

การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน



นางสาวศศิพันธุ์

ณ สงขลา

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2538

ISBN 974-632-849-2

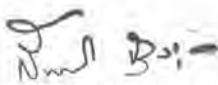
ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16840409

หัวข้อวิทยานิพนธ์      การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน  
โดย                              นางสาวศศิพันธุ์ ณ สงขลา  
ภาควิชา                        นิวเคลียร์เทคโนโลยี  
อาจารย์ที่ปรึกษา        ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม   ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

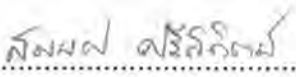
---

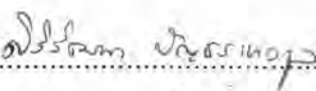
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็นส่วน  
หนึ่ง ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

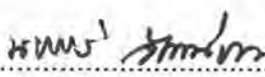
  
.....คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(รองศาสตราจารย์ ดร.สันติ อุงสุวรรณ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

  
.....ประธานกรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ชยากริต ศิริอุปลักษณ์ )

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ )

  
.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล )

  
.....กรรมการ  
( ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว )

  
.....กรรมการ  
( อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ )

DEVELOPMENT OF A ZnS(Ag) SCREEN FOR NEUTRON RADIOGRAPHY

Miss. SASIPHAN NA SONGKHLA

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

1995

ISBN 974-632-849-2

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสี่เหลี่ยมนี้เพียงแผ่นเดียว

ศศิพันธุ์ ณ สงขลา : การพัฒนาจากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) เพื่อการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน  
(DEVELOPMENT OF A ZnS(Ag) ROR NEUTRON RADIOGRAPHY) อ.ที่ปรึกษา :  
ผศ.สมยศ ศรีสถิตย์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : ผศ.ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล 113 หน้า  
ISBN 974-632-849-2

ได้พัฒนาจากเปลี่ยนรังสีนิวตรอนชนิด สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) สำหรับการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จากที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย สารเรืองรังสี คือ สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) และสารดูดกลืนนิวตรอน คือ ลิเทียม เมตาบอเรต โดยมี ไอโซโทปิวทิล อาซิเทคและอะซิโตน เป็นสารยึดเหนี่ยว อัตราส่วนของส่วนประกอบทั้งสาม คือ 10:15:6 โดยน้ำหนัก แล้วฉีกแผ่นลงบนแผ่นอะลูมิเนียมขนาด 10 ซม. × 12 ซม. เพื่อให้ได้ฉากที่มีความหนา 0.40 มม.

ได้ทดสอบจากเปลี่ยนรังสีนิวตรอนที่พัฒนาขึ้น โดยทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่อง ปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่ 1 (ปพว.-1/1) ซึ่งเดินเครื่องที่กำลัง 700 กิโลวัตต์ เปรียบเทียบ ภาพถ่ายกับฉากเรืองรังสีชนิด NE-426 และ  $Gd_2O_2S(Tb)$  รวมทั้งฉากโลหะแกโดลิเนียม นิวตรอน ฟลักซ์และอัตราส่วนนิวตรอนต่อแกมมาที่ตำแหน่งถ่ายภาพเท่ากับ  $1.5 \times 10^5$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร ต่อวินาที และ  $1.1 \times 10^5$  นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อมิลลิเรนเกนท์ ตามลำดับ ภายหลังจากถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากที่พัฒนาขึ้นเป็นเวลา 10 นาที พบว่า ค่าความดำบนแผ่นฟิล์ม ความไวในการ เกิดภาพและรีโซลูชันของภาพ เท่ากับ  $2, 2.3 \times 10^{-8}$  ต่อนิวตรอนต่อตารางเซนติเมตร และ 250 ไมครอน ตามลำดับ จากการทดสอบดังกล่าวปรากฏผลเป็นที่น่าพอใจยิ่ง



ภาควิชา ..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี .....  
สาขาวิชา ..... นิวเคลียร์เทคโนโลยี .....  
ปีการศึกษา ..... 2538 .....

ลายมือชื่อนิสิต ..... ศศิพันธุ์ ณ สงขลา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... สมยศ ศรีสถิตย์ .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล .....

