

## บทที่ 4

### ผลทดสอบการทำงานของระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

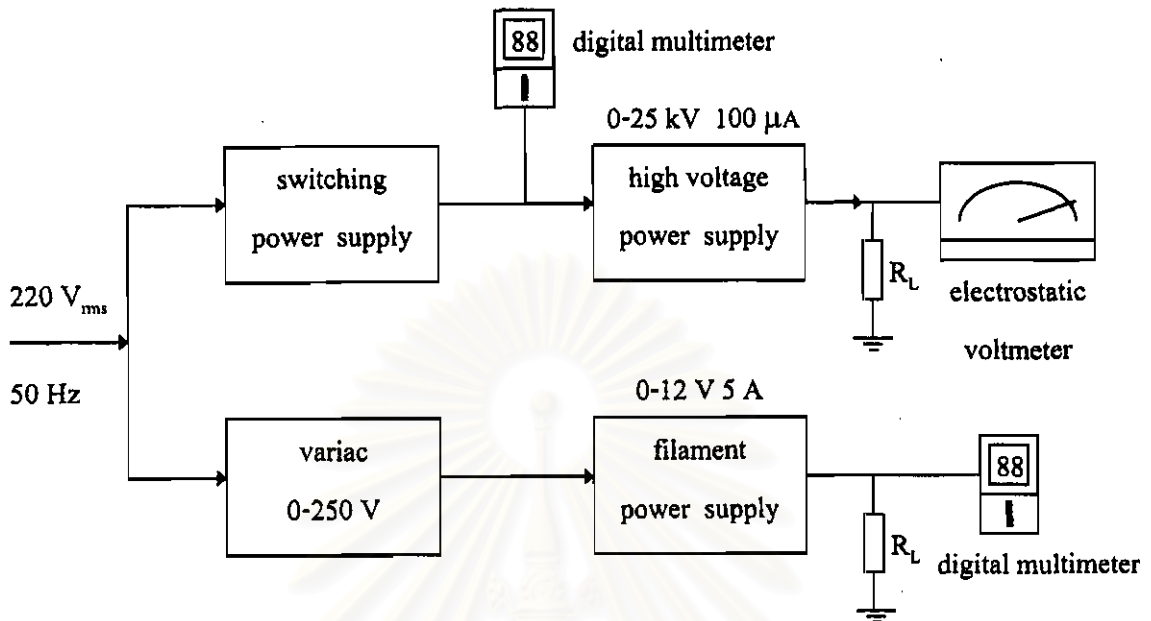
ระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นการดัดแปรหลอดรังสีแคโทดสำหรับกำเนิดลำอิเล็กตรอน โฟกัสลงบนแผ่นเป่าฟิล์มบางของทองคำ เพื่อกระตุ้นให้กำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัสด้านบนอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ ผ่านตัวอย่างขนาดเล็กบนฟิล์มถ่ายรูปที่ใช้ในงานจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และได้ทดสอบการทำงานของระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้นตามขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

- ก. การทำงานของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน
- ข. การกำเนิดลำอิเล็กตรอน
- ค. การกำเนิดรังสีเอกซ์
- ง. การถ่ายภาพรังสีเอกซ์

#### 4.1 การทดสอบระบบควบคุมแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

##### 4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1. มัลติมิเตอร์ระบบเชิงตัวเลข (digital multimeter) ของ Fluke model 8840A
2. มัลติมิเตอร์ระบบเชิงตัวเลข ของ Hewlett Packard model 3476B
3. โวลต์มิเตอร์ชนิดวัดไฟฟ้าสถิต (electrostatic voltmeter) ของ Sensitive research model ESH-22C
4. เครื่องอ่านรูปสัญญาณ (oscilloscope) ของ Tektronix model 465
5. หม้อแปลงไฟฟ้าปรับค่าได้ (variac) ของ Voltac model TSB-SM



รูปที่ 4.1 การจักระบบทดสอบการทำงานของระบบควบคุมแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

#### 4.1.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จักระบบทดสอบดังในแผนภาพรูปที่ 4.1
2. ทดสอบการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 0-20 กิโลโวลต์ และความสัมพันธ์กับแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำแบบสวิตซิง ขณะไม่มีโหลด โดยแปรเปลี่ยนค่าแรงดันไฟฟ้าสูงจาก 1.5 กิโลโวลต์ ถึง 20 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.1 และเส้นกราฟรูปที่ 4.2
3. ทดสอบการทำงานของวงจรแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง 0-20 กิโลโวลต์ โดยต่อโหลดขนาด 144 เมกกะโอห์ม เพื่อโหลดกระแส 138.89 ไมโครแอมป์ และหาความสัมพันธ์กับการควบคุมการจ่ายโหลด (load regulation) จากวงจรแหล่งไฟฟ้าศักดาต่ำแบบสวิตซิง โดยแปรเปลี่ยนค่าไฟฟ้าแรงดันสูงจาก 1.5 กิโลโวลต์ ถึง 20 กิโลโวลต์ ผลการทดสอบเป็นไปตามตารางที่ 4.2 และเส้นกราฟรูปที่ 4.3
4. ทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าทางออกของแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันต่ำ ทั้ง Line regulation และ Load regulation ที่ค่าสูงที่สุดของการจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง โดยใช้สมการที่ 4.1 และ 4.2 ในการคำนวณตามภาคผนวก ข.

$$\% \text{ line regulation} = \frac{[(V_{oh} - V_{ol})/V_o]}{[(V_{ih} - V_{il})/V_i]} \times 100 \quad \dots\dots\dots(4.1)$$

$$\% \text{ load regulation} = [(V_o - V_l)/V_o] \times 100 \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

โดยที่

$V_o$  = แรงดันไฟฟ้าทางออกปกติ

$V_i$  = แรงดันไฟฟ้าทางเข้าปกติ

$V_{oh}, V_{ol}$  = แรงดันไฟฟ้าทางออกสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ

$V_{ih}, V_{il}$  = แรงดันไฟฟ้าทางเข้าสูงสุดและต่ำสุดตามลำดับ

ผลการทดสอบการควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ line voltage  $\pm 10\%$  จะได้

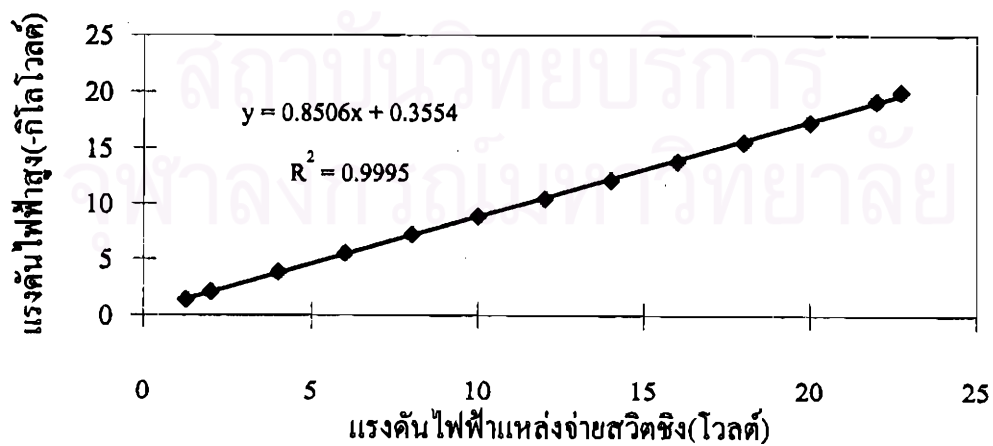
ค่า line regulation = 0.036 % และ load regulation = 0.113 %

5. ทดสอบการทำงานต่อเนื่องขณะมีโหลดที่อุณหภูมิห้อง 10 ชั่วโมง พบว่าแรงดันไฟฟ้าสูงทางออกเปลี่ยนแปลงน้อยกว่า  $\pm 50$  โวลต์
6. ทดสอบการเริ่มอาร์คที่ขั้วหม้อแปลงจุดใส่หลอดสูงสุดทนได้ 25 กิโลโวลต์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.1 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสวิตชิงกับแรงดันไฟฟ้าสูง ขณะไม่มีโหลด

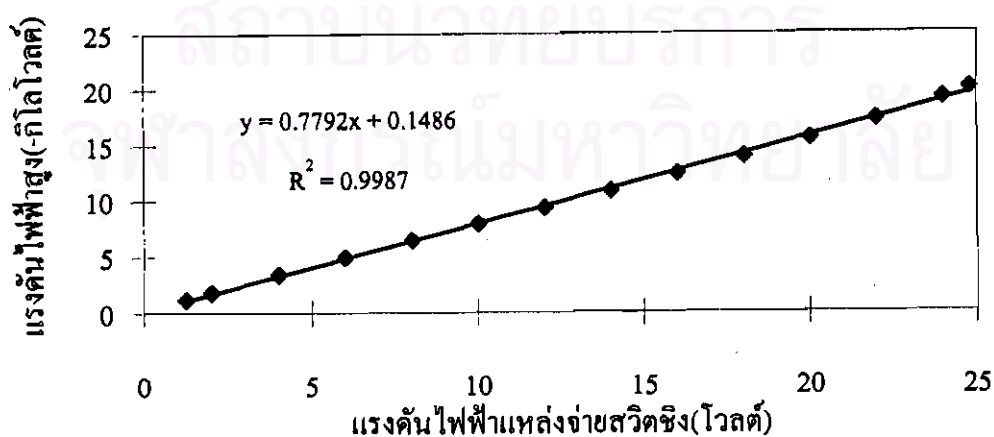
แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายสวิตชิง (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าสูงทางออก (กิโลโวลต์)
1.2698	- 1.42
2.0033	- 2.10
4.0021	- 3.86
6.0039	- 5.56
8.0046	- 7.22
10.0041	- 8.85
12.0046	-10.46
14.0057	-12.1
16.0068	-13.8
18.0085	-15.5
20.007	-17.3
22.008	-19.2
22.745	-20.0



รูปที่ 4.2 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าสูงขณะไม่มีโหลด

ตารางที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้าสวิตซิ่งกับแรงดันไฟฟ้าสูงขณะจ่ายโหลด

แรงดันไฟฟ้าแหล่งจ่ายสวิตซิ่ง (โวลต์)	แรงดันไฟฟ้าสูงทางออก (กิโลโวลต์)
1.259	- 1.21
2.0063	- 1.83
4.0054	- 3.40
6.0018	- 4.93
8.0028	- 6.43
10.0088	- 7.9
12.0063	- 9.36
14.0048	- 10.83
16.0069	- 12.4
18.0072	- 13.9
20.008	- 15.5
22.001	- 17.2
24.009	- 19.1
24.806	- 20.0

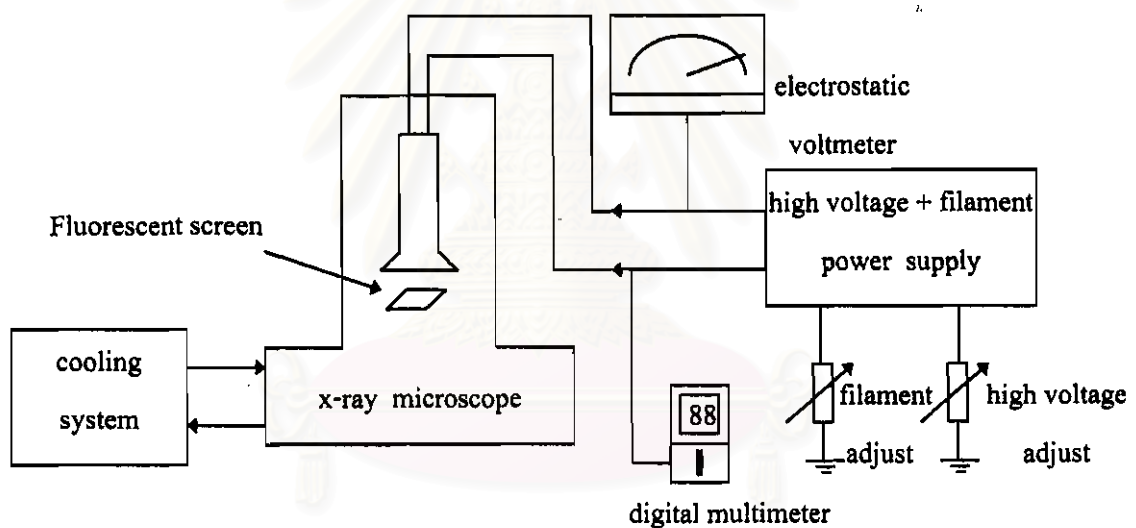


รูปที่ 4.3 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้นของแรงดันไฟฟ้าสูงขณะจ่ายโหลด

## 4.2 การทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอน

### 4.2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1. โวลต์มิเตอร์ชนิดวัดไฟฟ้าสถิต ของ Sensitive research model ESH-22C
2. แผ่นฉากเรืองแสงขนาด 6.5 x 6.5 ตารางเซนติเมตร
3. แผ่นฟิล์มถ่ายภาพในงานจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ ของ Fuji แบบ FG Orthochromatic ตัดให้มีขนาด 2.5 x 2.5 ตารางเซนติเมตร
4. ระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้น



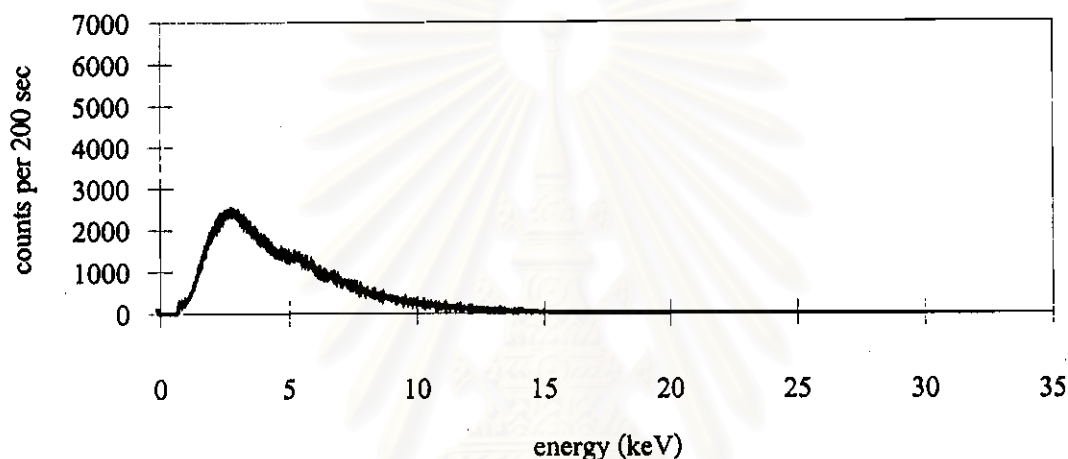
รูปที่ 4.4 การจัดระบบทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอน

### 4.2.2 ขั้นตอนการทดสอบ

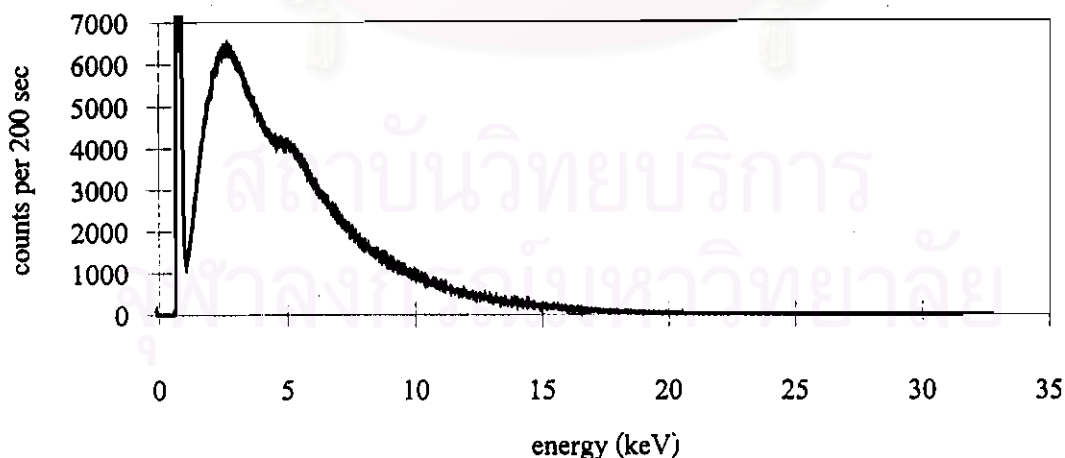
1. จัดระบบทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอนดังแผนภาพในรูปที่ 4.4
2. วางแผ่นเรืองแสงไว้ใต้ปืนอิเล็กตรอน ห่างจากแอโนด 3 เซนติเมตร
3. สูบสุญญากาศให้ได้ความดันสุญญากาศ  $1 \times 10^{-5}$  ทอร์
4. ทดสอบการกำเนิดลำอิเล็กตรอนที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และ 20 กิโลโวลต์ กระแส 60 และ 65 ไมโครแอมแปร์ พบว่าสามารถควบคุม

ปลายลำอิเล็กตรอนให้ตกบนแผ่นฉากเรืองแสงและปรับความเข้มของลำอิเล็กตรอนได้

7. ได้ทดลองใช้หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล(Xe) และระบบวิเคราะห์รังสีเอกซ์ในข้อ 4.3 วัดอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์ และ 20 กิโลโวลต์โดยตรง พบว่าลำอิเล็กตรอนจะทำอันตรกิริยากับหน้าต่างเบริลเลียม(Be) กำเนิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องดังในรูปที่ 4.5 ก.และข.ตามลำดับ



