

การตรวจหารอยบกพร่องในชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลแอมมาเรย์  
สแกนเทอร์ริงสเปกโตรสโคปี

นาย อภิชาติ ศิริวิทย์ปรีชา



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี  
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-467-4

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**FLAW DETECTION IN ALUMINIUM SPECIMENS USING DIFFERENTIAL  
GAMMA-RAY SCATTERING SPECTROSCOPY**



**Mr. Apichart Siriwitpreecha**

**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 974-332-467-4**

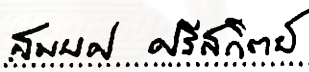
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การตรวจหารอบบ่งชี้ในชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียล  
แกมมาเรย์สแกดเทอร์ริงสเปกโตรสโคปี  
ชื่อนิสิต นาย อภิชาติ ศิริวิทย์ปรีชา  
ภาควิชา นิเวศลิขรเทคโนโลยี  
อาจารย์ที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันท์นัขาว  
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปรั้งมีพร


---

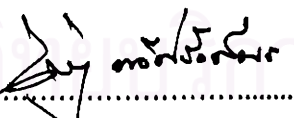
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น  
ส่วนหนึ่งของการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต


 ..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย  
(ศาสตราจารย์นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชูติวงศ์)

คณะกรรมการตรวจสอบวิทยานิพนธ์

 ..... ประธานกรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันท์นัขาว)

 ..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปรั้งมีพร)

 ..... กรรมการ  
(อาจารย์อรรถพร กัทรสุมันต์)

พิมพ์ต้นฉบับแก่คณาจารย์วิทยาลัยเกษตรกำแพงแสนเพื่อแจกจ่ายฟรี

อภิชาติ ศิริวิทย์ปริษา : การตรวจหารอยบกพร่องในชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์  
สเปกโตรสโกปี (FLAW DETECTION IN ALUMINIUM SPECIMENS USING  
DIFFERENTIAL GAMMA-RAY SCATTERING SPECTROSCOPY) อ. ที่ปรึกษา: ผศ. นรเศรษฐ์ จันทน์ขาว,  
อ. ที่ปรึกษาร่วม: ผศ. ดร. วิศิษฎ์ ทวีปริงฉัตร, 85 หน้า. ISBN 974-332-467-4

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาวิธีตรวจหารอยบกพร่องในชิ้นงานอะลูมิเนียมโดยใช้ดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สเปกโตรสโกปี รอยบกพร่องภายในชิ้นงานอะลูมิเนียมสามารถวิเคราะห์ได้จากดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมซึ่งได้จากการนำคอมพิวเตอร์วิเคราะห์สเปกตรัมที่กระเจิงจากชิ้นงานอะลูมิเนียมตัวอย่างที่ต้องการทดสอบออกจากคอมพิวเตอร์สเปกตรัมที่กระเจิงจากชิ้นงานอะลูมิเนียมอ้างอิงที่ไม่มีรอยบกพร่อง ในการทดลองได้ใช้ชิ้นงานอะลูมิเนียมต้นรูปทรงระบอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ยาว 9 เซนติเมตร ต้นกำเนิดรังสี Cs-137 ความแรงรังสี 5.5 มิลลิวรี จัดระบบวัดรังสีให้หัววัดรังสีทำมุม 90° กับแนวลำรังสี แล้ววัดรังสีที่กระเจิงจากชิ้นงานอะลูมิเนียมเข้าสู่หัววัดรังสี เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมคือ เมื่อตำแหน่งของรอยบกพร่องภายในชิ้นงาน เวลาที่ใช้ในการวัดรังสี ขนาดของรอยบกพร่องและชิ้นงานอะลูมิเนียมต่างกัน

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมพบว่า เมื่อตำแหน่งของรอยบกพร่องต่างกัน ลักษณะของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะต่างกันคือ ถ้ารอยบกพร่องอยู่ในแนวลำรังสีผ่านดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะมีพีคเป็นบวกลดลงที่มีความเข้มรังสีสูงสุดจะสูงกว่า 288 keV เมื่อรอยบกพร่องอยู่ใกล้ต้นกำเนิดรังสี และต่ำกว่า 288 keV เมื่ออยู่ไกลกว่าจุดศูนย์กลางชิ้นงานจากต้นกำเนิดรังสี ถ้ารอยบกพร่องอยู่ด้านใกล้หัววัดรังสี ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะมีพีคเป็นลบและจะกระจายเป็นบวกลดลงช่วงพลังงานถ้ารอยบกพร่องอยู่ไกลกว่าแนวลำรังสีจากหัววัดรังสี เมื่อใช้ชิ้นงานอะลูมิเนียมต่างกันดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมจะยังมีลักษณะคล้ายกัน แต่มีความเข้มรังสีน้อยกว่าสำหรับขนาดของรอยบกพร่องที่เล็กที่สุดที่สามารถวิเคราะห์ได้จากการวิจัยนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.4 เซนติเมตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา ..... นวัตกรรมเทคโนโลยี  
สาขาวิชา ..... นวัตกรรมเทคโนโลยี  
ปีการศึกษา ..... 2541

