

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน



นางสาวศรินรัตน์ วงษ์ลี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

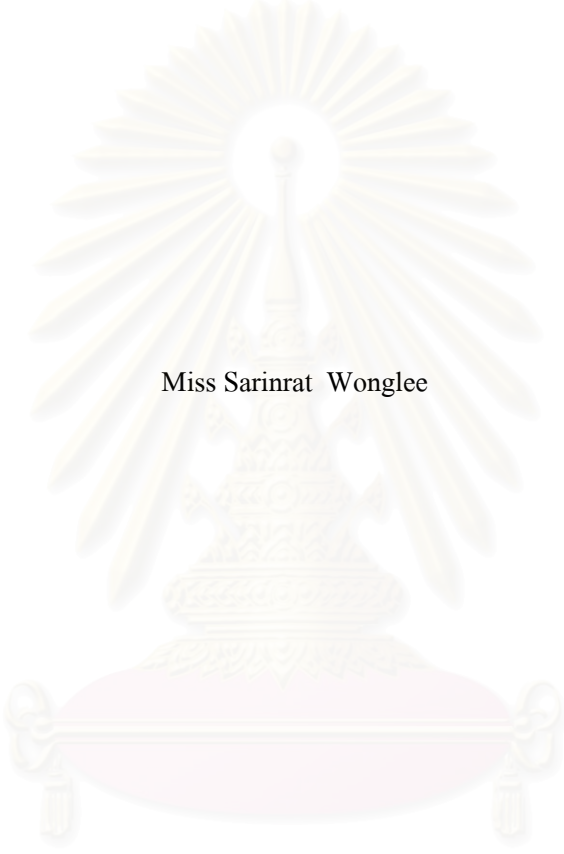
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

NEUTRON RADIOGRAPHY USING NEUTRON IMAGING PLATE



Miss Sarinrat Wonglee

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University


Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

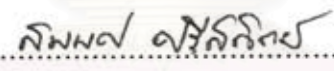
หัวข้อวิทยานิพนธ์	การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน
โดย	นางสาวศรินรัตน์ วงษ์ลี
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


  
..... คณะบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

  
..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

ศรินรัตน์ วงษ์ลี : การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน (NEUTRON RADIOGRAPHY USING NEUTRON IMAGING PLATE)

อ.ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, 70 หน้า.

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน หาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน และทดลองใช้ในการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลาย ในการทดลองได้ทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.-1/1 ที่กำลัง 1.2 เมกกะวัตต์ ด้วยแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนเปรียบเทียบกับระหว่างยี่ห้อ FUJI รุ่น BAS-ND 2040 และฟิล์มรังสีเอกซ์ ยี่ห้อ KODAK รุ่น MX125 กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียม ผลการวิจัยพบว่า ค่าความเข้มแสง (PSL) ที่อ่านได้จะแปรผันตรงกับเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพ และการถ่ายภาพที่ระยะ 120 ซม. เวลาถ่ายภาพ 15 - 25 วินาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุด คือจะให้ภาพที่มีความคมชัดและความเปรียบต่างสูง และยังพบว่าแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนมีความไวกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์ กับฉากแกโดลิเนียมประมาณ 40 เท่า นอกจากนี้ยังได้ศึกษาความไวของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนต่อรังสีแกมมาจากคันทันกำเนิดรังสีอริเดียม-192 ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี ซึ่งได้ผลสรุปว่ามีความไวต่อรังสีแกมมาน้อยกว่าแผ่นบันทึกภาพสำหรับแกมมา FUJI BAS-MS 2040 ประมาณ 5 - 6 เท่า ในขั้นสุดท้ายได้เลือกชิ้นงานบางชนิดมาทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียม เพื่อเปรียบเทียบกับ การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ซึ่งพบว่าสามารถมองเห็นส่วนประกอบที่เป็นธาตุเบาได้ชัดเจนจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนทั้งสองเทคนิค และสามารถสรุปได้ว่าคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนด้วยแผ่นบันทึกภาพทัดเทียมกับ การใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์กับฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียมที่ใช้กันอยู่ทั่วไป แต่สามารถลดเวลาในการถ่ายภาพลงได้ประมาณ 40 เท่า

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
ปีการศึกษา 2550

ลายมือชื่อนิสิต.....*ศรินรัตน์ วงษ์ลี*.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....*นเรศร์ จันทน์ขาว*.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....*สุวิทย์ ปุณณชัยยะ*.....

##4770471121 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : NEUTRON IMAGING PLATE / NEUTRON RADIOGRAPHY

SARINRAT WONGLEE : NEUTRON RADIOGRAPHY USING NEUTRON  
IMAGING PLATE.

THESIS ADVISOR : ASSOC.PROF.NARES CHANKOW, THESIS COADVISOR :  
ASST.PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, 70 PP.

The aims of this research are to study properties of neutron imaging plate, to obtain a suitable condition for neutron radiography and to use the neutron imaging plate for testing of materials nondestructively. The experiments were carried out by using a neutron beam from the Thai Research Reactor TRR-1/M1 at a power of 1.2 MW. A BAS-ND 2040 FUJI neutron imaging plate and a MX125 Kodak X-ray film/Gd neutron converter screen combination were tested for comparison. It was found that the photostimulated light (PSL) read out of the imaging plate was directly proportional to the exposure time. The optimum condition was found to be at 120 cm with the exposure time of 15 - 25 seconds which gave the best image definition and contrast. It was also found that radiography with neutron using the imaging plate was approximately 40 times faster than the conventional x-ray film/Gd converter screen combination. The sensitivity of the imaging plate to gamma-rays was also investigated by using gamma-rays from an Ir-192 radiographic sources. The imaging plate was found to be 5 - 6 times less sensitive to gamma-rays than a FUJI BAS-MS 2040 gamma-ray imaging plate. Finally, some specimens were selected to be radiographed with neutrons using the imaging plate and the x-ray film/Gd converter screen combination in comparison to x-rays. Parts containing light elements could be clearly observed by the two neutron radiographic techniques. It could be concluded that the image quality from the neutron imaging plate was comparable to the conventional x-ray film/Gd converter screen combination but the exposure time could be approximately reduced by a factor of 40.

Department Nuclear Technology

Field of study Nuclear Technology

Academic year 2007

Student's signature.....*Sarinrat Wonglee*.....

Advisor's signature.....*Nares Chankow*.....

Coadvisor's signature.....*Suvit Punnachaiya*.....

## กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีในครั้งนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ  
ภาควิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำนักงานปรมาณูเพื่อ  
สันติ และสถาบันเทคโนโลยีนิเวศวิทยาแห่งชาติ (องค์การมหาชน) ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ และอุปกรณ์  
การทำวิจัย

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์  
ฉบับนี้ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รวมถึงคณะกรรมการสอบ  
วิทยานิพนธ์ และอาจารย์ภาควิชาเทคโนโลยีทุกท่านที่ถ่ายทอดความรู้ คำแนะนำ และ  
ประสบการณ์ต่างๆ แก่ข้าพเจ้าตลอดมา และขอขอบคุณข้าราชการกลุ่มมาตรฐานการวัดรังสี สำนัก  
สนับสนุนการกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ เจ้าหน้าที่  
ฝ่ายตรวจสอบโดยไม่ทำลาย เจ้าหน้าที่กลุ่มงานวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยี ด้านวิทยาการก้าวหน้า  
สถาบันเทคโนโลยีนิเวศวิทยาแห่งชาติ (องค์การมหาชน)

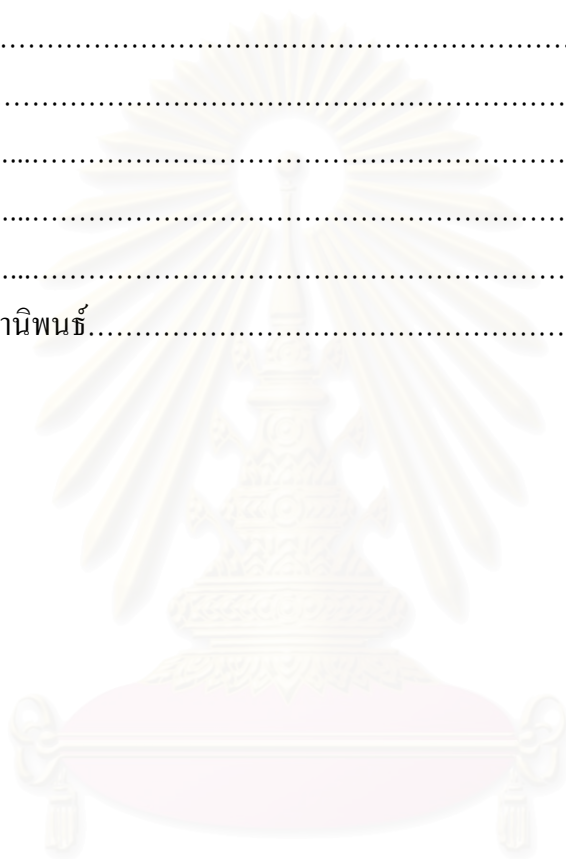
สุดท้ายข้าพเจ้าขอขอบพระคุณครอบครัวของข้าพเจ้า และครอบครัวแก้วสุข ที่คอย  
อบรมสั่งสอน ชี้นำ ให้กำลังใจ และให้ความช่วยเหลือข้าพเจ้าในทุกๆ เรื่องเสมอมา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	5
2.1 นิวตรอน.....	5
2.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน.....	10
3. อุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัย.....	29
3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	29
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	36
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	40
4.1 ผลการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่น บันทึกภาพนิวตรอน.....	40
4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของแผ่นกรองรังสี.....	50
4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติความไวต่อรังสีแกมมาของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน.....	52
4.4 ผลการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนและรังสีเอกซ์หรือแกมมา.....	54

บทที่	หน้า
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	61
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	61
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	63
รายการอ้างอิง.....	64
ภาคผนวก.....	65
ภาคผนวก ก.....	66
ภาคผนวก ข.....	67
ภาคผนวก ค.....	68
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	70



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน.....	5
2.2 ค่าเทอร์มัลไลเซนชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด.....	10
2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท ( $\alpha, n$ ).....	12
2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	18
2.5 แสดงค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	26
2.6 แสดงค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	26
3.1 เงื่อนไขการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยต้นกำเนิดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา.....	39
4.1 แสดงรายละเอียดขนาดชิ้นงานที่เล็กที่สุด ที่ระยะถ่ายภาพ 80 เซนติเมตร.....	46
4.2 แสดงรายละเอียดขนาดชิ้นงานที่เล็กที่สุด ที่ระยะถ่ายภาพ 100 เซนติเมตร.....	46
4.3 แสดงรายละเอียดขนาดชิ้นงานที่เล็กที่สุด ที่ระยะถ่ายภาพ 120 เซนติเมตร.....	46
4.4 แสดงค่าความเข้มแสงบริเวณแบรคกราวน์ที่ลดลงหลังผ่านแผ่นกรองรังสีชนิดต่างๆ.....	50
4.5 แสดงค่าความเข้มแสงของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและแผ่นบันทึกภาพรังสีแกมมา ที่ ถ่ายด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192.....	52

## สารบัญญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1	7
2.2	9
2.3	10
2.4	14
2.5	14
2.6	15
2.7	16
2.8	19
2.9	20
2.10	21
2.11	22
2.12	23
2.13	23
2.14	24
2.15	24
2.16	27
2.17	27
2.18	28
3.1	31
3.2	31
3.3	32
3.4	32
3.5	33
3.6	33
3.7	34
3.8	34

รูปที่	หน้า
3.9 เครื่องขับฟลอปปีดิสก์.....	34
3.10 ฮาร์ดดิสก์.....	34
3.11 RS-232 คอนเนคเตอร์ 9 PIN.....	35
3.12 RS-232 คอนเนคเตอร์ 25 PIN.....	35
3.13 หัววัดรังสีไอเดียมไอโอไดค์.....	35
3.14 ใช้อุปกรณ์จักรยานยนต์สภาพดี.....	35
3.15 ใช้อุปกรณ์จักรยานยนต์ชำรุด.....	35
3.16 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูฯ.....	36
3.17 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูฯ โดยมีแผ่นกรองรังสี.....	37
3.18 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา.....	38
3.19 ขั้นตอนการล้างฟิล์มเอกซเรย์.....	39
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงกับเวลาถ่ายภาพที่ระยะถ่ายภาพต่างๆ.....	41
4.2 แสดงค่าความเข้มแสงของโพรไฟล์บน Test Strip B ที่ระยะถ่ายภาพ 80 เซนติเมตร.....	41
4.3 แสดงค่าความเข้มแสงของโพรไฟล์บน Test Strip B ที่ระยะถ่ายภาพ 100 เซนติเมตร.....	42
4.4 แสดงค่าความเข้มแสงของโพรไฟล์บน Test Strip B ที่ระยะถ่ายภาพ 120 เซนติเมตร.....	42
4.5 แสดงโพรไฟล์บน Sensitivity Indicator (ซ้าย) และ Test strip B (ขวา) ที่ระยะ 80 ซม....	43
4.6 แสดงโพรไฟล์บน Sensitivity Indicator (ซ้าย) และ Test strip B (ขวา) ที่ระยะ 100 ซม....	44
4.7 แสดงโพรไฟล์บน Sensitivity Indicator (ซ้าย) และ Test strip B (ขวา) ที่ระยะ 120 ซม....	45
4.8 ภาพถ่ายชิ้นงานจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ระยะ 80 ซม. โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพต่างๆ.....	47
4.9 ภาพถ่ายชิ้นงานจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ระยะ 100 ซม. โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพต่างๆ.....	48
4.10 ภาพถ่ายชิ้นงานจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ระยะ 120 ซม. โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพต่างๆ.....	49
4.11 แสดงภาพถ่ายเมื่อใช้แผ่นกรองรังสีชนิดต่างๆ.....	51
4.12 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับเวลาถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192...	52
4.13 แสดงภาพถ่ายจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 เป็นเวลา 1, 2 และ 3 นาที.....	53

รูปที่	หน้า
4.14 แสดงภาพถ่ายจากแผ่นบันทึกภาพเกมมาที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 เป็น เวลา 1, 2 และ 3 นาที .....	53
4.15 ภาพถ่ายชิ้นงานเครื่องจับฟลอปปีดิสก์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ.....	55
4.16 ภาพถ่ายชิ้นงานฮาร์ดดิสก์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ.....	56
4.17 ภาพถ่ายชิ้นงานคอนเนคเตอร์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ.....	57
4.18 ภาพถ่ายชิ้นงานหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ.....	58
4.19 ภาพถ่ายชิ้นงานใช้อัปรถจักรยานยนต์สภาพดีจากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ.....	59
4.20 ภาพถ่ายชิ้นงานใช้อัปรถจักรยานยนต์ชำรุดจากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ.....	60
ก-1 แสดงลักษณะโปรแกรม Image Reader BAS-2500.....	66
ข-1 แสดงลักษณะโปรแกรม Image Gauge Version 4.0.....	67

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การถ่ายภาพด้วยรังสีเป็นวิธีหนึ่งของการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่าง (Non Destructive Testing : NDT) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา โดยการตรวจสอบด้วยรังสีดังกล่าว จะให้ผลที่ดีสำหรับวัสดุต่างๆ ที่มีเนื้อเดียวกัน เช่น พลาสติก งานเชื่อม งานหล่อด้วยโลหะ เป็นต้น แต่ในกรณีที่มีโลหะหนักปนอยู่กับวัสดุที่มีเลขอะตอมต่ำๆ นั้น ภาพถ่ายที่ได้จะเห็นรายละเอียดเฉพาะส่วนที่เป็นโลหะหนักเท่านั้น เนื่องจากโลหะหนักสามารถดูดกลืนความเข้มของรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าจากรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาได้ดี ทำให้รายละเอียดบนฟิล์มเห็นโลหะหนักค่อนข้างชัดเจนกว่าวัสดุอื่นๆ

การตรวจสอบวัสดุด้วยการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายพอสมควร โดยเฉพาะอย่างยิ่งการตรวจสอบวัสดุกัมมันตรังสี เชื้อเพลิงนิวเคลียร์และวัสดุที่มีส่วนประกอบเป็นธาตุเบา เช่น พลาสติก ยาง พอลิเมอร์ เรซิน น้ำ น้ำมัน และวัตถุระเบิด หรือวัสดุที่ประกอบด้วยธาตุที่มีค่าภาคตัดขวางต่อการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนสูง เช่น โบรอน (B) ลิเทียม (Li) แคลเซียม (Ca) เป็นต้น ซึ่งเมื่ออยู่ปะปนหรือถูกห่อหุ้มด้วยธาตุหนักแล้ว การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาไม่สามารถเห็นส่วนที่เป็นธาตุเบาได้ เนื่องจากคุณสมบัติของนิวตรอนในการทำปฏิกิริยากับวัสดุแต่ละชนิดจะแตกต่างจากรังสีที่เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือ รังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมามีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนแปรผันตามเลขอะตอมของวัสดุ แต่นิวตรอนจะมีค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนไม่เป็นสัดส่วน โดยตรงกับเลขอะตอม ดังนั้นการถ่ายด้วยนิวตรอนจึงสามารถให้รายละเอียดของวัสดุในส่วนนี้ชัดเจนยิ่งขึ้น

ในปัจจุบันการถ่ายภาพด้วยรังสีได้มีการพัฒนาในส่วนของการบันทึกภาพขึ้น คือ ได้มีการผลิตคิดค้นแผ่นบันทึกภาพ ขึ้นมาเพื่อแทนการใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ (X-ray Film) หรือฟิล์มถ่ายภาพ ซึ่งการบันทึกภาพด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์ใช้เวลาในการถ่ายภาพค่อนข้างนาน และต้องผ่านกระบวนการล้างฟิล์ม เพื่อให้ได้ภาพที่ต้องการ แต่สำหรับแผ่นบันทึกภาพหรือที่เรียกว่า “อิมเมจิงเพลต (Imaging Plate)” จะมีความไวต่อรังสีมากกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์หลายเท่า ทำให้ช่วยลดเวลาในการถ่ายภาพลง สำหรับวิธีการอ่านข้อมูลในแผ่นบันทึกภาพ จะใช้เครื่องสแกนด้วยลำแสงเลเซอร์ในลักษณะข้อมูลเชิงตัวเลขก่อนแสดงผลทางจอภาพคอมพิวเตอร์ (Computed Radiography) ทำให้มีความสะดวกและรวดเร็วในการตรวจสอบชิ้นงานมากยิ่งขึ้น แผ่นบันทึกภาพที่อ่านข้อมูลแล้วสามารถลบข้อมูลปริมาณรังสีที่ค้างอยู่เดิม ก่อนที่จะนำไปใช้งานใหม่ด้วยแสงที่มีความเข้มสูง ทำ

ให้สามารถนำกลับมาใช้งานได้ อีก โดยมีอายุการใช้งานมากกว่า 1000 ครั้ง ซึ่งในประเทศไทย การถ่ายภาพด้วยรังสีโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ ยังเป็นที่รู้จักในวงแคบ และยังไม่มีการใช้งานในการ ตรวจสอบอย่างจริงจัง นอกจากนี้แผ่นบันทึกภาพและเครื่องอ่านข้อมูลภาพมีราคาค่อนข้างสูง ในงานวิจัยนี้จะได้ทำการศึกษาคูณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพด้วยนิวตรอนและศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้ กับวิธีการถ่ายภาพโดยใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ร่วมกับแผ่นแกโดลิเนียม เนื่องจากเป็นวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ ให้ภาพถ่ายที่มีคุณภาพสูงสุด สำหรับเป็นแนวทางในการตรวจสอบวัสดุในทางอุตสาหกรรมต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาคูณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

- 1.3.1 ทดลองถ่ายภาพกับชิ้นงานมาตรฐานที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อศึกษาคูณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน
- 1.3.2 ศึกษาคูณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน เช่น ความคมชัด ความเปรียบต่างของภาพ ความไวต่อรังสีแกมมา เป็นต้น
- 1.3.3 ศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้นิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยปว.-1/1 เช่น เวลาในการถ่ายภาพ และชนิดของแผ่นกรองรังสี เป็นต้น
- 1.3.4 ทดลองถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่าง เช่น อุปกรณ์ต่างๆ ที่มีองค์ประกอบของธาตุนิวเคลียสและหนักปนกัน เปรียบเทียบกับภาพที่ได้จากแผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

## 1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย

- 1.4.1 ศึกษาค้นคว้าเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
- 1.4.2 ทดลองถ่ายภาพกับชิ้นงานมาตรฐานที่เงื่อนไขต่างๆ เพื่อศึกษาคูณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพ และหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

- 1.4.3 ทดลองถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่าง โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน
- 1.4.4 ทดลองถ่ายภาพชิ้นงาน โดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์ กับตัวอย่างชุดเดียวกัน
- 1.4.5 เปรียบเทียบคุณภาพของภาพที่บันทึกโดยแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและภาพจากแผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์
- 1.4.6 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

เข้าใจถึงคุณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน และได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลาย

## 1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.6.1 ศรารุช ใจเย็น. การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มัลนิวตรอนโดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารศึกษาด้านเทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.<sup>[6]</sup>

งานวิจัยนี้เป็นการออกแบบและสร้างระบบต้นแบบสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน รวมถึงการออกแบบระบบกำลังรังสี ระบบห่วงพลังงานนิวตรอน และนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ระบบนี้ใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ขนาด 20 ไมโครกรัม จากแผ่นเปลี่ยนนิวตรอน NE426 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่มีค่า L/D เท่ากับ 20 และอัตราส่วนแคดเมียมเท่ากับ 16.94 โดยมีเทอร์มัลนิวตรอน ฟลักซ์ที่ตำแหน่งถ่ายภาพ  $6.82 \times 10^2$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที จากระบบที่พัฒนาขึ้นนี้ทำให้ลำนิวตรอนที่ผ่านคอลลิเมเตอร์ออกมาก ไม่มีรังสีแกมมาปะปน ทำให้ได้ภาพถ่ายที่มีความดำบนฟิล์ม ความไวในการถ่ายภาพ ความเปรียบต่างและความคมชัดเป็นที่น่าพอใจ และระบบสามารถนำไปใช้ในการถ่ายภาพผลิตภัณฑ์หรือชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิดเพื่อการตรวจสอบโดยไม่ทำลายตัวอย่างได้

1.6.2 อำไพ สุขบำเพ็ญ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ นเรศร์ จันทน์ขาว เดโช ทองอร่าม และ นฤปวิทย์ เงินวิจิตร. การถ่ายภาพรังสีทางอุตสาหกรรมด้วยอริเดียม-192 โดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์กราฟิ. วารสารสมาคมนิวเคลียร์ 4, 1 (2544)<sup>[7]</sup>

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาอริเดียม-192 ซึ่งมีความแรงรังสีต่ำในการถ่ายภาพชิ้นงานทางอุตสาหกรรมโดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์กราฟิ ทำการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับถ่ายภาพแนวเชื่อมชิ้นงานเหล็กที่มีความหนา 20 มม. ด้วย

ต้นกำเนิดรังสีอิริเดียม-192 ความแรง 2.4 คูรี และใช้ระบบคอมพิวเตอร์ราดิโอกราฟีร่วมกับแผ่นบันทึกภาพชนิดความละเอียดสูงของบริษัทฟูจิฟิล์มรุ่น BAS-SR เพิ่มความไวรังสีด้วยการประกบฉากตะกั่วหนา 0.25 มม. ในคาสเซตตัวบรรจุ รวมทั้งลดผลการรบกวนของรังสีกระเจิงโดยวางแผ่นตะกั่วหนา 3 มม. ไว้ด้านหลังของก๊อกลักแผ่นบันทึกภาพ ซึ่งพบว่าภาพถ่ายที่ได้ มีความไวความเปรียบต่าง 2.5 % เมื่อใช้เวลาถ่ายภาพเพียง 3 นาที ซึ่งทัดเทียมกับภาพถ่ายชิ้นงานเดียวกับฟิล์ม Type II ซึ่งใช้เวลาถ่ายภาพ 45 นาที

1.6.3 Kentora Toh. **Optimization of Neutron Imaging Plate for High Speed Read-out Method.** J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001)<sup>[8]</sup>

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาค่าความหนาที่เหมาะสมของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ทำให้ได้ค่าความเข้มแสงที่วัดได้มีค่าสูงสุด (PSL) โดยได้ทำการทดลองนำแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน BAS-ND ของบริษัทฟูจิฟิล์ม ที่ความหนาต่างๆ มาทำการฉายรังสีเอกซ์ และรังสีนิวตรอน พบว่าค่าความหนาของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 6 keV, 20 keV และ 60 keV คือ 12  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  และ 100  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ส่วนค่าความหนาที่เหมาะสมสำหรับ Cold neutron, Thermal Neutron และ Fast neutron คือ 20  $\mu\text{m}$ , 45  $\mu\text{m}$ , และ 100  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

1.6.4 R. Pugliesi and E. Lemann. **Neutron-induced Electron Radiography Using an Imaging Plate.** Applied Radiation and Isotopes 62 (2005) : 457-460<sup>[9]</sup>

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยเปรียบเทียบภาพที่ได้จากฟิล์มรังสีเอกซ์ กับภาพจากแผ่นบันทึกภาพ BAS-MP และใช้แผ่นแกโดลิเนียมหนา 25  $\mu\text{m}$  เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน โดยทำการถ่ายภาพตัวอย่างบางๆ เป็นระดับ  $\mu\text{m}$  พบว่าวิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพ ให้รายละเอียดความแตกต่างของความหนาวัสดุได้ดีกว่าใช้ฟิล์มรังสีเอกซ์ แม้ว่าความหนาในวัสดุนั้นจะแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้แผ่นบันทึกภาพสามารถตอบสนองความเปรียบต่างในย่านกว้างมาก (Dynamic range) และมีความไวสูงกว่าฟิล์มรังสีเอกซ์มาก



## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 นิวตรอน

อนุภาคนิวตรอนถูกค้นพบโดย เจมส์ แชดวิก (James Chadwick)<sup>[1]</sup> นักฟิสิกส์ชาวอังกฤษ เมื่อปี พ.ศ. 2475 ซึ่งได้ทำการทดลองโดยนำแผ่นพอลอเนียม (Polonium foil) มารวมไว้กับเบริลเลียม (Beryllium) เมื่ออนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยออกจากพอลอเนียมเข้าชนกับแผ่นเบริลเลียม มีการปลดปล่อยอนุภาคพลังงานสูงออกมาซึ่งเรียกว่า อนุภาคนิวตรอน อนุภาคนิวตรอนใช้สัญลักษณ์แทนด้วย  ${}^1_0n$  มีมวล 1.0086654 หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit, amu) หรือ  $1.67492 \times 10^{-27}$  กิโลกรัม<sup>[2]</sup> มีประจุไฟฟ้าเป็นกลางจึงมีอำนาจทะลุทะลวงสูง นิวตรอนอิสระเป็นอนุภาคที่ไม่เสถียรจะสลายตัวให้อนุภาคโปรตอน อนุภาคอิเล็กตรอนหรืออนุภาคบีตา และอนุภาคแอนตินิวตริโน โดยมีครึ่งชีวิตประมาณ 12 นาที

##### 2.1.1 ชนิดของนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนเป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุ จึงไม่สามารถเร่งให้มีพลังงานสูงขึ้นได้แต่สามารถเลือกช่วงพลังงานในการใช้งานได้ด้วยการหน่วงนิวตรอน (Neutron Moderation) ซึ่งเป็นการลดพลังงานของนิวตรอนจากพลังงานตั้งต้น โดยการให้นิวตรอนชนกับอะตอมของวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เช่น น้ำ แกรไฟต์ และโพสิเอทีลิน เป็นต้น อนุภาคนิวตรอนแบ่งตามระดับพลังงานได้ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งอาจมีช่วงพลังงานที่เหลื่อมกัน

ตารางที่ 2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน<sup>[3]</sup>

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

## 2.1.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร<sup>[2]</sup>

นิวตรอนเป็นอนุภาคไม่มีประจุ จึงสามารถเข้าทำอันตรกิริยาโดยตรงกับนิวเคลียส อันตรกิริยาของนิวตรอนกับนิวเคลียสสามารถแบ่งได้ดังนี้

2.1.2.1 การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic Scattering) การชนแบบนี้ นิวตรอนจะวิ่งชนนิวเคลียสของอะตอมตัวกลางที่สภาวะปกติ (Ground state) แล้วนิวตรอนกระเจิงออกมาโดยที่เปลี่ยนทิศทางและความเร็วไป ส่วนนิวเคลียสที่ถูกชนยังคงอยู่ที่สถานะพื้น การชนแบบนี้เป็นการแลกเปลี่ยนโมเมนตัมกันเท่านั้น พลังงานจลน์และโมเมนตัมรวมของนิวตรอนและนิวเคลียสของตัวกลางก่อนชนและหลังชนมีค่าคงที่ อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการหน่วงพลังงานนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้า สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ  $(n,n)$

2.1.2.2 การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic Scattering) การชนแบบนี้จะมีลักษณะการชนคล้ายแบบยืดหยุ่น แต่นิวตรอนจะรวมกับนิวเคลียสที่ถูกชน กลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound Nucleus) แล้วปลดปล่อยนิวตรอนตัวหนึ่งออกมา โดยที่นิวเคลียสของตัวกลางอยู่ในสภาวะกระตุ้น (Excited state) เมื่อนิวเคลียสกลับสู่สภาวะปกติ จะปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา ในอันตรกิริยานี้ พลังงานจลน์รวมก่อนและหลังชนมีค่าต่างกัน คือพลังงานจลน์รวมภายหลังการชนมีค่าลดลง เนื่องจากสูญเสียพลังงานจลน์ส่วนหนึ่งไปในรูปของรังสีแกมมา การชนแบบนี้เป็น Threshold Reaction คือนิวตรอนจะต้องมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้นิวเคลียสอยู่ในสภาวะกระตุ้นได้ อันตรกิริยานี้จึงเกิดกับนิวตรอนพลังงานสูง อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการลดพลังงานของนิวตรอนเร็วให้เป็นนิวตรอนช้าเช่นกัน สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ  $(n,n')$

2.1.2.3 อันตรกิริยาแบบจับนิวตรอน (Neutron capture) อันตรกิริยานี้ นิวตรอนจะถูกจับโดยนิวเคลียสของตัวกลางกลายเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ (Compound Nucleus) ทำให้ นิวเคลียสมีเลขมวลเพิ่มขึ้น 1 และมีพลังงานสูงกว่าสภาวะปกติ จึงปลดปล่อยรังสีแกมมาออกมา เรียกว่า “Captured Gamma – rays หรือ Neutron Captured Gamma – ray” ซึ่งอาจมี 1 ตัวหรือมากกว่า อันตรกิริยานี้มีความสำคัญในการผลิตไอโซโทปรังสีและการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการอาบรังสีนิวตรอน (Neutron activation analysis : NAA) สัญลักษณ์ของอันตรกิริยานี้คือ  $(n,\gamma)$

2.1.2.4 ปฏิกิริยาฟิชชัน (Fission Reaction) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุหนักบางชนิด เช่น ยูเรเนียม-235 (Thermal neutron) ยูเรเนียม-238 (Fast neutron) และรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบที่มีพลังงานของนิวตรอนตัวสุดท้ายสูงกว่าพลังงานขีดเริ่มของการแตกตัวของนิวเคลียสเชิงประกอบ จึงทำให้นิวเคลียสเชิงประกอบแตกตัวเป็น 2 ส่วน ได้ นิวเคลียสที่มีมวลประมาณครึ่งหนึ่งของนิวเคลียสเดิม พร้อมกับให้อนุภาคนิวตรอนออกมา 2-3 ตัว

ปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาให้พลังงานสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู (Nuclear reactor) นิยมใช้สัญลักษณ์ของปฏิกิริยาเป็น (n,f)

2.1.2.5 ปฏิกิริยาปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุ (Charge – Particle Emission) เมื่อนิวตรอนชนกับนิวเคลียสของธาตุบางชนิด แล้วรวมตัวเป็นนิวเคลียสเชิงประกอบ จากนั้นจะปลดปล่อยอนุภาคที่มีประจุออกมา เช่น ปฏิกิริยาของนิวตรอนกับโบรอน-10 และปฏิกิริยาของนิวตรอนกับลิเทียม-6 ซึ่งมีความสำคัญในเรื่องการวัดนิวตรอนและการกำบังรังสีนิวตรอน

2.1.2.6 ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน (Neutron – Producing Reaction) ปฏิกิริยานี้เกิดกับนิวตรอนพลังงานสูงประมาณ 10 MeV เพราะต้องดึงอนุภาคนิวตรอนออกจากนิวเคลียส เป็นปฏิกิริยาชนิดดูดกลืนพลังงาน ผลของปฏิกิริยานี้จะได้นิวตรอนออกมามากกว่า 1 ตัว เช่น ปฏิกิริยา (n,2n) ปฏิกิริยา (n,3n)

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

รูปที่ 2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่างๆ<sup>[1]</sup>

### 2.1.3 ภาคตัดขวางของนิวตรอน (Neutron Cross Section)<sup>[2]</sup>

ภาคตัดขวางของนิวตรอน คือ โอกาสในการเกิดอันตรกิริยาระหว่างนิวตรอนกับนิวเคลียสของตัวกลาง การที่อันตรกิริยาแบบใดจะเกิดขึ้นได้หรือไม่ ขึ้นอยู่กับชนิดของนิวเคลียสและพลังงานของนิวตรอน ค่าภาคตัดขวางรวม (Total Cross Section :  $\sigma_t$ ) ของนิวเคลียสชนิดหนึ่งคือผลรวมของภาคตัดขวางรวมของนิวเคลียสต่ออันตรกิริยาทั้งหมดที่สามารถเกิดขึ้นได้ นั่นคือ

$$\sigma_t = \sigma_{(n,n)} + \sigma_{(n,n')} + \sigma_{(n,\gamma)} + \sigma_{(n,\alpha)} + \sigma_{(n,p)} + \sigma_{(n,f)} + \dots \quad (2.1)$$

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

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

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

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

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

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

ค่าภาคตัดขวางจุลภาคสามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก กลุ่มแรก คือ ภาคตัดขวางการกระเจิง (Scattering Cross Section :  $\sigma_s$ ) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่น กลุ่มที่สองคือ ภาคตัดขวางการดูดกลืน (Absorption Cross Section :  $\sigma_a$ ) ซึ่งหมายถึงภาคตัดขวางของอันตรกิริยาอื่นๆ นอกเหนือจากอันตรกิริยาในกลุ่มแรก

ค่าภาคตัดขวางของวัสดุที่มีส่วนประกอบหลายไอโซโทปและหลายธาตุ สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} \Sigma_{mix} &= \Sigma_1 + \Sigma_2 + \Sigma_3 + \dots \\ \Sigma_{mix} &= N_1\sigma_1 + N_2\sigma_2 + N_3\sigma_3 + \dots \end{aligned} \quad (2.2)$$

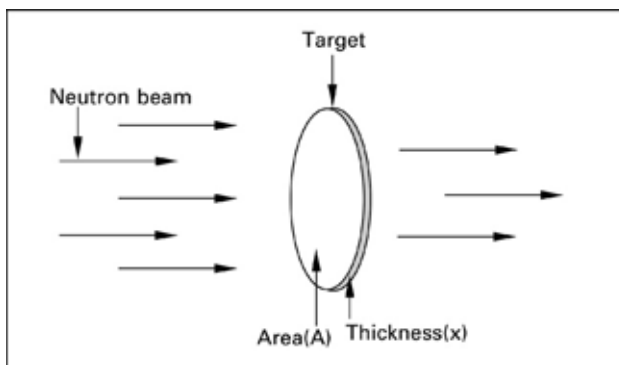
$\Sigma_{mix}$  คือ ค่าภาคตัดขวางมหภาคของวัสดุ

$\Sigma_1, \Sigma_2, \Sigma_3, \dots$  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 ค่าภาคตัดขวางจุลภาคต่ออันตรกิริยาที่สนใจของไอโซโทปหรือธาตุที่

1, 2, 3, ... ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 ลำนิวตรอนกระทบเป้า<sup>[1]</sup>

#### 2.1.4 การลดพลังงานของนิวตรอน

นิวตรอนจากต้นกำเนิดรังสีที่นำมาใช้ มีพลังงานในช่วง 2 MeV ถึง 14 MeV ในขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนต้องการพลังงานในช่วง 0.01 ถึง 10 keV เท่านั้น จึงจำเป็นต้องลดพลังงานของนิวตรอนให้อยู่ในช่วงเทอร์มัลนิวตรอนหรือเอพิเทอร์มัลนิวตรอน โดยใช้สารหน่วงนิวตรอน (Neutron Moderator) ที่เหมาะสม ซึ่งมีภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ เบริลเลียม โพลีเอทิลีน

นิวตรอนเร็วที่ปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิด ทำให้ลดพลังงานลงได้โดยการชนกับตัวหน่วงนิวตรอน จะทำให้ความเข้มข้นสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน (Peak thermal neutron flux) ในตัวหน่วงนิวตรอนลดลงประมาณ 50 ถึง 500 เท่าของอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิด อัตราส่วนการลดลงของความเข้มข้นนิวตรอนนี้เรียกว่า “เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ (Thermalization Factor)”<sup>[1]</sup> โดย

$$\text{เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน (n/s)}}{\text{เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุดในสารหน่วงนิวตรอน (n/cm<sup>2</sup>-s)}} \quad (2.3)$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 ค่าเทอร์รั้มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด<sup>[3]</sup>

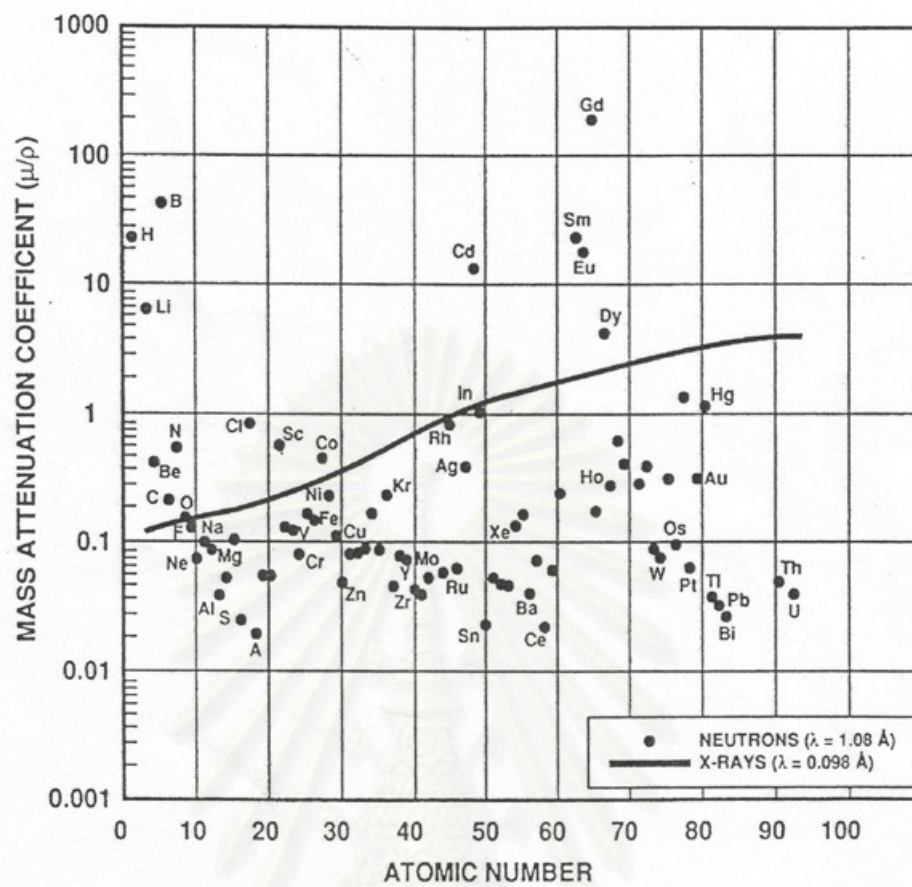
พลังงานนิวตรอน (MeV)	ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน	เทอร์รั้มัลไลเซชันแฟกเตอร์ (cm <sup>2</sup> )
0.024	<sup>124</sup> Sb-Be	<sup>9</sup> Be( $\gamma$ ,n) <sup>8</sup> Be	50
2	<sup>252</sup> Cf	self fission	100
4.5	<sup>241</sup> Am-Be	<sup>9</sup> Be( $\alpha$ ,n) <sup>12</sup> C	200
6.5 *	เครื่องเร่งอนุภาค	<sup>9</sup> Be(d,n) <sup>10</sup> B	300
14 **	เครื่องเร่งอนุภาค	<sup>3</sup> T(d,n) <sup>4</sup> He	650

หมายเหตุ \*เมื่อพลังงานของอนุภาคควิที่รอนเท่ากับ 2.8 MeV

\*\*เมื่อพลังงานของอนุภาคควิที่รอนเท่ากับ 150 MeV

## 2.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นวิธีการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย (Nondestructive : NDT) วิธีหนึ่ง อาศัยหลักการส่งผ่านนิวตรอนผ่านชิ้นงานแล้วทำการบันทึกความเข้มของนิวตรอนที่ทะลุผ่านออกมา ความเข้มของนิวตรอนที่ลดลงขึ้นอยู่กับชนิดและความหนาของวัสดุในชิ้นงาน ภาพที่ถ่ายได้จึงแสดงโครงสร้างภายในตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านชิ้นงานออกมา ซึ่งมีลักษณะกระบวนการคล้ายกันกับวิธีการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา แต่ในช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมาที่ใช้ในการถ่ายภาพ (สูงกว่า 100 keV) ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลมีค่าเพิ่มขึ้นตามเลขอะตอมของธาตุ แต่สำหรับรังสีนิวตรอน สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของนิวตรอนจะไม่ขึ้นตามเลขอะตอม แสดงดังรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของนิวตรอนช้าที่พลังงาน 0.0253 eV และของรังสีเอกซ์ที่พลังงาน 125 keV กับเลขอะตอมของธาตุ ดังนั้นภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยนิวตรอนจึงแตกต่างกับของรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ทำให้ได้ภาพในส่วนที่เป็นธาตุแต่ละชนิดแตกต่างกันไป



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุต่อนิวตรอนเปรียบเทียบกับรังสีเอกซ์พลังงาน 125 keV<sup>[1]</sup>

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนมีส่วนประกอบที่สำคัญ ดังนี้

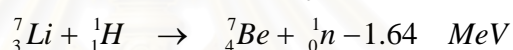
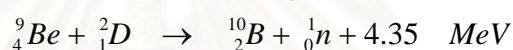
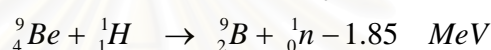
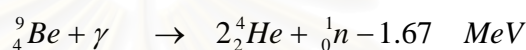
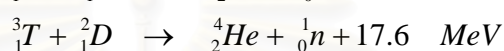
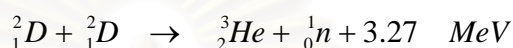
2.2.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน (Neutron Source) ที่ใช้ในการถ่ายภาพแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ

#### 2.2.1.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear Research Reactor)

เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ให้ความเข้มของนิวตรอนสูงสุด โดยนิวตรอนที่ได้เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของ ยูเรเนียม-235 พลังงานของนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาแตกตัวมีค่าประมาณ 2 MeV แล้วถูกลดพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอน ซึ่งมีน้ำเป็นตัวหน่วงพลังงานของนิวตรอน เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ดีและมีการใช้แพร่หลายสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนในปัจจุบัน เพราะสามารถนำนิวตรอนเข้าในช่วงความเข้มสูง  $10^7$  ถึง  $10^8$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาทีมาใช้ในการถ่ายภาพ จึงใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้น โดยให้ความคมชัดของภาพสูง

### 2.2.1.2 เครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในการเร่งอนุภาคที่มีประจุหรือนิวเคลียสชนิดหนึ่งให้มีพลังงานสูงเพื่อไปชนกับนิวเคลียสของอีกธาตุหนึ่งที่เป็นเป้า(Target) ทำให้เกิดปฏิกิริยานิวเคลียร์แล้วปลดปล่อยนิวตรอนออกมา เครื่องเร่งอนุภาคที่เป็นพื้นฐานของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ประกอบด้วยเครื่องกำเนิดนิวตรอนเร็ว (Fast Neutron Generator) และอุปกรณ์สำหรับห้วงนิวตรอนเร็ว เพื่อห้วงนิวตรอนภายในนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ปฏิกิริยาที่สำคัญได้แก่



### 2.2.1.3 ต้นกำเนิดแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotope neutron source) ได้แก่

2.2.1.3.1 ประเภท ( $\alpha, n$ ) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา ( $\alpha, n$ ) ประกอบด้วยไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เช่น เรเดียม-226 พลูโทเนียม-238 อะเมริเซียม-241 นำมาผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำ โดยทั่วไปจึงนิยมใช้เบริลเลียม-9 เนื่องจากมีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนของต้นกำเนิดประเภทนี้ประมาณ  $2.2 \times 10^6$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของธาตุกัมมันตรังสี ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท ( $\alpha, n$ ) บางไอโซโทป แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท ( $\alpha, n$ )<sup>[1]</sup>

Neutron Source	Half Life	Neutron Yield (n.s <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> )	Neutron Energy (MeV)
<sup>210</sup> Po-Be	138 วัน	$1.28 \times 10^{10}$	4.3
<sup>241</sup> Am-Be	458 ปี	$1 \times 10^7$	~ 4
<sup>226</sup> Ra-Be	1,620 ปี	$1.3 \times 10^7$	~ 4
<sup>227</sup> Ac-Be	21.8 ปี	$1.1 \times 10^9$	~ 4
<sup>228</sup> Th-Be	1.91 ปี	$1.7 \times 10^{10}$	~ 4

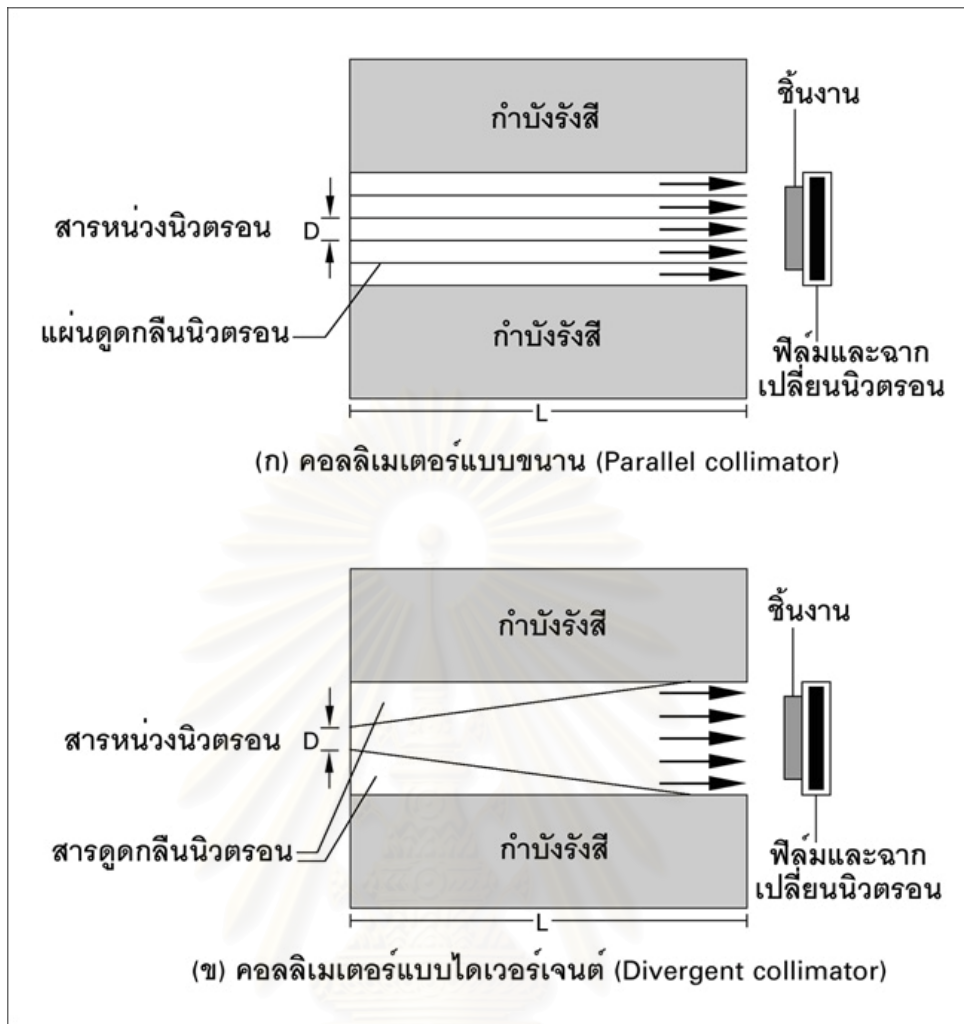


2.2.1.3.2 ประเภท ( $\gamma, n$ ) เป็นต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยา ( $\gamma, n$ ) โดยการผสมต้นกำเนิดรังสีแกมมาที่ปลดปล่อยรังสีแกมมาพลังงานสูงกว่า 1.67 MeV ผสมกับเบริลเลียม เมื่oringสีแกมมาชนนิวเคลียสของเบริลเลียม-9 จะมีนิวตรอนหลุดออกมา โดยปกติใช้ฟลวง-124 ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.70 MeV จะได้อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนประมาณ  $1.3 \times 10^6$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของฟลวง-124 ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้กันนัก เนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนมาก และมีครึ่งชีวิตสั้นเพียง 60 วัน

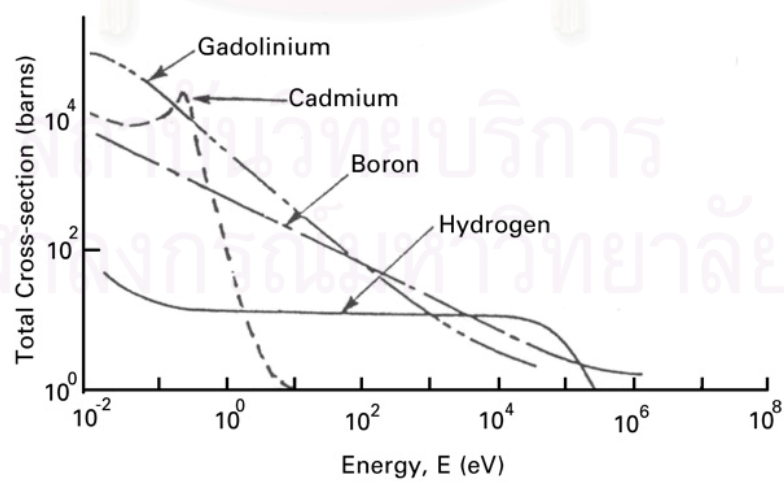
2.2.1.3.3 ประเภทแตกตัวเอง (Self Fission หรือ Spontaneous Fission) ได้แก่ ธาตุหนักบางชนิด ซึ่งแตกตัวแบ่งนิวเคลียสเป็น 2 ส่วนได้เอง ลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 มีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 สูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภท ( $\alpha, n$ ) และ ( $\gamma, n$ ) คือประมาณ  $4.3 \times 10^9$  นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของแคลิฟอร์เนียม-252 นอกจากนี้ยังมีธาตุอื่นที่สามารถแตกตัวเองให้นิวตรอนได้แต่มีโอกาสน้อย เช่น พลูโทเนียม-236, พลูโทเนียม-238, ยูเรเนียม-238, แคลิฟอร์เนียม-254 เป็นต้น

## 2.2.2 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ (Neutron Collimator)

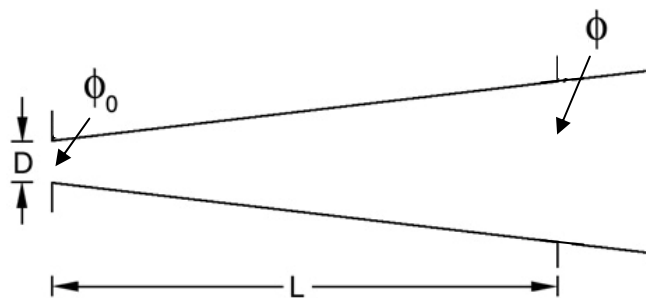
เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่นำลำนิวตรอนจากระบบแหล่งพลังงานนิวตรอนออกมาใช้ในการถ่ายภาพ ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์อาจมีลักษณะแตกต่างกันออกไปดังแสดงในรูปที่ 2.4 แต่ที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือ นิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เรียกว่า “ไดเวอร์เจนต์ คอลลิเมเตอร์ (Divergent collimator)” โดยที่ผนังของคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ จะผสมด้วยสารดูดจับนิวตรอน เช่น โบรอน ลิเทียม แคลเซียม แกโดลิเนียม เพื่อดูดจับนิวตรอนไม่ให้เข้าสู่คอลลิเมเตอร์ทางด้านข้าง และผนังด้านในของคอลลิเมเตอร์อาจฉาบด้วยสารดูดจับนิวตรอนเพื่อดูดจับนิวตรอนในคอลลิเมเตอร์ที่ชนผนังไม่ให้กระเจิงกลับเข้าไปในคอลลิเมเตอร์ ทำให้ได้ลำนิวตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาตามแนวแกนในลักษณะลำแสงที่บานออกเคลื่อนที่ไปกระทบชิ้นงาน โดยภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคลเซียม โบรอน และไฮโดรเจน แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 ลักษณะของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์แบบขนานและแบบไดเวอร์เจนต์<sup>[1]</sup>



รูปที่ 2.5 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโดลิเนียม แคดเมียม โบรอน และ ไฮโดรเจน<sup>[1]</sup>



รูปที่ 2.6 แผนภาพของคอลลิเมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ ที่มีช่องเปิดทางเข้า  $D$  และความยาวของคอลลิเมเตอร์  $L$

จากรูปที่ 2.6 นิวตรอนฟลักซ์ ( $\phi$ ) ที่ปลายท่อบังคับกับลำนิวตรอนตรงตำแหน่งซึ่งงานสามารถคำนวณได้จาก

$$\phi = \frac{\phi_0 A}{4\pi L^2} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดที่อยู่ใกล้ต้นกำเนิดนิวตรอนซึ่งเป็นทางที่นิวตรอนเข้าคอลลิเมเตอร์สำหรับคอลลิเมเตอร์ที่มีหน้าตัดแบบวงกลม

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (2.5)$$

ดังนั้นสมการ (4) สามารถเขียนได้เป็น

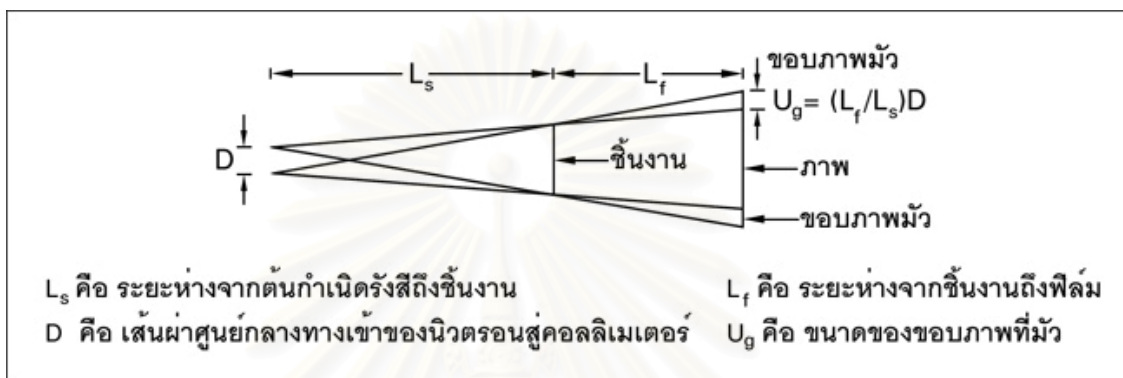
$$\phi = \frac{\phi_0 D^2}{16L^2} = \frac{\phi_0}{16} \left(\frac{D}{L}\right)^2 \quad (2.6)$$

$L/D$  เรียกว่า “อัตราส่วนคอลลิเมเตอร์ (Collimator Ratio)” เป็นพารามิเตอร์ที่แสดงลักษณะเฉพาะของแต่ละคอลลิเมเตอร์ อัตราส่วนของนิวตรอนที่ทางเข้าและทางออกของคอลลิเมเตอร์ เป็น

$$\frac{\text{Flux at entrance}}{\text{Flux at exit}} = \frac{\phi_0}{\phi} = 16 \left(\frac{L}{D}\right)^2 \quad (2.7)$$

จากสมการ (2.6) จะเห็นได้ชัดว่านิวตรอนฟลักซ์ที่ทางออกจะลดลง เมื่อคอลลิเมเตอร์มีความยาว ( $L$ ) เพิ่มขึ้น และ ขนาดของทางเข้า ( $D$ ) ลดลง

ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ระยะเวลาสั้น จำเป็นต้องให้นิวตรอนฟลักซ์ที่ตกกระทบวัตถุมีค่าสูง ซึ่งสามารถทำได้โดยลดความยาวของคอลลิเมเตอร์ และเพิ่มขนาดทางเข้าของนิวตรอน แต่การทำเช่นนี้จะทำให้ความคมชัดของภาพถ่ายลดลง



รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงค่า  $L$  และ  $D$  ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน

จากรูปที่ 2.7 จะได้

$$U_g = \frac{D}{L_s} L_f \quad (2.8)$$

โดยปกติจะวางฟิล์มติดกับชิ้นงาน ทำให้  $L_f \gg L_s$  และ  $L_s \approx L$  ดังนั้นสมการ (5) สามารถเขียนได้เป็น

$$U_g = \left( \frac{D}{L} \right) L_f \quad (2.9)$$

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

### 2.2.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converter Screen)

ฉากเปลี่ยนนิวตรอน ทำหน้าที่ดูดกลืนนิวตรอนแล้วปลดปล่อยรังสี อนุภาค หรือแสง ที่เกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้ดี เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นตามความเข้มของนิวตรอนที่ผ่านชั้นงาน เนื่องจากนิวตรอนเกิดปฏิกิริยากับฟิล์มได้น้อยมาก การบันทึกภาพจึงจำเป็นต้องใช้วัสดุที่มี ภาวตัดขวางต่อการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอนได้สูง เพื่อสร้างภาพให้เกิดขึ้นตามความเข้มของ นิวตรอนที่ผ่านชั้นงาน วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนต้องมีคุณสมบัติดูดกลืนนิวตรอนได้ดี และ สามารถปลดปล่อยรังสีทุติยภูมิ (Secondary Radiation) ที่ทำปฏิกิริยากับฟิล์มได้ เช่น รังสีเอกซ์ รังสี แกมมา รังสีบีตา หรือรังสีแอลฟา เมื่อรังสีทุติยภูมิตกกระทบฟิล์มซึ่งประกบอยู่กับฉากเปลี่ยน นิวตรอนจะทำปฏิกิริยากับฟิล์ม ทำให้เกิดภาพบนฟิล์มได้ ฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่นิยมใช้ คือ

- ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแผ่นโลหะ (Metallic Foil Neutron Converter Screen) แผ่นโลหะที่ใช้จะมีภาวตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนสูง เมื่อนิวตรอนทำปฏิกิริยากับนิวเคลียส ของธาตุแล้วจะมีการปลดปล่อยรังสีหรืออนุภาคออกมาทันที ปฏิกิริยาที่สำคัญคือ ปฏิกิริยา  $(n, \gamma)$  วัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอนแสดงดังตารางที่ 2.4

- ฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดปลดปล่อยแสง (Light Emitting Neutron Converter Screen) เป็นฉากที่นำมาใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเป็นชนิดแรก และมีความไวมากที่สุด ซึ่ง ประกอบด้วย สารดูดกลืนนิวตรอน (Neutron Absorber) และสารเรืองแสง(Phosphore) สารดูดกลืน นิวตรอนที่นิยมใช้ ได้แก่ ลิเทียม-6 และ โบรอน-10 เนื่องจากให้รังสีแอลฟาพลังงานสูง ส่วนสาร เรืองแสงที่นิยมใช้ คือ สังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) ซึ่งให้แสงในช่วงแสงสีน้ำเงินความยาวคลื่น 450 นาโน เมตร ซึ่งความยาวคลื่นช่วงนี้จะทำปฏิกิริยาอย่างเหมาะสมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน<sup>[1]</sup>

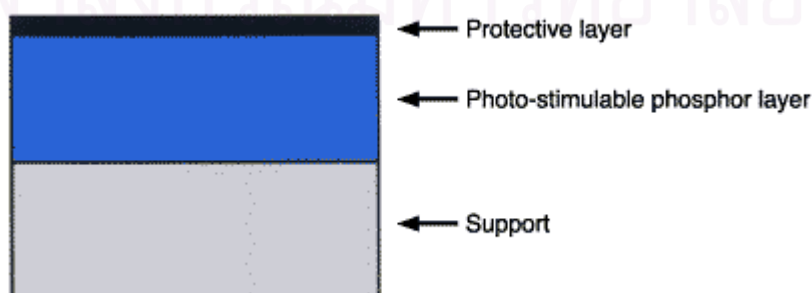
วัสดุ	ปฏิกิริยา	ภาคตัดขวางของการเกิดปฏิกิริยากับนิวตรอน (barn)	ครึ่งชีวิต	รังสีที่ปลดปล่อย	พลังงานของรังสี (MeV)
ลิเทียม	${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$	935	stable	$\alpha$	4.7
โบรอน	${}^{10}\text{B}(n, \alpha){}^7\text{Li}$	3,873	stable	$\alpha$	2.3
โรเดียม	${}^{103}\text{Rh}(n, \gamma){}^{104}\text{Rh}$	144	43 s	$\beta$	2.41
	${}^{103}\text{Rh}(n, \gamma){}^{104\text{m}}\text{Rh}$	11	4.4 m	$\beta$	0.5
เงิน	${}^{107}\text{Ag}(n, \gamma){}^{108}\text{Ag}$	44	2.4 m	$\beta$	1.64, 0.43
	${}^{109}\text{Ag}(n, \gamma){}^{110}\text{Ag}$	110	24.5 s	$\beta$	2.87
	${}^{109}\text{Ag}(n, \gamma){}^{110\text{m}}\text{Ag}$	3	254 d	$\beta$	1.5
แคดเมียม	${}^{113}\text{Cd}(n, \gamma){}^{114}\text{Cd}$	20,000	stable	$\gamma$	9
อินเดียม	${}^{115}\text{In}(n, \gamma){}^{116}\text{In}$	45	14 s	$\beta$	3.3, 0.44
	${}^{115}\text{In}(n, \gamma){}^{116\text{m}}\text{In}$	154	54 m	$\beta$	1.0, 0.42
ซามาเรียม	${}^{149}\text{Sm}(n, \gamma){}^{150}\text{Sm}$	41,500	stable	$\gamma$	0.33, 0.44
	${}^{152}\text{Sm}(n, \gamma){}^{153}\text{Sm}$	210	46.7 h	$\beta$	0.8, 0.1
แกโดลิเนียม	${}^{155}\text{Gd}(n, \gamma){}^{156}\text{Gd}$	58,000	stable	Electron	0.14
	${}^{157}\text{Gd}(n, \gamma){}^{158}\text{Gd}$	240,000	stable	Electron	0.13
ดิสโพรเซียม	${}^{164}\text{Dy}(n, \gamma){}^{165}\text{Dy}$	800	2.3 h	$\beta$	1.29, 0.095
	${}^{164}\text{Dy}(n, \gamma){}^{165\text{m}}\text{Dy}$	2,000	1.26 m	$\beta$	1.04, 1.108
ทอง	${}^{197}\text{Au}(n, \gamma){}^{198}\text{Au}$	98.8	2.69 d	$\beta$	0.962, 0.412

## 2.2.4 อุปกรณ์บันทึกภาพ

- फिल्मรังสีเอกซ์ หรือ फिल्मถ่ายรูป เป็นอุปกรณ์บันทึกภาพที่นิยมบันทึกภาพ โดยสามารถใช้ได้กับจากเปลี่ยนนิวตรอนประเภทแผ่นโลหะ และประเภทปลดปล่อยแสง ความคมชัดของภาพขึ้นอยู่กับความละเอียดของเม็ดเงินโบรไมด์ (Silver Bromide : AgBr) ที่จับอยู่บนผิวแผ่นฟิล์ม ส่วนความเปรียบต่างขึ้นอยู่กับความชันของกราฟลักษณะเฉพาะฟิล์ม นอกจากนี้กระบวนการล้างฟิล์มยังมีผลต่อความเปรียบต่างของภาพด้วย โดยกระบวนการล้างฟิล์มเป็นกระบวนการของปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้ผลึกเงินโบรไมด์ที่ถูกรังสีหรือแสงเปลี่ยนเป็นโลหะเงินสีดำ และชะล้างเงินโบรไมด์ที่ไม่ถูกรังสีหรือแสง

- แผ่นบันทึกภาพ (Imaging Plate) เป็นวัสดุบันทึกภาพชนิดใหม่ คล้ายกับฟิล์มที่ใช้บันทึกภาพที่ถ่ายด้วยรังสี ทำจากวัสดุเรืองแสงที่สามารถกักปริมาณของเอกซิตอน (Exciton) ที่สอดคล้องกับปริมาณรังสีที่ได้รับเอาไว้ แล้วนำมาสแกนด้วยแสงเลเซอร์ ซึ่งจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในกับดัก (Trap) คายพลังงานโดยเรืองแสงออกมา เทคโนโลยีของสารเรืองแสงนี้ มีการประยุกต์ใช้ครั้งแรกทางการแพทย์ ในงานด้านรังสีวินิจฉัย โดยใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ จากนั้นได้มีการประยุกต์ใช้ ในวงกว้างออกไป ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

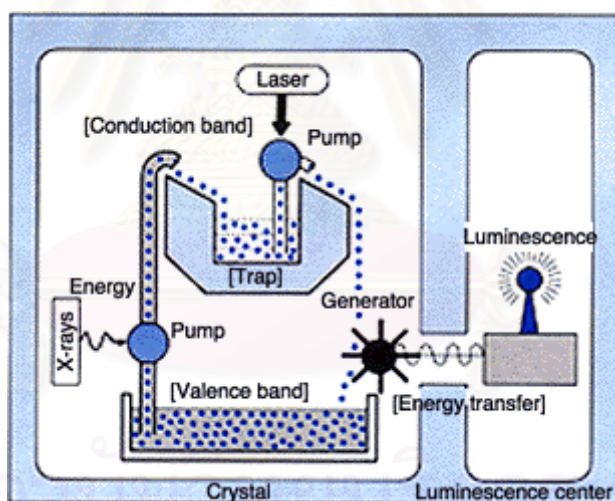
โครงสร้างของแผ่นบันทึกภาพ แสดงดังรูป 2.8 จะประกอบด้วย ชั้นแผ่นฐาน (Support Layer) ทำด้วยโพลีเอสเตอร์ (Polyester) ที่มีความอ่อนตัวทำหน้าที่เป็นฐานของแผ่นเพื่อรองรับการยึดตัวของผลึกเรืองแสงที่อยู่ด้านบน หนาประมาณ 2 มม. ชั้นของผลึกเรืองแสง (Photo-stimulable Phosphor Layer) ซึ่งเป็นกลุ่มของผลึกขนาดเล็กมีขนาดประมาณ  $5\ \mu\text{m}$  คือ สารแบเรียมฟลูออไรด์โบรไมด์เจือยูโรเปียม ( $\text{BaFBr:Eu}^{2+}$ ) ผลมสารยึดเกาะ ชั้นผลึกนี้มีความหนา  $150\text{-}400\ \mu\text{m}$  ซึ่งวางเรียงตัวอย่างสม่ำเสมอ ส่วนชั้นที่สาม เป็นชั้นที่ป้องกันการกระแทกกระเทือนของผลึกเรืองแสงจากกระบวนการในการบันทึกภาพและการอ่านภาพโดยจะเคลือบด้วยโพลีเอทเทอรีนเทเรพทาเลต (Polyethylene Terephthalate) ที่มีความหนา  $10\ \mu\text{m}$  บ่มผิวด้วยเทคนิคทางรังสีของลำอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.8 แสดงโครงสร้างของแผ่นบันทึกภาพ

แผ่นบันทึกภาพสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน จะใช้  $Gd_2O_3$  ผสมกับผลึก  $BaFBr:Eu^{2+}$  เคลือบอย่างสม่ำเสมอบนฐานรองโพลิเอสเตอร์ที่มีความยืดหยุ่น โดย  $Gd_2O_3$  จะทำหน้าที่เปลี่ยนนิวตรอนเป็นคอนเวอชันอิเล็กตรอน

หลักในการบันทึกภาพของแผ่นบันทึกภาพ จากโครงสร้างของแผ่นบันทึกภาพ ชั้นที่บันทึกภาพ คือ ชั้นของผลึกสารเรืองแสง ซึ่งเป็นกลุ่มของผลึกแบเรียมฟลูออไรด์โบไมด์เจียรูโรเปียม และเนื่องจากผลึกสารเรืองแสงนี้เป็นผลึกชนิดไม่บริสุทธิ์ เพราะมีการเจือด้วยยูโรเปียม ดังนั้นจึงเกิดกับดักขึ้นระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบคอนดักชัน ซึ่งเป็นบริเวณที่พร้อมดักจับคู่อิเล็กตรอน โดยเมื่อฉายรังสีให้กับแผ่นบันทึกภาพ จะส่งผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จำนวนมาก โดยจะเป็นสัดส่วนกับการดูดกลืนพลังงานของสารรังสี อิเล็กตรอนที่เกิดจากการไอออไนซ์จะถูกกระตุ้นให้เคลื่อนที่ไปอยู่ในระดับพลังงานที่สูงกว่า โดยอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานอยู่ในระดับ 6.6 eV จะสามารถเคลื่อนที่สู่แถบคอนดักชัน ส่วนอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่ำกว่า 6.6 eV จะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปสู่แถบคอนดักชันได้ จะกลับคืนสู่สถานะพื้น ในส่วนของอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่สู่แถบคอนดักชันจะลดระดับพลังงานลง และถูกกักไว้ใน Trap พร้อมกับโฮลที่จับคู่กัน ซึ่งเป็นการกักคู่อิเล็กตรอนเพื่อเก็บบันทึกปริมาณรังสี แสดงดังรูป 2.9



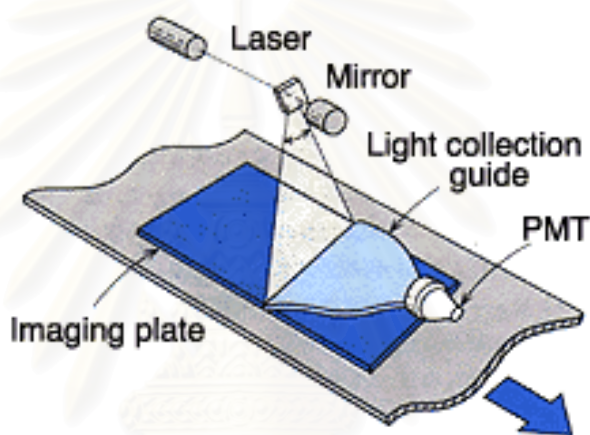
รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะการเกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพ

หลักในการอ่านภาพและลบภาพจากแผ่นบันทึกภาพ เครื่องอ่านภาพจะอ่านภาพที่เก็บบันทึกไว้ในแผ่นด้วยการใช้แสงเลเซอร์กระตุ้นเพื่อให้อิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้ในแผ่นบันทึกภาพกลับสู่สถานะพื้นเกิดการเปล่งแสงออกมา แสงเลเซอร์ที่ใช้ในการกระตุ้นนี้ มีความยาวคลื่นประมาณ 633 nm โดยปล่อยออกมาจากหลอดกำเนิดแสงเลเซอร์ชนิด He-Ne (Helium-Neon) ซึ่งลำเลเซอร์นี้จะมีลักษณะการสแกนตามแนวด้านกว้างของแผ่นบันทึกภาพ ลำเลเซอร์ที่ตกกระทบแผ่นบันทึกภาพแต่ละจุด จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้ใน Trap ได้รับพลังงานแล้วเคลื่อนที่สู่แถบคอนดักชัน และกลับคืนสู่สถานะพื้น โดยจะปลดปล่อยแสงในช่วงความยาวคลื่นช่วง 390 nm แสง



ที่ปล่อยออกมาเรียกว่า Photo-stimulated Luminescence (PSL) โดยแสงที่ได้จะส่งผ่านโดย Light collection guide ไปสู่โฟโตคาโทดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube: PMT) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงที่ปล่อยออกมาเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยความเข้มของแสงจะขึ้นกับปริมาณของอิเล็กตรอนที่ถูกกักไว้ในบริเวณ Trap สัญญาณอนาลอกตามความเข้มแสงดังกล่าวจะได้รับการแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลส่งต่อเข้าระบบคอมพิวเตอร์ เพื่อจะสร้างภาพในลักษณะ 2 มิติ และสามารถปรับแต่งภาพตามความต้องการได้ แสดงดังรูป 2.10

การลบภาพบนแผ่นบันทึกภาพจะใช้เครื่องลบภาพ ซึ่งทำหน้าที่ลบปริมาณรังสีที่ตกค้างอยู่บนแผ่นบันทึกภาพ ด้วยแสงความยาวคลื่นในช่วงที่ตามองเห็น (Visible light) ที่มีความเข้มสูง โดยแผ่นบันทึกภาพที่ผ่านเครื่องลบภาพแล้วสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้อีกหลายครั้ง

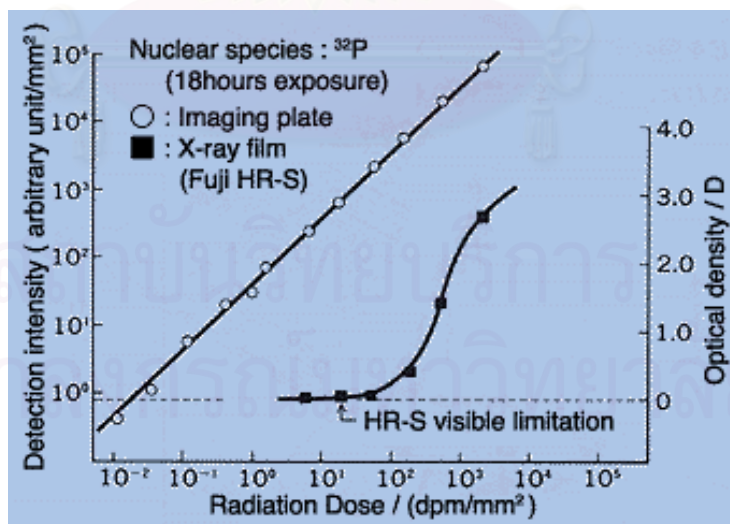


รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการอ่านภาพบนแผ่นบันทึกภาพ

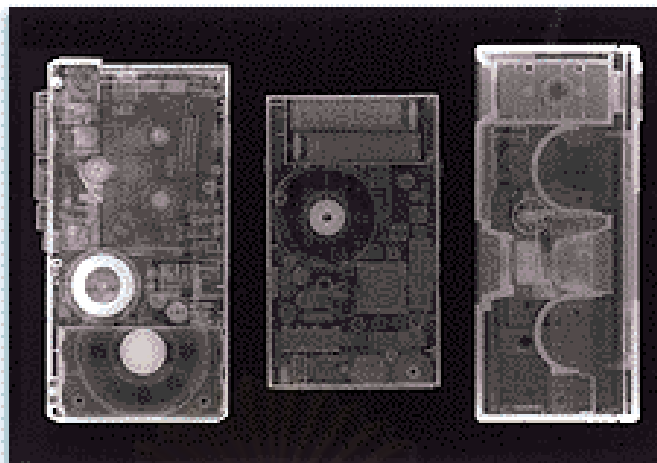
ลักษณะเด่นของการใช้ Imaging Plate วิธีการตรวจวัดปริมาณรังสีเพื่อสร้างสัญญาณภาพ มีการพัฒนาขึ้นมาหลายวิธี เช่น การใช้หัววัดรังสีแบบ Ionization Chamber, Scintillation Counter, และ Proportional Counter แต่มีเพียงไม่กี่วิธีที่สามารถตรวจวัดภาพถ่ายของรังสี โดยแสดงเป็นภาพ 2 มิติ ได้แก่ ฟิล์มบันทึกภาพ หัววัดรังสี Position Sensitive Proportional Counter แบบ 2 มิติ การถ่ายภาพรังสีเอกซ์โดยใช้ Image intensifier และ X-ray TV ในวิธีการเหล่านี้ เทคนิคที่มีการใช้มากที่สุดคือการถ่ายภาพโดยใช้ฟิล์ม ข้อแตกต่างระหว่างแผ่นบันทึกภาพกับฟิล์มรังสีเอกซ์ แสดงในรูปที่ 2.11 ในการวัดรังสีบีตาจากไอโซโทปรังสี ฟอสฟอรัส-32 โดยที่แกนนอนเป็นปริมาณรังสี จากตัวอย่างฟอสฟอรัส-32 ซึ่งให้รังสีบีตาพลังงาน 1.7 MeV แกนตั้งด้านซ้ายเป็นความเข้มของแสงที่เรืองจากแผ่นบันทึกภาพ แกนตั้งด้านขวาเป็นความดำของฟิล์ม สำหรับขีดจำกัดในการมองเห็น ซึ่งเป็นการแสดงส่วนที่สามารถมองเห็นได้ในภาพ มีค่า 1/10 ของค่าปกติของ Determination Limit โดยแสดงคุณสมบัติที่คล้ายกันในรังสีบีตา อิเล็กตรอน รังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา ซึ่งจะเห็นลักษณะเด่นได้ชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ตรวจวัดรังสีชนิดอื่น

1. มีความไวสูง โดยมีความไวมากกว่าฟิล์มหลายสิบเท่า หรืออาจไวกว่าหลายพันเท่า ขึ้นกับชิ้นงานหรือตัวอย่าง
2. มี Dynamic Range ที่กว้าง โดยมีช่วงกว้างมากกว่า  $10^4$  ถึง  $10^5$  ซึ่งสูงกว่าการใช้ฟิล์มที่มีอยู่ในช่วง  $10^2$
3. มีความเป็นเชิงเส้นดีกว่า และมีการเรืองแสงแปรผันโดยตรงตามปริมาณรังสีตลอดช่วง
4. ให้รายละเอียดการแจกแจง (Spatial Resolution) ได้สูง เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการที่ใช้ระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่น เนื่องจากมีความหนาแน่นของ pixel สูงกว่า
5. ใช้สัญญาณไฟฟ้าแบบดิจิทัลโดยตรงจากเครื่องอ่าน ทำให้มีกระบวนการทางคอมพิวเตอร์หรือการประสานงานกับระบบอิเล็กทรอนิกส์แบบอื่นได้สะดวก
6. ใช้ระบบการอ่านรังสีแบบ Integral-type detector ทำให้การใช้แผ่นบันทึกภาพในการอ่านผลปริมาณรังสี มีความคลาดเคลื่อน (Detection Counting Errors) จากรังสีความเข้มสูงน้อยกว่าวิธีการ Pulse-type Detectors ดังเช่นการใช้หัววัดรังสีแบบ Proportional Counter และ Scintillation Counter
7. ค่าของรังสีจากสิ่งแวดล้อม (Background) ที่บันทึกอยู่ สามารถลบออกได้ก่อนจะใช้งาน

แผ่นบันทึกภาพจึงสามารถนำมาใช้แทนการวัดรังสีทั่วไป ที่แสดงผลเป็นภาพ นอกจากนี้จะมีความไวสูง และสามารถแปรผลปริมาณรังสีออกมาเป็นภาพได้แล้ว ยังสามารถแสดงปริมาณ หรือความเข้มของรังสีในแต่ละจุดได้ด้วย



รูปที่ 2.11 เปรียบเทียบคุณลักษณะความไวรังสีของแผ่นบันทึกภาพและฟิล์มรังสีเอกซ์โดยใช้ต้นกำเนิดฟอสฟอรัส-32 ซึ่งให้พลังงานของรังสีเบตา 1.7 MeV<sup>[4]</sup>



รูปที่ 2.12 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอน<sup>[5]</sup>

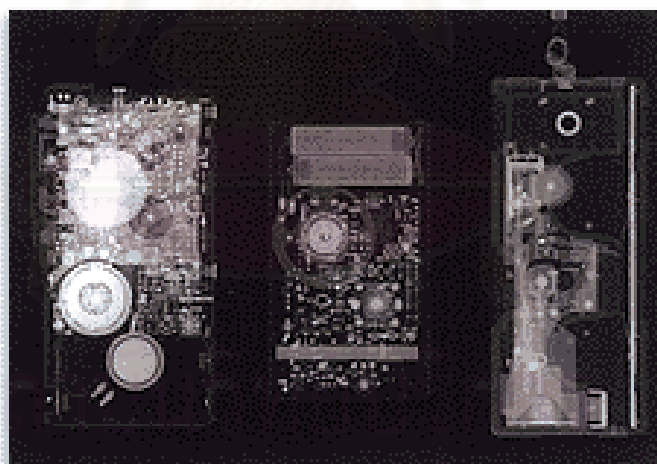
Neutron Generator : TRIGA-II 100 kW, Nuclear reactor, Rikkyo University

Irradiation : Thermal neutron , Fluence :  $1.4 \times 10^8$  neutron/cm<sup>2</sup> (100 kW)

Time : 90 msec

Imaging Plate : BAS-ND

Scanner : BAS-5000



รูปที่ 2.13 แสดงภาพถ่ายชิ้นงานด้วยรังสีเอกซ์<sup>[5]</sup>

X-ray Generator : KXO50G, Invertor, Komazawa, Junior College

Irradiation : Acceleration Voltage 150 kV , 260 mA

Time : 71 msec

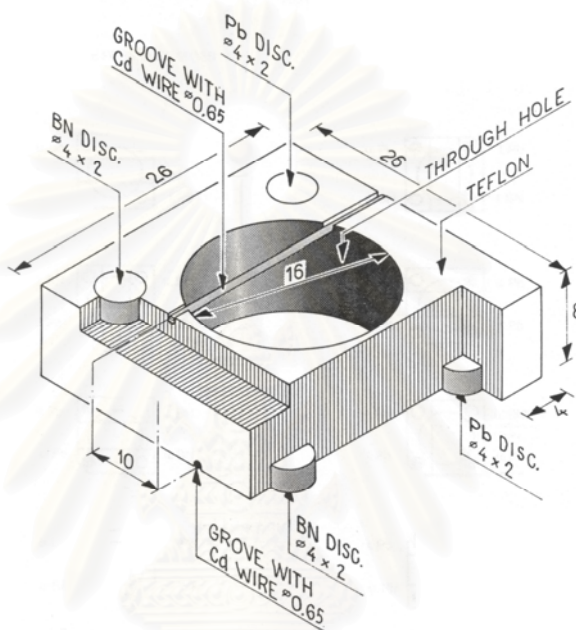
Filter : 1.5 mm Al + 0.1 Cu

Imaging Plate : BAS-SR

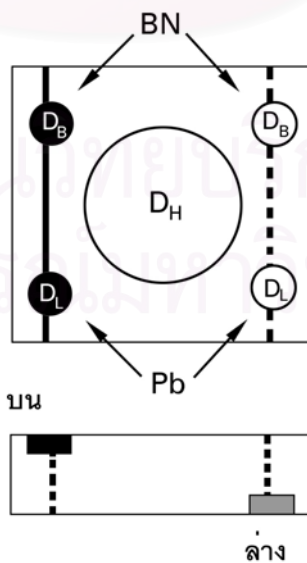
Scanner : BAS-5000

2.2.5 วัตถุประสงค์อย่างมาตรฐานสำหรับการตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยนิวตรอน<sup>[6]</sup>

วัตถุประสงค์อย่างมาตรฐานที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เป็นวัตถุประสงค์ที่ได้รับการออกแบบสำหรับทดสอบคุณภาพของการถ่ายภาพและอุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ซึ่งแสดงให้เห็นด้วยคุณภาพของภาพถ่าย การถ่ายภาพเพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยทั่วไปใช้ Beam Purity Indicator (BPI), Sensitivity Indicator (SI) และ Test Strip B ซึ่งรายละเอียดของอุปกรณ์แต่ละชนิด ดังนี้



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะ Beam Purity Indicator



รูปที่ 2.15 แสดงตำแหน่งที่วัดความดำของฟิล์มจากภาพ BPI

- การตรวจสอบระบบการถ่ายภาพโดยใช้ Beam Purity Indicator (BPI)

Beam Purity Indicator ผลิตจากฟลูออโรคาร์บอน (Fluorocarbon) ซึ่งเป็นวัสดุที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนนิวตรอนต่ำ จัดทำเป็นรูปสี่เหลี่ยมขนาด 25.4 มม. x 25.4 มม.หนา 8 มม. ตรงกลางจะเป็นรูปกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 15.9 มม. ได้รับการออกแบบมาสำหรับทดสอบและวิเคราะห์ปริมาณรังสีในลำนิวตรอนจากคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีของวัสดุแต่ละชนิดที่ประกอบอยู่บน BPI ได้แก่ โบรอนไนไตรด์ (BN) และตะกั่ว ซึ่งทำเป็นรูปเหรียญกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 มม. หนา 2 มม. ลวดแคดเมียมเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.64 มม. ยาว 12 มม. ดังรูปที่ 2.14

การวิเคราะห์ทำได้โดยการถ่ายภาพ Beam Purity Indicator แล้ววัดความเข้มแต่ละตำแหน่งบนฟิล์ม ตามรูปที่ 2.15 โดย

- $D_B$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของโบรอนไนไตรด์
- $D_L$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งของตะกั่ว
- $D_H$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งตรงกลางรู
- $D_T$  คือ ความเข้มฟิล์มที่ตำแหน่งวัสดุฟลูออโรคาร์บอน
- $\Delta D_L$  คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งตะกั่วทั้งสองชั้น
- $\Delta D_B$  คือ ผลต่างความเข้มฟิล์มของตำแหน่งโบรอนไนไตรด์ทั้งสองชั้น

ความเข้มของฟิล์มที่วัดได้สามารถใช้คำนวณปริมาณรังสีในลำนิวตรอนได้ดังนี้

- 1) ปริมาณเทอร์มัลนิวตรอน (Effective thermal neutron, NC)

$$NC = \frac{D_H - (highD_B + \Delta D_L)}{D_H} \times 100 \quad (2.10)$$

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

$$S = \left( \frac{\Delta D_B}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.11)$$

- 3) ปริมาณรังสีแกมมา (Effective gamma content,  $\gamma$ )

$$\gamma = \left( \frac{D_T - lowD_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.12)$$

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

$$P = \left( \frac{\Delta D_L}{D_H} \right) \times 100 \quad (2.13)$$

- การตรวจสอบความไวด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน Sensitivity Indicator (SI)

อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ (SI) ใช้สำหรับวิเคราะห์ความสามารถในการมองเห็นรายละเอียดของภาพโดยสังเกตจากรู (Hole : H) ที่จะเป็นช่องกลม และช่องว่าง (Gap : G) ตามแนวยาวที่เล็กที่สุดที่ภาพถ่ายสามารถแสดงรายละเอียดได้ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุหลักต่างๆ คือ อะคริลิกเรซิน (Acrylic resin) อะลูมิเนียม และตะกั่ว โดยมีความหนาขนาดของรูและช่องว่างต่างๆ กัน โดยแสดงดังตารางที่ 2.5 และตารางที่ 2.6

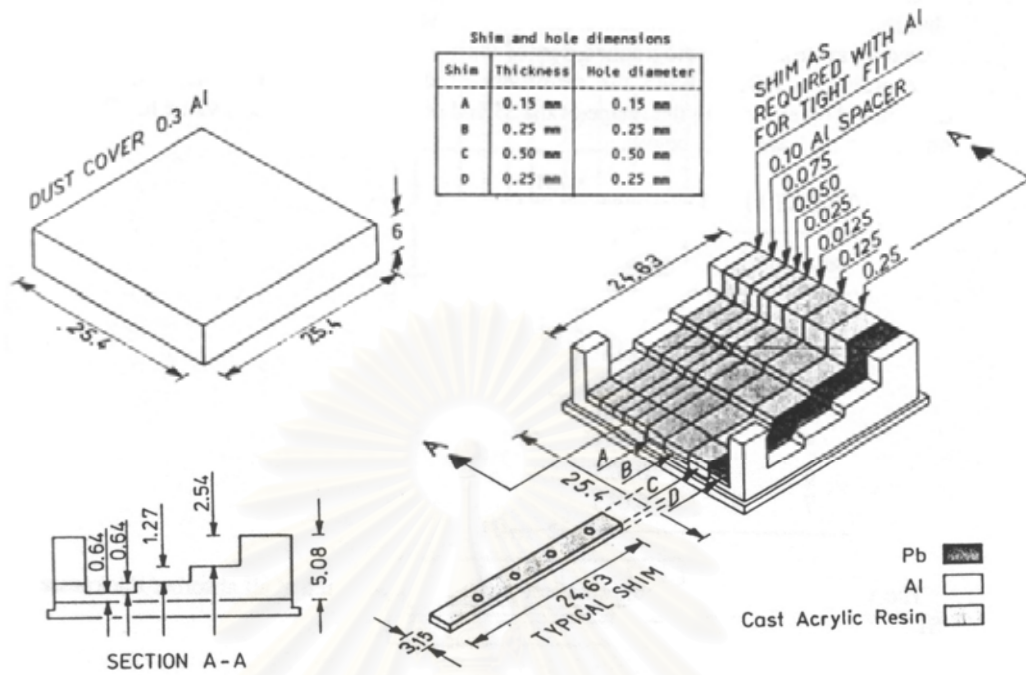
ตารางที่ 2.5 แสดงค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI

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

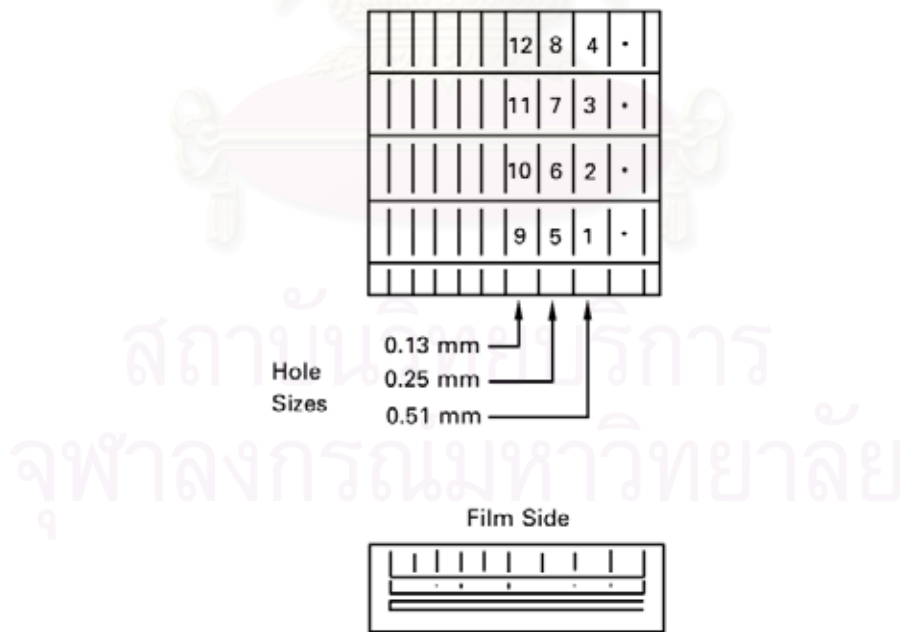
\* เป็นช่องว่างที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ในทุกช่วงความหนาของภาพ ASTM SI ตารางที่ 2.6 แสดงค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI

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

\* เป็นขนาดของรูที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากที่สุดที่มองเห็นได้ในภาพถ่าย ASTM SI



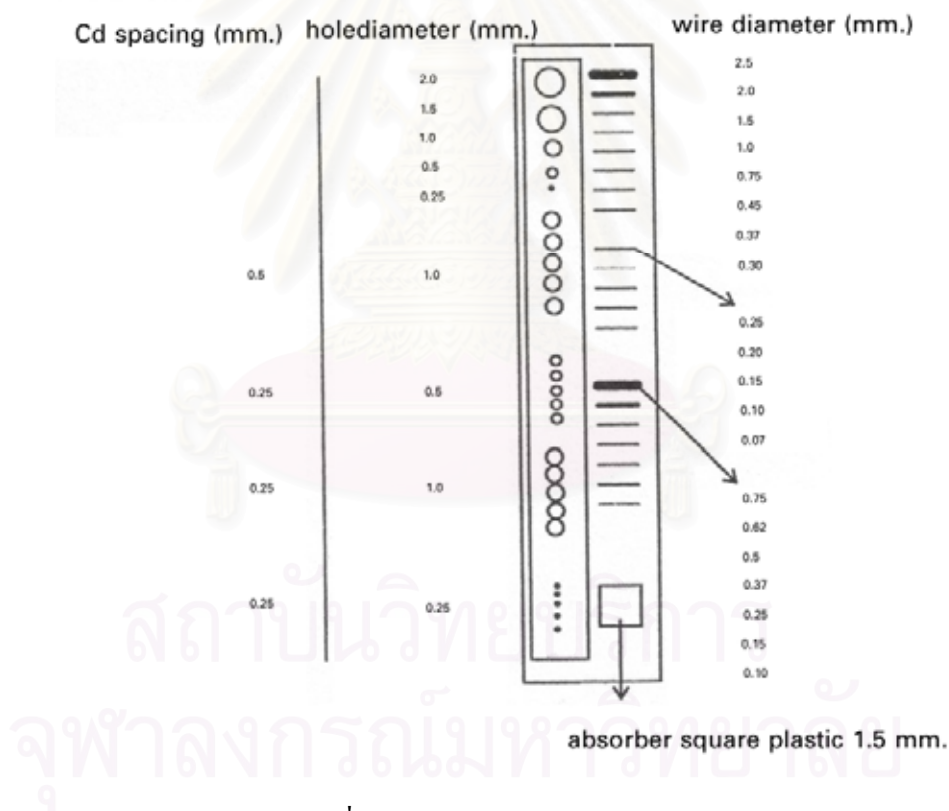
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ ASTM Sensitivity Indicator



รูปที่ 2.17 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูใน ASTM SI

- การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่ายและความไวของการถ่ายภาพด้วย Test strip B

Test strip B เป็นอุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์ความคมชัดและความเปรียบต่างของภาพจากขนาดของวัตถุที่มองเห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ประกอบด้วย แผ่นอะลูมิเนียมหนา 0.8 มม. เป็นฐาน แผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มม. เจาะรูขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 มม. 1 ชุด และเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0, 0.5, 1.0, 0.25 มม. ขนาดละ 5 รู ขนาดของรูที่เล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้ คือ ริโซลูชันของภาพ เส้นพลาสติกยาว 5 มม. ขนาดต่างๆกัน 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 มม. เส้นพลาสติกเส้นเล็กที่สุดที่สามารถมองเห็นได้นำมาพิจารณาริโซลูชันและความเปรียบต่างของภาพ เส้นแคดเมียมความยาว 5 มม. ความกว้างต่างๆกัน 7 เส้น ได้แก่ 0.75, 0.62, 0.5, 0.37, 0.25, 0.15, 0.1 มม. และแผ่นพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1.5 มม. x 1.5 มม. ใช้พิจารณาความเปรียบต่างของภาพ



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะ Test Strip B



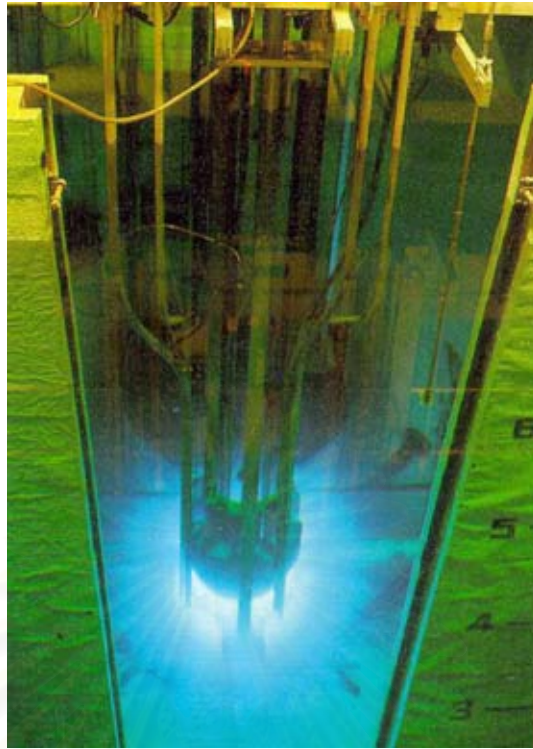
## บทที่ 3

### อุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 3.1 อุปกรณ์การวิจัย ประกอบด้วย

- 3.1.1 ต้นกำเนิดรังสีนิวตรอน เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 (Thai Research Reactor-1/modification1) หรือ TRR-1/M1 กำลัง 2 เมกกะวัตต์ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ใช้กำลังในการเดินเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู 1200 กิโลวัตต์
- 3.1.2 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา อิริเดียม-192 (Ir-192) รุ่น 424-9 ผลิตโดย บริษัท QSA Global ความแรงรังสี ณ วันที่ทำการทดลอง 3.3 คูรี ติดตั้งที่ฝ่ายตรวจสอบโดยไม่ทำลาย สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ
- 3.1.3 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ รุ่น ISOVOLT ES2 ผลิตโดย บริษัท RICH. SEIFERT&CO. AHRENSBURG ติดตั้งที่ฝ่ายตรวจสอบโดยไม่ทำลาย สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ
- 3.1.4 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน (Neutron Imaging Plate) BAS-ND 2040 และแผ่นบันทึกภาพแกมมา BAS-MS 2040 ผลิตโดย บริษัท ฟุจิฟิล์ม ขนาด 20 ซม. x 40 ซม.
- 3.1.5 เครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพและเครื่องลบภาพ BAS-2500 พร้อมโปรแกรม Image Reader และโปรแกรม Image Gauge ผลิตโดย บริษัท ฟุจิฟิล์ม ติดตั้งที่สำนักกำกับดูแลความปลอดภัยจากพลังงานปรมาณู สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ
- 3.1.6 ฟิล์มรังสีเอกซ์ (X-ray film) Kodak Industrex รุ่น MX125 ผลิตโดยบริษัท Kodak ขนาด 35 ซม. x 43 ซม.
- 3.1.7 น้ำยาล้างฟิล์ม
  - น้ำยา Developer ยี่ห้อ Kodak GBX ผลิตโดยบริษัท Kodak
  - น้ำยา Stop bath ในการทดลองได้ใช้น้ำประปาแทน
  - น้ำยา Fixer ยี่ห้อ Kodak GBX ผลิตโดยบริษัท Kodak
- 3.1.8 เครื่องอ่านความดำฟิล์ม (Densitometer) รุ่น 301X ผลิตโดยบริษัท X-Rite Incorporated
- 3.1.9 แผ่นกรองรังสี
  - แผ่นโบรอน-10 ความเข้มข้นสูง Kodak BE 10 ผลิตโดยบริษัท Kodak ขนาด 8 ซม. x 20 ซม.หนา 0.5 มม. ซึ่งมีความเข้มข้นของโบรอน-10 (B-10) ประมาณ 95%
  - แผ่นแคลเมียม ขนาด 25.5 ซม. x 39 ซม.หนา 1 มม.
  - แผ่นแกโดลิเนียม ขนาด 12.5 ซม. x 15.0 ซม.หนา 0.25 มม.

- แผ่นตะกั่ว ขนาด 25 ซม. x 25 ซม.หนา 4 มม.
- 3.1.10 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron Converter Screen) แผ่นแกโคลิเนียมขนาด 12.5 ซม. x 15.0 ซม.หนา 0.25 มม.ผลิตโดย บริษัท Goodfellow
- 3.1.11 คาสเซตต์ใส่แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน (Imaging Plate Cassette) รุ่น BAS 2040 ผลิตโดย บริษัท ฟุจิฟิล์ม มีขนาด 20 ซม. x 40 ซม.
- 3.1.12 คาสเซตต์ใส่ฟิล์ม (Film cassette) ผลิตโดยบริษัท Kodak มีขนาด 23 ซม. x 28 ซม.หนา 1.5 ซม.วัสดุที่ใช้ทำจากอะลูมิเนียม
- 3.1.13 ชิ้นงานมาตรฐาน
- Sensitivity Indicator (SI) ผลิตโดย American Society for Testing and Materials ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นวัตถุตัวอย่างสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอน เพื่อทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยสังเกตจากรายละเอียดที่สามารถมองเห็นและความคมชัดของภาพถ่าย
  - Test Strip B ผลิตโดย Argonne National Laboratory ประเทศสหรัฐอเมริกา เป็นวัตถุตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบคุณภาพของระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยสังเกตจากรายละเอียดที่สามารถมองเห็นได้จากภาพถ่าย ซึ่งประกอบด้วยวัสดุที่มีความเปรียบต่างสูง ได้แก่ แคดเมียม และวัสดุที่มีความเปรียบต่างต่ำกว่า ได้แก่ พลาสติก
- 3.1.14 ชิ้นงานตัวอย่าง
- เครื่องขับฟลอปปีดิสก์ (Floppy disk drive) รุ่น FD-235HF ผลิตโดยบริษัท TAEC มีขนาด 10 ซม. x 15 ซม.หนา 2.5 ซม.
  - ฮาร์ดดิสก์ (Hard disk drive) ขนาดหน่วยความจำ 20 Gbytes รุ่น ST320414A ผลิตโดยบริษัท Seagate มีขนาด 14.5 ซม. x 10 ซม.หนา 2.5 ซม.
  - คอนเนคเตอร์ (RS-232 Connector) 25 PIN และ 9 PIN
  - หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ (NaI Detector) ขนาด 2 นิ้ว x 2 นิ้ว พร้อมหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (Photomultiplier tube, PMT) ผลิตโดยบริษัท HARSHAW ซึ่งชำรุดแล้ว
  - โช้คอัพรถจักรยานยนต์ (Shock up) สภาพดีและชำรุด ยี่ห้อ Honda สำหรับจักรยานยนต์ Honda Dream มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม.ยาว 35 ซม.



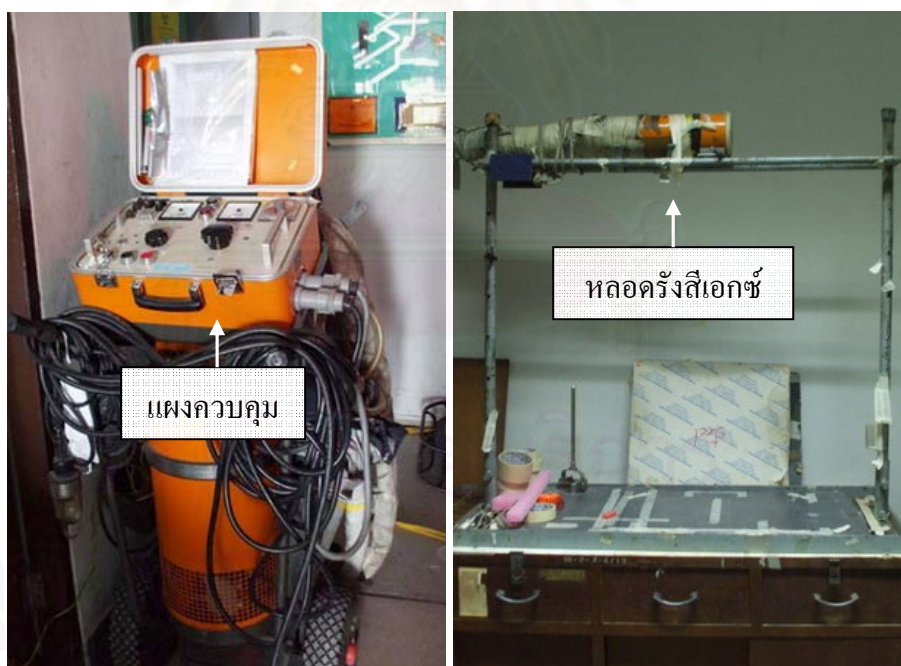
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปฏิกิริยา (ปปว.-1/1)



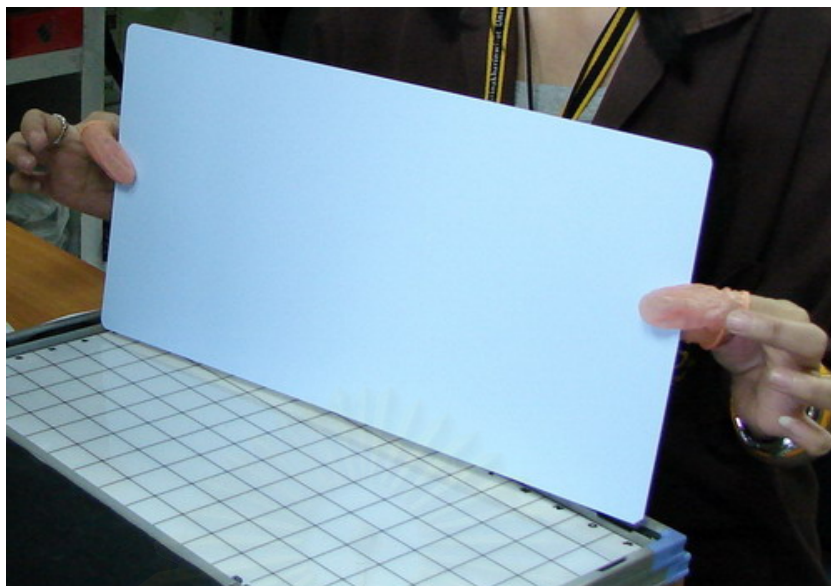
รูปที่ 3.2 โปรเจกเตอร์บรรจุโคบอลต์-60 สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา



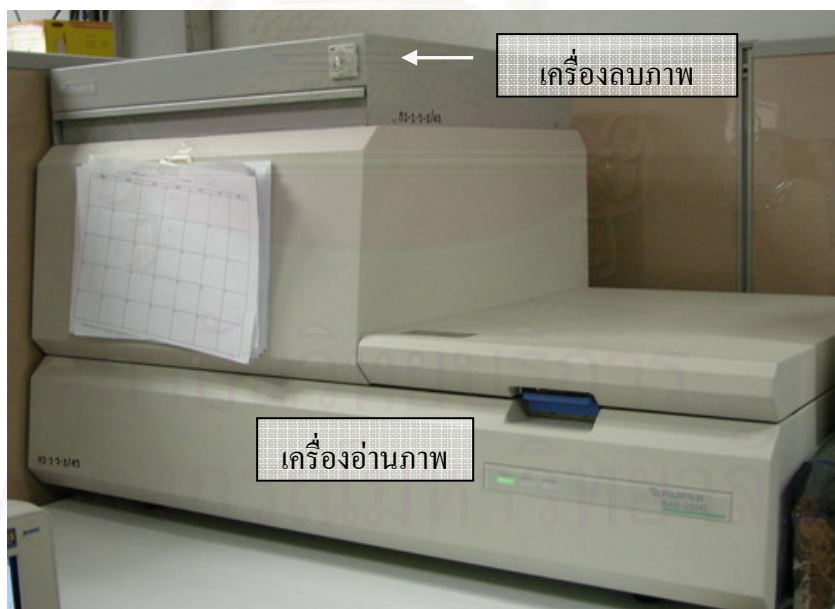
รูปที่ 3.3 โปรเจกเตอร์บริจูดิเทียม-192 สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา



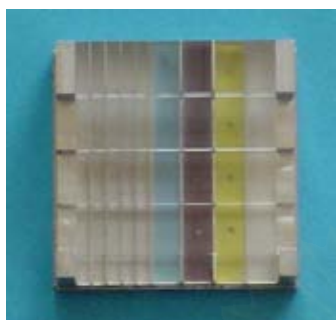
รูปที่ 3.4 เครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์



รูปที่ 3.5 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน BAS-ND 2040



รูปที่ 3.6 เครื่องอ่านและลบภาพแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน BAS-2500



รูปที่ 3.7 Sensitivity Indicator



รูปที่ 3.8 Test Strip B



รูปที่ 3.9 เครื่องขับฟลอปปีดิสก์



รูปที่ 3.10 ฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 3.11 RS-232 คอนเนคเตอร์ 9 PIN



