

การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ

นางสาวทิพาพร อติกานต์กุล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคามหัตถศาสตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-421-6

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

11937812a

**DEVELOPMENT OF NEUTRON RADIOGRAPHIC TECHNIQUES  
FOR LOW THERMAL NEUTRON FLUX**



**Miss Tipaporn Atikankul**

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

**Department of Nuclear Technology**

**Graduate School**

**Chulalongkorn University**

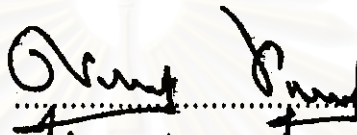
**Academic Year 1998**

**ISBN 974-332-421-6**

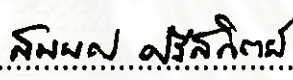
หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอน  
 ความเข้มต่ำ  
 โดย                                  นางสาวทิพาพร อติกานต์กุล  
 ภาควิชา                              นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
 อาจารย์ที่ปรึกษา                  ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว

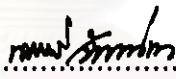
---

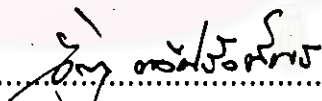
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต


  
 ..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
 (ศาสตราจารย์นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
 ..... ประธานกรรมการ  
 (รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

  
 ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

  
 ..... กรรมการ  
 (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปรัมย์พร)

  
 ..... กรรมการ  
 (อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ทิพาพร อติกานต์กุล : การพัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ (DEVELOPMENT OF NEUTRON RADIOGRAPHIC TECHNIQUES FOR LOW THERMAL NEUTRON FLUX) อ. ที่ปรึกษา : ศศ. นเรศร์ จันทร์ขาว ; 142 หน้า. ISBN 974-332-421-6.

ได้พัฒนาเทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ และเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายที่ได้จากเทคนิคที่พัฒนาขึ้นกับเทคนิคปกติที่ใช้กันอยู่ ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนประกอบด้วยต้นกำเนิดนิวตรอน พลูโทเนียม-238/เบริลเลียมและอะเมริเซียม-241/เบริลเลียม จากเปลี่ยนนิวตรอน NE-426 นิวตรอนคออลิเมเตอร์มีค่า L/D เท่ากับ 15 และอัตราส่วนแคดเมียม 13.18 โดยมีเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งถ่ายภาพ  $1.22 \times 10^2$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเชอร์ ใช้ฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ฟรี-เอกซ์โพสด้วยแสงจากเครื่องขยายภาพเป็นเวลา 0.4 ถึง 1.0 วินาที สามารถลดระยะเวลาในการถ่ายภาพได้ถึง 50 % ของเวลาในการถ่ายภาพโดยเทคนิคปกติ การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่อุณหภูมิ -20 ถึง -40 องศาเซลเซียส โดยใช้ไนโตรเจนเหลวในการหล่อเย็นฟิล์มและฉาก บันทึกรูปภาพด้วยฟิล์มอิลฟอร์ด เอชพี 5 พลัส ให้ภาพถ่ายที่มีความดำของฟิล์มสูงกว่าภาพถ่ายโดยเทคนิคปกติเกือบ 2 เท่า การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มฟูจิ เอชพี-3000บี สามารถลดระยะเวลาในการถ่ายภาพได้ถึง 20 เท่า และใช้เวลาในกระบวนการสร้างภาพเพียง 15 วินาที การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนทั้ง 3 เทคนิคนี้ ให้ภาพถ่ายที่มีค่าความดำบนฟิล์ม ความไวในการเกิดภาพ ความเปรียบต่าง และความคมชัดเป็นที่น่าพอใจ จึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนความเข้มต่ำ ซึ่งจะเป็นประโยชน์สำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลาย ขณะที่การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องถ่ายภาพ บันทึกรูปภาพด้วยฟิล์มฟูจิ นีโอแพน 1600 ถ่ายภาพนาน 5 วัน พบว่าไม่เกิดภาพบนฟิล์ม แต่ได้ภาพถ่ายที่มีคุณภาพดีเมื่อใช้นิวตรอนที่มีความเข้ม  $7.85 \times 10^5$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที จากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว.1/1 และรังสีเอกซ์จากเครื่องกำเนิดรังสีเอกซ์ ข้อดีของเทคนิคใช้กล้องถ่ายภาพกับฟิล์มฟูจิ นีโอแพน 1600 คือ มีราคาถูกกว่าเทคนิคอื่นๆ มาก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี .....  
สาขาวิชา ..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี .....  
ปีการศึกษา ..... 2541 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... *ทิพาพร อติกานต์กุล* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *นเรศร์ จันทร์ขาว* .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาพร้อม .....