ลายมือชื่อผู้จัดทำ .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

## C818980 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: FLAW DETECTION / ALUMINIUM / COMPTON SCATTERING

APICHART SIRIWITPREECHA: FLAW DETECTION IN ALUMINIUM SPECIMENS USING DIFFERENTIAL GAMMA-RAY SCATTERING SPECTROSCOPY. THESIS ADVISOR : ASSIST. PROF. NARBS CHANKOW , THESIS CO-ADVISOR : ASSIST. PROF. VISIT TAVEEPRUNGSIPORN, Ph.d, 85 pp. ISBN 974-332-467-4

The aim of this research was to investigate and develop a method for detecting flaws in aluminium specimens using differential gamma-ray scattering spectroscopy. Flaw detection was accomplished by subtracting compton scattering spectrum obtained from test specimens and an unflawed reference specimen. Aluminium specimens with a diameter of 5 cm and 9 cm in length were used in this study. A 5.5 mCi Cs-137 radioactive source was used with the detection system making a 90° angle with radiation beam. Factor such as flaw position , detection time , flaw size and different aluminium grade were investigated.

This research revealed the following factors that influence the differential spectrum. When the flaw position was varied, it was found that if the flaw was on the beam path, the subtraction resulted in a positive different spectrum with its peak located higher than 288 keV, when the flaw position was near the source, and lower if it was further away from the center of the aluminium cylinder the source. If the flaw was near the detector, the subtraction resulted in a negative differential spectrum. While it becomes positive if the flaw was further away from the beam path. When different grades of aluminium were used , there was no significant change in the differential spectrum. For this particular experimental set up, the smallest flaw size that can be detected was extrapolated to be 0.4 cm.

ภาควิชา..... นวัตกรรมเทคโนโลยี  
สาขาวิชา..... นวัตกรรมเทคโนโลยี  
2541  
ปีการศึกษา.....

ลายมือชื่อนิสิต.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....



### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของผู้ช่วยศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิศิษฐ ทวีปรัมย์พร อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ และได้กรุณาตรวจทาน และแก้ไขต้นฉบับวิทยานิพนธ์โดยตลอด รวมทั้งคณาจารย์ประจำภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยีทุกท่าน

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุณพานิช ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือคุณพระณี เสถียรศรี ที่ได้ให้ความช่วยเหลือในการทดลอง รวมทั้งนิสิตทุกท่านในภาควิชานิเวศลิษฐ์เทคโนโลยี ที่ได้ให้การช่วยเหลือมาโดยตลอด

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้สนับสนุนให้ทุนสำหรับอุดหนุนงานวิจัย ในการทำวิจัยมา ณ ที่นี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงิน และให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย .....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ณ
สารบัญภาพ.....	ญ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2. อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสารและเทคนิคดีฟเฟอเรนเชียล แกมมาเรย์สแกตเตอริงสเปกโตรสโคปี.....	4
2.1 รังสีแกมมา.....	4
2.2 แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา.....	5
2.3 อันตรกิริยาระหว่างรังสีแกมมากับสสาร.....	6
2.4 การดูดกลืนรังสีแกมมาเมื่อผ่านสาร.....	21
2.5 เทคนิคดีฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกตเตอริงสเปกโตรสโคปี.....	26
3. วิธีการดำเนินการวิจัย.....	32
3.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4. ผลการวิจัย.....	44
4.1 การศึกษาผลของคิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อตำแหน่งของรอย บกพร่องภายในชิ้นงานอะลูมิเนียมต่างกัน.....	46
4.2 การศึกษาผลของคิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อใช้เวลาในการวัด รังสีต่างกัน.....	52
4.3 การศึกษาผลของคิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อขนาดของรอย บกพร่องภายในชิ้นงานต่างกัน.....	59
4.4 การศึกษาผลของคิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อชิ้นงาน อะลูมิเนียมต่างกัน.....	62
5. สรุป วิเคราะห์ผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	70
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	70
5.2 วิเคราะห์ผลการวิจัย.....	72
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	74
รายการอ้างอิง.....	76
ภาคผนวก.....	77
ภาคผนวก ก.....	78
ภาคผนวก ข.....	80
ภาคผนวก ค.....	82
ประวัติผู้เขียน.....	85



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นในหน่วย $\text{cm}^{-1}$ สำหรับธาตุบางชนิดและคอนกรีต.....	23
2.2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล ( $\mu_m$ ) สำหรับ ธาตุต่างๆ ในหน่วย $\text{cm}^2/\text{g}$ .....	25
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างจากขอบชิ้นงานของ รอยบกพร่องกับช่วงพลังงานและความเข้มรังสีสูงสุดของ ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม.....	41
4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยบกพร่องที่ ระยะห่างจากขอบชิ้นงานกับพื้นที่ใต้พีค.....	49
4.3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยบกพร่องกับ พื้นที่ใต้พีค.....	67

สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานภายในนิวเคลียส.....	4
2.2 แผนผังการสลายตัวของต้นกำเนิดรังสีบางชนิด.....	5
2.3 แสดงการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์.....	7
2.4 แสดงการดูดกลืนรังสีแกมมาของตะกั่วที่พลังงานต่างกัน.....	8
2.5 แสดงค่าคงที่ $n$ ที่แปรเปลี่ยนตามค่าพลังงานของรังสีแกมมา.....	9
2.6 แสดงการเกิดปรากฏการณ์คอมพ์ตันเอฟเฟกต์.....	10
2.7 แสดงความเข้มรังสีที่เกิดจากการกระเจิงคอมพ์ตัน โดยมีความ ยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปตามมุมกระเจิงต่างๆ.....	14
2.8 แสดงค่าภาคตัดขวางของการกระเจิงคอมพ์ตันที่ขึ้นกับพลังงาน รังสีแกมมา.....	15
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าภาคตัดขวางของ Klein-Nishina ที่กระเจิงเป็นมุม $\theta$ ของรังสีแกมมาที่แต่ละพลังงาน.....	16
2.10 แสดงการเกิดแพร์โปรดักชัน.....	17
2.11 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของตะกั่วที่ขึ้นกับพลังงาน รังสีแกมมา.....	18
2.12 แสดงการเกิด annihilation เนื่องจากการรวมตัวระหว่างโพสิตรอน กับอิเล็กตรอน.....	19
2.13 แสดงโอกาสของการเกิดอันตรกิริยาของรังสีแกมมาที่พลังงานต่าง กันกับสารที่มีเลขอะตอมต่างกัน.....	20
2.14 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้นเมื่อรังสีแกมมามีพลังงานต่างกัน....	22
2.15 แสดงค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของอะลูมิเนียมเมื่อรังสี แกมมามีพลังงานต่างกัน.....	24

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.16 แสดงการกระเจิงของรังสีแกมมาที่กระทบกับแต่ละตำแหน่งในชั้น วัสดุแล้วเข้าสู่หัววัดรังสีด้วยมุม $\theta$ ค่าสุดจนถึงมุม $\theta$ สูงสุด.....	26
2.17 แสดงการสร้างดิฟเฟอเรนเชียลแกมมาเรย์สแกดเตอร์ริงสเปกตรัม.....	28
2.18 แสดงการกระเจิงคอมพ์ตันหลายครั้งก่อนเข้าสู่หัววัดรังสี.....	30
3.1 แสดงอุปกรณ์และระบบวัดรังสีแกมมา.....	33
3.2 แสดงลักษณะชิ้นงานอะลูมิเนียม.....	34
3.3 แสดงส่วนประกอบต่างๆ ของระบบวัดรังสี.....	34
3.4 แสดงการจัดระบบวัดรังสี.....	35
3.5 แสดงการจัดระบบวัดรังสีเมื่อรอยบกพร่องอยู่ในแนวลำรังสี.....	37
3.6 แสดงตำแหน่งรอยบกพร่องที่ไม่อยู่ในแนวลำรังสี.....	40
3.7 แสดงลักษณะชิ้นงานอะลูมิเนียมเมื่อความยาวของรอยบกพร่อง มีขนาดต่างกัน.....	42
4.1 แสดงลักษณะคอมพ์ตันสแกดเตอร์ริงที่กระเจิงจากชิ้นงานอ้างอิง.....	44
4.2 แสดงลักษณะคอมพ์ตันสแกดเตอร์ริงที่กระเจิงจากชิ้นงานตัวอย่าง.....	45
4.3 แสดงลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องเมื่อตำแหน่งของรอยบกพร่องห่างจากขอบชิ้นงานเป็นระยะ 0.70 , 1.95 และ 3.20 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	47
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยบกพร่องที่ ระยะห่างจากขอบชิ้นงานกับพลังงานที่มีความเข้มรังสีสูงสุดของ ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม.....	48
4.5 แสดงวิธีการหาพื้นที่ใต้พีคดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม.....	49

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่งของรอยบกพร่องที่ระยะห่างจากขอบชิ้นงานกับพื้นที่ใต้พิคของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม.....	51
4.7 แสดงลักษณะดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องที่ไม่อยู่ในแนวลำรังสีผ่าน.....	52
4.8 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องในตำแหน่งห่างจากขอบชิ้นงาน 0.70 เซนติเมตร เมื่อใช้เวลาในการวัดรังสี 4000 , 8000 , 12000 , 16000 และ 20000 วินาที ตามลำดับ.....	53
4.9 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องในตำแหน่งห่างจากขอบชิ้นงาน 1.95 เซนติเมตร เมื่อใช้เวลาในการวัดรังสี 4000 , 8000 , 12000 , 16000 และ 20000 วินาที ตามลำดับ.....	54
4.10 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องในตำแหน่งห่างจากขอบชิ้นงาน 3.20 เซนติเมตร เมื่อใช้เวลาในการวัดรังสี 4000 , 8000 , 12000 , 16000 และ 20000 วินาที ตามลำดับ.....	55
4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีกับพื้นที่ใต้พิคเมื่อรอยบกพร่องอยู่ห่างจากขอบชิ้นงานต่างกัน.....	56
4.12 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องในตำแหน่งตรงข้ามหัววัดรังสี เมื่อใช้เวลาในการวัดรังสี 4000 , 8000 , 12000 , 16000 และ 20000 วินาที ตามลำดับ.....	57
4.13 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องในตำแหน่งด้านด้านใกล้หัววัดรังสี เมื่อใช้เวลาในการวัดรังสี 4000 , 8000 , 12000 , 16000 และ 20000 วินาที ตามลำดับ.....	58
4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการวัดรังสีกับพื้นที่ใต้กราฟดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อรอยบกพร่องอยู่ในด้านตรงข้ามและใกล้หัววัดรังสี.....	59

## สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อความยาวของรอยบกพร่อง ในตำแหน่งห่างจากขอบชิ้นงาน 0.70 เซนติเมตร และมีความ ยาว 9, 7, 5, 3, 1 และ 0 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	60
4.16 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อความยาวของรอยบกพร่อง ในตำแหน่งห่างจากขอบชิ้นงาน 1.95 เซนติเมตร และมีความ ยาว 9, 7, 5, 3, 1 และ 0 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	61
4.17 แสดงดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมเมื่อความยาวของรอยบกพร่อง ในตำแหน่งห่างจากขอบชิ้นงาน 3.20 เซนติเมตร และมีความ ยาว 9, 7, 5, 3, 1 และ 0 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	62
4.18 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องในแนวลำรังสี.....	63
4.19 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมของรอยบกพร่องที่อยู่ในด้านใกล้ หัววัดรังสี.....	64
4.20 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในตำแหน่งใกล้ต้นกำเนิดรังสีเมื่อ ขนาดของรอยบกพร่องมีขนาด 0.96, 0.63, 0.45 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	65
4.21 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในตำแหน่งกลางเมื่อขนาดของรอย บกพร่องมีขนาด 0.96, 0.63, 0.45 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	66
4.22 ดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัมในตำแหน่งตรงข้ามต้นกำเนิดรังสี เมื่อขนาดของรอยบกพร่องมีขนาด 0.96, 0.63, 0.45 เซนติเมตร ตามลำดับ.....	67
4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรอยบกพร่องกับพื้นที่ ใต้พีคของดิฟเฟอเรนเชียลสเปกตรัม.....	69
5.1 แสดงการแบ่งส่วนต่างๆ ของชิ้นงานอะลูมิเนียม.....	73