การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบีอี-10

นาย วิเชียร รตนธงชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-638-849-5

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I17654428

NEUTRON RADIOGRAPHY USING BE-10 NEUTRON CONVERTER SCREEN

Mr. Wichian Ratanatongchai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1997

ISBN 974-638-849-5

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน บีอี-10
โดย	นายวิเชียร รตนธงชัย
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์นี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร ปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล)

..... กรรมการ
(อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

วิเชียร รตนธงชัย : การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนบีอี-10 (NEUTRON RADIOGRAPHY USING NEUTRON CONVERTER SCREEN BE-10) อ.ที่ปรึกษา : ผศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ.ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล, 109 หน้า. ISBN 974-638-847-5

ได้ทำการศึกษาทดลองถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรคเอตช์ โดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอนเป็นอนุภาคแอลฟาที่มีประสิทธิภาพสูง คือ Kodak BE-10 โดยใช้ฟิล์ม Kodak CN85 บันทึกภาพและล้างฟิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เทอร์มัลนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพ ได้จากท่อเทอร์มัลนิวตรอนขนาด 8 นิ้ว ของเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ที่สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ความเข้มของนิวตรอนที่ตำแหน่งชิ้นงานมีค่าเท่ากับ $1x10^5$ นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที การวิจัยนี้พบว่า เวลาที่เหมาะสมในการถ่ายภาพและล้างฟิล์มอยู่ในช่วง 30 ถึง 60 นาที และ 13 ถึง 18 นาที

การปรับปรุงความเปรียบต่างของภาพถ่ายนิวตรอน สามารถทำได้โดยการประกบฟิล์มด้านหลังแผ่นทองแดงชุบโครเมียม แล้วสแกนด้วยสแกนเนอร์ชนิดตั้งโต๊ะ เพื่อดูภาพบนจอไมโครคอมพิวเตอร์ ความเปรียบต่างของภาพถ่ายสามารถปรับเปลี่ยนได้ต่อไปอีก โดยใช้ซอฟท์แวร์จัดการภาพอย่างง่าย ๆ ความไวที่ได้จากการถ่ายภาพโดยตัวชี้บอกความไวของ ASTM พบว่า มีค่าเท่ากับ 0.013 มิลลิเมตร ได้ทำการถ่ายภาพฮาร์ดดิสก์ และเครื่องขับฟลอปปีดิสก์ เปรียบเทียบกับวิธีถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีถ่ายตรงโดยใช้แผ่นโลหะแกโดลิเนียม การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนวิธีถ่ายทอดโดยใช้แผ่นโลหะดิสโปรเซียม และการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรคเอตช์ ให้คุณภาพของภาพถ่ายทัดเทียมกับวิธีถ่ายภาพวิธีถ่ายตรงโดยใช้แผ่นโลหะแกโดลิเนียม นอกจากนี้วิธีดูภาพที่พัฒนาขึ้น ยังให้ความยืดหยุ่นดีมากในการปรับความสว่างและความเปรียบต่างของภาพถ่ายที่เหมาะสมที่สุด สำหรับส่วนของภาพถ่ายที่ต้องการตรวจสอบ

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

C718964 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: NEUTRON RADIOGRAPHY / TRACK-ETCH / RADIOGRAPHIC TESTING / NONDESTRUCTIVE TESTING

WICHIAN RATANATONGCHAI : NEUTRON RADIOGRAPHY USING NEUTRON CONVERTER SCREEN BE-10. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. NARES CHANKOW, THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. SIRIWATTANA BANCHORNDHEVAKUL, 109 pp. ISBN 974-638-847-5

Track-etch neutron radiography using a high efficiency (n,α) neutron converter screen, Kodak BE-10, was experimentally investigated. Kodak CN85 nitrocellulose films were used as the image recorders. The films were etched with 10% NaOH solution at 60 °C to make the images visible. Neutron Radiography was carried out using thermal neutrons from a 8" diameter neutron beam tube of the TRR1/M1 at the Office of Atomic Energy for Peace. The neutron influence rate at specimen position was found to be about 1×10^{5} n cm^{-1} s^{-1}. It was found that the suitable exposure time and etching time fell in the range of 30-60 and 13-18 minutes respectively.

Significant improvement of image contrast was obtained by backing the film with a chromium plated copper sheet then scanned with a desktop scanner to view the image on a microcomputer monitor. The image contrast could be improved even more by using a simple image processing software. The sensitivity indicated by an ASTM SI was found to be 0.013 mm. A hard disk and a floppy disk drive were radiographed with thermal neutrons using this technique in comparison with Gd foil direct exposure, Dy foil transfer method and with X-ray radiography. The results indicated that the track-etch neutron radiography could give an image quality comparable to the Gd foil direct exposure method. Moreover, the proposed viewing method gave excellent flexibility in adjusting the image brightness and contrast best for selected parts of the image under inspections.

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2540 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ศิริวัฒนา บัญชรเทวกุล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผู้อำนวยการกอง ข้าราชการ และเจ้าหน้าที่ กองฟิสิกส์ กองปฏิกรณ์ปฏิบัติ กองเคมี กองการวัดกัมมันตภาพรังสี และกองวิทยาศาสตร์ชีวภาพ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ในการอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการดำเนินการทดลอง

ท้ายนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณ คุณเก็จวรงค์ นุกูลกิจ และคุณศศิพันธุ์ ณ สงขลา ในการช่วยเหลือและจัดทำเอกสารวิทยานิพนธ์ จนสำเร็จลงด้วยดี

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญตาราง ..... ญ

สารบัญภาพ ..... ฐ

บทที่

1. บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการวิจัย 2

1.4 วิธีดำเนินการวิจัย 2

1.5 การสำรวจงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง 3

1.6 ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย 4

2. ทฤษฎี 5

2.1 บทนำ 5

2.1.1 คุณสมบัติของนิวตรอน 5

2.1.2 ชนิดของนิวตรอน 5

2.1.3 ต้นกำเนิดนิวตรอน 6

2.1.4 อันตรกิริยาของนิวตรอนต่อสสาร 9

2.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 11

2.2.1 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 11

2.2.2 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 12

2.3 ฟิล์มบันทึกภาพ 21

2.3.1 ชนิดของฟิล์ม 21

2.3.2 ความเข้มของฟิล์ม 22

2.4 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 25

4.4 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่าง 65
4.4.1 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างด้วยนิวตรอนโดยบันทึกด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์ ... 65
4.4.2 การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ 68
4.4.3 การถ่ายภาพวัตถุตัวอย่างด้วยวิธีแทรคเอตช์ 69
5. สรุปผลการวิจัย 75
5.1 ข้อสรุปและวิจารณ์ 75
5.2 ข้อเสนอแนะ 76
รายการอ้างอิง 79
ภาคผนวก ก 83
ภาคผนวก ข 87
ภาคผนวก ค 89
ภาคผนวก ง 92
ประวัติผู้เขียน 95

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ระดับพลังงานของนิวตรอนแต่ละชนิด 5
ตารางที่ 2.2 พลังงานของนิวตรอนจากอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคของเครื่องเร่งอนุภาค .. 7
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี 8
ตารางที่ 2.4 คุณสมบัติของฟิล์มพลาสติก 22
ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน 26
ตารางที่ 4.1 ความเข้มของฟิล์มที่ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 15 นาที และล้างกัดรอยที่อุณหภูมิต่างกัน 46
ตารางที่ 4.2 ความเข้มของฟิล์มไนโตรเซลลูโลสที่ใช้เวลาในการถ่ายภาพ 15 นาที และเวลาล้างกัดรอยต่าง ๆ กัน 50
ตารางที่ 4.3 ความเปรียบต่างและรายละเอียดจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรคเอตช์ 55
ตารางที่ 4.4 อุปกรณ์ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยบันทึกด้วยฟิล์มถ่ายรูปและฟิล์มรังสีเอกซ์ 61
ตารางที่ 4.5 ความเข้มและความเปรียบต่างของฟิล์มจากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 64
ตารางที่ 4.6 ขนาดของวัสดุบนชิ้นตัวอย่าง SI และ test strip B ที่สามารถมองเห็นได้จากการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 64
ตารางที่ 4.7 อุปกรณ์และเวลาในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยบันทึกด้วยฟิล์มรังสีเอกซ์ 65
ตารางที่ 4.8 ผลของเวลาถ่ายภาพต่อคุณสมบัติของภาพถ่าย 73
ตารางที่ 4.9 ผลของการปรับเพิ่มความเปรียบต่างต่อรายละเอียดของภาพถ่าย 73
ตารางที่ 4.10 ผลของการเพิ่มเวลาล้างกัดรอยต่อคุณสมบัติของภาพถ่าย 74
ตารางที่ 5.1 สรุปเงื่อนไขในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรคเอตช์ 75
ตารางที่ ก1 คุณสมบัติของไอโซโทปรังสีของทองแดงจากการอาบนิวตรอน 84
ตารางที่ ก2 ผลการวิเคราะห์รังสีแกมมาของทองแดงจากการอาบนิวตรอน 85
ตารางที่ ค1 ความเข้มของฟิล์มบนวัตถุตัวอย่าง BPI 90
ตารางที่ ง1 ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากความหนาของวัตถุตัวอย่าง 93