## C518163 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: NEUTRON RADIOGRAPHY/ NEUTRON CONVERTER SCREENS

SASIPHAN NA SONGKHLA : DEVELOPMENT OF A ZnS(Ag) SCREEN FOR NEUTRON RADIOGRAPHY THESIS ADVISOR: ASST. PROF. SOMYOT SRISATIT, THESIS CO-ADVISOR: ASST. PROF. SIRIWATTANA BANCHRONDHEVAKUL 113 pp. ISBN 974-632-849-2

A zinc sulfide neutron converter screen is developed to be used for neutron radiography. The screen is composed of silver activated zinc sulfide [ZnS(Ag)] scintillator and lithium metaborate ( $\text{LiBO}_2$ ) while isobutyl acetate are used as the binder. The three components are mixed thoroughly with a ratio of 10:15:6 by weight. Then sprayed on to a 10 cm. x 12 cm. aluminum plate to form a layer of 0.40 mm. thick.

The screen has been tested at the neutron radiography facility at the TRIGA Mark III Thai Research Reactor (TRR-1/M1) operating at 700 kW. The screen is also compared with an NE-426 and  $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}(\text{Tb})$  scintillating screens as well as a gadolinium foil screen. The neutron flux and the neutron to gamma ratio at the screen position are approximately  $1.5 \times 10^5 \text{ n/cm}^2\text{-s}$  and  $1.1 \times 10^5 \text{ n/cm}^2\text{-mR}$  respectively. For 10 minute exposure time, it is found that the radiographic density, sensitivity and resolution are approximately  $2.2 \times 10^{-8} \text{ 1/n-cm}^2$  and  $250 \mu\text{m}$  respectively. The test results are found to be very satisfactory.

ภาควิชา..... วิศวกรรมเทคโนโลยี.....

สาขาวิชา..... วิศวกรรมเทคโนโลยี.....

ปีการศึกษา..... 2538.....

ลายมือชื่อนิสิต..... ศศิพันธ์ น. สวงลา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ศิพนพล ศรีสวัสดิ์.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... สิริวัฒน์ บันชรอนธร.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่านซึ่งได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ สำหรับงานวิจัยมาด้วยดีตลอด ผู้วิจัยขอขอบคุณเป็นอย่างสูง และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจาก ทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบคุณ ดร.สมพร จงจักษ์ คุณสุนันทา ภัทรชาคร คุณวิเชียร รตนธงชัย รวมทั้งข้าราชการ และ เจ้าหน้าที่กองฟิสกส์และกองปฏิกรณ์ปฏิบัติ ของสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย

ขอขอบคุณ คุณกษมา วรรณศิลป์ คุณนิเวศ ศรีคุณ คุณบัญชา อุณพานิช คุณสุภสิทธิ์ คณะวิรัตน์ คุณบุญฉวี ศรีหมอก คุณปานทิพย์ อัมพรรัตน์ คุณ ภารดี สราภัสสร รวมทั้งเพื่อนๆ และน้องๆนิสิตภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอด

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อบิดา มารดา ผู้ซึ่งให้ความสนับสนุนในทุกด้าน โดยเฉพาะมารดาผู้เป็นกำลังใจ เป็นแบบอย่างที่ดีในการปฏิบัติงานและเป็นแรงผลักดัน อย่างสูงสุด ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานจนสำเร็จได้ และท้ายสุดนี้ผู้วิจัยขอไว้อาลัยต่อมารดาผู้ล่วงลับไปก่อนที่งานวิจัยนี้สำเร็จ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฒ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 วิธีดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. ทฤษฎี.....	4
2.1 ชนิดของนิวตรอน อันตรกิริยา และต้นกำเนิดนิวตรอน.....	4
2.1.1 ชนิดของนิวตรอน.....	4
2.1.2 อันตรกิริยาของนิวตรอน.....	5
2.1.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	6
2.2 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	11
2.2.1 ทฤษฎีการถ่ายด้วยนิวตรอน.....	11
2.2.2 วิธีการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	13
2.3 ฉากที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	16
2.3.1 ฉากเรืองแสง.....	18

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.3.2 ฉากโลหะ.....	20
2.3.3 ฉากแทรก-เอตซ์.....	23
2.4 ฟิล์ม.....	24
2.4.1 ส่วนประกอบสำคัญของฟิล์มถ่ายภาพ.....	24
2.4.2 ประเภทของฟิล์ม.....	25
2.4.3 ความไวแสงของฟิล์ม.....	25
2.4.4 กระบวนการสร้างภาพบนฟิล์ม.....	26
2.4.5 กระบวนการล้างฟิล์ม.....	27
2.5 การตรวจสอบคุณภาพของภาพถ่าย.....	27
2.5.1 ค่าความดำบนฟิล์ม.....	27
2.5.2 การทดสอบความไว(sensitivity)ของภาพถ่าย.....	28
2.5.3 การหาความไวในการเกิดภาพ(sensitivity)จากค่าความดำบนแผ่นฟิล์ม.....	32
2.5.4 การหาค่ารีโซลูชัน(resolution)และคอนทราสต์ของภาพ.....	33
3. วัสดุและอุปกรณ์.....	34
3.1 ดินกำเนิดนิวตรอน.....	34
3.2 ฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน.....	36
3.3 สารเคมีที่ใช้ในการสร้างฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	37
3.4 ฟิล์ม.....	39
3.5 กระจกอัดภาพ.....	40
3.6 เคมีภัณฑ์ในการสร้างภาพ.....	41
3.7 ดลับใส่ฟิล์ม.....	43
3.8 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	43
3.9 อุปกรณ์วัดคุณภาพของฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	45
3.10 เครื่องมือที่ใช้วัดความเข้มที่เกิดขึ้นบนฟิล์ม.....	47
3.11 หัววัดรังสีนิวตรอนพร้อมอุปกรณ์ประกอบการวัดรังสี.....	47
3.12 นาฬิกาจับเวลา.....	47



สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ขั้นตอนและผลการทดลอง.....	48
4.1 การทดลองหาสารที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการทำปฏิกิริยากับ นิวตรอนแล้วให้รังสีอัลฟา.....	48
4.2 การคำนวณหาโอกาสในการเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนแล้วให้รังสี อัลฟาของสารประกอบลิเทียมเมตาบอเรต.....	50
4.3 การคำนวณหาพิสัยของอนุภาคอัลฟาในสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	50
4.4 การทดลองหาสารยึดเหนี่ยวที่มีคุณสมบัติเหมาะสม.....	51
4.5 การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของสังกะสีซัลไฟด์(เงิน)กับ ลิเทียมเมตาบอเรต.....	56
4.6 การทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกาวดูโร กับสังกะสี ซัลไฟด์(เงิน)และลิเทียมเมตาบอเรต.....	71
4.7 การหาความหนาที่เหมาะสมของฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	78
4.8 การตรวจสอบความสม่ำเสมอของฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	81
4.9 ตัวอย่างการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	83
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	86
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	86
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	88
รายการอ้างอิง.....	90
ภาคผนวก ก.....	92
ภาคผนวก ข.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน .....	4
2.2 คุณสมบัติบางประการของธาตุกัมมันตรังสีที่นำมาใช้เป็น ต้นกำเนิดนิวตรอน.....	7
2.3 คุณสมบัติบางประการของฉากโลหะสำหรับการถ่ายภาพโดยวิธี ถ่ายภาพอด.....	22
2.4 คุณสมบัติบางประการของสารเคมีที่นำมาใช้ทำฉากแทรกเอตซ์...	22
2.5 การกำหนดค่า H .....	31
2.6 การกำหนดค่า G .....	32
2.7 neutron radiography categories .....	32
3.1 คุณสมบัติของฉากเปลี่ยนรังสีนิวตรอน NE-426,NE-905 และฉากแกโดลิเนียม.....	37
3.2 ขนาดอนุภาคของสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน) ที่นำมาใช้สร้างฉาก สังกะสีซัลไฟด์(เงิน) .....	38
3.3 เวลาที่ใช้ในการสร้างภาพโดยใช้กระดาษอัดภาพฟอร์เด้สปีดที่ อุณหภูมิต่าง ๆ .....	41
3.4 เวลาที่ใช้ในการล้างฟิล์ม(นาที) สำหรับน้ำยาล้างฟิล์ม ไมโครเฟน .....	42
4.1 เปรียบเทียบปริมาณลิเทียม-6และ โบรอน-10ในสารประกอบต่างๆ	49
4.2 การกระจายของขนาดอนุภาคลิเทียมเมตาบอเรตที่นำมาใช้ สร้างฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน).....	49
4.3 พลังงานและพิสัยของอนุภาค อัลฟา จากลิเทียม-6 และ โบรอน-10 ในสารประกอบสังกะสีซัลไฟด์ (เงิน).....	50
4.4 ผลการทดลองภายหลังทำการผสมสารยึดเหนี่ยวกับ ลิเทียมเมตาบอเรตและสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) .....	52

## สารบัญตาราง(ต่อ)

ตารางที่	หน้า
4.5 ปัญหาที่เกิดขึ้นในการผสมสารยึดเหนี่ยวกับลิเทียมเมตาบอเรต และสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) .....	53
4.6 ค่าความดำนฟิล์ม เมื่อนำจากตัวอย่างไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ต้นกำเนิดนิวตรอนพลูโตเนียม-238/เบริลเลียมเป็นเวลา 5 วัน .....	55
4.7 ค่าความดำนฟิล์ม เมื่อนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยจากต่างๆ .....	64
4.8 ค่าความดำที่ตำแหน่งต่างๆ ของ BPI.....	66
4.9 ผลการคำนวณคุณภาพของลำรังสีนิวตรอนตามสมการ 2.5-2.8 โดยใช้ค่าความดำจากตารางที่ 4.8.....	66
4.10 ความไวในการเกิดภาพของฉากต่างๆ .....	68
4.11 ผลการทดลองเพื่อเปรียบเทียบรีโซลูชันและคอนทราสต์ของภาพในหน่วยมิลลิเมตรจากฉากต่างๆ.....	70
4.12 อัตราส่วนของการดูโรในฉากตัวอย่าง.....	71
4.13 ค่าความดำนฟิล์มเมื่อนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากตัวอย่างหมายเลข 2.1.-2.4 .....	74
4.14 ผลการเปรียบเทียบคุณสมบัติของฉากตัวอย่างหมายเลข2.1-2.4... ..	75
4.15 ความไวในการเกิดภาพของฉากตัวอย่างหมายเลข 2.1-2.4.....	76
4.16 การทดสอบรีโซลูชันของภาพในหน่วยมิลลิเมตร .....	77
4.17 ค่าความดำนฟิล์มของฉากที่มีความหนาต่างกัน .....	79
4.18 การเปรียบเทียบความไวในการเกิดภาพของฉากที่มีความหนาต่างกัน.....	80
4.19 ค่ารีโซลูชันของฉากที่มีความหนาต่างกัน.....	81
5.1 แสดงค่าความไวในการเกิดภาพและค่ารีโซลูชันของภาพจากฉากต่างๆ .....	87



## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ปริมาณของนิวตรอนซึ่งผลิตจากธาตุกัมมันตรังสีที่ระยะต่างๆ.....	8
2.2 ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของอนุภาคที่ถูกเร่งให้เข้าชนและทำปฏิกิริยากับเป้า(target)แล้วให้นิวตรอนออกมาในปริมาณต่างกัน....	9
2.3 ปริมาณของนิวตรอนซึ่งผลิตขึ้นจากเครื่องเร่งอนุภาคที่ระยะต่างๆในน้ำ.....	10
2.4 ลักษณะการนำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ มาใช้ในการถ่ายภาพ.....	11
2.5 แสดงการเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficients) ของธาตุต่างๆสำหรับเทอร์มัลนิวตรอนและรังสีเอกซ์.....	12
2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีการถ่ายภาพโดยตรงและวิธีการถ่ายภาพทอด.....	14
2.7 กัมมันตรังสีบนฉาก ขณะทำการถ่ายภาพ และการสลายตัวของธาตุกัมมันตรังสีบนฉาก ภายหลังจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายภาพทอด.....	15
2.8 ภาพจำลองการทำให้เกิดความดำขึ้นบนแผ่นฟิล์ม โดยฉากเรืองแสง.....	19
2.9 ภาพตัดขวางของฟิล์ม.....	25
2.10 beam purity indicator.....	29
2.11 sensitivity indicator.....	31
2.12 IQIs strip B.....	33
3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย-1 ปรับปรุงครั้งที่ 1 และบริเวณที่ใช้ทำการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน คือบริเวณหมายเลข(1)ทางทิศใต้.....	35

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
3.2	ต้นกำเนิดนิวตรอนพลูโตเนียม238/เบริลเลียม.....	36
3.3	ตัวอย่างสารยึดเหนี่ยวที่นำมาใช้ในการทดลอง.....	39
3.4	ด้านหน้าของแผ่นฟิล์มอีลฟอร์ด เอชที 5 พลัส.....	40
3.5	เวลาที่ใช้ในการสร้างภาพ(นาทิจ)สำหรับน้ำยาสร้างภาพไมโครเฟน....	42
3.6	คลับใส่ฟิล์มทั้ง 2 ขนาด.....	43
3.7	ปืนฉีดฟ่น.....	44
3.8	ปั้มความดัน.....	44
3.9	เครื่องบดสาร.....	45
3.10	beam purity indicator.....	46
3.11	sensitivity indicator.....	46
3.12	รูปร่างภายนอกของ IQIs strip B.....	46
4.1	ขนาดและรูปร่างของแผ่นอลูมิเนียมที่ใช้เป็นฐานรองรับตัวอย่าง.....	53
4.2	แสดงการจัดอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ ต้นกำเนิดนิวตรอนพลูโตเนียม238/เบริลเลียม.....	54
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความดำบนฟิล์มกับอัตราส่วน ZnS(Ag) ต่อLiBO <sub>2</sub> เมื่อใช้สารยึดเหนี่ยวต่างๆ.....	56
4.4	ภาพถ่ายวัสดุมาตรฐานที่นำมาทดสอบคุณสมบัติของฉากรับตัวอย่าง.....	57
4.5	ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรับที่มีเฉพาะ LiBO <sub>2</sub> .....	58
4.6	ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรับที่มีอัตราส่วน ZnS(Ag)ต่อ LiBO <sub>2</sub> เท่ากับ 1.0.....	58
4.7	ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรับที่มีอัตราส่วน ZnS(Ag)ต่อ LiBO <sub>2</sub> เท่ากับ 1.5.....	59
4.8	ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรับที่มีอัตราส่วน ZnS(Ag)ต่อ LiBO <sub>2</sub> เท่ากับ 2.5.....	59

## สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรังสีที่มีอัตราส่วน ZnS(Ag)ต่อ LiBO <sub>2</sub> เท่ากับ 4.0.....	60
4.10 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรังสีที่มีอัตราส่วน ZnS(Ag)ต่อ LiBO <sub>2</sub> เท่ากับ 5.5.....	60
4.11 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรังสีที่มีอัตราส่วน ZnS(Ag)ต่อ LiBO <sub>2</sub> เท่ากับ 9.0.....	61
4.12 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากรังสีที่มีเฉพาะ ZnS(Ag).....	61
4.13 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากแกโดลิเนียม.....	62
4.14 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉาก NE-426.....	62
4.15 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉาก Gd <sub>2</sub> O <sub>2</sub> S(Tb).....	63
4.16 ค่าความดำบนฟิล์มเมื่อถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากต่างๆ.....	65
4.17 ความไวในการเกิดภาพของฉากต่างๆ.....	69
4.18 ภาพ IQIs strip B ซึ่งแบ่งออกเป็นส่วนๆเพื่อพิจารณารังสี และคอนทราสต์.....	69
4.19 รังสีของฉากต่างๆ.....	70
4.20 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยฉากหมายเลข 2.1.....	72
4.21 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยฉากหมายเลข 2.2.....	72
4.22 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยฉากหมายเลข 2.3.....	73
4.23 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยฉากหมายเลข 2.4.....	73
4.24 ค่าความดำบนฟิล์มภายหลังการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉาก ตัวอย่างหมายเลข 2.1-2.4.....	74
4.25 ความไวในการเกิดภาพของฉากตัวอย่างหมายเลข 2.1-2.4.....	77
4.26 รังสีของฉากตัวอย่างหมายเลข 2.1-2.4.....	78
4.27 ค่าความดำบนฟิล์มภายหลังการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉาก ที่มีความหนาต่างกัน.....	79
4.28 เปรียบเทียบค่าความไวในการเกิดภาพของฉากที่มีความหนา ต่างกัน.....	80

สารบัญภาพ(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.29 ผลที่ได้จากการอ่านค่าความต้านฟิล์ม โดยเครื่องสแกนอ่านค่า ความต้านอัตโนมัติ.....	82
4.30 ตัวอย่างที่นำมาใช้ทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยจากสังกะสี ซัลไฟด์(เงิน)ที่สร้างขึ้น.....	83
4.31 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของกระป๋องสเปรย์.....	84
4.32 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของปากกา.....	84
4.33 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของไม้บรรทัด.....	84
4.34 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของไฟแชค.....	85
4.35 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของดินขั้บปลอกกรมชูชีพ.....	85
4.36 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของนาฬิกาข้อมือ.....	85