ก. สเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อเนื่องจากหน้าต่างเบริลเลียมที่ 15 กิโลโวลต์



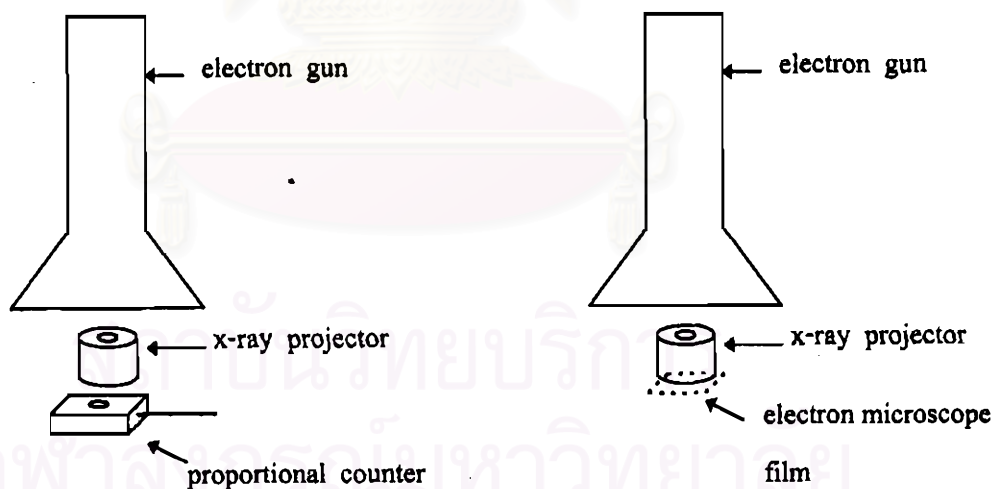
ข. สเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อเนื่องจากหน้าต่างเบริลเลียมที่ 20 กิโลโวลต์

รูปที่ 4.5 สเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อเนื่องที่เกิดจากหน้าต่างเบริลเลียมของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล

### 4.3 การทดสอบการกำเนิดรังสีเอกซ์

#### 4.3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1. อุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์
2. แผ่นเป่ากำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดฟิล์มบาง
3. เครื่อง ion sputtering ของ Baltech รุ่น SCD 040
4. แผ่นฟิล์มถ่ายภาพในงานจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ ของ Fuji ชนิด Orthochromatic ตัดให้มีขนาด 6.25 ตารางเซนติเมตร
5. ดันกำเนิดรังสีเอกซ์ เหล็ก-55 (Fe-55) ความแรง 5 มิลลิวรี
6. หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดบรรจุก๊าซซีนอน (Xe) ของ LND model 42111
7. อุปกรณ์ขยายส่วนหน้า ของ Canberra model 2006
8. เครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel analyzer) ของ Canberra model 40
9. ระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้น



ก. การวัดสเปกตรัมรังสีเอกซ์

ข. การวัดปริมาณรังสีเอกซ์

รูปที่ 4.6 แผนภาพการจัดอุปกรณ์ทดสอบการกำเนิดรังสีเอกซ์



#### 4.3.2 การเตรียมแผ่นเป่าทองคำชนิดฟิล์มบาง

ในการทดลองนี้แผ่นเป่าฟิล์มบางเลือกใช้ทองคำเป็นแผ่นเป่า เนื่องจากพลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่ผลิตได้เท่ากับ 20 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ การกำเนิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจากการกระตุ้นของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง จะให้ประสิทธิภาพสูงประมาณ 10 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นเมื่อพิจารณาวัสดุที่หาง่าย และเตรียมง่ายจากวิธีการ ion sputtering คือ ทองคำ ซึ่งมี L x-ray 9.71 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งการเตรียมฟิล์มบางของทองคำมีขั้นตอนดังนี้

1. ทดสอบคุณสมบัติของวัสดุฐาน (base) ที่จะใช้ฉาบฟิล์มแผ่นทอง โดยพิจารณาวัสดุ 3 ชนิด คือ ไมลาร์ (mylar) ไมกา (mica) และฟอร์มวาร์ (formvar) โดยทดลอง sputter ทองคำเป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.3 ไมกาให้ผลดีที่สุดจึงเลือกมาใช้เป็นฐาน

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบคุณสมบัติของวัสดุฐาน

วัสดุฐาน	คุณสมบัติของแผ่นฟิล์มที่ได้
ฟอร์มวาร์	แตกตามขอบ เนื่องจากผลของอุณหภูมิ
ไมลาร์	ผิวไม่สม่ำเสมอและโค้งงอ
ไมกา	ผิวเรียบและทนอุณหภูมิขณะเตรียม

2. ทดสอบการลดทอนปริมาณรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของแผ่นไมกา ที่ลอกผิวออกให้บางมากที่สุด โดยการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ของโครงกระดูกปลาหางนกยูง ด้วยต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดเหล็ก-55 ซึ่งมีพลังงาน 5.9 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ เปรียบเทียบระหว่างการวางฟิล์มบางไมกาทับบนตัวอย่างและถ่ายโดยตรงในบรรยากาศปกติดังรูปที่ 4.7 ก. ผลการทดลองเป็นไปตามรูปที่ 4.7 ข. และ ค. ซึ่งมีการสูญเสียปริมาณรังสีที่พลังงานต่ำไม่มากนัก



ก. แผนภาพการทดสอบการลดทอนปริมาณรังสีเอกซ์



ข. ภาพถ่ายโดยไม่มีแผ่นไมกา



ค. ภาพถ่ายผ่านแผ่นไมกาบาง

รูปที่ 4.7 ผลการทดลองถ่ายภาพรังสีเอกซ์พลังงาน 5.9 กิโลอิเล็กตรอน โวลต์ผ่านแผ่นไมกาบาง

