกไซด์ไฟด์ ชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล โดยมีขั้นตอนดังนี้

4.1 การทดสอบความสว่างของฉากเมื่อได้รับนิวตรอน

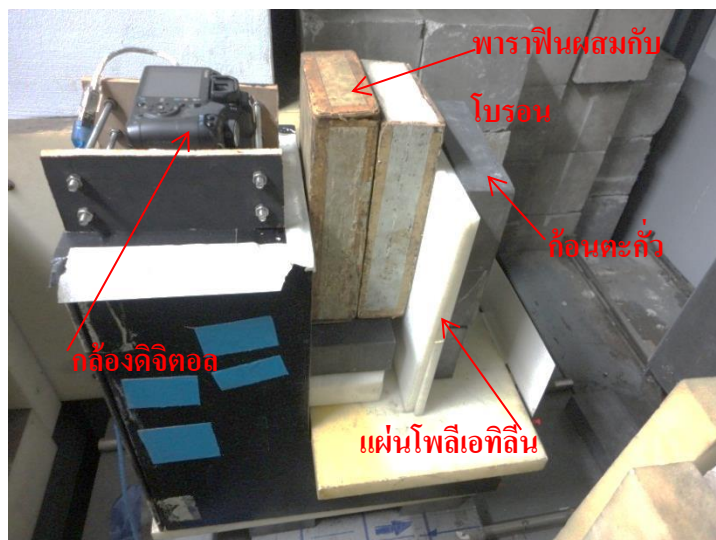
4.1.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบหาค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากเรืองรังสีทั้ง 3 ชนิด ซึ่งได้แก่ฉาก PI-200 ฉาก DRZ Std และฉาก NE426 โดยการตั้งค่า ISO ของกล้องที่ ISO เท่ากับ 100 ค่ารูรับแสงที่ f5.6 และเวลาในการถ่ายภาพนาน 3 นาที โดยลักษณะการติดตั้งฉากเรืองรังสีเข้ากับกล้องที่บแสงจะเป็นตามตัวอย่างรูปที่ 4.1 จากนั้นนำกล้องที่ติดตั้งอุปกรณ์เรียบร้อยแล้วไปวางที่ด้านหลังของชุดเดือร์ที่ทำหน้าที่ในการเปิด-ปิดลำนิวตรอนที่ระยะห่าง 0.8 เมตร



รูปที่ 4.1 การติดฉากเรืองรังสี

ติดตั้งวัสดุกำบังรังสีเพื่อป้องกันไม่ให้รังสีไปรบกวนชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่เป็นอุปกรณ์ภายในตัวกล้อง ซึ่งเป็นชิ้นส่วนที่มีความไวต่อรังสีที่ใช้ในการถ่ายภาพที่จะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวนให้กับภาพถ่าย โดยใช้ ก้อนตะกั่ว แผ่นโพลียเอทิลีน และก้อนพาราฟินผสมกับโบรอน

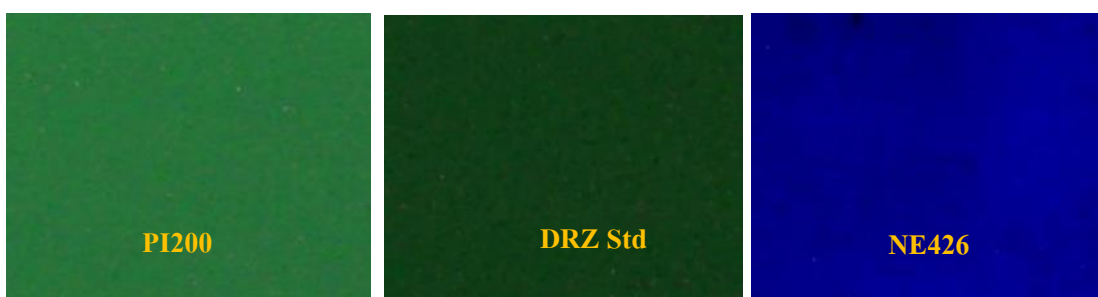


รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ป้องกันรังสีให้กับกล้อง

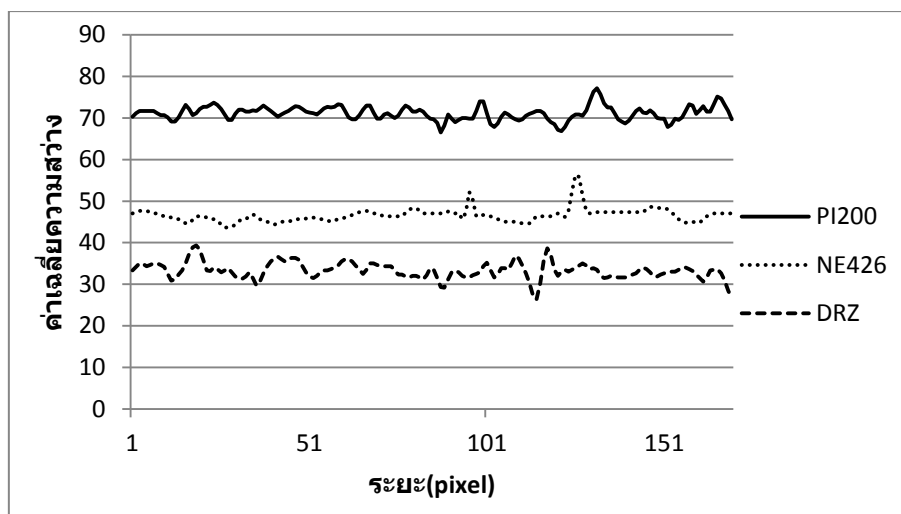
และทำการติดตั้งตัวกล้องเข้ากับกล่องที่บ และต่อสาย USB เข้ากับตัวกล้อง และเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเพื่อควบคุมการถ่ายภาพจากระยะไกล

4.1.2 ผลการวิจัย

จากการทดสอบความสว่างของฉากเรืองรังสีทั้ง 3 ชนิด ได้ผลตามรูปที่ 4.3 เมื่อนำค่าเฉลี่ยความสว่างของทั้ง 3 ฉากมาสร้างโปรไฟล์เปรียบเทียบจะได้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.3 สีของฉากเรืองรังสีทั้ง 3 ชนิดเมื่อทำปฏิกิริยากับนิวตรอน



รูปที่ 4.4 โพรไฟล์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากทั้ง 3 ชนิด

4.1.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากการทดลองความสว่างของฉากทั้ง 3 ชนิด พบว่าค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากเรื่องรังสีชนิด PI-200 มีค่ามากที่สุดที่ประมาณ 70 ส่วนฉากที่มีความสว่างรองลงมาได้แก่ ฉากเรื่องรังสีชนิด NE416 และ DRZ Std โดยมีค่าสว่างประมาณที่ 47 และ 35 ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของฉากเรื่องรังสีที่แตกต่างกัน

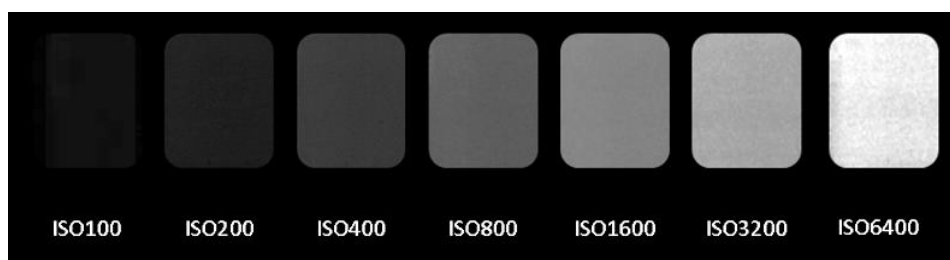
4.2 การหาค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากเรื่องรังสี และสัญญาณรบกวนที่ ISO ต่างกัน

4.2.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองหาค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากเรื่องรังสีชนิด PI-200 โดยทำการเปลี่ยนแปลงค่า ISO ตั้งแต่ 100, 200, 400, 800, 1600, 3200 และ 6400 ตามลำดับ โดยตั้งค่ารูรับแสงของกล้องที่ f5.6 และใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 3 นาที โดยมีระยะห่างระหว่างฉากเรื่องรังสีกับปากท่อของคอลลิเมเตอร์ 0.8 เมตร

4.2.2 ผลการวิจัย

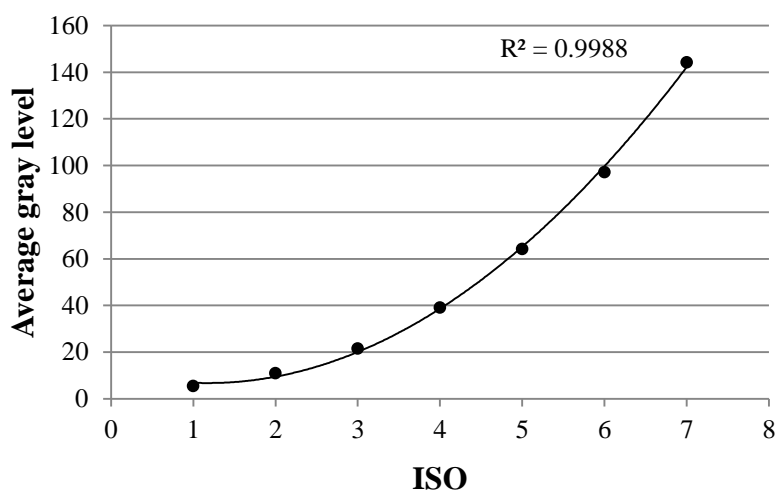
หลังจากทำการถ่ายภาพที่ค่า ISO ที่ค่าต่าง ๆ กัน และนำภาพที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ยความสว่างและปริมาณสัญญาณรบกวน ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และเมื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความสว่างของภาพกับ ISO และปริมาณสัญญาณรบกวนบนภาพถ่ายกับ ISO ได้ผลดังที่แสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7