\*\* C819051 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: NEUTRON RADIOGRAPHY / THERMAL NEUTRON / NE-426 SCREEN

TIPAPORN ATIKANKUL : DEVELOPMENT OF NEUTRON RADIOGRAPHIC TECHNIQUES FOR LOW THERMAL NEUTRON FLUX. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. NARES CHANKOW. 142 pp. ISBN 974 - 332-421-6.

Neutron radiographic techniques for low thermal neutron flux were developed and the quality of radiographs was compared with those obtained from a conventional technique. The experimental setup conditions for neutron radiography consisted of Pu-238/Be and Am-241/Be neutron sources, a NE-426 neutron converter screen, a neutron collimator with an L/D ratio of 15 and a cadmium ratio of 13.18 providing a thermal neutron flux of  $1.22 \times 10^2$  n/cm<sup>2</sup>-s at the specimen position.

Neutron radiography using Ilford HP 5 plus films pre-exposed to light from a photo-enlarger for 0.4 to 1.0 s was found to reduce the exposure time by 50%. It was also found that by cooling the Ilford HP 5 plus films and neutron converter screen using liquid nitrogen to -20 to -40 °C, the radiographs would increase their optical density by a factor of 2. When Fuji FP-3000B films were used the exposure time was reduced by as much as 20 times and it took only 15 s to process the films. In terms of optical density, sensitivity, contrast and sharpness, all 3 techniques were found to provide satisfactory results and hence, they are suitable for low thermal neutron flux radiography and can be applied as a non-destructive testing tool. On the contrary, neutron radiography with camera using Fuji Neopan 1600 films did not reveal any image on the film even after 5 days of exposure. However, when a high thermal neutron flux of  $7.85 \times 10^5$  n/cm<sup>2</sup>-s from the Thai Research Reactor TRR1/M1 or x-ray from an x-ray machine were instead used, high quality radiographs could be obtained. The major advantage of using camera / Fuji Neopan 1600 film was that it was much cheaper than the other developed techniques.

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....

สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....

ปีการศึกษา.....2541.....

ลายมือชื่อนิสิต.....*Tipaporn Atikankul*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....*Assoc. Prof. Nares Chankow*.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ รวมทั้งจัดหาอุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ และอาจารย์เดโช ทองอร่าม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือวัดรังสีและยิมอุปกรณ์ในการวิจัยจากศูนย์เครื่องมือวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ ที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและให้คำปรึกษาในการทำวิจัยมาโดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์และเจ้าหน้าที่ประจำภาควิชานิวเคลียร์ เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน

ขอขอบพระคุณ คุณบัญญัติ คุณพานิช ที่กรุณาให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ รวมทั้งช่วยจัดหาอุปกรณ์และซ่อมเครื่องมือวัดรังสี คุณวิมล ทรัพย์ส่งสุข ที่ให้กำลังใจและให้ความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง งานวิจัยสำเร็จ

ขอขอบคุณ คุณชัยวัฒน์ มั่นเจริญ คุณทวีศักดิ์ กิระวิทยา คุณอุริช อັชชโคสิต คุณทรงศักดิ์ องค์กรพัฒนกุล คุณวรางคณา หอมจันทร์ คุณไพศาล เดิมสินวามิช รวมทั้งเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจตลอดมา

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยบางส่วนในการทำวิจัยครั้งนี้

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และทุกคนในครอบครัว ที่ให้ความรัก ดูแลเอาใจใส่ ให้กำลังใจ และให้การสนับสนุนในทุกด้าน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฅ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฉ
สารบัญภาพ.....	ณ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย.....	3
1.6 งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง.....	3
2. ทฤษฎี.....	5
2.1 บทนำ.....	5
2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน.....	5
2.1.2 ชนิดของนิวตรอน.....	5
2.1.3 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร.....	6
2.1.4 กาศตัดขวางของนิวตรอน.....	9
2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	11
2.2.1 ประวัติการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	11
2.2.2 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	12
2.2.3 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	18
2.2.4 ส่วนประกอบสำคัญของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	24
2.3 ดันกำเนิดนิวตรอน.....	25



บทที่	สารบัญญ(ต่อ)	หน้า
	2.3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู.....	30
	2.3.2 เครื่องเร่งอนุภาค.....	32
	2.3.3 ดันกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์.....	36
	2.4 นิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	39
	2.5 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	46
	2.5.1 ฉากปลดปล่อยแสง.....	46
	2.5.2 ฉากโลหะ.....	49
	2.5.3 ฉากเทรก-เอตซ์.....	51
	2.6 ฟิล์มและอุปกรณ์แสดงภาพ.....	52
	2.7 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายนิวตรอน.....	56
	2.7.1 การตรวจสอบความคมชัดของภาพถ่าย.....	57
	2.7.2 การตรวจสอบความเปรียบต่างของภาพถ่าย.....	58
	2.7.3 การวัดค่าความดำบนฟิล์ม.....	58
	2.7.4 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่ายด้วยวัตถุตัวอย่างมาตรฐาน.....	59
	3. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย.....	65
	3.1 วัสดุและอุปกรณ์.....	65
	3.1.1 ดันกำเนิดนิวตรอน.....	65
	3.1.2 ระบบวัดนิวตรอนช้า.....	67
	3.1.3 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	69
	3.1.4 ฟิล์มบันทึกภาพ.....	69
	3.1.5 วัตถุตัวอย่างสำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	70
	3.1.6 คลิปใส่ฟิล์ม.....	71
	3.1.7 น้ำยาล้างฟิล์ม.....	72
	3.1.8 ตู้ไฟฟิล์ม.....	72
	3.1.9 อุปกรณ์วัดคุณภาพของภาพถ่าย.....	73
	3.1.10 อุปกรณ์ในการวัดนิวตรอนฟลักซ์.....	73
	3.1.11 วัสดุและอุปกรณ์ในการสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	75
	3.1.12 อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเชอร์.....	75



## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3.1.13 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคหล่อเย็นฟิล์มและฉาก.....	77
3.1.14 อุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคใช้กล้องถ่ายภาพ.....	78
3.2 วิธีดำเนินการวิจัย.....	81
3.2.1 การออกแบบและสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	76
3.2.2 ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเปรียบเทียบระหว่างการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแผ่นเดี่ยว และการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 2 แผ่น.....	82
3.2.3 การวัดรีเลทีฟฟลักซ์ และหาอัตราส่วนแคดเมียม.....	82
3.2.4 การเลือกตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอน และนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เหมาะสม.....	83
3.2.5 การหาระดับความดำบนฟิล์มที่เหมาะสมเพื่อทำฟรี-เอกซ์โพเชอร์ด้วยรังสีเอกซ์หรือแสงจากเครื่องขยายภาพ.....	85
3.2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเชอร์.....	86
3.2.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคการหล่อเย็นฟิล์มและฉาก.....	86
3.2.8 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคใช้กล้องถ่ายภาพ.....	87
3.2.9 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มฟูจิ เอฟที-3000 บี.....	88
3.2.10 การถ่ายภาพคอนเนคเตอร์ RS-232 ด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น.....	90
4. ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผลการวิจัย.....	91
4.1 ผลการออกแบบและสร้างนิวตรอนคอลลิเมเตอร์.....	91
4.2 ผลการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเปรียบเทียบระหว่างการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแผ่นเดี่ยวและการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 2 แผ่น.....	92
4.3 ผลการวัดรีเลทีฟฟลักซ์และหาอัตราส่วนแคดเมียม.....	95
4.3.1 ผลการวัดรีเลทีฟฟลักซ์.....	95
4.3.2 ผลการคำนวณอัตราส่วนแคดเมียม.....	99
4.4 ผลการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนเพื่อเลือกตำแหน่งต้นกำเนิดนิวตรอนและนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่เหมาะสม.....	102
4.5 ผลการหาระดับความดำบนฟิล์มที่เหมาะสมเพื่อทำฟรี-เอกซ์โพเชอร์ด้วยรังสีเอกซ์หรือแสงจากเครื่องขยายภาพ.....	108

## สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4.6 ผลการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเซอร์.....	112
4.7 ผลการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคการหล่อเย็นฟิล์มและฉาก.....	118
4.8 ผลการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคใช้กล้องถ่ายภาพ.....	119
4.9 ผลการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มฟูจิ เอฟพี-3000 บี.....	122
4.10 ผลการถ่ายภาพคอนเนคเตอร์ด้วยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น.....	123
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	124
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	124
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	127
รายการอ้างอิง.....	129
ภาคผนวก.....	132
ภาคผนวก ก.....	133
ภาคผนวก ข.....	134
ประวัติผู้เขียน.....	142

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน.....	6
2.2 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนและคุณสมบัติบางประการของธาตุ.....	14
2.3 ค่าภาคตัดขวางนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV ของไอโซโทปบางชนิด.....	16
2.4 ค่าเทอร์มาไกเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด.....	26
2.5 เทอร์มัตนิวตรอนฟลักซ์ ข้อดี และ ข้อจำกัดที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู เครื่องเร่งอนุภาค และ ไอโซโทปรังสี.....	30
2.6 ยึดตัวของนิวตรอน (Neutron Yield) ของเครื่องเร่งอนุภาคจากปฏิกิริยาบางชนิด.....	36
2.7 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท ( $\alpha$ , n).....	37
2.8 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท ( $\gamma$ , n).....	38
2.9 ลักษณะเฉพาะของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนบางชนิด.....	46
2.10 คุณสมบัติบางประการของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	49
2.11 คุณลักษณะบางประการของฉากเปลี่ยนนิวตรอน.....	49
2.12 คุณสมบัติบางประการของฉากโลหะสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิค ถ่ายทอด.....	51
2.13 คุณสมบัติบางประการของสารประกอบที่นำมาทำฉากแทรก-เอตซ์.....	52
2.14 ฟิล์มสำหรับฉากเปลี่ยนนิวตรอนชนิดต่างๆ.....	54
2.15 ความเร็วเปรียบเทียบของฟิล์มรังสีเอกซ์สำหรับงานอุตสาหกรรมที่ใช้ในการถ่ายภาพ ด้วยนิวตรอน.....	54
2.16 ค่า G จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	61
2.17 ค่า H จากภาพถ่ายของ ASTM SI.....	62
4.1 คุณสมบัติบางประการของนิวตรอนคอลลิมเคอร์ที่สร้างขึ้น.....	91
4.2 ค่าความดำของฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนแผ่นเดี่ยวและใช้ ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 2 แผ่น.....	93
4.3 ค่าความดำของฟิล์มเมื่อเอกซ์โพสด้วยรังสีเอกซ์ 100 kVp 3 มิลลิแอมแปร์ ที่เวลาต่างๆ กัน.....	109
4.4 ค่าความดำของฟิล์มเมื่อเอกซ์โพสด้วยแสงจากเครื่องขยายภาพ.....	111

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 อันตรกิริยาของนิวตรอนแบบต่างๆ.....	8
2.2 ลำนิวตรอนตกกระทบเป้า.....	9
2.3 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	13
2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของรังสีเอกซ์พลังงาน 125 keV และนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV กับเลขอะตอมของธาตุ.....	13
2.5 แผนภาพและกราฟแสดงการลดทอนความเข้มของรังสีเมื่อผ่านวัสดุ.....	18
2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพ.....	19
2.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพ.....	20
2.8 กัมมันตภาพรังสีบนฉากเปลี่ยนนิวตรอนขณะถ่ายภาพ และการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีภายหลังการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคถ่ายภาพ.....	20
2.9 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคแทรก-เอตซ์.....	22
2.10 ระบบถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอน.....	23
2.11 ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคโทโมกราฟี.....	23
2.12 การจัดระบบการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน.....	24
2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค.....	27
2.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากต้นกำเนิดแบบไอโซโทปรังสี.....	28
2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนกับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนของตัวห่นิวตรอน.....	29
2.16 ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู.....	31
2.17 หลักการของเครื่องแวนเดอกราฟฟ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	34
2.18 อุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่ใช้เครื่องเร่งอนุภาคแบบแวนเดอกราฟฟ์เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน.....	35
2.19 ความสัมพันธ์ระหว่างฮิลด์ของนิวตรอนกับพลังงานของอนุภาค.....	35
2.20 ลักษณะของต้นกำเนิดนิวตรอน $^{252}\text{Cf}$ และ $^{241}\text{Am/Be}$ .....	39

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 ภาคตัดขวางนิวตรอนของแกโคลิเนียม แคมเมียม โบรอน และไอโคเรเจน.....	40
2.22 ลักษณะของนิวตรอนคอลลิมเตอร์แบบขนานและแบบไดเวอร์เจนต์.....	40
2.23 ตำแหน่งของคอลลิมเตอร์และส่วนประกอบหลักในระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	41
2.24 แสดงภาพวาดอย่างง่ายของคอลลิมเตอร์แบบไดเวอร์เจนต์ ที่มีช่องเปิดทางเข้า D และ ความยาวของคอลลิมเตอร์ L.....	41
2.25 แผนภาพแสดงค่า L และ D ต่อความคมชัดของภาพถ่ายนิวตรอน.....	42
2.26 ลักษณะของคอลลิมเตอร์ที่ใช้สำหรับต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปริงส์.....	44
2.27 ความเข้มของนิวตรอน อัตราส่วน L/D และเวลาที่ใช้ในการถ่ายภาพของต้นกำเนิด นิวตรอนประเภทต่างๆ.....	44
2.28 ความเข้มของนิวตรอนและค่า L/D ของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบต่างๆ.....	45
2.29 ภาพจำลองการเกิดภาพแฝงบนฟิล์ม.....	48
2.30 ภาคตัดขวางของฟิล์ม.....	53
2.31 แผนภาพของระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนที่แสดงผลทางจอภาพ.....	55
2.32 อุปกรณ์ที่วัดความเข้มของภาพ.....	56
2.33 กราฟระหว่างความค้ำกับตำแหน่งบนฟิล์มที่ใช้ในการตรวจสอบความคมชัด โดยวิธี ของกลาเซนส์.....	57
2.34 Beam Purity Indicator.....	59
2.35 ตำแหน่งที่วัดความค้ำของฟิล์มจากภาพ BPI.....	60
2.36 ASTM Sensitivity Indicator.....	62
2.37 แสดงตำแหน่งและขนาดของรูใน ASTM ST.....	63
2.38 Test strip B.....	64
3.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนพลูโทเนียม-238/เบริลเลียมและอะเมริเซียม-241/เบริลเลียมที่อยู่ในถัง โพลิเอทีลีนบรรจุน้ำ.....	66
3.2 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 / ปรับปรุงครั้งที่ 1.....	67
3.3 ส่วนประกอบของระบบวัดนิวตรอนช้า.....	68
3.4 วัตถุตัวอย่างสำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	70
3.5 คอนเนคเตอร์ RS-232.....	71
3.6 ดับโบ้ฟิล์ม.....	71