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู 6
รูปที่ 2.2 เครื่องเร่งอนุภาคแบบแวนเดอกราฟประกอบกับอุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพ 7
รูปที่ 2.3 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี ^{241}Am-Be 8
รูปที่ 2.4 สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุต่อนิวตรอนเปรียบเทียบกับรังสีเอกซ์ 10
รูปที่ 2.5 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 12
รูปที่ 2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง 13
รูปที่ 2.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด 14
รูปที่ 2.8 การแตกตัวของฟิล์มจากอนุภาคอัลฟา 16
รูปที่ 2.9 การเกิดรอยบนฟิล์มพลาสติก 17
รูปที่ 2.10 การละลายของเนื้อฟิล์มในกระบวนการล้างกัดรอย 17
รูปที่ 2.11 ผิวของฟิล์มที่ละลายออกในกระบวนการล้างกัดรอย 18
รูปที่ 2.12 ภาพขยายจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแสดงผิวฟิล์มและรอยอนุภาคที่ผ่านการล้างกัดรอย 18
รูปที่ 2.13 แผนผังอุปกรณ์ถ่ายภาพเคลื่อนไหวด้วยนิวตรอน 20
รูปที่ 2.14 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยเทคนิคโทโมกราฟี 20
รูปที่ 2.15 วัตถุตัวอย่างที่ใช้ถ่ายและภาพที่สร้างขึ้นโดยเทคนิคโทโมกราฟี 21
รูปที่ 2.16 กราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม 23
รูปที่ 2.17 ความชันของกราฟคุณสมบัติเฉพาะของฟิล์ม 24
รูปที่ 2.18 กระบวนการถ่ายภาพโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน 25
รูปที่ 2.19 ผลของความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนแกโดลิเนียมต่อความดำของฟิล์ม . 27
รูปที่ 2.20 ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากการจัดอุปกรณ์ในการถ่ายภาพ 28
รูปที่ 2.21 ความไม่คมชัดของภาพถ่ายเนื่องจากความหนาของฉากเปลี่ยนนิวตรอนและความหนาของอิมัลชันฟิล์มบันทึกภาพ 29
รูปที่ 2.22 Beam Purity Indicator 31
รูปที่ 2.23 ตำแหน่งที่วัดความเข้มของ Beam Purity Indicator 31
รูปที่ 2.24 อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ SI 32

รูปที่ 2.25 ขนาดรูของอุปกรณ์วิเคราะห์ความไวในการถ่ายภาพ 33
รูปที่ 2.26 อุปกรณ์วัดความไวของการถ่ายภาพ Test Strip B 33
รูปที่ 3.1 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย(ปปว-1/1) 35
รูปที่ 3.2 ท่อนำนิวตรอน 36
รูปที่ 3.3 คาสเซตต์อลูมิเนียม 38
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์อัดขยายภาพ 39
รูปที่ 3.5 อุปกรณ์วัดความดำของฟิล์ม 40
รูปที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์ 40
รูปที่ 3.7 Beam Purity Indicator 41
รูปที่ 3.8 Sensitivity Indicator 41
รูปที่ 3.9 Test Strip B 41
รูปที่ 3.10 ฮาร์ดดิสก์ 42
รูปที่ 3.11 ฟลอปปีดิสก์ไดรฟ์ 42
รูปที่ 3.12 อุปกรณ์ในการล้างกัดรอยฟิล์มไนโตรเซลลูโลส 43
รูปที่ 3.13 แผ่นทองแดง 44
รูปที่ 3.14 ระบบวัดรังสีแกมมา 44
รูปที่ 4.1 ความเข้มของฟิล์มกับเวลาในการล้างกัดรอยเมื่อล้างกัดรอยที่อุณหภูมิต่างกัน 47
รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายของรอยอนุภาคบนฟิล์มที่เวลาถ่ายภาพต่างๆ กัน และล้างกัดรอย 20 นาที (ภาพขยาย 1000 เท่า) 49
รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของรอยอนุภาคบนฟิล์ม เมื่อถ่ายภาพ 5 นาที และล้างกัดรอยเวลาต่างๆ กัน (ภาพขยาย 1000 เท่า) 49
รูปที่ 4.4 ความเข้มฟิล์มไนโตรเซลลูโลสกับเวลาในการล้างกัดรอย เมื่อถ่ายภาพด้วยเวลาต่างกัน 51
รูปที่ 4.5 วัตถุตัวอย่างมาตรฐานที่ใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 52
รูปที่ 4.6 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลสโดยตรง 54
รูปที่ 4.7 การเพิ่มความเปรียบต่างของภาพบนฟิล์มไนโตรเซลลูโลส โดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงาสะท้อนแสงขณะสแกนภาพ 56
รูปที่ 4.8 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลสโดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงาเพิ่มความเปรียบต่าง 57