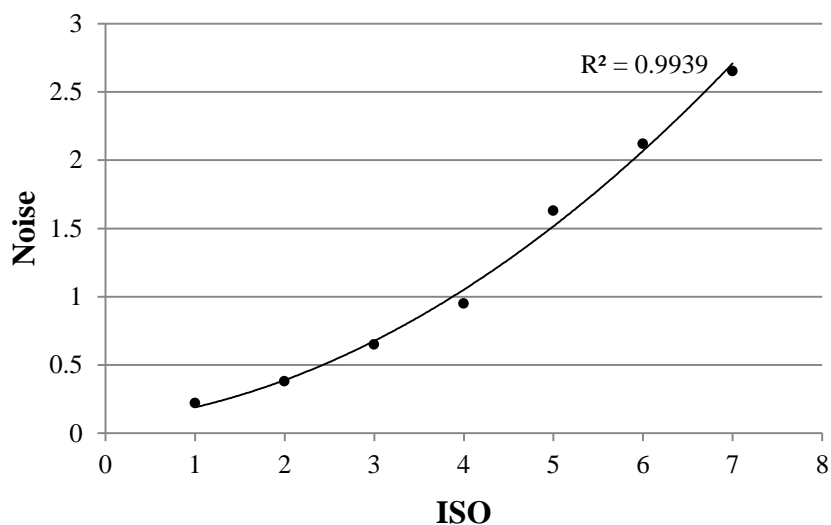
รูปที่ 4.5 ความสว่างของฉากที่ ISO ต่างๆ

ตารางที่ 4.1 ค่าเฉลี่ยความสว่าง และสัญญาณรบกวน ISO ต่าง ๆ

ISO	100	200	400	800	1600	3200	6400
Avg gray level	5.36	10.84	21.44	38.96	64.19	97.01	144.22
Noise	0.22	0.38	0.65	0.95	1.63	2.12	2.65



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงค่าความสว่างเทียบกับค่า ISO

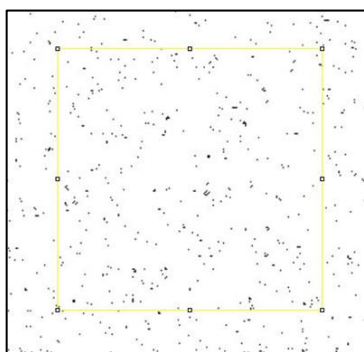


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงปริมาณสัญญาณรบกวนเทียบกับค่า ISO

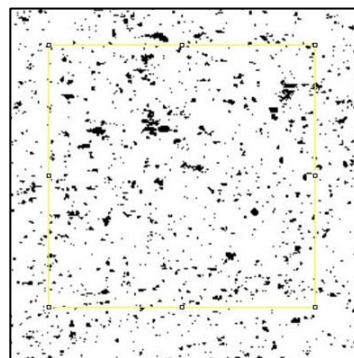
4.2.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.6 พบว่าค่าเฉลี่ยความสว่างของภาพเพิ่มขึ้นตามการปรับค่า ISO ของกล้อง ยิ่ง ISO มีค่าตัวเลขที่มากก็จะให้ค่าเฉลี่ยความสว่างของภาพมากขึ้นตามไปด้วย และเมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.7 พบว่าปริมาณสัญญาณรบกวนที่มีต่อภาพถ่ายจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปรับ ISO สูงขึ้น

ดังนั้นการเลือกปรับค่า ISO ของกล้องที่ให้ค่าความสว่างของภาพถ่ายที่เหมาะสม และจำนวนของสัญญาณรบกวนที่มีค่าน้อยที่สุดโดยไม่ทำให้คุณภาพของภาพน้อยลงคือ ISO ที่มีค่าเท่ากับ 100



รูปที่ 4.8 ขนาด pixel ของสัญญาณรบกวนต่อพื้นที่ ที่ ISO เท่ากับ 100



รูปที่ 4.9 ขนาด pixel ของสัญญาณรบกวนต่อพื้นที่ ที่ ISO เท่ากับ 6400

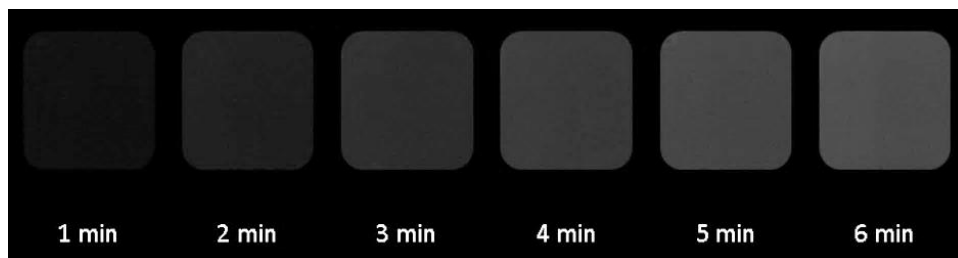
4.3 การหาค่าเฉลี่ยความสว่างของฉากเรื่องรังสี และสัญญาณรบกวนที่เวลาต่างกัน

4.3.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

ทำการปรับค่า ISO ของกล้องเป็น 100 เพื่อต้องการลดปริมาณสัญญาณรบกวนของกล้องซึ่งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า ISO มีค่าสูง ปรับค่ารูรับแสงที่ 5.6 จากนั้นทำการตั้งเวลาในการถ่ายภาพตั้งแต่ 1 นาทีไปจนถึง 6 นาที โดยทำการเพิ่มเวลาในการถ่ายภาพครั้งละ 1 นาที จากนั้นนำภาพถ่ายที่ได้มาหาค่าเฉลี่ยความสว่าง และปริมาณสัญญาณรบกวนของแต่ละภาพที่เวลาต่าง ๆ

4.3.2 ผลการวิจัย

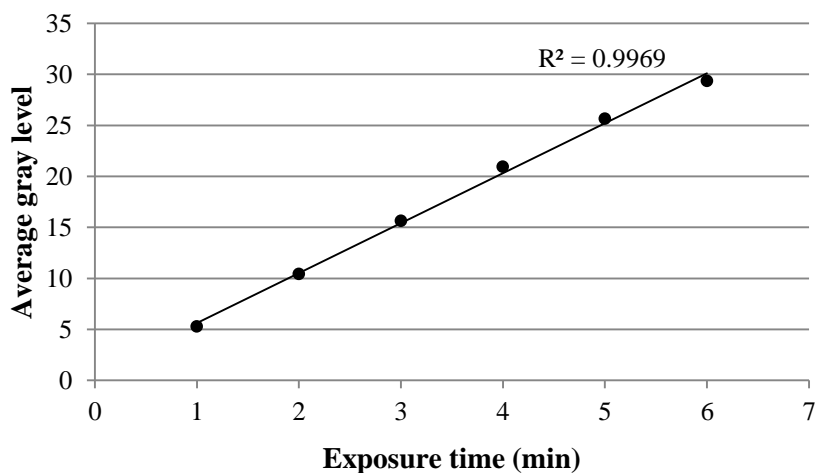
จากการทดลองถ่ายภาพโดยการเปลี่ยนระยะเวลาในการถ่ายภาพตั้งแต่ 1 นาที จนถึง 6 นาที แล้วนำภาพที่ได้ไปคำนวณหาค่าเฉลี่ยความสว่าง และปริมาณสัญญาณรบกวนของภาพถ่ายได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 4.2 และได้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความสว่างกับเวลาในการถ่ายภาพ และ กราฟความสัมพันธ์ของปริมาณสัญญาณรบกวนกับเวลาในการถ่ายภาพดังรูปที่ 4.11 และ 4.12 ตามลำดับ



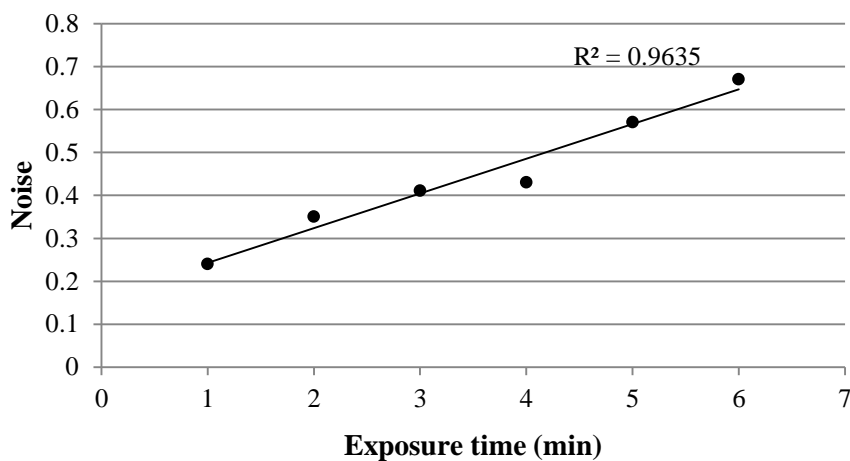
รูปที่ 4.10 ความสว่างของฉากที่ ISO ต่างๆ