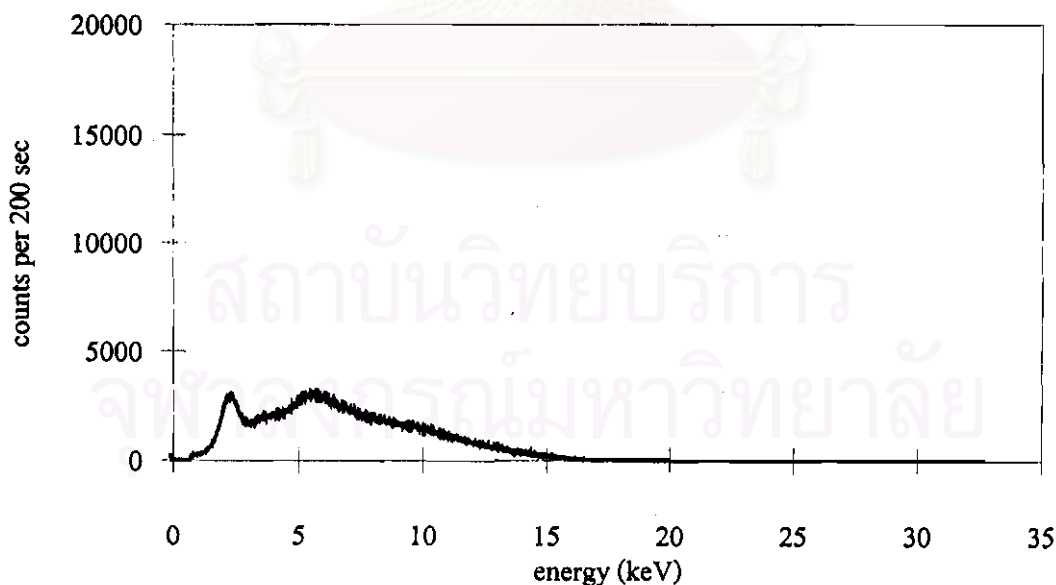
- นำแผ่นฐานไมกาไปเคลือบทองคำเพื่อสร้างแผ่นเป่าฟิล์มบางที่ความหนาต่างๆ ด้วยการควบคุมเวลาการทำ sputtering ได้แก่ 5, 10, 15, 20 และ 25 นาที ดังแสดงอุปกรณ์ในรูปที่ 4.8



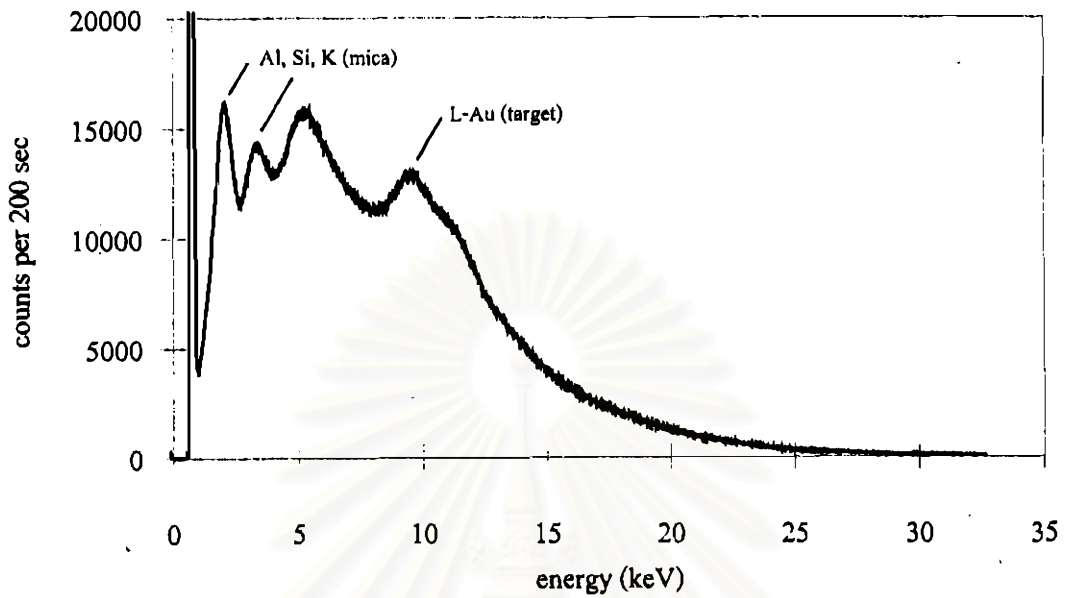
รูปที่ 4.8 เครื่องมือในการเตรียมแผ่นฟิล์มบางทองคำ

#### 4.3.3 ขั้นตอนการทดลองการกำเนิดรังสีเอกซ์

1. จัดระบบการทดสอบเช่นเดียวกับการทดสอบที่ 4.2 ดังรูปที่ 4.4
2. ใส่แผ่นเป่าฟิล์มบางของทองคำบน holder ของอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์
3. จัดหัววัดรังสีเพื่อวัดสเปกตรัมได้แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนดังรูปที่ 4.6 ก. และสร้างภาวะสุญญากาศที่  $10^{-5}$  ทอร์ ในห้องใส่ตัวอย่าง
4. ศึกษาผลของสเปกตรัมรังสีเอกซ์ของแผ่นเป่าฟิล์มบางทองคำที่ความหนาต่างๆ เพื่อหาความหนาที่เหมาะสมในการกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัสที่ให้ ความเข้มมากที่สุดโดยแปรเปลี่ยนความหนาของแผ่นฟิล์มที่เตรียมไว้
5. ผลการทดลองเป็นไปตามสเปกตรัมในรูปที่ 4.9ก.และข.
6. ศึกษาผลของความหนาของฟิล์มบางของทองคำ และความดำที่ปรากฏบนฟิล์ม (OD) ถ่ายภาพรังสีเอกซ์โดยแปรเปลี่ยนความหนาของแผ่นฟิล์มที่เตรียมไว้
7. ผลการทดลองเป็นไปตามตารางที่ 4.4 และเส้นกราฟในรูปที่ 4.10
8. นำแผ่นเป่าฟิล์มบางของทองคำที่ให้ปริมาณรังสีเอกซ์มากไปวัดความหนาของฟิล์มทองคำ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน
9. ผลการวัดความหนาเป็นไปตามข้อมูลในรูปที่ 4.11



ก. เวลาที่ใช้ในการเคลื่อนผิว 15 นาที แรงดันไฟฟ้า 15 กิโลโวลต์

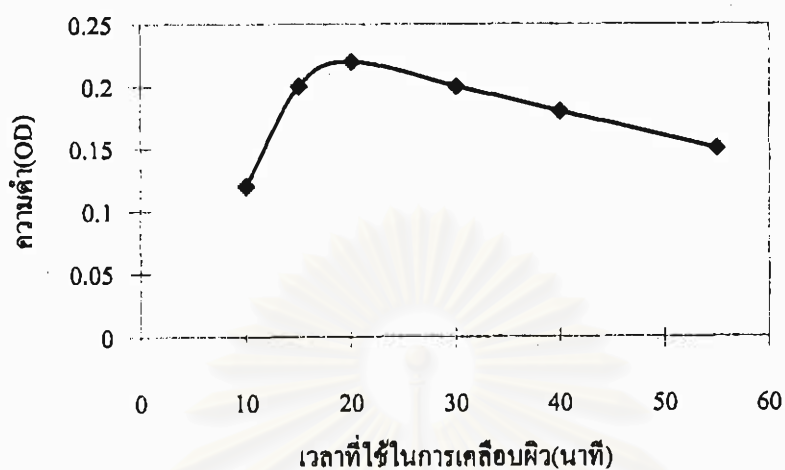


ข. เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว 15 นาที แรงดันไฟฟ้า 20 กิโลโวลต์

รูปที่ 4.9 สเปกตรัมรังสีเอกซ์จากแผ่นเป่าฟิล์มบางของทองคำที่ทะลุผ่านแผ่นฐานของไมกา

ตารางที่ 4.4 ความดำของฟิล์มที่เกิดจากรังสีเอกซ์ของแผ่นเป่าทองคำ

เวลาที่ใช้ในการเคลือบผิว (นาที)	ความดำ (OD)
10	0.12
15	0.20
20	0.22
30	0.20
40	0.18
55	0.15



รูปที่ 4.10 เส้นกราฟความสัมพันธ์ของความหนาของฟิล์มทองคำและความดำของรังสีเอกซ์บนแผ่นฟิล์ม (OD)



ก. เวลา 15 นาที  
ความหนา 300 นาโนเมตร

ข. เวลา 20 นาที  
ความหนา 350 นาโนเมตร

รูปที่ 4.11 ความหนาของฟิล์มบางทองคำบนฐานไมกาที่เวลาต่างๆ

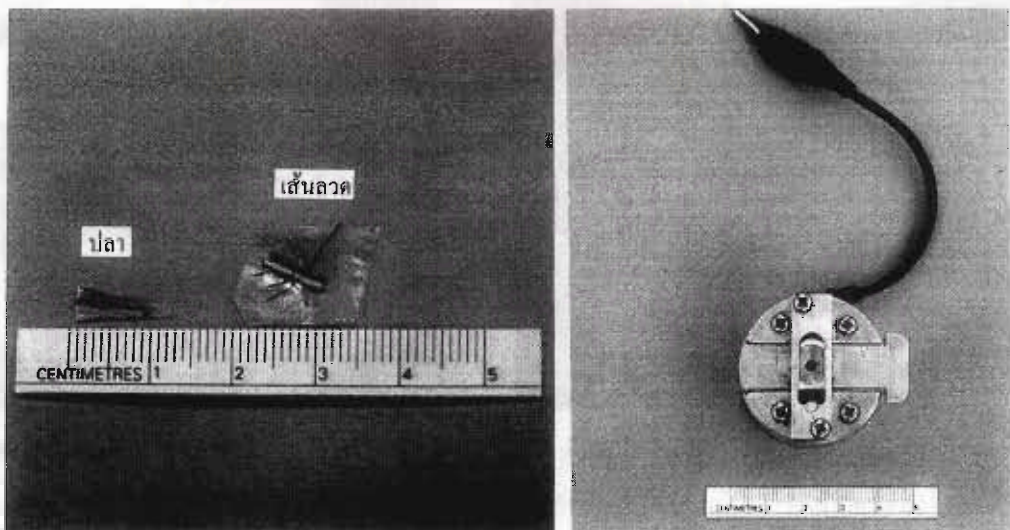
#### 4.4 การทดสอบถ่ายภาพรังสีเอกซ์

##### 4.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดสอบ

1. อุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์พร้อมแผ่นเป่าฟิล์มบาง
2. แผ่นฟิล์มถ่ายภาพในงานจุลทรรศน์อิเล็กทรอนิกส์ ของ Fuji ชนิด Orthochromatic และฟิล์มถ่ายภาพรังสีเอกซ์ในงานอุตสาหกรรม ของ Agfa STRUCTURIX D7
3. ตัวอย่างเส้นลวดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08, 0.12, 0.5 และ 1 มิลลิเมตร ตัวอย่างวัสดุที่มีความหนาแน่นต่ำ ได้แก่ ปลายทางนกยูง เป็นต้น
4. ระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ที่พัฒนาขึ้น

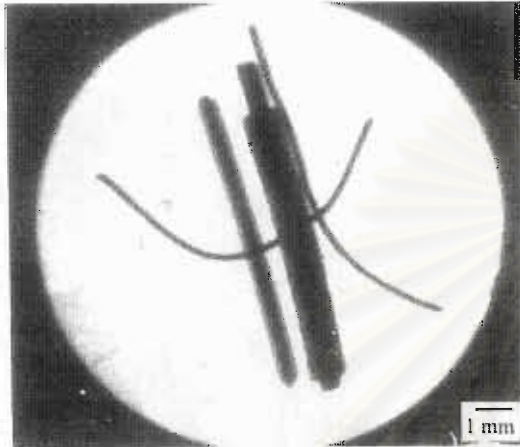
##### 4.4.2 ขั้นตอนการทดสอบ

1. จัดระบบวัดเช่นเดียวกับการทดลองในขั้นตอนที่ 4.3
2. ทดสอบความคมชัดของภาพที่กำลังขยายต่างๆ โดยใช้ตัวอย่างที่เป็นเส้นลวด โดยจัดระยะห่างระหว่างชิ้นตัวอย่าง ถึงต้นกำเนิดรังสีที่ 5.5 มิลลิเมตร และ 14.2 มิลลิเมตร ขนาดของชิ้นตัวอย่าง และอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์ แสดงในรูปที่ 4.12
3. ผลของภาพถ่ายชิ้นตัวอย่างด้วยรังสีเอกซ์แสดงในรูปที่ 4.13.ก.และข.

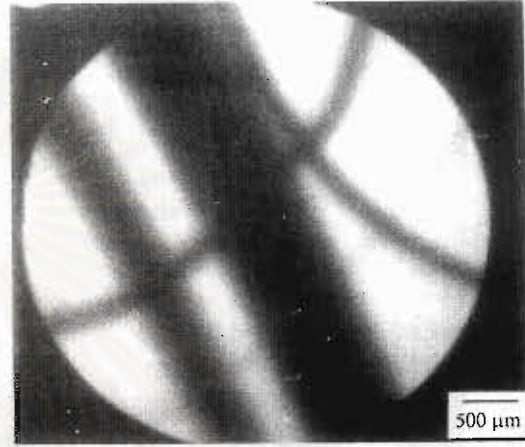


รูปที่ 4.12 แสดงขนาดชิ้นตัวอย่างและอุปกรณ์ฉายภาพรังสีเอกซ์

4. ทดสอบการถ่ายภาพขึ้นตัวอย่างที่มีความหนาแน่นต่ำได้แก่ ปลาหางนกยูงที่  
ระยะ  $d_2 = 20.5$  มิลลิเมตร และ  $d_2 = 11.8$  มิลลิเมตร
5. ผลของภาพถ่ายขึ้นตัวอย่างแสดงในรูปที่ 4.14 ก.และข.

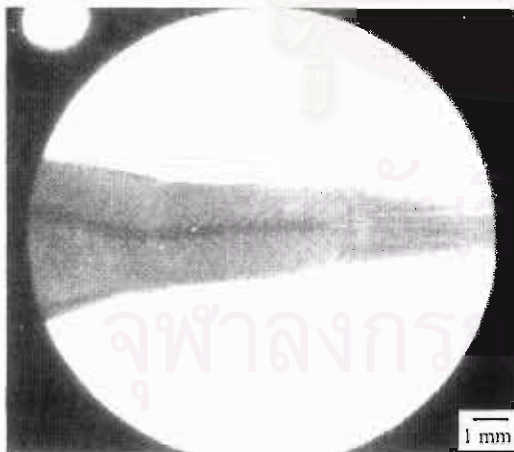


ก. กำลังขยายภาพถ่าย X 2 , กำลังอัดขยาย X 3  
กำลังขยายรวม X 6 , เวลาถ่ายภาพ 60 นาที  
ใช้ฟิล์ม Agfa STRUCTURIX D7

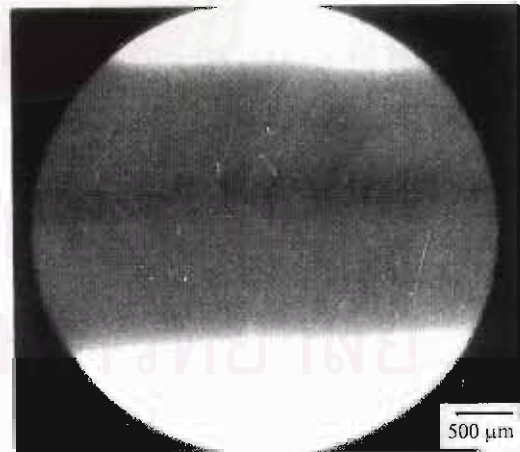


ข. กำลังขยายภาพถ่าย X 5 , กำลังอัดขยาย X 3  
กำลังขยายรวม X 15 , เวลาถ่ายภาพ 60 นาที  
ใช้ฟิล์ม Agfa STRUCTURIX D7

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ของขึ้นตัวอย่าง



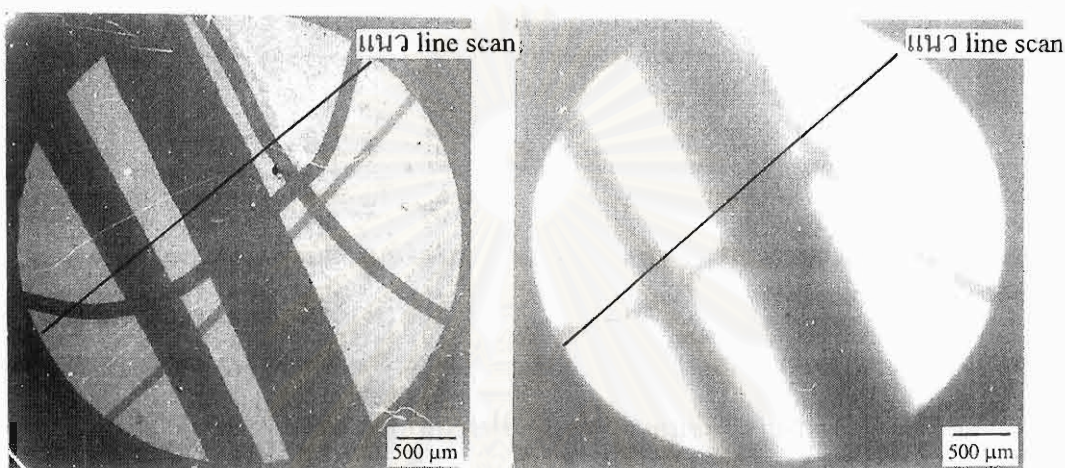
ก. กำลังขยายภาพถ่าย X 2 , กำลังอัดขยาย X 3  
กำลังขยายรวม X 6 , เวลาถ่ายภาพ 60 นาที  
ใช้ฟิล์ม Agfa STRUCTURIX D7



ข. กำลังขยายภาพถ่าย X 5 , กำลังอัดขยาย X 3  
กำลังขยายรวม X 15 , เวลาถ่ายภาพ 60 นาที  
ใช้ฟิล์ม Agfa STRUCTURIX D7

รูปที่ 4.14 ภาพถ่ายโครงกระดูกปลาหางนกยูง

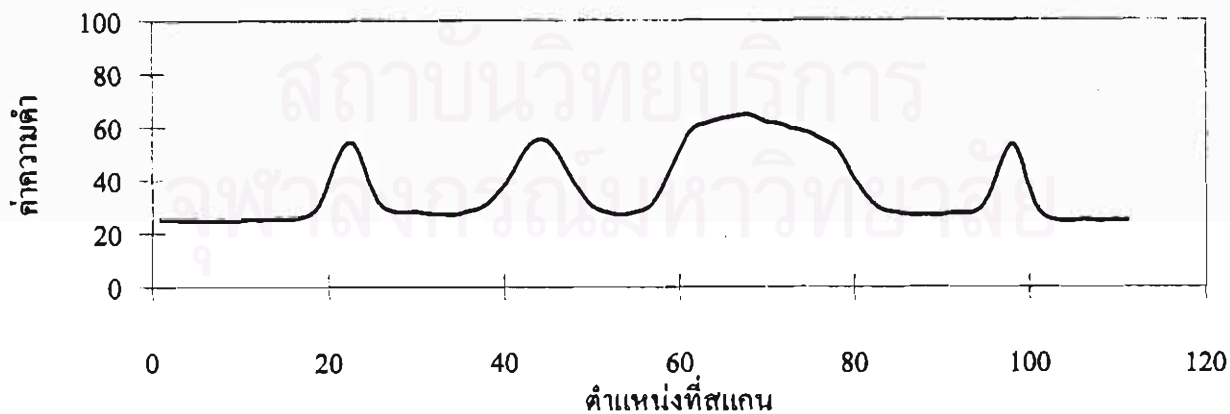
6. เปรียบเทียบผลของภาพถ่ายตัวอย่างเดียวกัน ด้วยลำอิเล็กตรอนจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน ของ JEOL รุ่น JSM-T-220 แสดงในรูปที่ 4.15
7. นำภาพถ่ายไปทดสอบความคมชัดขอบภาพได้ผลดังรูปที่ 4.16 ก. และ ข.



ก. ภาพถ่ายด้วยลำอิเล็กตรอนจาก  
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน  
ใช้ฟิล์ม Fuji ชนิด Orthochromatic

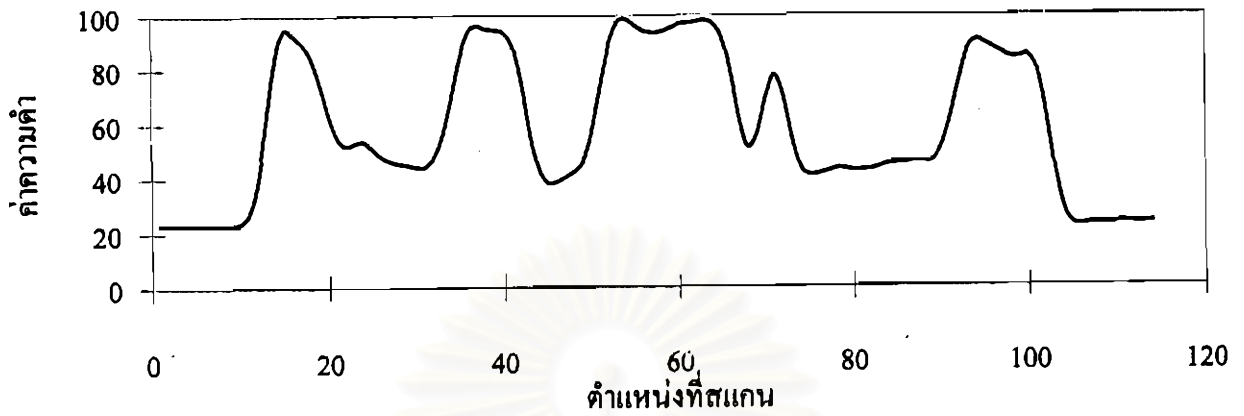
ข. ภาพถ่ายด้วยลำอิเล็กตรอนจาก  
การดัดแปรหลอดรังสีแคโทด  
ใช้ฟิล์ม Agfa STRUCTURIX D7

รูปที่ 4.15 ภาพเปรียบเทียบคุณภาพของภาพถ่ายรังสีเอกซ์จากตัวอย่างชิ้นงานเดียวกัน



ก. เส้นกราฟทดสอบความชัดขอบภาพในแนว line scan ของภาพถ่ายรังสีเอกซ์จาก  
การดัดแปรหลอดรังสีแคโทด





ข. เส้นกราฟทดสอบความชัดขอบภาพในแนว line scan ของภาพถ่ายรังสีเอกซ์จาก  
กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

รูปที่ 4.16 เส้นกราฟทดสอบความคมชัดขอบภาพ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย