

การตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็กโดยใช้รังสีแกมมา

GAMMA-RAY FLAW DETECTION IN STEEL



แก้วใจ มีเทียน  
KEAWGAI MEETIAN

เลขหน้า.....  
เลขทะเบียน...43295  
วัน, เดือน, ปี 26 ส.ค. 2545

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2545

ISBN 974 - 648 - 707 - 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# **GAMMA-RAY FLAW DETECTION IN STEEL**



**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT**

**OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF**

**MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

**2002**

**ISBN 974 - 648 - 707 - 8**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2002**

**SCHOOL OF GRADUATE STUDIES**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็กโดยใช้

รังสีแกมมา

นักศึกษา

นางสาวแก้วใจ มีเทียน

รหัสประจำตัว

38064004

ปริญญา

วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

พ.ศ.

2545

อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการตรวจสอบแบบไม่ทำลายชิ้นงานที่ทำด้วยเหล็กโดยใช้รังสีแกมมา ซึ่งอาศัยหลักการลดทอนของรังสีแกมมาเมื่อเดินทางผ่านวัสดุที่ขวางกั้น แหล่งกำเนิดที่ใช้ในงานวิจัยเป็น  $^{137}\text{Cs}$  ซึ่งสลายให้รังสีแกมมาพลังงานเดียวคือ 0.662 MeV มีกัมมันตภาพรังสีเริ่มต้น 100 mCi รังสีที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดถูกบีบให้เป็นลำแคบ ๆ ด้วยท่อทองแดงกลวง ทำให้ได้ลำรังสีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 เซนติเมตร ที่ระยะห่าง 10 เซนติเมตรจากปลายตัวบีบลำรังสี รังสีที่ผ่านวัสดุออกมาจะถูกตรวจจับโดยหัววัด Ge(Li) ที่มี Resolution 1.8 keV(FWHM) ที่ 1.33 MeV สัญญาณที่ได้จากหัววัดจะถูกป้อนเข้าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ซึ่งเชื่อมโยงกับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกและวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนนับของรังสีของสเปกตรัมที่ได้ถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์เพื่อหาโพรงหรือรอยร้าวในการวิเคราะห์หาขนาดของโพรงจากค่าความเข้มของรังสีก่อนและหลังผ่านแผ่นวัสดุโดยตรงจะมีความคลาดเคลื่อนเนื่องจากค่า buildup factor ขึ้นกับความหนาของวัสดุ ในงานวิจัยนี้ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบหาโพรงถูกนำมาสแกนทั้ง 3 มิติ จากค่าความเข้มของรังสีจากสเปกตรัมที่ได้ เมื่อนำมาวิเคราะห์สามารถใช้ออกตำแหน่งและขนาดของโพรงได้ถูกต้องมีค่าความคลาดเคลื่อนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ สำหรับขนาดของโพรงที่มีขนาดเท่ากับหรือมากกว่า 0.4 เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางลำรังสี

<b>Thesis Title</b>	Gamma – Ray Flaw Detection in Steel
<b>Student</b>	Miss. Keawgai Meetian
<b>Student ID</b>	38064004
<b>Degree</b>	Master of Physics
<b>Programme</b>	Applied Physics
<b>Year</b>	2002
<b>Thesis Advisor</b>	Assist. Prof. Preecha Teansompasong

## ABSTRACT

The research uses gamma rays to detect flaw in steel. The study is based on the attenuation of gamma rays passed through material.  $^{137}\text{Cs}$  providing monoenergetic gamma rays of 0.662 MeV of initial activity 100 mCi was used as the gamma - ray source. The beam is collimated with a cylindrical copper tube providing beam of diameter 1 cm at 10 cm from the end of the copper tube. Ge(Li) detector of resolution 1.8 keV ( FWHM ) at 1.33 MeV, is used as gamma - ray detector in this experiment. The signals were fed into a conventional electronic equipment which in turn connect to a computer for analysis and collection of the data. Peak area of the obtained spectrum was used for the analysis of flaw. The direct analysis of the flaw from the attenuated gamma - ray intensities would yield much error in the results as thickness of the sample results in different buildup factors. In our work, the spectra obtained by scanning the sample for 3 dimensions provided shapes and locations of the flaw to the accuracy of ~ 10 percent. The limit of the flaw size is at least 0.4 time of the magnitude of the diameter of gamma- ray beam used.

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์สำเร็จลุล่วงไปได้ดีด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก ผศ.ดร.ปรีชา เทียนสมประสงค์ ซึ่งเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง และเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่าน และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.วราวุฒิ เถาถัดคา ที่ให้ความช่วยเหลือในการออกแบบชุดเลเซอร์ และให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ที่ให้ความช่วยเหลือ และให้คำปรึกษาทางด้านวิชาการเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ คุณประยงค์ สังกวิเชียร จากกองรังสีและเครื่องมือแพทย์ กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข ที่ให้ความอนุเคราะห์ยืมแหล่งกำเนิดรังสี Cs-137 เป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ คุณสมยศ ปรุงเมือง จากกองตรวจสอบแบบไม่ทำลาย สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ตรวจสอบชิ้นงาน โดยการถ่ายภาพด้วยรังสี

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ น้อง ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ และภาคเคมีประยุกต์ และภาควิศวกรรมคอมพิวเตอร์ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือให้คำแนะนำต่าง ๆ และยังให้กำลังใจต่อผู้วิจัยอย่างยิ่งตลอดมา

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนการวิจัยแห่งชาติ ที่ช่วยเหลือในด้านงบประมาณทั้งหมดในการทำวิจัยแก่ข้าพเจ้าเป็นอย่างดี

สุดท้ายขอขอบคุณภาคฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้ออุปถัมภ์ในการทำวิจัยแก่ข้าพเจ้า และข้าพเจ้าขอขอบพระคุณทุก ๆ ท่านมา ณ โอกาสนี้

คุณค่า และประโยชน์อันพึงมีจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ผู้วิจัยขอบแต่ บิดามารดา และผู้มีพระคุณทุกท่าน

แก้วใจ มีเทียน

# สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญภาพ.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตเนื้อหาของงานวิจัย.....	4
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
1.5 ประวัติความเป็นมาของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้รังสี.....	4
1.6 วิธีดำเนินงานการทำวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	6
2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมา กับ สสาร.....	6
2.1.1 ปฏิกิริยาการณัโฟโตอิเล็กทริก.....	6
2.1.2 การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน.....	9
2.1.3 การผลิตคู่.....	12
2.2 การลดทอนของรังสีแกมมา.....	16
2.3 สัมประสิทธิ์การลดทอน.....	17
2.4 Buildup factor.....	20
บทที่ 3 การทดลองและผลการทดลอง.....	23
3.1 แหล่งกำเนิดรังสี.....	24
3.2 ระบบหัววัดรังสีแกมมา.....	26
3.3 ซึ่ในงาน.....	26
3.4 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง.....	30
3.4.1 การหาขนาดลำรังสี.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4.2 การหาพิสัยของความหนาของเหล็ก.....	34
3.5 การทดลอง และการรวบรวมข้อมูล.....	36
3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	37
3.7 ผลการทดลอง.....	38
บทที่ 4 สรุปผล ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา.....	79
4.1 สรุปผลการตรวจหาโพรงในเหล็กโดยใช้รังสีแกมมา.....	79
4.2 ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนาต่อไป.....	88
เอกสารอ้างอิง.....	89
ภาคผนวก ก.....	91
ภาคผนวก ข.....	94
ภาคผนวก ค.....	105
ภาคผนวก ง.....	115
ประวัติผู้เขียน.....	117

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ขนาดของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ.....	27
3.2 ผลการวัดความเข้มรังสีแกมมาเพื่อหาขนาดของลำรังสี.....	33
3.3 พื้นที่ใต้พีค และ dead time ของระบบการวัดลำรังสีแกมมาเมื่อรังสีแกมมาทะลุผ่านแผ่นเหล็กที่มีความหนาต่าง ๆ กัน.....	35
3.4 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 1(การสแกนอย่างหยาบ) .....	39
3.5 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 1(การสแกนอย่างละเอียด) .....	40
3.6 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 1(การสแกนอย่างหยาบ) .....	41
3.7 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 1(การสแกนอย่างละเอียด) .....	42
3.8 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 1(การสแกนอย่างหยาบ) .....	43
3.9 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 1(การสแกนอย่างละเอียด) .....	44
3.10 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างหยาบ).....	45
3.11 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	46
3.12 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างหยาบ) .....	47
3.13 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	48
3.14 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างหยาบ) .....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.15 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	49
3.16 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างหยาบ) .....	51
3.17 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	52
3.18 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างหยาบ) .....	53
3.19 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	54
3.20 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างหยาบ) .....	55
3.21 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	56
3.22 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างหยาบ) .....	57
3.23 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	58
3.24 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	60
3.25 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	61
3.26 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างหยาบ) .....	62
3.27 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างละเอียด) .....	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า
3.28 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างหยาบ).....	65
3.29 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างละเอียด).....	66
3.30 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างหยาบ).....	67
3.31 ค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่ตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดบนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างละเอียด).....	68
4.1 ค่าความถูกต้องการตรวจสอบชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้น.....	82



# สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก.....	6
2.2 (ก) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสำหรับ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกและพลังงานของโฟตอนสำหรับ อะลูมิเนียม เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว.....	8
2.2 (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสำหรับ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก(ในรูปของ $\mu\sigma_{pe} / Z_n^5$ ) กับ $z$ ที่ค่า $n = \frac{m_0c^2}{hv}$ .....	8
2.3 การกระเจิงของอิเล็กตรอน และโฟตอนในปรากฏการณ์คอมป์ตัน.....	9
2.4 กระบวนการชนต่าง ๆ เนื่องจากรังสีแกมมาที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ในธาตุโซเดียมไอโอไดด์.....	11
2.5 การเกิดการผลิตคู่.....	12
2.6 ภาคตัดขวางของการผลิตคู่ของอะลูมิเนียม และตะกั่ว.....	13
2.7 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวม และอันตรกิริยาแต่ละชนิดของตะกั่วสำหรับ โฟตอนที่ค่าพลังงานต่าง ๆ.....	15
2.8 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และอะลูมิเนียม สำหรับโฟตอนที่ค่าพลังงานต่าง ๆ.....	15
2.9 รังสีแกมมาที่เป็นลำแคบ ๆ วิ่งทะลุแผ่นวัสดุไปยังหัววัดรังสี.....	16
2.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของรังสีที่ผ่านตัวกลางต่อรังสีที่ ก่อนตกกระทบตัวกลางกับความหนาของตัวกลาง.....	17
2.11 (ก) สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุที่ค่าพลังงานต่าง .....	19
2.11 (ข) สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของสสารที่ค่าพลังงานต่าง .....	19
2.12 การเกิด buildup factor.....	21
2.13 เปรียบเทียบ buildup factor ของเหล็กมีความหนาต่าง ๆ กันสำหรับรังสีแกมมา จากแหล่งกำเนิด $^{60}\text{Co}$ .....	21
3.1 แผนผังแสดงการจัดเครื่องมือสำหรับการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในวัสดุ.....	23
3.2 ภาพถ่ายชุดเครื่องมือสำหรับการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในวัสดุ.....	23
3.3 ไคอะแกรมการสลายตัวของซีเซียม-137.....	24
3.4 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากแหล่งกำเนิดรังสี $^{137}\text{Cs}$ .....	24
3.5 แผนภาพตัวบรรจุแหล่งกำเนิดรังสี.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.6 (ก) (ข) (ค) (ง) และ (จ) เป็นขนาดของโพรงที่ใช้ในการตรวจสอบในชิ้นงานที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ.....	28
3.7 ลักษณะของแผ่นเหล็กก่อนนำมาประกอบเป็นชิ้นงาน.....	29
3.8 ชิ้นงานที่ประกอบแล้วเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบ.....	29
3.9 फिल्मที่ได้จากการถ่ายภาพของชิ้นงานด้วยรังสี.....	29
3.10 ไคอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลอง.....	30
3.11 ไคอะแกรมแสดงลักษณะของเส้นแบ่งที่ใช้ในการหาขอบเขตของลำรังสี.....	32
3.12 แสดงการแบ่งพื้นที่บนแต่ละด้านของชิ้นงาน.....	36
3.13 สเปกตรัมของรังสีแกมมา และการลากเส้นแบคกราวด์เพื่อหาพื้นที่ใต้พีค.....	37
3.14 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหยาบบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 1.....	69
3.15 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ .....	70
3.16 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหยาบบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 2.....	71
3.17 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 2.....	72
3.18 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหยาบบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 3.....	73
3.19 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 3.....	74
3.20 เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหยาบบนด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 4.....	75
3.21 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 4.....	76
3.22 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหยาบบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 5.....	77

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
3.23 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 5.....	78
4.1 ลักษณะของโพรงที่ใช้ตรวจสอบ.....	81
4.2 (ก) (ข) และ(ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับโพรงจริงในด้านที่ 1, 2 และ 3 รูป (ง) ลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ ในชิ้นงานที่ 1.....	83
4.3 (ก) (ข) และ(ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับโพรงจริงในด้านที่ 1, 2 และ 3 รูป (ง) ลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ ในชิ้นงานที่ 2.....	84
4.4 (ก) (ข) และ(ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับโพรงจริงในด้านที่ 1, 2 และ 3 รูป (ง) ลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ ในชิ้นงานที่ 3.....	85
4.5 (ก) (ข) และ(ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับโพรงจริงในด้านที่ 1, 2 และ 3 รูป (ง) ลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ ในชิ้นงานที่ 4.....	86
4.6 (ก) (ข) และ(ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับโพรงจริงในด้านที่ 1, 2 และ 3 รูป (ง) ลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ ในชิ้นงานที่ 5.....	87

## รายการคำย่อและสัญลักษณ์

- $E_b$  = พลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน ( Binding energy )
- $h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck's Constant)
- $v$  = ความถี่
- $\sigma_{pe}$  = ภาคตัดขวางของการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric absorption cross section)
- $Z$  = มวลอะตอม
- $E$  = พลังงาน
- $r_0$  = Classical electron radius
- $\sigma_{pp}$  = ภาคตัดขวางของการผลิตคู่ (Pair production absorption cross section)
- $\sigma_c$  = ภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน (Compton scattering absorption cross section)
- $I$  = ความเข้มของรังสี
- $\mu$  = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น (Linear attenuation coefficient)
- $\mu_m$  = สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (Mass attenuation coefficient)
- $\sigma_A$  = ภาคตัดขวางรวม (Total atomic absorption cross section)
- $B$  = buildup factor
- MCA = เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer)
- Ge(Li) = หัววัดเจอร์มาเนียมลิเทียม (Germanium lithium detector)
- ADC = ตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter)

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของงานวิจัย

ปัจจุบันการทดสอบวัสดุด้วยเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย ได้เข้ามามีบทบาทในวงการอุตสาหกรรม แทนที่การตรวจสอบแบบดั้งเดิมซึ่งทำให้ชิ้นงานถูกทำลายไปในการตรวจสอบ หรือเมื่อทดสอบเสร็จก็อาจทำให้วัสดุหรือชิ้นงานนั้น ๆ เกิดความเสียหาย นักวิทยาศาสตร์จึงได้พยายามคิดค้นและเสาะหาแนวทางในการตรวจสอบวัสดุโดยไม่ทำลายชิ้นงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำความรู้ทางฟิสิกส์ รวมถึงปรากฏการณ์ทางฟิสิกส์เข้ามาใช้ เทคนิคที่นำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ได้แก่การตรวจสอบวัสดุด้วยรังสีแกมมา ซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง คืออยู่ระหว่าง  $10^{18}$  Hz -  $10^{22}$  Hz มีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงนิยมนำไปใช้ในการตรวจหาโพรง หรือรอยร้าวในโครงสร้างภายในของวัตถุที่มีมวลอะตอมสูง ๆ เช่น โลหะ ในการนำรังสีชนิดนี้ไปใช้ตรวจสอบชิ้นงาน อาศัยหลักการลดทอนของความเข้มรังสีแกมมาเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุ โดยมีหัววัดเจอร์มาเนียมลิเทียม (Ge(Li) Detector) เป็นตัวตรวจจับรังสีที่ผ่านออกมา

การตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลาย มีอยู่หลายวิธีด้วยกันได้แก่ การตรวจสอบด้วยสายตา การถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ (x-ray radiography) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก (ultrasonic waves) สนามแม่เหล็ก (magnetic field) กระแสไหลวน (eddy current) อคูสติก เทอร์โมกราฟ และไฮโดกราฟี นอกจากนี้วิธีดังกล่าวนี้ยังมีอีกหลายวิธีที่พิเศษจริง ๆ สำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย เช่น การทำลายล้างกันของโปรตอน (proton annihilation) [1] การกระเจิงของนิวตรอน (neutron scattering) การถ่ายภาพโดยใช้โปรตอน (proton radiography) การใช้ไมโครเวฟ และใช้เทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายหลายวิธีด้วยกันได้ถูกพัฒนามาถึงขั้นที่สามารถนำมาใช้ได้ โดยผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องมีความชำนาญมากนัก เพียงแต่สามารถทำตามคำสั่งที่ระบุไว้อย่างละเอียด ด้วยบทบาทของไมโครคอมพิวเตอร์ทำให้งานทางด้านนี้ง่ายขึ้นมาก วิธีการต่าง ๆ สามารถโปรแกรมไว้ได้อย่างละเอียดและมีการตรวจสอบความผิดพลาดจากการทดลองที่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นผู้ที่จะดำเนินการตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลายจึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องเข้าใจถึงหลักการทางฟิสิกส์ทั้งหมดที่ใช้ในการตรวจสอบ

การตรวจสอบแบบไม่ทำลายนั้นควรมีหลายรูปแบบเพื่อให้ผู้ใช้งานในวงการอุตสาหกรรมได้มีตัวเลือกเพื่อเลือกใช้ให้เหมาะสมกับชนิดของวัสดุที่ต้องการตรวจสอบ สภาพแวดล้อมและทำเลที่ตั้ง โดยทั่วไปการตรวจสอบผลิตภัณฑ์นั้นจะทำการตรวจสอบโดย 2 วิธี หรือมากกว่า [1] เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นในผลิตภัณฑ์ที่ทำการตรวจสอบการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย

ที่สำคัญ ๆ ที่นิยมใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ในปัจจุบันมี 3 วิธี คือ การถ่ายภาพด้วยรังสีโดยตรง การถ่ายภาพด้วยรังสีโดยอ้อม และการใช้คลื่นอัลตราโซนิก [1]

รังสีที่นิยมใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสีได้แก่ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และลำนิวตรอน [1] เนื่องจากรังสีเอกซ์ และรังสีแกมมา (เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูง) และลำนิวตรอน (เป็นอนุภาคที่ไม่มีประจุไฟฟ้า) มีอำนาจทะลุทะลวงสูง จึงนิยมนำไปใช้ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายหาโพรง หรือโครงสร้างภายในของวัตถุที่มีมวลอะตอมสูง ๆ เช่น โลหะ ในการถ่ายภาพโดยตรงนั้นจะให้รังสีจากแหล่งกำเนิดรังสี (source) ผ่านวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ แล้วตกกระทบกับฟิล์มทำให้เกิดรอยดำบนฟิล์ม โดยความดำของฟิล์มจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณรังสีที่ตกกระทบ ส่วนการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยอ้อมนั้น มีหลักการคล้ายคลึงกันกับการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยตรง ต่างกันตรงที่รังสีที่ผ่านวัสดุหรือชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบออกมาจะถูกแปลงให้เป็นแสงโดยมีความเข้มแปรตามค่าความเข้มของรังสี

สำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกนั้นเป็นการตรวจสอบโดยใช้คลื่นเสียงที่มีความถี่สูง ซึ่งมีหัวตรวจสอบ (probe) ทำหน้าที่ปล่อย และรับคลื่นเสียง (ที่นิยมใช้ในช่วง 1-15 MHz) คลื่นเสียงที่ถูกส่งเข้าไปในชิ้นงานเมื่อตกกระทบโพรงหรือรอยร้าวจะสะท้อนกลับมายังหัวตรวจสอบ จากเวลาที่ใช้ในการวิ่งไปกลับของคลื่นเสียงสามารถใช้วิเคราะห์หาตำแหน่งโพรง หรือรอยร้าวได้

จากการตรวจสอบแบบไม่ทำลายหลาย ๆ เทคนิคที่กล่าวมาแล้ว แต่ละเทคนิคนั้นสามารถตรวจสอบหาข้อบกพร่องในวัสดุได้ต่างกัน การเลือกเทคนิคการตรวจสอบแบบไม่ทำลายให้เหมาะสมกับชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ ผู้ทำการตรวจสอบควรจะต้องทราบถึงข้อจำกัด ข้อดี และข้อเสีย ของแต่ละเทคนิคของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วย ในที่นี้สามารถจำแนกข้อดีข้อเสีย และข้อจำกัดของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายแบบต่าง ๆ ที่มีอยู่ทั้งหมด(ทั้งนิยมใช้และไม่นิยมใช้) เป็นข้อ ๆ ดังนี้

1. การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิก สามารถตรวจสอบได้กับวัสดุทั้งที่เป็นโลหะ และอโลหะ สามารถตรวจสอบได้กับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมาก ๆ ได้ แต่ชิ้นงานที่หนาน้อย ๆ จะตรวจสอบได้ยาก สามารถตรวจสอบวัสดุที่มีรอยแตกเป็นแผ่นได้ดี การตรวจสอบโดยใช้คลื่นอัลตราโซนิกนี้ไม่เหมาะกับการตรวจสอบวัสดุที่เป็นฉนวนที่มีอุณหภูมิสูง ๆ ในการตรวจสอบนี้จะทำได้ดีจำเป็นต้องเลือกให้การสะท้อนของคลื่นนั้นตั้งฉากกับระนาบของรอยแตกของวัสดุ อีกทั้งในการตรวจสอบผู้ตรวจสอบต้องมีความชำนาญสูง การวิเคราะห์ผลยาก และอุปกรณ์เครื่องมือมีราคาแพง

2. การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้กระแสไหลวน สามารถตรวจสอบได้ในชิ้นงานที่เป็นตัวนำ และชิ้นบาง ๆ หรือเล็ก ๆ เท่านั้น และหาข้อบกพร่องได้ที่บริเวณผิวและใต้ผิวเล็กน้อยได้ แต่ถ้าข้อบกพร่องที่อยู่ลึกมาก ๆ จะไม่สามารถตรวจสอบด้วยวิธีนี้ได้

3. การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้สนามแม่เหล็ก ทำการทดสอบได้เฉพาะกับชิ้นงานที่เป็นสารแม่เหล็กชนิด ferromagnetic และสามารถตรวจสอบหาข้อบกพร่องที่มีอยู่บริเวณผิวของชิ้นงานหรือใกล้ ๆ ผิวของชิ้นงานเท่านั้น

4. การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้ไมโครเวฟ ใช้ทดสอบได้กับชิ้นงานที่เป็นฉนวนเท่านั้น (dielectric) และสามารถตรวจสอบกับชิ้นงานที่มีความร้อนสูงได้ดี [1]

5. การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้รังสี ในการถ่ายภาพด้วยรังสี ภาพที่ได้จากการถ่ายภาพนั้นสามารถเก็บข้อมูลไว้ได้ และเป็นประโยชน์ต่อการบำรุงรักษา แต่ภาพที่ได้จากการถ่ายภาพด้วยรังสีนั้นจะเกิดเงาทำให้ยากต่อการวิเคราะห์ขอบเขตของรอยร้าว อีกทั้งตรวจสอบได้ยากสำหรับรอยร้าวภายในวัสดุที่มีความหนาแน่นมาก ๆ

จากวิวัฒนาการของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายเท่าที่ผ่านมาในอดีตจนถึงปัจจุบัน และจากข้อดีและข้อเสียของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายหลาย ๆ วิธีที่กล่าวมาแล้วก็ตาม และเมื่อมุ่งความสนใจไปที่การตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้รังสีนั้นมีเพียงแต่การถ่ายภาพด้วยรังสีเท่านั้น ยังไม่มีการตรวจสอบหารอยร้าวแบบไม่ทำลายโดยใช้รังสีแกมมาสแกนไปบนชิ้นส่วนที่ต้องการตรวจสอบซึ่งเป็นวิธีการตรวจสอบแบบไม่ทำลายที่น่าสนใจอีกวิธีหนึ่ง ที่ช่วยให้การตรวจสอบแบบไม่ทำลายครอบคลุมมากขึ้นและลดความบกพร่องจากการตรวจสอบแบบอื่นได้ สามารถตรวจสอบได้กับชิ้นงานที่มีความหนาแน่นมาก และให้ผลที่ละเอียดแม่นยำดีกว่าการถ่ายภาพด้วยรังสี ในการตรวจสอบชิ้นงานในงานวิจัยนี้เราจะใช้รังสีแกมมาสแกนไปบนชิ้นงาน และวิเคราะห์หาความหนาของแต่ละส่วนของชิ้นงานจากปริมาณรังสีที่ผ่านชิ้นวัสดุออกมา จากการศึกษาในขั้นต้นพบว่าความเข้มของรังสีไม่มากนักก็สามารถตรวจสอบกับโลหะที่หนาแน่นมาก ๆ ได้ และได้ดีกว่าการถ่ายภาพด้วยรังสี อีกทั้งยังง่ายสำหรับการวิเคราะห์หาข้อบกพร่องในวัสดุ และไม่มีปัญหาในด้านความปลอดภัยสำหรับผู้ทำกรวิจัย เนื่องจากสามารถควบคุมรังสีแกมมาให้อยู่ในทิศทางที่ต้องการได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาและหาวิธีการที่เหมาะสมในการใช้รังสีแกมมาสำหรับตรวจหาโพรง ภายในโลหะ และองค์ประกอบที่มีผลต่อการตรวจสอบชิ้นงาน
2. ศึกษาขีดความสามารถในการใช้รังสีแกมมาสำหรับตรวจหาขนาดของโพรงหรือรอยร้าวในโลหะ

### 1.3 ขอบเขตและเนื้อหาของงานวิจัย

เพื่อหาเทคนิคหรือวิธีการที่เหมาะสมสำหรับใช้ตรวจสอบหาโพรงในโลหะโดยเลือกเหล็กเป็นสารตัวอย่าง เพื่อศึกษาถึงขีดความสามารถของการใช้รังสีแกมมาในการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็กโดยใช้  $^{137}\text{Cs}$  ซึ่งมีความแรง 100 mCi เป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่มีพลังงาน 0.662 Mev

### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เรียนรู้ถึงเทคนิคการใช้รังสีแกมมาตรวจสอบหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็ก
2. สามารถนำไปเป็นพื้นฐานสำหรับการตรวจสอบโพรงหรือรอยร้าวในโลหะชนิดอื่น ๆ
3. นำไปประยุกต์ใช้ในงานอุตสาหกรรม

### 1.5 ประวัติความเป็นมาของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้รังสี

ในปี ค.ศ.1895 เริ่มมีการตรวจสอบวัสดุแบบไม่ทำลายโดยใช้รังสีเอกซ์ [2] และในปี ค.ศ. 1896 ได้ถูกนำไปใช้ในการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ในโรงงานอุตสาหกรรม โดยเทคนิคของการตรวจสอบแบบไม่ทำลายในสมัยนั้นเป็นการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ จากนั้นก็มีการพัฒนาจนสามารถใช้รังสีแกมมาช่วยในการถ่ายภาพด้วยรังสีได้เช่นเดียวกันกับรังสีเอกซ์เนื่องจากรังสีทั้งสองนั้นเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีสมบัติคล้ายคลึงกัน จากนั้นก็มีการศึกษาโดยใช้อนุภาคนิวตรอนและโปรตอนช่วยในการถ่ายภาพ ซึ่งภาพที่ถ่ายโดยนิวตรอนและโปรตอนนี้จะให้ความชัดเจนมากเช่นกัน และได้มีการพัฒนาต่อมาเรื่อย ๆ จนถึงปัจจุบันได้มีการพัฒนาในส่วนแสดงผลการตรวจสอบให้เป็นปัจจุบันมากขึ้นเรียกว่า real-time radiography (RTR) โดยแบบ RTR และการถ่ายภาพด้วยรังสีจะมีลักษณะการตรวจสอบใกล้เคียงกัน แต่จะแตกต่างกันในส่วนของตัวเองคือแบบ RTR จะใช้หัววัดรังสีไปช่วยในการสร้างภาพที่ได้จากการตรวจสอบแทนฟิล์ม ส่วนงานวิจัยนี้จะเป็นการตรวจสอบโดยใช้รังสีแกมมาที่ไม่ใช้วิธีการถ่ายภาพ แต่จะเป็นการตรวจหาโพรงภายในวัสดุโดยการแปลค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านวัสดุออกมา ซึ่งยังไม่มีผลงานตีพิมพ์เผยแพร่มาก่อน

## 1.6 วิธีดำเนินงาน การทำวิทยานิพนธ์

แผนการดำเนินงาน แบ่งเป็นขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

**ขั้นตอนที่ 1.** ศึกษาข้อมูลต่าง ๆ เกี่ยวกับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยศึกษาถึงทฤษฎีพื้นฐานที่เกี่ยวข้อง องค์ประกอบต่าง ๆ ที่มีผลต่อการตรวจสอบ เทคนิคการวิเคราะห์ผล หลักการออกแบบเครื่องมือสำหรับการตรวจสอบแบบไม่ทำลาย โดยใช้รังสีแกมมา

**ขั้นตอนที่ 2.** ออกแบบ และสร้างอุปกรณ์ประกอบการตรวจสอบซึ่งประกอบด้วย ตัวบรรจุกัมมันตรังสี ชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบ ชุดเลเซอร์ และอุปกรณ์อื่น ๆ

**ขั้นตอนที่ 3.** ศึกษาการทำงานของหัววัดรังสี อุปกรณ์เครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ และซอฟต์แวร์ของเครื่องวัดรังสีชนิดหลายช่อง (Multichannel Analyzer) จักระบบการวัด และทดสอบประสิทธิภาพของการวัด

**ขั้นตอนที่ 4.** ทำการทดลองหาองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการตรวจสอบได้แก่ ตำแหน่งของลำรังสี ขนาดลำรังสีแกมมา พิสัยของเหล็กที่จะนำมาใช้ในการทดลอง

**ขั้นตอนที่ 5.** ทดลองหาโพรงและรอยร้าวในชิ้นงานที่สร้างขึ้นเพื่อนำมาเปรียบเทียบกับขนาดโพรงจริงเพื่อหาความน่าเชื่อถือ ว่าเทคนิคการทดสอบที่ใช้มีความถูกต้องน่าเชื่อถือเพียงใด

**ขั้นตอนที่ 6.** ปรับปรุงแก้ไข ข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่พบ

**ขั้นตอนที่ 7.** สรุปผล และเสนอแนะแนวทางในการพัฒนาต่อไปในอนาคต

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 อันตรกิริยาของรังสีแกมมากับสสาร

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเมื่อตกกระทบสสารจะเกิดอันตรกิริยาดังกัน 3 อย่าง คือ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก (photoelectric effect) การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และการผลิตคู่ (pair production) ในทุกขบวนการที่เกิดขึ้นนี้โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานบางส่วนหรือทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอน

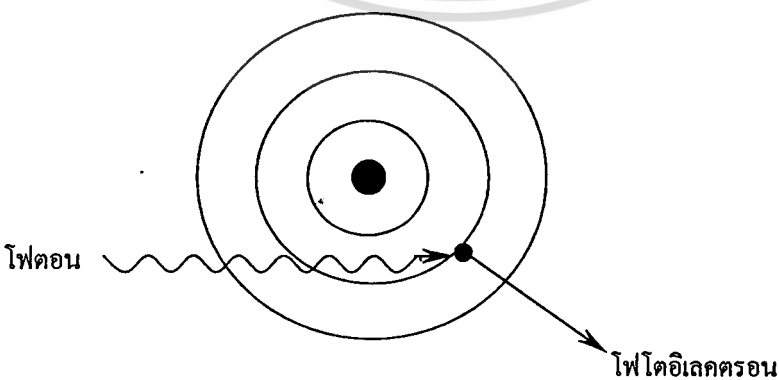
##### 2.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก เป็นปรากฏการณ์ที่โฟตอนซึ่งมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยว ( $E_b$ ; binding energy) [2] ของอิเล็กตรอนในอะตอมวิ่งเข้าชนอิเล็กตรอนในอะตอม และถ่ายเทพลังงานทั้งหมดให้กับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากอะตอม เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดจากอะตอมว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 และมีพลังงานเท่ากับ

$$E_e = h\nu - E_b \dots\dots\dots(2.1)$$

เมื่อ

- $h$  เป็นค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.6 \times 10^{-34}$  J.s
- $\nu$  เป็นความถี่ของโฟตอน
- $E_e$  เป็นพลังงานของอิเล็กตรอน



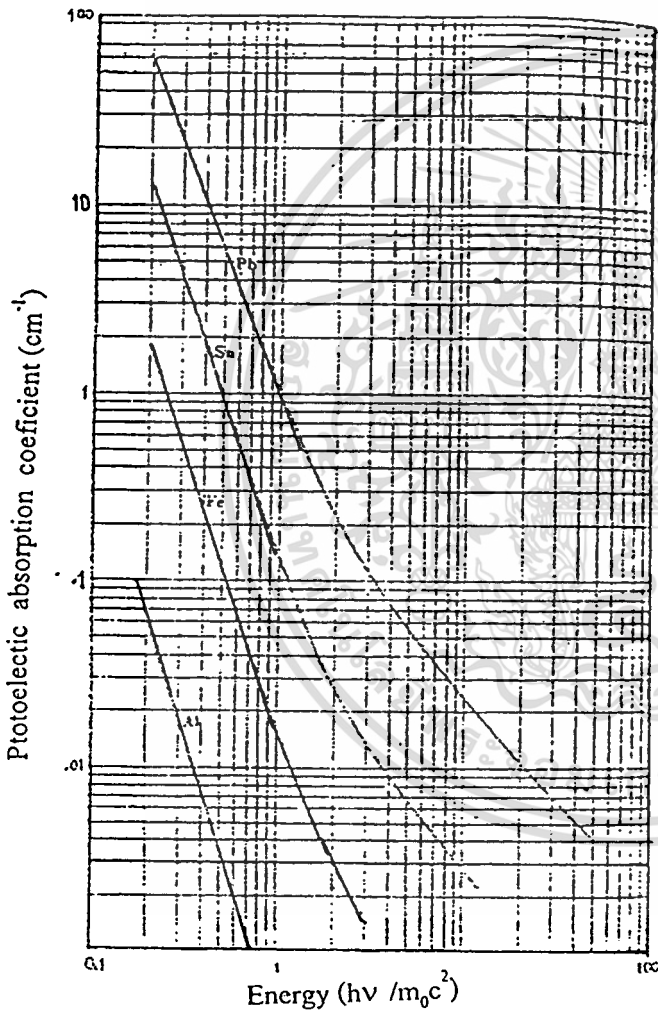
รูปที่ 2.1 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก

ในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนี้พลังงานเนื่องจากการเคลื่อนถอยหลัง (recoil energy) ของนิวเคลียสมีค่าน้อยมาก (เนื่องจากนิวเคลียสมีมวลมาก) จึงไม่น่ามาคิด สำหรับโฟตอนที่พลังงานสูงโฟโตอิเล็กตรอนจะถูกทำให้เคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับทิศทางของโฟตอนที่ตกกระทบ แต่สำหรับโฟตอนที่พลังงานต่ำทิศทางของโฟโตอิเล็กตรอนส่วนมากจะอยู่ในแนวตั้งฉากกับทิศทางของโฟตอนที่ตกกระทบ ภาคตัดขวางของการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริก ( $\sigma_{pe}$  ; photoelectric absorption cross section) จะแปรตาม  $E^{-n}$  เมื่อ  $E$  คือค่าพลังงานของรังสีแกมมาโดย  $n \sim 3$  เมื่อพลังงานของรังสีแกมมาน้อยกว่า 150 keV และ  $n$  จะเป็น 1 สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 5 MeV [2] และภาคตัดขวางของการดูดกลืนโฟโตอิเล็กทริกยังขึ้นอยู่กับ  $z^m$  เมื่อ  $z$  คือเลขอะตอม และ  $m$  จะมีค่าตั้งแต่ 4 ถึง 4.6 ซึ่งมีค่าเป็น 4 เมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าเป็น 100 keV และ  $m$  มีค่าเป็น 4.6 เมื่อพลังงานของรังสีแกมมามีค่าประมาณ 3 MeV ภาคตัดขวางของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเขียนได้เป็น [3]

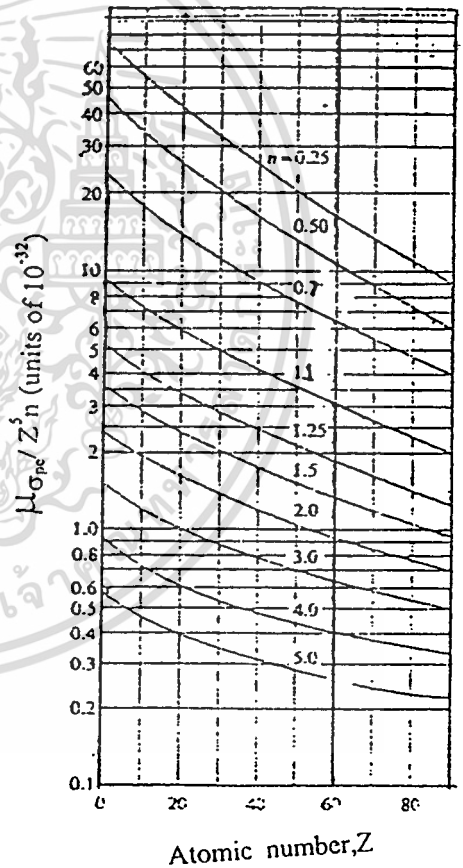
$$\sigma_{pe}(E) \propto \frac{Z^m}{E^n} \dots\dots\dots(2.2)$$

จากสมการ 2.2 จะเห็นได้ว่าโอกาสการเกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเล็กทริกจะมีค่ามาก เมื่อเลขอะตอมของวัสดุมีค่าสูง และพลังงานของโฟตอนที่ชนมีค่าไม่มากนัก ( $< 1$  MeV) หลังจากรังสีแกมมาชนกับอิเล็กตรอนแล้วอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอกจะเข้าไปแทนที่ตำแหน่งที่ว่างนั้น พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอกซ์ลักษณะจำเพาะ (characteristic x-rays) ซึ่งมีพลังงานต่ำมากเมื่อเทียบกับรังสีแกมมาส่วนใหญ่ เอกซ์เรย์โฟตอนนี้จะทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกหลุดออกไปอีกเรียกอิเล็กตรอนนี้ว่า โอเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electron) และทำให้อิเล็กซ์เรย์โฟตอนสูญเสียพลังงานไปทั้งหมด

เมื่อรังสีแกมมาวิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุบางส่วนของรังสีจะถูกดูดกลืนโดยอันตรกิริยาต่างๆ (ถ้าวัสดุต่างชนิดกันจะมีความสามารถในการดูดกลืนพลังงานโดยอันตรกิริยาต่าง ๆ แตกต่างกัน) ความสามารถของสสารในการดูดกลืนพลังงานด้วยปรากฏการณ์ต่าง ๆ นี้เรียกว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (ดูหัวข้อ 2.3) และสัมประสิทธิ์การดูดกลืนเนื่องจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกสำหรับวัสดุชนิดต่าง ๆ ที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ของโฟตอนและค่าเลขอะตอมของสสาร แสดงอยู่ในรูป 2.2 (ก) และรูป 2.2 (ข) นั้นแสดงความสัมพันธ์ของภาคตัดขวางของปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับเลขอะตอมที่ค่าต่าง ๆ



(ก)



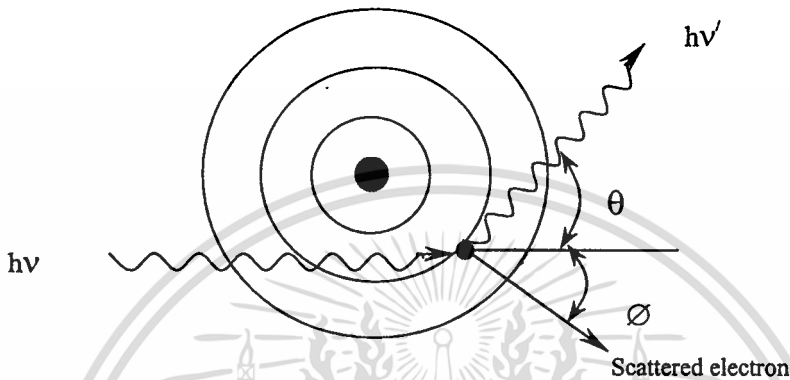
(ข)

รูปที่ 2.2 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสำหรับปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริกและพลังงานของโฟตอนสำหรับอะลูมิเนียม เหล็ก ดีบุก ตะกั่ว  
(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างภาคตัดขวางของโฟโตอิเล็กตริกในรูปของ  $\mu_{\sigma_{pe}} / Z^n$  กับ  $Z$  เมื่อ  $n = m_0c^2 / h\nu$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้ว่าหนังสือหรือใช้ในงานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.2 การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน

ในการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน โฟตอนที่วิ่งเข้าชนมีพลังงานมากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวอยู่มาก จึงถือได้ว่าเป็นการชนของโฟตอนกับอิเล็กตรอนอิสระ ในการชนแบบนี้โฟตอนไม่ได้สูญเสียพลังงานไปทั้งหมด โฟตอนจะสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งให้กับอิเล็กตรอน แล้วกระเจิงไปดังแสดงในรูป 2.3



รูปที่ 2.3 การกระเจิงของอิเล็กตรอนและโฟตอนในปรากฏการณ์คอมพ์ตัน

เมื่อโฟตอนที่มีพลังงาน  $h\nu$  วิ่งเข้าชนอิเล็กตรอน ซึ่งถือว่าหยุดนิ่ง และมีมวลเป็น  $m_0$  ภายหลังการชน โฟตอนกระเจิงออกมาด้วยพลังงาน  $h\nu'$  ทำมุม  $\theta$  กับทิศที่โฟตอนตกกระทบ ส่วนอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ ทำมุม  $\phi$  กับทิศที่โฟตอนตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของพลังงานของโฟตอนที่ถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนกับมุมที่เบนไปเป็นดังนี้ [5]

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_0 c^2} (1 - \cos \theta)} \quad \dots\dots (2.3)$$

เมื่อ  $m_0 c^2$  คือ พลังงานของอิเล็กตรอนขณะหยุดนิ่ง ( มีค่าเป็น 0.511 MeV) จากสมการที่ 2.3 จะเห็นว่าถ้า  $\theta$  มีค่าน้อย ๆ พลังงานที่โฟตอนถ่ายเทให้กับอิเล็กตรอนก็จะมีค่าน้อย

ค่าความน่าจะเป็นของการกระเจิงแบบคอมพ์ตันต่ออะตอมของตัวกลางจะขึ้นอยู่กับจำนวนอิเล็กตรอนที่จะเป็นเป้าสำหรับการชนหรือนั่นก็คือมีค่าเพิ่มขึ้นเชิงเส้นตามค่า  $Z$  ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งเป็นการกระเจิงแบบคอมพ์ตันที่เกิดขึ้นในธาตุโซเดียมไอโอไดด์

คิฟเฟอร์เรนเซียลภาคตัดขวางของการกระเจิงแบบคอมพ์ตันต่อหน่วยมอดันสำหรับโฟตอนที่กระเจิงไปเป็นมุม  $\theta$  มีค่าเป็น [5]

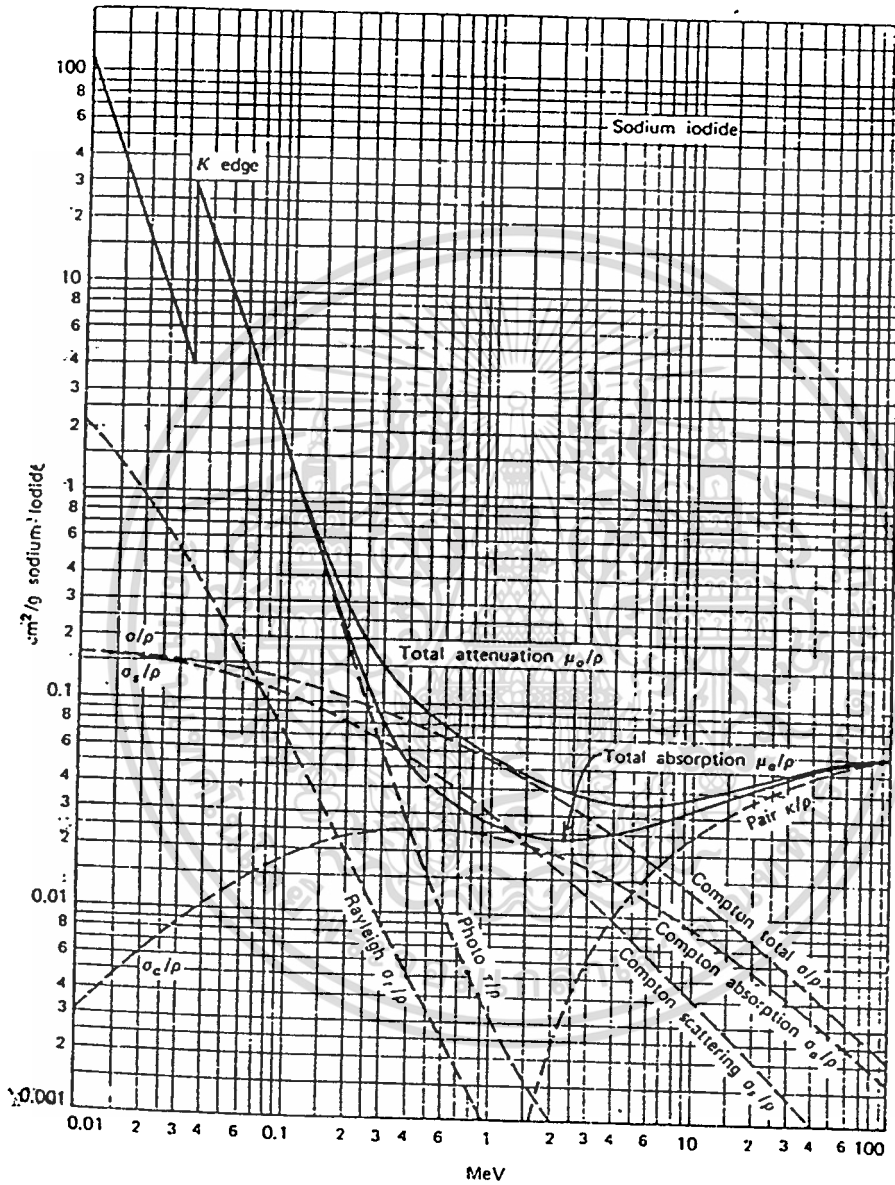
$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = Zr_0^2 \left( \frac{1}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \right)^2 \left( \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \right) \left( 1 + \frac{\alpha^2(1 - \cos \theta)^2}{(1 + \cos^2 \theta)[1 + \alpha(1 - \cos \theta)]} \right)$$

..... (2.4)

เมื่อ  $\alpha \equiv hv/m_0c^2$  และ  $r_0$  คือ classical electron radius

ข้อแตกต่างที่พึงสังเกตได้ระหว่างปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และการกระเจิงแบบคอมป์ตัน คือปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนั้น โฟตอนจะถูกดูดกลืนโดยสิ้นเชิง แต่การกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้น โฟตอนจะสูญเสียพลังงานไปเพียงบางส่วน โดยพลังงานที่ลดลงนี้จะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับพลังงานก่อนชน และมุมที่กระเจิงไปของโฟตอน สำหรับการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้น โฟตอนที่กระเจิงไปจะมีพลังงานลดลง และเคลื่อนที่ไปในทิศทางต่างๆ โฟตอนเหล่านี้สามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์คอมป์ตันต่อไปได้อีก ถ้าวัสดุที่มีความหนาแน่นเพียงพอที่จะเกิด การกระเจิงหลายครั้ง (multiple scattering) และถ้าโฟตอนที่กระเจิงไปนี้ไม่หลุดจากวัสดุ พลังงานของโฟตอนที่หักเหนี้จะหมดไปด้วยปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก และจะมีโอกาสมากขึ้น เมื่อพลังงานของโฟตอนลดน้อยลง





รูปที่ 2.4 กระบวนการชนต่าง ๆ เนื่องจากรังสีแกมมาที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ในธาตุโซเดียมไอโอไดค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.3 การผลิตคู่

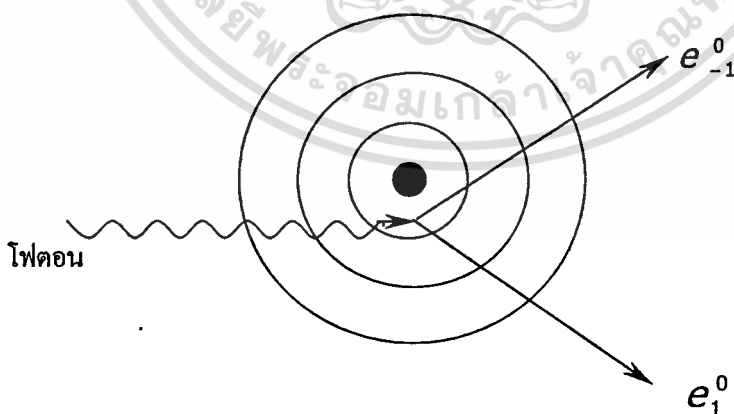
เมื่อโฟตอนของรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับ 1.02 Mev วิ่งเข้าไปใกล้นิวเคลียสของอะตอม โฟตอนจะถูกสนามไฟฟ้าความเข้มสูงของนิวเคลียสทำลายให้หายไปพร้อมกับเกิดอิเล็กตรอนและโพสิตรอนขึ้นคู่หนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 จากกฎการคงตัวของพลังงาน พลังงานของโฟตอน ( $h\nu$ ) ต้องมีค่า

$$h\nu = 2 m_0 c^2 + E_+ + E_- + E_N \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

เมื่อ  $E_+$ ,  $E_-$  และ  $E_N$  เป็นพลังงานจลน์ของโพสิตรอน อิเล็กตรอน และนิวเคลียส ตามลำดับ เนื่องจากนิวเคลียสมีมวลมาก(จะเคลื่อนที่น้อยมากเมื่อโฟตอนวิ่งเข้าไปใกล้)ค่าพลังงานจลน์ของนิวเคลียส ( $E_N$ ) จึงมีค่าน้อยมากจนไม่จำเป็นต้องนำมาคิด ฉะนั้นสมการ 2.5 จึงเขียนได้เป็น

$$h\nu = 2 m_0 c^2 + E_+ + E_- \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

โพสิตรอนและอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นนี้มีพลังงานจลน์สูงก็จะเกิดการชนกับอิเล็กตรอนที่อยู่ใกล้ ๆ และมีพลังงานจลน์ลดลง ในที่สุดก็จะเกิดการรวมตัวกันเองหรือกับคู่อิเล็กตรอนอื่นที่อยู่ใกล้ กลายเป็นโฟตอน 2 ตัว (annihilation radiation) โดยพลังงานของโฟตอนแต่ละตัวมีค่า 0.51 Mev หรือครึ่งหนึ่งของพลังงานหยุดนิ่งของอนุภาคทั้งสอง อย่างไรก็ตามโฟตอนเหล่านี้มีพลังงานต่ำและกระจัดกระจายออกไปทุกทิศทุกทาง ทำให้ปริมาณรังสีที่พุ่งต่อไปข้างหน้าลดลง

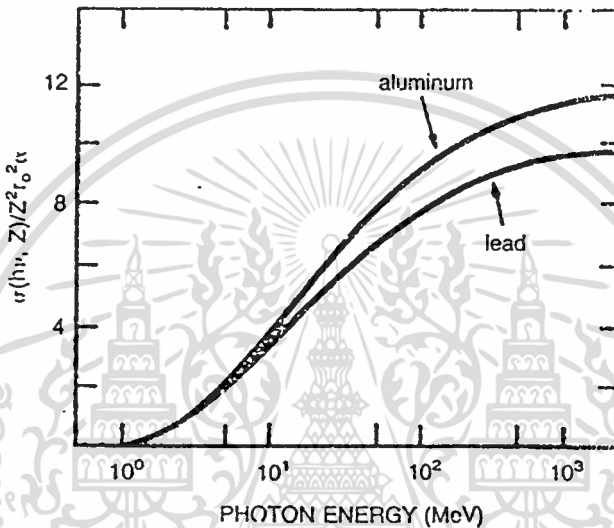


รูปที่ 2.5 การเกิดการผลิตคู่

ค่าภาคตัดขวางของการผลิตคู่  $\sigma_{pp}$  มีค่าเป็น [3]

$$\sigma_{pp} = z^2 r_0^2 \alpha h$$

ค่า  $\sigma_{pp}$  ของอะลูมิเนียม และตะกั่วแสดงอยู่ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาคตัดขวางของการผลิตคู่ของอะลูมิเนียม และตะกั่ว

เมื่อโฟตอนมีพลังงานน้อยกว่า 1.02 Mev ค่าภาคตัดขวางของการผลิตคู่จะมีค่าเป็นศูนย์ เมื่อพลังงานเพิ่มขึ้นค่าภาคตัดขวาง  $(h\nu, z)$  จะเพิ่มอย่างรวดเร็ว ก็จะแปรตามค่า  $z^2$  ดังปรากฏในสมการ 2.9 นั่นเอง

จากอันตรกิริยาทั้งสามที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น สามารถเปรียบเทียบสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีแกมมาของทั้ง 3 ปฏิกริยาได้ว่า เมื่อโฟตอนมีพลังงานสูงขึ้นภาคตัดขวางของขบวนการการผลิตคู่จะสูงขึ้น แต่ขบวนการอื่น ๆ คือ ทั้งโฟโตอิเล็กทริกและการกระเจิงแบบคอมพ์ตันจะลดลง ดังแสดงตามสมการของภาคตัดขวางทั้ง 3 ปฏิกริยาเป็นดังนี้

$$\sigma_{pe} \propto \frac{z^4}{(h\nu)^3}$$

..... 2.7

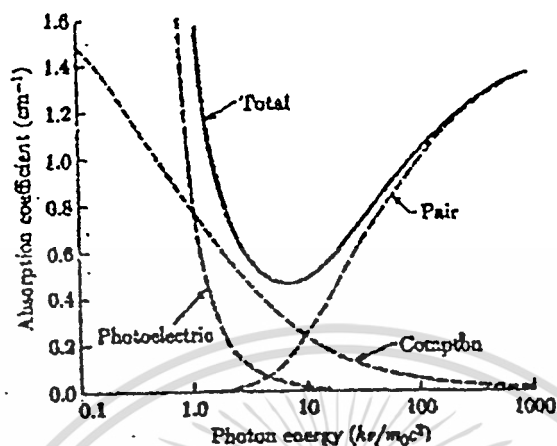
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\sigma_c \propto \frac{z}{(hv)} \quad \dots\dots\dots 2.8$$

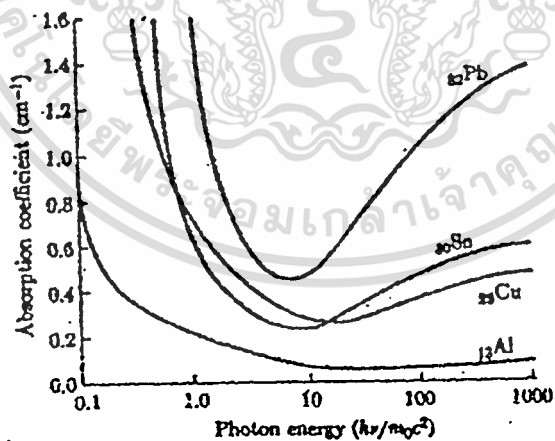
$$\sigma_{pp} \propto z^2(hv - 1.02) \quad \dots\dots\dots 2.9$$

ตัวอย่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวม และอันตรกิริยาต่าง ๆ ของตะกั่วสำหรับโฟตอนที่ค่าพลังงานต่าง ๆ แสดงในรูป 2.7 และรูป 2.8 เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมของธาตุต่าง ๆ ของโฟตอนที่ค่าพลังงานต่าง ๆ





รูปที่ 2.7 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวม และอันตรกิริยาแต่ละชนิดของตะกั่วสำหรับโฟตอนที่มีค่าพลังงานต่าง ๆ

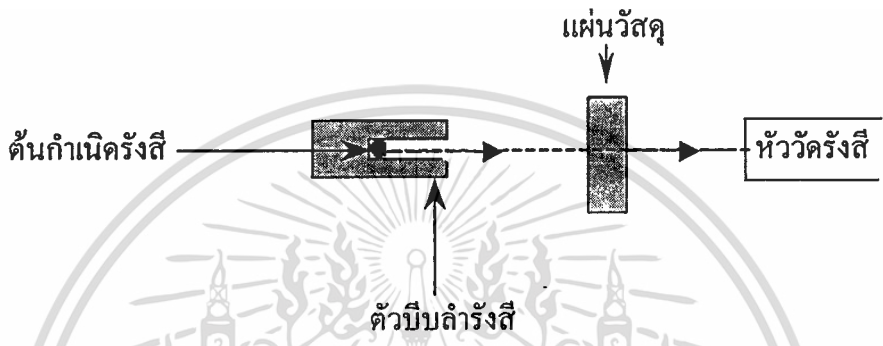


รูปที่ 2.8 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนรวมของตะกั่ว สังกะสี ทองแดง และอะลูมิเนียมสำหรับโฟตอนที่มีค่าพลังงานต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2 การลดทอนของรังสีแกมมา

เมื่อรังสีแกมมาวิ่งผ่านเข้าไปในสสารรังสีส่วนหนึ่งจะเกิดอันตรกิริยาต่าง ๆ กับสสารดังกล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 ความเข้มของรังสีแกมมาที่ผ่านสสารออกมาจะลดทอนลงขึ้นกับความหนาและชนิดของสสารที่รังสีแกมมาทะลุผ่าน และขึ้นกับพลังงานหรือความถี่ของรังสีแกมมานั้น



รูปที่ 2.9 รังสีแกมมาที่เป็นลำวิ่งทะลุแผ่นวัสดุไปยังหัววัดรังสี

ถ้าพิจารณารังสีแกมมาพลังงานเดี่ยว (monoenergetic gamma-ray) ซึ่งถูกบีบให้เป็นลำแคบ ๆ วิ่งผ่านตัวกลางดังแสดงในรูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ของความเข้มของรังสีแกมมาก่อนผ่านตัวกลาง ( $I_0$ ) และหลังผ่านตัวกลาง ( $I$ ) เป็นดังนี้

$$I = I_0 e^{-\mu x} \dots\dots\dots(2.10)$$

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล  $\mu_m$  และสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น  $\mu$  สัมพันธ์กันโดย

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho}$$

เมื่อใช้ความสัมพันธ์นี้แทนลงในสมการ 2.10 จะได้

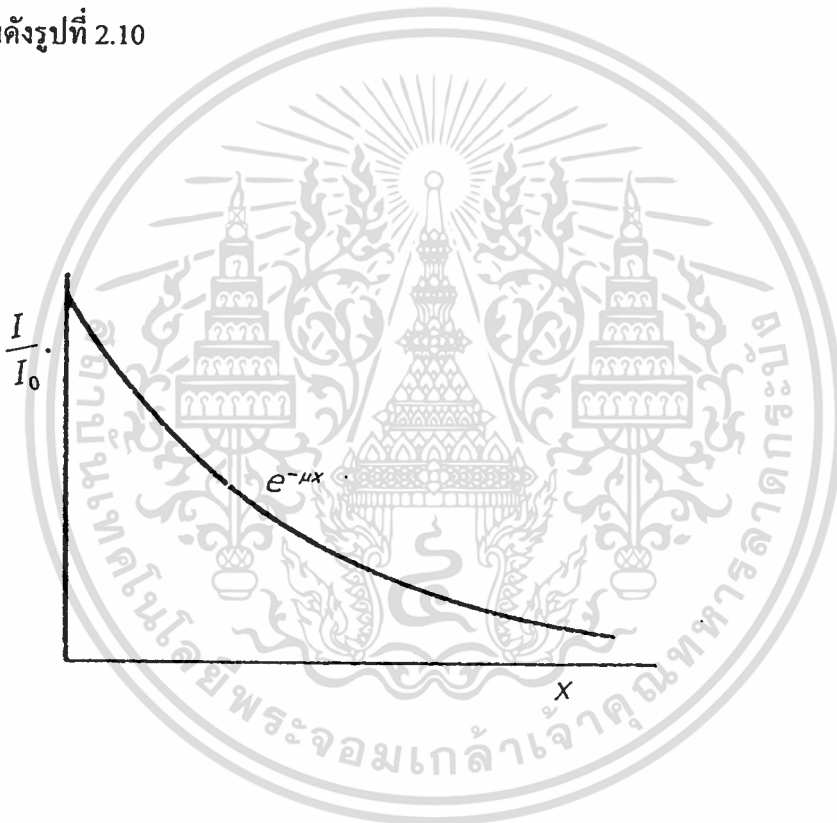
$$I = I_0 e^{-\mu_m \rho x} \dots\dots\dots(2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ

- $\mu$  เป็นสัมประสิทธิ์ลดทอนเชิงเส้น (linear attenuation coefficient) สำหรับรังสีแกมมาพลังงาน  $E$  ในตัวกลาง  $Z$  มีหน่วยเป็น  $\text{cm}^{-1}$
- $\mu_m$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวล (mass attenuation coefficient) มีหน่วยเป็น  $(\text{cm}^2/\text{g})$
- $\rho$  ความหนาแน่นต่อหน่วยปริมาตรของสสาร มีหน่วยเป็น  $(\text{g}/\text{cm}^3)$
- $x$  เป็นความหนาของแผ่นวัสดุ มีหน่วยเป็น  $(\text{cm})$

ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนรังสีที่ผ่านตัวกลางต่อรังสีที่ก่อนตกกระทบตัวกลางกับความหนาของตัวกลางเป็นดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ความสัมพันธ์ของอัตราส่วนของรังสีที่ผ่านตัวกลางต่อรังสีก่อนตกกระทบตัวกลางกับความหนาของตัวกลาง

### 2.3 สัมประสิทธิ์การลดทอน

สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นรวมสัมพันธ์กับภาคตัดขวางรวมของการดูดกลืน (total atomic absorption cross section),  $\sigma_A$  ดังนี้ [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับ  $\mu = N_A \sigma_A$  การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้แก้ไขโดยไม่ได้รับอนุญาต (2.12) การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

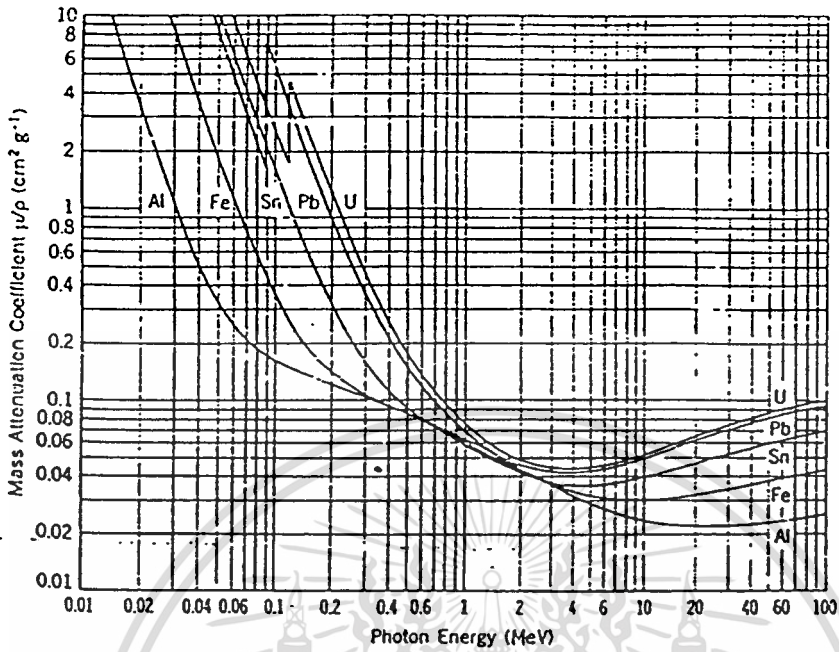
สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นรวม (total attenuation coefficient) ของวัสดุมีค่าเป็น

$$\mu = \mu_c + \mu_{pe} + \mu_{pp} \quad \dots\dots\dots(2.13)$$

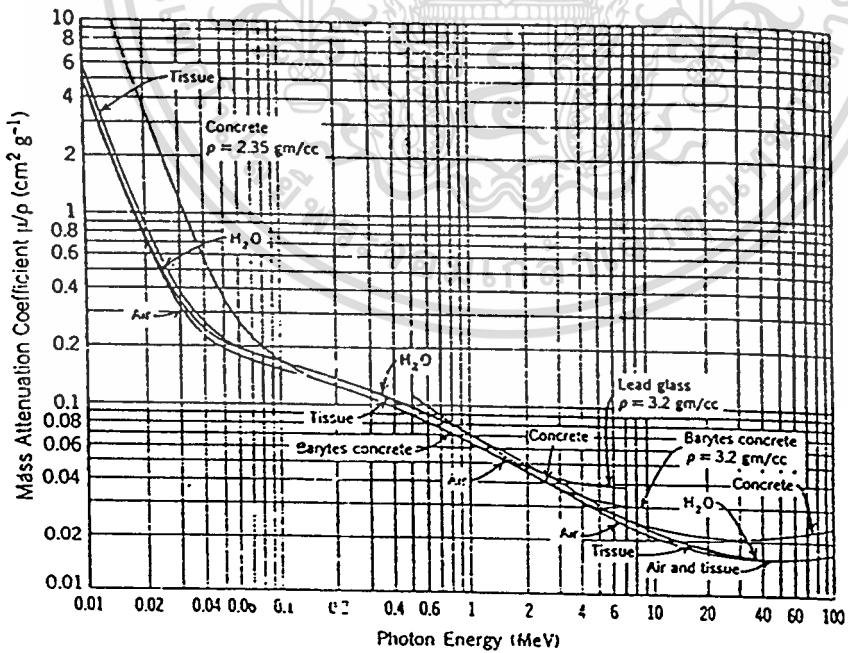
- เมื่อ  $\mu_c$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเนื่องจากการกระเจิงแบบคอมพ์ตัน  
 $\mu_{pe}$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเนื่องจากการปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก  
 $\mu_{pp}$  เป็นสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้นเนื่องจากการผลิตคู่

รูปที่ 2.11 (ก) และ 2.11 (ข) เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของพลังงานของโฟตอนกับสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุต่าง ๆ และวัสดุชนิดต่าง ๆ ตามลำดับ





(ก)



(ข)

รูปที่ 2.11 (ก) สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของธาตุที่ค่าพลังงานต่าง ๆ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า (ข) สัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงมวลของสสารที่ค่าพลังงานต่าง ๆ ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น ยกเว้นห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 Buildup factor

เมื่อรังสีแกมมาผ่านเข้าไปในตัวกลางใด ๆ จะทำอันตรกิริยากับตัวกลางนั้นทำให้รังสีแกมมาถูกลดทอนให้น้อยลงดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1 ซึ่งรังสีแกมมาจะลดลงมากหรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับสมบัติและความหนาของวัสดุที่กั้นนั้นตามสมการ

$$I = BI_0 e^{-\mu x} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

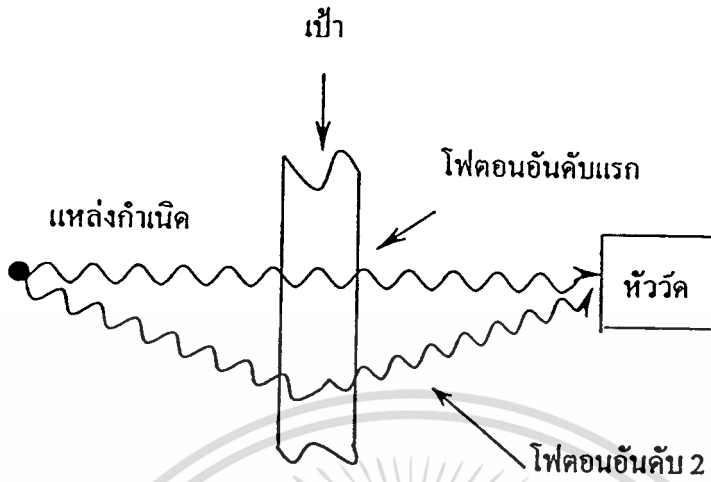
เมื่อ B เป็น buildup factor

โดยทั่วไปในการวัดปริมาณรังสีของหัววัดนั้นหัววัดจะนับทุกครั้งเมื่อมีรังสีตกกระทบบหัววัด (โดยไม่มีการแยกแยะทิศทางของลำรังสีที่ตกกระทบบทำให้ผลการวัดที่ได้นั้นคลาดเคลื่อนไป) เมื่อพิจารณาถึงเส้นทางการเดินทางของรังสีตั้งแต่ออกจากแหล่งกำเนิดตกกระทบบหัววัดจนตกกระทบบหัววัดมี 2 แบบ คือ แนวทางเดินตรงและไม่ตรง

1. แนวทางเดินตรง คือ แนวทางเดินของโฟตอนตั้งแต่ออกจากแหล่งกำเนิดผ่านวัสดุจนตกกระทบบหัววัดเป็นเส้นตรงตลอดแนว นั่นก็หมายความว่าโฟตอนของรังสีแกมมาเมื่อออกจากแหล่งกำเนิดผ่านวัสดุออกมาจนตกกระทบบหัววัดไม่มีการกระเจิงไปในทิศทางอื่นเนื่องจากการชนเรียกโฟตอนนี้ว่า โฟตอนอันดับแรก (primary photons) ตามแสดงคังรูปที่ 2.12

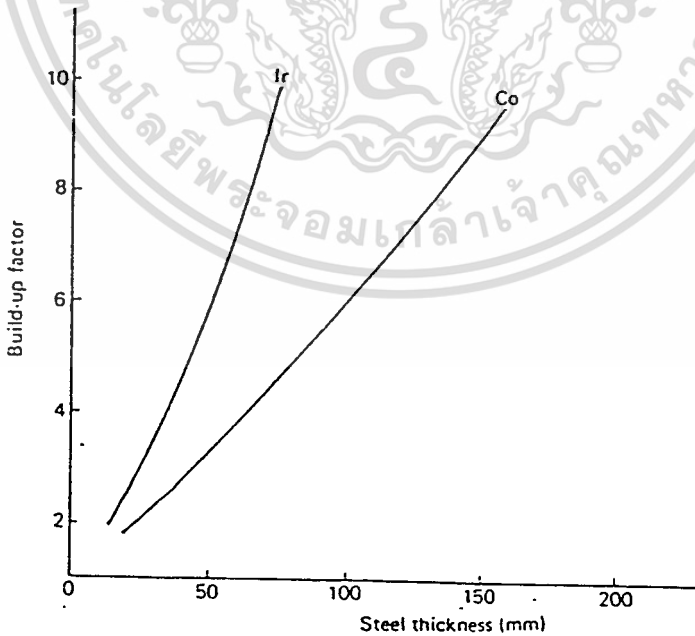
2. แนวทางเดินไม่ตรง คือ แนวทางเดินของโฟตอนตั้งแต่ออกจากแหล่งกำเนิดผ่านวัสดุจนตกกระทบบหัววัดนั้นไม่เป็นเส้นตรง นั่นก็หมายความว่าโฟตอนของรังสีแกมมาเกิดชนกับอิเล็กตรอนในวัสดุแล้วกระเจิงเปลี่ยนแนวการเคลื่อนที่ไป ซึ่งอาจจะเกิดการชนกันระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอน มากกว่า 1 ครั้ง และกระเจิงกลับมากกระทบบกับหัววัดพอดี เรียกโฟตอนที่ตกกระทบบในลักษณะนี้ว่าโฟตอนอันดับสอง (secondary photon)

หัววัดรังสีจะทำการนับเมื่อมีโฟตอนตกกระทบบหัววัด โดยไม่มีการจำแนกว่าเป็นโฟตอนอันดับแรกหรือโฟตอนอันดับสอง จากการที่โฟตอนผ่านวัสดุไปตกกระทบบหัววัดเมื่อนำปริมาณรังสีที่ได้ไปคำนวณหาความหนาของวัสดุนั้นจะได้ค่าความหนาผิดไป ซึ่งวิเคราะห์ได้ว่าปริมาณรังสีที่ผ่านวัสดุออกมานั้นมีค่ามากเกินไปจึงทำให้ความหนาที่คำนวณได้นั้นไม่ถูกต้อง เรียกปริมาณรังสีในส่วนที่เกินไปนี้ว่า buildup factor และในความเป็นจริงพบว่าปริมาณรังสีส่วนที่เกินมานี้เป็นผลเนื่องจากการตกกระทบบหัววัดของโฟตอนอันดับ 2 นั้นเอง ดังแสดงตามรูปที่ 2.12 โดยค่า buildup factor จะขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ คือถ้าวัสดุมีความหนาเปลี่ยนไปจะส่งผลต่อการกระเจิงของโฟตอน คือมีโฟตอนอันดับสองตกกระทบบหัววัดเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้ค่า buildup factor เปลี่ยนแปลงไปด้วย [5]



รูปที่ 2.12 การเกิด buildup factor

รูปที่ 2.13 แสดงค่า buildup factor ของเหล็กที่ค่าความหนาต่าง ๆ กัน สำหรับรังสีแกมมาที่ออกมาจากธาตุ Ir-182 (มีพลังงานเป็น 0.13 MeV) และ Co-60 (มีพลังงานเป็น 1.33 และ 1.17 MeV) จะเห็นว่ารังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำกว่าจะมีค่า buildup factor สูงกว่าสำหรับค่าความหนาที่เท่ากัน ของเหล็ก[5]



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบ buildup factor ของเหล็กที่มีความหนาต่าง ๆ กันสำหรับรังสี

แกมมาจากแหล่งกำเนิด Ir และ Co

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการวัดค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบหาโพรงนั้น ถ้านำค่าที่ได้จากการวัดนั้นมาคำนวณหาโพรงโดยตรงจากสมการ (2.14) ผลที่ได้จะไม่มี ความถูกต้องนักเนื่อง จากไม่รู้ขนาดโพรง หรือความหนาของชิ้นงาน จึงเป็นการยากสำหรับการเลือก build up factor (build up factor เป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับความหนาของวัสดุ ค่าความเข้มของรังสีแกมมา และลักษณะ การจัดวางอุปกรณ์) ที่ถูกต้อง ส่งผลให้การวิเคราะห์หาขนาดของโพรงจากสมการ 2.14 นั้นคลาดเคลื่อนไป ในงานวิจัยนี้เราจึงเล็งหาค่าความหนาจาก สมการนี้โดยตรง แต่ใช้เทคนิคการ สแกนแทน

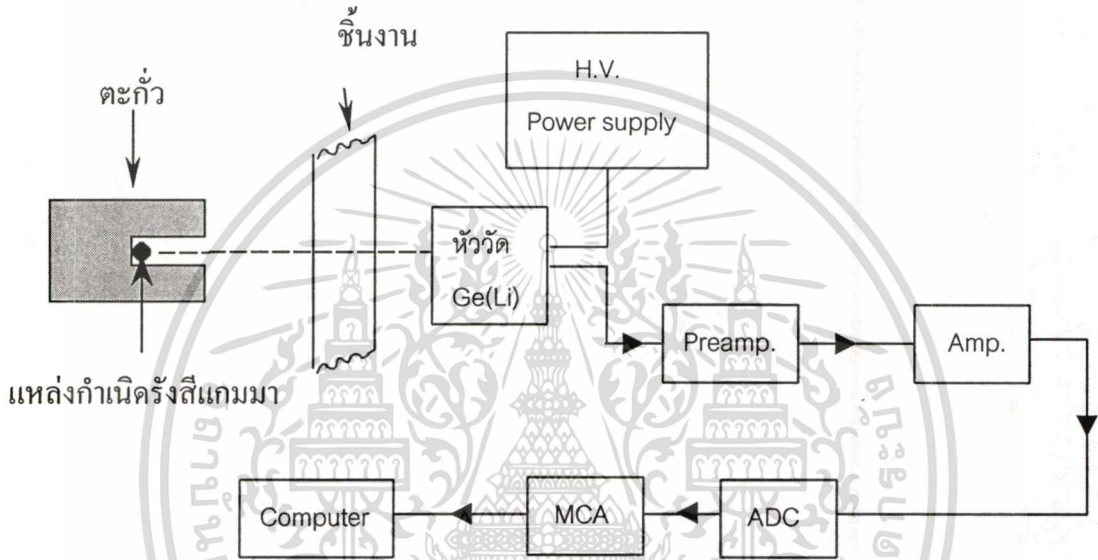


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

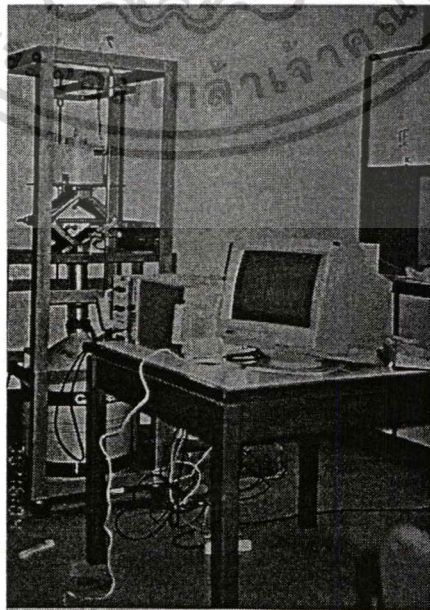
### บทที่ 3

## การทดลอง และผลการทดลอง

อุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ หัววัดรังสีแกมมาชนิดเจอร์มาเนียมลิเทียม [Ge(Li) Detector] และ conventional electronic equipments ซึ่งเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์อีกทอดหนึ่งเพื่อรวบรวมข้อมูล แสดงผลทางจอภาพ และใช้ในการวิเคราะห์ต่อไป ดังแสดงในรูป 3.1 และ 3.2



รูปที่ 3.1 แผนผังแสดงการจัดเครื่องมือสำหรับการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในวัสดุ



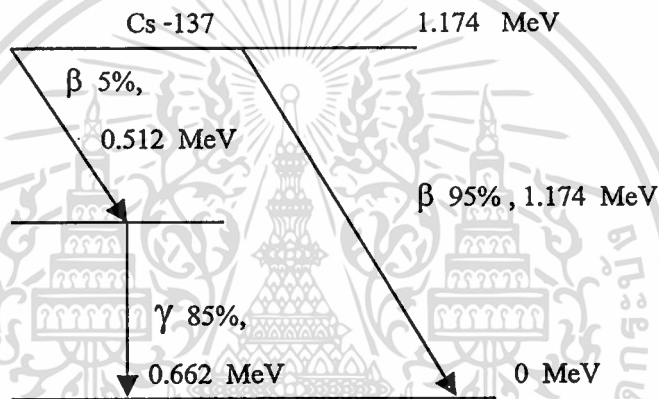
รูปที่ 3.2 ภาพถ่ายชุดเครื่องมือสำหรับการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางมหาวิทยาลัย

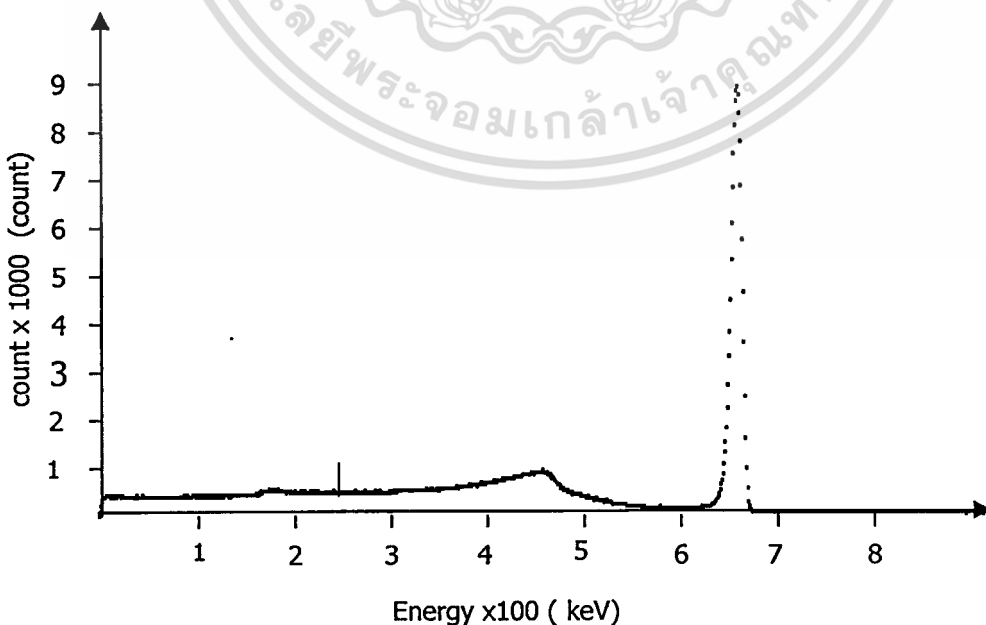
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1 แหล่งกำเนิดรังสี

ในการเลือกใช้แหล่งกำเนิดรังสีเพื่อใช้ในการวิจัย จำเป็นต้องคำนึงถึงค่าพลังงานของรังสีแกมมา ความแรง (activity) และครึ่งชีวิต (half life) ของแหล่งกำเนิด ในการตรวจสอบแบบไม่ทำลายพบว่ารังสีแกมมาพลังงานสูง สามารถใช้ตรวจสอบชิ้นงานที่มีความหนามากกว่าการใช้รังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่าสำหรับชิ้นงานชนิดเดียวกัน [6] งานวิจัยนี้เลือกใช้ ซีเซียม - 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาที่พลังงาน 0.662 MeV และมีครึ่งชีวิตเท่ากับ 30 ปี เป็นแหล่งกำเนิดรังสีโดยมีความแรงเริ่มต้นเท่ากับ 100 mCi (ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อผู้ทำการทดลองเนื่องจากได้บรรจุแหล่งกำเนิดไว้ในตัวกำบังรังสี) การสลายตัวของซีเซียม-137 แสดงอยู่ในรูป 3.3 และสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ออกจากแหล่งกำเนิด ซีเซียม-137 แสดงอยู่ในรูป 3.4



รูปที่ 3.3 โคออร์ดิเนตการสลายตัวของซีเซียม-137



รูปที่ 3.4 สเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ได้จากแหล่งกำเนิดรังสี Cs-137

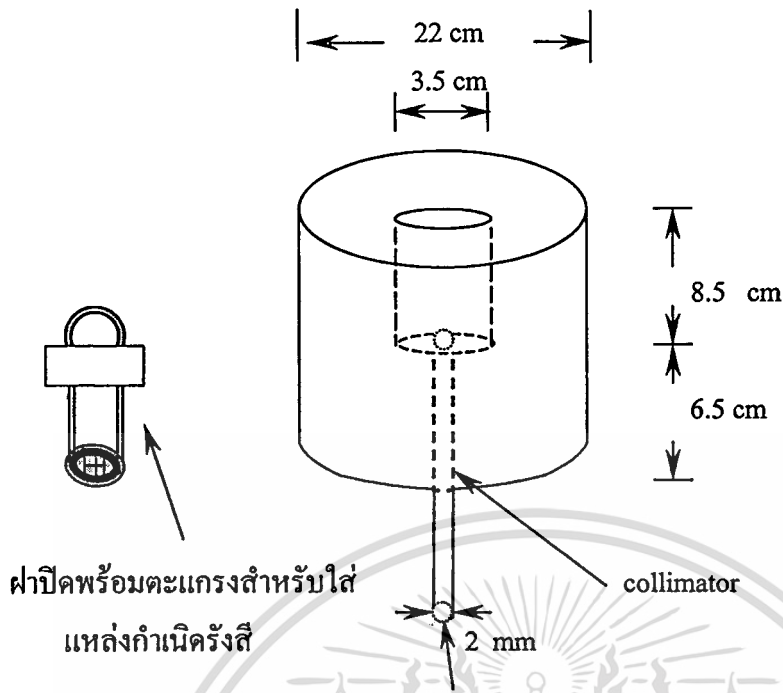
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหตุผลที่นำซีเซียม-137 มาใช้ในงานวิจัยคือ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีที่สลายให้รังสีแกมมาพลังงานเดียว ซึ่งสะดวกสำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลอง เพราะแหล่งกำเนิดรังสีที่สลายให้รังสีแกมมาหลาย ๆ พลังงาน Compton tail จากรังสีแกมมาพลังงานสูง จะไปปรากฏในพีคของรังสีแกมมาที่มีค่าพลังงานต่ำกว่าซึ่งจะทำให้ผลการวิเคราะห์ยุ่งยากและมีค่าความผิดพลาดสูงขึ้น

สำหรับความแรงของแหล่งกำเนิดรังสีนั้น ถ้าใช้ต้นกำเนิดรังสีที่มีความแรงสูง ความเข้มของรังสีที่วัดได้ก็จะมีค่าสูงด้วย [จำนวนนับต่อหน่วยเวลา (count/s) มีค่ามาก] ทำให้ความผิดพลาดทางสถิติ (statistical error) มีค่าน้อย [ภาคผนวก ค.] ความถูกต้องของข้อมูลก็จะสูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามความแรงของแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาค่าหนึ่ง ๆ นั้นเหมาะสมสำหรับความหนาของแผ่นวัสดุพิสัยหนึ่งเท่านั้น (ดูหัวข้อ 3.4.2)

ในงานวิจัยนี้นอกจากจะต้องคำนึงถึงพลังงาน และค่าความแรงของแหล่งกำเนิดรังสีแล้ว อีกสิ่งหนึ่งที่ต้องคำนึงถึงก็คือ ครึ่งชีวิตของแหล่งกำเนิดที่นำมาใช้ คือ แหล่งกำเนิดที่นำมาใช้จะต้องมีครึ่งชีวิตมีค่ามากกว่าช่วงเวลารวบรวมข้อมูลมาก เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาของค่าความแรงของแหล่งกำเนิดรังสีที่ลดลงในช่วงระยะเวลาทำการทดลอง ซีเซียม-137 มีครึ่งชีวิต 30 ปี จึงเหมาะสำหรับนำมาใช้ในงานวิจัยนี้

ตัวบรรจุแหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ในการทดลองนี้ทำด้วยตะกั่วมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาว 15 cm เส้นผ่านศูนย์กลาง 22 cm มีช่องว่างรูปทรงกระบอกร่วมจุดศูนย์กลางเดียวกัน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.5 cm ยาว 8.5 cm (ดูรูป 3.5) เจาะจากปลายด้านหนึ่งของทรงกระบอก และมีฝาปิดพร้อมที่ใส่สารกัมมันตรังสีไว้เมื่อปิดฝาแหล่งกำเนิดรังสีจะอยู่ที่ใจกลางของตัวบรรจุ แหล่งกำเนิดรังสีแกมมา ตำแหน่งต่อจากทรงกระบอกกลวงนี้มีช่องแคบรูปทรงกระบอก (collimator) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ยาว 6.5 cm (ร่วมจุดศูนย์กลางเดียวกัน) เพื่อให้รังสีทะลุผ่าน collimator ออกมาเป็นลำแคบ ๆ ลำรังสีที่ผ่านออกมามีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 cm ที่ระยะห่าง 10 cm จากปลาย collimator



รูปที่ 3.5 แผนภาพของตัวบรรจุแหล่งกำเนิดรังสี

### 3.2 ระบบหัววัดรังสีแกมมา

หัววัดรังสีแกมมาในงานวิจัยนี้ใช้หัววัดเจอร์มานีเยมลิเทียม (Ge(Li) detector) active volume ของหัววัดมีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกยาว 4.6 cm มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.15 cm และมีปริมาตร 56.5 cm<sup>3</sup> หัววัดนี้มี resolution 1.8 keV ที่พลังงาน 1.33 MeV (เมื่อหัววัดได้รับการปรับเทียบมาตรฐานแล้ว) หัววัดนี้ทำงานที่ความต่างศักย์ขนาด 4500 โวลต์ จากแหล่งจ่ายไฟที่มีความเสถียรภาพสูงและหัววัดนี้ต้องหล่อเย็นในไนโตรเจนเหลว (liquid nitrogen) สัญญาณที่ออกจากหัววัดถูกป้อนเข้าสู่ preamplifier amplifier ADC (Analog to Digital Converter) และ MCA (Multichannel Analyzer) มีจำนวนช่องเท่ากับ 8192 ช่อง ซึ่งเป็น data handle unit ตามลำดับเพื่อส่ง ข้อมูลให้กับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลและทำการวิเคราะห์ต่อไป

### 3.3 ชิ้นงาน

ชิ้นงานที่ใช้สำหรับตรวจสอบหาโพรงหรือรอยร้าวในงานวิจัยนี้ใช้เหล็กแท่งขนาดสม่ำเสมอมีหน้าตัดเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 6.5 x 6.5 cm<sup>2</sup> มาตัดเป็นแผ่นที่ความหนาต่าง ๆ กัน จาก 1 mm ถึง 35 mm จากนั้นนำมาเจาะรูกลมให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางขนาดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัน (ได้แก่ 0.3, 0.5, 0.8, 1 และ 3 cm) ดังรูป 3.7 แล้วนำแผ่นที่มีรูมาประกบหัวท้ายด้วยแผ่นเหล็กตัน แล้วปิดผนึกด้วยกระดาษเพื่อไม่ให้รู้ตำแหน่งและขนาดของโพรง เพื่อนำไปใช้เป็นชิ้นงานที่จะตรวจสอบหาความบกพร่องดังปรากฏตามรูป 3.8 ความหนาของชิ้นงานที่ใช้ในงานวิจัยแสดงอยู่ในตาราง 3.1

ตารางที่ 3.1 ขนาดของชิ้นงานที่ทำการตรวจสอบ

ชิ้นงานที่	กว้าง x ยาว x หนา (cm) <sup>3</sup>
1	6.5 x 6.5 x 2.0
2	6.5 x 6.5 x 3.0
3	6.5 x 6.5 x 3.0
4	6.5 x 6.5 x 1.0
5	6.5 x 6.5 x 3.0

สำหรับชิ้นงานที่นำมาใช้ในการตรวจสอบหาโพรงภายในนั้นได้ทำการตรวจสอบแบบไม่ทำลายด้วยการถ่ายภาพด้วยรังสี ที่สำนักงานปรมาณูเพื่อสันติ (ดูรูป 3.9) [เพื่อตรวจสอบดูว่าไม่มีโพรงอื่น ๆ ในเนื้อเหล็กนอกจากโพรงที่สร้างขึ้นมาเอง] และจากผลการตรวจสอบพบว่าชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบนั้นไม่มีความบกพร่องใด ๆ

ขนาดของโพรงในชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบนั้นมีลักษณะเป็นดังนี้

ชิ้นงานที่ 1 มีลักษณะของโพรงเป็นรูปทรงกระบอกครึ่งมี 1.5 cm สูง 1 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก)

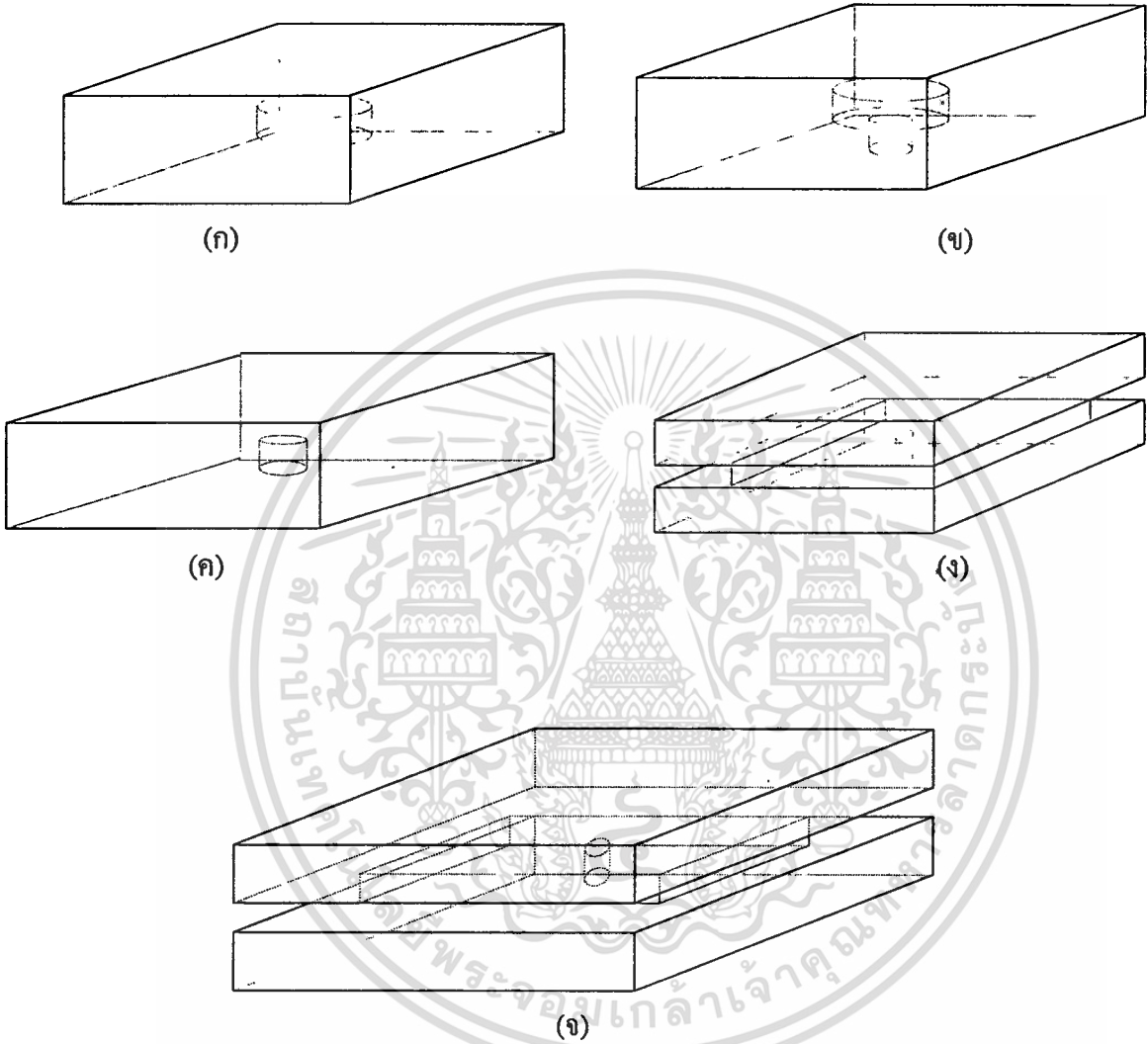
ชิ้นงานที่ 2 มีลักษณะของโพรงเป็นรูปทรงกระบอก 2 อันซ้อนกันและร่วมจุดศูนย์กลางเดียวกัน โดยทรงกระบอกอันแรกมีรัศมี 1.5 cm สูง 1 cm ทรงกระบอกที่ 2 มีรัศมีเป็น 0.5 cm สูง 0.5 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ข)

ชิ้นงานที่ 3 มีลักษณะของโพรงเป็นรูปทรงกระบอกครึ่งมี 0.5 cm สูง 0.8 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ค)

ชิ้นงานที่ 4 มีลักษณะของโพรงเป็นรูปตัว L มีขนาดเป็น 0.4 cm และ 1.2 cm โดยวัดจากขอบบน และขอบซ้ายของชิ้นงาน ตามลำดับ และมีรูปทรงกระบอกมีรัศมี 0.1 cm สูง 0.3 cm ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ง)

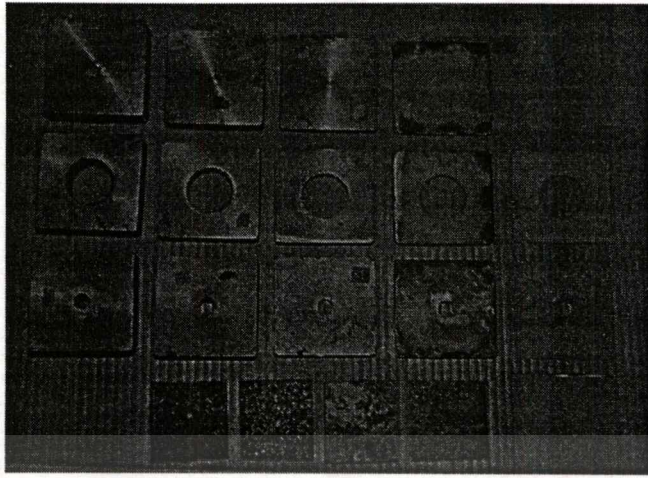
ชิ้นงานที่ 5 มีลักษณะของโพรงเป็นรูปกรอบสี่เหลี่ยมอยู่ที่ขอบของชิ้นงานทั้ง 4 ด้าน และรูปทรงกระบอกอยู่ตรงกลางมีรัศมี 0.2 cm สูง 0.5 cm โดยโพรงรูปสี่เหลี่ยมมีจุดความยาวโพรงแค่

ละด้านมีขนาด 6.5cm ส่วนความกว้างของโพรงมีขนาดเป็น 1.0 cm, 1.0 cm, 0.7 cm และ 0.2 cm โดยวัดจากขอบซ้าย ขอบขวา ขอบบน และขอบล่างของชิ้นงาน ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 (ก) - (จ)

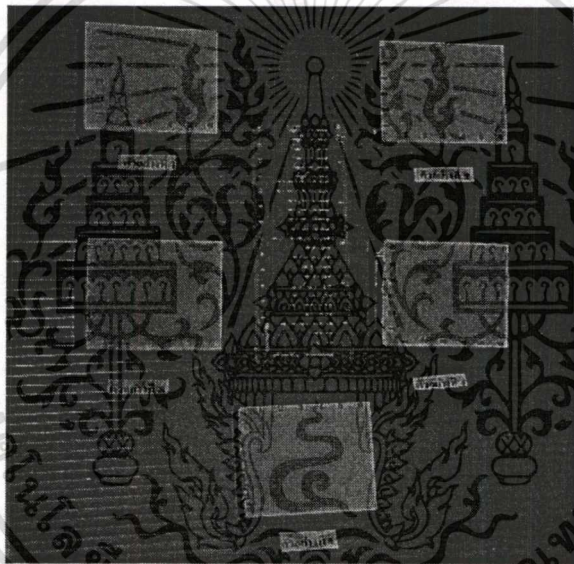


รูปที่ 3.6 (ก) (ข) (ค) (ง) และ(จ) เป็นขนาดของ โพรงที่ใช้ในการตรวจสอบในชิ้นงานที่ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

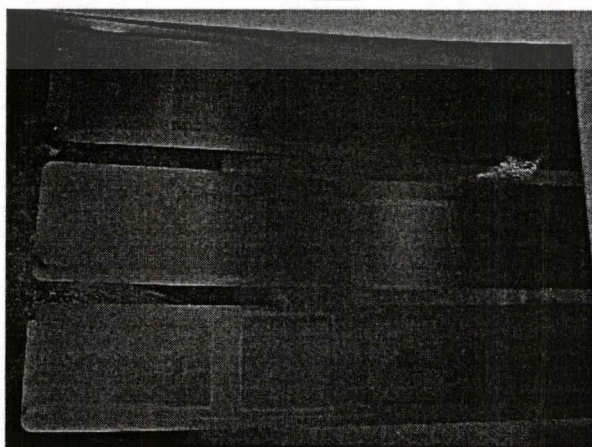
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ลักษณะของแผ่นเหล็กก่อนนำมาประกอบเป็นชิ้นงาน



รูปที่ 3.8 ชิ้นงานที่ประกอบแล้วเพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบ

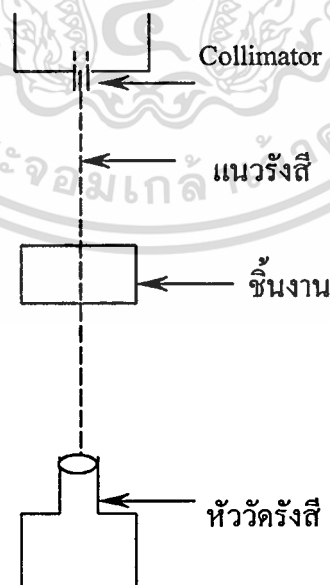


รูปที่ 3.9 फिल्मที่ได้จากการถ่ายภาพของชิ้นงานด้วยรังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 การจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลอง

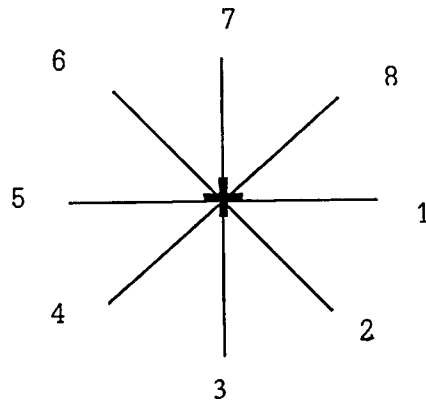
ในการจัดเตรียมอุปกรณ์ในการทดลองนี้สิ่งสำคัญก็คือ การจัดแนวของลำรังสี ( beam alignment ) และการหาขนาดของลำรังสี ในส่วนของการจัดแนวของลำรังสีนั้นต้องจัดให้จุดศูนย์กลางของลำรังสีตกบนจุดศูนย์กลางของหัววัด (เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบ) ซึ่งทำได้โดยใช้ชุดเลเซอร์ (ภาคผนวก ก.) ในการจัด โดยจัดให้ลำแสงเลเซอร์ที่ออกจากชุดเลเซอร์ (มีลักษณะเป็นเส้นตรงพุ่งขึ้น และพุ่งลง ในแนวตั้งฉากกับพื้นโลก)ให้ลำแสงเลเซอร์ที่พุ่งขึ้นตกบริเวณศูนย์กลางของปลาย collimator และลำแสงเลเซอร์ที่พุ่งลงตกตรงจุดศูนย์กลางของแผ่นวัดที่ต้องการวัด และจุดศูนย์กลางของหัววัดพอดี ตามแสดงในรูปที่ 3.10 วัสดุที่นำมาตรวจสอบชุดเลเซอร์และหัววัด จะต้องถูกจัดวางให้ระนาบของแต่ละสิ่งอยู่ในแนวระดับ (โดยในการจัดวางอุปกรณ์ต่าง ๆ นั้นใช้ระดับน้ำช่วยในการจัดวาง ) สิ่งที่ต้องคำนึงในการจัดวางเครื่องมืออีกอย่างก็คือ ตำแหน่ง และระยะห่างในการวางชุดอุปกรณ์ในแต่ละชุด ซึ่งจัดวางให้ระยะห่างของ collimator ชี้นำงาน และหัววัดให้คงที่ตลอด และสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงอีกอย่างก็คือขนาดของลำรังสี คือขนาดของลำรังสีจะมีค่าไม่เท่ากัน ณ.ตำแหน่งที่ห่างจาก collimator ต่างกัน ในงานวิจัยนี้จึงได้กำหนดระยะห่าง และตำแหน่งที่วางชุดอุปกรณ์ ในแต่ละจุดเป็นดังนี้ คือ กำหนดระยะห่างระหว่างปลาย collimator ถึงหัววัดเป็น 24 cm และกำหนดระยะห่างระหว่างปลาย collimator ถึงชี้นำงานที่ทำการวัดเป็น 10 cm ซึ่งกำหนดเป็นระยะคงที่ตลอดการทดลอง



รูปที่ 3.10 ไคอะแกรมการจัดวางอุปกรณ์ในการทดลอง

### 3.4.1 การหาขนาดลำรังสี

ในการหาขนาดของลำรังสีที่ใช้ในการทดลองนี้จะเป็นประโยชน์สำหรับวิเคราะห์โพรงหรือรอยร้าวมากคือ ในการวัดหรือการตรวจสอบแต่ละครั้งจะจัดให้จุดศูนย์กลางลำรังสีตกกระทบณ.ตำแหน่งของชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบ ถ้าทราบขอบเขตของลำรังสีก็ทำให้ทราบถึงตำแหน่งลำรังสีที่ผ่านชิ้นงานนั้นได้ ในการหาขนาดลำรังสีที่ใช้ในการทดลองนี้มีการจัดเตรียมอุปกรณ์ดังรูป 3.10 โดยใช้ชุดเลเซอร์ในการ alignment (โดยใช้ลำแสงเลเซอร์แทนลำรังสี โดยมีจุดศูนย์กลางร่วมกัน) เพื่อหาขนาด และตำแหน่งของลำรังสี ในการหาขนาดของลำรังสีนี้อาศัยหลักการลดทอนของรังสีเกมมาเมื่อเดินทางผ่านวัสดุ ในการทดลองนั้นได้ทำการลากเส้นรัศมีบนแผ่นพลาสติกสำหรับวางชิ้นงาน โดยเริ่มจากจุดศูนย์กลางของลำรังสี(จุดศูนย์กลางลำแสงเลเซอร์ตกกระทบบนแผ่นสำหรับวางชิ้นงาน) ซึ่งลากเส้นรัศมีทั้งหมด 8 เส้น และได้ทำกากบาทไว้ตรงกลางของตำแหน่งที่ลำรังสีตก (ตำแหน่งที่ลำแสงเลเซอร์ตก) ดังแสดงในรูป 3.11 โดยเลือกเส้นรัศมีมาทดลองหาขอบเขตของลำรังสีครั้งละ 1 เส้น โดยการเลื่อนแผ่นเหล็กที่เหลี่ยมจัตุรัสที่มีความหนาค่าหนึ่งเข้าสู่ศูนย์กลางของลำรังสี (ตำแหน่งกากบาท) มากที่สุดเท่าที่จะทำได้ (โดยไม่ให้ส่วนหนึ่งส่วนใดสัมผัสกับรังสี) ในการเลื่อนแผ่นเหล็กในแต่ละครั้งนั้นให้แนวกึ่งกลางแผ่นเหล็กทาบกับแนวเส้นรัศมีที่เลือกพอดี ซึ่งในการทดลองจะเริ่มเลื่อนแผ่นเหล็กจากตำแหน่งที่ลำรังสีไม่ผ่านส่วนใด ๆ ของแผ่นเหล็ก (ตรวจสอบได้จากปริมาณรังสีที่วัดได้ ซึ่งในการทดลองเริ่มวัดครั้งแรกที่ตำแหน่งห่างจากจุดกากบาทเป็นระยะ 2 cm) จนถึงตำแหน่งที่แผ่นเหล็กเริ่มสัมผัสขอบของลำรังสี (เลื่อนไปในทิศทางเข้าหาตำแหน่งกากบาท) ซึ่งณ.ตำแหน่งนี้ความเข้มของรังสีเริ่มลดลง ซึ่งถือว่าตำแหน่งก่อนที่จะมีการลดลงของปริมาณรังสีเป็นขอบของลำรังสี ในการเลื่อนแผ่นเหล็กนั้นเริ่มต้นจะให้ระยะห่างของแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดเป็น 0.5 cm แต่ถ้าพบการเปลี่ยนแปลงความเข้มรังสีณ.จุดใดแล้วจะให้ระยะห่างแต่ละตำแหน่งในการเลื่อนแผ่นเหล็กละเอียดขึ้น คือครั้งละ 0.1 cm ทำการทดลองเช่นเดียวกันกับเส้นแรกจนครบ 8 เส้น ก็จะทำให้ทราบลักษณะของลำรังสีที่นำมาใช้ในการทดลองได้



† เป็นตำแหน่งจุดศูนย์กลางของลำรังสี

รูปที่ 3.11 ไดอะแกรมแสดงลักษณะของเส้นแบ่งที่ใช้ในการหาขอบเขตของลำรังสี

ในการวัดหาขอบเขตของลำรังสีใช้แผ่นเหล็กขนาด  $6.5 \times 6.5 \times 7.5 \text{ cm}^3$  วางกั้นลำรังสีก่อนตกกระทบหัววัด (วางติดกับหัววัด) เพื่อไม่ให้ลำรังสีตกบนหัววัดมากเกินไปเพื่อให้ dead time มีค่า  $< 40\%$  (ดูหัวข้อ 3.4.2) ซึ่งอาจจะส่งผลให้หัววัดเสื่อมสภาพได้ และใช้แผ่นเหล็กขนาด  $6.5 \times 6.5 \times 1.0 \text{ cm}^3$  วางบนที่วางชิ้นงานและเป็นตัวเลื่อนให้เข้าใกล้บริเวณลำรังสี ผลการวัดตามตาราง 3.2 โดยตัวเลขพิมพ์หนาแทนตำแหน่งเริ่มต้นลำรังสีของแต่ละเส้นแบ่งที่ทำการตรวจสอบ

ตารางที่ 3.2 ผลการวัดความเข้มรังสีแกมมาเพื่อหาขนาดลำรังสี

เส้นแบ่งที่	ระยะห่างจากจุดกึ่ง กลางลำรังสี (cm)	พื้นที่ที่ได้พิก (counts/min)			
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ค่าเฉลี่ย
1	2	30,243	30,110	30,072	30,142
	1	30,290	30,331	30,361	30,327
	0.5	30,374	30,511	30,421	30,435
	0.4	26,152	26,315	26,157	26,519
	0.3	20,584	20,479	20,221	20,424
	0.2	16,325	16,418	16,304	16,349
2	2	30,514	30,427	30,592	30,511
	1	30,417	30,455	30,511	30,461
	0.5	30,502	30,491	30,559	30,516
	0.4	27,002	26,842	26,489	26,780
	0.3	24,336	24,411	24,895	24,547
	0.2	22,356	22,848	22,721	22,641
3	2	30,521	30,345	30,392	30,591
	1	30,644	30,580	30,433	30,552
	0.5	30,261	30,425	30,298	30,328
	0.4	22,592	22,477	22,480	22,561
	0.3	20,588	20,695	20,384	20,555
	0.2	16,921	16,899	16,766	16,862
4	2	30,426	30,379	30,628	30,477
	1	30,521	30,422	30,354	30,432
	0.5	30,598	30,321	30,425	30,448
	0.4	26,485	26,371	26,365	26,407
	0.3	24,255	24,277	24,842	24,459
	0.2	22,533	20,484	20,502	20,506
5	2	30,671	30,495	30,308	30,491
	1	30,489	30,257	30,646	30,461
	0.5	30,784	30,659	30,688	30,710
	0.4	29,757	29,732	29,805	29,764
	0.3	25,482	25,788	25,321	25,530
	0.2	20,749	20,584	20,591	20,641
6	2	30,895	30,771	30,785	30,817
	1	30,484	30,692	30,429	30,535
	0.5	30,267	30,848	30,634	30,583
	0.4	28,365	28,427	28,563	28,451
	0.3	26,311	26,492	26,392	26,398
	0.2	21,744	21,684	21,609	21,679
7	2	30,841	30,962	30,892	30,898
	1	30,484	30,209	30,367	30,353
	0.5	30,684	30,785	30,711	30,726
	0.4	30,694	30,378	30,522	30,531
	0.3	26,942	26,371	26,791	26,677
	0.2	22,115	22,384	22,168	22,222
8	2	30,318	30,641	30,545	30,519
	1	30,841	30,321	30,519	30,560
	0.5	30,149	30,265	30,432	30,282
	0.4	27,457	27,655	27,500	27,537
	0.3	24,326	24,488	24,576	24,463
	0.2	20,115	20,204	20,267	20,195
9	2	17,291	17,218	17,237	17,249

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากข้อมูลที่ได้ตามตารางที่ 3.2 ลำรังสีเป็นวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 1 cm เพื่อเพิ่มความเชื่อมั่นใจในการทดลองของการหาขนาดของลำรังสีได้ทำการหาขนาดของลำรังสีโดยการถ่ายภาพด้วยรังสีโดยวางฟิล์มที่เก็บไว้ในถุงดำไว้ระหว่าง collimator กับหัววัดซึ่งวางห่างจากปลาย collimator เป็นระยะ 10 cm เมื่อนำฟิล์มไปล้างจะปรากฏรอยดำเป็นรูปวงกลมมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.96 cm ซึ่งใกล้เคียงกันกับการทดลองหาขอบเขตของลำรังสีในการทดลองที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น

#### 3.4.2 การหาพิสัยของความหนาของเหล็ก

ในงานวิจัยการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็กนี้ สิ่งที่จะส่งผลกระทบต่อความถูกต้องของการวัดอีกอย่างก็คือ ความหนาของเหล็กที่ใช้ในการตรวจสอบ โดยความหนาของเหล็กที่นำมาตรวจสอบจะต้องสัมพันธ์กับความเข้มของรังสีแกมมาที่ใช้ในการตรวจสอบตามรายละเอียดดังต่อไปนี้

การหาพิสัยของความหนาของเหล็กที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ทำได้โดย นำแผ่นเหล็กตันที่มีพื้นที่ผิวหน้าตัดขนาด  $6.5 \times 6.5 \text{ cm}^2$  ตัดให้มีความหนาตั้งแต่ 10 mm ถึง 160 mm วางอยู่ระหว่างปลาย collimator กับหัววัด ให้ระยะห่างจากปลาย collimator ถึงแผ่นเหล็กเท่ากับ 10 cm วัดปริมาณรังสีแกมมาที่ผ่านเหล็กออกมา โดยเพิ่มความหนาของเหล็กครั้งละ 10 mm จนถึง 160 mm ผลการวัดดังแสดงในตาราง 3.3

ในการวิเคราะห์หาพิสัยของความหนาของเหล็กที่จะนำมาใช้ในการตรวจสอบนี้ได้จากการวิเคราะห์ จำนวนนับของรังสี และ dead time ของหัววัดรังสี โดยในการวัดที่ให้ค่าความถูกต้องสูงนั้น จำนวนนับของรังสีจะต้องมีมากพอ (เพื่อลดค่าความผิดพลาดทางสถิติ ในงานวิจัยนี้จะรวบรวมข้อมูลให้ได้จำนวนนับของรังสีอย่างน้อย 10,000 ครั้ง/นาที เพื่อจำกัดค่าความผิดพลาดทางสถิติให้มีค่า  $\leq 1\%$ ) และ dead time มีค่าไม่เกิน 40% [7]

ตารางที่ 3.3 พื้นที่ที่ได้ฟีด และ dead time ของระบบการวัดรังสีแกมมาเมื่อรังสีทะลุผ่านแผ่นเหล็กที่มีความหนาต่าง ๆ กัน

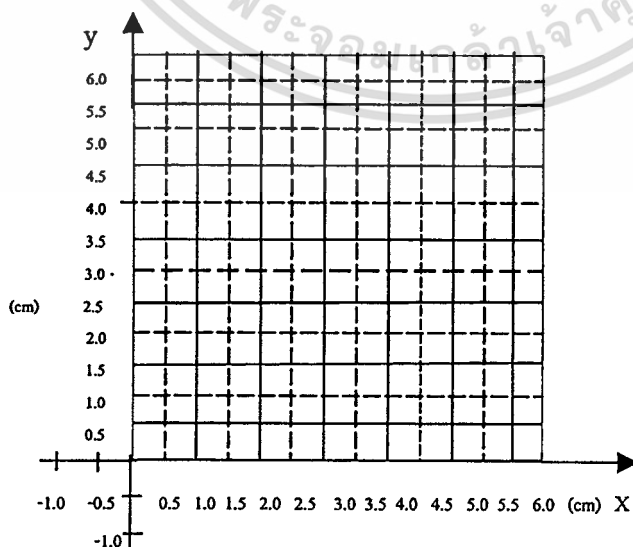
ความหนา (mm)	ผลการวัด ครั้งที่ 1			ผลการวัด ครั้งที่ 2			ผลการวัดเฉลี่ย		
	Dead time (%)	พื้นที่ที่ได้ฟีด (Counts/min)	Error (%)	Dead time (%)	พื้นที่ที่ได้ฟีด (Counts/min)	Error (%)	Dead Time (%)	พื้นที่ที่ได้ฟีด (Counts/min)	Error (%)
160	0.92	2,214	4.10	0.93	2,238	3.98	0.92	2,226	4.04
150	1.04	3,880	2.96	1.04	3,962	4.00	1.04	3,921	3.48
140	1.21	6,703	2.24	1.20	6,488	2.28	1.20	6,595	2.26
130	1.42	11,481	2.24	1.41	11,365	1.68	1.42	11,423	1.96
120	1.68	10,298	1.75	1.69	10,176	1.76	1.69	10,237	1.75
110	2.13	17,662	1.34	2.13	17,686	1.34	2.13	17,673	1.34
100	2.81	18,256	1.32	2.93	18,357	1.32	2.87	18,306	1.32
90	4.29	35,937	0.98	4.29	35,799	0.98	4.29	35,868	0.98
80	6.14	62,069	0.76	6.13	61,964	0.76	6.14	62,016	0.76
70	8.93	67,250	0.74	8.92	67,545	0.71	8.93	67,397	0.75
60	12.91	106,020	0.60	12.74	107,446	0.59	12.73	106,733	0.59
50	19.51	175,116	0.50	19.49	174,554	0.50	19.50	174,635	0.50
40	28.07	272,287	0.46	28.08	273,978	0.45	28.08	273,132	0.46
30	38.63	397,784	0.42	38.66	400,390	0.41	38.65	399,045	0.42
20	47.3	829,634	0.24	47.48	847,328	0.24	47.36	838,381	0.24
10	60.18	928,442	0.24	60.19	977,714	0.24	60.19	953,078	0.24

ผลการทดลองในตาราง 3.3 จะเห็นว่า ความหนาของเหล็กที่ควรนำมาใช้ในการทดลอง ควรจะต้องมีความหนาตั้งแต่ 30 mm ขึ้นไป ซึ่งมี dead time < 40% (ในการใช้ dead time < 40% เพื่อเป็นการเลี่ยงการเพี้ยนของสเปกตรัม [spectrum distortion] ส่วนความหนา 20 mm มี dead time > 40% ดังนั้นการตรวจสอบชิ้นงานที่เป็นเหล็กที่มีความหนาน้อยกว่า 20 mm จะทำให้ผลการทดลองมีความผิดพลาดสำหรับค่าความแรงของรังสีที่ใช้ในการทดลองนี้ (ในเชิงปฏิบัติ เราสามารถตรวจสอบกับชิ้นงานที่มีความหนา  $\leq 20$  mm ได้โดยการนำแผ่นเหล็กมาเสริม) เพื่อเป็นการทำให้รังสีแกมมาตกกระทบหัววัดในปริมาณที่พอเหมาะและมี dead time < 40 % ทำให้สามารถตรวจสอบข้อบกพร่องในชิ้นงานที่มีความหนา  $\leq 20$  mm ได้อย่างถูกต้อง

### 3.5 การทดลอง และการรวบรวมข้อมูล

การหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็กในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการสแกน (scanning) ซึ่งได้ทดสอบแล้วว่าเป็นเทคนิคที่เหมาะสมสำหรับการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวที่อยู่ภายในเนื้อของชิ้นงาน ในการศึกษานี้จะทำการตรวจสอบวัสดุทั้ง 3 ด้าน เพื่อให้ทราบถึงขนาด ลักษณะ และตำแหน่งของโพรงหรือรอยร้าวในวัสดุที่นำมาตรวจสอบนั้น โดยชิ้นงานที่ใช้ในการตรวจสอบนี้เป็นรูปทรงสี่เหลี่ยมมุมฉาก ฉะนั้นจึงทำการตรวจวัดแต่ละชิ้นงานเพียง 3 ด้าน (ด้านคู่ขนานจะทำการวัดที่ด้านใดด้านหนึ่งเพียงด้านเดียว) ซึ่งจะทำให้ทราบถึงตำแหน่งและลักษณะของโพรงภายในชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบได้ การตรวจสอบแต่ละด้านของชิ้นงานจะเริ่มต้นด้วยวัดหาความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานโดยสแกนไปทั่วชิ้นงานอย่างหยาบ ๆ และให้ระยะห่างของแต่ละตำแหน่งที่ทำการตรวจวัดเป็น 0.5 cm (ดังแสดงในรูปที่ 3.12) โดยทำการสแกนทั้งในแนวแกน x และ y เปรียบเทียบจำนวนนับของรังสีแกมมาในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดเพื่อวิเคราะห์หาโพรงหรือรอยร้าวภายในอย่างคร่าว ๆ จากนั้นก็ทำการวัดหาความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานอย่างละเอียดในบริเวณที่มีโพรงหรือรอยร้าวอยู่ ซึ่งได้ข้อมูลมาจากการสแกนอย่างหยาบโดยลดระยะห่างของการวัดในแต่ละครั้งเป็น 0.1 cm โดยเริ่มจากตำแหน่งก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีแกมมา จนพ้นตำแหน่งที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีแกมมา ในการวิเคราะห์นั้นถือว่าตำแหน่งก่อนที่จะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มของรังสีแกมมาเป็นตำแหน่งเริ่มของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้

ในการวัดหาความเข้มของรังสีที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจะทำการรวบรวมข้อมูลให้ได้พื้นที่ได้พีคอย่างน้อย 10,000 counts เพื่อให้มีค่าความผิดพลาดทางสถิติน้อยกว่าหนึ่งเปอร์เซ็นต์



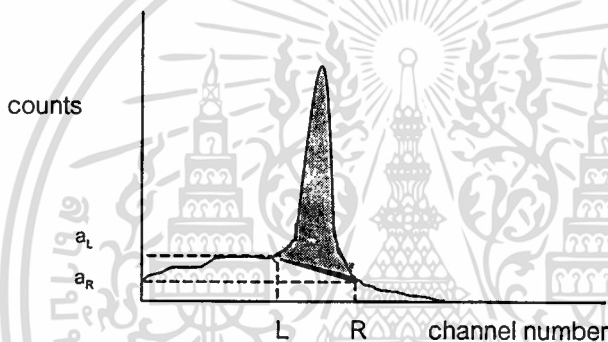
รูปที่ 3.12 แสดงการแบ่งพื้นที่บนแต่ละด้านของชิ้นงาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6 การวิเคราะห์ข้อมูล

ในการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็กนี้ หลักการวิเคราะห์นั้นจะทำการวิเคราะห์ความเข้มของรังสีแกมมาเมื่อผ่านวัสดุออกมา(พื้นที่ใต้พีคของรังสีแกมมา)

เมื่อรังสีแกมมาตกกระทบหัววัด หัววัดจะทำการวัดแล้วส่งผ่านสัญญาณสู่ conventional electronic equipment ที่เป็นตัวแปลงและวิเคราะห์สัญญาณ และแสดงผลทางคอมพิวเตอร์ ซึ่งผลที่ได้นี้จะอยู่ในรูปสเปกตรัม (spectrum) ของรังสีแกมมาที่ทะลุผ่านชิ้นงานออกมามาดังแสดงในรูปที่ 3.13 ซึ่งจะมีลักษณะเช่นเดียวกับสเปกตรัมของรังสีแกมมาที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยตรงในรูป 3.4 แต่ความเข้มหรือปริมาณรังสีมีค่าลดลง



รูปที่ 3.13 สเปกตรัมของรังสีแกมมา และการลากเส้นแบคกราวด์เพื่อหาพื้นที่ใต้พีค

พื้นที่ใต้พีคของสเปกตรัมนี้ประกอบด้วยรังสีแกมมาจากแหล่งกำเนิดที่ทะลุผ่านตัวกลางมาและแบคกราวด์ (Background) สำหรับช่วงแคบ ๆ แบคกราวด์สามารถประมาณได้ว่ามีลักษณะเป็นเส้นตรงและหาได้จาก

$$\text{Background} = (a_L + a_R) \left( \frac{R-L}{2} \right)$$

$$\text{Total Counts} = \sum_{i=L}^R a_i$$

$$\text{พื้นที่ใต้พีคเมื่อหักแบคกราวด์} = \text{Total Counts} - \text{Background}$$

$$= \sum_{i=L}^R a_i - (a_L + a_R) \left( \frac{R-L}{2} \right) \dots\dots\dots(3.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$a_i$  = จำนวนนับในช่อง  $i$

$L$  = หมายเลขช่องซ้ายสุดของแบ็คกราวนด์ทางด้านซ้ายของพีค

$R$  = หมายเลขช่องขวาสุดของแบ็คกราวนด์ทางด้านขวาของพีค

การหาพื้นที่ใต้พีคทำได้โดยการป้อนข้อมูลจากตำแหน่งเริ่มต้นถึงตำแหน่งสุดท้าย ของสเปกตรัม โดยเลือกบริเวณแบ็คกราวนด์ที่เปลี่ยนแปลงน้อยที่สุด ข้อมูลเหล่านี้จะถูกใช้หาค่าแบ็คกราวนด์โดยหลักการของ least square fitting ( ภาคผนวก ข) เมื่อได้ค่าแบ็คกราวนด์แล้วพื้นที่ใต้พีคก็ถูกคำนวณโดยใช้สมการ (3.1)

ในการทดลองนี้การตรวจวัดหาโพรงในวัสดุได้จากการเปรียบเทียบค่าความเข้มของรังสีที่ผ่านตัวกลางออกมา ค่าความผิดพลาดของพื้นที่ใต้พีคมาจากความผิดพลาดทางสถิติของค่านับและการเลือกค่าแบ็คกราวนด์

### 3.7 ผลการทดลอง

ผลการตรวจวัดในแต่ละด้านของชิ้นงานต่าง ๆ แสดงอยู่ในตารางที่ 3.4 – 3.31 เมื่อนำพื้นที่ใต้พีค (counts/min) ที่วัดได้ในแต่ละตำแหน่งบนชิ้นงานในแต่ละด้านมาแสดงในแผนภาพดัง (รูปที่ 3.14 – 3.23 ) ก็ทำให้ทราบตำแหน่งของโพรงได้

รูปที่ 3.14 , 3.16 , 3.18 , 3.20 และ 3.22 เป็นการพลอตค่าของพื้นที่ใต้พีคที่ได้จากการสแกนอย่างหยาบทุกระยะ 0.5 cm โดยการแทนค่าของความเข้มที่ต่างกันด้วยสัญลักษณ์ที่ต่างกัน ส่วนรูปที่ 3.15 , 3.17 , 3.19 , 3.21 และ 3.23 เป็นการพลอตค่าของพื้นที่ใต้พีคที่ได้จากการสแกนอย่างละเอียดทุกระยะ 0.1 cm

หมายเหตุ \* การการตรวจสอบชิ้นงานตามรูปนี้ไม่มีการสแกนอย่างหยาบในด้านที่ 2 และด้านที่ 3 เนื่องจากพื้นที่ผิวในการสแกนนั้นเท่ากับลำรังสีซึ่งข้อมูลที่ได้จากการสแกนในแต่ละตำแหน่งมีค่าน้อยจึงไม่เพียงพอที่จะนำมาวิเคราะห์โพรงอย่างคร่าว ๆ ได้

ตารางที่ 3.4 แสดงค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 1 (การสแกนอย่างหยาบ)

x(cm) y(cm)	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
1.00	28,827	29,041	28,753	29,171	29,350	29,526	29,132	30,124	30,410	30,462	30,515
1.50	28,764	29,144	28,474	29,735	29,434	30,698	29,599	30,246	30,322	30,174	30,216
2.00	28,828	28,964	29,627	31,051	32,584	32,613	38,044	30,115	30,721	30,643	30,551
2.50	28,465	29,172	34,276	37,352	37,659	36,203	42,672	31,161	30,128	30,521	30,714
3.00	28,964	29,101	40,738	44,168	44,837	46,003	49,488	35,798	30,420	30,187	30,216
3.50	28,835	29,277	43,251	44,794	45,261	46,158	49,576	37,256	30,177	30,259	30,211
4.00	28,819	29,321	40,859	44,184	44,327	45,659	49,736	39,853	30,511	30,336	30,584
4.50	28,744	28,969	29,674	37,461	40,552	42,692	33,747	30,571	30,314	30,727	30,215
5.00	29,110	29,238	29,990	31,437	38,955	30,672	29,724	30,211	30,257	30,184	30,202
5.50	28,702	29,130	29,848	29,348	29,671	29,351	29,321	30,057	30,025	30,577	30,414
6.00	28,836	28,922	29,220	29,744	29,500	29,655	29,655	30,110	30,238	30,718	30,728

หมายเหตุ : x แทนตำแหน่งที่ห่างจากขอบด้านซ้ายของชิ้นงาน

: y แทนตำแหน่งที่ห่างจากขอบล่างของชิ้นงาน

: ตัวเลขที่ขีดเส้นใต้ (สำหรับการตรวจชิ้นงานแบบหยาบ) แทนตำแหน่งที่มีความเปลี่ยนแปลงเนื่องจากอิทธิพลของโพรง

: ตัวเลขที่ขีดเส้นใต้ (สำหรับการตรวจชิ้นงานแบบละเอียด) แทนตำแหน่งเริ่มต้นของโพรง

หมายเหตุ : ข้อมูลข้างต้นนี้จะใช้สำหรับผลในตาราง 3.4-3.31

ตารางที่ 3.5 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 1 ชิ้นงานที่ 1 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)
1.75,1.80	30,184	2.00,1.70	28,433	2.50,1.80	29,341	3.00,1.60	29,425	3.50,1.30	29,711	4.00,1.20	29,721	4.50,2.10	30,357
1.75,1.90	30,244	2.00,1.80	28,542	2.50,1.90	29,255	3.00,1.70	29,672	3.50,1.40	30,105	4.00,1.30	29,506	4.50,2.20	30,506
1.75,2.10	31,842	2.00,1.90	28,833	2.50,2.10	32,619	3.00,1.80	30,304	3.50,1.60	31,299	4.00,1.40	29,611	4.50,2.30	30,761
1.75,2.20	31,688	2.00,2.10	30,477	2.50,5.10	30,422	3.00,1.90	31,116	3.50,1.70	31,893	4.00,1.60	31,761	4.50,2.40	34,160
1.75,2.30	31,655	2.00,2.20	31,256	2.50,5.20	30,244	3.00,5.20	37,245	3.50,5.10	30,205	4.00,1.70	34,160	4.50,4.30	31,488
1.75,2.40	32,288	2.00,4.30	30,767	2.50,5.30	30,118	3.00,5.30	35,713	3.50,5.20	29,910	4.00,4.60	32,134	4.50,4.40	30,679
1.75,4.30	36,117	2.00,4.40	30,289	2.50,5.40	29,366	3.00,5.40	30,160	3.50,5.30	29,847	4.00,4.70	30,127	4.50,4.60	30,127
7.75,4.40	33,964	2.00,4.60	29,311	2.50,5.40	29,571	3.00,5.60	30,217	-	-	4.00,4.80	29,732	4.50,4.70	30,153
1.75,4.60	30,417	2.00,4.70	29,115	-	-	-	-	-	-	4.00,4.90	29,650	-	-

หมายเหตุ : เครื่องหมาย - แทนตำแหน่งที่ไม่มีกรตรวจวัด (ใช้สำหรับตารางที่ 3.5 - 3.31)

ตารางที่ 3.6 แสดงค่า ความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 1 (การสแกนอย่างหยาบ)

x(cm) \ y(cm)	0.50	1.00	1.50
0.50	22,175	22,120	17,622
1.00	22,270	22,830	17,644
1.50	22,160	25,836	18,387
2.00	27,390	29,451	21,760
2.50	28,267	26,075	23,963
3.00	25,920	38,652	27,403
3.50	28,172	42,879	27,691
4.00	29,973	44,814	26,894
4.50	25,917	37,671	25,191
5.00	25,372	23,469	22,508
5.50	21,630	20,749	17,842
6.00	21,675	20,118	17,531

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนนิวเคลียสที่ 2 ซึ่งงานที่ 1 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)
0.50,1.40	22,337	1.50, 1.20	17,261	0.10, 2.50	23,978	0.10, 3.00	25,012	0.10, 3.50	30,431	0.10, 4.00	24,867	0.10, 4.50	24,836
0.50,1.70	23,402	1.50, 1.30	17,202	0.20, 2.50	23,617	0.20, 3.00	25,397	0.20, 3.50	29,397	0.20, 4.00	23,147	0.20, 4.50	24,712
0.50,1.80	26,362	1.50, 1.40	17,147	0.30, 2.50	24,728	0.30, 3.00	30,999	0.30, 3.50	24,620	0.30, 4.00	25,839	0.30, 4.50	28,194
0.50,5.10	23,883	1.50, 1.60	21,795	0.40, 2.50	30,808	0.50, 3.00	44,173	0.40, 3.50	29,161	0.50, 4.00	27,669	0.40, 4.50	34,460
0.50,5.20	23,903	1.50, 5.10	21,004	0.50, 2.50	42,211	0.70, 3.00	59,190	0.50, 3.50	42,325	0.70, 4.00	39,847	0.70, 4.50	41,083
0.50,5.30	21,284	1.50, 5.20	20,213	0.70, 2.50	52,154	0.90, 3.00	61,902	0.70, 3.50	57,109	0.90, 4.00	52,149	0.90, 4.50	53,210
0.50,5.40	21,277	1.50, 5.30	18,016	0.90, 2.50	57,127	1.10, 3.00	61,089	0.90, 3.50	60,330	1.10, 4.00	51,380	1.00, 4.50	57,960
-	-	1.50, 5.40	17,935	1.00, 2.50	58,389	1.20, 3.00	60,623	1.10, 3.50	60,773	1.30, 4.00	48,361	1.10, 4.50	54,820
-	-	-	-	1.20, 2.50	55,358	1.30, 3.00	67,707	1.20, 3.50	59,647	1.20, 4.00	50,019	1.20, 4.50	58,105
-	-	-	-	1.30, 2.50	53,779	1.40, 3.00	54,067	1.30, 3.50	54,067	1.50, 4.00	41,108	1.30, 4.50	50,373
-	-	-	-	1.40, 2.50	50,714	1.70, 3.00	48,946	1.40, 3.50	48,946	1.70, 4.00	43,001	1.40, 4.50	42,161
-	-	-	-	1.50, 2.50	47,649	-	-	-	-	-	-	1.70, 4.50	44,605

ตารางที่ 3.8 แสดงค่า ความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งที่ทำกรวัด  
บนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 1 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm) x(cm)	0.50	1.00	1.50
0.50	27,484	16,251	18,257
1.00	27,972	16,018	18,279
1.50	27,536	16,477	18,099
2.00	25,641	26,503	31,878
2.50	28,437	37,981	45,860
3.00	26,216	44,706	52,202
3.50	26,417	41,521	51,362
4.00	29,136	37,683	44,135
4.50	27,617	26,500	32,162
5.00	27,072	20,051	18,571
5.50	27,177	16,094	17,951
6.00	27,377	16,463	18,093

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 3 ซึ่งงานที่ 1 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)
0.50,2.30	27,642	1.00,1.30	16,257	1.50,1.40	18,025	0.2,0.0	25,327	0.2,50	25,128	0.3,0.0	24,622
0.50,2.40	27,683	1.00,1.40	16,425	1.50,1.60	18,641	0.10,2.00	22,111	0.10,2.50	24,800	0.10,3.00	24,031
0.50,2.60	27,421	1.00,1.60	27,106	1.50,1.70	21,114	0.20,2.00	22,668	0.20,2.50	24,775	0.20,3.00	24,120
0.50,2.70	28,413	1.00,1.80	29,751	1.50,1.80	21,943	0.30,2.00	24,680	0.30,2.50	26,320	0.30,3.00	25,927
-	-	1.00,4.60	28,759	1.50,4.60	29,756	0.40,2.00	28,696	0.40,2.50	31,772	0.40,3.00	30,887
-	-	1.00,4.70	20,051	1.50,4.70	24,425	0.70,2.00	44,150	0.70,2.50	44,835	0.70,3.00	49,730
-	-	1.00,4.80	16,714	1.50,4.80	18,307	0.90,2.00	47,105	0.90,2.30	48,658	0.90,3.00	51,737
-	-	1.00,4.90	16,037	1.50,4.90	18,550	1.10,2.00	47,670	1.20,2.50	48,121	1.20,3.00	50,016
-	-	-	-	-	-	1.20,2.00	43,212	1.30,2.50	42,339	1.30,3.00	48,564
-	-	-	-	-	-	1.30,2.00	38,955	1.40,2.50	41,776	1.70,3.00	45,765
-	-	-	-	-	-	1.40,2.00	37,703	-	-	1.00	51,287

ตารางที่ 3.10 แสดงค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างหยาบ)

$y(\text{cm})$ $x(\text{cm})$	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
1.00	28,984	29,443	28,977	29,134	29,425	28,710	29,205	28,565	28,424	28,571	28,596
1.50	28,435	<u>28,714</u>	28,563	29,177	29,111	28,692	29,744	28,426	28,714	28,749	29,006
2.00	28,534	28,684	<u>30,125</u>	29,362	<u>30,499</u>	<u>31,579</u>	29,569	28,682	28,574	28,703	28,683
2.50	28,720	28,535	39,415	<u>33,502</u>	35,784	<u>38,456</u>	<u>36,175</u>	<u>30,106</u>	28,424	28,463	28,694
3.00	28,754	28,917	<u>37,256</u>	35,914	40,218	41,888	29,756	34,211	28,825	28,463	28,651
3.50	28,515	28,844	34,223	36,274	40,925	46,510	29,847	35,821	29,444	28,421	28,461
4.00	28,821	29,067	<u>30,735</u>	<u>37,127</u>	41,097	<u>50,750</u>	<u>30,277</u>	<u>36,625</u>	29,319	28,744	28,344
4.50	28,477	29,056	29,680	33,511	38,261	<u>37,211</u>	<u>33,960</u>	<u>32,133</u>	28,737	28,824	28,744
5.00	28,669	29,134	28,686	<u>32,882</u>	<u>34,287</u>	29,811	28,887	29,149	28,601	29,051	28,770
5.50	28,892	28,845	28,747	28,961	29,338	29,294	28,496	28,598	28,404	29,160	28,874
6.00	28,526	28,694	28,549	28,700	29,171	28,745	28,562	28,495	28,284	28,961	28,421

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามแก้ไขตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 1 ซึ่มีงานที่ 2 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ใต้พีค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ใต้พีค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ใต้พีค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ใต้พีค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ใต้พีค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ใต้พีค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ใต้พีค (counts/ min)
2.00,1.90	28,535	2.50,1.90	29,142	3.00,1.70	29,111	3.50,1.40	28,942	4.00,1.80	29,746	4.50,2.30	28,713	1.00,3.75	29,176
2.00,2.10	28,481	2.50,2.10	30,207	3.00,1.80	29,351	3.50,1.60	29,125	4.00,1.90	29,206	4.50,2.40	29,106	1.10,3.75	29,072
2.00,2.20	29,744	2.50,2.20	30,869	3.00,1.90	29,877	3.50,1.80	30,660	4.00,2.10	29,684	4.50,2.60	31,744	1.20,3.75	29,198
2.00,2.30	29,962	2.50,2.30	31,488	3.00,2.10	31,425	3.50,1.90	30,926	4.00,2.20	30,745	4.50,2.70	32,499	1.30,3.75	29,623
2.00,2.40	29,966	2.50,5.20	30,847	3.00,5.30	31,468	3.50,5.10	29,022	4.00,4.70	31,205	4.50,4.70	31,502	1.50,3.75	30,414
2.00,4.90	30,745	2.50,5.30	29,891	3.00,5.40	30,709	3.50,5.20	28,075	4.00,4.80	30,210	4.50,4.80	29,125	1.60,3.75	31,108
2.00,5.10	29,107	2.50,5.40	29,210	3.00,5.60	29,355	3.50,5.30	28,745	4.00,4.90	29,133	4.50,4.90	29,684	1.70,3.75	33,048
2.00,5.20	28,846	2.50,5.60	28,477	3.00,5.70	29,477	3.50,5.40	28,773	4.00,5.10	28,745	4.50,5.10	29,137	2.00,3.75	38,614
2.00,5.30	28,714	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.00,3.75	46,634
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.00,3.75	41,620
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.00,3.75	29,725
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.30,3.75	29,744
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.40,3.75	29,174
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5.50,3.75	29,107
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6.00,3.75	29,112

ตารางที่ 3.12 แสดงค่า ความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm) \ x(cm)	0.50	1.00	1.50	2.00
0.50	23,520	23,742	23,145	23,422
1.00	23,425	23,521	23,131	23,187
1.50	23,357	23,599	23,844	26,312
2.00	23,421	23,756	36,253	56,880
2.50	26,578	27,135	40,367	73,530
3.00	28,630	29,709	58,075	75,498
3.50	27,425	28,897	52,222	68,625
4.00	24,231	24,318	39,391	52,184
4.50	23,075	22,575	27,399	29,682
5.00	23,141	22,849	24,152	23,970
5.50	23,895	22,694	23,168	23,718
6.00	23,660	23,107	23,130	23,869

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.13 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 2 จำนวนที่ 2 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)		
0.75, 1.00	23,182	1.00, 1.20	22,484	1.25, 1.00	22,638	1.50, 1.30	23,171	1.75, 1.00	22,452	2.00, 1.10	26,435	0.00, 2.00	22,802	-0.30, 2.50	83,772	-0.30, 3.00	112,283	-0.30, 3.50	106,384	-0.30, 4.00	121,360
0.75, 1.00	23,125	1.00, 1.30	22,079	1.25, 1.40	22,580	1.50, 1.40	23,844	1.75, 1.10	22,892	2.00, 2.00	27,160	0.30, 2.00	21,845	-0.20, 2.50	75,682	-0.20, 3.00	103,238	-0.20, 3.00	97,892	-0.20, 4.00	99,854
0.75, 1.90	23,175	1.00, 1.40	22,134	1.25, 1.50	23,182	1.50, 1.60	26,492	1.75, 1.20	23,172	2.00, 1.30	26,198	0.50, 2.00	17,723	-0.10, 2.50	53,932	-0.10, 3.00	99,232	-0.10, 3.00	89,676	-0.10, 4.00	89,521
0.75, 2.00	23,756	1.00, 1.60	24,725	1.25, 1.70	24,270	1.50, 1.70	30,529	1.75, 1.30	24,489	2.00, 1.50	30,312	0.60, 2.00	18,000	0.00, 2.50	53,932	0.00, 3.00	99,372	0.00, 3.50	83,214	0.00, 4.00	83,962
0.75, 2.10	24,296	1.00, 2.20	22,628	1.25, 2.00	25,132	1.50, 4.40	28,358	1.75, 1.50	30,189	-	-	0.90, 2.00	18,242	0.10, 2.50	53,728	0.10, 3.00	81,472	0.10, 3.50	84,602	0.10, 4.00	83,574
0.75, 2.20	24,923	1.00, 4.30	22,725	1.25, 3.00	41,190	1.50, 4.60	28,622	1.75, 2.00	54,522	-	-	0.00, 2.00	21,048	0.20, 2.50	58,332	0.20, 3.00	84,873	0.20, 3.50	78,744	0.30, 4.00	75,321
0.75, 2.30	25,369	1.00, 4.40	21,847	1.25, 4.00	28,278	1.50, 4.70	25,671	1.75, 3.00	72,754	-	-	1.10, 2.00	33,531	0.30, 2.50	48,322	0.30, 3.00	84,322	0.50, 3.50	60,482	0.50, 4.00	62,090
0.75, 2.50	27,185	1.00, 4.60	21,945	1.25, 4.30	25,373	1.50, 4.80	25,392	1.75, 4.00	49,428	-	-	1.50, 2.00	57,341	0.40, 2.50	38,716	0.50, 3.00	92,635	1.00, 3.50	41,573	0.80, 4.00	61,854
0.75, 3.00	29,709	-	-	1.25, 4.50	23,789	-	-	1.75, 4.50	28,846	-	-	2.00, 2.00	20,881	0.50, 2.50	33,728	0.50, 3.00	55,698	1.30, 3.50	33,741	0.90, 4.00	58,760
0.75, 3.40	25,600	-	-	1.25, 4.70	23,128	-	-	1.75, 4.80	23,028	-	-	2.50, 2.00	19,184	0.60, 2.50	32,125	2.60, 3.00	32,429	1.50, 3.50	29,074	1.00, 4.00	57,293
0.75, 3.50	24,897	-	-	1.25, 4.80	22,692	-	-	1.75, 4.90	23,160	-	-	2.50, 2.00	18,922	0.80, 2.50	44,216	2.70, 3.00	33,193	1.80, 3.50	27,604	1.30, 4.00	57,723
0.75, 3.70	24,312	-	-	1.25, 4.90	22,327	-	-	1.75, 5.00	22,812	-	-	2.70, 2.00	16,821	1.00, 2.50	46,375	2.80, 3.00	47,850	2.00, 3.50	25,108	1.50, 4.00	56,700
0.75, 3.80	23,928	-	-	1.25, 5.00	22,384	-	-	1.75, 6.00	22,891	-	-	3.00, 2.00	18,412	1.20, 2.50	57,680	3.00, 3.00	69,382	2.30, 3.50	23,374	1.80, 4.00	56,924
0.75, 3.90	23,122	-	-	1.25, 6.00	22,691	-	-	-	-	-	-	-	-	1.50, 2.50	65,757	-	-	2.60, 3.50	20,387	2.00, 4.00	54,788
0.75, 4.00	23,318	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.70, 2.50	74,388	-	-	2.70, 3.50	19,107	2.30, 4.00	44,625
0.75, 5.00	22,849	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.00, 2.50	74,370	-	-	2.80, 3.50	28,228	2.50, 4.00	24,390
0.75, 6.00	23,107	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.20, 2.50	67,912	-	-	2.90, 3.50	49,322	2.60, 4.00	19,211
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.50, 2.50	48,161	-	-	3.00, 3.50	71,372	2.70, 4.00	18,252
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.70, 2.50	32,741	-	-	-	-	2.80, 4.00	21,270
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.80, 2.50	44,657	-	-	-	-	3.00, 4.00	17,811
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3.00, 2.50	120,974	-	-	-	-	-	-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.14 แสดงค่า ความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่ง บนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 2 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm)\x(cm)	0.40	0.80	1.60	2.00
1.00	29,079	17,131	19,823	39,140
1.50	30,841	17,254	19,972	39,659
2.00	33,985	17,531	22,991	43,467
2.50	33,463	18,367	48,050	62,361
3.00	33,985	21,331	56,995	70,003
3.50	31,751	28,914	56,313	71,031
4.00	29,681	20,134	55,663	66,816
4.50	30,340	17,267	43,269	59,089
5.00	29,433	17,267	24,269	42,043
5.50	28,812	17,740	21,388	44,030
6.00	29,551	17,391	21,256	44,786

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 3.16 แสดงค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm) x(cm)	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
1.00	27,477	27,381	27,460	27,574	27,396	27,372	27,898	27,411	27,370	27,201	27,415
1.50	27,160	27,416	27,471	27,625	27,882	27,280	27,297	27,711	27,281	27,336	27,853
2.00	27,467	27,566	27,790	27,621	27,874	27,803	27,732	27,502	27,364	27,140	27,361
2.50	27,432	27,437	27,599	27,149	29,240	31,842	31,842	27,744	27,401	27,369	27,425
3.00	27,549	27,811	27,404	28,162	31,676	34,549	34,549	27,780	27,308	27,149	27,908
3.50	27,499	27,609	27,517	27,920	29,288	30,786	27,502	27,541	27,318	27,267	27,116
4.00	27,521	27,417	27,613	27,713	27,422	27,291	27,220	27,462	27,370	27,161	27,355
4.50	27,448	27,332	27,583	27,265	27,103	27,298	27,807	27,620	27,608	27,273	27,193
5.00	27,138	27,185	27,660	27,405	27,105	27,216	27,321	27,161	27,309	27,321	27,146
5.50	27,385	27,311	27,105	27,037	27,705	27,140	27,663	27,609	27,533	27,213	27,322
6.00	27,030	27,105	27,837	28,045	27,911	27,870	27,810	27,628	27,415	27,538	27,484

ตารางที่ 3.17 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 1  
ชั้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้พิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้พิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้พิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้พิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้พิค (counts/ min)
2.75,1.00	27,301	3.00,1.90	27,484	3.50,1.90	27,482	4.00,2.10	27,642	1.00,3.00	27,903
2.75,1.50	27,415	3.00,2.10	28,127	3.50,2.10	27,710	4.00,2.20	27,679	1.50,3.00	27,387
2.75,2.00	27,186	3.00,2.20	28,742	3.50,2.20	28,829	4.00,2.30	28,143	2.00,3.00	27,108
2.75,2.50	28,231	3.00,2.30	29,136	3.50,2.30	29,062	4.00,2.40	28,756	2.20,3.00	27,509
2.75,2.60	28,510	3.00,3.70	28,966	3.50,3.60	29,744	4.00,3.30	28,741	2.30,3.00	28,171
2.75,2.70	28,654	3.00,3.80	28,242	3.50,3.70	28,823	4.00,3.40	28,144	2.40,3.00	28,729
2.75,3.00	29,270	3.00,3.90	27,608	3.50,3.80	28,219	4.00,3.60	27,537	2.50,3.00	29,488
2.75,3.50	28,715	3.00,4.10	27,256	3.50,3.90	27,660	-	-	3.00,3.00	30,833
2.75,3.60	28,714	-	-	-	-	-	-	3.50,3.00	29,993
2.75,3.70	27,624	-	-	-	-	-	-	4.00,3.00	29,036
2.75,4.00	27,534	-	-	-	-	-	-	4.10,3.00	28,577
2.75,4.50	27,470	-	-	-	-	-	-	4.20,3.00	27,819
2.75,5.00	27,193	-	-	-	-	-	-	4.30,3.00	27,591
2.75,5.5	27,630	-	-	-	-	-	-	4.50,3.00	27,636
2.75,6.00	27,709	-	-	-	-	-	-	5.00,3.00	27,737
-	-	-	-	-	-	-	-	5.50,3.00	27,281
-	-	-	-	-	-	-	-	6.00,3.00	27,347

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.18 แสดงค่า ความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่ง บนผิวด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm) \ x(cm)	0.50	1.00	1.50
1.00	22,170	22,667	23,668
1.50	22,279	22,182	25,297
2.00	22,408	22,968	25,456
2.50	29,844	24,452	25,774
3.00	29,162	24,477	24,189
3.50	23,795	23,229	24,406
4.00	24,926	23,580	23,906
4.50	22,377	22,776	24,132
5.00	22,393	23,125	23,847
5.50	22,327	22,683	24,326
6.00	22,600	23,120	24,399

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.19 แสดงความเข้มข้น (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวคานที่ 2 ชั้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่ได้ฟิค (counts/ min)
0.25,1.00	24,423	0.50,1.90	22,484	0.75,1.00	30,403	1.00,1.90	22,474	1.25,1.00	22,006	0.40,3.00	26,686
0.25,1.50	23,958	0.50,2.10	22,844	0.75,1.50	32,238	1.00,2.10	22,216	1.25,1.50	22310	0.50,3.00	27,208
0.25,1.90	24,271	0.50,2.20	23,162	0.75,2.00	26,585	1.00,2.20	23,091	1.25,2.00	21706	0.60,3.00	29,062
0.25,2.00	25,448	0.50,2.30	28,939	0.75,2.10	26,379	1.00,2.30	24,099	1.25,2.50	22130	0.70,3.00	26,806
0.25,2.50	31,742	0.50,4.20	23,174	0.75,2.30	26,303	1.00,4.20	23,984	1.25,3.00	22265	0.90,3.00	21,621
0.25,3.00	35,402	0.50,4.30	22,625	0.75,2.40	27,574	1.00,4.30	23,127	1.25,4.00	21891	1.00,3.00	19,090
0.25,3.50	37,844	0.50,4.40	22,577	0.75,2.50	29,209	1.00,4.40	22,788	1.25,4.50	21505	1.10,3.00	18,110
0.25,3.70	27,680	-	-	0.75,3.00	32,529	1.00,4.60	22,749	1.25,5.00	22128	1.20,3.00	24,021
0.25,3.80	27,107	-	-	0.75,3.50	29,633	-	-	1.25,5.50	22313	1.30,3.00	60,187
0.25,3.90	27,113	-	-	0.75,4.00	23,897	-	-	1.25,6.00	22248	-	-
0.25,4.00	26,509	-	-	0.75,4.50	24,293	-	-	-	21850	-	-
0.25,4.50	29,082	-	-	0.75,4.80	25,105	-	-	-	-	-	-
0.25,5.00	25,682	-	-	0.75,4.90	24,828	-	-	-	-	-	-
0.25,5.50	26,414	-	-	0.75,5.00	24,383	-	-	-	-	-	-
0.25,6.00	25,741	-	-	0.75,5.50	24,845	-	-	-	-	-	-

ตารางที่ 3.20 แสดงค่า ความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่ง บนผิวด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 3 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm) \ x(cm)	0.50	1.00	1.50
1.00	23,734	21,995	23,844
1.50	23,550	22,013	23,885
2.00	23,749	22,424	24,132
2.50	33,802	29,512	24,192
3.00	34,372	30,352	23,088
3.50	30,882	23,181	24,109
4.00	23,118	22,010	22,991
4.50	24,181	22,079	22,630
5.00	23,322	22,134	23,193
5.50	23,149	21,704	22,827
6.00	24,163	22,360	22,389
6.00	24,163	22,360	22,389

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ตารางที่ 3.22 แสดงค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนพิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm) x(cm)	0.5	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
0.5	22,238	20,466	21,145	22,103	21,477	21,443	20,698	21,976	21,422	21,324	21,352	20,796
1.00	20,660	19,800	20,172	19,915	20,270	20,070	19,822	19,996	19,771	19,747	20,075	21,285
1.50	20,608	17,923	19,852	19,252	19,426	19,309	18,928	19,121	18,932	20,074	19,990	20,904
2.00	20,496	17,746	18,114	18,067	18,212	17,802	17,794	17,724	18,566	19,863	20,072	20,993
2.50	20,634	17,764	17,978	17,772	18,215	17,828	17,776	17,803	18,311	19,916	19,600	20,598
3.00	20,179	17,837	17,940	17,734	17,990	17,776	17,887	19,071	18,271	19,185	19,885	20,433
3.50	20,646	17,829	17,867	17,832	18,201	18,218	17,743	19,401	18,026	19,637	20,145	20,416
4.00	20,487	17,890	18,207	17,798	18,150	18,323	17,956	19,279	17,940	19,550	19,995	20,089
4.50	20,366	17,896	18,076	17,852	17,933	17,730	17,875	17,741	17,959	19,636	19,788	20,034
5.00	20,392	17,990	17,844	17,869	18,098	17,845	18,012	17,873	17,936	19,510	19,781	20,306
5.50	20,465	17,762	17,970	17,544	17,982	17,943	17,775	17,854	18,026	19,631	19,984	20,148
6.00	20,339	18,297	18,279	18,269	18,502	18,201	18,280	18,320	18,649	19,957	20,303	20,361

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.23 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 1 ชั้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	
1.00,0.60	20,454	1.50,0.60	21,616	2.00,0.20	26,681	2.50,1.30	19,730	3.00,0.30	3,000.60	3.50,0.60	20,970	4.00,0.30	24,358	4.50,1.30	19,483	
1.00,0.70	20,404	1.50,0.70	20,495	2.00,0.30	25,034	2.50,1.40	19,355	3.00,0.50	3,500.80	3.50,0.80	20,410	4.00,0.40	22,493	4.50,1.40	19,210	
1.00,0.80	20,151	1.50,0.80	20,274	2.00,0.40	23,183	2.50,1.60	19,214	3.00,0.70	3,501.70	3.50,1.70	18,540	4.00,0.70	20,210	4.50,1.60	18,475	
1.00,1.40	19,505	1.50,0.90	20,315	2.00,0.60	20,605	2.50,1.70	18,498	3.00,1.40	3,501.80	3.50,1.80	18,370	4.00,0.80	20,577	4.50,1.70	18,774	
1.00,1.60	19,292	1.50,1.70	19,095	2.00,0.70	20,236	2.50,1.80	18,238	3.00,1.60	3,501.80	3.50,1.80	19,216	4.00,1.20	19,940	-	4.70,2.00	18,339
1.00,1.70	18,387	1.50,1.80	18,206	2.00,0.80	19,877	2.50,1.90	18,195	3.00,1.70	3,502.10	3.50,2.10	17,489	4.00,1.40	19,551	-	4.80,2.00	18,747
1.00,1.80	17,469	1.50,1.90	18,217	2.00,1.60	19,484	-	-	3.00,1.80	3,502.20	3.50,2.20	17,935	4.00,1.70	18,486	-	5.30,2.00	19,932
1.00,1.90	17,255	1.50,2.10	18,257	2.00,1.70	18,741	-	-	3.00,1.90	3,502.20	3.50,2.20	17,935	4.00,1.80	17,765	-	5.4,2.00	20,041
-	-	-	-	2.00,1.80	19,941	-	-	-	-	-	-	4.00,1.90	17,543	-	5.60,2.00	20,325
-	-	-	-	2.00,1.90	18,209	-	-	-	-	-	-	4.00,2.60	18,074	-	5.70,2.00	20,276
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.00,2.70	18,729	-	5.80,2.00	20,526
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.00,2.80	18,693	-	5.90,2.00	20,268
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.00,4.10	17,920	-	6.10,2.00	21,204
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.00,4.20	17,816	-	6.20,2.00	22,362
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	4.00,4.30	17,655	-	-	-

ตารางที่ 3.23(ต่อ)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	
4.40.2.50	18,046	4.30.3.00	18,089	4.40.3.50	17,994	4.30.4.00	18,039	2.50.3.70	18,320	4.30.4.50	18,063	4.40.5.00	18,016	4.30.5.50	18,342	4.50.6.00	18,538			
4.50.2.50	17,858	4.40.3.00	18,251	4.50.3.50	18,413	4.40.4.00	18,232	3.00.3.70	18,477	4.40.4.50	18,190	4.60.5.00	18,330	4.40.5.50	18,072	4.50.6.00	18,510			
4.60.2.50	18,154	4.60.3.00	18,474	4.70.3.50	18,360	4.50.4.00	18,343	3.10.3.70	18,611	4.60.4.50	18,246	4.70.5.00	18,222	4.60.5.50	18,149	4.70.6.00	18,820			
4.70.2.50	18,447	4.70.3.00	18,947	4.80.3.50	18,504	4.60.4.00	18,427	3.20.3.70	18,622	4.70.4.50	18,210	4.80.5.00	18,520	4.70.5.50	18,109	4.80.6.00	18,988			
4.80.2.50	18,780	4.80.3.00	18,983	4.90.3.50	19,108	4.70.4.00	18,373	3.30.3.70	18,539	4.80.4.50	18,377	4.90.5.00	18,788	4.80.5.50	18,652	4.90.6.00	19,064			
5.20.2.50	20,023	5.20.3.00	20,164	5.10.3.50	19,975	4.80.4.00	18,482	3.40.3.70	18,353	4.90.4.50	18,632	5.30.5.00	20,198	4.90.5.50	18,822	5.20.6.00	21,028			
5.30.2.50	20,326	5.30.3.00	20,490	5.30.3.50	19,990	4.90.4.00	18,781	3.50.3.70	18,636	5.30.4.50	19,987	5.40.5.00	20,109	5.20.5.50	19,735	6.10.6.00	20,948			
5.40.2.50	20,290	5.40.3.00	20,360	5.70.3.50	20,484	5.20.4.00	20,051	3.60.3.70	18,911	5.30.4.50	20,507	5.70.5.00	20,388	5.40.5.50	20,082	-	-			
5.70.2.50	20,436	5.60.3.00	20,623	5.90.3.50	20,660	5.40.4.00	20,205	3.70.3.70	18,498	5.70.4.50	21,118	5.90.5.00	20,142	5.70.5.50	20,288	-	-			
6.10.2.50	21,316	5.80.3.00	20,604	6.10.3.50	21,279	5.70.4.00	20,459	4.00.3.70	18,358	6.10.4.50	-	6.10.5.00	20,845	5.90.5.50	20,821	-	-			
-	-	6.10.3.00	21,388	-	-	6.10.4.00	21,524	-	-	-	-	-	-	6.10.5.50	21,169	-	-			



ตารางที่ 3.24 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิวด้านที่ 2 ชั้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)	ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	พื้นที่วัด (counts/ min)
1.00,-0.50	56,379	1.50,-0.50	53,423	2.00,-0.40	54,882	3.00,-0.40	50,423	3.50,-0.50	222,400	4.00,-0.60	244,452	4.50,-0.50	188,696	5.00,-0.40	183,349
1.00,-0.40	44,462	1.50,-0.40	43,728	2.00,-0.30	38,007	3.00,-0.30	37,901	3.50,-0.40	148,604	4.00,-0.40	135,558	4.50,-0.40	161,377	5.00,-0.30	150,510
1.00,-0.30	39,828	1.50,-0.10	36,992	2.00,-0.20	30,010	3.00,-0.20	25,795	3.50,-0.30	63,714	4.00,-0.30	94,572	4.50,-0.30	99,212	5.00,-0.20	63,389
1.00,-0.20	34,742	1.50,0	32,216	2.00,-0.10	24,008	3.00,-0.10	23,633	3.50,-0.20	33,173	4.00,-0.20	51,556	4.50,-0.20	46,638	5.00,-0.10	43,210
1.00,0	33,593	1.50,0.10	33,127	2.00,0	25,020	3.00,0	24,132	3.50,-0.10	26,091	4.00,-0.10	28,949	4.50,-0.10	18,418	5.00,0	24,288
1.00,0.10	34,248	1.50,0.20	30,887	2.00,0.10	28,963	3.00,0.10	23,371	3.50,0	23,801	4.00,0	24,141	4.50,0	20,957	5.00,0.10	24,960
1.00,0.20	33,767	1.50,0.30	33,355	2.00,0.20	26,827	3.00,0.20	28,110	3.50,0.10	23,834	4.00,0.10	24,701	4.50,0.10	19,568	5.00,0.20	23,667
1.00,0.30	34,579	1.50,0.40	38,628	2.00,0.30	36,130	3.00,0.30	36,174	3.50,0.20	31,602	4.00,0.20	24,108	4.50,0.20	20,858	5.00,0.30	24,222
1.00,0.40	39,967	1.50,0.50	40,671	2.00,0.40	46,804	3.00,0.40	46,523	3.50,0.30	47,157	4.00,0.30	40,625	4.50,0.30	28,499	5.00,0.40	48,111
1.00,0.50	44,237	1.50,0.80	42,182	2.00,0.50	52,884	3.00,0.50	57,955	X		4.00,0.40	58,654		36,200		
1.00,0.60	45,677	1.50,0.70	52,221	2.00,0.60	63,006					4.00,0.50	59,468				
1.00,0.70	59,806	1.50,0.80	63,408	2.00,0.70	76,714										
1.00,0.80	67,894	1.50,0.90	71,365												
1.00,0.90	77,562	1.50,1.00	71,943												
		1.50,1.10	73,427												
		1.50,1.20	84,840												

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.25 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบริเวณผิวตัวที่ 3 ชั้นงานที่ 4 (การสแกนอย่างละเอียด)

ตำแหน่ง ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)	จำนวน ที่วัด (x, y)	จำนวน ที่วัด (counts/ min)		
1.00,-0.50	231.622	1.50,-0.40	218.160	2.00,-0.40	207.858	2.50,-0.40	203.941	3.00,-0.40	231.113	3.50,-0.40	210.633	4.00,-0.40	221.816	4.50,-0.40	214.313	5.00,-0.40	235.462	6.00,-0.40	197.123
1.00,-0.40	219.180	1.50,-0.30	108.461	2.00,-0.30	150.444	2.50,-0.30	159.397	3.00,-0.30	177.350	3.50,-0.30	166.345	4.00,-0.30	184.275	4.50,-0.30	281.072	5.00,-0.30	172.482	6.00,-0.30	144.882
1.00,-0.30	108.396	1.50,-0.20	102.885	2.00,-0.20	112.570	2.50,-0.20	132.557	3.00,-0.20	106.366	3.50,-0.20	133.678	4.00,-0.20	125.738	4.50,-0.20	132.961	5.00,-0.20	111.321	6.00,-0.20	97.673
1.00,-0.20	108.806	1.50,-0.10	48.201	2.00,-0.10	47.744	2.50,-0.10	60.731	3.00,-0.10	83.949	3.50,-0.10	63.389	4.00,-0.10	46.583	4.50,-0.10	49.387	5.00,-0.10	56.326	6.00,-0.10	53.428
1.00,-0.10	44.149	1.50,0.10	20.899	2.00,0	20.312	2.50,0	42.649	3.00,0	44.276	3.50,0	28.478	4.00,0	30.128	4.50,0	29.182	5.00,0	22.222	6.00,0	21.878
1.00,0	30.125	1.50,0	21.825	2.00,0.10	21.027	2.50,0.10	22.887	3.00,0.10	25.110	3.50,0.10	22.687	4.00,0.10	31.717	4.50,0.10	21.695	5.00,0.10	23.128	6.00,0.10	23,918
1.00,0.10	22.033	1.50,0.20	21.385	2.00,0.20	19.877	2.50,0.20	22.767	3.00,0.20	26.823	3.50,0.20	22.757	4.00,0.20	31.755	4.50,0.20	24.387	5.00,0.20	21.374	6.00,0.20	20.825
1.00,0.20	20.668	4.50,0.10	24.825	2.00,0.30	23.244	2.50,0.30	23.421	3.00,0.30	26.944	3.50,0.30	29.860	4.00,0.30	34.179	4.50,0.30	23.125	5.00,0.30	24.438	6.00,0.30	24.378
1.00,0.30	22.098	4.50,0.20	30.812	2.00,0.40	28.342	2.50,0.40	-	3.00,0.40	33.166	3.50,0.40	32.580	4.00,0.40	48.372	4.50,0.40	25.737	5.00,0.40	28.321	6.00,0.40	30.677
1.00,0.40	24.628	4.50,0.30	-	2.00,0.50	45.152	-	-	-	-	-	-	X	-	4.50,0.50	31.370	5.00,0.50	-	6.00,0.50	36.800
1.00,0.50	25.809	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1.00,0.60	42.760	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-



ตารางที่ 3.26 แสดงความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนพิวด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างหยาบ)

x(c) y(cm)	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00	5.50	6.00
0.5	36.665	37.027	33.317	36.271	36.187	34.613	33.026	36.708	34.764	34.282	39.980
1.00	31.115	27.259	26,474	26,740	26,637	26,734	26,901	26,738	26,818	29,526	39,398
1.50	30.468	26,930	26,148	26,470	26,517	26,513	26,183	26,345	26,667	28,110	39,037
2.00	30,043	26,825	26,747	26,819	26,860	26,879	26,311	26,549	27,069	28,958	38,512
2.50	30,206	26,727	26,756	26,869	26,827	26,679	26,439	26,708	26,764	29,136	38,391
3.00	29,981	26,790	26,755	26,948	28,024	28,377	26,678	26,644	26,791	28,809	38,498
3.50	28,838	26,701	27,002	26,678	27,112	27,224	26,889	26,764	26,890	29,179	38,156
4.00	29,287	26,515	26,985	26,669	26,574	26,802	26,753	26,635	26,972	29,354	38,122
4.50	29,121	26,484	26,604	26,411	26,519	26,207	26,709	26,616	26,902	29,721	38,437
5.00	28,808	26,713	27,118	26,294	26,741	26,798	26,791	26,820	27,049	29,255	38,163
5.50	30,793	30,127	30,768	29,675	28,911	29,164	28,957	29,230	29,689	30,403	38,544
6.00	39,712	40,291	39,579	39,911	38,148	38,744	40,703	39,987	43,514	40,073	40,210



### ตารางที่ 3.27(ต่อ)

ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)	ค่าหนึ่ง ที่ (x, y)	พื้นที่ได้ (counts/ min)
0.50,1.50	35,822	0.50,2.50	37,041	0.50,2.50	36,743	0.50,3.50	37,899	0.50,3.50	38,364	0.50,4.00	37,647	0.50,4.50	37,663	0.50,5.00	37,413	2.30,2.50	26,601
1.00,1.50	30,468	1.00,2.50	30,043	1.00,2.50	30,206	1.00,3.50	29,981	1.00,3.50	29,838	1.00,4.00	29,287	1.00,4.50	29,121	1.00,5.00	28,808	2.50,3.25	27,164
1.20,1.50	27,980	1.30,2.50	28,582	1.30,2.50	27,677	1.20,3.50	27,581	1.20,3.50	27,580	1.20,4.00	27,913	1.20,4.50	27,503	1.30,5.00	27,523	2.60,3.25	26,903
1.30,1.50	27,341	1.40,2.50	27,285	1.40,2.50	26,808	1.30,3.50	26,761	1.30,3.50	27,080	1.30,4.00	26,781	1.30,4.50	26,765	1.50,5.00	27,014	2.70,3.25	26,777
1.40,1.50	26,580	1.50,2.50	26,903	1.50,2.50	26,825	1.40,3.50	26,727	1.40,3.50	26,657	1.50,4.00	26,702	5.00,4.50	26,902	1.50,5.00	26,713	2.80,3.25	27,650
1.50,1.50	26,930	4.90,2.00	26,776	5.00,2.50	26,764	5.00,3.50	26,791	5.00,3.50	26,780	5.00,4.00	26,972	5.20,4.50	26,861	5.00,5.00	27,040	3.00,3.25	29,245
5.00,1.50	26,818	5.00,2.00	27,069	5.20,2.50	26,904	5.10,3.00	26,794	5.00,2.50	26,890	5.10,4.00	26,596	5.30,4.50	27,564	5.20,3.00	26,952	3.50,3.25	27,845
5.20,1.50	26,741	5.20,2.00	26,826	5.30,2.50	27,517	5.20,3.00	27,322	5.10,3.50	26,474	5.20,4.00	27,379	5.50,4.50	29,271	5.30,5.00	27,974	3.60,3.25	27,095
5.30,1.50	27,311	5.30,2.00	26,581	5.50,2.50	-	5.30,3.00	27,758	5.20,3.50	26,737	5.30,4.00	27,557	-	-	5.50,5.00	29,255	3.70,3.25	27,877
-	-	5.50,2.00	27,840	-	-	5.50,3.00	28,809	5.30,3.50	27,454	5.50,4.00	29,354	-	-	-	-	3.80,3.25	27,323
-	-	6.00,2.00	28,958	-	-	6.00,3.00	38,498	5.40,3.50	28,792	-	-	-	-	-	-	3.90,3.25	26,808
-	-	-	36,011	-	-	-	-	5.50,3.50	29,179	-	-	-	-	-	-	4.30,3.25	26,647
-	-	-	-	-	-	-	-	6.00,3.50	38,156	-	-	-	-	-	-	5.00,3.25	26,962

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.28 แสดงค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิว  
ด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างหยาบ)

y(cm) x(cm)	0.5	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
0.50	78,061	45,100	105,104	142,745	53,093	59,620
1.00	57,310	27,817	80,175	101,407	34,975	45,600
1.50	19,348	16,210	30,928	26,478	16,948	79,674
2.00	43,193	15,066	17,529	22,031	17,557	31,409
2.50	44,821	14,777	17,920	22,684	18,617	30,702
3.00	32,745	14,648	17,835	24,351	16,975	26,533
3.50	34,857	14,899	17,740	24,784	18,760	24,917
4.00	30,798	14,937	17,432	21,401	17,534	26,831
4.50	34,648	14,692	17,105	23,737	18,554	24,121
5.00	33,261	15,161	18,793	26,381	17,884	27,560
5.50	27,282	18,209	69,284	69,379	25,516	46,128
6.00	54,327	51,369	90,637	123,541	44,917	73,781

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

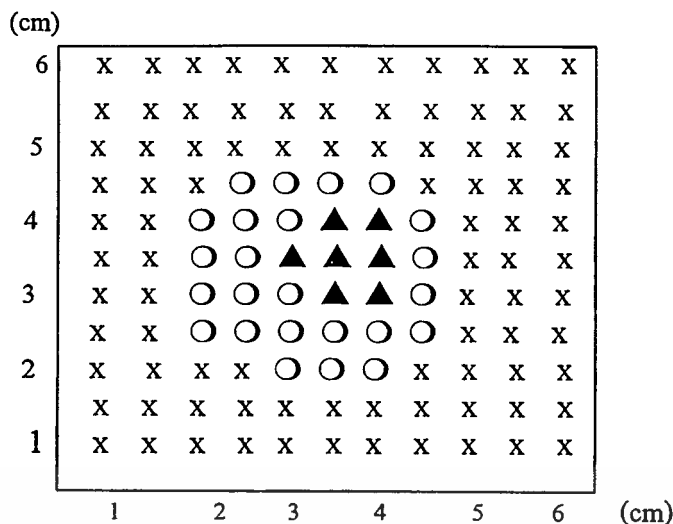


ตารางที่ 3.30 แสดงค่าความเข้มรังสี (counts/min) ที่แต่ละตำแหน่งบนผิว  
ด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 5 (การสแกนอย่างหยาบ)

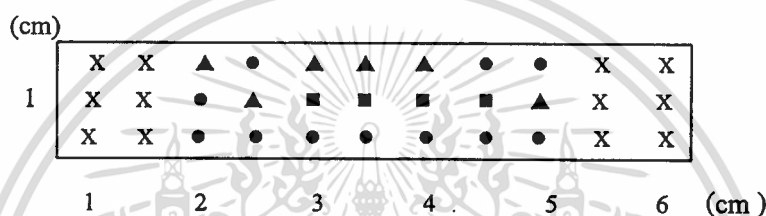
y x	0.5	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00
0.50	72,543	45,327	98,427	135,217	72,128	103,922
1.00	46,312	17,357	37,080	27,645	18,660	41,249
1.50	45,184	16,981	26,039	18,477	16,730	23,449
2.00	57,843	15,081	18,433	23,796	22,240	20,980
2.50	48,211	14,984	18,501	24,766	19,653	23,373
3.00	36,218	14,810	16,779	25,342	19,240	24,111
3.50	42,368	15,100	17,849	26,541	20,053	26,091
4.00	83,038	14,938	17,628	25,354	19,373	28,451
4.50	48,753	14,495	17,137	25,817	20,388	28,498
5.00	47,361	14,930	18,875	26,438	20,977	24,557
5.50	46,318	15,102	17,860	86,043	25,710	45,322
6.00	74,392	41,608	88,127	149,361	60,544	87,560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

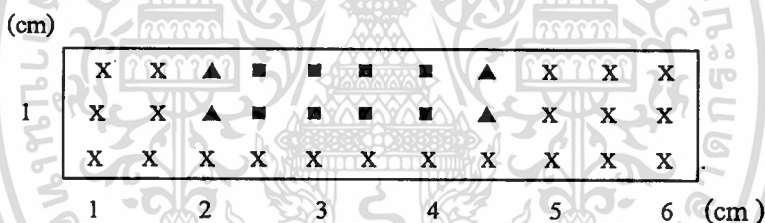




(ก)



(ข)

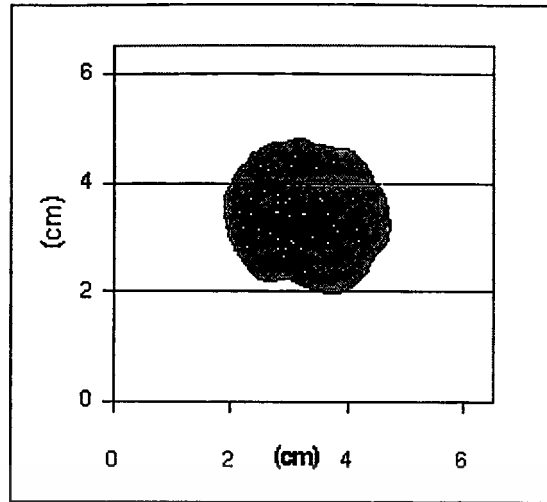


(ค)

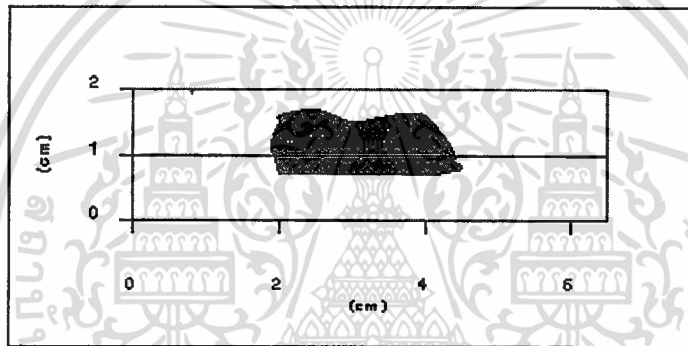
รูปที่ 3.14 (ก) (ข) และ (ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานจากการ  
สแกนอย่างหยาบบนค้ำานที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 1 ตามลำดับ

- ให้ x สำหรับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิก  $\leq 10\%$  เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิกต่ำสุด
- สำหรับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิก  $> 10-50\%$  เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิกต่ำสุด
  - ▲ สำหรับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิก  $> 51-90\%$  เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิกต่ำสุด
  - สำหรับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิก  $> 91-130\%$  เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิกต่ำสุด
  - สำหรับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิก  $> 131-170\%$  เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิกต่ำสุด
  - สำหรับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิก  $> 170\%$  เมื่อเทียบกับตำแหน่งที่มีพื้นที่ได้พิกต่ำสุด

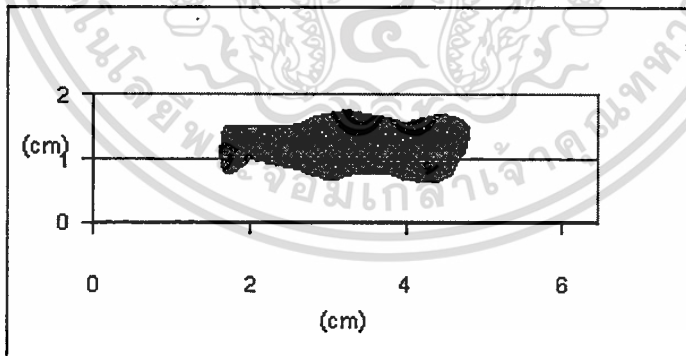
หมายเหตุ : จากรูปที่ 3.14 – 3.23 จะใช้สัญลักษณ์เดียวกันทั้งหมด



(ก)



(ข)



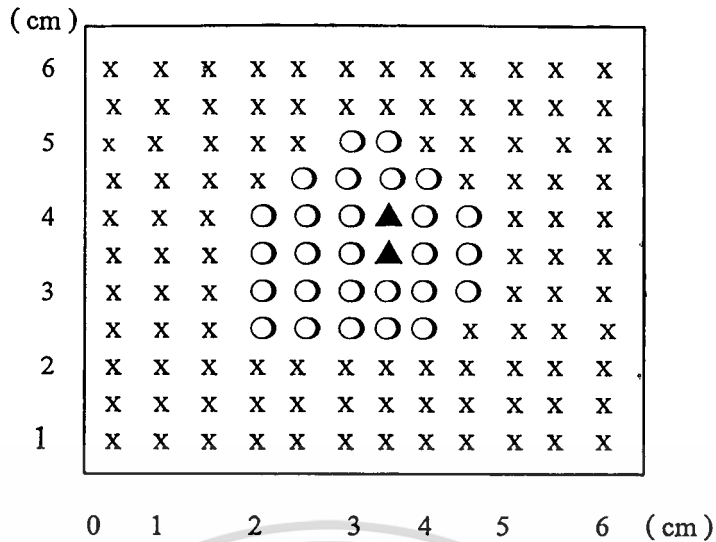
(ค)



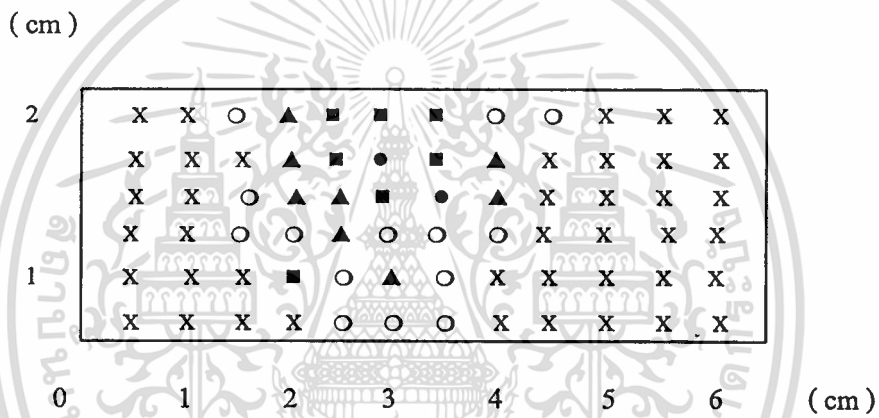
บริเวณโพรงที่ตรวจสอบได้

(สัญลักษณ์เดียวกันนี้ใช้กับรูป 3.17, 3.19, 3.21 และ 3.23)

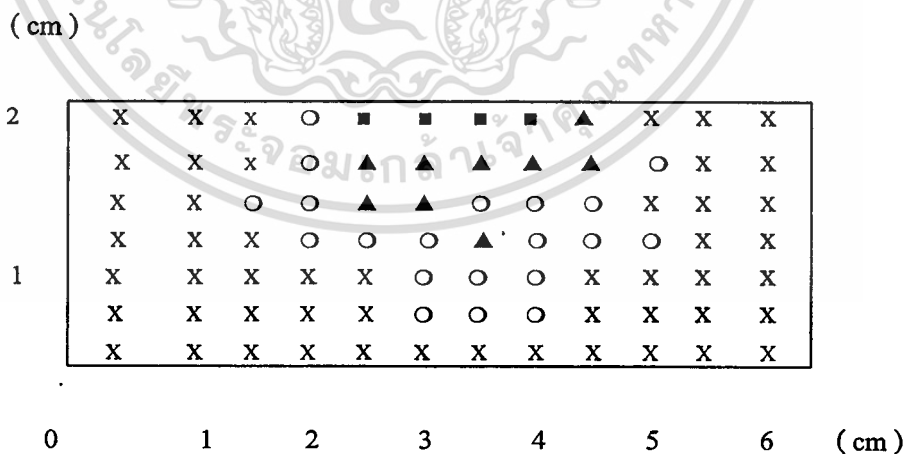
รูปที่ 3.15 (ก) (ข) และ (ค) ลักษณะของโพรงที่ได้จากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 1 ตามลำดับ



(ก)



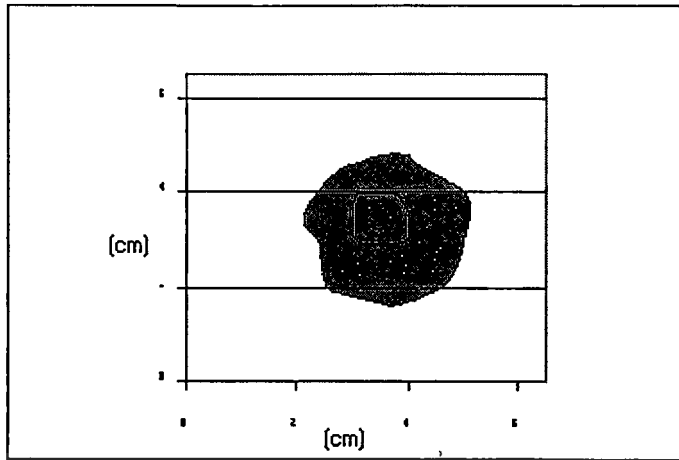
(ข)



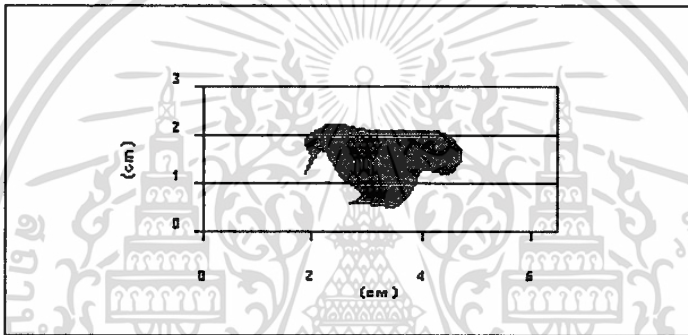
(ค)

รูปที่ 3.16 (ก) (ข) และ (ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหนาบบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 2 ตามลำดับ

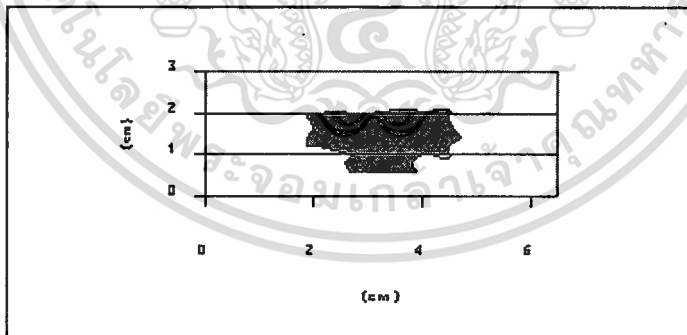
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



( ก )



( ข )

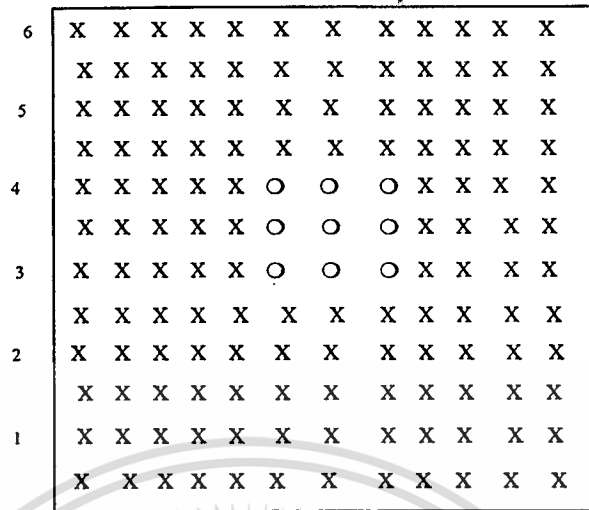


( ค )

รูปที่ 3.17 (ก) (ข) และ (ค) ลักษณะของโพรงที่ได้จากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 2 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

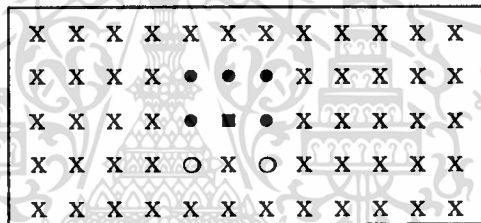
( cm )



0 1 2 3 4 5 6 ( cm )

( ก )

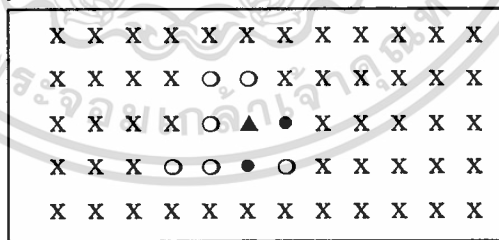
( cm )



0 1 2 3 4 5 6 ( cm )

( ข )

( cm )

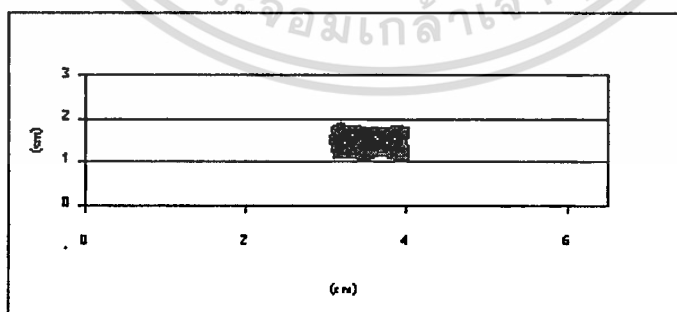
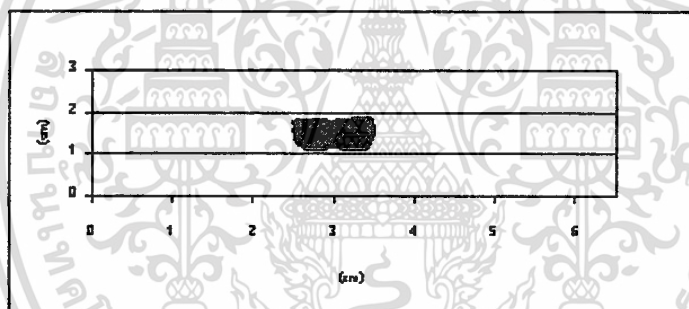
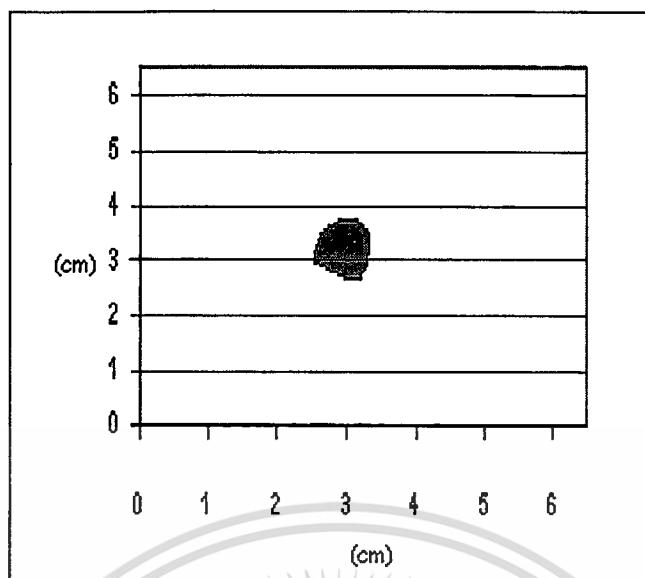


0 1 2 3 4 5 6 ( cm )

( ค )

รูปที่ 3.18 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหนาบบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

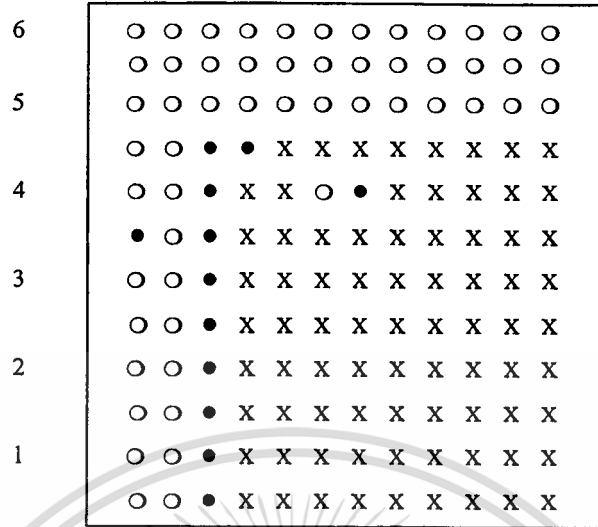


(ก)

รูปที่ 3.19 (ก) (ข) และ (ค) ลักษณะของโพรงที่ได้จากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 3 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

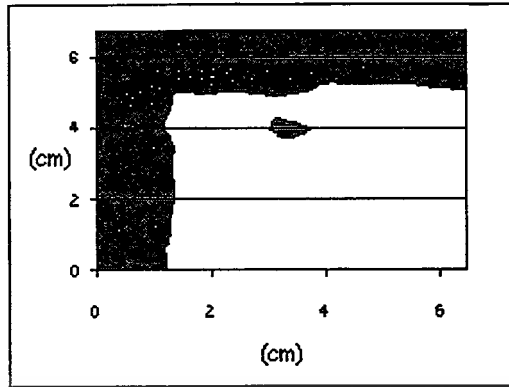
(cm)



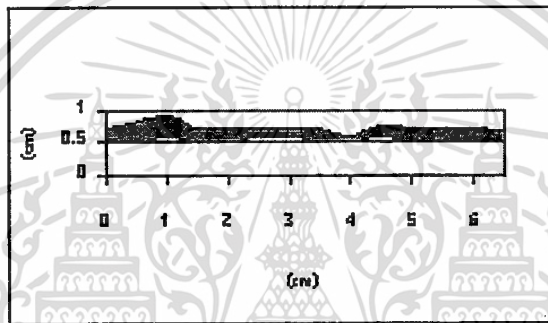
0 1 2 3 4 5 6 (cm)

รูปที่ 3.20 เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหยาบบน ด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 4

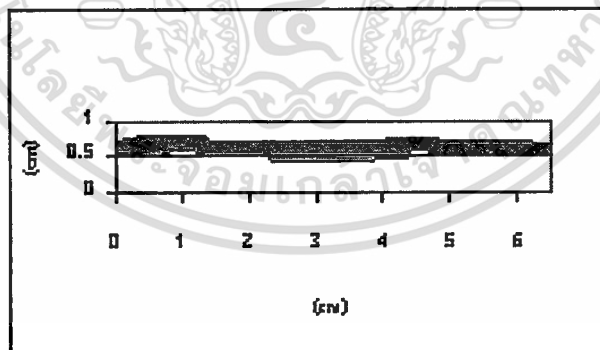
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



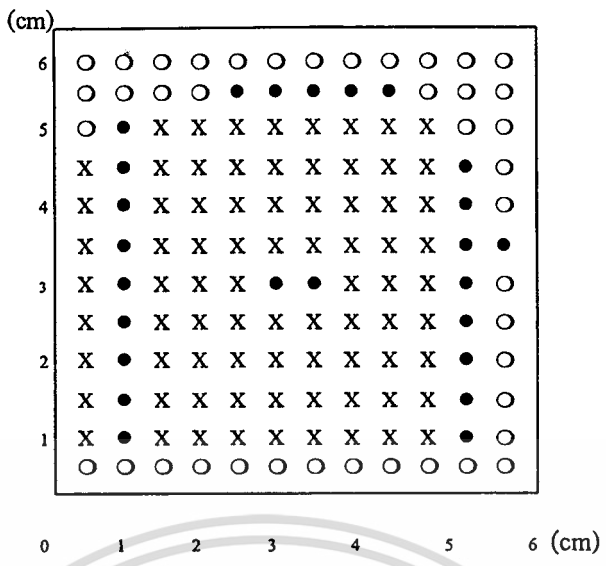
(ข)



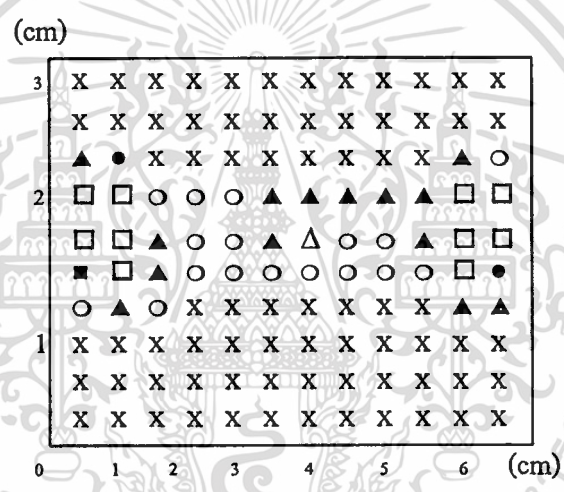
(ค)

รูปที่ 3.21 (ก) (ข) และ (ค) ลักษณะของโพรงที่ได้จากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 4 ตามลำดับ

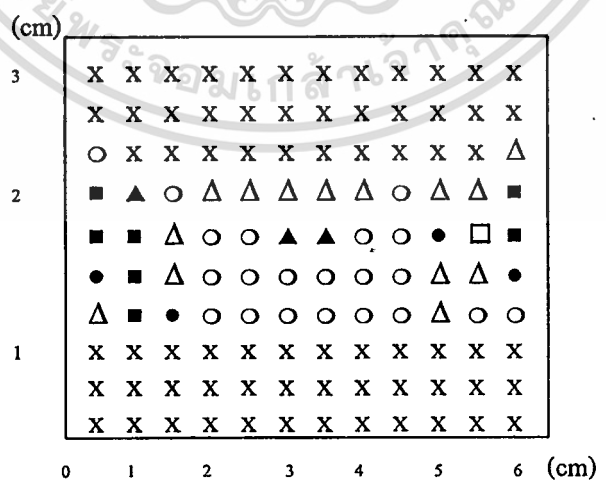
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



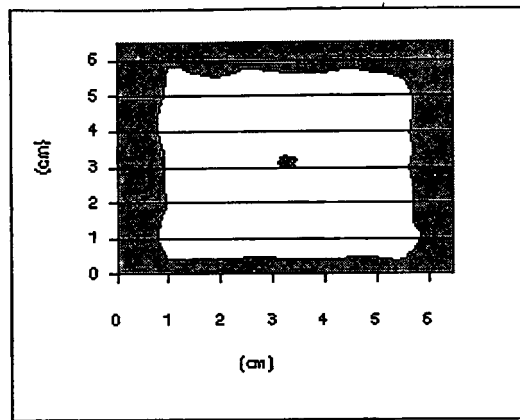
(ข)



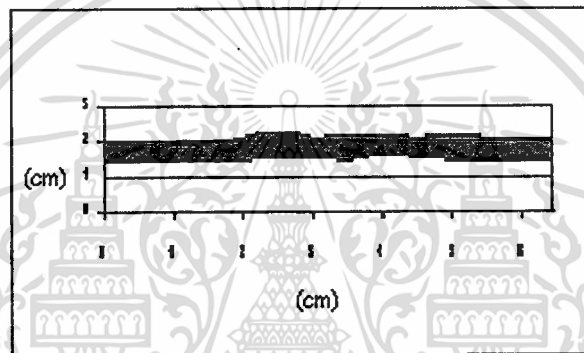
(ค)

รูปที่ 3.22 (ก) (ข) และ(ค) เป็นการพลอตค่าความเข้มของรังสีทะลุผ่านชิ้นงานออกมาจากการสแกนอย่างหนาบบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 5 ตามลำดับ

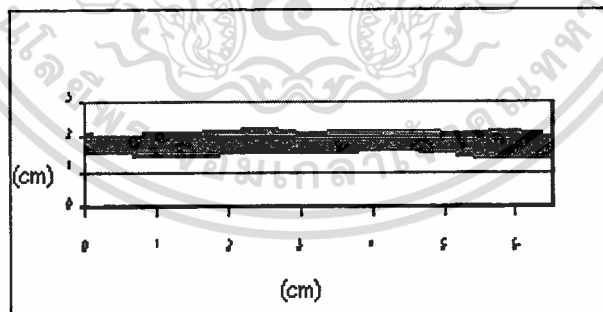
เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ผู้ใดเห็นนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.23 (ก) (ข) และ (ค) ลักษณะของโพรงที่ได้จากการสแกนอย่างละเอียดบนด้านที่ 1, 2 และ 3 ของชิ้นงานที่ 5 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สรุปผล ข้อเสนอแนะและแนวทางในการพัฒนา

ในบทนี้เป็นส่วนสรุปผลการดำเนินงานของการศึกษาตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็ก ตลอดจนปัญหาที่พบระหว่างการดำเนินงาน ตลอดจนข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนา ปรับปรุง และประยุกต์ใช้ในงาน เพื่อเป็นแนวทางในการดำเนินการวิจัยต่อไป

### 4.1 สรุปผลการตรวจหาโพรงในเหล็กโดยใช้รังสีแกมมา

4.1.1 การตรวจสอบแบบไม่ทำลายโดยใช้รังสีแกมมา อาศัยหลักการลดทอนของรังสีแกมมาเมื่อเคลื่อนที่ผ่านวัสดุออกมามากกระทบกับหัววัด ความเข้มของรังสีแกมมาที่ได้จากหัววัดขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายตัวด้วยกัน ได้แก่ ความหนาของวัสดุ buildup factor แหล่งกำเนิดรังสี เป็นต้น ดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะนำเอาข้อมูลความเข้มรังสีแกมมาที่ได้จากการวัดมาวิเคราะห์หาโพรงจากสมการ  $I = BI_0 e^{-\mu x}$  โดยตรง เนื่องจากไม่รู้ขนาดโพรงหรือความหนาของชิ้นงาน จึงเป็นการยากสำหรับการเลือก buildup factor ที่ถูกต้องส่งผลให้การวิเคราะห์หาขนาดของโพรงนั้นคลาดเคลื่อนไป ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบการวิเคราะห์โพรง (เพื่อหลีกเลี่ยงข้อผิดพลาดดังกล่าว) โดยการสแกนทั่วชิ้นงานแล้วนำค่าความเข้มรังสีในแต่ละตำแหน่งที่ทำการวัดมาเปรียบเทียบหาการเปลี่ยนแปลงของความเข้มรังสีเพื่อวิเคราะห์หาโพรง วิธีการที่ได้กล่าวมานี้ใช้ได้สะดวก และให้ค่าความถูกต้องมากกว่าการคำนวณจากสมการข้างต้น

4.1.2 การเปรียบเทียบขนาดของโพรงในชิ้นงานที่ได้จากการตรวจสอบกับขนาดจริงของโพรง (ซึ่งแสดงในรูป 4.1) แสดงอยู่ในรูป 4.2 - 4.6 ส่วนค่าความผิดพลาดของการทดลองแสดงอยู่ในตารางที่ 4.1 และมีค่าสูงสุดไม่เกิน 20 %

4.1.3 ในการเลือกชิ้นงานมาตรวจสอบนั้นต้องคำนึงถึงความหนาของชิ้นงานให้เหมาะสมกับความแรงของรังสีแกมมาที่ใช้ (ตามทฤษฎีที่กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 2.2) ผลจากข้อมูลในงานวิจัยนี้พบว่าแหล่งกำเนิด  $^{137}\text{Cs}$  ซึ่งให้รังสีแกมมาพลังงาน 0.662 MeV ที่ความแรง 100 mCi ใช้ได้ดีกับเหล็กที่มีความหนา ในช่วง 30-100 mm

4.1.4 ค่าความผิดพลาดในการทดลองนั้นนอกจากจะเกิดจากค่าความผิดพลาดเชิงสถิติ (ดูจากภาคผนวก ก.) ของจำนวนนับ และการเลือกเบ็คกราวด์ แล้วยังขึ้นกับลักษณะของชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบด้วย คือ

4.1.4.1 ในการตรวจสอบวัสดุเมื่อขนาดของโพรงไม่เล็กกว่าขนาดของลำรังสี และพื้นที่ผิวในการตรวจสอบเท่ากัน ค่าความถูกต้องของการตรวจสอบจะขึ้นกับขนาดความลึกของ

โพรง คือถ้าโพรงมีความลึกมากกว่าจะให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าที่มีความลึกของโพรงน้อยกว่า ดูได้จากข้อมูลในด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 2 กับด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 3 หรือด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 2 กับด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 3

4.1.4.2 ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากัน พื้นที่ผิวของชิ้นงานที่ล่ำรังสีตกกระทบที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของลำรังสีที่ใช้จะให้ค่าความถูกต้องสูงกว่าชิ้นงานที่มีขนาดของพื้นที่ผิวน้อยกว่าหรือใกล้เคียงกับขนาดของลำรังสีคือ ในการตรวจวัดชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดลำรังสีข้อมูลที่ได้นั้นจะมีจำนวนมากกว่า และง่ายต่อการวิเคราะห์ผลกว่าชิ้นงานที่มีขนาดเล็กกว่าหรือเท่ากับขนาดลำรังสี ดูจากข้อมูลในด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 4 กับด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 5 หรือด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 4 กับด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 5

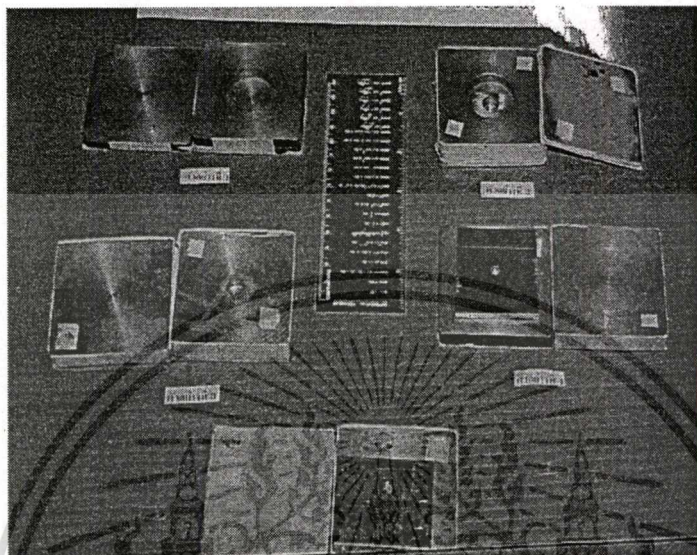
4.1.4.3 ในการตรวจสอบชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากัน และพื้นที่ผิวในการตรวจสอบเท่ากัน พบว่าเมื่อขนาดของโพรง (ความกว้าง และความยาว) ใหญ่กว่าขนาดของลำรังสี จะให้ผลการตรวจสอบมีความถูกต้องสูงกว่าชิ้นงานที่มีขนาดของโพรง (ความกว้าง หรือความยาว) ที่น้อยกว่าขนาดของลำรังสี ดูได้จากข้อมูลในด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 2 กับด้านที่ 2 ของชิ้นงานที่ 5 หรือด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 2 กับด้านที่ 3 ของชิ้นงานที่ 5 และถ้ารัศมีของโพรงที่นำมาตรวจสอบถ้าน้อยกว่า 5 เท่าของรัศมีของลำรังสีจะไม่สามารถตรวจสอบได้ ดังปรากฏในการตรวจสอบโพรงรูปทรงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 mm ในด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 5

4.1.4.4 ในการตรวจสอบชิ้นงานที่ขนาดของโพรงไม่เล็กกว่าขนาดของลำรังสีพบว่าเมื่อความลึกโพรงน้อยมากเมื่อเทียบกับความหนาของชิ้นงานความผิดพลาดก็จะสูงขึ้นเพราะความแตกต่างของความเข้มรังสีระหว่างส่วนที่มีโพรงกับส่วนที่ไม่มีโพรงมีค่าไม่ต่างจากความผิดพลาดทางสถิติมากนัก จากข้อมูลในงานวิจัยพบว่าชิ้นงานที่มีความหนา 30 mm และมีความลึกของโพรง 4 mm ยังสามารถตรวจสอบได้

4.1.5 เมื่อพิจารณาลักษณะของชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบทั้งหมด สามารถแบ่งตามลักษณะของโพรงได้ 2 แบบคือ แบบที่ 1 เป็นชิ้นงานที่ลักษณะของโพรงไม่ซับซ้อน ( ชิ้นงานที่ 1 และ 3 ) และแบบที่ 2 เป็นชิ้นงานที่ลักษณะของโพรงมีความซับซ้อน ( ชิ้นงานที่ 2 , 4 และ 5 ) ในงานวิจัยพบว่าในชิ้นงานที่มีความหนาเท่ากัน พื้นที่ผิวในการตรวจสอบเท่ากัน ความซับซ้อนของโพรงนั้นมีอิทธิพลต่อการตรวจสอบไม่เท่ากับขนาดของโพรง(เมื่อขนาดของโพรงไม่เล็กกว่าขนาดของลำรังสี) ดังปรากฏในข้อมูลด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 3 กับด้านที่ 1 ของชิ้นงานที่ 4

4.1.6 ในการเลือก background straight line นั้นไม่มีผลต่อความผิดพลาดในการทดลองมากนัก (เนื่องจากปริมาณนับได้พีคสูง) และในงานวิจัยนี้พบว่าค่าความผิดพลาดในการเลือก background straight line นั้นไม่เกิน 1 %

4.1.7 จากการทดลองตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในเหล็กในงานวิจัยนี้ถือเป็นต้นแบบของการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวโดยใช้รังสีแกมมาสแกน และสามารถนำไปใช้ตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวกับโลหะชนิดอื่น ๆ ได้



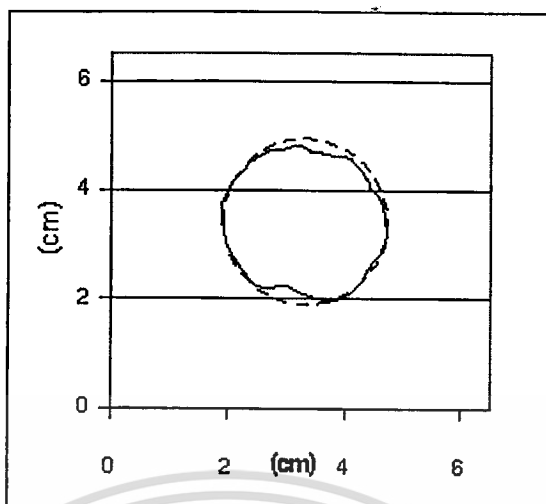
รูปที่ 4.1 ลักษณะโพรงจริงที่ใช้ทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ค่าความถูกต้องการตรวจสอบชิ้นงานทั้ง 5 ชิ้นงาน (ดูภาคผนวก ง)

ชิ้นงานที่	ด้านที่	ความผิดพลาดเฉลี่ย (%)
1	1	3.30
	2	12.50
	3	12.50
2	1	2.47
	2	3.30
	3	5.30
3	1	10.00
	2	10.00
	3	14.29
4	1	2.50
	2	13.33
	3	16.50
5	1	3.74
	2	10.00
	3	10.00

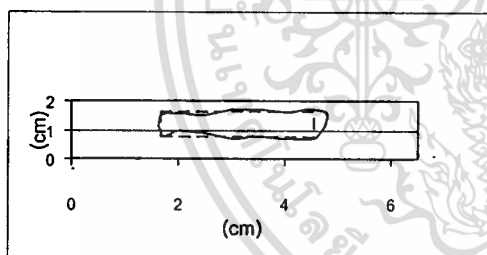
หมายเหตุ : \* เป็นค่าความคลาดเคลื่อนของโพรงรูปกรอบสี่เหลี่ยม ส่วนโพรงรูปทรงกระบอกนั้นเนื่องจากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยเกินไปคือน้อยกว่า  $1/5$  เท่าของเส้นผ่านศูนย์กลางของลำรังสีซึ่งถือเป็นขีดจำกัดในการตรวจสอบนี้จึงไม่นำมาหาค่าความคลาดเคลื่อน



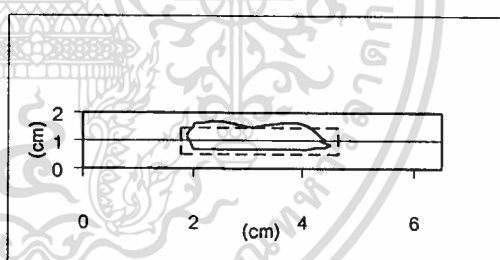
(ก)

ขอบเขตของโพรงจริง

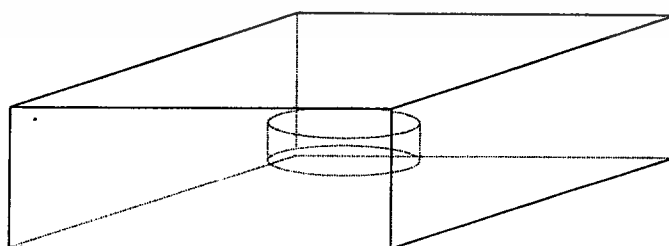
ขอบเขตของโพรงที่ได้จากการตรวจสอบ



(ข)



(ค)



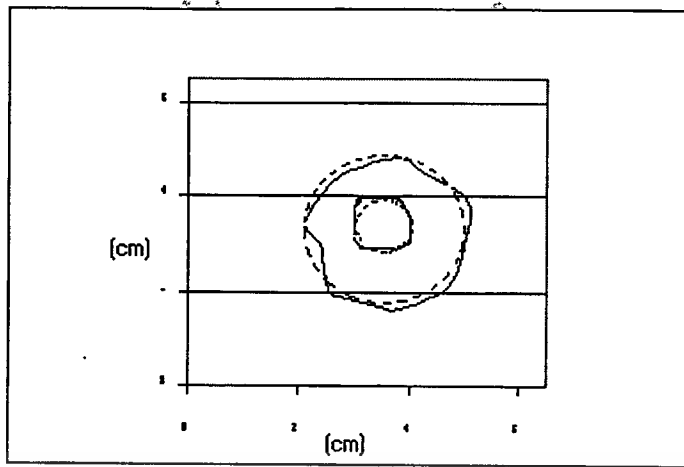
(ง)

รูปที่ 4.2 (ก) (ข) และ(ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับโพรงจริงใน

ด้านที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ รูป (ง) ลักษณะของโพรงจริงที่ใช้ในการตรวจสอบ

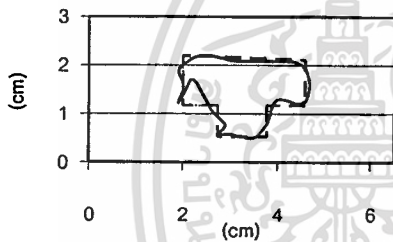
ในชิ้นงานที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

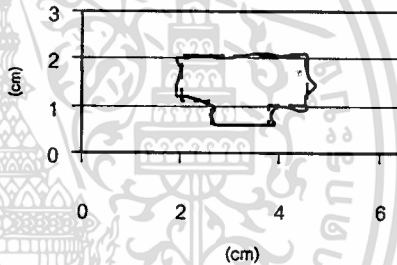


(ก)

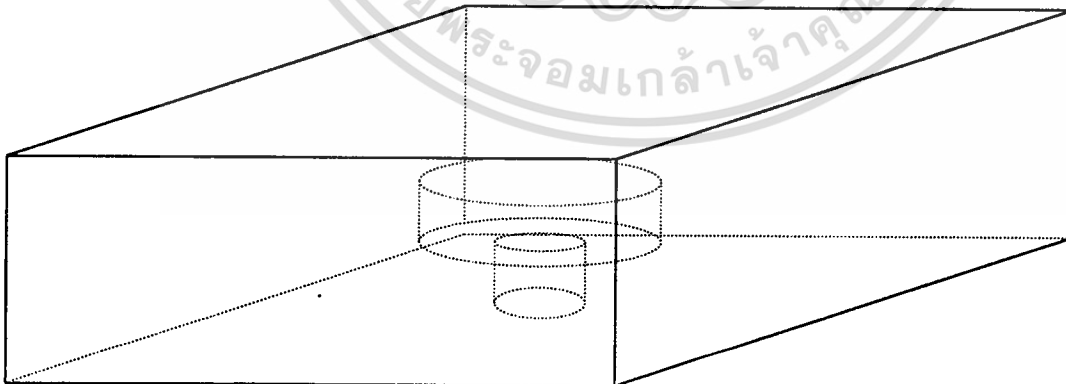
----- ขอบเขตของโพรงจริง  
 \_\_\_\_\_ ขอบเขตของโพรงที่ได้จากการตรวจสอบ



(ข)



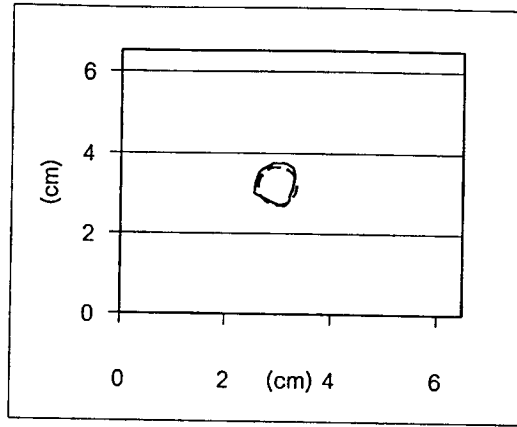
(ค)



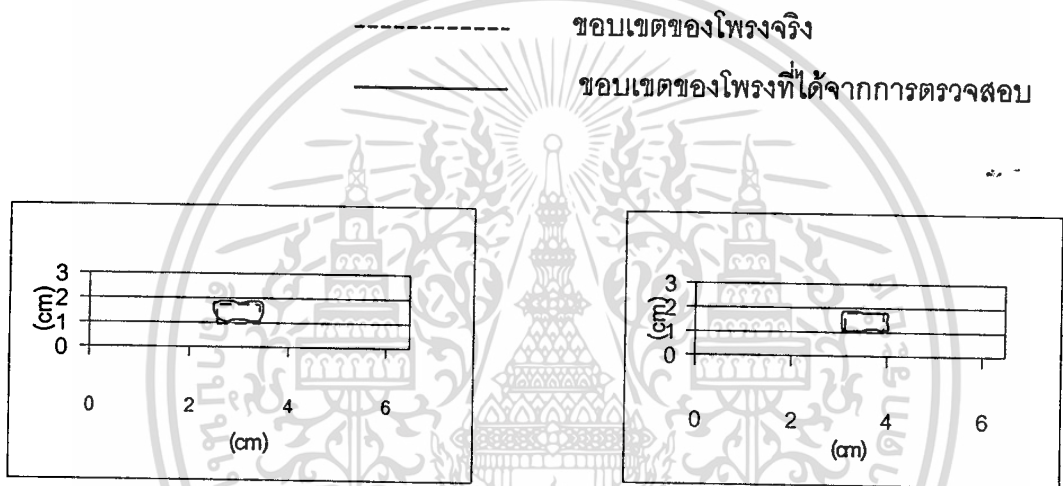
(ง)

รูปที่ 4.3 (ก) (ข) และ (ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับ โพรงจริงใน  
 ด้านที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ รูป (ง) ลักษณะของโพรงจริงที่ใช้ในการตรวจสอบ  
 ในชิ้นงานที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

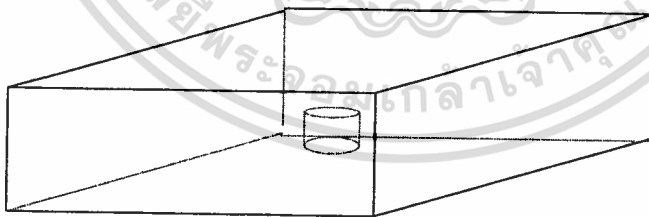


(ก)



(ข)

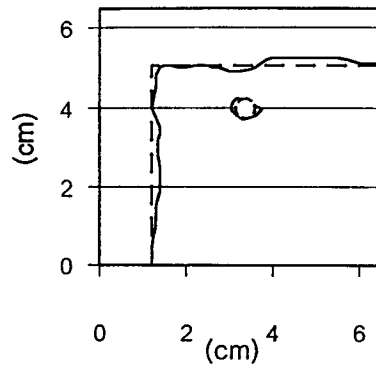
(ค)



(ง)

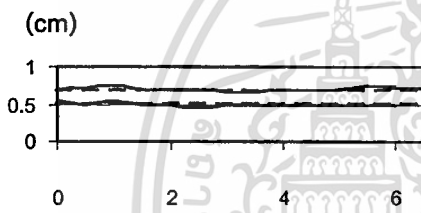
รูปที่ 4.4 (ก) (ข) และ(ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับ โพรงจริงใน  
 ด้านที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ รูป (ง) ลักษณะของโพรงจริงที่ใช้ในการตรวจสอบ  
 ในชิ้นงานที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

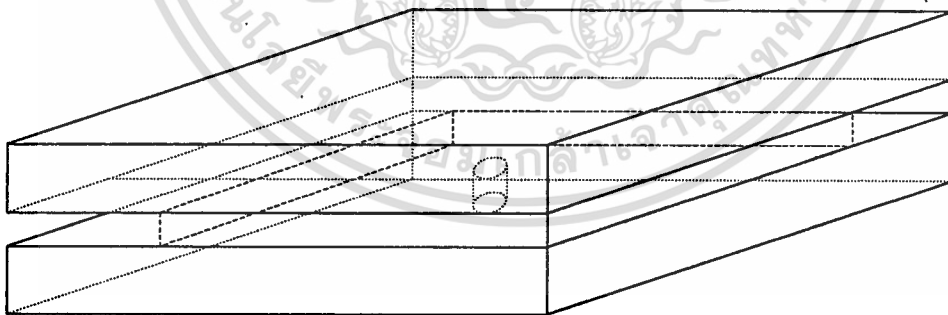
----- ขอบเขตของโพรงจริง  
 \_\_\_\_\_ ขอบเขตของโพรงที่ได้จากการตรวจสอบ



(ข)

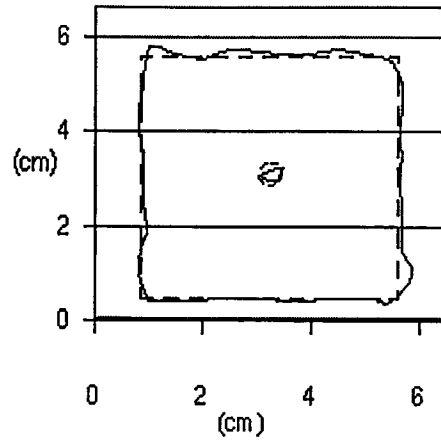


(ค)



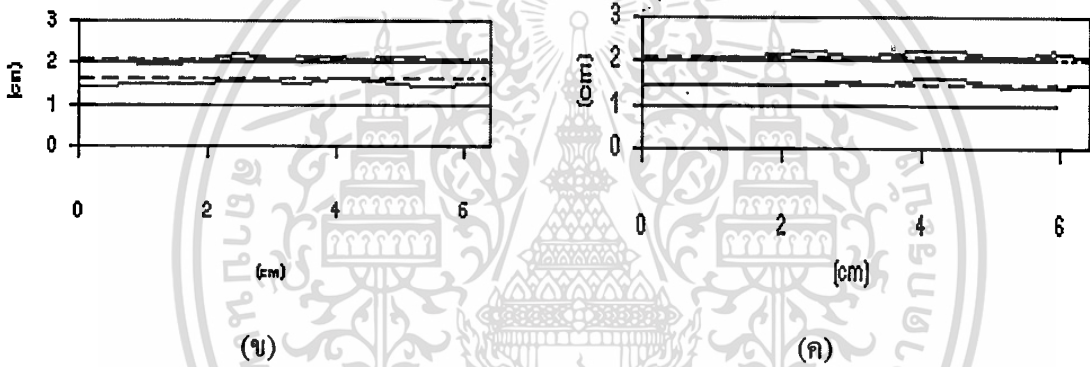
(ง)

รูปที่ 4.5 (ก) (ข) และ (ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับ โพรงจริงใน  
 ด้านที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ รูป (ง) ลักษณะของโพรงจริงที่ใช้ในการตรวจสอบ  
 ในชิ้นงานที่ 4



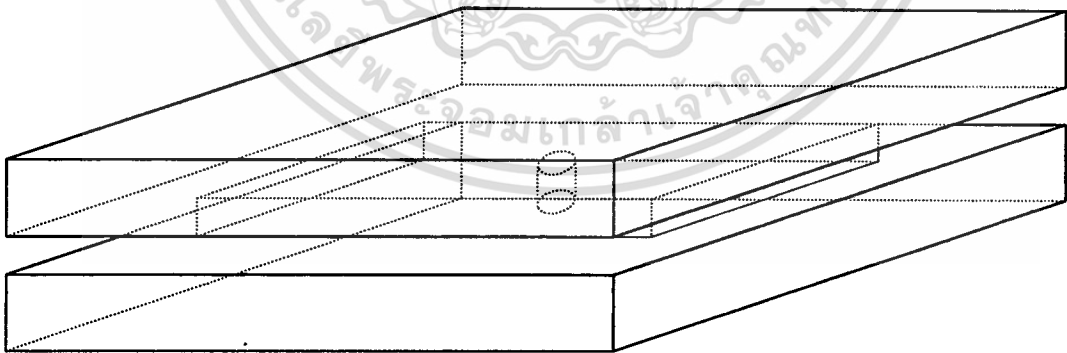
(ก)

----- ขอบเขตของโพรงจริง  
 \_\_\_\_\_ ขอบเขตของโพรงที่ได้จากการตรวจสอบ



(ข)

(ค)



(ง)

รูปที่ 4.6 (ก) (ข) และ (ค) เปรียบเทียบลักษณะของโพรงที่ทำการตรวจสอบได้ กับโพรงจริงใน  
 ด้านที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ รูป (ง) ลักษณะของโพรงจริงที่ใช้ในการตรวจสอบ  
 ในชิ้นงานที่ 5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาต่อไป

4.2.1 ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ Cs-137 ความแรง 100 mCi เป็นแหล่งกำเนิดรังสีแกมมาซึ่งมีพลังงาน 0.662 MeV พบว่าเหมาะสมกับชิ้นงานในช่วงความหนา 30 – 100 mm ในการตรวจสอบโพรงในเหล็กที่มีความหนามากขึ้นจำเป็นต้องเพิ่มความแรงของแหล่งกำเนิด หรือไม่ก็เปลี่ยนแหล่งกำเนิดที่ให้รังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงขึ้น แต่ถ้าต้องการตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในวัสดุที่มีความหนาน้อยกว่าที่ทำการศึกษาในงานวิจัยนี้ได้ โดยการเสริมแผ่นเหล็กที่ไม่มีความบกพร่องประกบเข้าไปเพื่อควบคุม dead time ให้  $\leq 40\%$

4.2.2 การตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวโดยใช้รังสีแกมมาสามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อตรวจหาโพรงหรือรอยร้าวในโครงสร้างขนาดใหญ่ ซึ่งไม่สามารถถอดชิ้นงานมาตรวจสอบในห้องปฏิบัติการได้ โดยใช้หัววัดภาคสนามในการตรวจสอบแทน สำหรับการศึกษาด้านนี้การใช้หัววัดโซเดียมไอโอไดด์ (NaI Detector) ในการตรวจสอบก็เพียงพอแล้ว หัววัดโซเดียมไอโอไดด์ได้เปรียบกว่าหัววัดเจอร์มาเนียมลิเทียมคือ เป็นหัววัดที่ไม่ต้องหล่อเย็นและมีประสิทธิภาพสูงกว่า แต่ในงานวิจัยนี้ใช้หัววัดเจอร์มาเนียมลิเทียมเนื่องจากภาคฟิสิกส์ประยุกต์มีหัววัดนี้อยู่แล้ว

4.2.3 จากผลการวิจัยนี้จะเห็นว่า การตรวจสอบโพรงโดยการสแกนรังสีแกมมาบนชิ้นงานที่ต้องการตรวจสอบนั้นมีความถูกต้องในระดับที่ได้นำไปประยุกต์ใช้งานได้ (ความคลาดเคลื่อน  $\leq 20\%$ ) งานที่ควรพัฒนาต่อไปก็คือระบบการสแกนอัตโนมัติเพื่อเพิ่ม ความรวดเร็ว และความแม่นยำในการเปลี่ยนตำแหน่งสำหรับการสแกน และยังให้ความปลอดภัยสูงสำหรับผู้ปฏิบัติงาน

4.2.4 ในการตรวจสอบหาโพรงหรือรอยร้าวด้วยรังสีแกมมาโดยการสแกนนี้เราสามารถที่จะเพิ่มความแม่นยำให้สูงขึ้น และทำให้สามารถวัดโพรงที่มีขนาดเล็ก ๆ ได้ดีขึ้นอีกถ้าบีบลำรังสีให้เล็กลง

# เอกสารอ้างอิง

- 1). Bliz, Jack. Electrical and Magnetic Methods of Nondestructive Testing. Bristel : Addison Wesley . 1991
- 2). อรณรงค์ ศรีสันติสุข. นิวเคลียร์ฟิสิกส์. สงขลา : มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. 2530.
- 3). Cohen-Tannondji, C. et. al.. Atom – Photon Interaction : Basic Processes and Application. New York : John Wiley. 1998.
- 4). F.H. Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry. New York : Wiley. 1986
- 5). Knoll , Glenn F. Radiation Detection and Measurement. New York : Wiley . 1989.
- 6). Halmshaw , R. Nondestructive Testing. London : Edward Arnold. 1991.
- 7). Canberra Industry. Manual of Multichannel Analyzer. 1984.
- 8). Teansomprasong, P. Elastic Scattering of Eu Gamma-Rays. PH.D. Thesis of University of North Queensland the Department of Physics , James Cook University of North Queensland, Australia. 1986.
- 9). ASTM standard : E 1000 (1982 ), Standard Guide for Radiologic Real-time Imaging.
- 10). Mangclaviraj, V. Nuclear Instrumentation Laboratory Manual. Master physics Chulalongkorn University. 1989.
- 11). Scharwtz, G. and Weidinger, A. Nuclear Condensed Matter Physics. Chichester : Wiley. 1996.
- 12). Lin, U.-T. An Experimental Study of Gamma Ray Buildup factors for a Point Isotopic Source in Stratified Spherical Shield, Nuclear Science and Engineering. 1979.
- 13). Kaplan, I. Nuclear Physics. Massachusetts : Addison-Wesley. 1962.
- 14). Anderson, David. W. Absorption of Ionizing Radiation. Baltimore : University Park Press. 1984.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

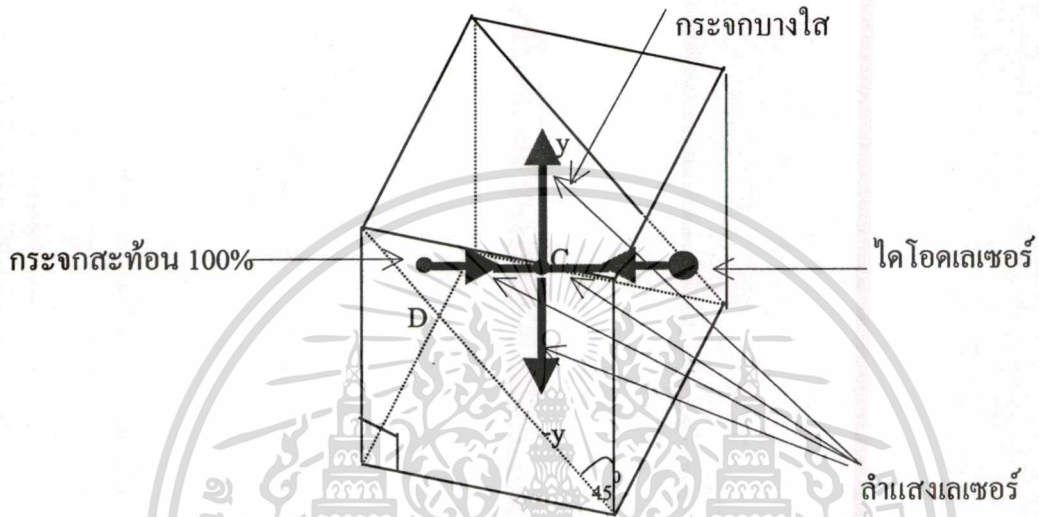
ภาคผนวก ก.



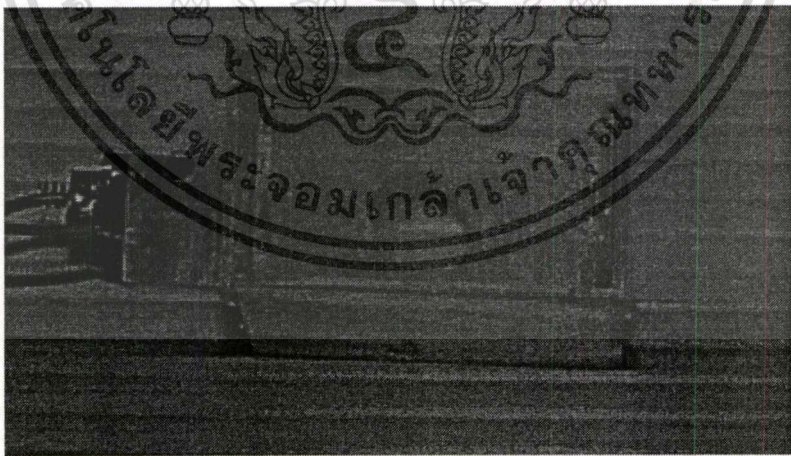
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ชุดเลเซอร์

ลำแสงเลเซอร์ถูกนำมาบ่งบอกลำรังสีแกมมาซึ่งไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตา โดยอาศัยหลักการสะท้อน และหักเหของแสงเมื่อเดินทางผ่านตัวกลางที่ 2 ในชุดเลเซอร์ที่สร้างขึ้นนี้มีลักษณะเป็นกล่องพลาสติกรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสที่ใช้กระจกบางใสเป็นตัวกลางที่ 2 และใช้ไดโอดเลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดเลเซอร์ ดังแสดงในรูป 1 และ รูปที่ 2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 ลักษณะของชุดเลเซอร์ที่ใช้ในการวิจัย



รูปที่ 2 ภาพถ่ายชุดเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงเลเซอร์ที่ออกจากไดโอดเลเซอร์ (ในแนวขนานกับพื้น) ตกกระทบกับกระจกบางใส (ทำมุม  $45^\circ$  กับแนวราบ) ที่จุด C ลำแสงส่วนหนึ่งจะสะท้อนขึ้นตามแนวตั้ง ทำมุม  $90^\circ$  กับพื้น อีกส่วนหนึ่งจะหักเหผ่านกระจก (กระจกบางมากจนถือว่ามุมที่หักเหไปน้อยมากลำแสงเลเซอร์ที่ผ่านไปถึงยังคงอยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน) แล้วตกกระทบกระจกสะท้อนกลับร้อยเปอร์เซ็นต์ ที่จุด D (กระจกสะท้อนวางทำมุม  $90^\circ$  กับพื้น) ลำแสงเลเซอร์จะสะท้อนกลับทับเส้นทางเดิม แต่ทิศทางตรงกันข้ามแล้วตกกระทบกระจกบางใสที่จุด C อีกครั้งแล้วเกิดการสะท้อนและหักเห โดยแนวสะท้อนไปตามทิศทาง  $-y$  และทำมุม  $90^\circ$  กับพื้น จะเห็นว่า ลำรังสีในทิศทาง  $y$  และลำรังสีในทิศทาง  $-y$  อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้แนวเส้นตรง  $y$  และ  $-y$  แทนเส้นทางเดินของลำรังสีแกมมา (โดยให้ลำแสงเลเซอร์ด้าน  $y$  ตกกระทบกับปลาย collimator และลำแสงเลเซอร์ด้าน  $-y$  ตกกระทบกับตำแหน่งที่ต้องการวัด)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## THE METHOD OF LEAST SQUARES

### Fitting a Straight Line

Suppose that each of ten patients is treated first with a certain amount of a standard drug  $A$  and then with an equal amount of a new drug  $B$ , and that the change in blood pressure induced by each drug is observed for each patient. This change in blood pressure will be called the *response* of the patient. For  $i = 1, \dots, 10$ , we shall let  $x_i$  denote the response, measured in appropriate units, of the  $i$ th patient when he receives drug  $A$ , and we shall let  $y_i$  denote his response when he receives drug  $B$ . We shall suppose also that the observed values of the responses are as given in Table 10.1. The ten points  $(x_i, y_i)$  for  $i = 1, \dots, 10$  are plotted in Fig. 10.1.

Suppose now that we are interested in describing the relationship between the response  $y$  of a patient to drug  $B$  and his response  $x$  to drug  $A$ . In order to obtain a simple expression for this relationship, we might wish to fit a straight line to the ten points plotted in Fig. 10.1. Although these ten points obviously do not lie exactly on a straight line, we might believe that the deviations from such a line are caused by the fact that the observed change in the blood pressure of each patient is affected not only by the two drugs but also by various other factors. In other words, we might believe that if it were possible to control all these other factors, the observed points would actually lie on a straight line. We might believe further that if we measured the responses to the two drugs for a very large number of patients, instead of for just ten patients, we would then find that the observed points tend to cluster along a straight line. Perhaps we might also wish

Table 10.1

$i$	$x_i$	$y_i$
1	1.9	0.7
2	0.8	-1.0
3	1.1	-0.2
4	0.1	-1.2
5	-0.1	-0.1
6	4.4	3.4
7	4.6	0.0
8	1.6	0.8
9	5.5	3.7
10	3.4	2.0

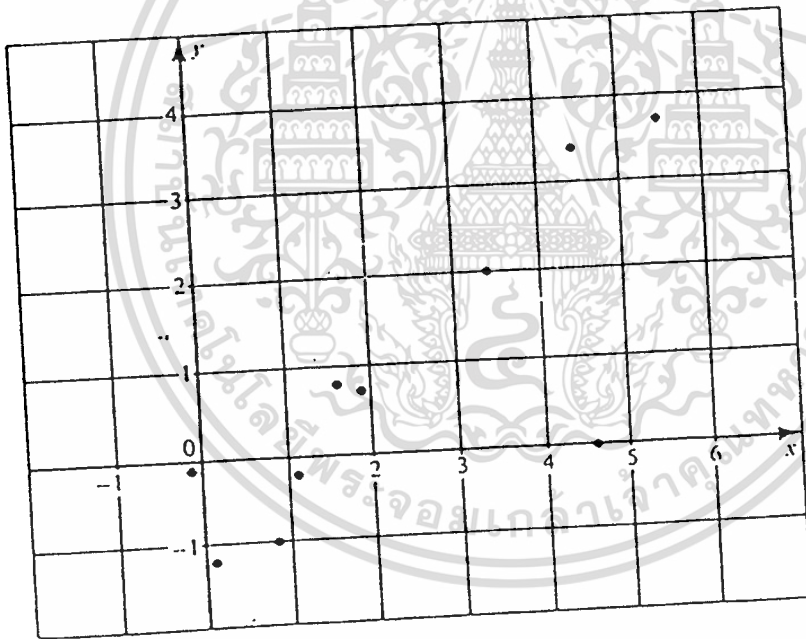


Figure 10.1 A plot of the observed values in Table 10.1.

to be able to predict the response  $y$  of a future patient to the new drug  $B$  on the basis of his response  $x$  to the standard drug  $A$ . One procedure for making such a prediction would be to fit a straight line to the points in Fig. 10.1, and to use this line for predicting the value of  $y$  corresponding to any given value of  $x$ .

It can be seen from Fig. 10.1 that if we did not have to consider the point (4.6, 0.0), which is obtained from the patient for whom  $i = 7$  in Table 10.1, then the other nine points lie roughly along a straight line. One arbitrary line which fits reasonably well to these nine points is sketched in Fig. 10.2. However, if we wish

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

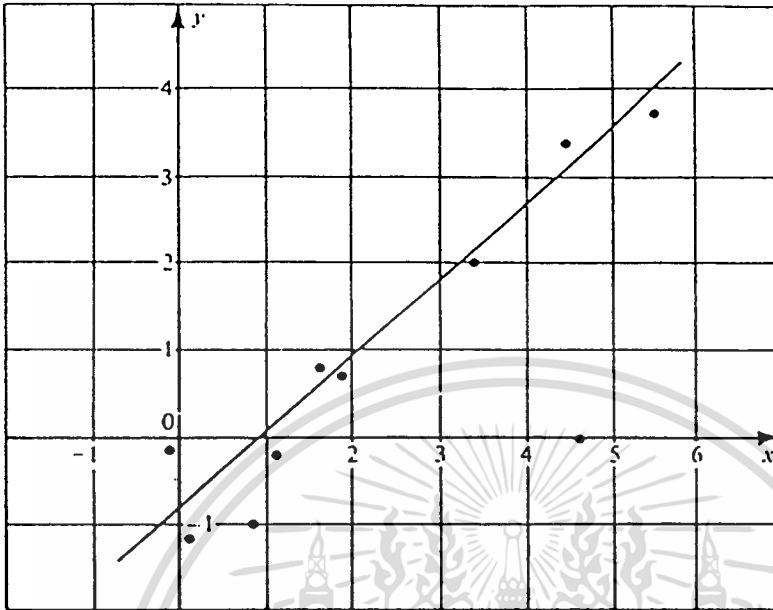


Figure 10.2 A straight line fitted to nine of the points in Table 10.1.

to fit a straight line to all ten points, it is not clear just how much the line in Fig. 10.2 should be adjusted in order to accommodate the anomalous point. We shall now describe a method for fitting such a line.

### The Least-Squares Line

We shall assume here that we are interested in fitting a straight line to the points plotted in Fig. 10.1 in order to obtain a simple mathematical relationship for expressing the response  $y$  of a patient to the new drug  $B$  as a function of his response  $x$  to the standard drug  $A$ . In other words, our main objective is to be able to predict closely a patient's response to drug  $B$  from his response  $x$  to drug  $A$ . We are interested, therefore, in constructing a straight line such that, for each observed response  $x_i$ , the corresponding value of  $y$  on the straight line will be as close as possible to the actual observed response  $y_i$ . The vertical deviations of the ten plotted points from the line drawn in Fig. 10.2 are sketched in Fig. 10.3.

One method of constructing a straight line to fit the observed values is called *the method of least squares*. According to this method, the line should be drawn so that the sum of the squares of the vertical deviations of all the points from the line is a **minimum**. We shall now study this method in more detail.

Consider an arbitrary straight line  $y = \beta_1 + \beta_2 x$ , in which the values of the constants  $\beta_1$  and  $\beta_2$  are to be determined. When  $x = x_i$ , the height of this line is

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

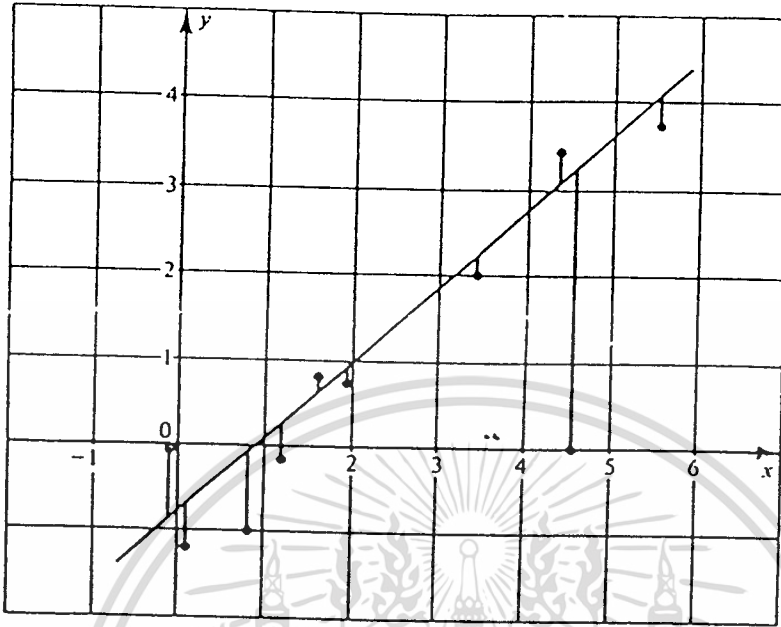


Figure 10.3 Vertical deviations of the plotted points from a straight line.

$\beta_1 + \beta_2 x_i$ . Therefore, the vertical distance between the point  $(x_i, y_i)$  and the line is  $|y_i - (\beta_1 + \beta_2 x_i)|$ . Suppose that the line is to be fitted to  $n$  points, and let  $Q$  denote the sum of the squares of the vertical distances at the  $n$  points. Then

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_1 + \beta_2 x_i)]^2. \quad (1)$$

The method of least squares specifies that the values of  $\beta_1$  and  $\beta_2$  must be chosen so that the value of  $Q$  is minimized.

It is not difficult to minimize the value of  $Q$  with respect to  $\beta_1$  and  $\beta_2$ . We have

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_1 - \beta_2 x_i) \quad (2)$$

and

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_2} = -2 \sum_{i=1}^n (y_i - \beta_1 - \beta_2 x_i) x_i. \quad (3)$$

By setting each of these two partial derivatives equal to 0, we obtain the following pair of equations:

$$\begin{aligned} \beta_1 n + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_i &= \sum_{i=1}^n y_i, \\ \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 &= \sum_{i=1}^n x_i y_i. \end{aligned} \quad (4)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

The equations (4) are called the *normal equations* for  $\beta_1$  and  $\beta_2$ . By considering the second-order derivatives of  $Q$ , we can show that the values of  $\beta_1$  and  $\beta_2$  which satisfy the normal equations will be the values for which the sum of squares  $Q$  in Eq. (1) is minimized. If we denote these values by  $\hat{\beta}_1$  and  $\hat{\beta}_2$ , then the equation of the straight line obtained by the method of least squares will be  $y = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x$ . This line is called the *least-squares line*.

As usual, we shall let  $\bar{x}_n = (1/n)\sum_{i=1}^n x_i$  and  $\bar{y}_n = (1/n)\sum_{i=1}^n y_i$ . By solving the normal equations (4) for  $\beta_1$  and  $\beta_2$ , we obtain the following results:

$$\hat{\beta}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i - n\bar{x}_n \bar{y}_n}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - n\bar{x}_n^2}, \quad (5)$$

$$\hat{\beta}_1 = \bar{y}_n - \hat{\beta}_2 \bar{x}_n.$$

For the values given in Table 10.1,  $n = 10$  and it is found from Eq. (5) that  $\hat{\beta}_1 = -0.786$  and  $\hat{\beta}_2 = 0.685$ . Hence, the equation of the least-squares line is  $y = -0.786 + 0.685x$ . This line is sketched in Fig. 10.4.

### Fitting a Polynomial by the Method of Least Squares

Suppose now that instead of simply fitting a straight line to  $n$  plotted points, we wish to fit a polynomial of degree  $k$  ( $k \geq 2$ ). Such a polynomial will have the

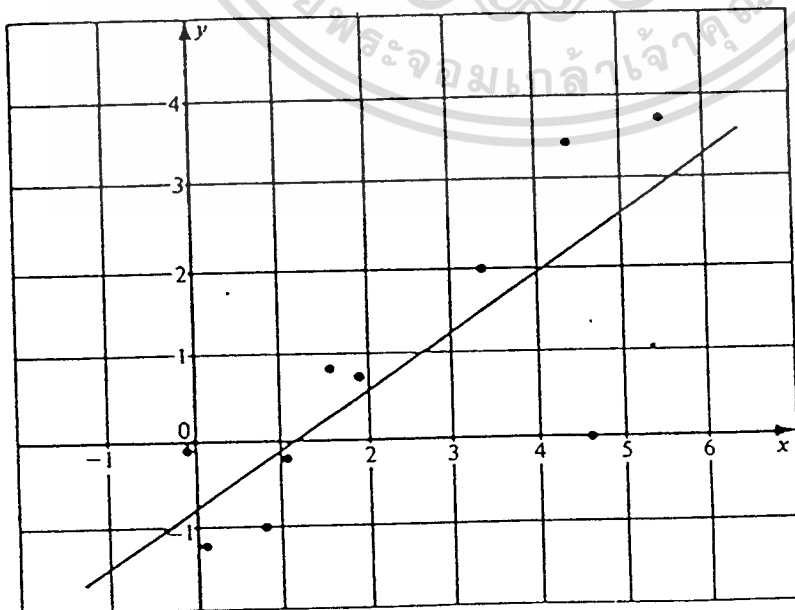


Figure 10.4 The least-squares straight line.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

following form:

$$y = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 x^2 + \cdots + \beta_{k+1} x^k. \quad (6)$$

The method of least squares specifies that the constants  $\beta_1, \dots, \beta_{k+1}$  should be chosen so that the sum  $Q$  of the squares of the vertical deviations of the points from the curve is a minimum. In other words, these constants should be chosen so as to minimize the following expression for  $Q$ :

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_1 + \beta_2 x_i + \cdots + \beta_{k+1} x_i^k)]^2. \quad (7)$$

If we calculate the  $k + 1$  partial derivatives  $\partial Q / \partial \beta_1, \dots, \partial Q / \partial \beta_{k+1}$  and we set each of these derivatives equal to 0, we obtain the following  $k + 1$  linear equations involving the  $k + 1$  unknown values  $\beta_1, \dots, \beta_{k+1}$ :

$$\begin{aligned} \beta_1 n + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_i + \cdots + \beta_{k+1} \sum_{i=1}^n x_i^k &= \sum_{i=1}^n y_i, \\ \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + \cdots + \beta_{k+1} \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} &= \sum_{i=1}^n x_i y_i, \\ &\vdots \\ \beta_1 \sum_{i=1}^n x_i^k + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_i^{k+1} + \cdots + \beta_{k+1} \sum_{i=1}^n x_i^{2k} &= \sum_{i=1}^n x_i^k y_i. \end{aligned} \quad (8)$$

As before, these equations are called the *normal equations*. There will be a unique set of values of  $\beta_1, \dots, \beta_{k+1}$  which satisfy the normal equations if and only if the determinant of the  $(k + 1) \times (k + 1)$  matrix formed from the coefficients of  $\beta_1, \dots, \beta_{k+1}$  is not zero. If there are at least  $k + 1$  different values among the  $n$  observed values  $x_1, \dots, x_n$ , then this determinant will not be zero and there will be a unique solution to the normal equations. We shall assume that this condition is satisfied. It can be shown by the methods of advanced calculus that the unique values of  $\beta_1, \dots, \beta_{k+1}$  which satisfy the normal equations will then be the values which minimize the value of  $Q$  in Eq. (7). If we denote these values by  $\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{k+1}$ , then the least-squares polynomial will have the form  $y = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x + \cdots + \hat{\beta}_{k+1} x^k$ .

**Example 1: Fitting a Parabola.** Suppose that we wish to fit a polynomial of the form  $y = \beta_1 + \beta_2 x + \beta_3 x^2$  (which represents a parabola) to the ten points given in Table 10.1. In this example, it is found that the normal equations (8) are as

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

follows:

$$10\beta_1 + 23.3\beta_2 + 90.37\beta_3 = 8.1,$$

$$23.3\beta_1 + 90.37\beta_2 + 401.0\beta_3 = 43.59, \quad (9)$$

$$90.37\beta_1 + 401.0\beta_2 + 1892.7\beta_3 = 204.55.$$

The unique values of  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , and  $\beta_3$  that satisfy these three equations are  $\hat{\beta}_1 = -0.744$ ,  $\hat{\beta}_2 = 0.616$ , and  $\hat{\beta}_3 = 0.013$ . Hence, the least-squares parabola is

$$y = -0.744 + 0.616x + 0.013x^2. \quad (10)$$

This curve is sketched in Fig. 10.5 together with the least-squares straight line. Because the coefficient of  $x^2$  in Eq. (10) is so small, the least-squares parabola and the least-squares straight line are very close together over the range of values included in Fig. 10.5.  $\square$

### Fitting a Linear Function of Several Variables

We shall now consider an extension of the example discussed at the beginning of this section, in which we were interested in representing a patient's response to a new drug  $B$  as a linear function of his response to drug  $A$ . Suppose that we wish

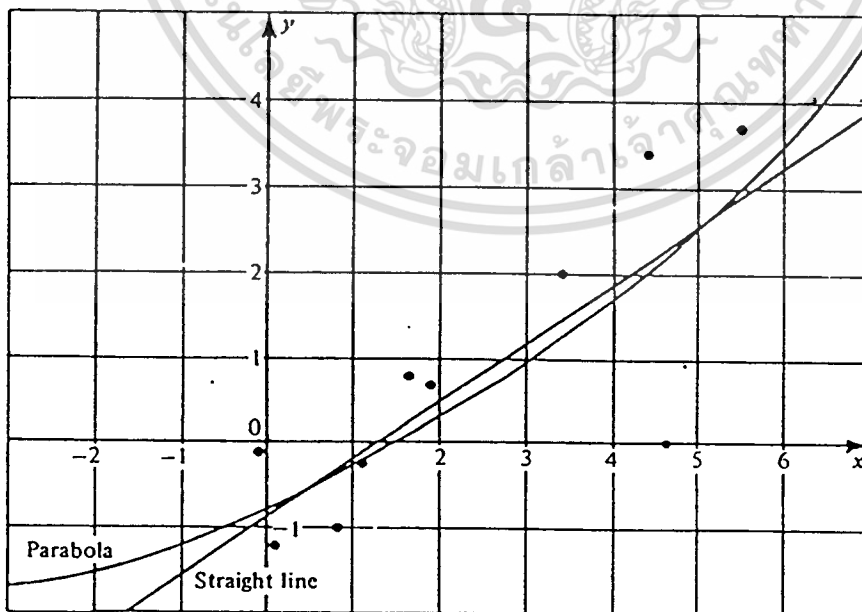


Figure 10.5 The least-squares parabola.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

to represent a patient's response to drug  $B$  as a linear function involving not only his response to drug  $A$  but also some other relevant variables. For example, we may wish to represent the patient's response  $y$  to drug  $B$  as a linear function involving his response  $x_1$  to drug  $A$ , his heart rate  $x_2$ , his blood pressure  $x_3$  before he receives any drugs, and other relevant variables  $x_4, \dots, x_k$ .

Suppose that for each patient  $i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) we measure his response  $y_i$  to drug  $B$ , his response  $x_{i1}$  to drug  $A$ , and also his values  $x_{i2}, \dots, x_{ik}$  for the other variables. Suppose also that in order to fit these observed values for the  $n$  patients, we wish to consider a linear function having the form

$$y = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \dots + \beta_{k+1} x_k. \quad (11)$$

In this case, also, the values of  $\beta_1, \dots, \beta_{k+1}$  can be determined by the method of least squares. For each given set of observed values  $x_{i1}, \dots, x_{ik}$ , we again consider the difference between the observed response  $y_i$  and the value  $\beta_1 + \beta_2 x_{i1} + \dots + \beta_{k+1} x_{ik}$  of the linear function given in Eq. (11). As before, it is required to minimize the sum  $Q$  of the squares of these differences. Here,

$$Q = \sum_{i=1}^n [y_i - (\beta_1 + \beta_2 x_{i1} + \dots + \beta_{k+1} x_{ik})]^2. \quad (12)$$

A set of  $k + 1$  normal equations can again be obtained by setting each of the partial derivatives  $\partial Q / \partial \beta_j$  equal to 0 for  $j = 1, \dots, k + 1$ . These equations will have the following form:

$$\begin{aligned} \beta_1 n + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \dots + \beta_{k+1} \sum_{i=1}^n x_{ik} &= \sum_{i=1}^n y_i, \\ \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{i1} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{i1}^2 + \dots + \beta_{k+1} \sum_{i=1}^n x_{i1} x_{ik} &= \sum_{i=1}^n x_{i1} y_i, \\ &\vdots \\ \beta_1 \sum_{i=1}^n x_{ik} + \beta_2 \sum_{i=1}^n x_{ik} x_{i1} + \dots + \beta_{k+1} \sum_{i=1}^n x_{ik}^2 &= \sum_{i=1}^n x_{ik} y_i. \end{aligned} \quad (13)$$

If the determinant of the  $(k + 1) \times (k + 1)$  matrix formed from the coefficients of  $\beta_1, \dots, \beta_{k+1}$  in these equations is not zero, then there will be a unique solution  $\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_{k+1}$  of the equations. The least-squares linear function will then be  $y = \hat{\beta}_1 + \hat{\beta}_2 x_1 + \dots + \hat{\beta}_{k+1} x_k$ .

**Example 2: Fitting a Linear Function of Two Variables.** Suppose that we expand Table 10.1 to include the values given in the third column in Table 10.2. Hence, for

Table 10.2

$i$	$x_{i1}$	$x_{i2}$	$y_i$
1	1.9	66	0.7
2	0.8	62	-1.0
3	1.1	64	-0.2
4	0.1	61	-1.2
5	-0.1	63	-0.1
6	4.4	70	3.4
7	4.6	68	0.0
8	1.6	62	0.8
9	5.5	68	3.7
10	3.4	66	2.0

each patient  $i$  ( $i = 1, \dots, 10$ ),  $x_{i1}$  denotes his response to the standard drug  $A$ ;  $x_{i2}$  denotes his heart rate; and  $y_i$  denotes his response to the new drug  $B$ . Suppose also that to these values we wish to fit a linear function having the form  $y = \beta_1 + \beta_2 x_1 + \beta_3 x_2$ .

In this example, it is found that the normal equations (13) are as follows:

$$\begin{aligned} 10\beta_1 + 23.3\beta_2 + 650\beta_3 &= 8.1, \\ 23.3\beta_1 + 90.37\beta_2 + 1563.6\beta_3 &= 43.59, \\ 650\beta_1 + 1563.6\beta_2 + 42,334\beta_3 &= 563.1. \end{aligned} \quad (14)$$

The unique values of  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ , and  $\beta_3$  which satisfy these three equations are  $\hat{\beta}_1 = -11.4527$ ,  $\hat{\beta}_2 = 0.4503$ , and  $\hat{\beta}_3 = 0.1725$ . Hence, the least-squares linear function is

$$y = -11.4527 + 0.4503x_1 + 0.1725x_2. \quad \square \quad (15)$$

It should be noted that the problem of fitting a polynomial of degree  $k$  involving only one variable, as specified by Eq. (6), can be regarded as a special case of the problem of fitting a linear function involving several variables, as specified by Eq. (11). To make Eq. (11) applicable to the problem of fitting a polynomial having the form given in Eq. (6), we define the  $k$  variables  $x_1, \dots, x_k$  simply as  $x_1 = x$ ,  $x_2 = x^2, \dots, x_k = x^k$ .

A polynomial involving more than one variable can also be represented in the form of Eq. (11). For example, suppose that the values of four variables  $r$ ,  $s$ ,  $t$ , and  $y$  are observed for several different patients, and that we wish to fit to these observed values a function having the following form:

$$y = \beta_1 + \beta_2 r + \beta_3 r^2 + \beta_4 rs + \beta_5 s^2 + \beta_6 t^3 + \beta_7 rst. \quad (16)$$

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

We can regard the function in Eq. (16) as a linear function having the form given in Eq. (11) with  $k = 6$  if we define the six variables  $x_1, \dots, x_6$  as follows:  $x_1 = r$ ,  $x_2 = r^2$ ,  $x_3 = rs$ ,  $x_4 = s^2$ ,  $x_5 = t^3$ , and  $x_6 = rst$ .



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ERROR PROPAGATION

In a typical nuclear measurement, one is seldom interested in the unprocessed data consisting of the number of counts over a particular interval. More often the data are processed through multiplication, addition, or other functional manipulation to arrive at a derived number of more direct interest. We must then be concerned with the manner in which the error associated with the original number of counts propagates through these calculations and is reflected as a corresponding uncertainty in the derived quantity. It can be shown<sup>3</sup> that if the errors are individually small and symmetric about zero, a general result can be obtained for the expected error to be associated with any quantity which is calculated as a function of any number of independent variables. If  $x, y, z, \dots$  are directly measured counts or related variables for which we know  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \dots$ , then the standard deviation for any quantity  $u$  derived from these counts can be calculated from

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 + \dots \quad (4-37)$$

where  $u = u(x, y, z, \dots)$  represents the derived quantity. Equation 4-37 is generally known as the *error propagation formula* and is applicable to almost all situations in nuclear measurements. The variables  $x, y, z, \dots$ , however, must be chosen so that they are truly independent in order to avoid the effects of correlation. The same specific count should not contribute to the value of more than one such variable. The use of Eq. 4-37 can be illustrated by application to some simple cases.

### Case 1. Sums or Differences of Counts

If we define

$$u = x + y \quad \text{or} \quad u = x - y$$

then

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 1 \quad \text{and} \quad \frac{\partial u}{\partial y} = \pm 1$$

Application of Eq. 4-37 yields

$$\sigma_u^2 = (1)^2 \sigma_x^2 + (\pm 1)^2 \sigma_y^2$$

or

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (4-38)$$

A common application of this case arises when counts due to a radioactive source must be corrected by subtracting an appropriate background count. If we assume equal counting times, then

$$\text{net counts} = \text{total counts} - \text{background counts}$$

or

$$u = x - y$$

Because both  $x$  and  $y$  are directly measured numbers of counts (or successes), the expected standard deviation of each is known to be its own square root. The object is to deduce the expected standard deviation of the net counts, a derived number. Because a simple difference is involved, the answer will be given by Eq. 4-38.

To illustrate by example, suppose we have recorded the following data for equal counting times

$$\begin{array}{ll} \text{total counts} & = x = 1071 \\ \text{background counts} & = y = \underline{521} \end{array}$$

then

$$\text{net counts} \quad = u = 550$$

We know *a priori*

$$\sigma_x = \sqrt{x} = \sqrt{1071}$$

$$\sigma_y = \sqrt{y} = \sqrt{521}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thus

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = \sqrt{x + y} = \sqrt{1592} = 39.9$$

We would then quote the result plus or minus one standard deviation as

$$\text{net counts} = 550 \pm 39.9$$

## Case 2. Multiplication or Division by a Constant

If we define

$$u = Ax$$

where  $A$  is a constant (no associated uncertainty), then

$$\frac{\partial u}{\partial x} = A$$

and application of Eq. 4-37 gives

$$\sigma_u = A\sigma_x$$

(4-39)

Similarly, if

$$v = \frac{x}{B}$$

where  $B$  is also a constant, then

$$\sigma_v = \frac{\sigma_x}{B}$$

(4-40)

Note that, in either case, the final “fractional error” ( $\sigma_u/u$  or  $\sigma_v/v$ ) is the same as the original fractional error ( $\sigma_x/x$ ). As we would expect intuitively, multiplying or dividing a value by a constant does not change its relative error.

A familiar example of the above case is the calculation of a counting rate. If  $x$  counts are recorded over a time  $t$ , then

$$\text{counting rate} \equiv r = \frac{x}{t}$$

The usual assumption is that the time is measured with very small uncertainty, so that  $t$  can be considered a constant. Then Eq. 4-40 can be used to calculate the expected standard deviation in  $r$  corresponding to the known standard deviation in the number of counts  $x$ .

Again, dividing both sides by  $u^2 = \frac{x^2}{y^2}$

$$\boxed{\left(\frac{\sigma_u}{u}\right)^2 = \left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2} \quad (4-41')$$

Thus, for either  $u=xy$  or  $u=x/y$ , the *fractional errors* in  $x$  and  $y$  ( $\sigma_x/x$  and  $\sigma_y/y$ ) combine in quadrature sum to give the *fractional error* in  $u$ .

As an example, suppose we wish to calculate the ratio of two source activities from independent counts taken for equal counting times (background is neglected). Assume

$$\begin{aligned} \text{Counts from source ①} &\equiv N_1 = 16265 \\ \text{Counts from source ②} &\equiv N_2 = 8192 \\ \text{Activity ratio: } R &\equiv \frac{N_1}{N_2} = \frac{16265}{8192} = 1.985 \end{aligned}$$

From Eq. 4-41'

$$\begin{aligned} \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2 &= \left(\frac{\sigma_{N_1}}{N_1}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{N_2}}{N_2}\right)^2 = \frac{N_1}{N_1^2} + \frac{N_2}{N_2^2} \\ &= 1.835 \times 10^{-4} \\ \frac{\sigma_R}{R} &= 0.0135 \end{aligned}$$

and multiplying by the value of  $R$

$$\sigma_R = 0.027$$

Therefore, the reported result would be:

$$R = 1.985 \pm 0.027$$

#### Case 4. Mean Value of Multiple Independent Counts

Suppose we have recorded  $N$  repeated counts from the same source for equal counting times. Let the results of these multiple counts be designated  $x_1, x_2, \dots, x_N$  and their sum be  $\Sigma$ . Then

$$\Sigma = x_1 + x_2 + \dots + x_N$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

If we formally apply the error propagation formula (Eq. 4-37) to find the expected error in  $\Sigma$ , we find  $\partial\Sigma/\partial x_i = 1$  for all independent counts  $x_i$ , and therefore,

$$\sigma_{\Sigma}^2 = \sigma_{x_1}^2 + \sigma_{x_2}^2 + \dots + \sigma_{x_N}^2$$

But because  $\sigma_{x_i} = \sqrt{x_i}$  for each independent count,

$$\begin{aligned}\sigma_{\Sigma}^2 &= x_1 + x_2 + \dots + x_N = \Sigma \\ \sigma_{\Sigma} &= \sqrt{\Sigma}\end{aligned}\quad (4-42)$$

This result shows that the standard deviation expected for the sum of all the counts is the same as if the measurement had been carried out by performing a single count, extending over the entire period represented by all the independent counts.

Now if we proceed to calculate a mean value from these  $N$  independent measurements,

$$\bar{x} = \frac{\Sigma}{N}\quad (4-43)$$

Equation 4-43 is an example of dividing an error-associated quantity ( $\Sigma$ ) by a constant ( $N$ ). Therefore, Eq. 4-40 applies and the expected standard deviation of this mean value is given by

$$\begin{aligned}\sigma_{\bar{x}} &= \sigma_{\Sigma} / N = \sqrt{\Sigma} / N = \sqrt{N\bar{x}} / N \\ \sigma_{\bar{x}} &= \sqrt{\frac{\bar{x}}{N}}\end{aligned}\quad (4-44)$$

Note that the expected standard deviation of any single measurement  $x_i$  is

$$\sigma_{x_i} = \sqrt{x_i}$$

Because any typical count will not differ greatly from the mean,  $x_i \cong \bar{x}$ , and we therefore conclude that the mean value based on  $N$  independent counts will have an expected error which is smaller by a factor  $\sqrt{N}$  compared with any single measurement on which the mean is based. A general conclusion is that, if we wish to improve the statistical precision of a given measurement by a factor of two, we must invest four times the initial counting time.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Case 5. Combination of Independent Measurements with Unequal Errors

If  $N$  independent measurements of the same quantity have been carried out and they do not all have nearly the same associated precision, then a simple average (as discussed in Case 4) no longer is the optimal way to calculate a single “best value.” We will instead want to give more weight to those measurements with small values for  $\sigma_{x_i}$  (the standard deviation associated with  $x_i$ ) and less weight to measurements for which this estimated error is large.

Let each individual measurement  $x_i$  be given a weighting factor  $a_i$  and the “best value”  $\langle x \rangle$  computed from the linear combination

$$\langle x \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N a_i x_i}{\sum_{i=1}^N a_i} \quad (4-45)$$

We will now seek a criterion by which the weighting factors  $a_i$  should be chosen in order to minimize the expected error in  $\langle x \rangle$ .

For brevity, we will write

$$\alpha \equiv \sum_{i=1}^N a_i$$

so that

$$\langle x \rangle = \frac{1}{\alpha} \sum_{i=1}^N a_i x_i$$

Now apply the error propagation formula (Eq. 4-37) to this case:

$$\begin{aligned} \sigma_{\langle x \rangle}^2 &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{\partial \langle x \rangle}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \\ &= \sum_{i=1}^N \left( \frac{a_i}{\alpha} \right)^2 \sigma_{x_i}^2 \\ &= \frac{1}{\alpha^2} \sum_{i=1}^N a_i^2 \sigma_{x_i}^2 \\ \sigma_{\langle x \rangle}^2 &= \beta / \alpha^2 \end{aligned} \quad (4-46)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

where

$$\beta \equiv \sum_{i=1}^N a_i^2 \sigma_{x_i}^2$$

In order to minimize  $\sigma_{\langle x \rangle}$ , we must minimize  $\sigma_{\langle x \rangle}^2$  from Eq. 4-46 with respect to a typical weighting factor  $a_j$

$$0 = \frac{\partial \sigma_{\langle x \rangle}^2}{\partial a_j} = \frac{\alpha^2 \frac{\partial \beta}{\partial a_j} - 2\alpha\beta \frac{\partial \alpha}{\partial a_j}}{\alpha^4} \quad (4-47)$$

Note that

$$\frac{\partial \alpha}{\partial a_j} = 1 \quad \frac{\partial \beta}{\partial a_j} = 2a_j \sigma_{x_j}^2$$

Putting these results into Eq. 4-47

$$\frac{1}{\alpha^4} (2\alpha^2 a_j \sigma_{x_j}^2 - 2\alpha\beta) = 0$$

and solving for  $a_j$

$$a_j = \frac{\beta}{\alpha} \cdot \frac{1}{\sigma_{x_j}^2} \quad (4-48)$$

If we choose to normalize the weighting coefficients

$$\sum_{i=1}^N a_i \equiv \alpha = 1$$

$$a_j = \frac{\beta}{\sigma_{x_j}^2}$$

Putting this into the definition of  $\beta$

$$\beta = \sum_{i=1}^N a_i^2 \sigma_{x_i}^2 = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\beta}{\sigma_{x_i}^2} \right)^2 \sigma_{x_i}^2$$

or

$$\beta = \left[ \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \right]^{-1} \quad (4-49)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Therefore, the proper choice for the normalized weighting coefficient for  $x_j$  is

$$a_j = \frac{1}{\sigma_{x_j}^2} \left[ \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \right]^{-1} \quad (4-50)$$

We therefore see that *each data point should be weighted inversely as the square of its own error.*

Assuming that this optimal weighting is followed, what will be the resultant (minimum) error in  $\langle x \rangle$ ? Because we have chosen  $\alpha = i$  for normalization, Eq. 4-46 becomes

$$\sigma_{\langle x \rangle}^2 = \beta$$

In the case of optimal weighting,  $\beta$  is given by Eq. 4-49. Therefore,

$$\frac{1}{\sigma_{\langle x \rangle}^2} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_{x_i}^2} \quad (4-51)$$

From Eq. 4-51, the expected standard deviation  $\sigma_{\langle x \rangle}$  can be calculated from the standard deviations  $\sigma_{x_i}$  associated with each individual measurement.

## ภาคผนวก ง.

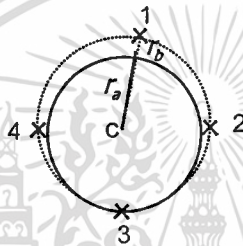


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การหาค่าความคลาดเคลื่อน

ความคลาดเคลื่อนจากการตรวจหาโพรงและรอยร้าวในแต่ละด้านของแต่ละชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบนั้นหาได้จากค่าเฉลี่ยของความผิดพลาดในทุก ๆ ตำแหน่งที่ได้จากการสแกนทั่วทั้งด้านที่ทำการตรวจสอบของชิ้นงานรายละเอียดดังต่อไปนี้

โพรงในชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบนั้นมีรูปร่างเป็นรูปทรงเรขาคณิต ฉะนั้นในการหาค่าความคลาดเคลื่อนนั้นต้องกำหนดจุดอ้างอิงบนโพรงที่นำมาตรวจสอบเพื่อเป็นตำแหน่งอ้างอิงกับตำแหน่งที่ทำการตรวจสอบได้ ตัวอย่างการหาค่าความคลาดเคลื่อนในที่นี้จะใช้ตัวอย่างเป็นโพรงที่มีลักษณะเป็นวงกลมซึ่งจะใช้จุดศูนย์กลางของวงกลมคือจุด C เป็นจุดอ้างอิงและตำแหน่งที่ทำการสแกนได้มี 4 ตำแหน่ง(ในการทดลองจริงนั้นมีมากกว่านี้ ) เมื่อเทียบโพรงที่ตรวจสอบได้ และโพรงจริงเป็นดังรูปที่ 1



— ขอบเขตโพรงจริง  
 - - - - - ขอบเขตโพรงที่ได้จากการตรวจสอบ

รูปที่ 1 เปรียบเทียบโพรงที่ตรวจสอบได้กับ โพรงจริงในชิ้นงานที่นำมาตรวจสอบ

ในการหาเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในแต่ละตำแหน่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อน} = \frac{|r_a - r_b|}{r_a} \times 100 \dots\dots\dots(1)$$

เมื่อ  $r_a$  เป็นระยะห่างจากจุด C ถึงขอบของโพรงจริง

$r_b$  เป็นระยะห่างจากจุดอ้างอิงถึงตำแหน่งที่ทำการหาค่าความคลาดเคลื่อนบนโพรงที่ทำการตรวจสอบได้(เมื่อใช้จุดศูนย์กลางร่วมกันระหว่างโพรงจริงและโพรงที่ได้จากการตรวจสอบ)

ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยของแต่ละตำแหน่งต่าง ๆ ที่ตรวจสอบได้ในแต่ละด้านของชิ้นงานหาได้จาก

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \dots\dots\dots(2)$$

เมื่อ  $\bar{X}$  เป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยในด้านที่ทำการตรวจสอบของชิ้นงานนั้น

$X_i$  เป็นเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนในตำแหน่งที่  $i$ ;  $i = 1, \dots, n$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

นางสาวแก้วใจ มีเทียน เกิดเมื่อวันที่ 10 สิงหาคม พ.ศ. 2513 ที่ บ้านเลขที่ 1 หมู่ที่ 7 บ้านโพธิ์ศรีสวัสดิ์ ตำบลโพนสูง อำเภอปทุมรัตน์ จังหวัดร้อยเอ็ด จบปริญญาการศึกษาศาสตรบัณฑิต วิชาเอก (ฟิสิกส์) ที่มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มหาสารคาม ปีการศึกษา 2534

ปี 2535 เข้ารับราชการในตำแหน่งอาจารย์ 1 ระดับ 3 โรงเรียนเชิงใหม่ประชานุสรณ์ จังหวัดร้อยเอ็ด สังกัดกรมสามัญศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ และปัจจุบันดำรงตำแหน่งอาจารย์ 1 ระดับ 4 โรงเรียนโพนสูงประชาสรรค์ สังกัดกรมสามัญศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้