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยความสว่าง และสัญญาณรบกวนที่เวลาต่าง ๆ

เวลา(นาที)	1	2	3	4	5	6
Avg gray level	5.28	10.41	15.64	20.93	25.63	29.34
Noise	0.24	0.35	0.41	0.43	0.57	0.67



รูปที่ 4.11 กราฟค่าเฉลี่ยความสว่างเทียบกับเวลา



รูปที่ 4.12 กราฟปริมาณสัญญาณรบกวนเทียบกับเวลา

4.3.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.11 พบว่าค่าเฉลี่ยความสว่างของภาพถ่ายจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ และจะส่งผลให้กับปริมาณสัญญาณรบกวนภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.12

ดังนั้นการเลือกใช้เวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจะใช้เวลาในการถ่ายภาพนานเป็นเวลา 3 นาที ที่จะทำให้ค่าความสว่างของภาพที่สามารถมองเห็นรายละเอียดของภาพของวัตถุตัวอย่างที่นำมาถ่ายได้

4.4 การหาปริมาณสัญญาณรบกวนบริเวณถ่ายภาพ

4.4.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

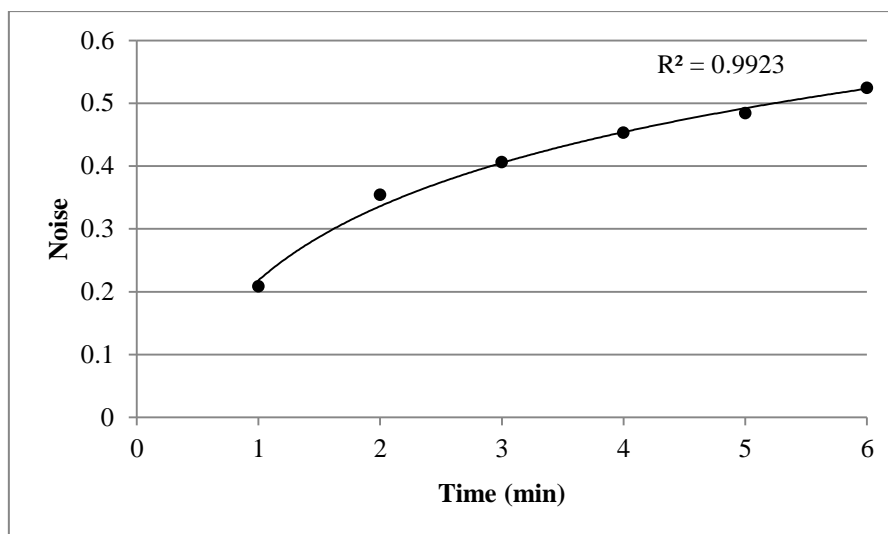
ปิดเลนส์ของกล้อง และเปิดชัตเตอร์ของท่อนำนิวตรอน จากนั้นทำการปรับค่า ISO ของกล้องเป็น 100 เพื่อต้องการลดปริมาณสัญญาณรบกวนของกล้องซึ่งจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อค่า ISO มีค่าสูง ปรับค่ารูรับแสงที่ 5.6 จากนั้นทำการตั้งเวลาในการถ่ายภาพตั้งแต่ 1 นาทีไปจนถึง 6 นาที โดยทำการเพิ่มเวลาในการถ่ายภาพครั้งละ 1 นาที จากนั้นนำภาพถ่ายที่ได้มาหาปริมาณสัญญาณรบกวนของแต่ละภาพที่เวลาต่าง ๆ

4.4.2 ผลการวิจัย

จากการทดลองถ่ายภาพโดยการเปลี่ยนระยะเวลาในการถ่ายภาพตั้งแต่ 1 นาที จนถึง 6 นาที แล้วนำภาพถ่ายที่ได้ไปคำนวณหาปริมาณสัญญาณรบกวนของภาพถ่าย ได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 4.3 และได้กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยความสว่างกับเวลาในการถ่ายภาพ ดังรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.3 สัญญาณรบกวนที่เวลาต่าง ๆ

เวลา(นาที)	1	2	3	4	5	6
Noise	0.208	0.354	0.406	0.453	0.484	0.524



รูปที่ 4.13 กราฟปริมาณสัญญาณรบกวนเทียบกับเวลา

4.4.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.13 พบว่าปริมาณสัญญาณรบกวนของภาพมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ

ดังนั้นการเลือกใช้เวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ต้องพิจารณาปริมาณสัญญาณรบกวนที่เป็นผลมาจากรังสีของบริเวณที่ทำการถ่ายภาพ และความร้อนที่จะเกิดขึ้นกับชิพที่ทำหน้าที่ในการรับภาพของกล้อง ซึ่งยิ่งใช้เวลาในการถ่ายภาพนานมากขึ้นจะทำให้ภาพที่ได้มีปริมาณสัญญาณรบกวนมากเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

4.5 เปรียบเทียบขนาดรูรับแสงที่มีผลต่อคุณภาพของภาพถ่าย

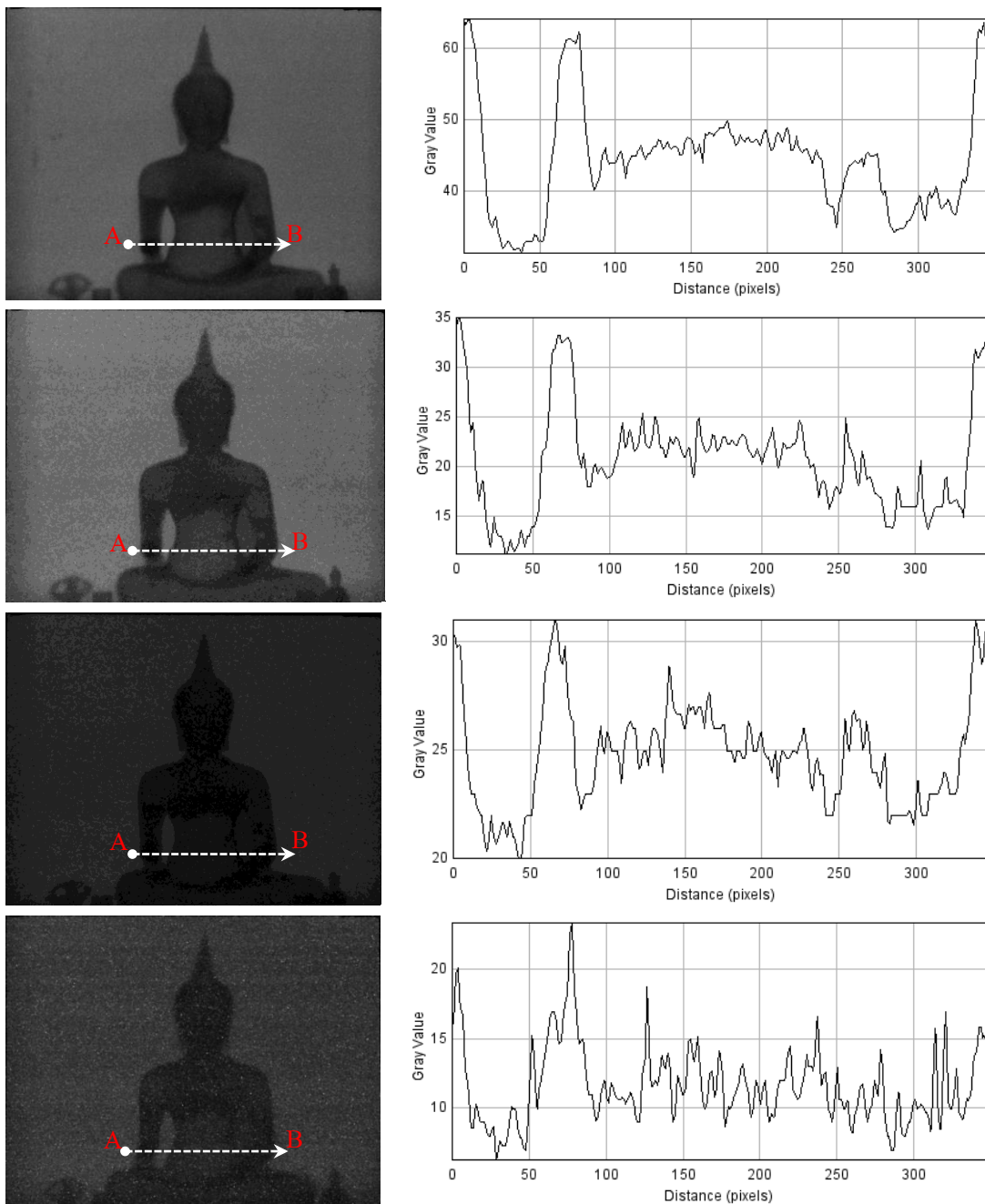
4.5.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

