

การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี
โดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงาน

นายสุพร กุลวัฒน์นัทชัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2540

ISBN 974-639-090-2

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF THE COMPUTED TOMOGRAPHY SCANNING SYSTEM
USING MULTIENERGY GAMMA RAY

MR. SUPORN KUNLAWATNUNCHAI

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 974-639-090-2

ศุพร กุลวัฒน์นันทชัย : การพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงาน (DEVELOPMENT OF THE COMPUTED TOMOGRAPHY SCANNING SYSTEM USING MULTIENERGY GAMMA RAY) อ. ที่ปรึกษา : รศ. สมยศ ศรีสถิตย์, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. อรรถพร ภัทรสุมันต์, 74 หน้า. ISBN 974-639-090-2.

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงานเพื่อใช้ประโยชน์ในการตรวจสอบชิ้นส่วนอุตสาหกรรมบางชนิด โดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงานจากต้นกำเนิดรังสีอิริเดียม-192 ความแรง 37,000 เมกกะเบคเคอเรล (1 คูรี) และหัววัดรังสีชนิดโซเดียมไอโอไดค์ (ทลเทียม) ขนาด 2 x 2 นิ้ว มีการใช้อุปกรณ์บังคับลำรังสีที่ทำด้วยตะกั่ว ทั้งที่ต้นกำเนิดรังสี และที่หัววัดรังสี เพื่อให้ลำรังสีที่ส่งผ่านมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร และมีการพัฒนาวงจรเชื่อมโยงสัญญาณเพื่อควบคุมและรับข้อมูล ระหว่างเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง CANBERRA รุ่น 35 plus กับเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ โดยระบบนี้ผู้ใช้สามารถเลือกช่วงพลังงานได้หลายช่วง ทำให้ได้ข้อมูลของทุกๆ พลังงานในการวัดแต่ละครั้ง

การคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานตัวอย่าง 3 ชิ้น และชิ้นงานอุตสาหกรรม 1 ชิ้น โดยรังสีแกมมาพลังงาน 317 468 และ 613 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ผลการทดสอบพบว่าสามารถแสดงภาพโทโมกราฟีทางจอภาพของเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ได้อย่างชัดเจน ภาพโทโมกราฟีโดยรังสีพลังงาน 317 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ แสดงความเปรียบต่างได้ดีที่สุด โดยเฉพาะกับวัตถุที่มีค่าความหนาแน่นต่ำ เช่น อลูมิเนียม และพลาสติก ส่วนค่ารีโซลูชันของภาพโทโมกราฟีโดยรังสีแกมมาทุกพลังงานพบว่ามีความประมาณ 4 มิลลิเมตร

ภาควิชา..... นวัตกรรมเทคโนโลยี

สาขาวิชา..... นวัตกรรมเทคโนโลยี

ลายมือชื่อนิติ.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... ลิขิต ลิขิตวิทย์

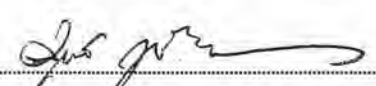
C718888 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY
KEY WORD: COMPUTED TOMOGRAPHY / GAMMA-RAY / NONDESTRUCTIVE TESTING
SUPORN KUNLAWATNUNCHAI : DEVELOPMENT OF THE COMPUTED
TOMOGAPHY SCANNING SYSTEM USING MULTIENERGY GAMMA
RAY. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMYOT SRISATIT, THESIS
CO-ADVISOR : ATTAPORN PATTARASUMUNT, 74 pp. ISBN 974-639-090-2.

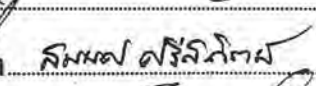
The purpose of this research is to develop a computed tomography (CT) scanning system using multienergy gamma-rays for inspection of some industrial objects. A 3.7×10^4 MBq (1 Ci) ^{192}Ir source and a 2"x2" NaI (Tl) detector were used in the system. The detector and source were collimated with lead allowing gamma-rays to pass to detector only through 3 mm ϕ aperture. An interfacing unit was also developed for controlling the system as well as for data transmission between a 35 plus CANBERRA MCA and a microcomputer. The system allowed the user to select several energy intervals to obtain transmitted data profiles of different gamma-ray energies simultaneously.

The CT images of 3 testing objects and 1 industrial object at 317, 468 and 613 keV gamma-ray energies were reconstructed. The results indicated that CT images can be displayed clearly on the microcomputer monitor. The images at 317 keV give the best contrast particularly for low density material like aluminum and plastic. The image resolutions of all gamma-ray energies were found to be about 4 mm.

ภาควิชา..... นวัตกรรมเทคโนโลยี.....

สาขาวิชา..... นวัตกรรมเทคโนโลยี.....

ลายมือชื่อนิสิต..... 

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... 

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเพราะความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษา และอาจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำเป็นอย่างดีมาโดยตลอด ผู้ทำการวิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว ซึ่งได้ให้แนวความคิดริเริ่มในการทำวิทยานิพนธ์นี้ และอาจารย์ทุกท่านที่ช่วยชี้แนะให้งานวิจัยนี้เสนอเป็นผลงานได้อย่างดี

ขอขอบคุณ คุณมณฑล วรรณประภา ที่ได้จัดสร้างชุดอุปกรณ์สำหรับเก็บข้อมูลเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีแบบเคลื่อนที่ ซึ่งยังคงใช้งานได้เป็นอย่างดี สามารถนำมาพัฒนาใช้ต่อในงานวิจัยนี้ จึงทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จได้อย่างรวดเร็ว และขอบคุณผู้ทำการวิจัยด้าน CT ทุกท่านที่ได้สร้างผลงานวิจัยอย่างดีเยี่ยมมาก่อน เป็นตัวอย่างให้ผู้ทำการวิจัยสามารถศึกษา และใช้เป็นแนวทางในการทำงานวิจัยนี้

ขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ในภาคนิวเคลียร์เทคโนโลยีทุกท่าน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจสนับสนุนมาโดยตลอด

ขอขอบคุณบริษัท เอ็นซิสเทคโนโลยี จำกัด ที่ได้อนุเคราะห์ต้นกำเนิดรังสีอิริเดียม-192 ความแรงรังสีต่ำซึ่งใช้ทดสอบอุปกรณ์นำบรรจุต้นกำเนิดรังสี

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุมัติทุนอุดหนุนการวิจัย สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่เป็นกำลังใจ และคอยให้การสนับสนุน การศึกษามาโดยตลอด ทำให้ผู้ทำการวิจัยได้มีโอกาสในการศึกษาต่อและได้ทำงานวิจัยนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ปัญหา ที่มา และเหตุผล	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัย	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎี	4
2.1 หลักการของการสร้างภาพโทโมกราฟี	4
2.1.1 ระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ (discrete beam)	6
2.1.2 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด (fan beam)	7
2.1.3 ระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย (cone beam)	8
2.2 ทฤษฎีการสร้างภาพโทโมกราฟี	9
2.2.1 การลดทอนของรังสีแกมมา	9
2.2.2 นิยามของเรย์ซัม (ray-sum)	10
2.3 อิทธิพลจากพลังงานของรังสีแกมมาต่อภาพโทโมกราฟี	12
3 การพัฒนาอุปกรณ์ และระบบสแกน	13
3.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย	13
3.2 ระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมา หลายพลังงาน	13
3.3 ระบบวัดรังสีแกมมาหลายพลังงาน	15
3.3.1 ดันกำเนิดรังสีแกมมา	15
3.3.2 หัววัดรังสีแกมมา	16

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
3.3.3 อุปกรณ์กำลังรังสี และบังคับลำรังสี	17
3.3.4 ฐานหลอด และภาชนะขยายส่วนหน้า	18
3.3.5 แหล่งจ่ายศักดาไฟฟ้าสูง	19
3.3.6 ภาชนะขยายสัญญาณ และ NIM BIN	19
3.3.7 เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง	19
3.4 ระบบขับเคลื่อนเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี	21
3.5 วงจรเชื่อมโยงสัญญาณ	22
3.5.1 แผ่นวงจรเชื่อมโยงสัญญาณ	22
3.5.2 วงจรขับสแต็ปิงมอเตอร์	24
3.6 โปรแกรมควบคุมการทำงานของระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพ โทโมกราฟี	24
3.6.1 โปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ...	26
3.6.2 โปรแกรมทดสอบเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง	31
3.6.3 โปรแกรมทดสอบระบบขับเคลื่อน	32
4 การทดสอบ และผลการทดสอบ	33
4.1 การทดสอบเก็บข้อมูลโดยระบบวัดรังสีแกมมาหลายพลังงาน	32
4.1.1 ผลของอัตราขยายที่ภาชนะขยายสัญญาณที่มีต่อความแปรปรวนของข้อมูล	33
4.1.2 ผลของเวลาที่ใช้ในการวัดข้อมูลที่มีต่อความแปรปรวนของข้อมูล	34
4.2 การทดสอบการระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้ รังสีแกมมาพลังงานเดียวจากซีเซียม-137	35
4.3 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงานจาก อิริเดียม-192 เปรียบเทียบกับการใช้รังสีแกมมาพลังงานเดียวจากซีเซียม-137	37
4.4 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรม	43
5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	47
5.1 สรุปผลการวิจัย	47
5.1.1 ผลการทดสอบเก็บข้อมูลโดยระบบวัดรังสีแกมมาหลายพลังงาน	47
5.1.2 จำนวนโพรไฟล์ และระยะห่างระหว่างเรย์ซันที่มีผลต่อภาพโทโมกราฟี	47

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5.1.3 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงานจาก อิริเดียม-192 เปรียบเทียบกับการใช้รังสีแกมมาพลังงานเดียวจากซีเรียม-137 .	48
5.1.4 ผลการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรม	49
5.2 ข้อเสนอแนะ	49
รายการอ้างอิง	51
บรรณานุกรม	52
ภาคผนวก	53
ภาคผนวก ก	54
ภาคผนวก ข	64
ภาคผนวก ค	69
ประวัติผู้เขียน	74

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 การจัดเข้ารับส่งสัญญาณที่พอร์ต J112 ของเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง	20
3.2 การจัดตำแหน่งหมายเลขพอร์ตที่ใช้อ้างอิงในเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์	24
4.1 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่วัดได้ที่อัตราขยายสัญญาณค่าต่างๆ	34
4.2 ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลที่วัดได้โดยใช้เวลาในการวัดต่างกัน	34

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 การเคลื่อนลำรังสีตัดผ่านชิ้นงาน ไปเป็นระนาบในแนวเส้นตรง ทำให้ได้ข้อมูล 1 โพรไฟล์	4
2.2 การเคลื่อนลำรังสีตัดผ่านชิ้นงาน 2 ครั้ง โดยแนวการเก็บข้อมูลทำมุม 90 องศา ทำให้ได้ข้อมูล 2 โพรไฟล์	5
2.3 แสดงวิธีการแบ็กโพรเจกชันจากข้อมูลจำนวน 2 โพรไฟล์	5
2.4 การทำงานของระบบสแกนแบบรังสีลำแคบ	7
2.5 การทำงานของระบบสแกนแบบลำรังสีรูปพัด	8
2.6 การทำงานของระบบสแกนแบบลำรังสีรูปกรวย	8
2.7 แสดงเรขาคณิตของลำรังสีแกมมาที่เดินผ่านตัวกลาง 3 แบบ	
ก. ตัวกลางที่มีเนื้อเดียวตลอด	10
ข. ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกันสองชนิด	10
ค. ตัวกลางที่มีเนื้อต่างกันหลายชนิด	10
2.8 แผนภาพของการสร้างภาพโทโมกราฟี	11
3.1 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของระบบสแกนเพื่อการคำนวณสร้างภาพ โทโมกราฟีโดยใช้รังสีแกมมาหลายพลังงาน	14
3.2 สเปกตรัมของต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ir-192	15
3.2 สเปกตรัมของต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137	16
3.4 หัววัดรังสีโซเดียมไอโอไดค์	17
3.5 อุปกรณ์กำบัง และบังกับลำรังสี สำหรับหัววัดรังสี และต้นกำเนิด รังสีแกมมา Cs-137	17
3.6 การย้ายต้นกำเนิดรังสีแกมมา Ir-192 โดยใช้อุปกรณ์นำบรรจุ ต้นกำเนิดรังสี	18
3.7 แผนภาพแสดงส่วนประกอบภายในเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง	19
3.8 ระบบขับเคลื่อนเพื่อเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี	22
3.9 แสดงพอร์ต และการเชื่อมต่อระบบบัส ในโหมคอินพุต/เอาต์พุตพื้นฐาน ของไอซีหมายเลข 8255	23
3.10 รูปแบบของรหัสควบคุมที่ใช้ และการทำงานของไอซีหมายเลข 8255	23

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
3.11 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมเมนูหลัก	25
3.12 ผลทางจอภาพของโปรแกรมเมนูหลัก	25
3.13 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี	27
3.14 ผลการแสดงผลทางจอภาพของโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ในขั้นการป้อนรายละเอียดในการทำงานทั้งหมดให้โปรแกรม	28
3.15 ผลการแสดงผลทางจอภาพของโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี หลังจากโปรแกรมได้รับค่าความเข้มรังสีที่เข้าสู่หัววัด โดยยังไม่ผ่านชิ้นงาน	28
3.16 ผลการแสดงผลทางจอภาพของโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี หลังจากการเก็บข้อมูลตลอดโปรไฟล์ที่ 1 แล้วเสร็จ	29
3.17 ผลการแสดงผลทางจอภาพของโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี ระหว่างการเก็บข้อมูลในโปรไฟล์ที่ 2 ซึ่งการสแกนจะกระทำในทิศทางย้อนกลับ	29
3.18 ผลการแสดงผลทางจอภาพของโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาหลายพลังงาน หลังจากโปรแกรมได้รับค่าความเข้มรังสีที่เข้าสู่หัววัด โดยยังไม่ผ่านชิ้นงาน	30
3.19 ผลการแสดงผลทางจอภาพของโปรแกรมควบคุมการเก็บข้อมูลสำหรับการคำนวณสร้างภาพโทโมกราฟี เมื่อใช้ต้นกำเนิดรังสีแกมมาหลายพลังงาน หลังจากการเก็บข้อมูลตลอดโปรไฟล์ที่ 1 แล้วเสร็จ	30
3.20 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมทดสอบเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง	31
3.21 แผนภาพการทำงานของโปรแกรมทดสอบระบบขับเคลื่อน	32
4.1 ชิ้นงานตัวอย่างที่ 1	35
4.2 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานที่ 1 จากการคำนวณข้อมูล 9 โปรไฟล์ ระยะห่างระหว่างเรย์ซัน 3 มิลลิเมตร	36

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.3 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานที่ 1 จากการคำนวณข้อมูล 9 โพรไฟล์ ระยะห่างระหว่างเรย์ซั่ม 2 มิลลิเมตร	36
4.4 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานที่ 1 จากการคำนวณข้อมูล 18 โพรไฟล์ ระยะห่างระหว่างเรย์ซั่ม 3 มิลลิเมตร	36
4.5 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานที่ 1 จากการคำนวณข้อมูล 18 โพรไฟล์ ระยะห่างระหว่างเรย์ซั่ม 2 มิลลิเมตร	36
4.6 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานที่ 1 จากการคำนวณข้อมูล 36 โพรไฟล์ ระยะห่างระหว่างเรย์ซั่ม 3 มิลลิเมตร	36
4.7 ภาพโทโมกราฟีของชิ้นงานที่ 1 จากการคำนวณข้อมูล 36 โพรไฟล์ ระยะห่างระหว่างเรย์ซั่ม 2 มิลลิเมตร	36
4.8 ชิ้นงานตัวอย่างที่ 2	38
4.9 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 2 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV	38
4.10 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 2 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 613 keV	38
4.11 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 2 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 468 keV	38
4.12 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 2 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 317 keV	38
4.13 ชิ้นงานตัวอย่างที่ 3	40
4.14 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 3 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV	38
4.15 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 3 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 613 keV	38
4.16 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 3 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 468 keV	38
4.17 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 3 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 317 keV	38
4.18 ชิ้นงานตัวอย่างที่ 4	41
4.19 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 4 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV	42
4.20 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 4 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 613 keV	42
4.21 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 4 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 468 keV	42
4.22 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานที่ 4 โดยรังสีแกมมาพลังงาน 317 keV	42
4.23 แสดงชิ้นงานอุตสาหกรรม	43
4.24 ภาพด้านบนของชิ้นงานอุตสาหกรรม	44

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.25 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านบน โดยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV ..	44
4.26 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านบน โดยรังสีแกมมาพลังงาน 613 keV ..	44
4.27 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านบน โดยรังสีแกมมาพลังงาน 468 keV ..	44
4.28 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านบน โดยรังสีแกมมาพลังงาน 317 keV ..	44
4.29 ภาพด้านล่างของชิ้นงานอุตสาหกรรม	45
4.30 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านล่าง โดยรังสีแกมมาพลังงาน 662 keV .	45
4.31 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านล่าง โดยรังสีแกมมาพลังงาน 613 keV .	45
4.32 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านล่าง โดยรังสีแกมมาพลังงาน 468 keV .	45
4.27 ภาพโทโมกราฟีชิ้นงานอุตสาหกรรมด้านล่าง โดยรังสีแกมมาพลังงาน 317 keV .	45