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.7 ตู้ไฟดูฟิล์ม.....	72
3.8 เครื่องวัดความดำของฟิล์ม.....	73
3.9 ระบบสแกนวัดความดำของฟิล์ม.....	74
3.10 เครื่องเอกซเรย์ ของ ANDREX รุ่น CMA 20.....	75
3.11 เครื่องอัด-ขยายภาพ.....	76
3.12 เครื่องตั้งเวลา.....	76
3.13 กล้องสังกะสีบุด้วยฉนวนกันความร้อน.....	77
3.14 ดิจิตอลเทอร์โมมิเตอร์.....	77
3.15 โคลสอัพฟิลเตอร์.....	78
3.16 Mirror angle scope.....	78
3.17 แผนภาพการจัดอุปกรณ์สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้เทคนิคใช้กล้องถ่ายภาพ	79
3.18 กล้องทึบแสงเมื่อติดตั้งกล้องถ่ายภาพและอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ.....	80
3.19 แผนภาพแสดงการจัดระบบวัดนิวตรอนช้า.....	83
3.20 การดึงฟิล์มฟูจิ เอฟพี-3000 บี ออกจากกล้อง.....	88
3.21 ฟิล์มฟูจิ เอฟพี-3000 บี .....	89
3.22 การดึงฟิล์มฟูจิ เอฟพี-3000 บี .....	89
4.1 แผนภาพนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ที่สร้างขึ้น.....	91
4.2 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเปรียบเทียบระหว่างการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 1 แผ่น และการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 2 แผ่น.....	92
4.3 โพรไฟล์ค่าความดำสัมพัทธ์เปรียบเทียบระหว่างการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 1 แผ่น และการใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 2 แผ่น.....	94
4.4 รีเลทีฟฟลักซ์ที่ระยะต่างๆ เมื่อใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์แต่ละอัน.....	95
4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ารีเลทีฟฟลักซ์ที่ได้จากการนับนิวตรอนกับความยาวของส่วนที่ไม่ผสมสารดูดกลืนนิวตรอนของนิวตรอนคอลลิเมเตอร์เปรียบเทียบกับค่ารีเลทีฟฟลักซ์ที่คำนวณจากสมการ.....	98
4.6 อัตราส่วนแคดเมียมที่ระยะต่างๆ เมื่อใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์แต่ละอัน.....	99
4.7 ภาพถ่ายเปรียบเทียบเมื่อใช้นิวตรอนคอลลิเมเตอร์และตำแหน่งถ่ายภาพต่างกัน.....	97
4.8 แผนภาพแสดงแนวในการสแกนค่าความดำสัมพัทธ์.....	104



สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 โพรไฟล์ค่าความดำสัมพัทธ์ของฟิล์ม.....	104
4.10 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์ม เมื่อเอกซ์โพสด้วยรังสีเอกซ์ 100 kVp 3 มิลลิแอมแปร์	109
4.11 กราฟคุณลักษณะเฉพาะของฟิล์มเมื่อเอกซ์โพสด้วยแสงจากเครื่องขยายภาพ.....	110
4.12 ภาพถ่ายเปรียบเทียบระหว่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคปกติและเทคนิค ฟรี-เอกซ์โพเชอร์.....	112
4.13 โพรไฟล์ค่าความดำสัมพัทธ์ของฟิล์มจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคปกติ และเทคนิคฟรี-เอกซ์โพเชอร์ที่เวลาต่างๆ กัน.....	114
4.14 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนเปรียบเทียบระหว่างการใช้นิคมการหล่อเย็นฟิล์มและฉากกับ เทคนิคปกติ.....	118
4.15 โพรไฟล์ค่าความดำสัมพัทธ์ของฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างการใช้นิคมการหล่อเย็น ฟิล์มและฉาก กับเทคนิคปกติ.....	119
4.16 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูโดยเทคนิคใช้กล้องถ่ายภาพ.....	120
4.17 ภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์โดยเทคนิคใช้กล้องถ่ายภาพ.....	121
4.18 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฟิล์มฟูจิ เอฟพี-3000 บี.....	122
4.19 ภาพถ่ายคอนเนคเตอร์โดยเทคนิคที่พัฒนาขึ้น.....	123
๗.1 ค่า self-shielding factor ตามสมการของ Nisle และสมการสำหรับ slab, cylinder และ sphere.....	137