(1) ทำการปรับค่า ISO ของกล้องเป็น 100 และทำการปรับค่ารูรับแสงตั้งแต่ 5.6, 8, 10, 16 ตามลำดับ และใช้เวลาในการถ่ายภาพแต่ละค่ารูรับแสงนาน 3 นาที

(2) ลากเส้นจาก A ไปยังจุด B เพื่อสร้างโพรไฟล์เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ภาพ

4.5.2 ผลการวิจัย

จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุชนิดเดียวกัน โดยการเปลี่ยนค่ารูรับแสงของกล้องดิจิทัลจะ
ได้ภาพที่มีโปรไฟล์ความสว่างแตกต่างกันทั้ง 4 ภาพดังที่แสดงที่รูป 4.14



รูปที่ 4.14 โปรไฟล์ภาพถ่ายที่ค่ารูรับแสงต่างกัน

ก. รูรับแสงที่ 5.6 ข. รูรับแสงที่ 8 ค. รูรับแสงที่ 10 ง. รูรับแสงที่ 16

4.5.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาภาพถ่ายที่แสดงในรูปที่ 4.14 จะเห็นว่าโพรไฟล์ของภาพถ่ายที่ได้นั้นมีค่าไม่เท่ากันเมื่อมีการปรับเปลี่ยนค่ารูรับแสงของกล้อง ซึ่งภาพถ่ายจะมีความสว่างมากเมื่อค่ารูรับแสงมีค่าน้อยซึ่งค่าที่น้อยที่สุดของกล้องที่สามารถปรับได้คือ f5.6 ซึ่งจะทำให้ความกว้างของรูรับแสงเปิดกว้างมากที่สุด ในทางตรงกันข้ามเมื่อปรับค่ารูรับแสงให้มีค่าเพิ่มมากขึ้นก็จะทำให้ภาพที่ถ่ายออกมามีความสว่างลดน้อยลง ซึ่งเป็นผลมาจากขนาดของรูรับแสงเปิดกว้างน้อยลง และเมื่อพิจารณาโพรไฟล์ของแต่ละภาพจากจุด A ไปยังจุด B พร้อมกันไปด้วยจะเห็นว่า คุณภาพของภาพถ่ายในแง่ของความคมชัดของภาพ และความเปรียบต่างของภาพนั้น ค่ารูรับแสงที่ f5.6 จะให้คุณภาพของภาพถ่ายออกมามีค่าดีที่สุดเมื่อเทียบกับค่ารูรับแสงค่าอื่นๆ ซึ่งค่าความแตกต่างในแนวแกน y ของโพรไฟล์ที่เส้นสีขาวลากผ่านในภาพเดียวกันจะบ่งบอกถึงค่าความเปรียบต่างของภาพถ่าย ยิ่งค่าในแนวแกน y มีความแตกต่างของความสว่างมากก็จะทำให้ความเปรียบต่างของภาพนั้นสูง ส่วนการพิจารณาความคมชัดของภาพถ่ายนั้นจะพิจารณาที่ความชันของกราฟภาพถ่ายตรงตำแหน่งที่เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงในแนวแกน x

ดังนั้นค่ารูรับแสงที่ให้คุณภาพของภาพถ่ายดีที่สุดของกล้องที่สามารถปรับได้ในการทดลองนี้คือ f5.6

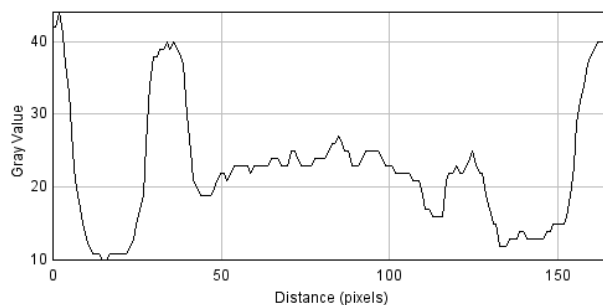
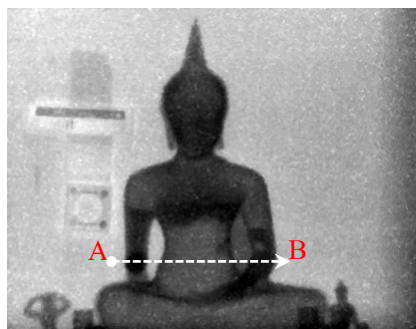
4.6 เปรียบเทียบภาพถ่ายที่ถ่ายนาน 3 นาทีนำมาซ้อนทับกันกับภาพที่ถ่ายนาน 6 นาที

4.6.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

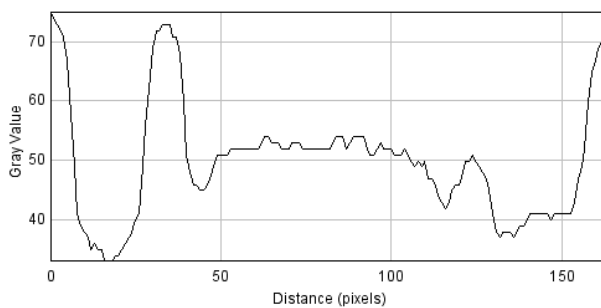
- (1) ทำการปรับค่า ISO ของกล้องเป็น 100 ค่ารูรับแสงที่ f5.6 และใช้เวลาในการถ่ายภาพแต่ละภาพนาน 3 และ 6 นาที
- (2) ถ่ายภาพที่ใช้เวลานาน 3 นาทีจำนวน 2 ครั้งจากนั้นทำการถ่ายภาพนาน 6 นาที 1 ครั้ง
- (3) สร้างโพรไฟล์ภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์จากจุด A ไปยังจุด B ที่ ดังที่ตัวอย่างที่แสดงในรูปที่ 4.15

4.6.2 ผลการวิจัย

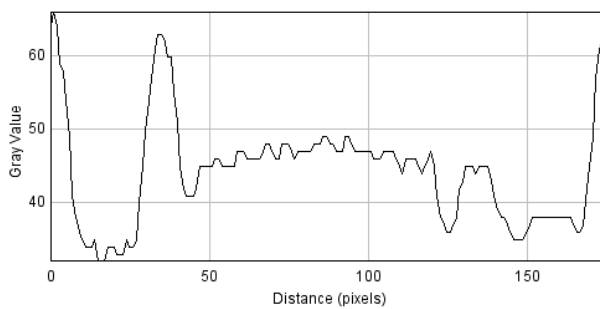
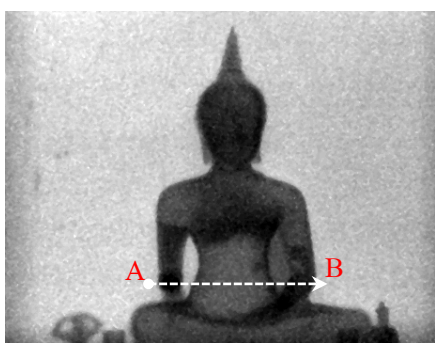
จากการทดลองถ่ายภาพวัตถุชนิดเดียวกัน ที่เวลาถ่ายนานต่างกันจำนวน 3 ภาพเมื่อนำภาพทั้งหมดมาสร้างโพรไฟล์ภาพเพื่อใช้ในการวิเคราะห์ และปริมาณสัญญาณรบกวน จะได้โพรไฟล์ภาพและปริมาณสัญญาณรบกวนดังที่แสดงในรูปและตารางด้านล่าง



รูปที่ 4.15 ภาพถ่าย 3 นาที



รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย 3 นาที 2 ภาพซ้อนทับกัน



รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย 6 นาที

ตารางที่ 4.4 จำนวนสัญญาณรบกวนของภาพแบบซ้อนทับกัน

เวลาในการถ่ายภาพ	จำนวนสัญญาณรบกวน (pixel)
3 นาที	910
3 นาที 2 ภาพซ้อนทับกัน	2109
6 นาที	1368

4.6.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาโพรไฟล์ภาพที่เวลาถ่ายต่าง ๆ จะพบว่าตำแหน่งที่เส้นลากผ่านวัตถุที่ถ่ายนั้น โพรไฟล์ที่ได้จากภาพที่ถ่าย 3 นาที 2 ภาพแล้วนำมาซ้อนทับกันจะได้โพรไฟล์ที่ใกล้เคียงกับภาพที่ได้จากการถ่ายนาน 6 นาที และมีค่าเฉลี่ยความสว่างเฉลี่ยประมาณ 2 เท่าของภาพที่ถ่ายนาน 3 นาที นอกจากนั้นแล้วการซ้อนทับกันของภาพ 2 ภาพยังให้รายละเอียดของวัตถุที่ถ่ายเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่เมื่อพิจารณาปริมาณสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นบนภาพถ่ายดังที่แสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าการซ้อนทับกันของภาพจะเป็นการรวมสัญญาณรบกวนของภาพทั้ง 2 ภาพเข้าด้วยกัน และมีค่าที่มากกว่าการถ่ายภาพนาน 6 นาที

ดังนั้นในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 3 นาทีจำนวน 2 ภาพแล้วนำภาพมาซ้อนทับกัน จะสามารถทำให้พิจารณารายละเอียดของวัตถุที่ถ่ายได้ดียิ่งขึ้น และไม่ทำให้ชิพที่รับภาพร้อนจนเกินไป ซึ่งอาจทำให้เกิดสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้นตามมา

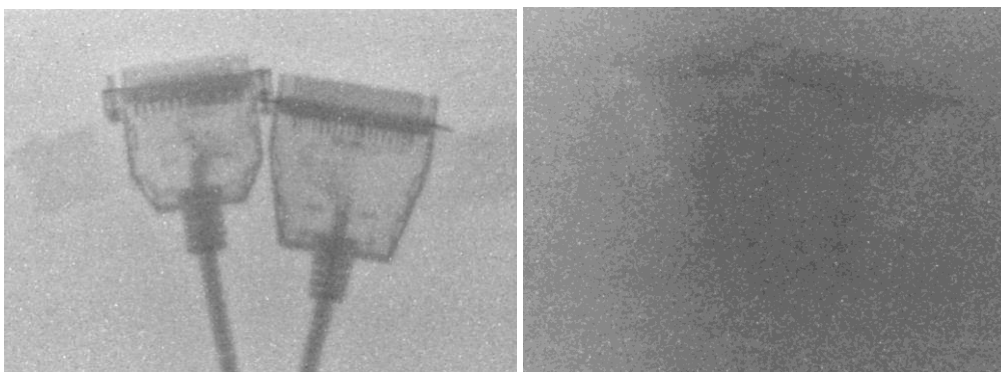
4.7 การหาปริมาณแกมมาที่ประปรายกับนิวตรอนที่ปรากฏในภาพถ่าย

4.7.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

- (1) ทำการปรับค่า ISO ของกล้องเป็น 100 และใช้เวลาในการถ่ายภาพแต่ละภาพนาน 3 นาที และปรับรูรับแสงที่ f5.6
- (2) ถ่ายภาพวัตถุที่ไม่ติดตั้งแผ่นแคดเมียมทางด้านหน้าของวัตถุ หลังจากนั้นถ่ายภาพที่มีแผ่นแคดเมียมหนา 1 มิลลิเมตรที่วางอยู่ด้านหน้าวัตถุ
- (3) นำภาพทั้งสองมาลบกันเพื่อคำนวณหาปริมาณรังสีแกมมาที่ทะลุมาจากรังสี

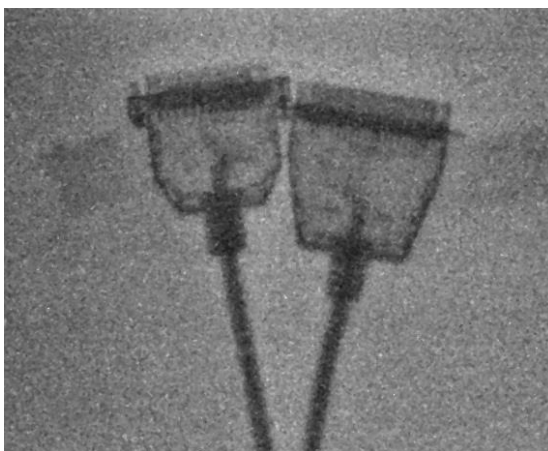
4.7.2 ผลการวิจัย

จากการถ่ายภาพแบบไม่ใช้แผ่นแคดเมียม และแบบที่ใช้แผ่นแคดเมียมบัง แล้วนำภาพทั้งสองมาลบกันจะได้ภาพที่แสดงในรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายที่ไม่มีแผ่นแคดเมียมบัง

รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายวัตถุที่มีแผ่นแคดเมียมบัง



รูปที่ 4.20 ภาพที่เกิดจากการนำ 2 ภาพมาลบกัน

4.7.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากการทดลองถ่ายภาพหาปริมาณรังสีแกมมาที่ปะปนมากับเทอร์มัลนิวตรอน รูปที่ 4.18 เป็นภาพถ่ายปกติที่ไม่มีการกำบังรังสีนิวตรอน โดยแผ่นแคดเมียม โดยภาพถ่ายที่ปรากฏเกิดจากอันตรกิริยาที่ได้จากจากรังสีแกมมา และนิวตรอน ส่วนรูปที่ 4.19 คือภาพถ่ายที่ได้จากการนำแผ่นแคดเมียมมาบังลำรังสีนิวตรอนจึงมีเพียงรังสีแกมมาเท่านั้นที่ทำอันตรกิริยากับวัตถุ และจากเรื่องรังสี ทำให้ภาพของวัตถุที่ถ่ายนั้นไม่ปรากฏบนฉาก เมื่อนำภาพทั้งสองมาทำการลบกัน จะได้ภาพที่

แสดงในรูปที่ 4.20 ซึ่งจะเป็นภาพถ่ายที่เกิดจากอันตรกิริยาของนิวตรอนเพียงอย่างเดียว นั้นแสดงว่าลำรังสีนิวตรอนที่ใช้ในการทำการวิจัยมีปริมาณของรังแกมมาปะปน

4.8 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างมาตรฐานด้วยนิวตรอน

4.8.1 วิธีการดำเนินการวิจัย

(1) ทำการปรับค่า ISO ของกล้องเป็น 100 และใช้เวลาในการถ่ายภาพแต่ละภาพนาน 3 นาที และปรับรูรับแสงที่ f5.6

(2) ถ่ายวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Test Strip B โดยใช้ฉากเรืองรังสีชนิด PI-200 ฉากเรืองรังสีชนิด DRZ Std และฉากเรืองรังสีชนิด NE426

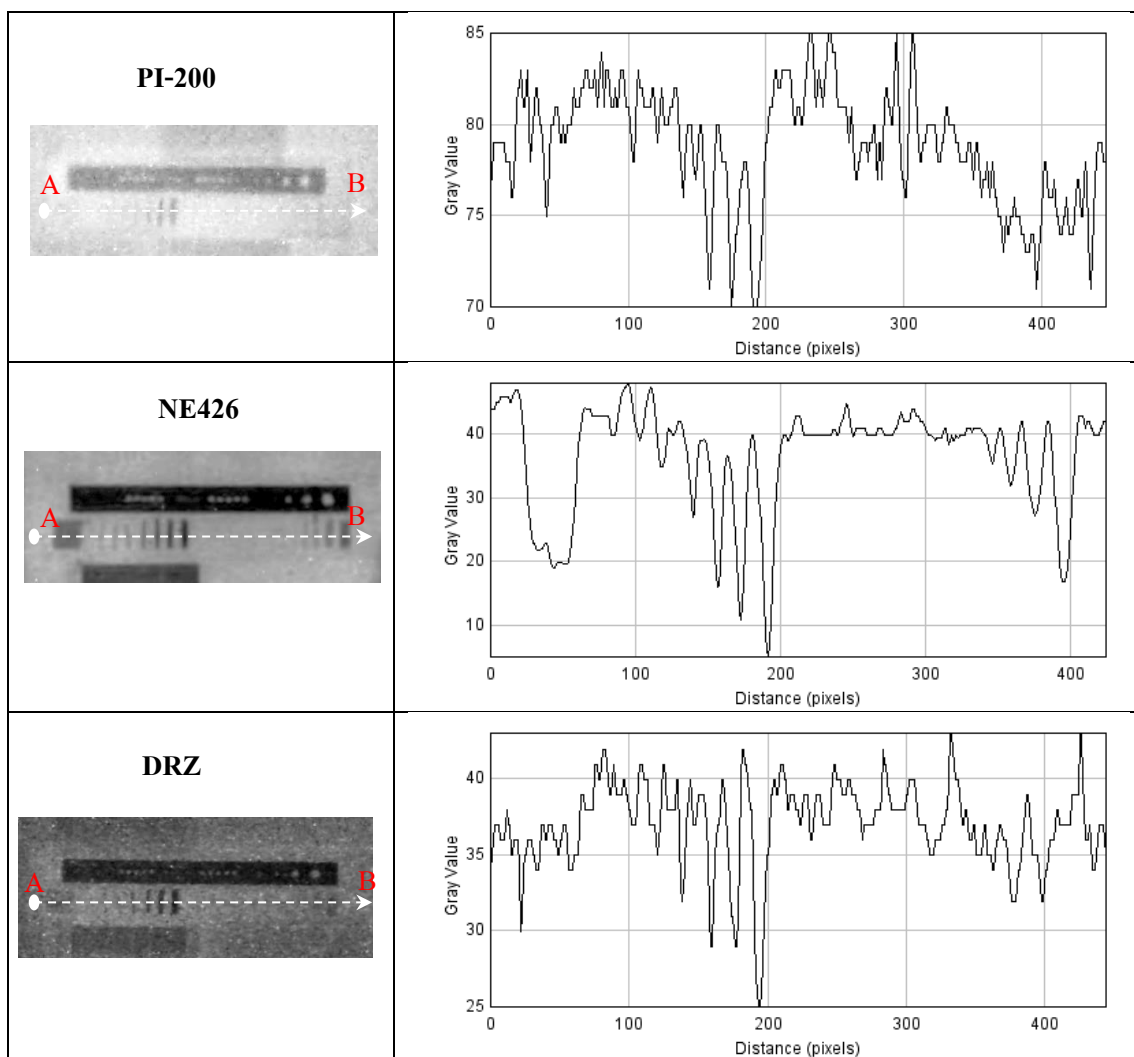
(3) เปรียบเทียบความเปรียบต่าง ความไวของภาพถ่าย และความคมชัดของภาพ

4.8.2 ผลการวิจัย

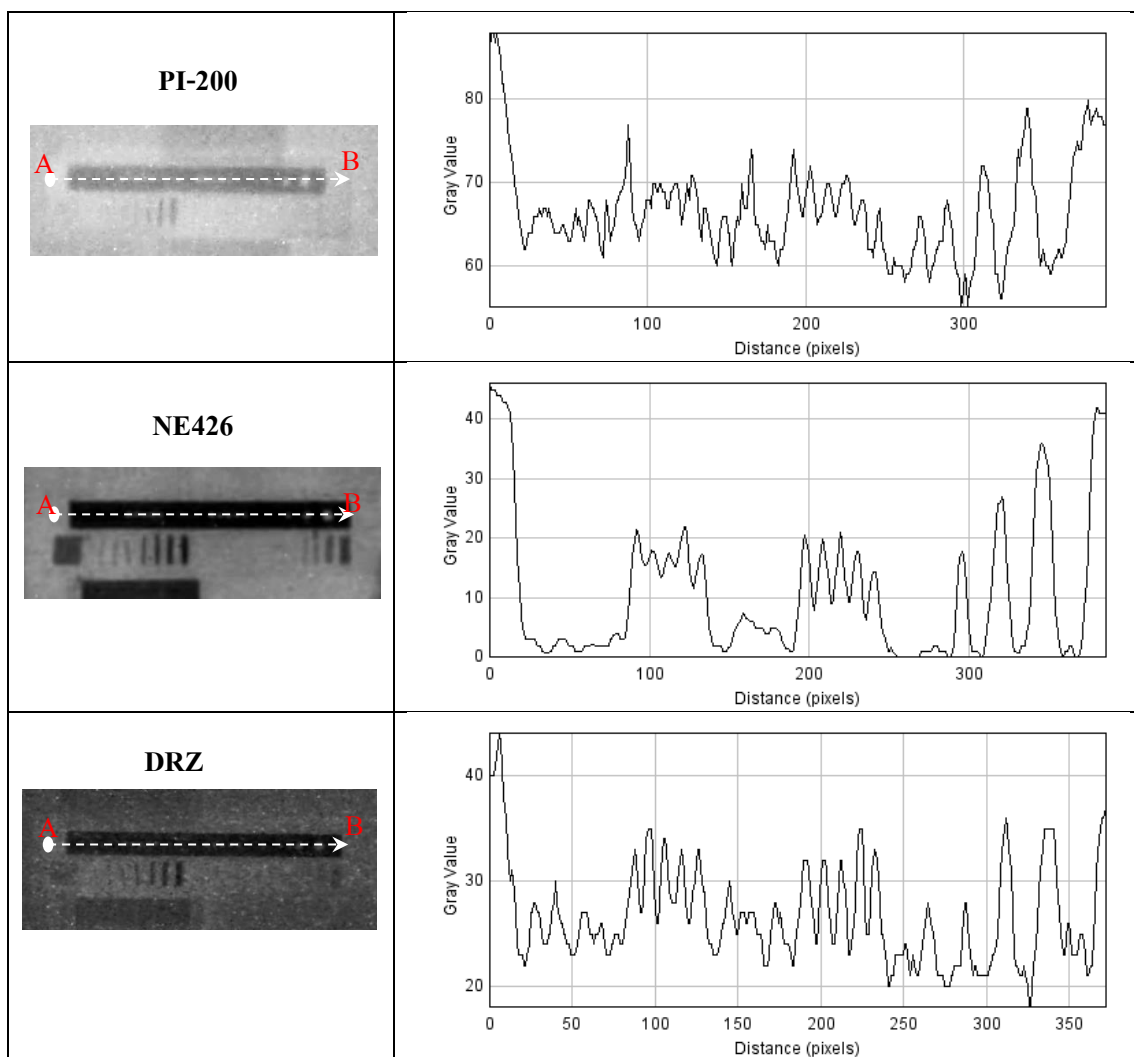
ความคมชัด และค่าความไวที่ได้จากการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Test Strip B ของฉากเรืองรังสีทั้ง 3 ชนิด แสดงตามตารางที่ 4.5 และโพรไฟล์เปรียบเทียบความไวภาพ และความคมชัด ทั้งก่อนและหลังการปรับค่าเฉลี่ยความสว่างของภาพของฉากเรืองรังสีทั้ง 3 ชนิด เพื่อเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายได้ง่ายขึ้นดังที่แสดงในรูปที่ 4.21, 4.22 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.5 เปรียบเทียบความคมชัด และความไวของภาพถ่าย

ชนิดของฉากเรืองรังสี	ความคมชัดของภาพ	ความไวของการถ่ายภาพ
	ขนาดของรูแคคเมียม (มม.)	ขนาดของเส้นแคคเมียม (มม.)
PI-200	0.5	0.37
DRZ Std	0.5	0.37
NE426	1	0.15



รูปที่ 4.21 โพรไฟล์เปรียบเทียบความไวของภาพถ่ายของฉากรชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 4.22 โพรไฟล์เปรียบเทียบความคมชัดของภาพถ่ายของฉากชนิดต่าง ๆ

4.8.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

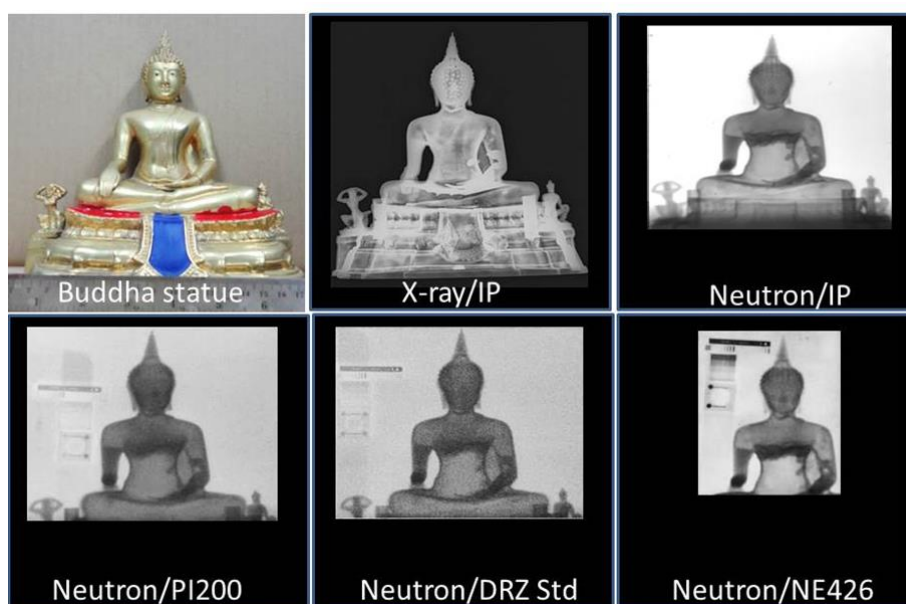
จากการทดลองหาความคมชัด และความไวของภาพถ่ายด้วยการถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Test Strip B ด้วยนิวตรอนจะได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 ซึ่งฉากชนิด PI-200 และฉาก DRZ Std สามารถมองเห็นขนาดของรูแคดเมียมที่ 0.5 มิลลิเมตร ส่วนฉากชนิด NE426 สามารถมองเห็นขนาดของรูแคดเมียม 1 มิลลิเมตร แต่ฉากชนิด DRZ Std จะให้คุณภาพของภาพถ่ายดีกว่าฉากชนิด NE426 และ PI-200 ดังที่แสดงโพรไฟล์รูป 4.22 เมื่อพิจารณาความไวของภาพถ่าย ฉากชนิด NE426 จะมีความไวดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับฉาก PI-200 และฉาก DRZ Std ซึ่งขนาดของเส้นแคดเมียมที่ฉากชนิด NE426 ถ่ายได้มีขนาด 0.15 มิลลิเมตร ส่วนฉากชนิด PI-200 และ DRZ Std ถ่ายได้มีขนาด 0.37 มิลลิเมตรดังที่แสดงโพรไฟล์รูป 4.21

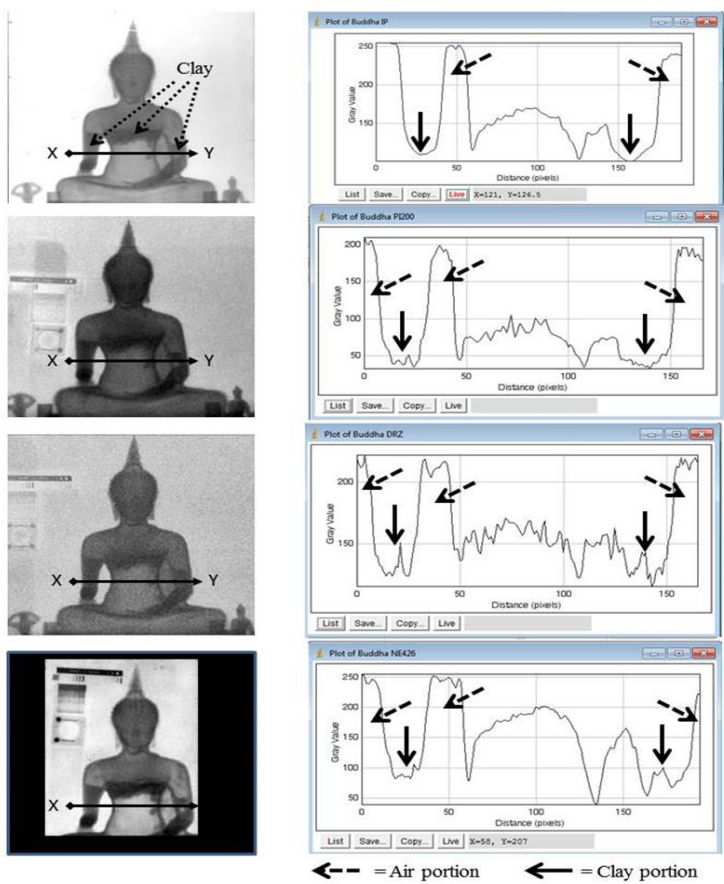
4.9 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่าง

4.9.1 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสีชนิดต่าง ๆ และการบันทึกภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยแผ่นบันทึกภาพ

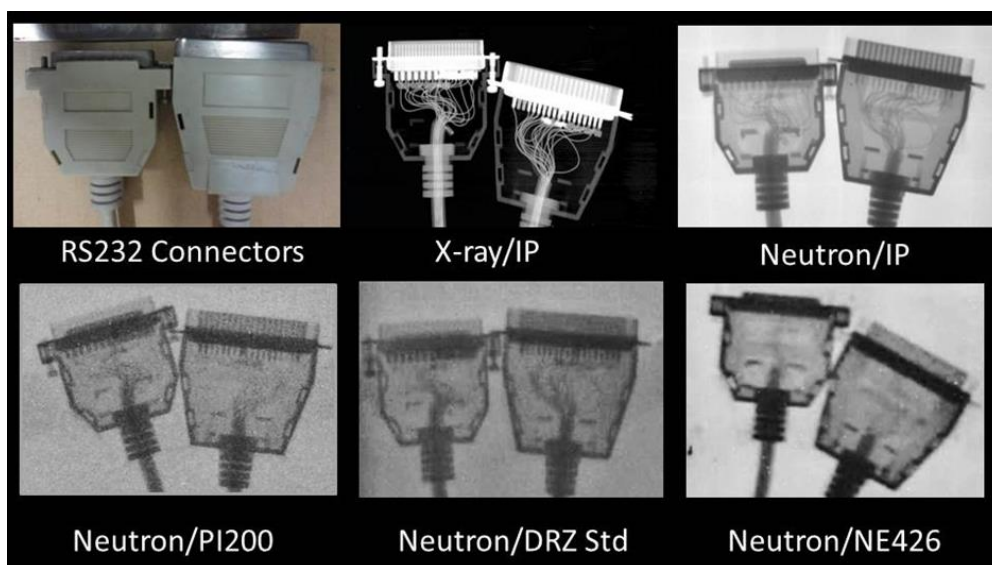
วัตถุตัวอย่างที่นำมาถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วย พระพุทธรูปโลหะสำริด กระบอกไฟฉาย และ Connector RS232 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างประกอบด้วย การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสีชนิด PI-200, NE426, DRZ Std, การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ (Imaging plate) และการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นบันทึกภาพ โดยการปรับตั้งค่ากล้องที่ ISO 100, f5.6, และใช้เวลาในการถ่ายภาพนาน 3 นาที ซึ่งเป็นค่าที่ได้จากการทดลอง

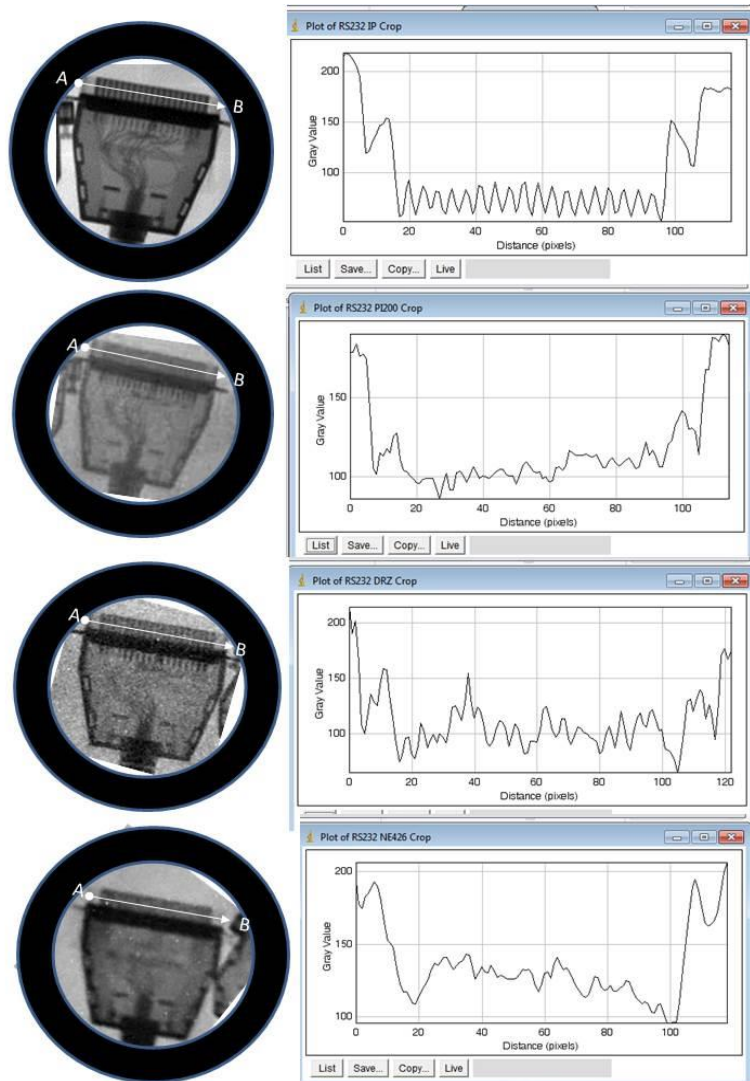
4.9.2 ผลการวิจัย



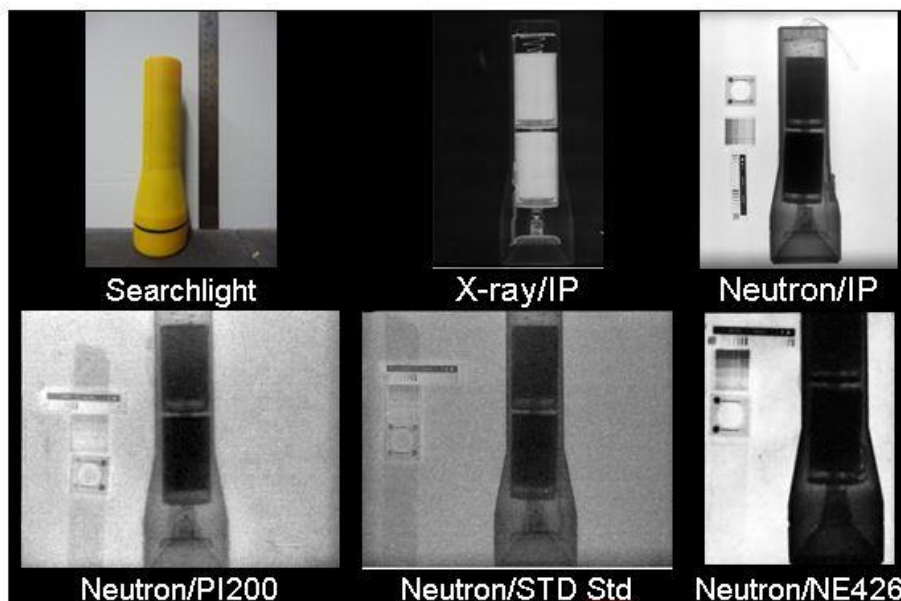


รูปที่ 4.23 พระพุทธรูป โพรไฟล์ภาพถ่ายตามแนวเส้น X-Y ที่ลากผ่านของ IP, PI200, DRZ Std และ NE426





รูปที่ 4.24 Connector RS232 โพรไฟล์ภาพถ่ายตามแนวเส้น A-B ที่ลากผ่านของ IP, PI200, DRZ Std และ NE426



รูปที่ 4.25 กระจกไฟฉาย ของจากชนิด IP, PI200, DRZ Std และNE426

4.9.3 วิเคราะห์ผลการวิจัย

จากรูปที่ 4.23 พระพุทธรูป เมื่อพิจารณาโพรไฟล์ของวัตถุที่นำมาถ่ายภาพโดยใช้ฉากเรืองรังสีแต่ละชนิด พบว่าแผ่นบันทึกภาพและจากทุกชนิด สามารถแยกแยะส่วนที่เป็นอากาศ ดินน้ำมัน และโลหะ ได้ดี แต่ภาพจากแผ่นบันทึกภาพให้รายละเอียดดีที่สุดเช่นเดียวกับภาพอื่น ๆ

เมื่อพิจารณาโพรไฟล์รูปที่ 4.36 หัวต่อ RS232 ที่ถ่ายด้วย แผ่นบันทึกภาพสามารถให้ให้รายละเอียดของหัวต่อ RS-232 ที่เป็นเข็มโลหะเรียงต่อกันดีกว่าฉากเรืองรังสีทั้งสามชนิด ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากการที่แผ่นบันทึกภาพมีความไวต่อรังสีแกมมาที่ปะปนมากับลำนิวตรอนมากกว่าฉากทั้งสามชนิด จึงเห็นเข็มโลหะแยกแยะกันชัดเจนดีมาก ส่วนภาพจากฉากทั้งสามชนิดแยกรายละเอียดส่วนนี้ได้ไม่ชัดเจนเนื่องจากมีความไวกับรังสีแกมมาน้อยกว่าแผ่นบันทึกภาพมาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสี แกโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์ (เทอร์เบียม) $[Gd_2O_2S(Tb)]$ ชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องถ่ายภาพดิจิทัล สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมเพื่อถ่ายภาพผลิตภัณฑ์ และสามารถนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบภายในของวัตถุโบราณ ซึ่งเป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายวัตถุตัวอย่าง ซึ่งประหยัดเวลาในการบันทึกภาพ และการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุตัวอย่าง ที่ได้ผลรวดเร็วยิ่งขึ้น จากงานวิจัย และพัฒนา ระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเรืองรังสี แกโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์ชนิด PI-200 สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วย ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ ปริมาณวิจัย ปว.-1/1 ที่มีความเข้มของกระแสเทอร์มัลนิวตรอนที่ผ่านคอลลิเมเตอร์แล้วที่ประมาณ 1×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ที่ระยะ 1 เมตร และใช้ฉากเรืองรังสีแกโดลิเนียมออกซีซัลไฟด์ชนิด PI-200 ร่วมกับกล้องดิจิทัลที่ต่อเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊กเพื่อใช้ในการบันทึกภาพ และวิเคราะห์ภาพถ่าย

5.1.2 การปรับค่า ISO ของกล้องดิจิทัลที่ให้ค่าเฉลี่ยความสว่าง และปริมาณสัญญาณรบกวนที่เกิดบนภาพถ่ายที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพคือ ISO 100

5.1.3 เวลาที่ใช้ในการเปิดหน้ากล้องดิจิทัลที่ให้ค่าเฉลี่ยความสว่าง และปริมาณสัญญาณรบกวนที่เหมาะสม ที่สามารถพิจารณารายละเอียดภายในของวัตถุตัวอย่างคือ 3 นาที

5.1.4 ค่ารับแสงของกล้องดิจิทัล ที่ทำให้ภาพถ่ายมีความคมชัด และความเปรียบต่างของภาพถ่ายที่เหมาะสมคือ f5.6

5.1.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนของวัตถุชนิดเดียวกันจำนวน 2 ภาพ แล้วนำภาพมาซ้อนทับกัน จะให้คุณภาพของภาพถ่ายดีกว่าการถ่ายภาพเพียงครั้งเดียวซึ่งจะทำให้สามารถพิจารณารายละเอียดได้ดียิ่งขึ้น

5.1.6 จากคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากระบบที่พัฒนาขึ้น พบว่ามีปริมาณรังสีแกมมาปะปนมากับนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพ

5.1.7 การเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายของฉากเรื่องรังสีทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ ฉากชนิด PI-200 ฉากชนิด DRZ Std และฉาก NE426 พบว่าฉากเรื่องรังสีชนิด PI-200 สามารถสังเกตเห็นขนาดของรูแคดเมียมขนาด 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นความคมชัดของภาพซึ่งเทียบเท่ากับฉากเรื่องรังสีชนิด DRZ Std แต่ความเปรียบต่างของภาพจะน้อยกว่าฉาก NE426 ส่วนความไวของภาพถ่ายสามารถสังเกตเห็นเส้นลวดแคดเมียมที่มีขนาด 0.37 มิลลิเมตร

5.1.8 จากระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่พัฒนาขึ้นสามารถนำไปถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างบางชนิดได้เช่น คอนเนคเตอร์ RS232 กระจบอกไฟฉาย และ พระพุทธรูป เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับภาพถ่ายจากรังสีเอกซ์ และการบันทึกภาพแบบแผ่นบันทึกภาพ พบว่าสามารถแสดงรายละเอียดของภาพได้ดี

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องดิจิทัล ที่ต้องการรายละเอียดของภาพถ่ายที่มากขึ้นและมีปริมาณของสัญญาณรบกวนที่น้อยลง ควรใช้กล้องดิจิทัลที่มีชิพประมวลผลที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งจะทำให้ปริมาณของสัญญาณรบกวนเกิดขึ้นกับกล้องดิจิทัลน้อยลงเมื่อปรับค่า ISO ของกล้องเพิ่มขึ้น

5.2.2 เลนส์ของกล้องดิจิทัลที่ใช้ในการถ่ายภาพควรจะใช้เลนส์ที่สามารถปรับค่ารูรับแสงได้น้อย ๆ เช่น f1.8 และ f2.0 ซึ่งจะทำให้ได้ภาพที่มีความสว่างของเพิ่มมากขึ้น และยังใช้เวลาในการถ่ายภาพน้อยลง

5.2.3 การส่งข้อมูลภาพถ่ายระหว่างกล้องดิจิทัล และคอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก สามารถใช้เทคโนโลยีไร้สายในการส่งข้อมูล เช่น Wi-Fi และ Bluetooth เป็นต้น ทำให้ไม่ต้องใช้สาย USB ที่ยาวมากในการส่งข้อมูล และยังปลอดภัยจากการรับรังสีโดยไม่จำเป็นในขณะที่ทำการทดลอง

5.2.4 เนื่องจากบริเวณที่ทำการถ่ายภาพมีรังสีที่ส่งผลกระทบต่อตัวกล้องดิจิทัลซึ่งจะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนกับภาพถ่ายดังนั้นควรกำบังรังสีให้กับตัวกล้องดิจิทัลด้วยวัสดุที่เหมาะสม

รายการอ้างอิง

- [1] ศศิพันธุ์ ณ สงขลา. การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.
วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
,2538.
- [2] สรวุฑ ใจเย็น. การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยใช้
แคลิฟอร์เนียม-252. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2545.
- [3] ทิพาพร อติกานต์กุล. การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความ
เข้มต่ำ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาศาสตร์ ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย, 2543.
- [4] A. Abou Mandour . Characterization and Application of the Thermal Neutron Radiography
Beam in the Egyptian Second Experimental and Training Research Reactor (ETRR-2)
- [5] Domanus, J.C., ed. Practical Neutron Radiography. Dordrecht, Netherlands:
KluwerAcademic Publishers, 1992.
- [6] Garrett, D.A., and Berger, H. The Technological Development of Neutron Radiography.
Atomic Energy Review 15 No.2 (June 1977): 125-141.
- [7] Lamarsh, J.R., Introduction to Nuclear Engineering. 2nd ed. Massachusetts :Addison-Wesley
Publishing., 1983.
- [8] Evaluated Nuclear Data File ENDF/B-V (available from and maintained by the National
Nuclear Data Center of Brookhaven National Laboratory).
- [9] Harms, A.A., Physical process and mathematical methods in neutron radiography. Atomic
Energy Review 15, No.2 (June 1977): 147.
- [10] Hawkesworth, M.R., Neutron radiography: Equipment and methods. Atomic Energy Review
15 No.2 (June 1977): 169-220.
- [11] H. Berger (editor), Neutron Radiography. Nondestructive Testing Information Analysis
Center, August 1998.
- [12] บทความสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย (Nuclear society of Thailand articles),
อิมเมจิงเพลท [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.nst.or.th/article/article143/article1439.htm>
[18 เมษายน 2551]

- [13] PI-200 fluorescent screen [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.mcc-phosphor.com/english/products/x-ray/fluorescent/DRZ Std_pi.html [3 ธันวาคม 2554]
- [14] กล่องแคมนอนดิจิตอล [ออนไลน์]. แหล่งที่มา : <http://www.canon.co.th> [3 ธันวาคม 2554]

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายศิวาวุธ ชูรักษา เกิดเมื่อวันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2525 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสุโขทัย สำเร็จการศึกษาปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ในปีการศึกษา 2549 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชานิเวศียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2553 ประสบการณ์การทำงานอดีตวิศวกรบริษัท โลจิสติกส์ อัลลายแอนซ์ (ประเทศไทย) และบริษัท สแต็ทส์ชิพแพ็ค (ประเทศไทย) จำกัด