รูปที่ 4.9 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ซึ่งถ่ายภาพ 20 นาที ล้าง 13 นาที เพิ่มความเปรียบต่างโดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงา และปรับความเปรียบต่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 58
รูปที่ 4.10 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ซึ่งถ่ายภาพ 20 นาที ล้าง 18 นาที เพิ่มความเปรียบต่างโดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงา และปรับความเปรียบต่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 58
รูปที่ 4.11 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ซึ่งถ่ายภาพ 30 นาที ล้าง 13 นาที เพิ่มความเปรียบต่างโดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงา และปรับมความเปรียบต่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 59
รูปที่ 4.12 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ซึ่งถ่ายภาพ 30 นาที ล้าง 18 นาที เพิ่มความเปรียบต่างโดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงา และปรับมความเปรียบต่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 59
รูปที่ 4.13 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ซึ่งถ่ายภาพ 60 นาที ล้าง 13 นาที เพิ่มความเปรียบต่างโดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงา และปรับมความเปรียบต่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 60
รูปที่ 4.14 ภาพจากการสแกนฟิล์มไนโตรเซลลูโลส ซึ่งถ่ายภาพ 60 นาที ล้าง 18 นาที เพิ่มความเปรียบต่างโดยใช้แผ่นโครเมียมขัดเงา และปรับมความเปรียบต่างด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ 60
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน Gd บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก SR 62
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 บันทึกภาพด้วยฟิล์ม Ilford HP5 63
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน Dy บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก AA 63
รูปที่ 4.18 ฮาร์ดดิสก์ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน Gd บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก SR 66
รูปที่ 4.19 ฟลอปปีดิสก์ไดรฟ์ ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน Gd บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก SR 66
รูปที่ 4.20 ฮาร์ดดิสก์ ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน Dy บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก AA 67

รูปที่ 4.21 ฟลอปปีดิสก์ไดรฟ์ ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน NE426 บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก SR 67
รูปที่ 4.22 ฮาร์ดดิสก์ ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก AA 68
รูปที่ 4.23 ฟลอปปีดิสก์ไดรฟ ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ บันทึกภาพด้วยฟิล์มโกดัก AA ... 68
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายฮาร์ดดิสก์ใช้เวลาถ่ายภาพ 20 นาที เวลาล้างกัดรอย 13 นาที สแกนภาพ โดยวางแผ่นโครเมียมไว้ด้านบนฟิล์มและปรับเพิ่มความเปรียบต่าง 60% 69
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายฮาร์ดดิสก์ใช้เวลาถ่ายภาพ 30 นาที เวลาล้างกัดรอย 13 นาที สแกนภาพ โดยวางแผ่นโครเมียมไว้ด้านบนฟิล์มและปรับเพิ่มความเปรียบต่าง 75% 70
รูปที่ 4.26 ภาพถ่ายฮาร์ดดิสก์ใช้เวลาถ่ายภาพ 60 นาที เวลาล้างกัดรอย 13 นาที สแกนภาพ โดยวางแผ่นโครเมียมไว้ด้านบนฟิล์มและปรับเพิ่มความเปรียบต่าง 75% 70
รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายฟลอปปีดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว ถ่ายภาพ 30 นาที ล้างกัดรอย 13 นาที เพิ่มความเปรียบต่างด้วยแผ่นโครเมียม และปรับความเปรียบต่าง 75% 71
รูปที่ 4.28 ภาพถ่ายฟลอปปีดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว ถ่ายภาพ 60 นาที ล้างกัดรอย 13 นาที เพิ่มความเปรียบต่างด้วยแผ่นโครเมียม และปรับความเปรียบต่าง 75% 71
รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายฟลอปปีดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว ถอดแผ่นวงจรพิมพ์ออก ถ่ายภาพ 30 นาที ล้างกัดรอย 13 นาที เพิ่มความเปรียบต่างด้วยแผ่นโครเมียมขัดเงาและ ปรับความเปรียบต่าง 75% 72
รูปที่ 4.30 ภาพถ่ายฟลอปปีดิสก์ไดร์ฟขนาด 3.5 นิ้ว ถอดแผ่นวงจรพิมพ์ออก ถ่ายภาพ 60 นาที ล้างกัดรอย 13 นาที เพิ่มความเปรียบต่างด้วยแผ่นโครเมียมขัดเงาและ ปรับความเปรียบต่าง 75% 72
รูปที่ ก1 สเปคตรัมรังสีแกมมาของทองแดงจากการอาบนิวตรอน 85
รูปที่ ก2 แสดงการเปรียบเทียบนิวตรอนฟลักซ์ในการถ่ายภาพแต่ละครั้ง 86
รูปที่ ข1 กราฟความเข้มฟิล์มจากการวัดความสม่ำเสมอของนิวตรอน 88
รูปที่ ค1 ตำแหน่งที่วัดความเข้มของ Beam Purity Indicator 89
รูปที่ ง1 ความไม่คมชัดของภาพเนื่องจากความหนาของวัตถุตัวอย่าง 94