รูปที่ 3.12 RS-232 คอนเนคเตอร์ 25 PIN



รูปที่ 3.13 หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดค์ (ชำรุด)



รูปที่ 3.14 โช้คอัพรถจักรยานยนต์สภาพดี



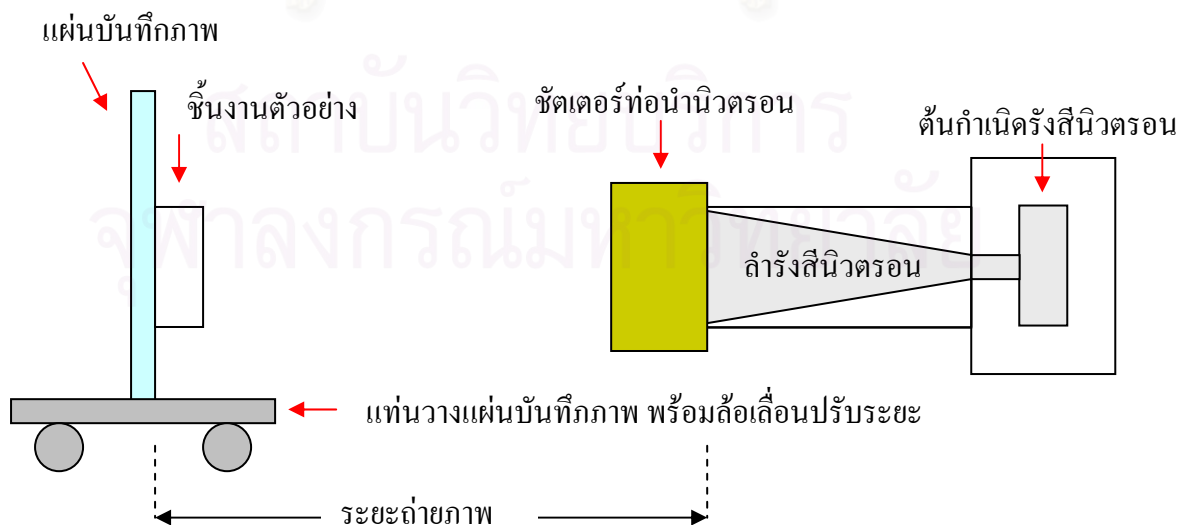
รูปที่ 3.15 โช้คอัพรถจักรยานยนต์ชำรุด

### 3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

ในการดำเนินการวิจัยนี้ ได้ทำการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพและศึกษาคุณสมบัติของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน จากนั้นได้ทำการทดลองนำแผ่นกรองรังสีชนิดต่างๆ มาทำบังรังสีที่ออกมาจากลำนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัยเพื่อศึกษาลักษณะภาพถ่ายที่ได้ และขั้นตอนสุดท้ายได้ทำการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่าง โดยเปรียบเทียบภาพที่ได้ระหว่างการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนและรังสีเอกซ์

#### 3.2.1 การศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการถ่ายภาพชิ้นงานมาตรฐาน SI Test Strip B และตัวอย่างเครื่องจับฟลอปปีดิสก์ โดยติดชิ้นงานดังกล่าวด้วยเทปกาวอะลูมิเนียมบนคาสเซ็ทที่บรรจุแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนแล้ว นำไปถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน โดยมีระยะห่างจากปากท่อนำนิวตรอนถึงแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนเท่ากับ 80, 100 และ 120 ซม. และในแต่ละระยะใช้เวลาในการถ่ายภาพ 5, 10, 15, 20 และ 25 วินาที ตามลำดับ ในการถ่ายภาพแต่ละครั้งจะนำไปคำนวณสร้างภาพด้วยเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพซึ่งควบคุมโดยโปรแกรม Image Reader Version 4 โดยใช้เงื่อนไขการอ่านภาพที่ละเอียดที่สุดตามคำแนะนำของเจ้าหน้าที่ดูแลเครื่องมือ คือ เลือก Gradation : 65536 (16 bit), Resolution : 50, Dynamic Range : L5 S30000 แล้วลบภาพด้วยเครื่องลบภาพเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำมาถ่ายภาพในครั้งต่อไป นำภาพที่ได้มาอ่านค่าความเข้มแสง (PSL) ด้วยโปรแกรม Image Gauge โดยเลือกอ่านที่บริเวณแบกกราวด์ของภาพ เปรียบเทียบค่าความเข้มแสงจากภาพที่ได้ในแต่ละเงื่อนไข

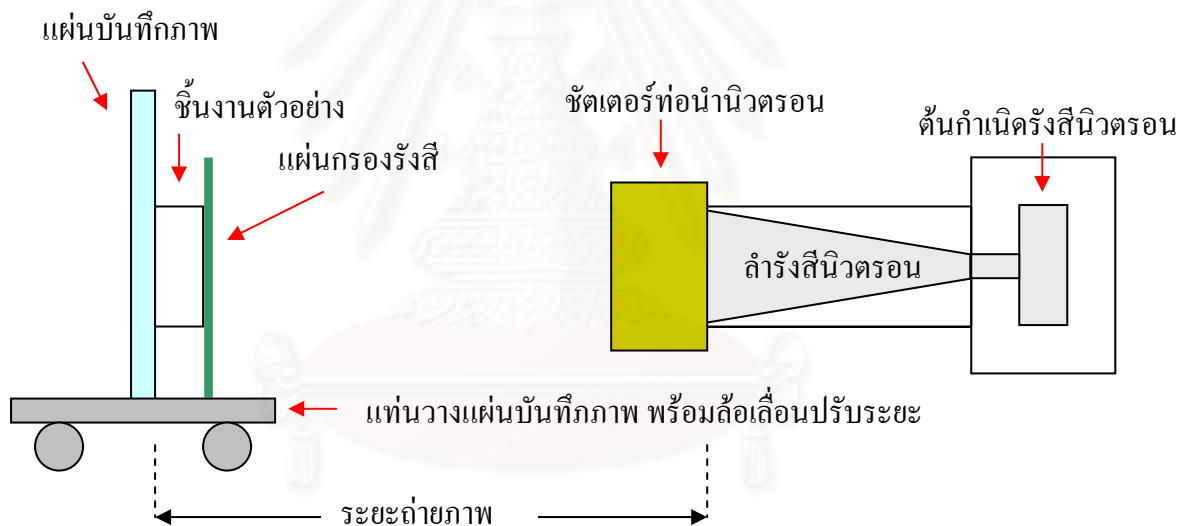


รูปที่ 3.16 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ



### 3.2.2 การศึกษาคุณสมบัติของแผ่นกรองรังสีต่อการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

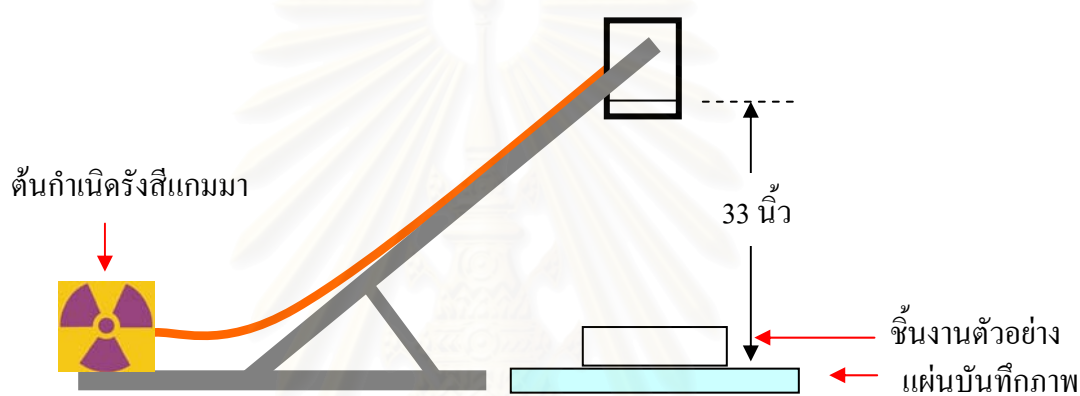
ในขั้นตอนนี้ได้ทำการถ่ายภาพชิ้นงานมาตรฐาน SI Test Strip B และตัวอย่างเครื่องขับฟลอปปีดิสก์ โดยติดชิ้นงานดังกล่าวด้วยเทปกาวอะลูมิเนียมบนคาสเซตต์ที่บรรจุแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนแล้ว นำไปวางที่ตำแหน่งห่างจากปากท่อนำนิวตรอน 120 ซม. จากนั้นนำแผ่นกรองรังสีชนิดต่างๆ ได้แก่ แผ่นโบรอน-10 ความเข้มข้นสูง แผ่นแกโดลิเนียม แผ่นแคดเมียม และแผ่นตะกั่ว มาทำการกำบังรังสีที่ออกจากท่อนำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยวางระหว่างปากท่อนำนิวตรอนกับแผ่นบันทึกภาพและให้วางชิดกับชิ้นงานตัวอย่าง ใช้เวลาในการถ่ายภาพ 15 วินาที จากนั้นนำแผ่นบันทึกภาพไปทำการอ่านด้วยเงื่อนไขตามข้อ 3.2.1 และทำการลบภาพด้วยเครื่องลบภาพเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำมาถ่ายภาพในครั้งต่อไป เปรียบเทียบรายละเอียดของภาพที่ได้



รูปที่ 3.17 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ โดยมีแผ่นกรองรังสี

### 3.2.3 การศึกษาคุณสมบัติความไวต่อรังสีแกมมาของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาความไวต่อรังสีแกมมาของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน โดยนำชิ้นงานตัวอย่างติดบนคาสเซ็ทที่บรรจุแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและแผ่นบันทึกภาพแกมมาไปทำการฉายรังสีแกมมา ด้วยต้นกำเนิดรังสีแกมมาอิริเดียม-192 ด้วยเวลา 1, 2 และ 3 นาที ตามลำดับ โดยมีระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับแผ่นบันทึกภาพ 33 นิ้ว จากนั้นนำแผ่นบันทึกภาพไปทำการอ่านด้วยเครื่องฉายตามข้อ 3.2.1 และลบภาพด้วยเครื่องลบภาพเป็นเวลา 10 นาที ก่อนนำมาถ่ายภาพในครั้งต่อไป นำภาพที่ได้มาอ่านค่าความเข้มแสง ด้วยโปรแกรม Image Gauge โดยเลือกอ่านที่บริเวณแบกกราวน์ของภาพ เปรียบเทียบค่าความเข้มแสงที่ได้จากแผ่นบันทึกภาพทั้งสองชนิด



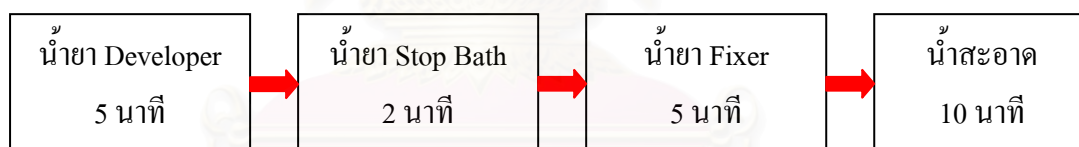
รูปที่ 3.18 การจัดวางอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา

### 3.2.4 การถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนและรังสีเอกซ์/แกมมา

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างและลักษณะภายในของชิ้นงานตัวอย่างโดยเปรียบเทียบภาพที่ได้จากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและแผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์ โดยแบ่งขั้นตอนการถ่ายภาพออกเป็น 3 วิธีด้วยกันคือ

- การถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน นำชิ้นงานตัวอย่างมาทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างของตัวอย่าง ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการถ่ายภาพชิ้นงาน เครื่องขับฟลอปปีดิสก์, ฮาร์ดดิสก์, คอนเนคเตอร์, หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ และโซ่คอปเปอร์จากรยานยนต์ โดยให้มีระยะห่างระหว่างแผ่นบันทึกภาพกับปากท่อนิวตรอน 120 ซม. และใช้เวลาในการถ่ายภาพ 15 วินาที จากนั้นนำแผ่นบันทึกภาพไปทำการอ่านด้วยเครื่องฉายตามข้อ 3.2.2 และลบภาพด้วยเครื่องลบภาพเป็นเวลา 10 นาที

- การถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโคลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์ นำชิ้นงานตัวอย่างชุดเดียวกันมาทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโคลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ เพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างของตัวอย่าง โดยได้นำฟิล์มรังสีเอกซ์ Kodax MX125 ขนาด 35 ซม. x 43 ซม. มาทำการตัดออกเป็นสี่ส่วนเท่ากัน แล้วบรรจุลงในภาชนะที่พร้อมแผ่นแกโคลิเนียมภายในห้องมืด และนำไปถ่ายภาพโดยให้มีระยะห่างระหว่างแผ่นบันทึกภาพกับปากท่อนิวตรอน 120 ซม. และใช้เวลาในการถ่ายภาพ 10 นาที จากนั้นนำฟิล์มรังสีเอกซ์ไปล้าง และผึ่งให้แห้ง ใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพแผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์กับตู้ไฟเพื่อเก็บข้อมูลภาพที่ได้
- การถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา โดยใช้แผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ ในขั้นตอนนี้ได้ทำการนำชิ้นงานตัวอย่างชุดเดียวกันมาถ่ายภาพเพื่อศึกษาลักษณะของโครงสร้างของตัวอย่าง โดยได้นำฟิล์มรังสีเอกซ์ Kodax MX125 ขนาด 35 ซม. x 43 ซม. มาทำการตัดออกเป็นสี่ส่วนเท่ากัน แล้วบรรจุลงในภาชนะที่ภายในห้องมืด ซึ่งมีเงื่อนไขการถ่ายภาพดังตารางที่ 3.1 จากนั้นนำฟิล์มรังสีเอกซ์ไปล้าง และผึ่งให้แห้ง ใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพแผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์กับตู้ไฟเพื่อเก็บข้อมูลภาพที่ได้



รูปที่ 3.19 ขั้นตอนการล้างฟิล์มรังสีเอกซ์

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยต้นกำเนิดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

ชิ้นงานตัวอย่าง	ต้นกำเนิดรังสี	เงื่อนไขการถ่ายภาพ	ระยะถ่ายภาพ
เครื่องขับฟลอปปีดิสก์	รังสีเอกซ์	100 kV 21 mAs	33 นิ้ว
ฮาร์ดดิสก์	รังสีเอกซ์	120 kV 90 mAs	33 นิ้ว
คอนเนคเตอร์	รังสีเอกซ์	100 kV 21 mAs	33 นิ้ว
หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์	รังสีเอกซ์	120 kV 90 mAs	33 นิ้ว
โซ่คอพอลิเมอร์ยานยนต์สภาพดี	โคบอลต์-60	400 Ci-min	36 นิ้ว
โซ่คอพอลิเมอร์ยานยนต์ชำรุด	โคบอลต์-60	400 Ci-min	36 นิ้ว

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

#### 4.1 ผลการศึกษาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

จากการถ่ายภาพชิ้นงานมาตรฐาน SI และ Test Strip B พร้อมด้วยชิ้นงานตัวอย่างเครื่องขับฟลอปปีดิสก์ด้วยเงื่อนไขต่างๆ พบว่าเมื่อเลือกเงื่อนไขการอ่านภาพที่ให้ละเอียดสูงสุดจากโปรแกรม Image Reader จะใช้เวลาในการอ่านแผ่นบันทึกภาพประมาณ 5 นาที และได้ไฟล์ที่มีขนาดประมาณ 64 Mbytes อยู่ในรูปนามสกุล img ซึ่งจะสามารถทำการเปิดด้วยโปรแกรมเฉพาะของบริษัท Fujifilm เท่านั้น ดังนั้นเพื่อความสะดวกต่อการดูภาพถ่ายชิ้นงานที่ได้ จึงได้ทำการแปลงไฟล์ต้นฉบับให้เป็นนามสกุล tiff ด้วยโปรแกรม Image Gauge ของบริษัท ฟุจิฟิล์ม ซึ่งยังคงมีขนาดไฟล์ที่ใหญ่และมีรายละเอียดสูง จากนั้นแปลงไฟล์ภาพเป็นนามสกุล jpg อีกครั้ง ด้วยโปรแกรม ACD see เพื่อให้ขนาดไฟล์ภาพมีขนาดลดลงแต่ยังสามารถมองเห็นรายละเอียดภาพได้เหมือนภาพต้นฉบับ ทำให้สามารถศึกษาคุณสมบัติต่างๆของแผ่นบันทึกภาพได้

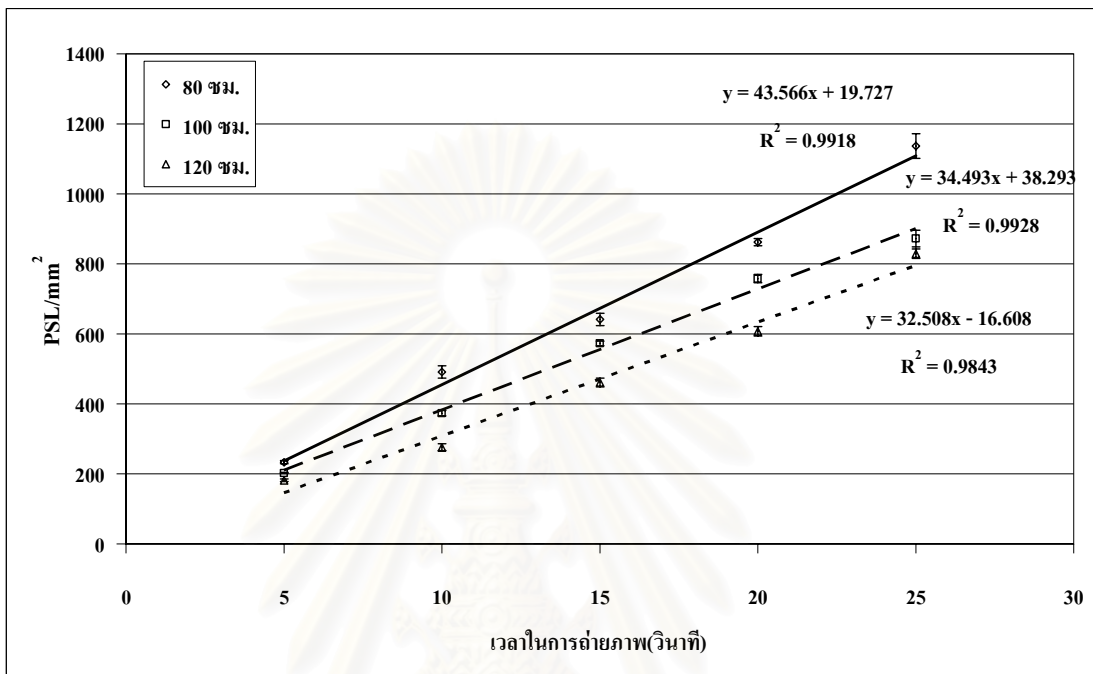
เมื่อทำการอ่านค่าความเข้มแสงบริเวณแบกกราวด์ที่เงื่อนไขการถ่ายภาพต่างๆ พบว่าความเข้มของแสงมีความสัมพันธ์เป็นแบบเชิงเส้นกับระยะเวลาการถ่ายภาพ โดยเมื่อใช้เวลาถ่ายภาพนานขึ้น ค่าความเข้มแสงก็จะมากขึ้นตามไปด้วย ดังรูปที่ 4.1

ค่าความไวของภาพถ่าย สามารถดูได้จากขนาดของช่องอะลูมิเนียมในชิ้นงานมาตรฐาน SI และขนาดเส้นลวด ขนาดรูปที่เล็กที่สุดบนชิ้นงานมาตรฐาน Test Strip B ซึ่งภาพถ่ายที่ได้สามารถบอกรายละเอียดได้ดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3 โดยพบว่าการถ่ายภาพที่ระยะ 120 ซม. เวลาในการถ่ายภาพ 15-25 วินาที สามารถเห็นรายละเอียดของชิ้นงานที่มีขนาดเล็กที่สุดได้ดี

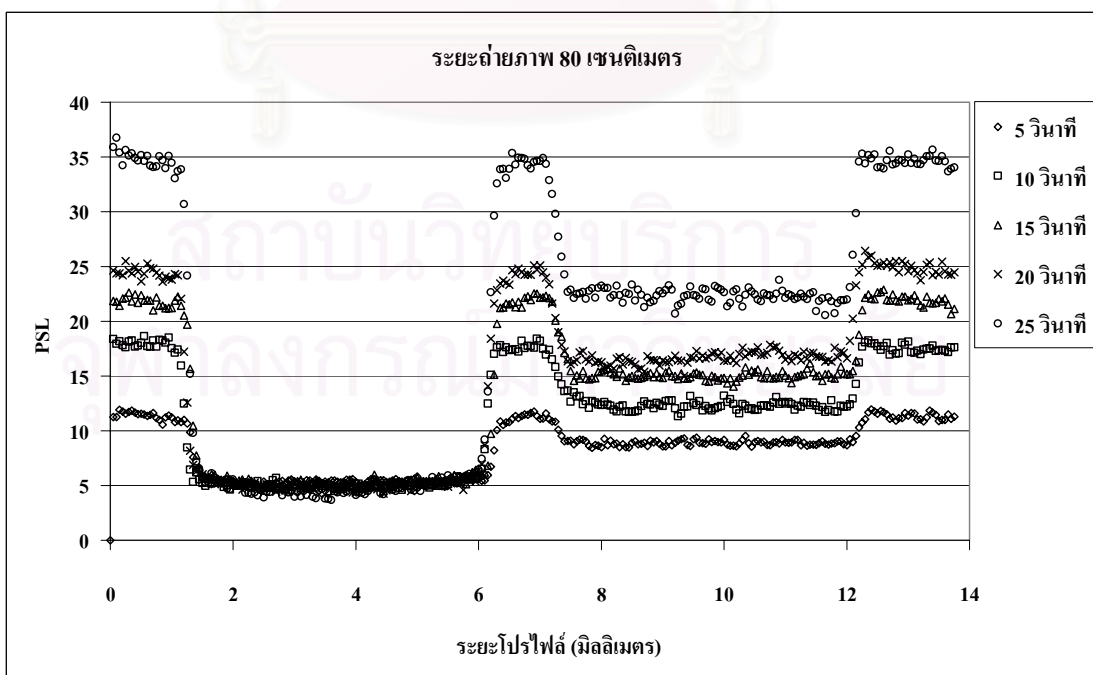
ค่าความคมชัดของภาพถ่าย เมื่อพิจารณาด้วยตาเปล่าและการวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Image Gauge โดยเลือกเมนู โปรไฟล์เพื่อลากผ่านบริเวณที่ต้องการ เพื่อวิเคราะห์ค่าความเข้มแสงตามแนวเส้น พบว่าภาพถ่ายที่ได้มีความคมชัดใกล้เคียงกันมาก

ค่าความเปรียบต่างของภาพถ่าย พิจารณาโดยใช้โปรแกรม Image Gauge โดยเลือกเมนู โปรไฟล์เพื่อลากผ่านบริเวณที่ต้องการ เพื่อพิจารณาค่าความเข้มแสงตามแนวเส้น โดยในการวิจัยนี้ได้ทำการลากโปรไฟล์บนชิ้นงานมาตรฐาน Test Strip B โดยลากผ่านแผ่นแคดเมียมและแผ่นพลาสติกซึ่งมีความเปรียบต่างสูง พบว่าที่ระยะถ่ายภาพเดียวกัน ค่าความเปรียบต่างจะมากขึ้นเมื่อใช้เวลาในการถ่ายภาพนานขึ้น ดังแสดงดังรูปที่ 4.2, 4.3 และ 4.4

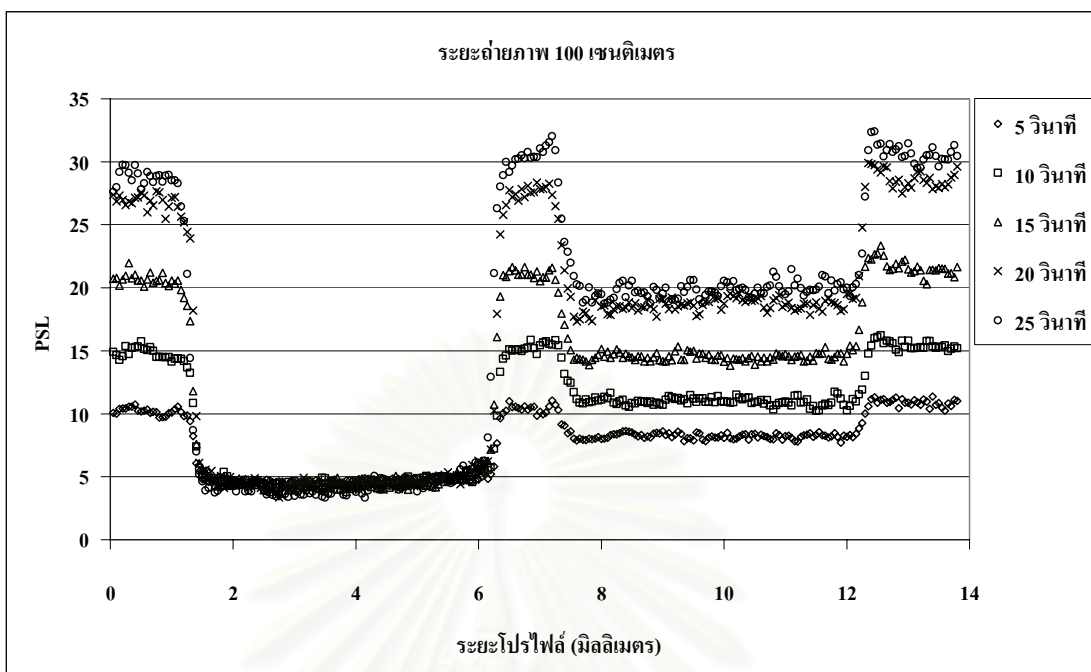
เมื่อคิดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนต่อค่าปริมาณรังสีนิวตรอนที่ได้รับ จากค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์จากท่อนำนิวตรอน ที่ระยะ 100 เซนติเมตร เท่ากับ  $8.95 \times 10^5$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที<sup>[10]</sup> จะได้ว่า 1 PSL ต้องใช้รังสีนิวตรอนประมาณ 240 ตัว



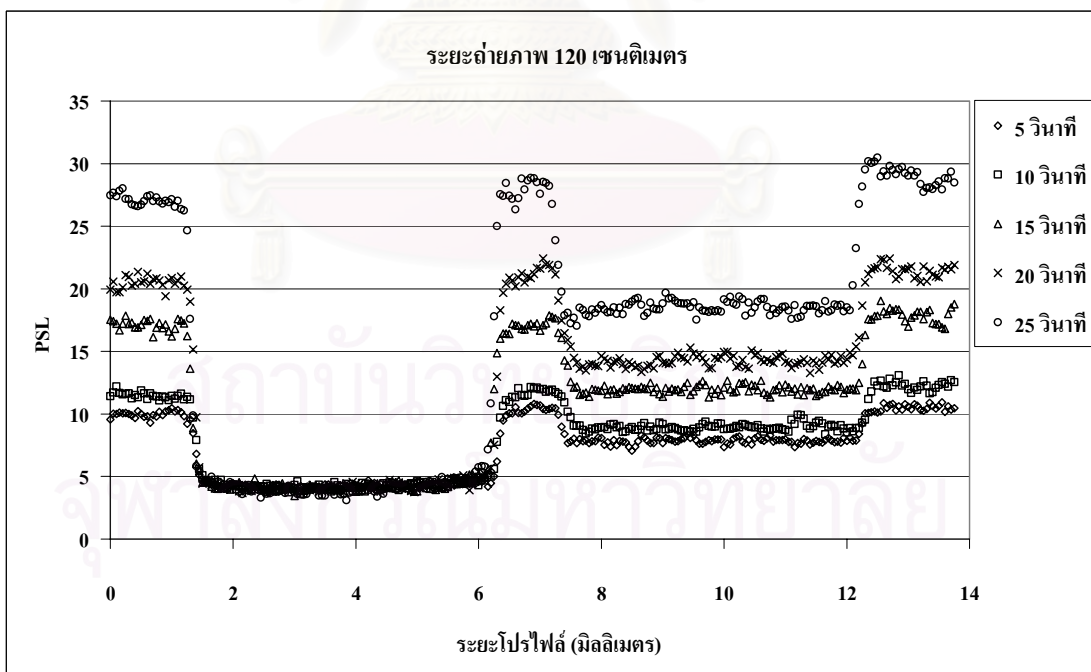
รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงกับเวลาถ่ายภาพที่ระยะถ่ายภาพต่างๆ



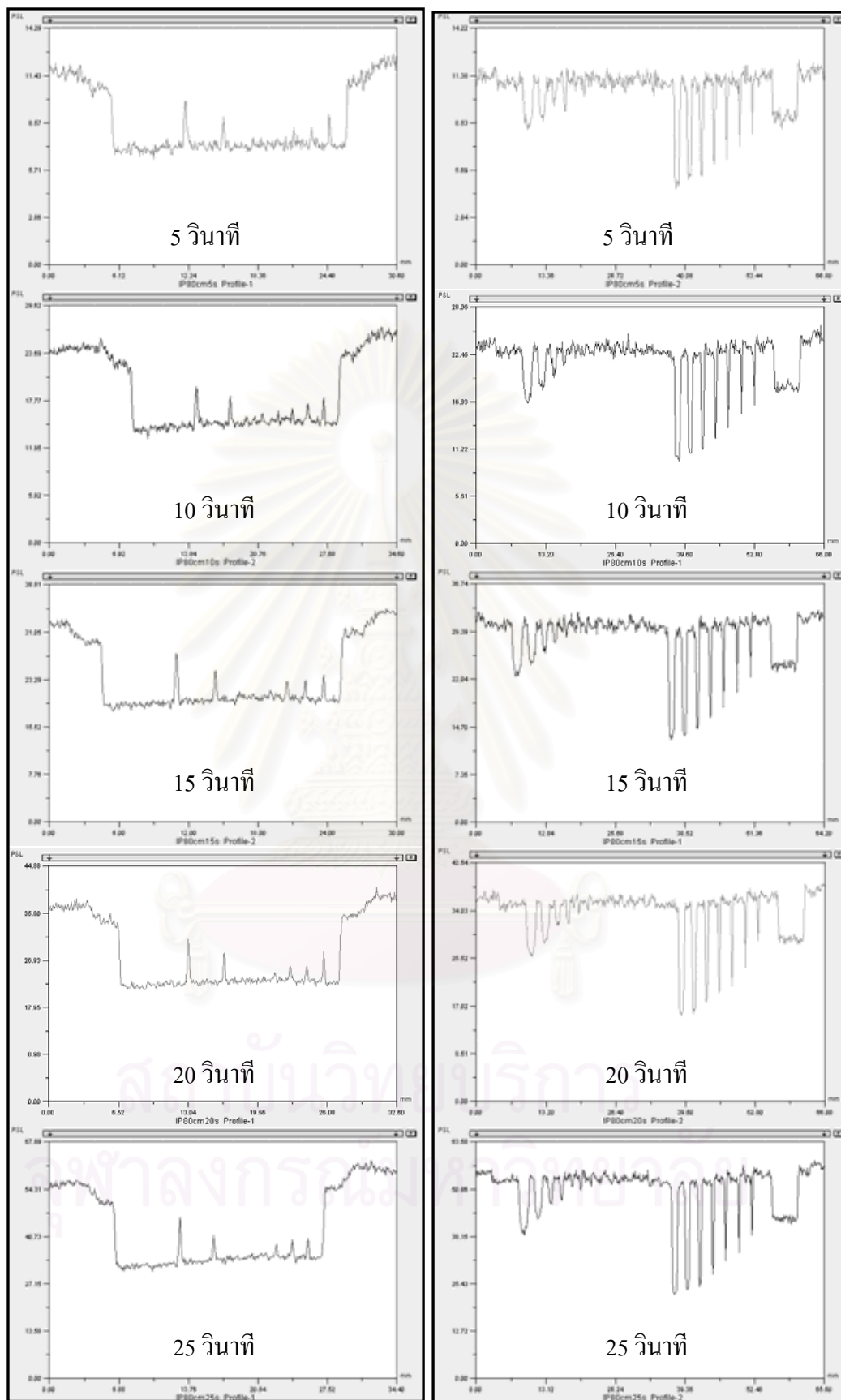
รูปที่ 4.2 แสดงค่าความเข้มแสงของโปรไฟล์บน Test Strip B ที่ระยะถ่ายภาพ 80 ซม.



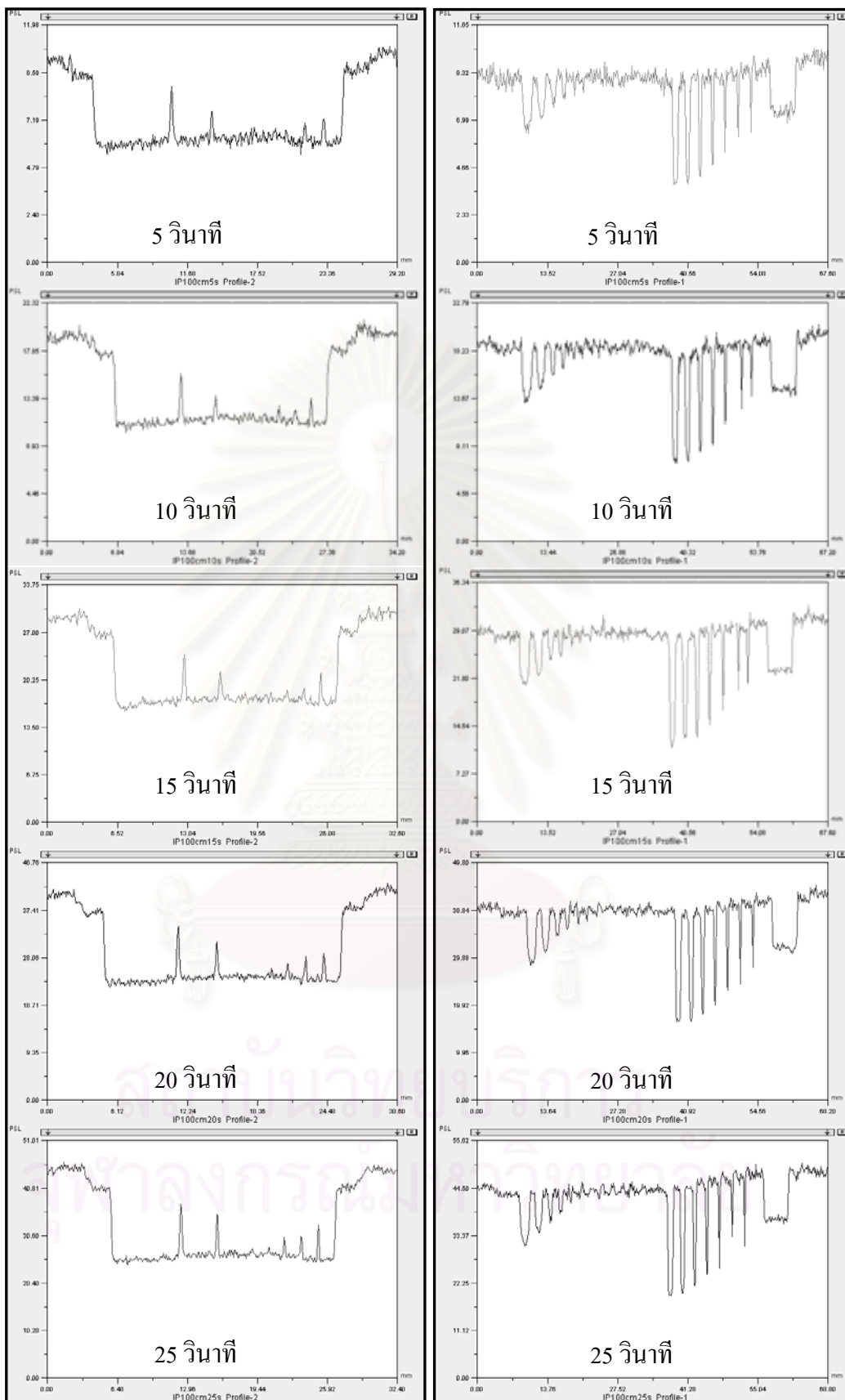
รูปที่ 4.3 แสดงค่าความเข้มแสงของโปรไฟล์บน Test Strip B ที่ระยะถ่ายภาพ 100 ซม.



รูปที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มแสงของโปรไฟล์บน Test Strip B ที่ระยะถ่ายภาพ 120 ซม.

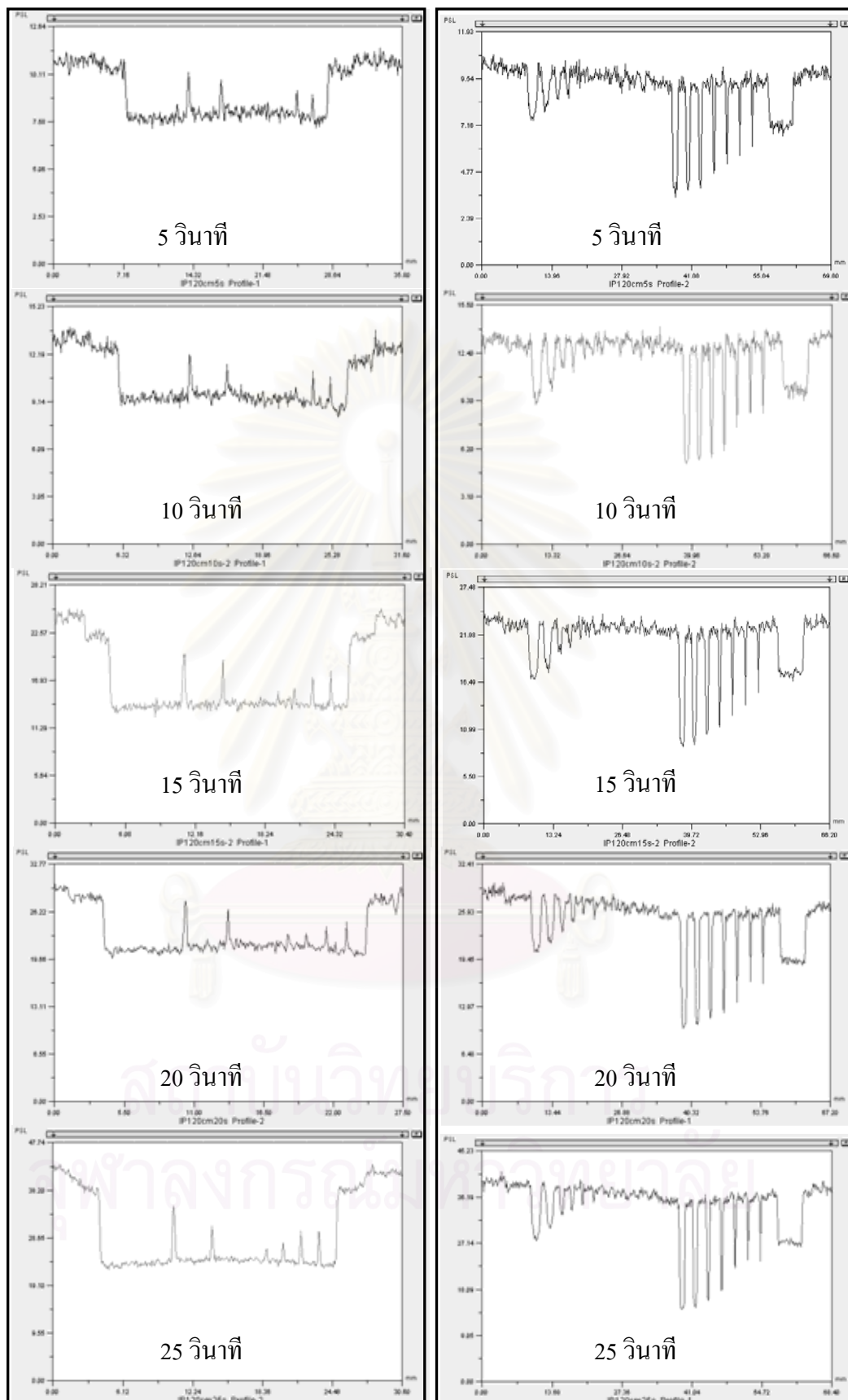


รูปที่ 4.5 แสดงโปรไฟล์บน Sensitivity Indicator (ซ้าย) และ Test strip B (ขวา) ที่ระยะ 80 ซม.



รูปที่ 4.6 แสดงโปรไฟล์บน Sensitivity Indicator (ซ้าย) และ Test strip B (ขวา) ที่ระยะ 100 ซม.





รูปที่ 4.7 แสดงโปรไฟล์บน Sensitivity Indicator (ซ้าย) และ Test strip B (ขวา) ที่ระยะ 120 ซม.

ตารางที่ 4.1 แสดงรายละเอียดขนาดชิ้นงานที่เล็กที่สุด ที่ระยะถ่ายภาพ 80 เซนติเมตร

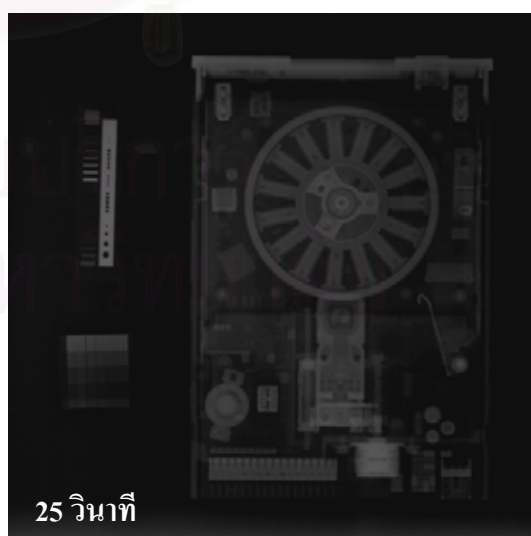
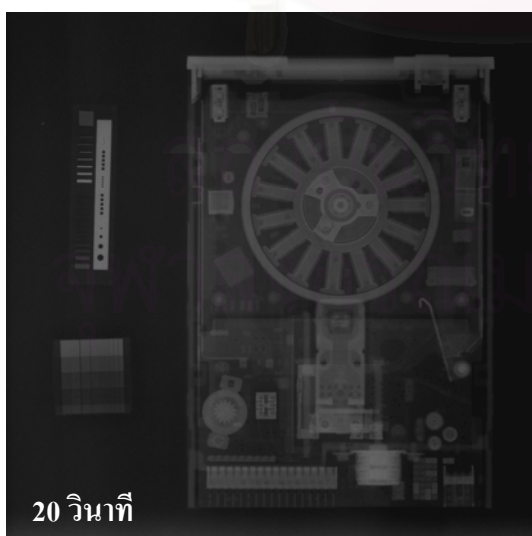
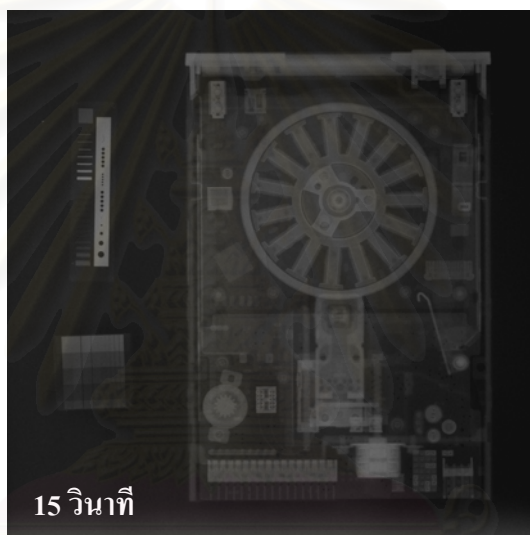
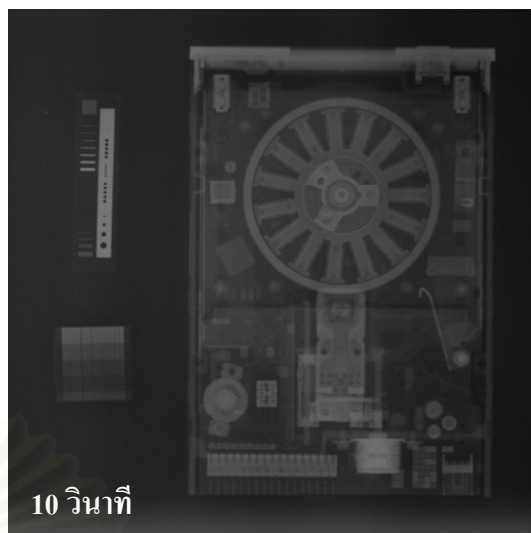
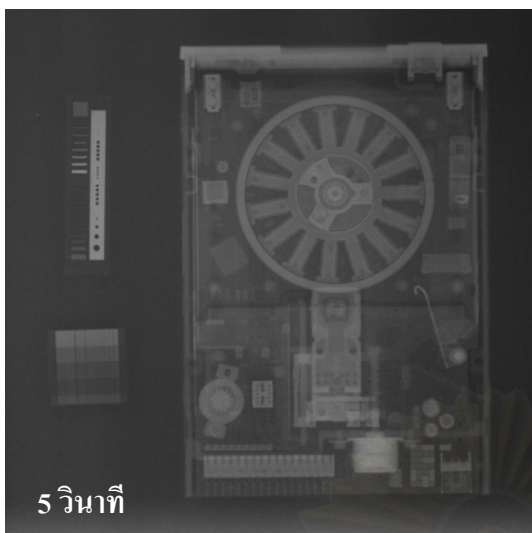
เวลาในการ ถ่ายภาพ (วินาที)	Test Strip B			Sensitivity Indicator	
	ลวดพลาสติก (มม.)	ลวดแคดเมียม (มม.)	รูแคดเมียม (มม.)	ช่องอะลูมิเนียม (มม.)	รูบน Shim (มม.)
5	1	0.1	0.25	0.05	-
10	1	0.1	0.25	0.05	-
15	1	0.1	0.25	0.05	-
20	1	0.1	0.25	0.05	-
25	1	0.1	0.25	0.05	-

ตารางที่ 4.2 แสดงรายละเอียดขนาดชิ้นงานที่เล็กที่สุด ที่ระยะถ่ายภาพ 100 เซนติเมตร

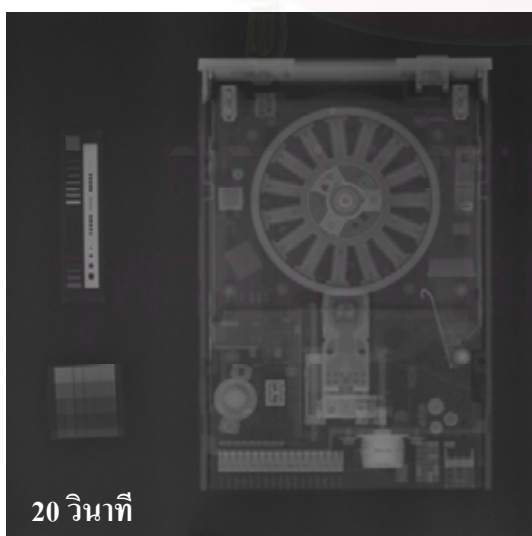
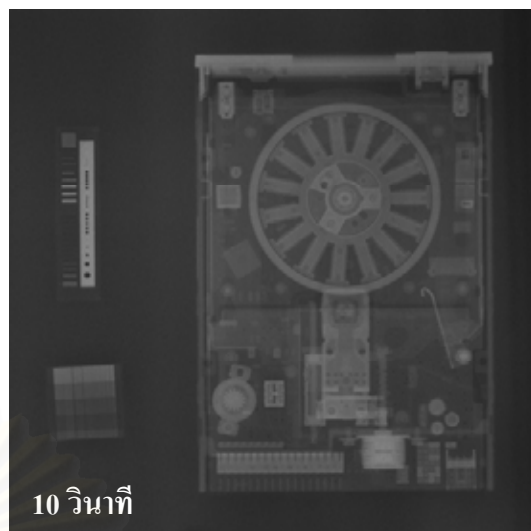
เวลาในการ ถ่ายภาพ (วินาที)	Test Strip B			Sensitivity Indicator	
	ลวดพลาสติก (มม.)	ลวดแคดเมียม (มม.)	รูแคดเมียม (มม.)	ช่องอะลูมิเนียม (มม.)	รูบน Shim (มม.)
5	1	0.1	0.25	0.05	-
10	1	0.1	0.25	0.05	-
15	1	0.1	0.25	0.05	-
20	1	0.1	0.25	0.05	-
25	1	0.1	0.25	0.05	-

ตารางที่ 4.3 แสดงรายละเอียดขนาดชิ้นงานที่เล็กที่สุด ที่ระยะถ่ายภาพ 120 เซนติเมตร

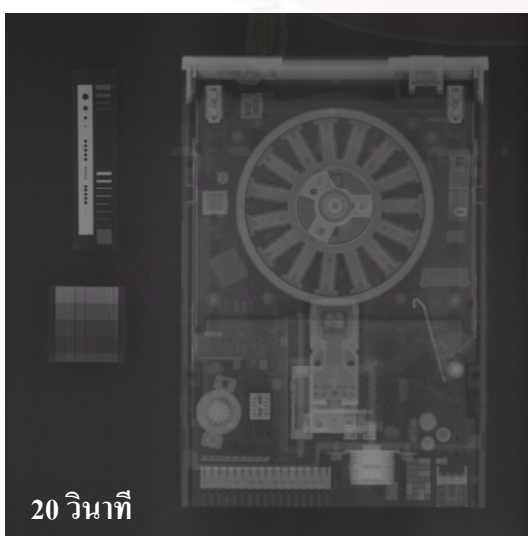
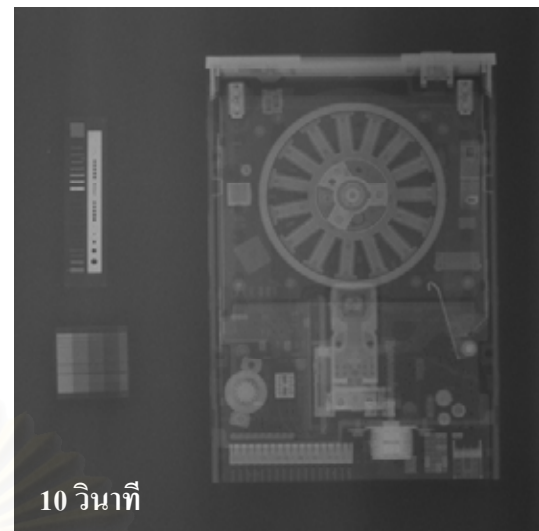
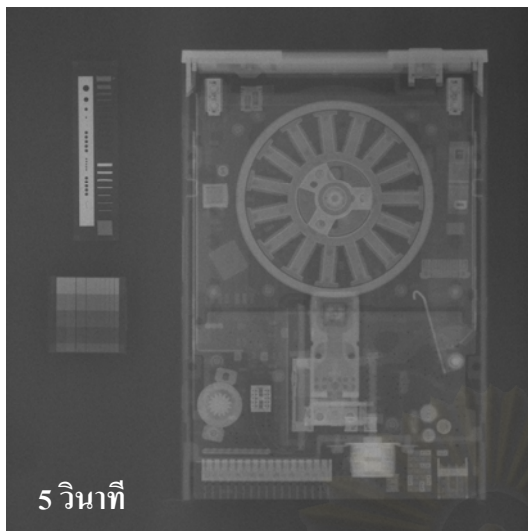
เวลาในการ ถ่ายภาพ (วินาที)	Test Strip B			Sensitivity Indicator	
	ลวดพลาสติก (มม.)	ลวดแคดเมียม (มม.)	รูแคดเมียม (มม.)	ช่องอะลูมิเนียม (มม.)	รูบน Shim (มม.)
5	0.75	0.1	0.25	0.05	-
10	0.75	0.1	0.25	0.05	-
15	0.45	0.1	0.25	0.025	-
20	0.45	0.1	0.25	0.025	-
25	0.45	0.1	0.25	0.025	-



รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายชิ้นงานจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ระยะ 80 ซม. โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพ  
ต่างๆ



รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายชิ้นงานจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ระยะ 100 ซม. โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพ  
ต่างๆ



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายชิ้นงานจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ระยะ 120 ซม. โดยใช้เวลาในการถ่ายภาพ  
ต่างๆ

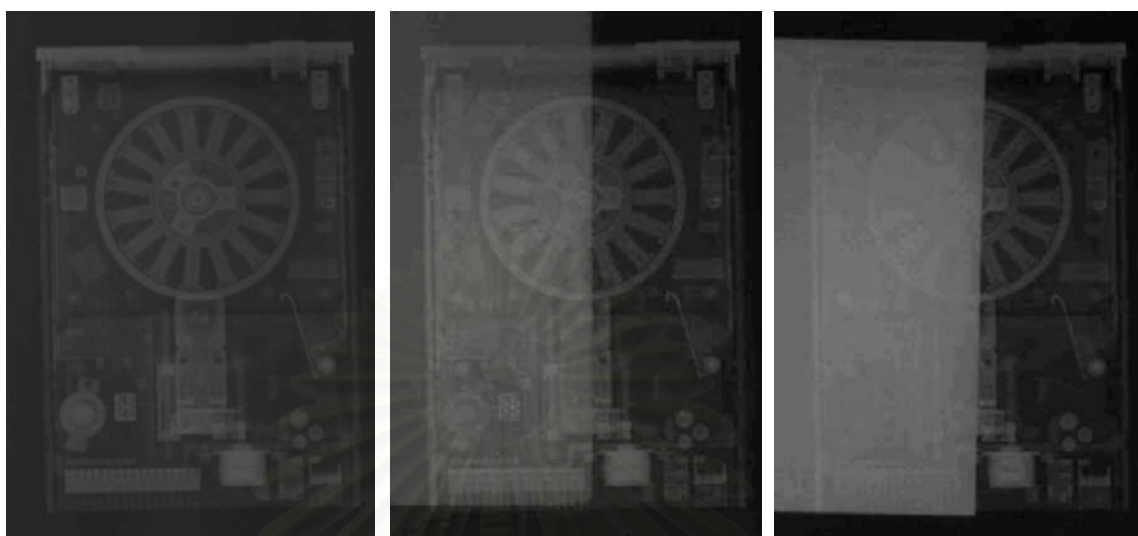
#### 4.2 ผลการศึกษาคุณสมบัติของแผ่นกรองรังสี

จากการนำแผ่นกรองรังสีชนิดต่างๆมาทำการกำบังรังสีที่ออกมาจากท่อนำนิวตรอนพบว่าคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้แตกต่างกันไปตามชนิดของแผ่นกรองรังสี แต่เนื่องจากในงานวิจัยนี้ไม่สามารถควบคุมขนาดและความหนาของแผ่นกรองรังสี จึงไม่สามารถเปรียบเทียบคุณภาพของแผ่นกรองรังสีที่มีผลความคมชัดและความเปรียบต่างได้อย่างชัดเจนนัก

เมื่อพิจารณาคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้ พบว่าเมื่อกรองรังสีด้วยแผ่นตะกั่ว ยังสามารถมองเห็นรายละเอียดได้ชัดเจน ภาพที่ได้ยังมีความคมชัดและความเปรียบต่างสูง อาจเนื่องมาจากแผ่นตะกั่วดูดกลืนรังสีแกมมาที่ออกมาจากท่อนำนิวตรอนได้บางส่วน และยอมให้รังสีนิวตรอนทะลุผ่านไป จึงทำให้สามารถมองเห็นรายละเอียดภาพถ่ายที่เกิดจากรังสีนิวตรอนได้ แต่สำหรับแผ่นกรองรังสีแผ่นโบรอน-10 ความเข้มข้นสูง แผ่นแกโดลิเนียม และแผ่นแคดเมียม มีคุณสมบัติในการดูดกลืนรังสีนิวตรอนพลังงานต่ำได้ดี จึงทำให้คุณภาพของภาพถ่ายลดลงอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าความเข้มแสงบริเวณแบรคกราวด์ที่ลดลงหลังผ่านแผ่นกรองรังสีชนิดต่างๆ

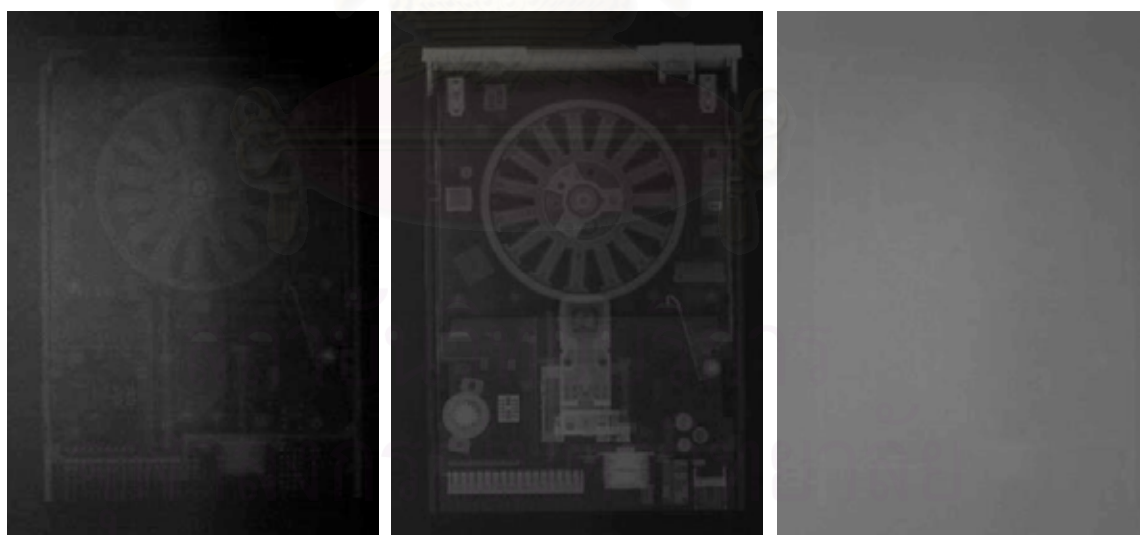
ชนิดแผ่นกรองรังสี	PSL ต่อตารางมิลลิเมตร	%PSL ที่ลดลงหลังผ่านแผ่นกรองรังสี
ไม่มีแผ่นกรองรังสี	461.23 ± 12.06	0.00
แผ่นโบรอน-10 ความเข้มข้นสูง	213.99 ± 10.66	53.60
แผ่นแกโดลิเนียม	142.85 ± 11.74	69.03
แผ่นแคดเมียม	112.90 ± 7.29	75.52
แผ่นตะกั่ว	311.08 ± 6.64	32.55
แผ่นแคดเมียมร่วมกับตะกั่ว	95.68 ± 4.26	79.25



ไม่มีแผ่นกรองรังสี

กรองรังสีด้วยแผ่นโบรอน-10

กรองรังสีด้วยแผ่นแกโดลิเนียม



กรองรังสีด้วยแผ่นแคดเมียม

กรองรังสีด้วยแผ่นตะกั่ว

กรองรังสีด้วยแผ่นแคดเมียม/ตะกั่ว

รูปที่ 4.11 แสดงภาพถ่ายเมื่อใช้แผ่นกรองรังสีชนิดต่างๆ

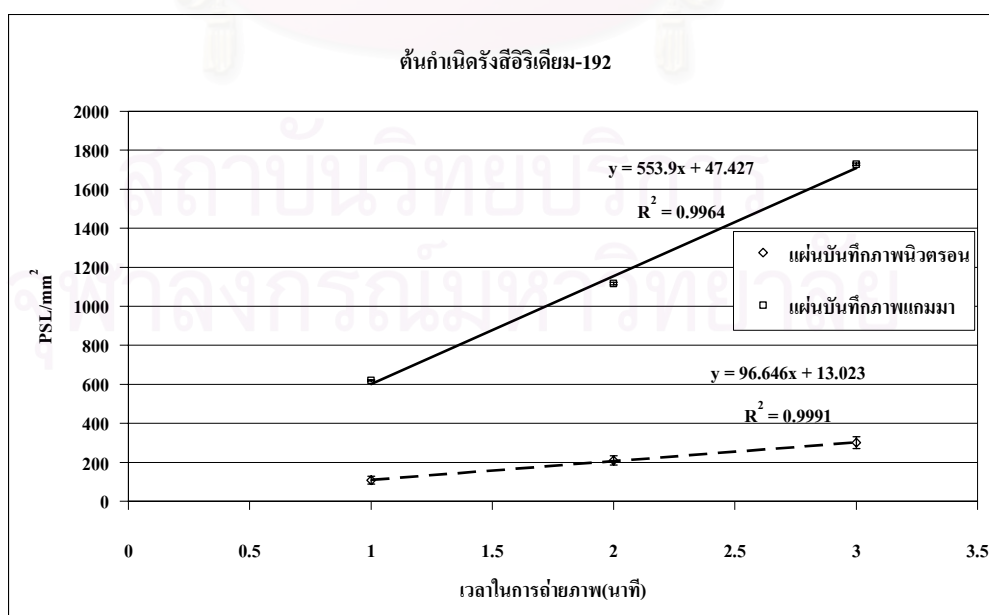
#### 4.3 ผลการศึกษาคุณสมบัติความไวต่อรังสีแกมมาของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

จากผลการวิจัยพบว่าแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนมีความไวต่อทั้งรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา จึงทำให้เกิดภาพขึ้นงานตัวอย่างปรากฏขึ้นเมื่อทำการถ่ายภาพโดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากอิริเดียม -192 ดังแสดงในรูป 4.13 โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าความเข้มแสงที่บริเวณแบกกราวด์ของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนกับแผ่นบันทึกภาพรังสีแกมมา พบว่าแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนมีความไวต่อรังสีแกมมาน้อยกว่าแผ่นบันทึกภาพแกมมาประมาณ 5-6 เท่า ดังตารางที่ 4.5 และมีความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงต่อปริมาณรังสีแกมมาแบบเชิงเส้น แสดงดังรูปที่ 4.12

เมื่อคิดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนต่อค่าปริมาณรังสีแกมมาที่ได้รับ จะได้ว่า 1 PSL ต้องใช้รังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 เท่ากับ  $1.50 \times 10^4$  gammas

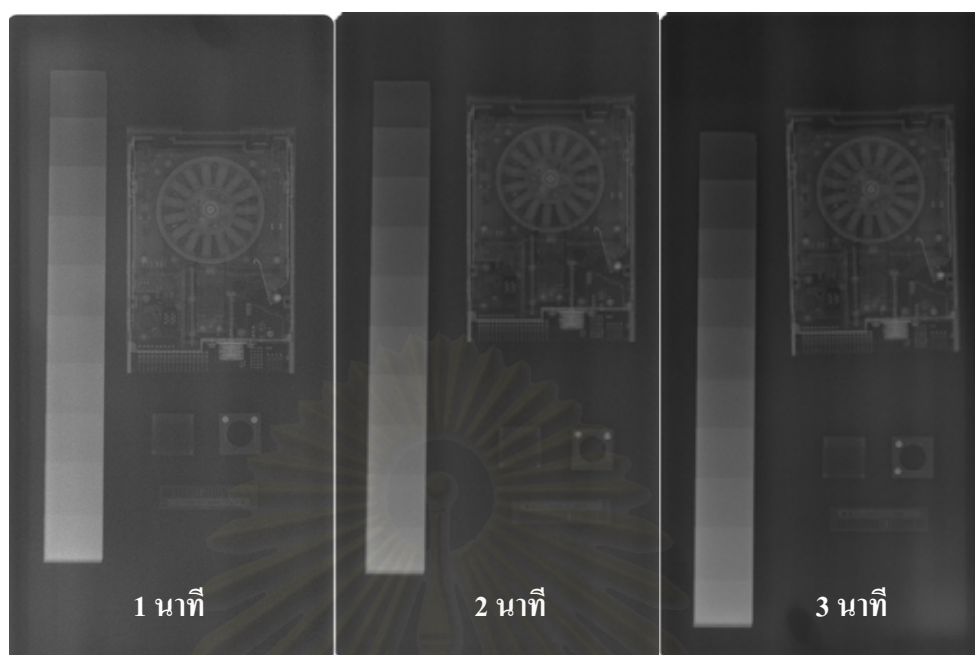
ตารางที่ 4.5 แสดงค่าความเข้มแสงบริเวณแบกกราวด์ของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนและแผ่นบันทึกภาพรังสีแกมมา ที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192

เวลาในการถ่ายภาพ (นาทีก)	PSL ต่อตารางมิลลิเมตร		จำนวนเท่าความไวรังสี
	แผ่นบันทึกภาพ นิวตรอน	แผ่นบันทึกภาพ แกมมา	
1	$108.01 \pm 3.24$	$620.56 \pm 20.00$	5.7
2	$209.63 \pm 6.70$	$1116.74 \pm 23.91$	5.3
3	$301.30 \pm 6.04$	$1728.36 \pm 30.49$	5.7

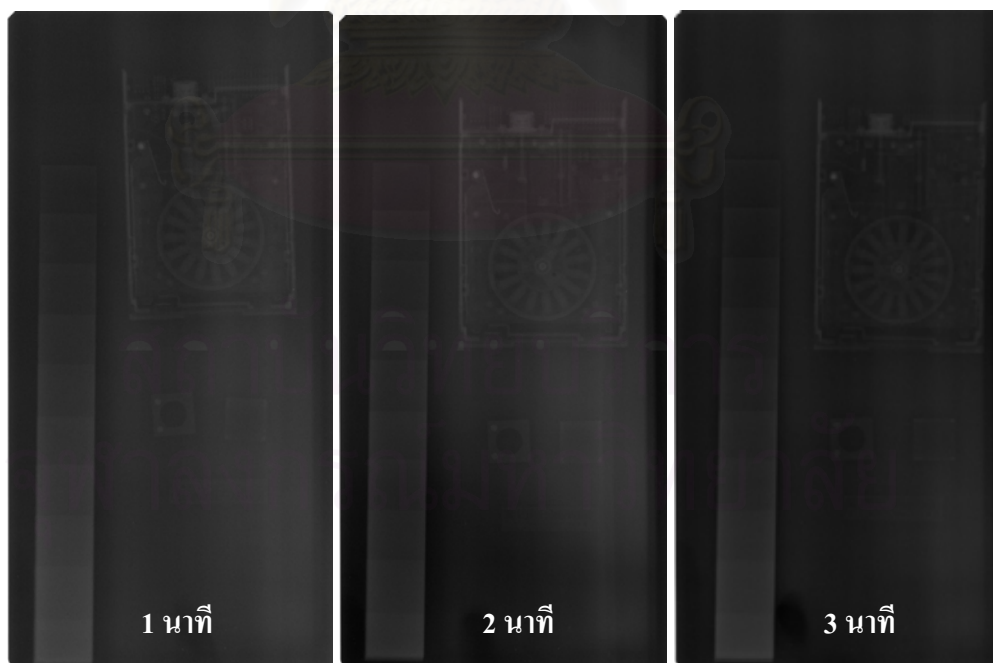


รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับเวลาถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192





รูปที่ 4.13 แสดงภาพถ่ายจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 เป็นเวลา 1, 2 และ 3 นาที ตามลำดับ



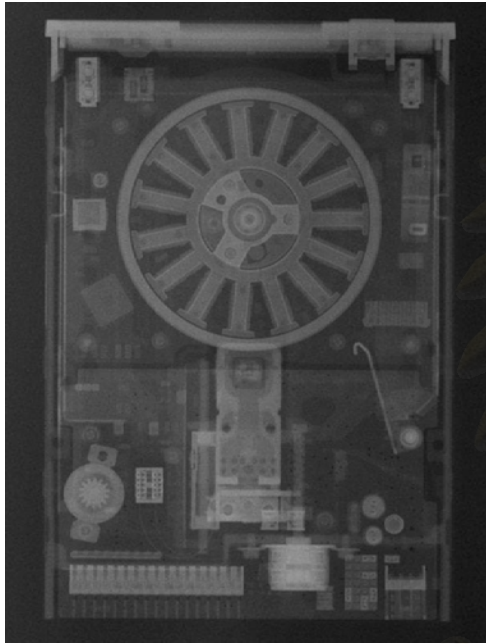
รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายจากแผ่นบันทึกภาพเกมมาที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 เป็นเวลา 1, 2 และ 3 นาที ตามลำดับ

#### 4.4 ผลการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนและรังสีเอกซ์/แกมมา

ในการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างจากเทคนิคการถ่ายภาพทั้ง 3 วิธี พบว่าการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน ที่ระยะ 120 ซม. เวลาถ่ายภาพ 15 วินาที ให้รายละเอียดของภาพถ่ายใกล้เคียงกับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์ ที่ระยะ 120 ซม. เวลาถ่ายภาพ 10 นาที โดยมีความคมชัดของภาพถ่ายใกล้เคียงกัน ทำให้การใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนช่วยลดเวลาในการถ่ายภาพลงจากวิธีเดิมคือ การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์ลงได้ถึง 40 เท่า

ภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน จะให้รายละเอียดของชิ้นงานในส่วนของธาตุเบาได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะแตกต่างกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือแกมมา จะเห็นรายละเอียดของชิ้นงานในส่วนที่เป็นโลหะหรือธาตุหนักแทน

นอกจากนี้ภาพที่ถ่ายด้วยรังสีนิวตรอน ทำให้สามารถเห็นรอยบกพร่องของตัวอย่างชิ้นงานในส่วนที่เป็นธาตุเบาได้ดี เช่น ตัวอย่างหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์ เมื่อทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน จะสามารถเห็นรอยแตกบนผลึกโซเดียมไอโอไดด์ได้อย่างชัดเจน ซึ่งต่างกับภาพเมื่อถ่ายด้วยรังสีเอกซ์จะไม่สามารถเห็นรอยแตกดังกล่าว และตัวอย่างชิ้นงานโซ่คอปเปอร์จากรยานยนต์สภาพดีและชำรุด ทำให้สามารถตรวจสอบความผิดปกติภายในของโครงสร้างภายในชิ้นงานได้ชัดเจน



ก



ข



ค

รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายเครื่องขับฟลอปปีดิสก์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ

หมายเหตุ

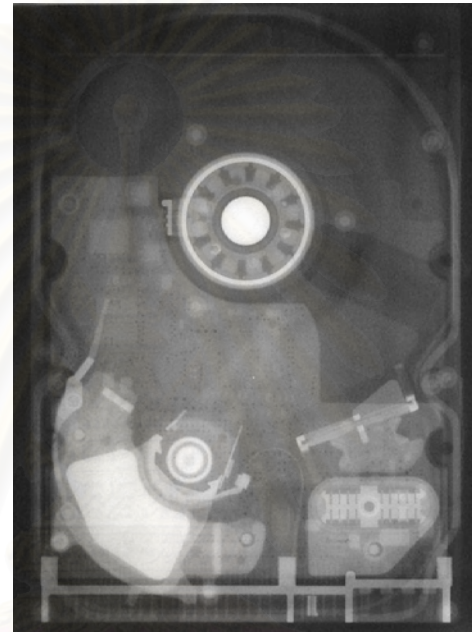
รูป ก คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

รูป ข คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

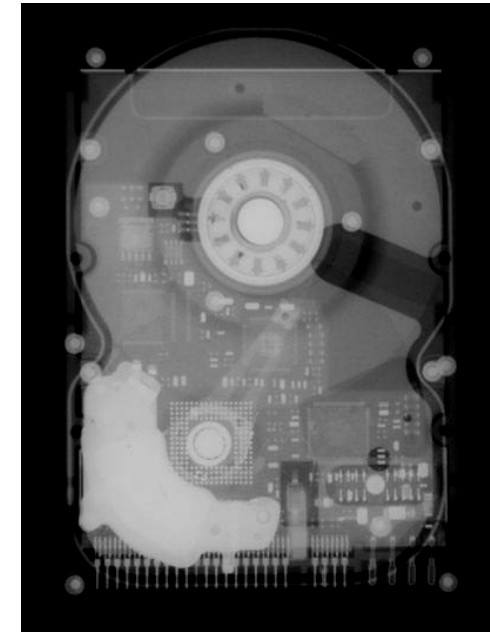
รูป ค คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์โดยใช้แผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ



ก



ข



ค

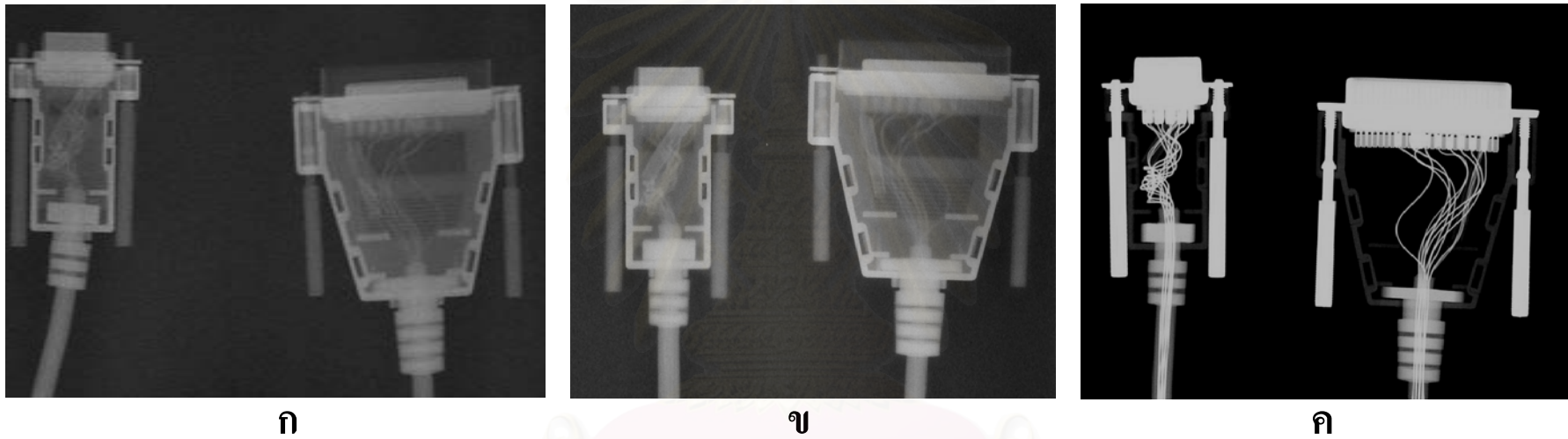
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายฮาร์ดดิสก์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ

หมายเหตุ

รูป ก คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

รูป ข คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

รูป ค คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้แผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ



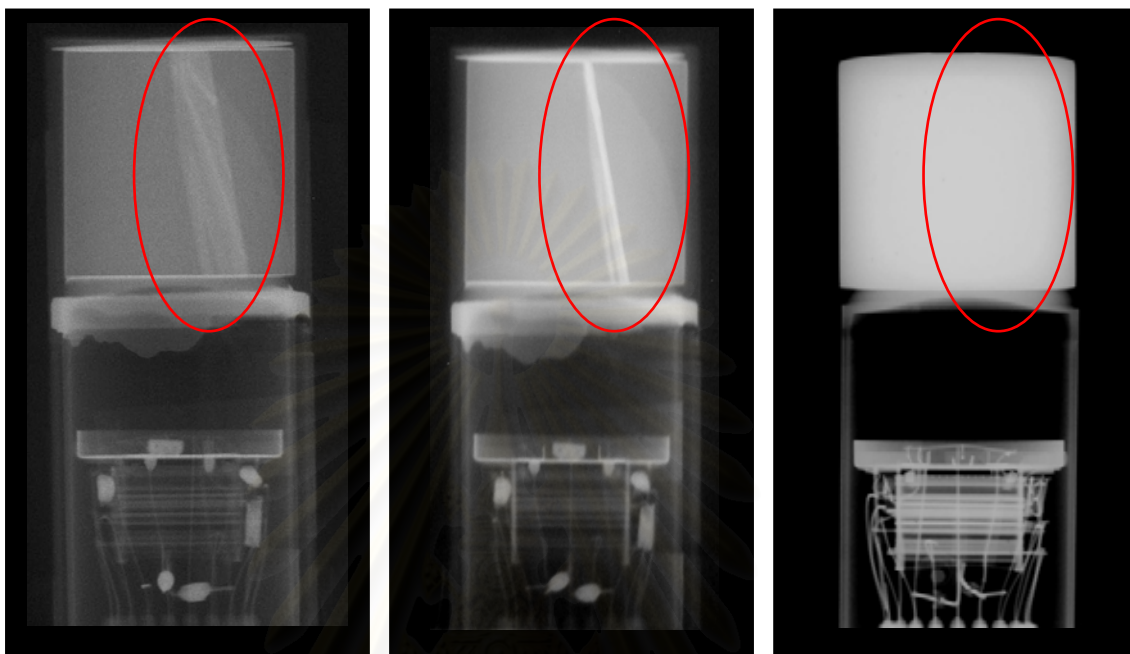
รูปที่ 4.17 ภาพถ่าย RS-232 คอนเนคเตอร์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ

หมายเหตุ

รูป ก คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

รูป ข คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิดแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

รูป ค คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้แผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ



ก

ข

ค

รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายหัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดด์จากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ

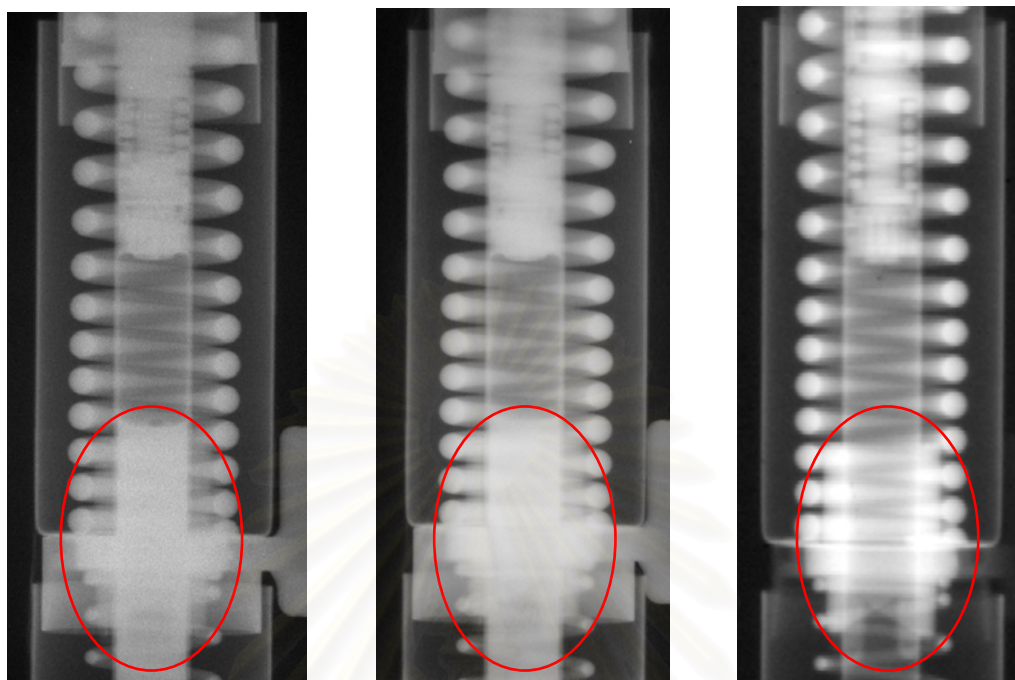
หมายเหตุ

รูป ก คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

รูป ข คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอน โดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิด

แกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

รูป ค คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้แผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ



ก

ข

ค

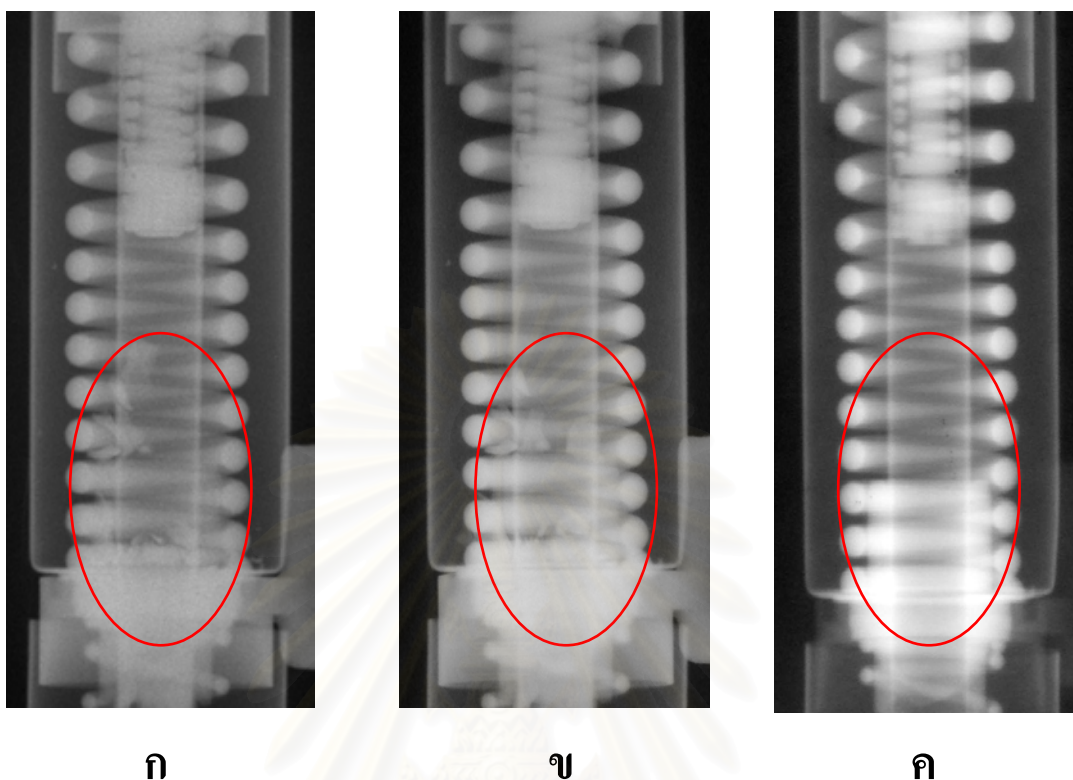
รูปที่ 4.19 ภาพถ่ายใช้คอ้อปรถจักรยานยนต์สภาพดีจากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ

หมายเหตุ

รูป ก คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

รูป ข คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิด  
แกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

รูป ค คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีแกมมาโดยใช้แผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ



รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายใช้ค้อพรตจักรยานยนต์ชำระุดจากวิธีการถ่ายภาพต่างๆ

หมายเหตุ

รูป ก คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

รูป ข คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นเปลี่ยนนิวตรอนชนิด  
แกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์

รูป ค คือ วิธีการถ่ายภาพชิ้นงานตัวอย่างด้วยรังสีแกมมาโดยใช้แผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์บันทึกภาพ



## บทที่ 5

### สรุป วิจารณ์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1.1 แผ่นบันทึกนิวตรอนมีความไวต่อรังสีนิวตรอนสูง และมีลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณรังสีกับค่าความเข้มแสงที่อ่านได้เป็นลักษณะเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้น เมื่อทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากลำนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ฯ เดินเครื่องด้วยกำลัง 1.2 เมกกะวัตต์ สามารถถ่ายภาพชิ้นงานด้วยระยะเวลาสั้นในระดับวินาที ให้รายละเอียดของชิ้นงานได้ โดยเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ พบว่าระยะเวลาถ่ายภาพที่ 120 ชม. เวลาในการถ่ายภาพ 15-25 วินาที สามารถเห็นรายละเอียดของชิ้นงานในตัวอย่างมาตรฐานที่มีขนาดเล็กได้ดี คือ ลวดพลาสติกขนาด 0.45 มม. ลวดแคดเมียม 0.1 มม. ฐานแผ่นแคดเมียม 0.25 มม. ช่องอะลูมิเนียม 0.025 มม. โดยในการวิจัยได้เลือกใช้เวลาในการถ่ายภาพที่ 15 วินาที เนื่องจากใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้น และให้คุณภาพของภาพถ่ายที่ดี

ค่าความเปรียบต่างของภาพถ่ายสูงขึ้นเมื่อได้รับปริมาณรังสีสูงขึ้นหรือเพิ่มเวลาการถ่ายภาพให้มากขึ้น โดยที่ความคมชัดของภาพถ่ายลดลงเพียงเล็กน้อย นอกจากนี้ยังสามารถปรับค่าความสว่างและความเปรียบต่างจากโปรแกรม Image Gauge ได้ทันที รวมทั้งยังสามารถให้แสดงรายละเอียดของภาพถ่ายเป็นสีเทียมเพื่อเพิ่มความสะดวกในการดูภาพ และเพื่อช่วยเพิ่มคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากแผ่นบันทึกภาพได้ดียิ่งขึ้น โดยที่ข้อมูลค่าความเข้มแสงไม่เปลี่ยนแปลง

เมื่อคิดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนต่อปริมาณรังสีนิวตรอนที่ได้รับ ที่ระยะ 100 ซม. จะได้ว่า 1 PSL เกิดจากจำนวนรังสีนิวตรอนประมาณ 240 ตัว

ระยะเวลาการอ่านภาพจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนเมื่อเลือกความละเอียดสูงสุดจะใช้เวลาในการอ่านภาพเพียง 5 นาที และเลือกใช้เวลาลบภาพ 10 นาที ทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการปฏิบัติงานลงได้ จากเดิมที่ต้องนำฟิล์มไปผ่านกระบวนการล้างและอบฟิล์ม และไม่จำเป็นต้องปฏิบัติงานภายในห้องมืด

5.1.2 รังสีที่ออกมาจากท่อนำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ นั้น มีทั้งเทอร์มัลนิวตรอน ฟาสต์นิวตรอน และรังสีแกมมา เจือปนอยู่ ดังนั้นแผ่นกรองรังสีจึงมีผลต่อคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้ โดยที่แผ่นตะกั่วสามารถช่วยกรองรังสีแกมมาที่ออกมาจากท่อนำนิวตรอนได้บางส่วน รวมทั้งแผ่นตะกั่วยังสามารถดูดกลืนรังสีนิวตรอนได้เช่นเดียวกัน ทำให้ค่าความเข้มแสงที่ได้ลดลง ถึง 32% แต่

ยังสามารถเห็นรายละเอียดของชิ้นงานได้ สำหรับแผ่นกรองรังสีโบรอน-10 ความเข้มข้นสูง แผ่นแกโดลิเนียม และแผ่นแคดเมียมสามารถดูดกลืนเทอร์มัลนิวตรอนได้ดี ทำให้รายละเอียดของภาพถ่ายที่ได้ลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากเทอร์มัลนิวตรอนเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเกิดภาพบนแผ่นบันทึกภาพ

5.1.3 แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนนอกจากจะมีคุณสมบัติไวต่อรังสีนิวตรอนแล้ว ยังมีคุณสมบัติไวต่อรังสีแกมมาด้วย เนื่องจากเมื่อนำแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนไปทำการฉายรังสีแกมมาแล้วนำไปอ่านพบว่าเกิดภาพตัวอย่างชิ้นงานบนแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน ดังนั้นภาพถ่ายที่ได้จากการถ่ายด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ จึงอาจเกิดจากรังสีแกมมาที่เจือปนร่วมด้วย ค่าความไวต่อรังสีแกมมาของแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนสามารถหาได้โดยเทียบกับแผ่นบันทึกภาพรังสีแกมมาที่ถ่ายด้วยเงื่อนไขเดียวกัน พบว่าแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนมีความไวต่อรังสีแกมมาน้อยกว่าแผ่นบันทึกภาพรังสีแกมมา 5-6 เท่า

เมื่อคิดความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนต่อค่าปริมาณรังสีแกมมาที่ได้รับ จะได้ว่า 1 PSL ต้องใช้รังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 เท่ากับ  $1.50 \times 10^4$  แกมมา

5.1.4 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนสามารถให้รายละเอียดภาพและความคมชัดได้เป็นที่น่าพอใจ เทียบเท่าได้กับถ่ายภาพโดยใช้แผ่นแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์ ซึ่งถือว่าเป็นวิธีเป็นมาตรฐานและดีที่สุดสำหรับการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน ทำให้ช่วยลดระยะเวลาในการถ่ายภาพลงได้ถึง 40 เท่า รวมทั้งช่วยลดระยะเวลาในขั้นตอนการล้างฟิล์ม การอบฟิล์มให้แห้ง และไม่จำเป็นต้องปฏิบัติการในห้องมืด เมื่อนำแผ่นบันทึกภาพไปลบภาพแล้ว ยังสามารถนำกลับมาใช้ได้ใหม่หลายครั้ง แต่ข้อเสียคือ เมื่อต้องการคุณภาพต้องใช้อุปกรณ์แสดงผลช่วยในการเปิดดูภาพถ่าย ไม่สามารถดูได้ทันทีเหมือนฟิล์มรังสีเอกซ์

เมื่อเปรียบเทียบการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์หรือแกมมานั้น พบว่าสามารถให้รายละเอียดภายในชิ้นงานแตกต่างกัน โดยที่การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจะสามารถให้รายละเอียดในส่วนของชิ้นงานที่เป็นธาตุเบาได้ดี แต่รังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาจะให้รายละเอียดภาพในส่วนของธาตุหนักหรือโลหะได้ดีกว่า

การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นบันทึกภาพนิวตรอนสามารถช่วยในการตรวจสอบรอยบกพร่องของชิ้นงานที่มีส่วนประกอบของธาตุเบาได้ดี หากนำชิ้นงานตัวอย่างไปถ่ายด้วยรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมาจะไม่สามารถตรวจสอบรอยบกพร่องดังกล่าวได้ นอกจากนี้ สามารถนำไปใช้ในการตรวจสอบโดยไม่ทำลายได้ โดยนำไปใช้ร่วมกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนชนิดไอโซโทป เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 อีกทั้งในปัจจุบันเครื่องอ่านแผ่นบันทึกภาพมีขนาดเล็กลง ทำให้สามารถนำไปใช้งานนอกสถานที่ได้อย่างสะดวก

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ในการวิจัยนี้ได้ทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ ซึ่งการควบคุมเวลาการถ่ายภาพ ทำได้โดยผู้ทำการวิจัยต้องเลื่อนชัตเตอร์เพื่อเปิด-ปิดท่อนำนิวตรอนให้ได้ตามเวลาที่กำหนด ลักษณะการเปิดท่อนำนิวตรอน ทำได้โดยการเลื่อนชัตเตอร์ไปทางซ้ายของท่อนำนิวตรอน และเมื่อต้องการปิดท่อนำนิวตรอนจะทำการดึงกลับชัตเตอร์มาสู่ตำแหน่งเดิม เนื่องจากการเปิด-ปิดท่อนำนิวตรอนจากด้านเดียวของท่อนำนิวตรอน และชัตเตอร์มีน้ำหนักมาก ทำให้ผู้ทำการวิจัยไม่สามารถควบคุมความเร็วของการเปิด-ปิดให้สม่ำเสมอทุกครั้งได้ ทำให้แผ่นบันทึกภาพที่มีความไวต่อรังสีสูงได้รับปริมาณนิวตรอนไม่เท่ากันทั้งแผ่น จึงอาจส่งผลกระทบต่อคุณภาพของภาพถ่ายและค่าความเข้มแสงที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกภาพ หากมีการพัฒนาระบบการเปิด-ปิดชัตเตอร์ท่อนำนิวตรอนให้มีลักษณะเปิด-ปิดจากทั้งสองด้านของท่อนำนิวตรอน ก็จะช่วยให้สามารถควบคุมเวลาการถ่ายภาพ และรับปริมาณรังสีนิวตรอนสม่ำเสมอยิ่งขึ้น

5.2.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้แผ่นแกโดลิเนียมกับฟิล์มรังสีเอกซ์นั้นสามารถให้รายละเอียดภาพที่ดี ภาพที่ได้มีความคมชัดสูง แต่ทั้งนี้ขนาดของภาพจะถูกจำกัดด้วยขนาดของแผ่นแกโดลิเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน จึงทำให้สามารถเห็นรายละเอียดชิ้นงานได้เฉพาะบริเวณที่มีแผ่นแกโดลิเนียม หากสามารถเพิ่มขนาดของแผ่นแกโดลิเนียมได้ก็จะทำให้ได้ภาพถ่ายที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรืออาจจะต้องทำการถ่ายภาพหลายครั้งเพื่อให้ได้ภาพถ่ายครบทั้งชิ้นงาน

5.2.3 ภาพถ่ายจากการถ่ายภาพด้วยแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนมีลักษณะข้อมูลเป็นแบบดิจิทัล จึงทำให้สามารถพัฒนาโปรแกรมสำหรับนำภาพถ่ายที่ถ่ายด้วยรังสีนิวตรอน รังสีเอกซ์ หรือรังสีแกมมา มารวมกันให้อยู่ในภาพเดียวกัน เพื่อให้สามารถเห็นรายละเอียดภายในชิ้นงานที่มีส่วนประกอบทั้งธาตุเบาและธาตุหนักได้ หรือนำข้อมูลภาพถ่ายมาลบกันได้ จะทำให้คุณภาพของภาพถ่ายดีขึ้น เนื่องจากจะได้ภาพที่เกิดจากเทอร์มัลนิวตรอนเพียงอย่างเดียว

5.2.4 เนื่องจากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอนมีความไวต่อรังสีนิวตรอนสูง และทำการถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ฯ ทำให้ใช้เวลาในการถ่ายภาพสั้น แต่สำหรับงานการตรวจสอบโดยไม่ทำลาย หากชิ้นงานมีขนาดใหญ่ จะไม่สามารถนำชิ้นงานมาทำการถ่ายภาพที่เครื่องปฏิกรณ์ฯได้ เนื่องจากข้อจำกัดของสถานที่ ซึ่งหากนำข้อมูลจากงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้งานการตรวจสอบโดยไม่ทำลายกับต้นกำเนิดรังสีนิวตรอนแบบไอโซโทป เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 ก็จะทำให้สามารถพัฒนาไปสู่การถ่ายภาพในทางอุตสาหกรรมได้

## รายการอ้างอิง

- [1] P. Von Der Hardt and H. Rottger. **Neutron Radiography Handbook**. Netherlands: D. Reidel Publishing Company, 1981.
- [2] John R. Lamarch. **Introduction to Nuclear Engineering 2nd Edition**. United States of America: Addison-Wesley Publishing Company, 1983.
- [3] Garrett, D.A., and Berger, H. The Technological Development of Neutron Radiography. **Atomic Energy Review**. 15, 2 (June 1977)
- [4] Jungji Miyahara. The Imaging Plate : A New Radiation Image Sensor. **Chemistry Today**, 223 (October 1989) : 29-36.
- [5] Kenji Takahashi and Seiji Tazaki. Development of BAS-ND Imaging Plate. **Fujifilm Research and Development**, 43 (1998)
- [6] สรวุฑ ใจเย็น. การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินัลนิวตรอนโดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- [7] อัมไพ สุขบำเพ็ญ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ นเรศร์ จันทน์ขาว เคโซ ทองอร่าม และ นฤปวิจัก์ เงิน วิจิตร. การถ่ายภาพรังสีทางอุตสาหกรรมด้วยอริเดียม-192 โดยใช้เทคนิคคอมพิวเตอร์กราฟิ. วารสารสมาคมนิวเคลียร์ 4, 1 (2544)
- [8] Kentora Toh. **Optimization of Neutron Imaging Plate for High Speed Read-out Method**. J. Phys. Soc. Jpn. 70 (2001)
- [9] R. Pugliesi and E. Lemann. **Neutron-induced Electron Radiography Using an Imaging Plate**. Applied Radiation and Isotopes 62 (2005) : 457-460
- [10] วิเชียร รตนรงค์ชัย. การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้จากเปลี่ยนนิวตรอนบีโอ-10. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- [11] International Atomic Energy Agency. **Practical Aspects of Operating A Neutron Activation Analysis Laboratory**. IAEA. 1990.



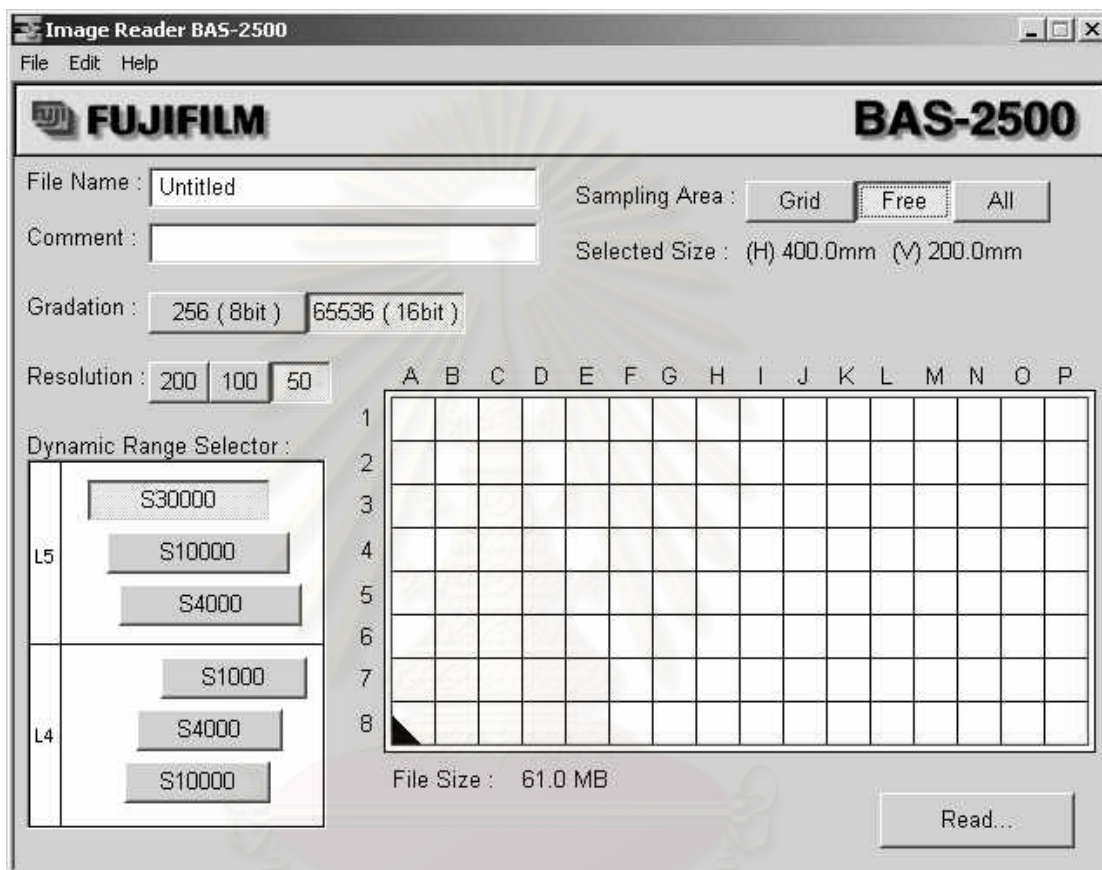
ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

## โปรแกรม Image Reader BAS-2500

ใช้สำหรับการควบคุมและกำหนดเงื่อนไขการอ่านภาพบนแผ่นบันทึกภาพ



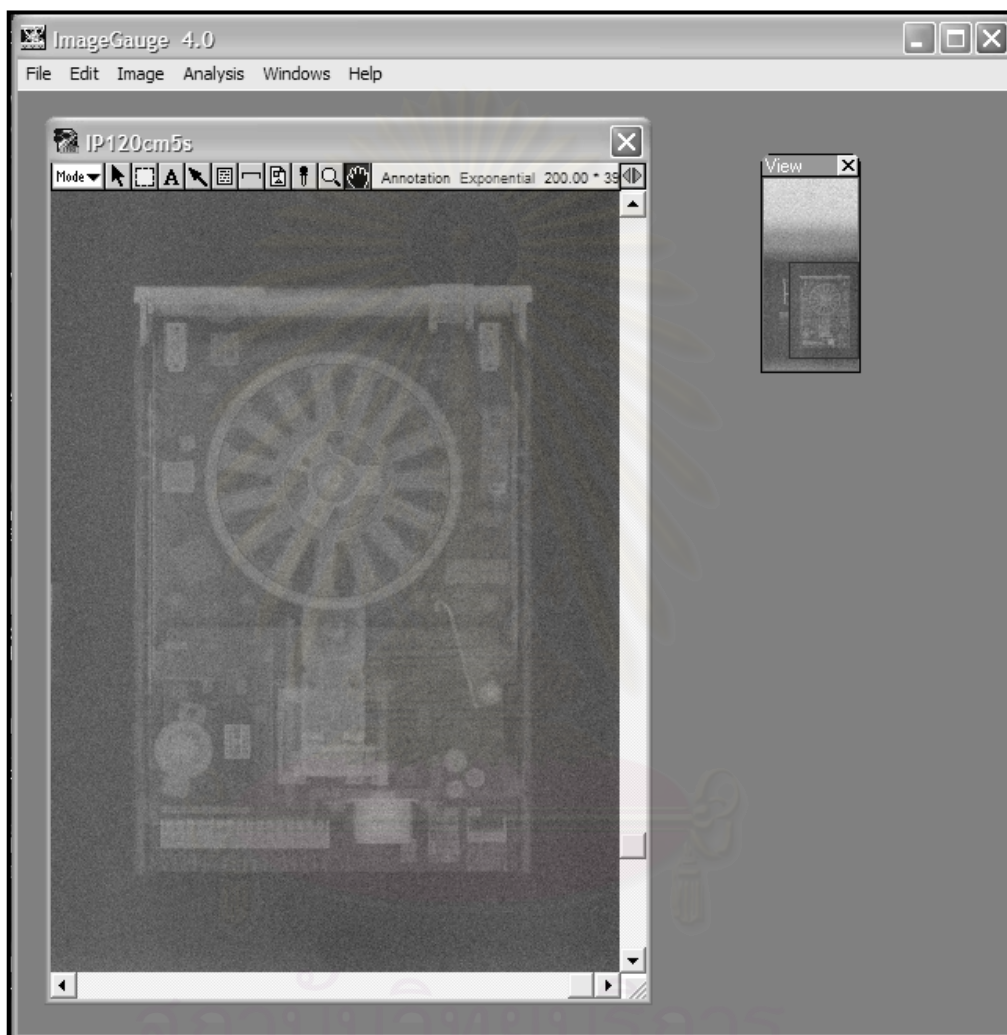
รูปที่ ก-1 แสดงลักษณะ โปรแกรม Image Reader BAS-2500

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ข

### โปรแกรม Image Gauge Version 4.0

สำหรับใช้ในการวิเคราะห์ความเข้มแสง และลักษณะโปรไฟล์จากภาพถ่ายที่ได้



รูปที่ ข-1 แสดงลักษณะโปรแกรม Image Gauge Version 4.0

## ภาคผนวก ค

### ตัวอย่างการคำนวณ

ความสัมพันธ์ของปริมาณรังสีต่อค่าเข้มแสงที่อ่านได้จากแผ่นบันทึกภาพนิวตรอน

- การถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอน

จากข้อมูลต่อไปนี้

ค่าเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์จากท่อนำนิวตรอน ที่ระยะ 100 cm เท่ากับ  $8.91 \times 10^5 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$

ถ่ายภาพด้วยรังสีนิวตรอนโดยใช้เวลา 5 วินาที ได้ค่า PSL = 202.23 PSL mm<sup>-2</sup>

เมื่อถ่ายภาพโดยใช้เวลา 1 วินาที ค่าความเข้มแสง = 202.23 / 5 PSL mm<sup>-2</sup>

= 40.45 PSL mm<sup>-2</sup>

=  $4.04 \times 10^3$  PSL cm<sup>-2</sup>

จะได้ว่า 1 PSL เกิดจากจำนวนรังสีนิวตรอน =  $8.91 \times 10^5 / 4.04 \times 10^3$

= 221.28 ตัว

ในทำนองเดียวกัน

ค่า PSL ที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยเวลา 10, 15, 20 และ 25 วินาที เท่ากับ 373.35, 572.60, 758.03

และ 872.22 ตามลำดับ

เมื่อถ่ายภาพโดยใช้เวลา 1 วินาที จะได้ว่า 1 PSL เกิดจากรังสีนิวตรอน 239.72, 234.46, 236.14 และ

256.53 ตัว ตามลำดับ

ดังนั้น เมื่อคิดหาค่าเฉลี่ย จะได้ว่า 1 PSL เกิดจากรังสีนิวตรอน 237.62 ตัว หรือประมาณ 240 ตัว

- การถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา

จากข้อมูลต่อไปนี้

ต้นกำเนิดรังสีแกมมา อิริเดียม-192 มีพลังงานของรังสีแกมมา และสัดส่วนความเข้มของรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงานดังนี้<sup>[11]</sup>

พลังงานรังสีแกมมา(keV)	%ความเข้มของรังสีแกมมา
295.96	28.73
308.46	29.75
316.51	83.00
468.07	47.72



ต้นกำเนิดรังสีแกมมาอิริเดียม-192 ความแรงรังสี ณ วันที่ทำการทดลอง 3.3 Ci

ความแรงรังสีแกมมา	= 3.3	Ci
	= $3.3 \times 3.7 \times 10^{10}$	dps
	= $1.22 \times 10^{11}$	dps
ความเข้มของรังสีแกมมาพลังงาน 295.96 keV	= $1.22 \times 10^{11} \times 0.2873$	gammas.s <sup>-1</sup>
	= $3.51 \times 10^{10}$	gammas.s <sup>-1</sup>
ความเข้มของรังสีแกมมาพลังงาน 308.46 keV	= $1.22 \times 10^{11} \times 0.2975$	gammas.s <sup>-1</sup>
	= $3.63 \times 10^{10}$	gammas.s <sup>-1</sup>
ความเข้มของรังสีแกมมาพลังงาน 316.51 keV	= $1.22 \times 10^{11} \times 0.8300$	gammas.s <sup>-1</sup>
	= $1.01 \times 10^{11}$	gammas.s <sup>-1</sup>
ความเข้มของรังสีแกมมาพลังงาน 468.07 keV	= $1.22 \times 10^{11} \times 0.4772$	gammas.s <sup>-1</sup>
	= $5.79 \times 10^{10}$	gammas.s <sup>-1</sup>
ความเข้มรังสีแกมมารวม	= $3.51 \times 10^{10} + 3.63 \times 10^{10} + 1.01 \times 10^{11} + 5.79 \times 10^{10}$	
	= $2.31 \times 10^{11}$	gammas.s <sup>-1</sup>
ความเข้มรังสีแกมมาที่ระยะถ่ายภาพ = ความเข้มรังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีต่อพื้นที่ทรงกลมที่ตำแหน่งถ่ายภาพ (ระยะถ่ายภาพ 33 นิ้ว หรือ 83.82 เซนติเมตร)		
I	= $2.31 \times 10^{11} / 4 \times \pi \times 83.82^2$	gammas cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
	= $2.61 \times 10^6$	gammas cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
ทำการถ่ายภาพ (t) 1 นาที (60 วินาที)		
Gamma fluence = I x t		
	= $2.61 \times 10^6 \times 60$	gammas cm <sup>-2</sup>
	= $1.57 \times 10^8$	gammas cm <sup>-2</sup>
หรือ	= $1.57 \times 10^6$	gammas mm <sup>-2</sup>
และค่า PSL ที่อ่านได้จาก Imaging plate	= 108.01	PSL mm <sup>-2</sup>
จะได้ว่า 1 PSL เกิดจากจำนวนรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192	= $1.57 \times 10^6 / 108.01$	
	= $1.45 \times 10^4$	gammas

ในทำนองเดียวกัน เมื่อคิดที่เวลาถ่ายภาพ 2 และ 3 นาที

จะได้ว่า 1 PSL เกิดจากรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 =  $1.50 \times 10^4$  และ  $1.56 \times 10^4$  gammas

เมื่อคิดค่าเฉลี่ยที่เวลาต่างๆ ดังนั้น 1 PSL เกิดจากรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 =  $1.50 \times 10^4$  gammas

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศรินรัตน์ วงษ์ลี เกิดเมื่อวันที่ 26 เมษายน พ.ศ. 2521 สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) จากภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปี พ.ศ. 2543 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (นิเวศวิทยาเทคโนโลยี) ที่ภาควิชาเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 ปัจจุบันทำงานในตำแหน่งนักวิทยาศาสตร์นิเวศวิทยา สถาบันเทคโนโลยีนิเวศวิทยาแห่งชาติ (องค์การมหาชน) กลุ่มวิจัยและพัฒนานิเวศวิทยา ด้านวิทยาการก้าวหน้า



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย