การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอน โดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน

ว่าที่เรืออากาศตรีนพดล นาคเงิน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-425-9

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I16500262

DEVELOPMENT OF A GAMMA-RAY AND NEUTRON RADIOGRAPHY SYSTEM USING A NEUTRON IMAGING SCOPE

Acting. Plt.Off. NOPPADON NAK-NGOEN

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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 1998

ISBN 974-332-425-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองกาพนิวตรอน
โดย	ว่าที่เรืออากาศตรีนพดล นาคเงิน
ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

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

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว)

.....อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์)

.....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ เดโช ทองอร่าม)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

นพดล นาคเงิน : การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน (DEVELOPMENT OF A GAMMA-RAY AND NEUTRON RADIOGRAPHY SYSTEM USING A NEUTRON IMAGING SCOPE) อ. ที่ปรึกษา : ผศ. นเรศร์ จันทน์ขาว, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ.อรรถพร ภัทรสุมันต์ , 100 หน้า ISBN 974-332-425-9

ได้พัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนแบบแสดงผลทันทีบนไมโครคอมพิวเตอร์โดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน กล้องมองภาพนิวตรอนประกอบด้วยฉากสังกะสีซัลไฟด์(เงิน) และลิเทียม-6 ที่ติดอยู่กับอุปกรณ์ทวีความเข้มของภาพและกล้องโทรทัศน์ความไวสูง ซึ่งใช้ได้กับรังสีแกมมาพลังงานต่ำ รังสีเอกซ์ และเทอร์มัลนิวตรอนที่มีความเข้มต่ำ ภาพที่ได้สามารถดูได้จากจอภาพของไมโครคอมพิวเตอร์ผ่านแผงวงจรแปลงสัญญาณภาพเป็นข้อมูลภาพซึ่งติดตั้งบนไมโครคอมพิวเตอร์ อุปกรณ์กลขับเคลื่อนชิ้นงานที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกและเพิ่มความปลอดภัย

จากการทดสอบระบบกับรังสีแกมมาพลังงาน 60 keV จากต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียม-241 ที่มีความแรงรังสี 100 มิลลิคูรี ($3.7x10^{9}$ เบคเคอเรล) และเทอร์มัลนิวตรอนจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ปรมาณูวิจัย ปปว-1/1 ทั้งกับวัตถุที่หยุดนิ่ง และวัตถุที่เคลื่อนไหว สำหรับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ อุปกรณ์กลขับเคลื่อนชิ้นงานจะช่วยในการถ่ายภาพบริเวณต่างๆ แล้วนำมาต่อเรียงกันบนไมโครคอมพิวเตอร์ ภาพที่ได้สามารถนำไปปรับปรุงคุณภาพของภาพ เช่น ความสว่างและความเปรียบต่างได้ภายหลัง สำหรับภาพที่มีความเข้มของภาพต่ำก็สามารถนำมาบวกและเฉลี่ยภาพ เพื่อให้ได้ภาพที่มีคุณภาพดีขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

#3970733521 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: GAMMA-RAY AND NEUTRON RADIOGRAPHY/NEUTRON IMAGING SCOPE
NOPPADON NAK-NGOEN : DEVELOPMENT OF A GAMMA-RAY AND NEUTRON RADIOGRAPHY SYSTEM USING A NEUTRON IMAGING SCOPE. THESIS ADVISOR:ASSIST.PROF. NARES CHANKOW , THESIS CO-ADVISOR : ATTAPORN PATTARASUMUNT, 100 pp. ISBN 974-332-425-9

A microcomputer based gamma-ray and neutron radiography system using a neutron imaging scope was developed for real-time gamma-ray and neutron imaging. The imaging scope consisted of a ^{6}Li-loaded ZnS(Ag) screen coupled with an image intensifier and a sensitive CCD camera which could be used with low energy gamma-rays x-rays and thermal neutrons at low intensity. The image could be seen on the microcomputer monitor through a video card installed inside the microcomputer. A specimen moving device operated by a microcontroller was also developed for convenience and safety purposes.

The system was tested with 60 keV gamma-rays form 100 mCi (3.7 GBq) ^{241}Am source and thermal neutrons from the Thai Research Reactor TRR1/M1 for both static and dynamic imaging. For large specimen, the specimen moving device allowed to take images of different parts which were later on collated in the microcomputer . The image quality such as brightness and contrast could be adjusted. For low intensity images, they could be summed-up and averaged to obtain better images.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา นิวเคลียร์เทคโนโลยี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่ง ของผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และ อาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม รวมทั้งอาจารย์ประจำภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ทุกท่านซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่าง ๆ ของการวิจัยมาด้วยดีตลอด ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และเนื่องจากทุนการวิจัยครั้งนี้บางส่วนได้รับมาจากทุนอุดหนุนการวิจัยของบัณฑิตวิทยาลัย จึงขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยมา ณ ที่นี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ บริษัท LIXI ประเทศสหรัฐอเมริกาที่ขายกล้องมองกาพนิวตรอนในราคาต่ำเพื่อใช้ในการทำวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณสำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ คุณวิเชียร รัตนธงชัย รวมทั้งข้าราชการ และ เจ้าหน้าที่กองฟิสิกส์และกองปฏิกรณ์ปฏิบัติทุกท่าน ที่ให้คำแนะนำและอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ นาวาอากาศเอกสุเทพ เผือกพูลผล นาวาอากาศโทณรงค์ ทันประโยชน์ และครอบครัว อดีตผู้บังคับบัญชาผู้ซึ่งสนับสนุนในการศึกษาต่อ

ขอขอบพระคุณ คุณทรงศักดิ์ฯ คุณภาณุพันธุ์ฯ คุณปกรณ์ฯ คุณฐิติกรฯ คุณเสมอใจฯ เพื่อน ๆ และ น้อง ๆ นิสิตภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาตลอด

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงยิ่งต่อบิดา มารดา คุณตา คุณยาย ผู้ซึ่งให้ความสนับสนุนในทุกด้าน โดยเฉพาะ คุณยายกิมเอ็ง ชิ้มเจริญ ผู้เป็นกำลังใจเป็นแบบอย่างที่ดีในการปฏิบัติงานและเป็นแรงผลักดันอย่างสูงสุด ทำให้ผู้วิจัยสามารถดำเนินงานจนสำเร็จได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... จ

กิตติกรรมประกาศ..... ฉ

สารบัญ..... ช

สารบัญตาราง..... ญ

สารบัญภาพ..... ฌ

บทที่

1. บทนำ..... 1

1.1 ความเป็นมาของปัญหา..... 1

1.2 วัตถุประสงค์..... 2

1.3 ขอบเขตของวิทยานิพนธ์..... 2

1.4 ขั้นตอนและวิธีการในการดำเนินงานวิจัย..... 2

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 2

2. ทฤษฎี..... 3

2.1 การถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา..... 3

2.1.1 คุณสมบัติของรังสีแกมมา..... 3

2.1.2 การลดทอนของรังสี..... 4

2.1.3 ทฤษฎีของการเกิดภาพ..... 5

2.2 อันตรกิริยาของนิวตรอนกับสสาร..... 10

2.3 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน..... 12

2.3.1 หลักการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน..... 13

2.3.2 เทคนิคการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน..... 14

2.4 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน..... 19

2.5 อุปกรณ์ทวีความเข้มของภาพ..... 22

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
3. วิธีดำเนินการวิจัย.....	25
3.1 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	25
3.2 การพัฒนาระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพ นิวตรอน.....	25
3.3 การออกแบบและสร้างระบบขับเคลื่อนชิ้นงานทดสอบ.....	27
3.3.1 ชุดอุปกรณ์กลขับเคลื่อนชิ้นงาน.....	28
3.3.2 ระบบควบคุมการทำงานของอุปกรณ์กลขับเคลื่อนชิ้นงาน.....	28
3.3.2.1 ระบบควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์.....	30
3.3.2.2 วงจรขับสเต็ปปิงมอเตอร์.....	31
3.3.2.3 วงจรรับสัญญาณจากสวิตช์แสง.....	34
3.3.2.4 การเชื่อมโยงสัญญาณระหว่างระบบไมโครคอนโทรลเลอร์กับอุปกรณ์กลขับเคลื่อนชิ้นงาน.....	35
3.3.2.5 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบ.....	36
3.4 การพัฒนาระบบถ่ายภาพโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน และบันทึกภาพลงไมโครคอมพิวเตอร์.....	38
3.4.1 การถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา.....	38
3.4.2 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน.....	40
3.4.3 กล้องมองภาพนิวตรอน.....	41
3.4.4 กล้องโทรทัศน์.....	43
3.4.5 แผงวงจรแปลงสัญญาณภาพเป็นข้อมูลภาพของไมโครคอมพิวเตอร์..	44
4. การทดสอบและผลการทดสอบ.....	46
4.1 การทดสอบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน.....	46
4.2 ผลการทดสอบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน.....	47
4.3 การทดสอบปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยรังสีแกมมาโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป.....	50
4.4 ผลการปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ได้จากการถ่ายด้วยรังสีแกมมาโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอนด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป.....	51

สารบัญ(ต่อ)

บทที่		หน้า
	4.5 การทดสอบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน.....	53
	4.6 ผลการทดสอบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน.....	54
	4.7 เปรียบเทียบผลของภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้ กล้องมองภาพนิวตรอน.....	56
	4.8 การทดสอบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับชิ้นงานที่เคลื่อนที่.....	62
	4.9 ผลการทดสอบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับชิ้นงานที่เคลื่อนที่.....	63
	4.10 การทดสอบถ่ายภาพชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้ากล้องมอง ภาพนิวตรอน.....	64
	4.11 ผลการทดสอบถ่ายภาพชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้ากล้องมอง ภาพนิวตรอน.....	65
5.	สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	72
	5.1 สรุปผลการวิจัย.....	72
	5.3 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....		76
บรรณานุกรม.....		77
ภาคผนวก.....		78
	ภาคผนวก ก.....	79
	ภาคผนวก ข.....	81
	ภาคผนวก ค.....	93
	ภาคผนวก ง.....	98
ประวัติผู้เขียน.....		100

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำฉากเปลี่ยนนิวตรอน 20

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงการจัดวางต้นกำเนิดรังสี ชิ้นงาน และอุปกรณ์รับภาพในการถ่ายภาพด้วยรังสี 5
รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบความเปรียบต่างของภาพถ่ายด้วยรังสีพลังงานสูงและพลังงานต่ำ 7
รูปที่ 2.3 แสดงภาพชิ้นงานที่ความแตกต่างของความหนามากและน้อย 8
รูปที่ 2.4 แสดงอิทธิพลของความกว้างของชิ้นงานต่อระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดรังสีกับอุปกรณ์รับภาพ 9
รูปที่ 2.5 แสดงความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลกับเลขอะตอมของธาตุต่าง ๆ สำหรับรังสีเอกซ์หรือรังสีแกมมา และนิวตรอน 12
รูปที่ 2.6 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายตรง 14
รูปที่ 2.7 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีถ่ายทอด 16
รูปที่ 2.8 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยวิธีแทรดเอดช์..... 17
รูปที่ 2.9 การถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องถ่ายภาพ..... 18
รูปที่ 2.10 กระบวนการถ่ายภาพโดยใช้ฉากเปลี่ยนนิวตรอน..... 19
รูปที่ 2.11 แสดงส่วนประกอบของอุปกรณ์ทวีความเข้มของภาพ..... 22
รูปที่ 2.12 แสดงส่วนต่างๆ ของ Microchannel Plate..... 23
รูปที่ 2.13 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูงของอุปกรณ์ทวีความเข้มของภาพ..... 23
รูปที่ 2.14 แสดงการทำงานของอุปกรณ์ทวีความเข้มของภาพ..... 24
รูปที่ 3.1 แผนภาพของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน..... 26
รูปที่ 3.2 อุปกรณ์กลขับเคลื่อนชิ้นงาน..... 28
รูปที่ 3.3 ชุดควบคุมการทำงานของอุปกรณ์กลขับเคลื่อนชิ้นงาน..... 29
รูปที่ 3.4 แผนผังการทำงานของระบบไมโครคอนโทรลเลอร์..... 31
รูปที่ 3.5 แสดงการขับสเต็ปปิงมอเตอร์แบบกระตุ้น 2 เฟส..... 32
รูปที่ 3.6 วงจรขับสเต็ปปิงมอเตอร์..... 32
รูปที่ 3.7 ชุดควบคุมขับสเต็ปปิงมอเตอร์..... 33

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 3.8 แสดงวงจรสวิตช์แสง..... 34
รูปที่ 3.9 รหัสควบคุมที่ใช้ในไอซีเบอร์ 8255..... 35
รูปที่ 3.10 โฟลวชาร์ตแสดงการทำงานโปรแกรมควบคุม..... 36
รูปที่ 3.11 แสดงการถ่ายภาพในโหมดอัตโนมัติ..... 37
รูปที่ 3.12 ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Am-241..... 39
รูปที่ 3.13 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (ปปว-1/1)..... 40
รูปที่ 3.14 ท่อนำนิวตรอน..... 41
รูปที่ 3.15 กล้องมองภาพนิวตรอน..... 42
รูปที่ 3.16 แสดงส่วนประกอบและการทำงานของกล้องมองภาพนิวตรอน 43
รูปที่ 3.17 กล้องโทรทัศน์..... 43
รูปที่ 3.18 แสดงการเชื่อมต่อระหว่างกล้องมองภาพนิวตรอนและกล้องโทรทัศน์วงจรปิด... 44
รูปที่ 3.19 แผงวงจรแปลงสัญญาณภาพเป็นข้อมูลภาพ..... 45
รูปที่ 4.1 การจัดอุปกรณ์ระบบถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมาโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน..... 47
รูปที่ 4.2 ภาพถ่าย และผลของภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของรีเลย์รถยนต์..... 48
รูปที่ 4.3 ภาพถ่าย และผลของภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาของแบตเตอรี่แบบแห้งขนาด 9 โวลต์.. 49
รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายจากการปรับปรุงคุณภาพของภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีแกมมา
โดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอนด้วยโปรมแกรมสำเร็จรูป..... 52
รูปที่ 4.5 การจัดอุปกรณ์ระบบถ่ายภาพด้วยนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน..... 53
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายและผลของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของขวดสเปรย์ระงับกลิ่นปาก 55
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายและผลของภาพถ่ายด้วยนิวตรอนของตัวอักษรพลาสติก..... 55
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบภาพที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน
ของรีเลย์รถยนต์..... 58
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบภาพที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน
ของขวดสเปรย์ระงับกลิ่นปากบรรจุของเหลว 59
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบภาพที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอน
ของคอนเน็กเตอร์..... 60

สารบัญภาพ(ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบภาพที่ถ่ายด้วยรังสีแกมมาและนิวตรอนโดยใช้กล้องมองภาพนิวตรอนของสายโคแอกเชียล..... 61
รูปที่ 4.12 อุปกรณ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยนิวตรอนสำหรับชิ้นงานที่เคลื่อนที่..... 62
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายด้วยนิวตรอนสำหรับชิ้นงานที่เคลื่อนที่..... 63
รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายและภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาแบบ แมตริกซ์ 2×2 ของแผงวงจรอิเล็กทรอนิกส์..... 67
รูปที่ 4.15 ภาพถ่ายและภาพถ่ายด้วยนิวตรอนแบบ แมตริกซ์ 3 ×3 ของเบรกเกอร์สวิตช์..... 68
รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายและภาพถ่ายด้วยรังสีแกมมาแบบ แมตริกซ์ 3 ×3 ของเซอร์กิตเบรกเกอร์สวิตช์..... 69
รูปที่ 4.17 ภาพถ่ายและภาพถ่ายด้วยนิวตรอนแบบ แมตริกซ์ 3 ×3 ของอุปกรณ์ชุดเปิด/ปิดไฮดรอลิก..... 70

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย