

บทที่ 4

ผลทดสอบการทำงานของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

จากผลการศึกษาและพัฒนาระบบถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ โดยใช้หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหลชนิดไวต่อตำแหน่งซึ่งสร้างขึ้นด้วยวิธีประหยักร่วมกับเทคนิคการสแกนสร้างภาพมิติเดียวควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ และพยายามลดการใช้อุปกรณ์วัดจากต่างประเทศเท่าที่สามารถจะพัฒนาขึ้นได้ด้วยวัสดุ และชิ้นส่วนที่หาได้ในประเทศ พบว่าสามารถสร้างวงจรทดแทนในส่วนของอุปกรณ์หน่วงสัญญาณ (delay amplifier) และอุปกรณ์แปลงผันสัญญาณคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณ (TAC) ขึ้นแทนได้ ทำให้สามารถจัดขั้นตอนการทดสอบสมรรถนะการทำงานของระบบเป็นบางส่วนๆ ได้ดังนี้

- ก. การทดสอบสมรรถนะของวงจรแปลงผันสัญญาณคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณ
- ข. การทดสอบสมรรถนะในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น
- ค. การทดสอบการทำงานของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ
- ง. เปรียบเทียบผลการทำงานของระบบด้วยวงจรแปลงผันคาบเวลาที่พัฒนาขึ้น
- จ. การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำจากของบรรจุวัสดุปิดผนึกและตัวอย่างชีวภาพ

4.1 วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ

4.1.1 อุปกรณ์วัดนิวเคลียร์มาตรฐาน NIM

| | | | | |
|---|----------|-------|-------|-------|
| 1. อุปกรณ์ขยายส่วนหน้า | CANBERRA | model | 2006 | 2 ชุด |
| 2. แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง | ORTEC | model | 556 | 1 ชุด |
| 3. อุปกรณ์ขยายและวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว | ORTEC | model | 590A | 2 ชุด |
| 4. อุปกรณ์หน่วงสัญญาณ | ORTEC | model | 427A | 2 ชุด |
| 5. อุปกรณ์วิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว | CANBERRA | model | 2030 | 1 ชุด |
| 6. อุปกรณ์แปลงผันคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณ | CANBERRA | model | 2145 | 1 ชุด |
| 7. เครื่องวิเคราะห์พลังงานแบบหลายช่อง | CANBERRA | model | 40 | 1 ชุด |
| 8. อุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์คู่ | CANBERRA | model | 1407P | 1 ชุด |
| 9. NIM bin และแหล่งจ่ายไฟฟ้า | ORTEC | model | 4001C | 1 ชุด |
| 10. สาย โคนีลเชื่อมขนาดต่างๆ | | | | 1 ชุด |

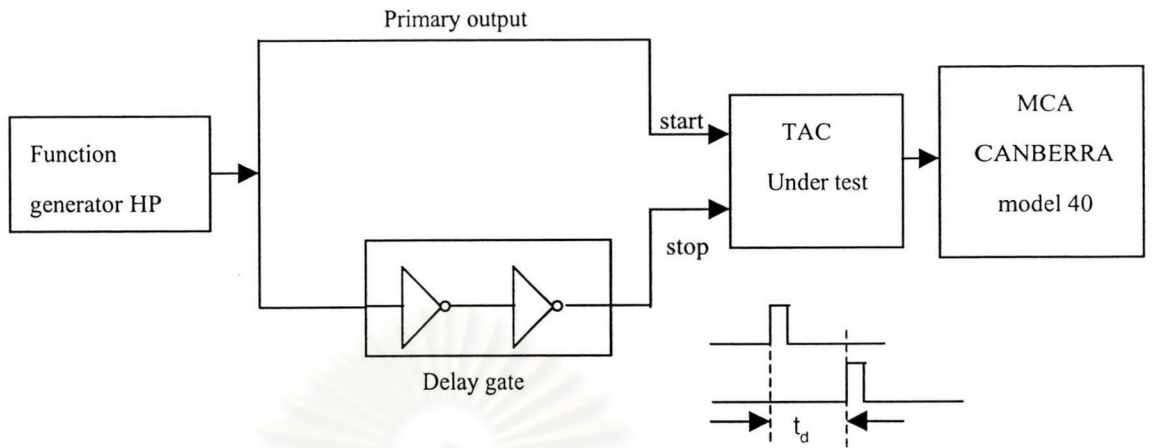
4.1.2 อุปกรณ์ประกอบการทดลอง

1. หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหลชนิดไวต่อตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น
2. ก๊าซ P-10 (อาร์กอน 90% มีเทน 10%) พร้อมชุดควบคุมแรงดัน
3. ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิด เหล็ก-55 ความแรง 5.83 มิลลิคูรี
4. ระบบสแกนวัสดุทดสอบ
5. ไมโครคอมพิวเตอร์ 1 เครื่อง
6. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ Tektronix model 2465 1 เครื่อง
7. เครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์ Hewlett Packard model 8111A 1 เครื่อง
8. โมดูลทดสอบกำหนดช่วงเวลา ที่ 30 ns, 50 ns และ 70 ns
9. ชุดทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งที่ออกแบบขึ้นได้แก่
 - 9.1 แผ่นบังกัมลารังสีทำด้วยแผ่นตะกั่วหนา 2 มม. และช่องขนาด 0.4 มม.
 - 9.2 แผ่นทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพ
 - 9.3 ซองบรรจุวัสดุปิดผนึกและตัวอย่างชีวภาพ

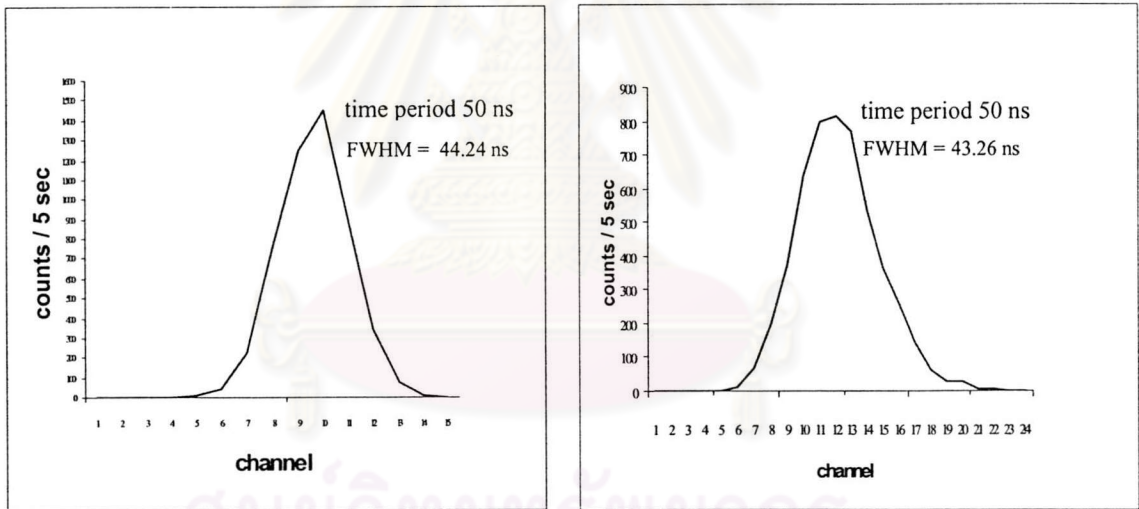
4.2 การทดสอบสมรรถนะของวงจรแปลงผันคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณ

4.2.1 ทดสอบความสามารถในการแจกแจงคาบเวลา (time resolution)

การทดสอบนี้ต้องออกแบบอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณปรับเทียบสเกลคาบเวลาที่มีสิ่งรบกวนน้อยมากและมีความเสถียรสูง ในงานวิจัยนี้อาศัย กำหนดเวลาของไอซีเชิงตัวเลข เบอร์ 74LS14 ซึ่งเกิดแต่ละตัวมีกำหนดเวลา 20 ns สร้างเป็น โมดูลทดสอบกำหนดเวลาที่ 30 ns, 50 ns และ 70 ns และจัดอุปกรณ์ทดสอบดังแผนภาพในรูปที่ 4.1 โดยป้อนอัตราสัญญาณพัลส์จากเครื่องกำเนิดสัญญาณพัลส์เท่ากับ 1 kcps ผลทดสอบความสามารถในการแจกแจงคาบเวลาที่ 50 ns เปรียบเทียบกันระหว่างวงจรที่พัฒนาขึ้น และอุปกรณ์ TAC CANBERRA model 2145 แสดงในรูปที่ 4.2 ก. และ ข. ส่วนผลทดสอบความสามารถในการแปลงผันคาบเวลาที่ 30 ns, 50 ns และ 70 ns เปรียบเทียบกันแสดงในรูปที่ 4.3.ก. และ ข.

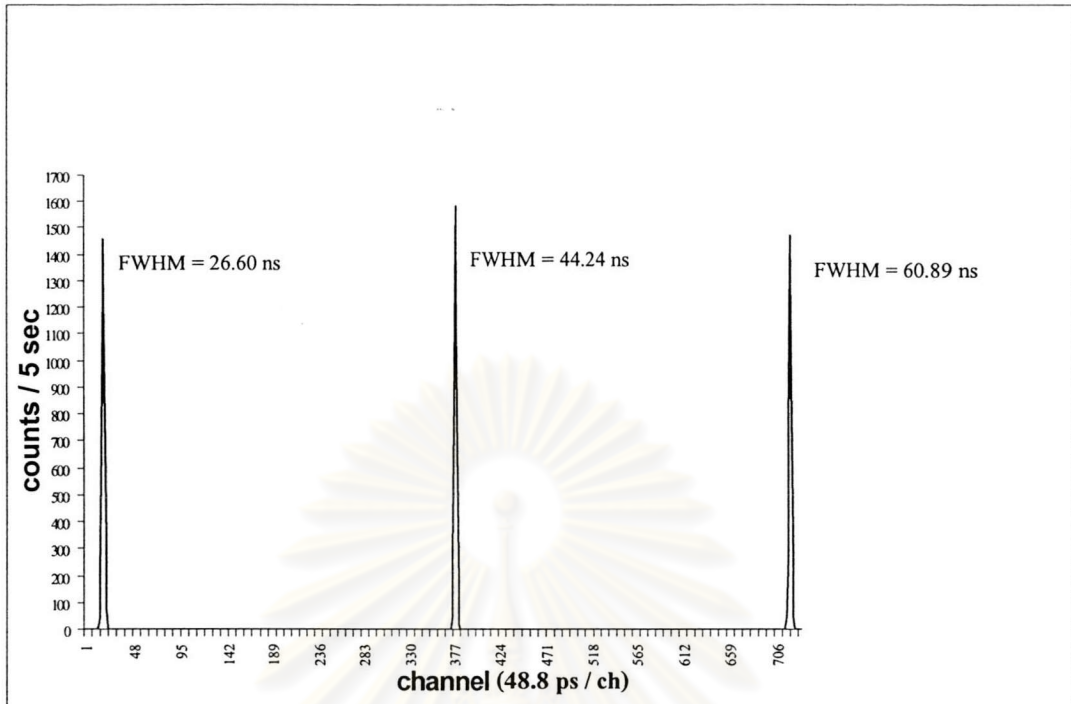


รูปที่ 4.1 แผนภาพการจักระบบทดสอบความสามารถในการแจกแจงคาบเวลา

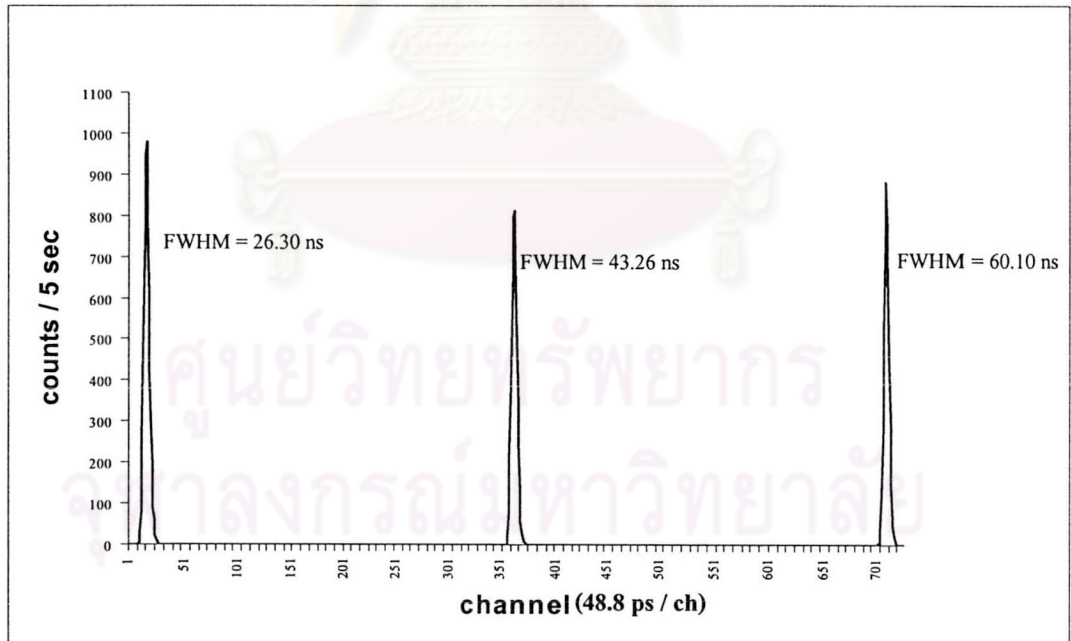


- ก. ความสามารถในการแจกแจงคาบเวลา ของ TAC ที่พัฒนาขึ้น
- ข. ความสามารถในการแจกแจงคาบเวลา ของโมดูล TAC ที่รุ่น 2145

รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบผลของความสามารถในการแจกแจงคาบเวลาระหว่าง วงจร TAC ตามที่พัฒนาขึ้น กับ โมดูลของ CANBERRA 2145



ก.ความสามารถในการแปลงผันคาบเวลาที่ 30 ns, 50 ns และ 70 ns ของ TAC ที่พัฒนาขึ้น

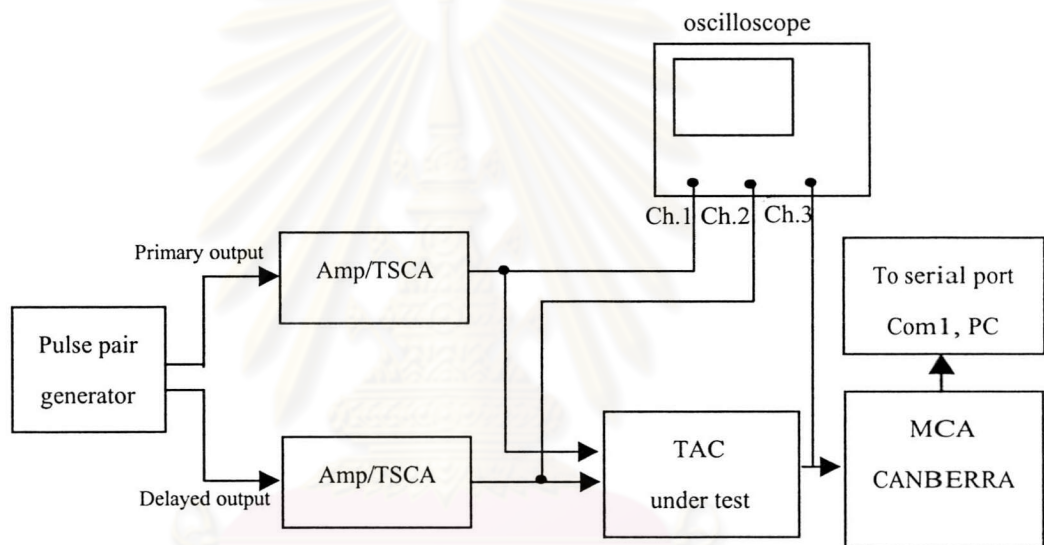


ข.ความสามารถในการแปลงผันคาบเวลาที่ 30 ns , 50 ns และ 70 ns ของโมดูล TAC รุ่น 2145

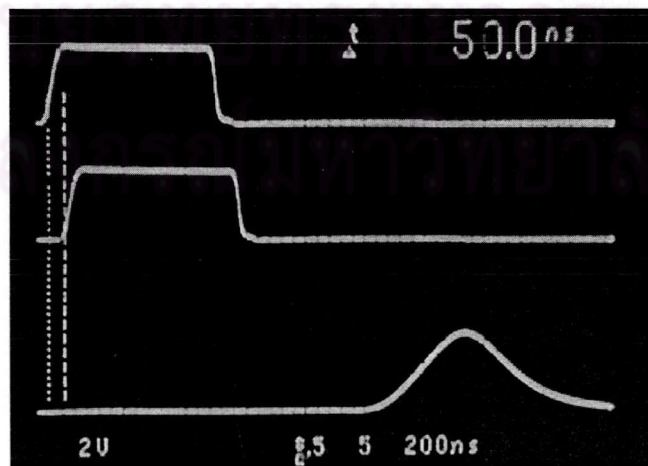
รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบผลของความสามารถในการแปรผันคาบเวลาของวงจร TAC ที่พัฒนาขึ้นกับโมดูล TAC ของ CANBERRA รุ่น 2145

4.2.2 ทดสอบการทำงานและความเป็นเชิงเส้น

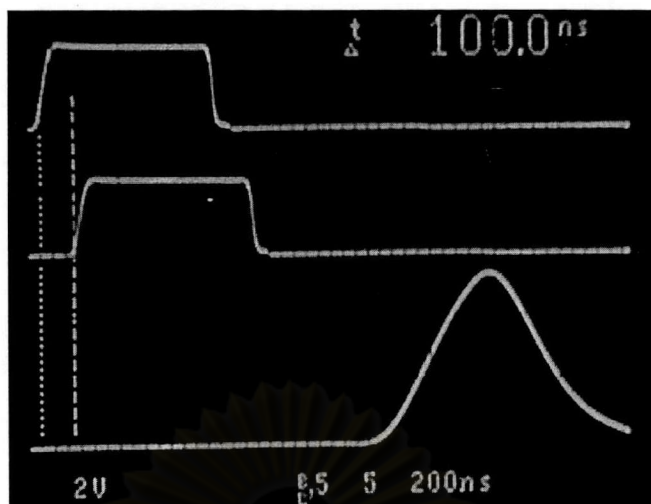
การทดสอบทำได้โดยจัดวงจรทดสอบ ดังแผนภาพรูปที่ 4.4 โดยใช้แหล่งกำเนิดสัญญาณหน่วงเวลาจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์คู่ (pulse pair generator) ผลทดสอบการทำงานของวงจรที่ค่าหน่วงเวลา 50 ns และ 100 ns ที่อัตราพัลส์ 10 kcps ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ของคาบเวลา และขนาดสัญญาณปรากฏในรูปที่ 4.5.ก. และ ข. ตามลำดับ ส่วนผลทดสอบความเป็นเชิงเส้นของวงจรแปลงผันคาบเวลา ในช่วง 20-200 ns โดยการแปรเปลี่ยนค่าหน่วงเวลาจากอุปกรณ์กำเนิดสัญญาณพัลส์คู่ และอ่านค่าตำแหน่งพีคบนช่องวิเคราะห์ของเครื่องวิเคราะห์หลายช่องแสดงในรูปที่ 4.6 และ 4.7



รูปที่ 4.4 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการทำงานของ TAC

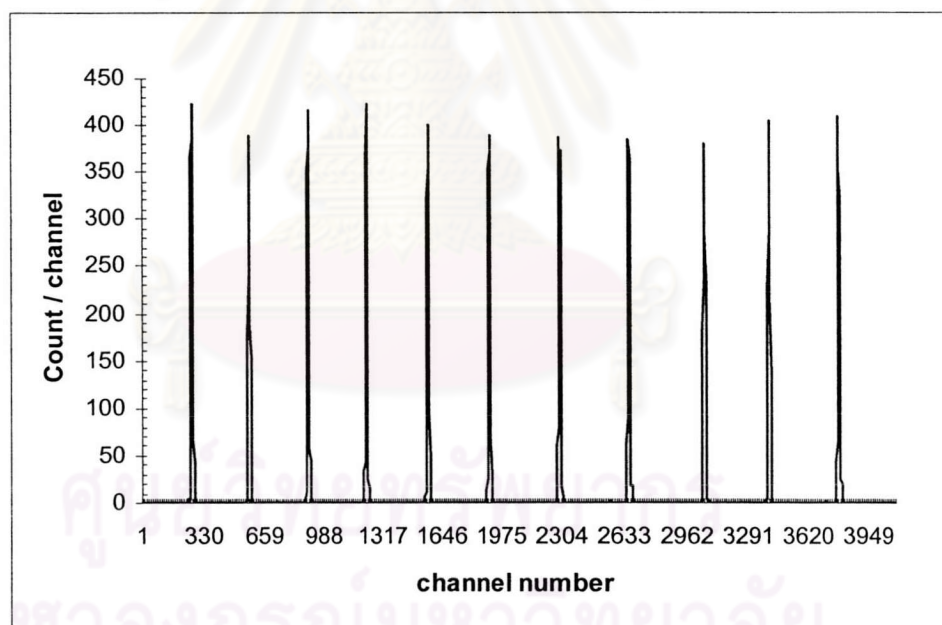


ก. รูปสัญญาณพัลส์ที่คาบเวลา 50 ns

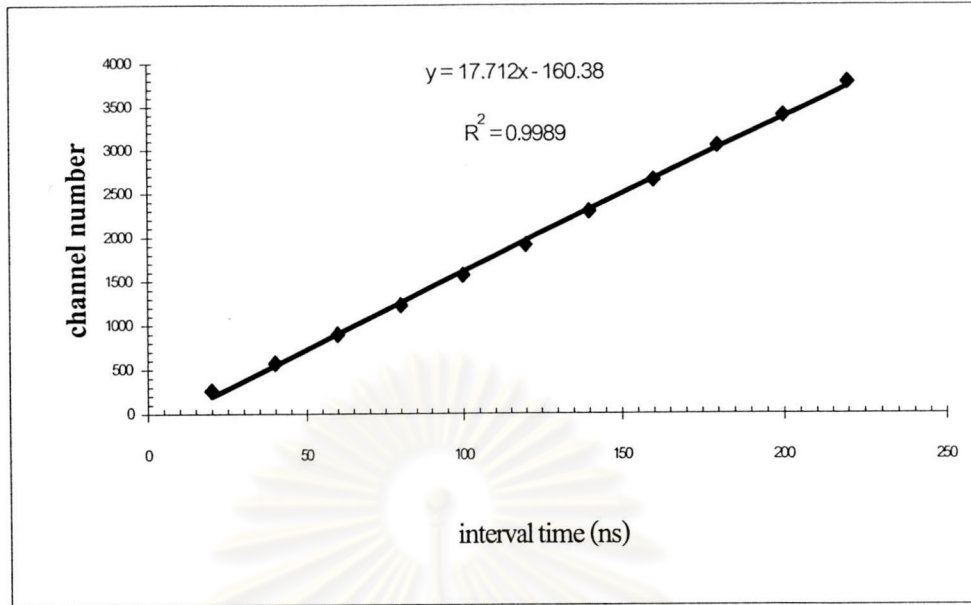


ข. รูปสัญญาณพัลส์ทางออกที่คาบเวลา 100 ns

รูปที่ 4.5 รูปสัญญาณพัลส์จากการทำงานของ TAC ที่พัฒนาขึ้น



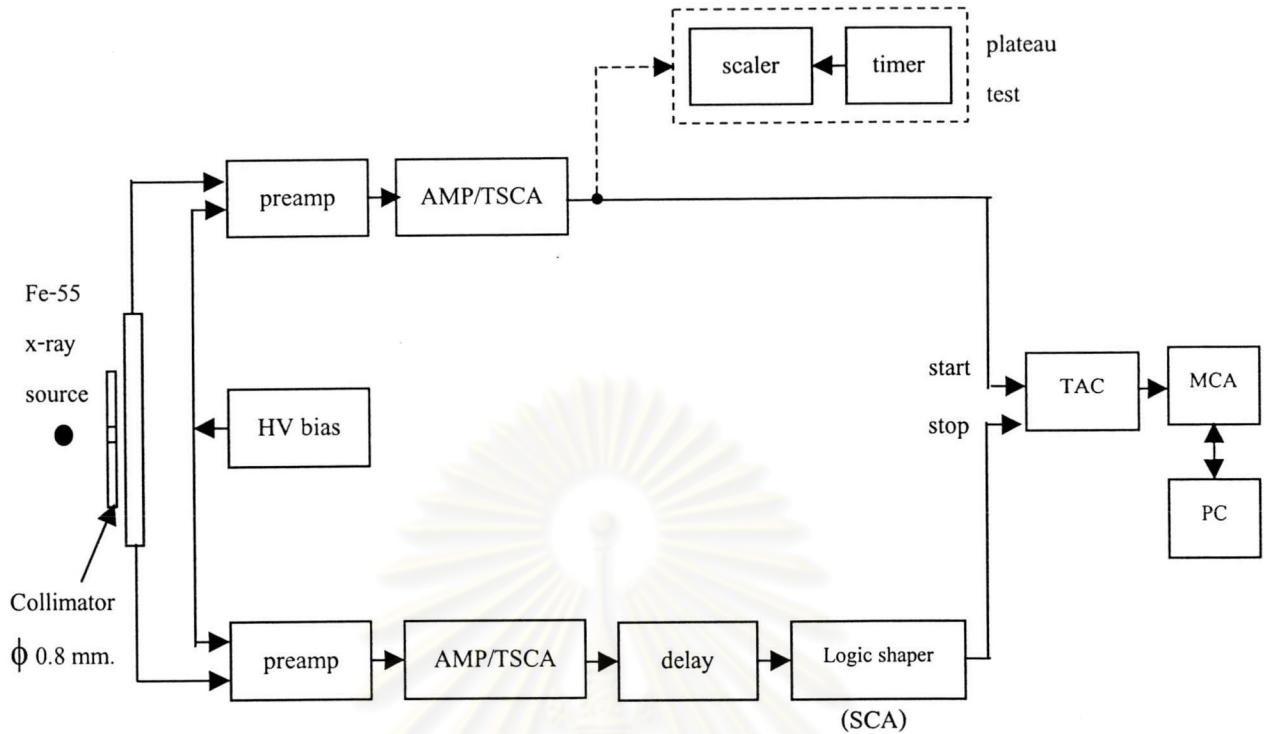
รูปที่ 4.6 แสดงตำแหน่งพีกของช่วงเวลาที่แปรเปลี่ยนจาก 20 ns ถึง 200 ns



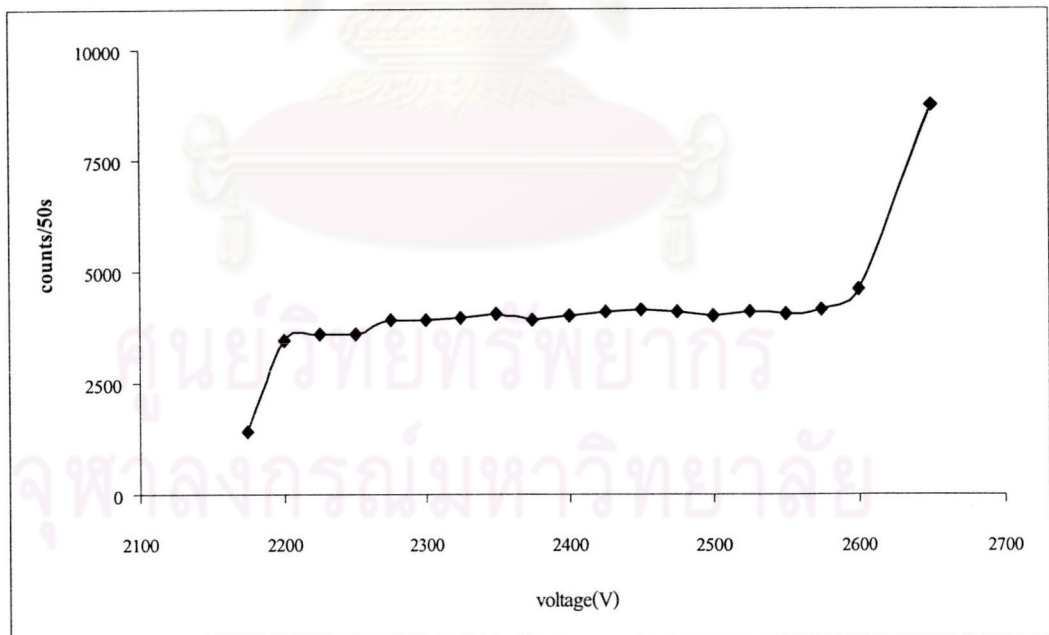
รูปที่ 4.7 เส้นกราฟทดสอบเป็นเชิงเส้นของวงจร TAC ที่พัฒนาขึ้น

4.3 การทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

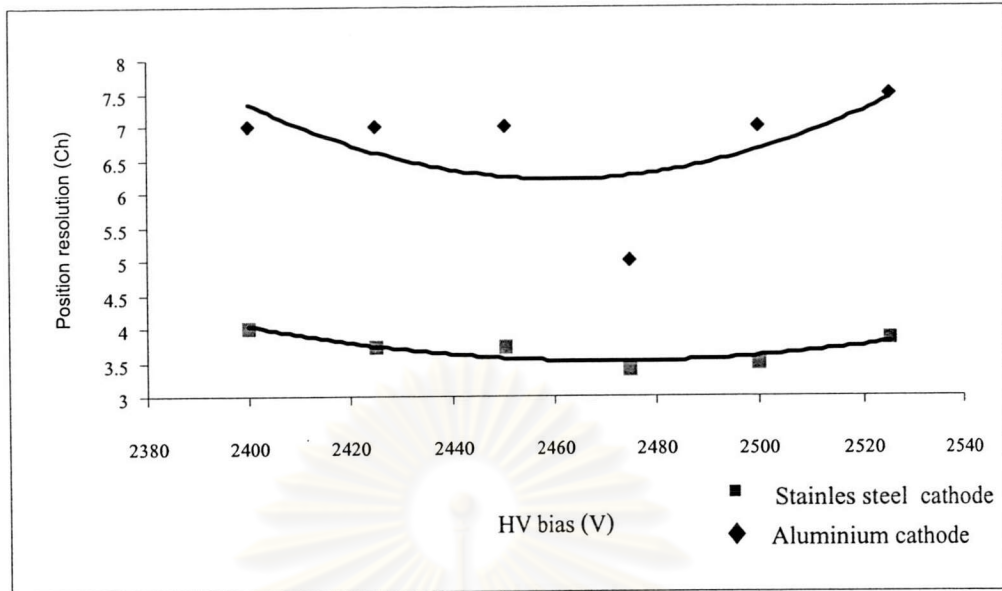
จากหัววัดพรอพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหลชนิดไวต่อตำแหน่งที่ปรับปรุงใหม่ โดยเปลี่ยนวัสดุแคโทดเป็นอลูมิเนียม ทรงกระบอกรูปเหลี่ยม และบิบช่องทางเข้ารังสี (window slit) เป็น 1.0 มม. ได้นำมาจัดระบบวัดความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.8 โดยทำการทดสอบเส้นกราฟคุณลักษณะการทำงานของหัววัดรังสี (plateau curve) เพื่อหาแรงดันไบอัสสำหรับช่วงทำงานของหัววัดรังสี ได้ผลการทดสอบเป็นไปดังรูปที่ 4.9 จากนั้นทำการหาแรงดันไบอัสที่ให้ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งดีที่สุด ได้ที่ 2475 โวลต์ ดังผลทดสอบตามเส้นกราฟรูปที่ 4.10 ในรูปที่ 4.11 เป็นผลทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง เมื่อเลือกไบอัสที่เหมาะสม และเคลื่อนตำแหน่งรังสีครั้งละ 20 มม.



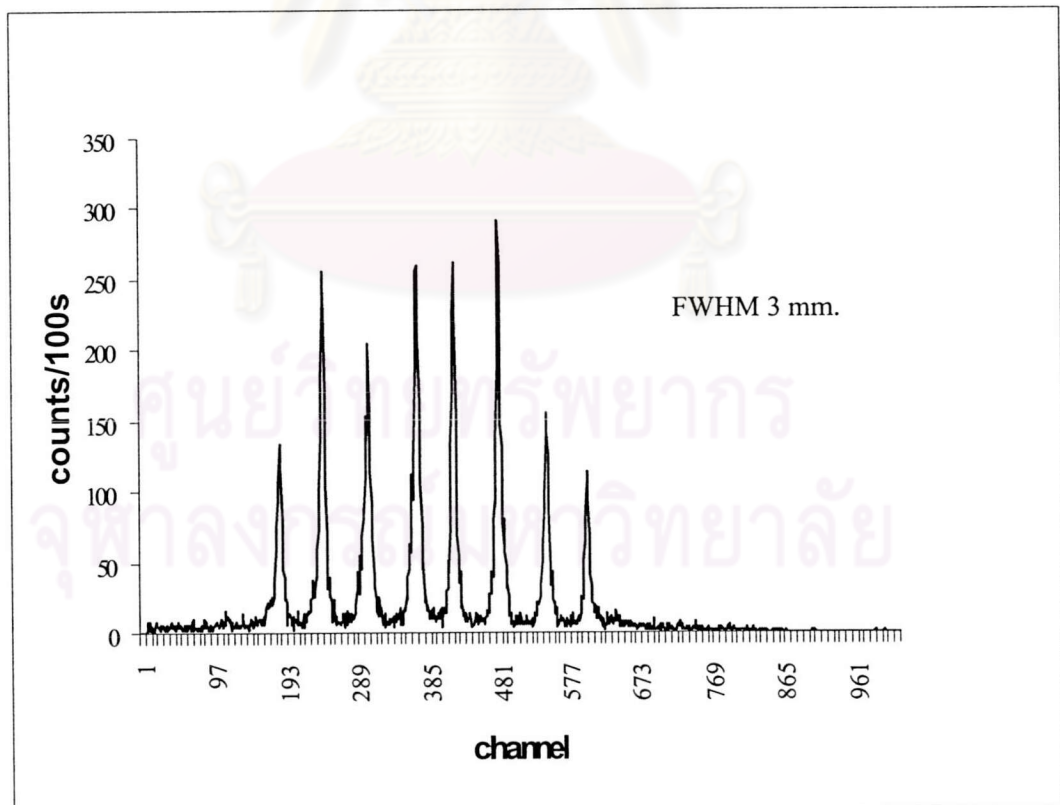
รูปที่ 4.8 แผนภาพการจัดอุปกรณ์เพื่อทดสอบความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง



รูปที่ 4.9 เส้นกราฟคุณลักษณะการทำงานของหัววัดรังสี (HV plateau) ที่พัฒนาขึ้น

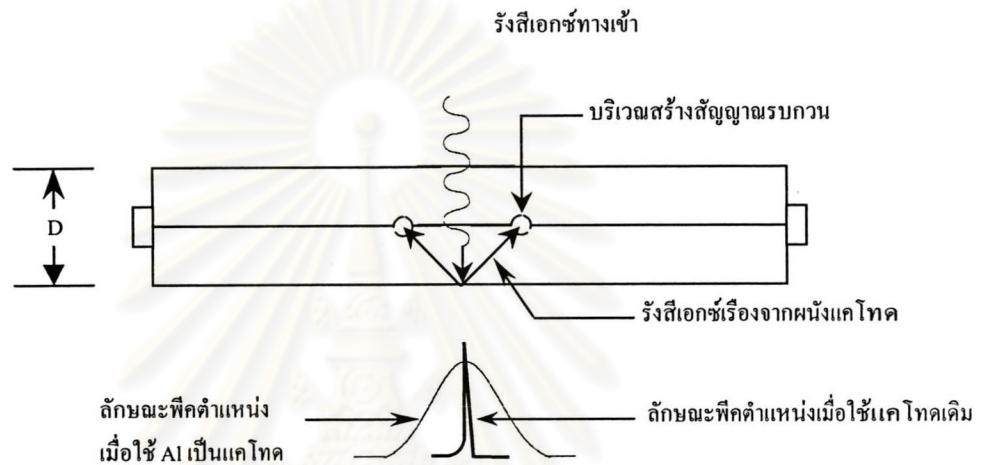


รูปที่ 4.10 เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งกับ HV bias เปรียบเทียบกันระหว่างแคโทดของเดิม^[2] และแคโทดที่ทดลองปรับปรุงใหม่



รูปที่ 4.11 แพทเทอร์นแสดงการวัดตำแหน่งรังสีของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น

จากผลการทดลองความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัดรังสีที่พัฒนาขึ้น โดยใช้แคโทดเป็นอลูมิเนียมพบว่าความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งด้อยลงมาก ทั้งนี้เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นธาตุเบาที่มีค่า absorption edge ในชั้น K เท่ากับ 1.559 keV ดังนั้นผนังแคโทดสามารถถูกกระตุ้นให้เกิดการเรืองรังสีเอกซ์จากต้นกำเนิดรังสี Fe-55 ได้ดังในรูปที่ 4.12 รังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นจะไอออไนซ์ก๊าซภายในหัววัดรังสีและสร้างปริมาณประจุไฟฟ้าตามตำแหน่งที่รังสีเคลื่อนไปถึงเกิดสัญญาณรบกวนบนเส้นแอนโตนขึ้นทำให้ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งด้อยลง



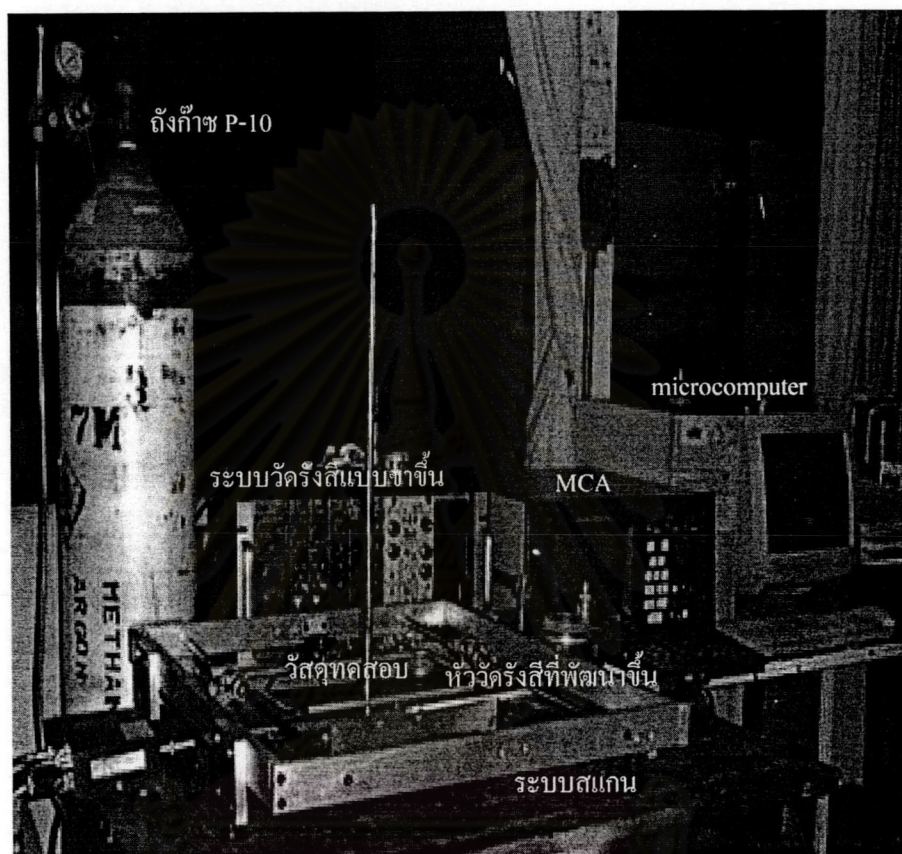
รูปที่ 4.12 แสดงการรบกวนของรังสีเอกซ์เรืองภายในหัววัดรังสี

4.4 การทดสอบการทำงานของระบบถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

4.4.1. ทดสอบการทำงานของระบบสแกนและระบบสร้างภาพ

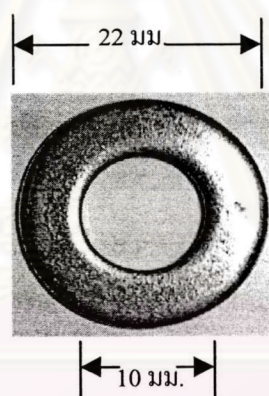
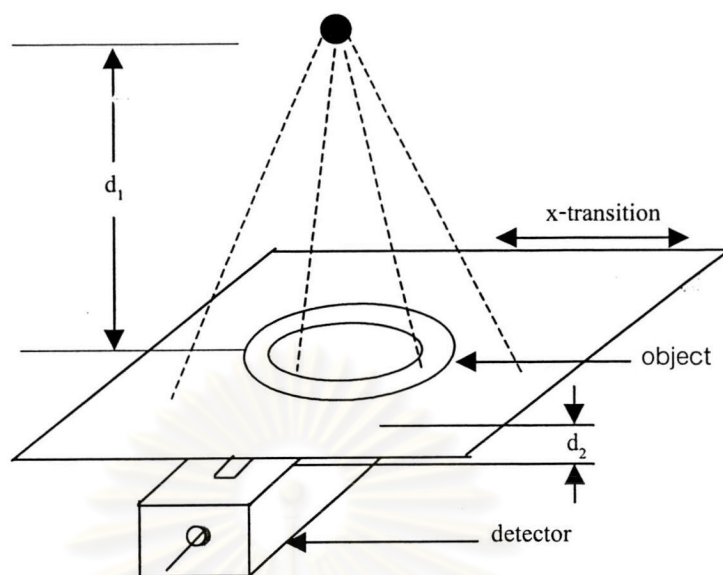
การทดสอบทำโดยการจัดระบบทดสอบดังในภาพถ่ายรูปที่ 4.13 ใช้วงแหวนเหล็กที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 22 มม. และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มม. เป็นชิ้นตัวอย่างทดลอง จัดระยะต้นกำเนิดรังสีกับระยะวัสดุ (d_1) เท่ากับ 150 มม. และระยะวัสดุกับหน้าต่างหัววัดรังสี (d_2) เท่ากับ 1.0 มม. ตั้งเวลานับรังสีที่ 100 วินาที ใช้ย่านเวลาแปลงผันสัญญาณของ TAC ที่ 20×10^3 นาโนวินาที อัตราการสแกนวัสดุเท่ากับ 1.6 มม./สแต็ป บนพื้นที่ขนาด 21×32 ซม.² ใช้โปรแกรมควบคุมระบบสแกนวัสดุทดสอบเพื่อบันทึกข้อมูลสัญญาณภาพ และแสดงภาพ แสดงภาพบนจอภาพให้ผลของภาพดังในรูปที่ 4.14 ค และ ง ซึ่งเปรียบเทียบระหว่างการใช้หัววัดรังสีที่แคโทดเป็นอลูมิเนียมรูปทรงกระบอกรูปเหลี่ยมมีช่องหน้าต่าง 1.0 มม. และหัววัดรังสีที่มีแคโทดเป็นเหล็กกล้าไร้สนิมรูปทรงกระบอกกลม ช่องหน้าต่าง 2 มม. ผลคือภาพที่ได้จากหัววัดรังสี

โครงสร้างเดิมซึ่งแคโทดทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมให้ภาพที่ชัดเจนกว่า ดังนั้นการทดลองถ่ายภาพด้วยรังสีในงานวิจัยนี้จึงใช้หัววัดโครงสร้างเดิมทำการเก็บข้อมูลโปรไฟล์

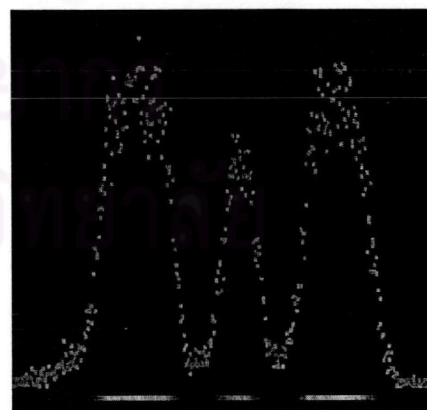
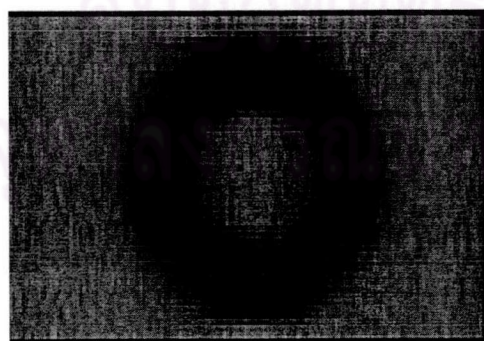


รูปที่ 4.13 การจัดระบบภาพถ่ายด้วยรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

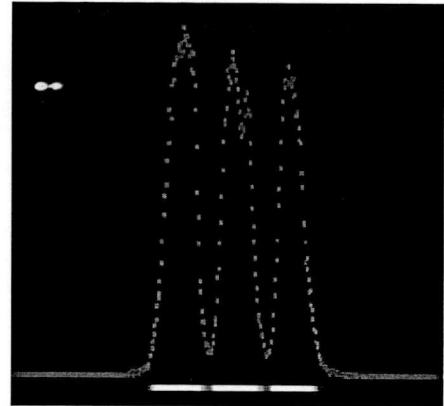
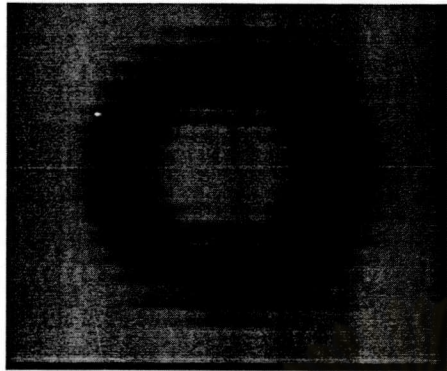
ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ก. ภาพถ่ายวงแหวนเหล็ก



ค. ภาพวงแหวนจากระบบถ่ายภาพหัววัดรังสีทรงกลม ง. โปรไฟล์สัญญาณภาพบริเวณกึ่งกลาง



จ. ภาพวงแหวนจากระบบถ่ายภาพหัววัดรังสี ฉ. โปรไฟล์สัญญาณภาพบริเวณกึ่งกลางแนว
ทรงสี่เหลี่ยม

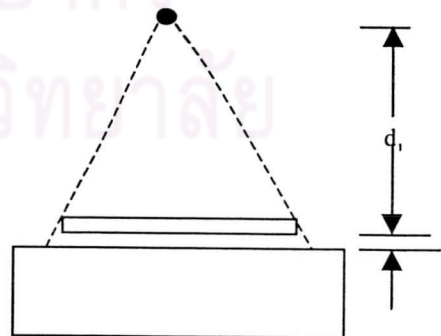
รูปที่ 4.14 แสดงภาพถ่ายบนจอภาพเปรียบเทียบระหว่างหัววัดรังสีที่แคโทดเป็น
รูปทรงกระบอกกลมและรูปทรงกระบอกสี่เหลี่ยม

4.4.2 ทดสอบผลกระทบของระยะห่างระหว่างวัสดุและหน้าต่างหัววัดรังสี

จากผลของภาพถ่ายในข้อ 4.4.1 ได้ทำการทดลองผลกระทบของระยะห่างวัสดุและ
หน้าต่างของหัววัดรังสี (d_2) ซึ่งมีผลต่อการเกิดเงาซ้อนของภาพตามสมการที่ 2.8 และการกระเจิง
ของรังสีเอกซ์จากวัสดุทดสอบบริเวณอื่นเข้ามาบริเวณ โดยจัดเงื่อนไขการทดลองดังรูปที่ 4.15 ก.
แปรเปลี่ยนระยะ d_2 ที่ 2, 1.5 และ 0 มม. ให้ผลทดสอบดังในรูปที่ 4.15 ข,ค และ ง

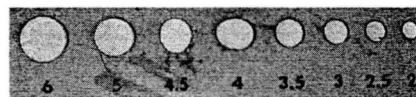
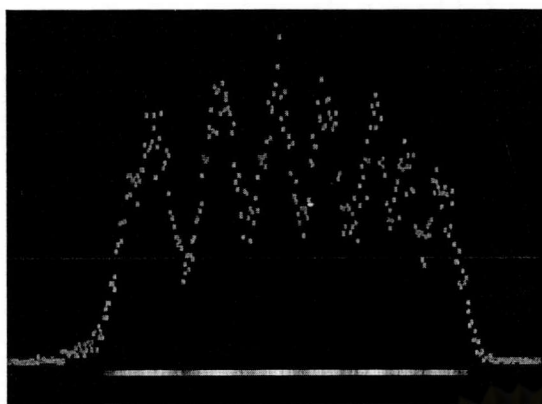


แผ่น template



การจัดวางวัสดุทดสอบ

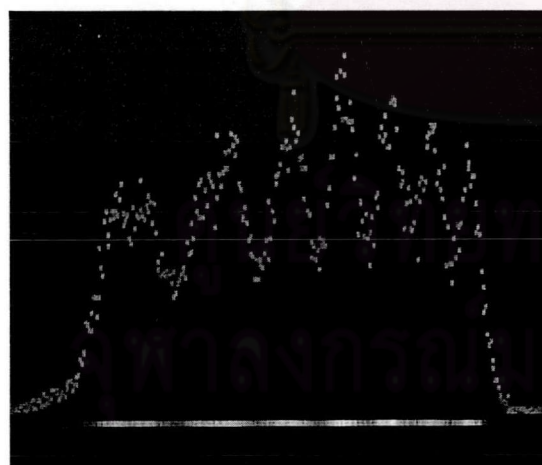
ก. ทดลองผลกระทบของระยะห่างวัสดุและหน้าต่างของหัววัดรังสี



ข. สัญญาณโปรไฟล์เมื่อวัดระยะ $d_2 = 2.0$ mm.



ค. สัญญาณโปรไฟล์เมื่อวัดระยะ $d_2 = 1.0$ mm.

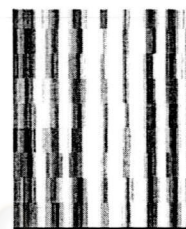
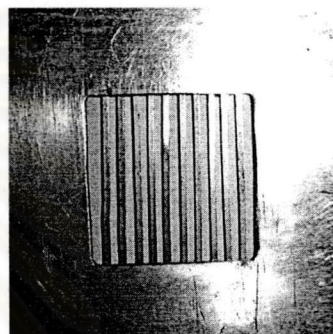
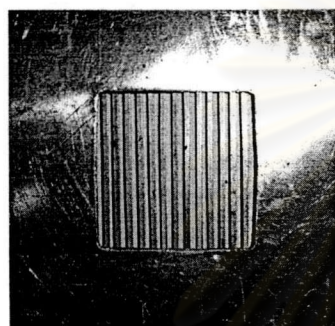


ง. สัญญาณโปรไฟล์เมื่อวัดระยะ $d_2 = 0$ mm.

รูปที่ 4.15 ผลทดสอบสัญญาณโปรไฟล์จากผลกระทบของระยะระหว่างวัสดุทดสอบ กับหน้าต่างของหัววัดรังสี

4.4.3 ทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดตามแนวเส้น

จากผลการทดลองระหว่างวัสดุทดสอบกับหน้าต่างของหัววัดรังสีซึ่งผลของโปรไฟล์สัญญาณดีขึ้น ได้ทดลองใช้เงื่อนไขดังกล่าวทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพตามแนวเส้น โดยใช้แผ่นทดสอบที่ประกอบด้วยทองแดงขนาด 1 มม.วางที่ระยะห่าง 1.5 และ 3 มม. หรือจำนวนเส้นเท่ากับ 4 เส้น/ซม. และ 3 เส้น/ซม. ตามลำดับ ให้ผลของภาพดังในรูปที่ 4.16 ก และ ข ตามลำดับจะเห็นว่ามีความสามารถแจกแจงรายละเอียดที่ 1.5 มม.



ก.ระยะห่าง 1.5 มม.

ข.ระยะห่าง 3 มม.

รูปที่ 4.16 ภาพถ่ายรังสีจากแผ่นทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดแนวเส้น

4.4.4 ทดสอบความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดจุดภาพ

ในการทดลองนี้ใช้แผ่น template ที่มีช่องวงกลมขนาดตั้งแต่ 2 มม. ถึง 10 มม. ทดลองถ่ายภาพผลของภาพถ่ายแสดงในรูปที่ 4.17.ข. ซึ่งจะเห็นว่ามีการแจกแจงรายละเอียดที่ขนาด 3 มม.



ก. แผ่น template



ข. ภาพถ่ายรังสีของ template

4.5 เปรียบเทียบผลการทำงานของระบบด้วยวงจรแปลงผันเวลาที่พัฒนาขึ้น

การทดลองนี้เป็นการปรับเปลี่ยนระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสส์ใหม่ใหม่โดยแทนอุปกรณ์มาตรฐาน NIM 2 ส่วนคือ

1. แทนอุปกรณ์หน่วงเวลาสัญญาณ (delay amplifier ORTEC model 427A) 2 โมดูล และอุปกรณ์แต่งรูปสัญญาณ (SCA CANBERRA model 2030) 1 โมดูล ด้วยวงจรหน่วงเวลาที่ออกแบบไว้ในข้อ 3.3.1
2. แทนอุปกรณ์แปลงผันคาบเวลาเป็นขนาดสัญญาณ (TAC CANBERRA model 2145) ด้วยวงจร TAC ที่พัฒนาขึ้น

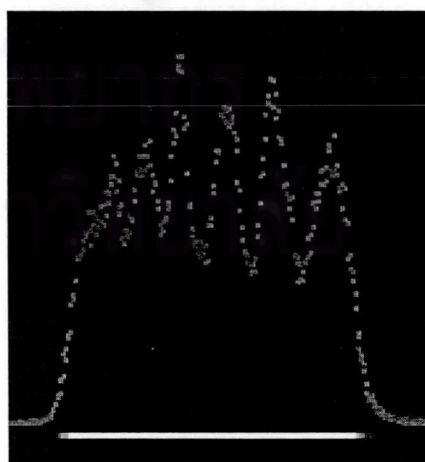
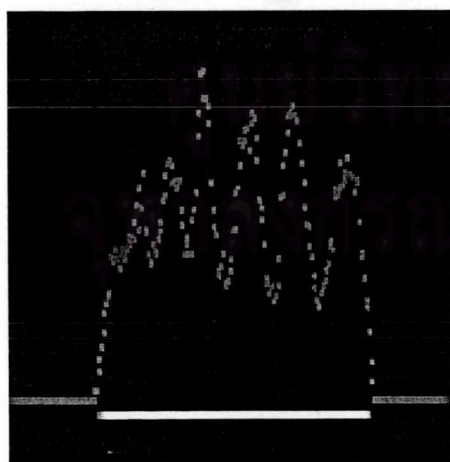
ผลการทดลองวัดสัญญาณข้อมูลโปรไฟล์ในการแจกแจงรายละเอียดจุดภาพด้วยแผ่น template เช่นเดียวกับข้อ 4.4.4 ให้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18



ก. แผ่น template ในการแจกแจง
รายละเอียดจุดภาพโดยใช้
ระบบมาตรฐาน NIM

ข. แผ่น template ในการ
แจกแจงรายละเอียดจุดภาพ
ที่พัฒนาขึ้น

รูปที่ 4.18 ผลทดสอบสัญญาณข้อมูลโปรไฟล์แผ่น template ในการแจกแจงรายละเอียดภาพ



ก. สัญญาณ โปรไฟล์จากระบบมาตรฐาน ข. สัญญาณ โปรไฟล์จากระบบที่พัฒนาขึ้นทดแทน
รูปที่ 4.19 ผลเปรียบเทียบสัญญาณโปรไฟล์ของระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสส์ใหม่

4.6 การทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำ

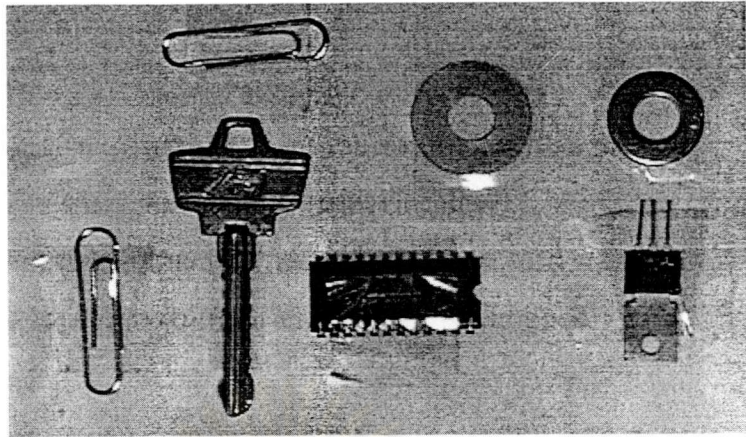
4.6.1 การทดลองถ่ายภาพตัวอย่างของบรรจุวัสดุปิดผนึก

ได้ทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของตัวอย่างของบรรจุวัสดุดังในรูปที่ 4.20.ก. ซึ่งบรรจุวัสดุต่างๆ ได้แก่ คลิปหนีบกระดาษ วงแหวนเหล็ก ไอซี ลูกกอล์ฟ แจกจัดเรียงดังในรูปที่ 4.20 ข. จักรยะระหว่างต้นกำเนิดรังสีและชิ้นตัวอย่างเท่ากับ 5 ซม. และระยะวัสดุจัดให้ติดกับหน้าต่างของหัววัดรังสีใช้ระบบวัดตำแหน่งมาตรฐาน NIM และระบบวัดตำแหน่งที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกัน โดยตั้งเวลานับรังสี 100 วินาที อัตราการสแกน 1.6 มม./ สเต็ป ใช้เวลาสแกนภาพ 2 ชั่วโมงให้ผลของภาพถ่ายดังในรูปที่ 4.20.ข. และ ค. แสดงให้เห็นรายละเอียดและความเปรียบเทียบดีพอสมควร

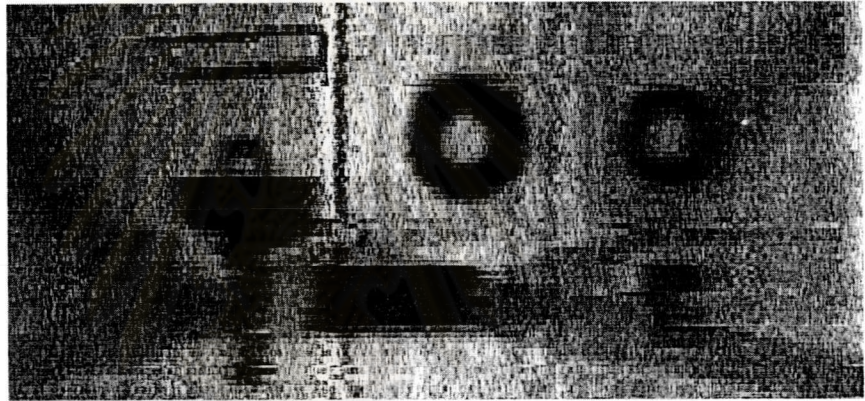


ก. ช่องจดหมายที่ใช้ผนึกวัสดุ

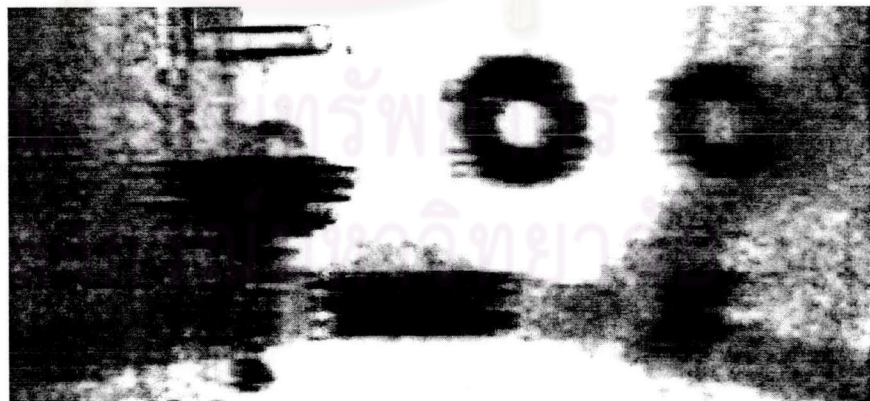
ศูนย์วิทยุโทรพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข. ตำแหน่งของวัตถุที่บรรจุในซองจดหมาย



ค. ภาพถ่ายรังสีเอกซ์โดยใช้ระบบวัดมาตรฐาน NIM



ง. ภาพถ่ายรังสีเอกซ์โดยใช้ระบบวัดที่พัฒนาขึ้น

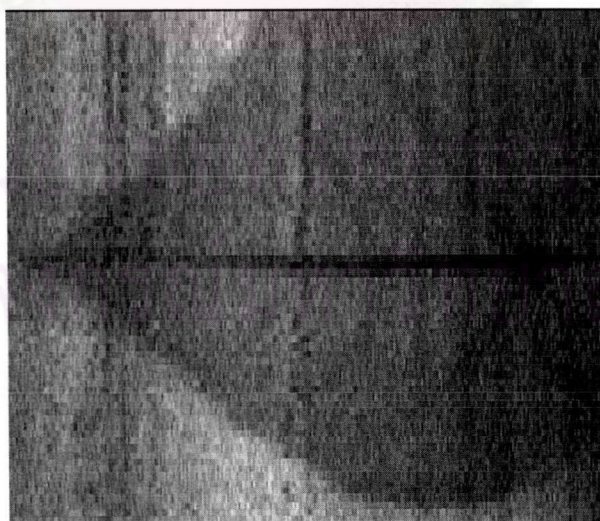
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ผลงานต่ำของวัตถุที่บรรจุภายในซองจดหมาย

4.6.2 การทดลองถ่ายภาพตัวอย่างทางชีวภาพ

ได้ทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของตัวอย่างใบไม้ในรูปที่ 4.21. ก. โดยใช้ระบบวัดตำแหน่งที่พัฒนาขึ้น จักระยะต้นกำเนิดรังสีและตัวอย่างที่ 15 ซม. ระยะวัตถุติดกับหน้าต่างวัดรังสีตั้งเวลานับรังสีที่ 60 วินาทีที่ระยะวัสดุ 1.0 มม. อัตราการสแกน 1.6 มม./สเต็มป์ ใช้เวลาในการสแกนภาพ 1 ชั่วโมง 30 นาทีให้ผลของภาพถ่ายดังในรูปที่ 4.21.ข. แสดงให้เห็นรายละเอียดเส้นใบและความเปรียบต่างดีพอสมควร



ก. ภาพใบโพธิ์ที่ใช้ในการถ่ายภาพด้วยรังสี



ข. ภาพถ่ายรังสีของใบโพธิ์

รูปที่ 4.21 ทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของตัวอย่างใบไม้