หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

การดำเนินการทดลองและผลการทดลอง

3.1 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง

อุปกรณ์หลักสำคัญที่ใช้ในการทดลอง ได้แก่ ต้นกำเนิดรังสี ฟิล์ม คอนเวอร์เตอร์สกรีน ชิ้นงานทดสอบ อุปกรณ์สร้างภาพ และอุปกรณ์การอ่านผล (ดังแสดงในตารางที่ 3.1)

ตารางที่ 3.1 อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการทดลอง

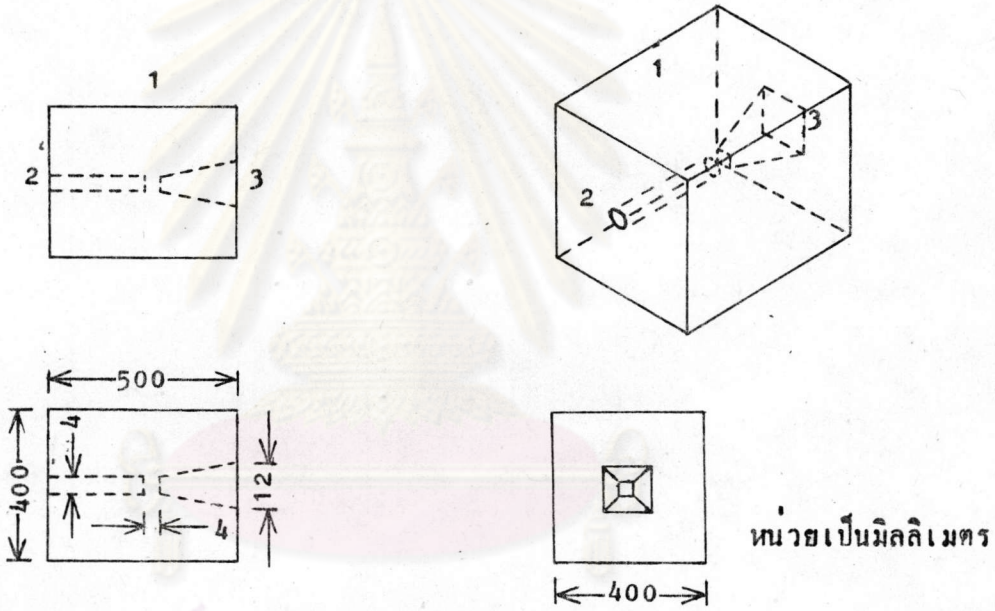
ต้นกำเนิดรังสี	ฟิล์ม	คอนเวอร์เตอร์สกรีน	ชิ้นงานทดสอบ	อุปกรณ์สร้างภาพ
นิวตรอน	รีกดัก CN85 TYPE B	ลิเทียมเตตราบอเรต	PSW แคดเมียม S-1 โพลีเอทิลีน อิริเดียม-192	รีซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 น้ำกลั่น
เอกซ์	รีกดัก AA-5	แผ่นตะกั่วบาง	S-1 โพลีเอทิลีน อิริเดียม-192	น้ำยาสร้างภาพ น้ำธรรมดา น้ำยาคงสภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 สร้างอุปกรณ์ที่ใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากต้นกำเนิดพลูโทเนียม-เบริลเลียม

3.2.1 ทำแบบหล่อเพื่อบรรจุวัสดุกำบังรังสี (พาราฟีน) และช่องบังคับลำนิวตรอน วัสดุที่ใช้ทำเป็นไม้อัดหนา 0.5 เซนติเมตร

3.2.2 นำแผ่นพาราฟีนขนาด 30x50x4 เซนติเมตร จำนวน 13 แผ่น (ทำให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อหลอมตัวได้สะดวก) มาเคี่ยวในบีบซึ่งตั้งบนเตาไฟฟ้า และเมื่อพาราฟีนเหลวก็นำไปเทในแบบหล่อที่เตรียมไว้ แล้วทิ้งให้เย็นตัว จะได้อุปกรณ์ดังแสดงในรูปที่ 3.1

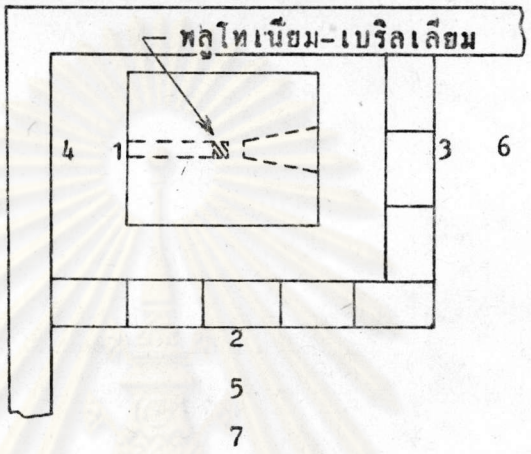


1. พาราฟีนหล่อทรงลูกบาศก์
2. ช่องบรรจุพลูโทเนียม-เบริลเลียม
3. ช่องบังคับลำนิวตรอน

รูปที่ 3.1 อุปกรณ์กำบังรังสีและช่องบังคับลำนิวตรอน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 นำก้อนพาราฟินผสมโบรอนร้อยละ 30 (borated paraffin) มาเรียงเป็นชั้น ๆ รอบก้อนพาราฟินที่หล่อเสร็จแล้ว เพื่อป้องกันอันตรายจากรังสีอีกชั้นหนึ่ง แล้วนำต้นกำเนิดพลูโทเนียม-เบริลเลียม ออกจากถังบรรจุ ใส่ในช่องของก้อนพาราฟินที่หล่อเสร็จแล้ว (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) จากนั้นวัดระดับรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมาด้วยเครื่องมือวัดที่เตรียมไว้ ผลการวัดดังแสดงในตารางที่ 3.2



รูปที่ 3.2 การวัดระดับรังสีและตำแหน่งที่ทำการวัด

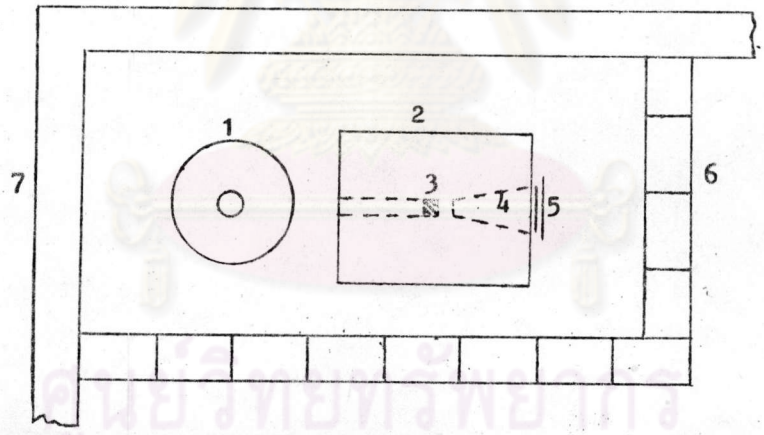
ตารางที่ 3.2 ผลการวัดระดับรังสีจากพลูโทเนียม-เบริลเลียมที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งที่	ระดับรังสีนิวตรอน (mrem/Hr)	ระดับรังสีแกมมา (mR/Hr)	หมายเหตุ
1	3.5	4.0	1 เป็นช่องบรรจุ
2	0.3	1.4	ต้นกำเนิดนิวตรอน 2,3
3	2.0	3.0	เป็นระยะสัมผัสกำบังรังสี
4	0.3	1.0	4,5,6 เป็นระยะที่ห่าง 1
5	0.1	0.4	เมตร และ 7 ห่าง
6	0.1	0.5	3 เมตร มีเชือกกั้นและ
7	0.1	0.1	ติดป้ายบอกระดับรังสี

3.3 ทดสอบลำนิวตรอนจากต้นกำเนิดพลูโทเนียม-เบริลเลียม

การทดสอบลำนิวตรอนที่ตำแหน่งถ่ายภาพชิ้นงาน เพื่อให้ทราบขนาดความโตและทิศทางของลำนิวตรอน จะได้ใช้ถ่ายภาพชิ้นงานที่เหมาะสม ซึ่งถ้าหากชิ้นงานที่นำมาถ่าย มีขนาดโตกว่าความโตของลำนิวตรอน หรือขนาดของแผ่นฟิล์ม (9x12 เซนติเมตร) ก็สามารถถ่ายภาพชิ้นงานทีละส่วนแล้วนำมาต่อกันได้

3.3.1 นำฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทของโกดักชนิด CN85 TYPE B พร้อมกระดาษหุ้มฟิล์มมาประกบ ติดกับแผ่นอลูมิเนียมขนาด 9x12 เซนติเมตร หนา 0.75 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันฟิล์มหักงอ แล้วนำมาติดตั้งที่ปลาย ของช่องบังคับลำนิวตรอน ต่อมาทำการกำบังรังสีอีกชั้นหนึ่ง ด้วยก้อนพาราฟีน ขนาด 15x15x25 เซนติเมตร จำนวน 40 ก้อน และขนาด 15x15x30 เซนติเมตร จำนวน 25 ก้อน จากนั้นนำพลูโทเนียม-เบริลเลียมออกจากถังบรรจุใส่ในช่อง (ดังแสดงในรูปที่ 3.3)



1 ถังบรรจุพลูโทเนียม-เบริลเลียม
2 พาราฟีนหล่อทรงลูกบาศก์
3 พลูโทเนียม-เบริลเลียม
4 ช่องบังคับลำนิวตรอน
5 ตำแหน่งชิ้นงาน (และฟิล์ม)
6 กำบังรังสี
7 ผนังคอนกรีต

รูปที่ 3.3 แผนภาพการทดสอบลำนิวตรอนจากต้นกำเนิดพลูโทเนียม-เบริลเลียม

ในการกำบังรังสีครั้งนี้ ไม่มีการกำบังรังสีแกมมา เนื่องจากต้นกำเนิดนิวตรอนชนิดนี้ มีปริมาณรังสีแกมมาต่ำ และโปรดสังเกตที่ตำแหน่งทางขวาของต้นกำเนิดจะมีความหนาของพาราฟีน 4 เซนติเมตร เพื่อลดพลังงานจากฟาสต์นิวตรอน (fast neutron) เป็นเทอร์มัลนิวตรอน (thermal neutron) การทดสอบลำนิวตรอนนี้ ใช้เวลาในการถ่าย 21 วัน ระยะจากต้นกำเนิดนิวตรอน ถึงฟิล์มห่าง 10 เซนติเมตร

3.3.2 เตรียมน้ำยากัดรอยบนฟิล์ม โดยการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ชนิดเกล็ด จำนวน 90 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นจำนวน 900 มิลลิลิตร ในถ้วยตวงขนาด 1 ลิตร แล้วคนด้วยแท่งแก้ว ให้ละลายเข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จะได้น้ำยากัดขยายรอยโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 10 (10% NaoH) มีคุณสมบัติเป็นด่าง ใช้กัดขยายรอยอนุภาคได้

3.3.3 นำฟิล์มที่ถ่ายแล้ว ไปทำการกัดขยายรอย ตามกรรมวิธีต่อไปนี้

1. นำฟิล์มที่ถ่ายแล้วมาแช่ในน้ำเย็นธรรมดา ที่อุณหภูมิประมาณ 20-25 เซลเซียส เพื่อล้างคอนเวอร์เตอร์สกรีน (ซึ่งเป็นวัสดุสีขาวเคลือบบนแผ่นฟิล์มทั้ง 2 ด้าน) ออกให้หมดก่อน โดยขณะที่แช่น้ำ ก็ใช้คีมจับฟิล์มเขย่าเป็นครั้งคราว เพื่อให้คอนเวอร์เตอร์สกรีน หลุดออกจากแผ่นฟิล์มเร็วขึ้นเป็นการประหยัดเวลา ในขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 7-10 นาที

2. นำแผ่นฟิล์ม (ซึ่งมีลักษณะใส) แช่ลงในน้ำยากัดขยายรอยซึ่งมีอุณหภูมิ 60 เซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที และควบคุมอุณหภูมิไว้ ที่ระดับนี้ตลอดเวลา ขณะที่กัดขยายรอยบนฟิล์ม ให้ใช้คีมจับฟิล์มเขย่า และยกดูเป็นครั้งคราว เพื่อให้ส่วนที่ถูกน้ำยากัดออก หลุดออกจากแผ่นฟิล์มโดยง่าย และช่วยให้น้ำยาทำปฏิกริยากับแผ่นฟิล์มได้ทั่วตลอดทั้ง 2 ด้าน ลักษณะการจัดอุปกรณ์การกัดขยายรอย ดังแสดงในรูปที่ 3.4

3. นำฟิล์มที่ผ่านการกัดขยายรอยแล้ว มาแช่ในน้ำเย็นธรรมดาประมาณ 30 นาที เพื่อให้น้ำชะล้างน้ำยา ที่ติดอยู่ที่ผิวหน้าแผ่นฟิล์มออกให้หมด

4. นำฟิล์มขึ้นจากน้ำยึดติดกับไม้ตากฟิล์ม ปล่อยทิ้งไว้ให้แห้งในอุณหภูมิห้องปกติใช้เวลาประมาณ 40-50 นาที

5. นำฟิล์มที่แห้งแล้วมาอ่านผลด้วยสายตา ผลการทดสอบพบว่าความโต

ลำนิวตรอน เท่ากับ 9x12 เซนติเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.5)

รูปที่ 3.4 ความเข้มของลำนิวตรอนที่ได้จากต้นกำเนิดพลูโทเนียม-เบริลเลียม

3.4 ถ่ายภาพชิ้นงาน S-1 ด้วยต้นกำเนิดพลูโทเนียม-เบริลเลียม

3.4.1 นำชิ้นงาน S-1 ไปถ่ายภาพโดยติดตั้งชิ้นงานในตำแหน่งเดิมใช้เวลาถ่าย 30 วัน ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนถึงฟิล์ม 10 เซนติเมตร

3.4.2 นำฟิล์มที่ถ่ายมากัดขยายรอยตามวิธีการ ในข้อ 3.3.3 ผลการล้างปรากฏว่า ภาพถ่ายที่ได้มีลักษณะเป็นฝ้าขาว มองเห็นลาง ๆ เท่านั้น (ดังแสดงในรูปที่ 3.6) ที่เป็นเช่นนี้เพราะ นิวตรอนฟลักซ์จากพลูโทเนียม-เบริลเลียมต่ำเกินไป ซึ่งจากการคำนวณได้พบว่าที่ตำแหน่งชิ้นงาน มีนิวตรอนฟลักซ์ตกกระทบเท่ากับ 2.7×10^2 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที ซึ่งไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดภาพได้ชัดเจนในเวลาที่เหมาะสม

รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายชิ้นงาน S-1 ด้วยพลูทเนียม-เบริลเลียม

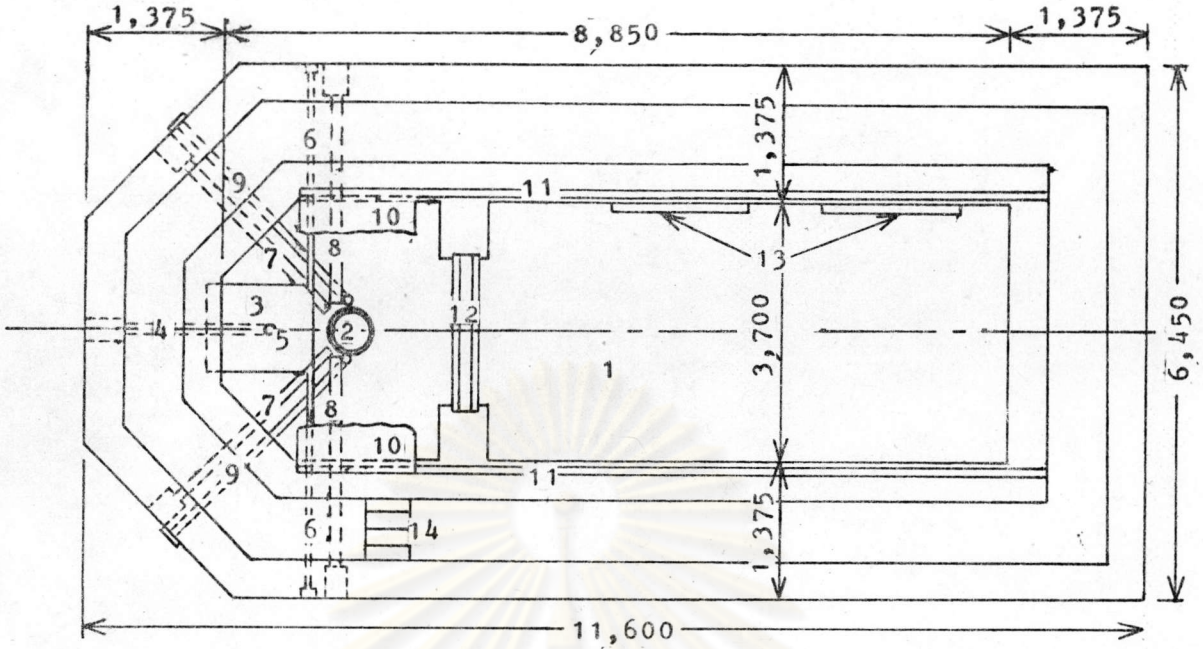
3.5 ดัดแปลงและติดตั้งอุปกรณ์ เพื่อใช้ถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์-ปรมาณูวิจัย-1/ปรับปรุงครั้งที่1 (ปปว-1/1)

3.5.1 จากแผนผังเครื่องปฏิกรณ์ปปว-1/1 (ดังแสดงในรูปที่ 3.6) จะมีท่อที่ใช้สำหรับถ่ายภาพด้วยนิวตรอน 2 ด้าน คือ ด้านเหนือและด้านใต้ ของแกนเครื่องปฏิกรณ์ ฯ แต่ละด้านจะมีท่อ 3 ขนาด ได้แก่ขนาด 2 นิ้วซึ่งมี 2 ระดับ คือ ระดับบนและล่าง (2" lower and upper through tubes) ขนาด 6 นิ้วและขนาด 8 นิ้ว ซึ่งเป็นท่อที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้เหตุที่ใช้ท่อ 8 นิ้ว เพราะว่ามีความพร้อม สะดวกและอันตรายจากรังสีมีน้อย เนื่องจากอุปกรณ์ชุดนี้ทางกองพิสิกส์ สำนักงานพลังงานปรมาณูเพื่อสันติ ได้ออกแบบไว้เพื่อศึกษาทดลองในเรื่อง "ดิฟแฟรคชันของนิวตรอน" อยู่ก่อนแล้ว จึงนำมาดัดแปลงใช้กับงานถ่ายภาพด้วยนิวตรอน โดยใช้อุปกรณ์ชุดนี้ร่วมกัน อุปกรณ์ดังกล่าวมีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.7

3.5.2 ทำการวัดระดับรังสี ขณะเดินเครื่องปฏิกรณ์ ฯ ที่ระดับกำลัง 1 เมกะวัตต์ความร้อน ณ บริเวณที่ทดลอง ผลการวัดแสดงในตารางที่ 3.3

3.6 ทดสอบลำนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

การทดสอบลำนิวตรอน ทำเพื่อจุดประสงค์เดียวกับการทดสอบลำนิวตรอนจากต้นกำเนิด พลูทเนียม-เบริลเลียม แต่มีสิ่งที่เพิ่มเติม คือชุดกำบังรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา ซึ่งมีความแรงรังสีสูงกว่ามาก โดยเฉพาะที่ปากทางออกของลำนิวตรอน



หน่วยเป็นมิลลิเมตร

รูปที่ 3.6 แผนผังเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

1. บ่อปฏิกรณ์ ฯ
2. แกนเครื่องปฏิกรณ์ ฯ
3. เทอร์มัลคอลัมน์
4. ทออาบรังสีที่เทอร์มัลคอลัมน์แนวนอน
5. ทออาบรังสีที่เทอร์มัลคอลัมน์แนวตั้ง
6. ทออาบรังสีขนาด 2 นิ้วยาวทลอด (มี 2 ระดับ บนและล่าง)
7. ทออาบรังสีขนาด 6 นิ้ว (มี 2 ด้าน)
8. ทออาบรังสีขนาด 8 นิ้ว (มี 2 ด้าน)
9. ทออาบรังสีด้วยลม
10. สะพานยึดติดแกนเครื่องปฏิกรณ์ ฯ
11. รางเหล็ก (สำหรับให้สะพานเลื่อนไปมา)
12. ปูระดูกั้นน้ำระหว่างบูอเล็กกับบอใหญ่
13. ที่พักแท่งเชื้อเพลิงใหม่
14. บันได

3.6.1 นำฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท จำนวน 1 แผ่น ใส่ในตลับอลูมิเนียม จากนั้นนำไปติดตั้ง ที่ตำแหน่งปลายท่อบังคับลำนิวตรอนที่ 2 ซึ่งมีระยะห่างจากแกนเครื่องปฏิกรณ์ ฯ ประมาณ 4 เมตร ระยะเวลาที่ใช้ถ่ายคือ 1 ชั่วโมง

3.6.2 นำฟิล์มไปกัดขยายรอย ตามขบวนการที่กล่าวในข้อ 3.3.3 พบว่า ความยาวลำนิวตรอนเท่ากับ 7.9 เซนติเมตร (ดังแสดงในรูปที่ 3.8)

ตารางที่ 3.3 ผลการวัดระดับรังสีจากเครื่องปฏิกรณ์ ฯ ที่ตำแหน่งต่าง ๆ

ตำแหน่งที่	ระดับรังสีนิวตรอน (mrem/Hr)	ระดับรังสีแกมมา (mR/Hr)	หมายเหตุ
1.	2.0	2.0	ตำแหน่งที่ 1-2 เป็น
2.	4-7	6.0	ระยะที่สัมผัสกำบังรังสี
3.	2.8	2.0	ตำแหน่งที่ 3-4 เป็น
4.	3-5	5.0	ระยะที่ห่าง 1 เมตร
5.	1-2	4.0	ตำแหน่งที่ 5-6 เป็น
6.	1-3	4.0	ระยะที่ห่าง 2 เมตร
7.	-	-	ตำแหน่งที่ 7-8 เข้า
8.	-	-	ไปวัดไม่ได้
9.	2.0	2.0	ตำแหน่งที่ 9 ระยะ ห่าง 3 เมตรมีเขื่อกกั้น

3.7 ตรวจสอบความเข้มของนิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งชิ้นงานทดสอบ

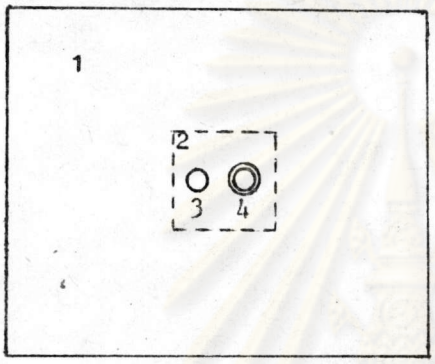
การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จำเป็นจะต้องรู้จำนวนนิวตรอนฟลักซ์ เพื่อจะได้ทราบจำนวนนิวตรอน ตกกระทบที่แผ่นฟิล์ม และชิ้นงาน ช่วยให้สามารถหาเวลา

รูปที่ 3.8 ขนาดของลำนิวตรอนที่ใช้ในการถ่ายภาพเท่าของจริง
(กว้างและยาวเท่ากับ 7.9 เซนติเมตร)

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ในการถ่ายภาพได้ถ้ารู้ค่าภาคตัดขวางการดูดกลืน ของวัสดุที่จะนำมาตรวจสอบ

3.7.1 นำแผ่นอินเดียม (In-115) จำนวน 2 แผ่น ไปอาบนิวตรอนที่ตำแหน่งเดียวกับการทดสอบลำนิวตรอน โดยให้ทองแผ่นที่ 1 อาบนิวตรอนโดยตรง (bare) ทองแผ่นที่ 2 หุ้มด้วยฟาแคดเมียมทั้งสองด้าน แล้วนำไปยึดติดกับตลับอลูมิเนียม (ดังแสดงในรูปที่ 3.9) เพื่อสะดวกในการเลื่อนเข้าออก โดยทำการอาบนิวตรอนพร้อมกันทั้ง 2 แผ่น ทำการอาบทั้งหมด 3 ครั้ง ระยะเวลาที่ใช้อาบนิวตรอน คือ 4 ชั่วโมง, 5 ชั่งโมง 57 นาที และ 5 ชั่วโมง 18 นาที ตามลำดับ



1. ตลับอลูมิเนียม
2. บริเวณที่ลำนิวตรอนตกกระทบ
3. แผ่นอินเดียม (หรือทอง) ไม่หุ้มแคดเมียม
4. แผ่นอินเดียม (หรือทอง) หุ้มแคดเมียม

รูปที่ 3.9 รูปการติดตั้งแผ่นอินเดียมและทองกับตลับอลูมิเนียม

3.7.2 นำแผ่นอินเดียมที่อาบนิวตรอนไปวัดความแรงรังสี (activity) และคำนวณหานิวตรอนฟลักซ์ ซึ่งวิธีการในข้อนี้ดำเนินการโดยเจ้าหน้าที่กองฟิสิกส์* สำนักงานพลังงานปรมาณู ฯ ผลการคำนวณหานิวตรอนฟลักซ์จากอินเดียม ได้ค่าเท่ากับ 5.974×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที

3.7.3 นำแผ่นทอง (Au-198) จำนวน 2 แผ่น ไปอาบนิวตรอน โดยให้ทองแผ่นที่ 1 และ 2 อาบนิวตรอนโดยตรงและหุ้มด้วยฟาแคดเมียม เช่นเดียวกับข้อ 3.7.1 พร้อมกัน เป็นเวลา 12 ชั่วโมง และ 15 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.7.4 นำแผ่นทองที่อาบนิวตรอนแล้ว ไปวัดความแรงรังสี และคำนวณหานิวตรอนฟลักซ์จากทอง ผลคือได้เทอร์มัลฟลักซ์ เท่ากับ 7.206×10^6 นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที (ดังแสดงในตารางที่ 3.4)

* คุณชาญชัย อัศวินิจกุลชัย

ตารางที่ 3.4 นิวตรอนฟลักซ์ที่ตำแหน่งชิ้นงานซึ่งได้จากอินเดียมและทอง

วัสดุที่ใช้	เอพิเทอร์มัลนิวตรอน (นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)	เทอร์มัลนิวตรอน (นิวตรอนต่อตารางเซนติเมตรต่อวินาที)
อินเดียม	1.655×10^{6}	5.974×10^{6}
ทอง	7.470×10^{5}	7.206×10^{6}

3.8 หาอัตราส่วนแคดเมียม (cadmium ratio)

การหาอัตราส่วนแคดเมียม เพื่อให้ทราบว่าที่ตำแหน่งชิ้นงาน มีอัตราส่วนและความเข้มของ เอพิเทอร์มัล (เรโซแนนซ์) ต่อเทอร์มัลนิวตรอน ว่าเป็นเท่าไร ซึ่งจากผลการวัดและคำนวณหาความแรงรังสีและนิวตรอนฟลักซ์ ในข้อ 3.6 จะได้อัตราส่วนแคดเมียม ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 อัตราส่วนแคดเมียมที่ได้จากการวัดนิวตรอนฟลักซ์

วัสดุที่ใช้	การอาบนิวตรอน		อัตราส่วนแคดเมียม
	ไม่หุ้มแคดเมียม (dps)	หุ้มแคดเมียม (dps)	
อินเดียม	5.107×10^{6}	1.278×10^{6}	3.99:1
ทอง	4.338×10^{5}	1.289×10^{5}	3.36:1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.9 หาเงื่อนไขการกัดขยายรอยอนุภาคบนฟิล์ม

การกัดขยายรอยอนุภาคฟิล์มเป็นอีกขั้นตอนหนึ่งที่สำคัญ จึงจำเป็นต้องหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด เพื่อให้ผลการตรวจสอบวัสดุชัดเจนและถูกต้องที่สุด

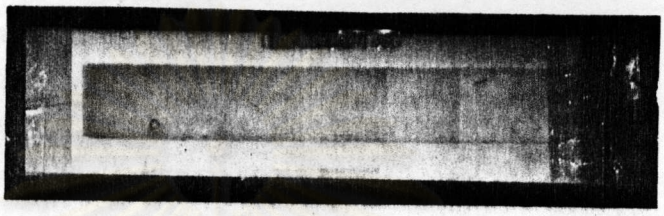
3.9.1 นำชิ้นงานทดสอบ PSW (plastic step-wedge) มีขนาด 1.0x6.3 เซนติเมตร ซึ่งมีลักษณะเป็นขั้น ๆ 6 ขั้น หนาขั้นละ 0.2 มิลลิเมตร ยึดติดด้วยกาวไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ทั้งหมด 7 ครั้ง ๆ ละ 30 นาที ฟิล์มที่ใช้คือฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทเช่นเดิม

3.9.2 นำฟิล์มมาล้างเพื่อกัดขยายรอย ด้วยน้ำยาโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 ตามวิธีการเช่นเดียวกับข้อ 3.2.3 ทีละฟิล์ม แต่เวลาที่ใช้กัดขยายรอยแตกต่างกัน ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 3.6

ตารางที่ 3.6 เงื่อนไขการกัดขยายรอยบนฟิล์มที่ใช้เวลาต่างกัน

ฟิล์มที่	น้ำยากัดขยายรอยอนุภาค	อุณหภูมิของน้ำยา (เซลเซียส)	เวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอย (นาที)
1	10% NaOH	60	10
2	10% NaOH	60	15
3	10% NaOH	60	20
4	10% NaOH	60	25
5	10% NaOH	60	30
6	10% NaOH	60	35
7	10% NaOH	60	40

3.9.3 นำฟิล์มที่แห้งสนิทแล้วทั้ง 7 ฟิล์ม มาตรวจผลด้วยสายตา ผลคือ ฟิล์มที่ 2, 3 และ 4 ให้ความชัดเจนใกล้เคียงกัน ไม่สามารถระบุได้ว่าฟิล์มใดดีที่สุด (ดังแสดงในรูปที่ 3.10) จากนั้นนำฟิล์มมาส่องดูรอยอนุภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์ OLYMPUS BH-2 ขยาย 400 เท่า ผลปรากฏว่าฟิล์มที่ 2 ซึ่งใช้เวลา 15 นาที ในการกัดขยายรอย มีความคมชัด และคอนทรัสต์ดีที่สุด (ดังแสดงในรูปที่ 3.10)



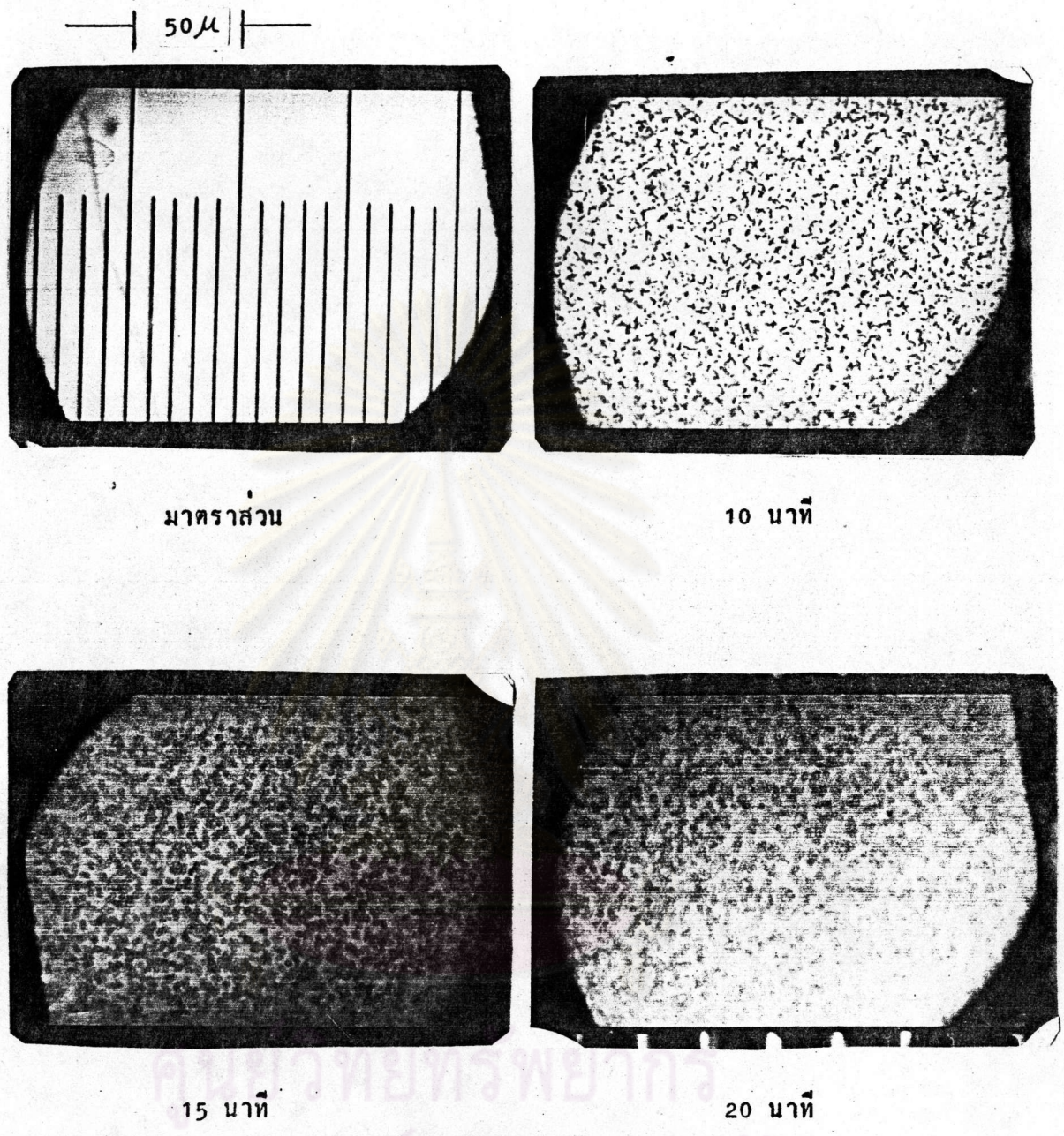
รูปที่ 3.10 ผลการกัดขยายรอยชิ้นงาน PSW ด้วยเวลาต่าง ๆ
(เป็นภาพที่ถ่ายเอกสารจากฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท)

3.10 <u>ทดสอบเรโซลูชัน</u> (resolution)

การถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ต้องมีการทดสอบเรโซลูชัน เพราะในชิ้นงานที่ตรวจสอบ จะมีการกระจายของโครงสร้างที่แตกต่างกัน ซึ่งส่วนที่ต้องการตรวจสอบอาจจะอยู่ชิดกันมากจนแยกไม่ออก จึงต้องใช้วิธีนี้ และเพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์สกรีน ว่าจะสามารถแยกรายละเอียดของภาพ ชิ้นงานทดสอบได้ดีเพียงใด

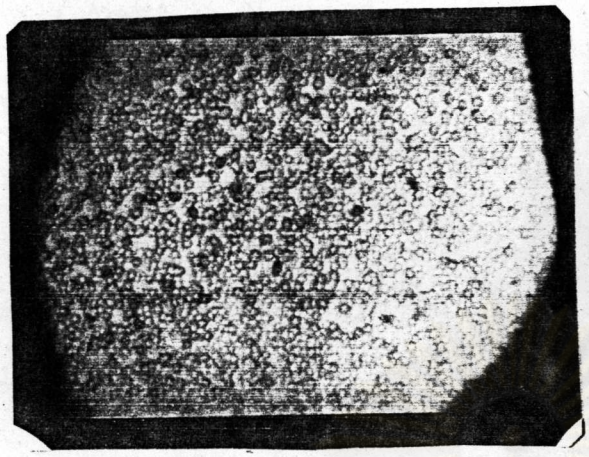
3.10.1 นำแผ่นแคดเมียมเจาะรู (รายละเอียดดูในภาคผนวก) และฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท ไปยึดติดกับตลับอลูมิเนียม แล้วนำถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ ๆ ครั้งละ 1 ฟิล์มใช้เวลาถ่ายนาน 30,45,60,75 และ 90 นาที ตามลำดับ

3.10.2 นำฟิล์มที่ถ่ายภาพแล้ว ไปล้างตามกรรมวิธีในข้อ 3.3.3 แต่เวลาที่ใช้กัดขยายรอยอยู่ในช่วง 15 ถึง 20 นาที เพราะเป็นเวลาที่เหมาะสมที่สุดตามที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.9.3

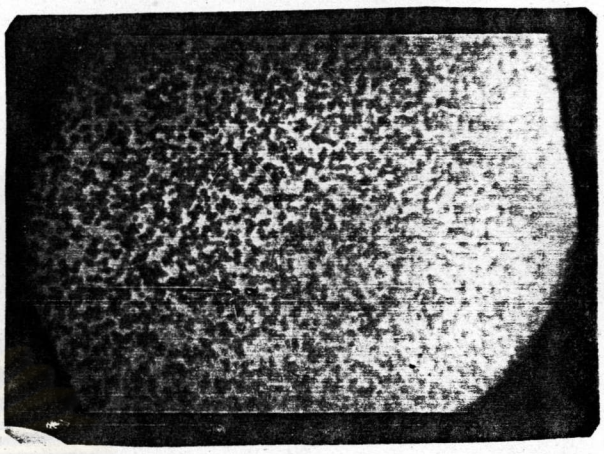


รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายของรอยอนุภาคที่ถูกกัดขยายรอยของชิ้นงาน PSW ซึ่งใช้เวลากัดขยายรอยต่าง ๆ กัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

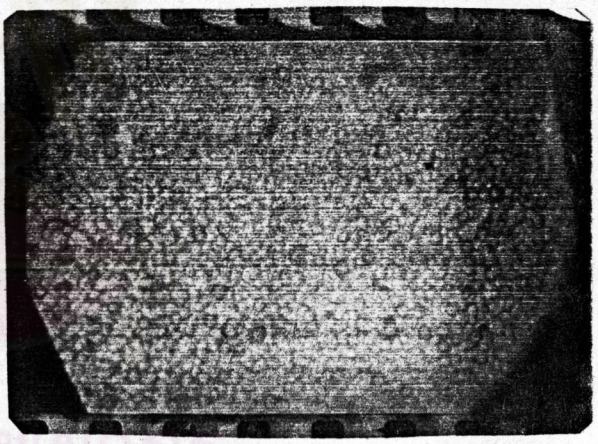


25 นาที



30 นาที

35 นาที

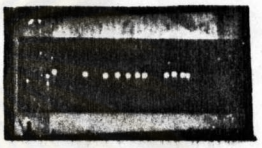


40 นาที

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.11 (ต่อ)

3.10.3 นำฟิล์มมาอ่านผลด้วยสายตา พบว่าเรโซลูชันจัดอยู่ในขั้นดี สามารถมองเห็นรูเล็ก ๆ และขอบรูที่เจาะไว้ได้ชัดเจน (ดังแสดงในรูปที่ 3.12) และเมื่อนำไปส่องกล้องจุลทรรศน์ดู ปรากฏว่าไม่พบความแตกต่างที่เด่นชัด จึงต้องนำไปเปรียบเทียบด้วยการอัดภาพลงบนกระดาษอัดภาพ (ดังแสดงในรูปที่ 3.19) **ผลลัพธ์ฟิล์มที่ใช้เวลาถ่าย 75 นาที มีความคมชัดที่สุด**



รูปที่ 3.12 ผลของภาพถ่ายจากการทดสอบเรโซลูชัน

3.11 ถ่ายภาพชิ้นงาน S-1 ด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ ปปว-1/1

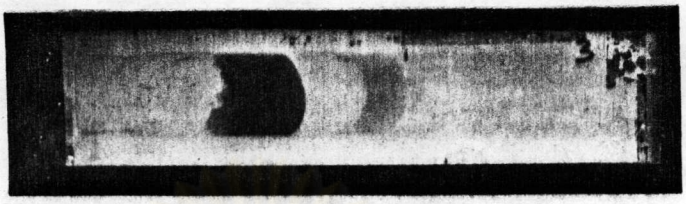
เนื่องจากเทคนิคอันนี้เพิ่งเริ่มต้นศึกษา จึงได้สร้างชิ้นงานทดสอบ S-1 ขึ้นมา (รายละเอียดดูในภาคผนวก) เพื่อแสดงให้เห็นคุณสมบัติของการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน ว่าสามารถตรวจสอบวัสดุที่มีส่วนประกอบของธาตุเบาต่างชนิดได้ดี และสามารถเห็นรายละเอียดได้ดีด้วย

3.11.1 นำชิ้นงาน S-1 ไปถ่ายภาพด้วยฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทจำนวน 5 ฟิล์ม โดยทำการถ่ายทีละฟิล์ม เวลาที่ใช้ในการถ่ายคือ 30,45,60,75 และ 90 นาที ตามลำดับ

3.11.2 นำฟิล์มทั้ง 5 ฟิล์มมากัดขยายรอย ตามกรรมวิธีในข้อ 3.3.3 โดยใช้เวลากัดขยายรอยนาน 15 นาที

3.11.3 นำฟิล์ม 5 ฟิล์มดังกล่าวมาอ่านผลด้วยสายตา พบว่าสามารถมองเห็นวัสดุธาตุเบาต่างชนิดกันซึ่งบรรจุรูรอยไนไตรด์,คาร์บอน,ลิเทียมฟลูออไรด์ และแมงกานีสได้ชัดเจนพอสมควร เมื่อนำฟิล์มไปส่องกล้องจุลทรรศน์ พบว่าฟิล์มที่ 3 ซึ่งใช้เวลาถ่ายภาพนาน 60 นาที มีรอยอนุภาคคมชัดที่สุด และระยะห่างของรอย

ชิดกันมากแต่ไม่ซ้อนกัน และมีจำนวนรอยอนุภาคแตกต่างกันด้วย ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าภาคตัดขวางของการดูดกลืนนิวตรอนของวัสดุแต่ละชนิด เช่นริบรอนคาร์ไบด์ดูดกลืนได้สูงกว่าฟิล์มจึงใสเพราะเกิดรอยอนุภาคน้อย (ในรูปจะมีสีดำมากที่สุด) เป็นต้น



รูปที่ 3.13 ภาพผลการถ่ายชิ้นงาน S-1

3.12 ถ่ายภาพก้อนโพลีเอทิลีนผสมริบรอนร้อยละ 5 และร้อยละ 32

ในขั้นตอนนี้ทดลองเพื่อทดสอบว่าวัสดุธาตุเบาชนิดเดียวกัน แต่มีส่วนผสมของริบรอนต่างกัน ซึ่งริบรอนเป็นวัสดุที่ดูดกลืนนิวตรอนได้สูง เมื่อนำไปถ่ายภาพด้วยนิวตรอน จะสามารถแยกให้เห็นความแตกต่างได้มากน้อยเพียงใด

3.12.1 นำชิ้นงานสองชิ้นมาถ่ายภาพด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ ฯ พร้อมกันโดยจัดให้ชิ้นงานทั้งสองวางชิดติดกัน ใช้ฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทเป็นตัวบันทึกภาพ ทำการถ่าย 4 ครั้ง เวลาที่ใช้ถ่ายนาน 2,2.5,3 และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ

3.12.2 นำฟิล์มไปกัดขยายรอยอนุภาค ตามวิธีการในข้อ 3.3.3 โดยใช้เวลา 15 นาที

3.12.3 นำฟิล์มมาอ่านผลด้วยสายตาพบว่า สามารถเห็นความแตกต่างของความหนาแน่นของวัสดุทั้งสองชิ้นได้ชัดเจน เพราะชิ้นงานที่ผสมริบรอนร้อยละ 5 ซึ่งน้อยกว่าร้อยละ 32 จะดูดกลืนนิวตรอนได้น้อยทำให้เกิดรอยอนุภาคมากจึงมีสีขาวมากกว่า และฟิล์มที่เห็นความแตกต่างมากที่สุดคือฟิล์มที่ 2 ซึ่งใช้เวลาถ่าย 2.5 ชั่วโมง (ดังแสดงในรูปที่ 3.14)

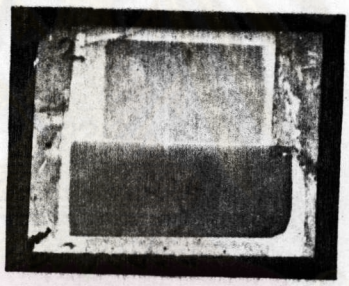
3.13 ถ่ายภาพต้นกำเนิดรังสีแกมมาอิริเดียม-192 (Ir-192)

เนื่องจากฟิล์มเซลลูโลสไม่ทำปฏิกริยากับรังสีเอกซ์ แกมมาและแสงสว่าง ดังนั้นจึงสามารถถ่ายภาพ ต้นกำเนิดรังสีแกมมาได้ เพื่อเป็นการทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มชนิดนี้และเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง ของอิริเดียม-192

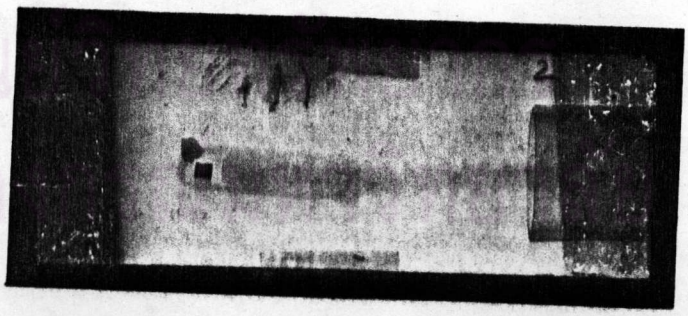
3.13.1 นำอิริเดียม-192 ความแรง 16 คูรี มาถ่ายภาพทีละฟิล์ม ทั้งหมด 4 ครั้งใช้เวลา 45,60,75 และ 90 นาที ตามลำดับ

3.13.2 นำฟิล์มที่ถ่ายแล้วไปกัดขยายรอย ตามวิธีดังกล่าวมาแล้ว

3.13.3 นำฟิล์มมาอ่านผลด้วยสายตา พบว่าฟิล์มที่ 2 สามารถมองเห็นโครงสร้างของอิริเดียม-192 ได้ชัดเจนที่สุด สามารถเห็นโครงสร้างภายในซึ่งมีลักษณะเป็นชิ้นเล็ก ๆ วางเรียงกัน 4 ชิ้น



รูปที่ 3.14 ผลการถ่ายก้อนโพลีเอทิลีนผสมโบรอนร้อยละ 5 และร้อยละ 32



รูปที่ 3.15 ภาพอิริเดียม-192 ที่ถ่ายด้วยนิวตรอน

3.14 ถ่ายภาพชิ้นงาน S-1 ก้อนโพลีเอทิลีนผสมบรอนและต้นกำเนิดรังสีแกมมา (อิริเดียม-192) ด้วยรังสีเอกซ์

ขั้นตอนการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยรังสีเอกซ์ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.14.1 อุ่นเครื่อง (warm) ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ก่อน ที่พลังงาน 100 กิโลโวลท์ กระแส 1 มิลลิแอมป์ เป็นเวลา 5 นาที

3.14.2 นำชิ้นงาน S-1 มาถ่ายภาพ ใช้พลังงาน 62 กิโลโวลท์ 12 มิลลิแอมป์-นาที (2x6 mA-min) ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ ถึงฟิล์ม เป็น 24 นิ้ว (FFD=24นิ้ว)

3.14.3 นำฟิล์มไปล้างในห้องมืด ตามวิธีการต่อไปนี้

1. เอาฟิล์มออกจากซองฟิล์ม ยึกติดกับไม้แขวนฟิล์ม (hanger)

2. จุ่มฟิล์มลงในน้ำยาสร้างภาพ (developer) ความเข้มข้นร้อยละประมาณ 26 (น้ำยาสร้างภาพ 5 ลิตรต่อน้ำกลั่น 19 ลิตร) มีอุณหภูมิประมาณ 20 เซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ขั้นตอนนี้ต้องเขย่าฟิล์มเป็นระยะ เพื่อให้น้ำยาสร้างภาพทำปฏิกริยาได้ทั่วถึงตลอดแผ่นฟิล์ม และให้ส่วนที่ถูกกัดออกตกตะกอนสู่ก้นถัง

3. นำฟิล์มแช่น้ำเย็นธรรมดา (stop bath) ที่อุณหภูมิ 20 เซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 2 นาที เพื่อหยุดปฏิกริยาการสร้างภาพ และชะล้างน้ำยาสร้างภาพให้หลุดออกไปจากผิวฟิล์ม ขณะที่แช่น้ำต้องเขย่าฟิล์มเป็นครั้งคราวด้วย เพื่อมั่นใจในว่าหยุดปฏิกริยาได้ทั่วถึง

4. จุ่มฟิล์มลงในน้ำยาคงสภาพ (fixer) ซึ่งมีความเข้มข้นร้อยละ 26 (น้ำยาคงสภาพ 5 ลิตรต่อน้ำกลั่น 19 ลิตร) อุณหภูมิ 20 เซลเซียส เป็นเวลานาน 6 นาที เพื่อให้ฟิล์มและภาพถ่ายมีความคงทน ไม่เปลี่ยนแปลงสภาพได้ง่าย ทำให้เก็บผลไว้ได้นาน ขณะที่จุ่มน้ำยาคงสภาพ ก็เขย่าฟิล์มเป็นครั้งคราวเช่นเดียวกับทุกขั้นตอน เพื่อให้น้ำยาทำปฏิกริยาได้ทั่วถึงทั้งแผ่นฟิล์ม

5. นำฟิล์มมาแช่ในน้ำธรรมดา (อุณหภูมิประมาณ 20-25 เซลเซียส) เพื่อให้น้ำชะล้างน้ำยาคงสภาพออกให้หมด เป็นการทำให้ฟิล์มสะอาด

6. นำฟิล์มไปตากในตู้อบฟิล์ม ทิ้งไว้ให้แห้งด้วยอุณหภูมิห้อง

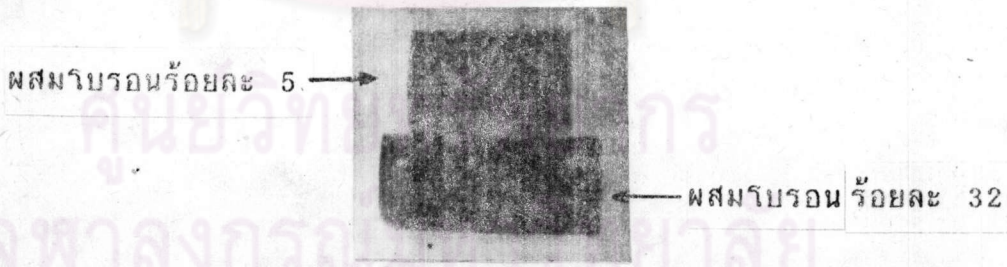
7. นำฟิล์มไปอ่านผลด้วยไฟอ่านฟิล์ม

ผลการถ่ายภาพชิ้นงาน S-1 ปรากฏว่าส่วนที่เป็นวัสดุทองเหลือง ดูคมชัดดี แต่รายละเอียดในการแยกชั้นวัสดุ และเนื้อวัสดุแต่ละชนิดไม่ดีพอ ดังแสดงในรูปที่ 3.16

รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายชิ้นงาน S-1 ที่ถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

3.14.3 นำก้อนวัสดุโพลีเอทิลีนผสมโบรอนร้อยละ 5 และร้อยละ 32 ไปถ่ายภาพ ด้วยรังสีเอกซ์ ที่พลังงาน 62 กิโลโวลท์ 6 มิลลิแอมป์-นาที (1.5x4 mA-min) ระยะห่างจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงฟิล์มเท่ากับ 24 นิ้ว

3.14.4 นำฟิล์มไปล้างในห้องมืด ตามวิธีการเดียวกับข้อ 3.14.2 ผลปรากฏว่า เห็นภาพถ่ายของวัสดุได้ดี แต่เห็นความแตกต่าง ของวัสดุทั้งสองก้อนเพียงเล็กน้อยเมื่อดูด้วยตาเปล่า (ดังแสดงในรูปที่ 3.17)



รูปที่ 3.17 ผลการถ่ายภาพก้อนโพลีเอทิลีน ฯ ด้วยรังสีเอกซ์

3.14.5 นำต้นกำเนิดรังสีแกมมาจากอิริเดียม-192 ความแรง 16 คูรี มาถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ ที่พลังงาน 120 กิโลโวลท์ 3 มิลลิแอมป์-นาที (1x3 mA-min) ระยะจากต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงฟิล์ม เท่ากับ 24 นิ้ว

3.14.6 นำฟิล์มไปล้างในห้องมืดตามวิธีการในข้อ 3.14.2 ผลการล้างฟิล์มคือ ไม่สามารถมองเห็นโครงสร้าง ของอิริเดียม-192 ได้เลย เพราะรังสีแกมมาที่เปล่งออกมาจะทำปฏิกริยากับแผ่นฟิล์ม ทำให้ฟิล์มดำเสียก่อน จึงไม่สามารถนำผลการถ่ายภาพมาแสดงได้

3.15 พัฒนาการอ่านผลจากฟิล์ม

หลังจากทำการถ่ายภาพและล้างฟิล์มเสร็จแล้ว จำเป็นต้องพัฒนาการอ่านผลจากฟิล์ม เนื่องจากฟิล์มชนิดนี้มีความคมของภาพ และคอนทรัสต์ต่ำ ไม่เหมาะแก่การอ่านผลโดยตรง ในการพัฒนาการอ่านผลนั้น มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

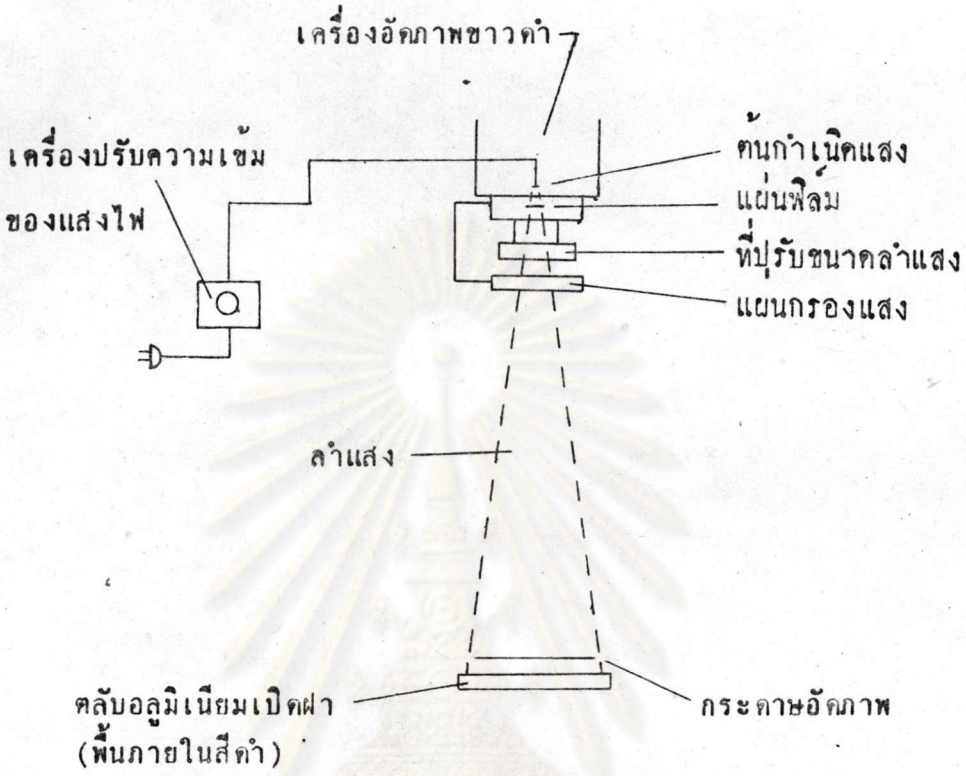
3.15.1 นำฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทที่ถ่ายภาพชิ้นงานต่าง ๆ มาวางบนกระดาษสีดำ เพื่อให้คอนทรัสต์ของฟิล์มดีขึ้น จากนั้นถ่ายภาพฟิล์มเหล่านั้นด้วยกล้องถ่ายรูปธรรมดา (ใช้ฟิล์มโกดัก AA-5) เปิดหน้ากล้อง 8 มิลลิเมตร ความชัตเตอร์ 1/125 วินาที

3.15.2 นำฟิล์มที่ถ่ายไปล้างด้วยวิธีการเดียวกับการล้างฟิล์มที่ถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ในห้องมืด (ยกเว้นเวลาที่แช่ในน้ำยาสร้างภาพประมาณ 30 วินาที)

3.15.3 ทำการอัดภาพชิ้นงานต่าง ๆ จากฟิล์มที่ได้ในข้อ 3.15.2 ลงบนกระดาษอัดภาพ ดังแสดงในรูปที่ 3.18 และในตารางที่ 3.7

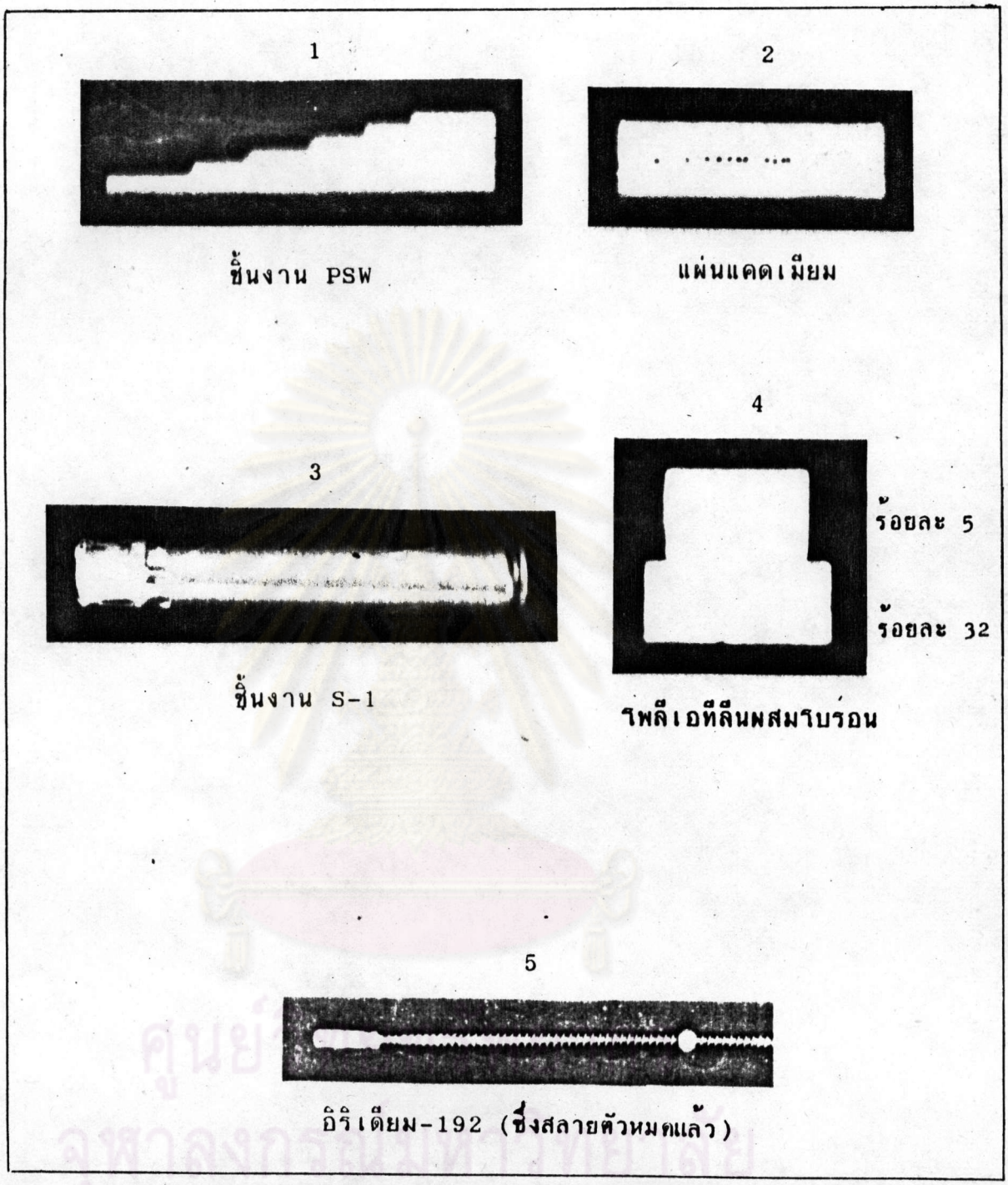
3.15.4 ทำการอัดภาพจากฟิล์ม ที่ถ่ายภาพชิ้นงานด้วยรังสีเอกซ์ และฟิล์มที่ถ่ายรอยอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.11) สำหรับข้อมูลในการอัดภาพดังแสดงในตารางที่ 3.8 และ 3.9 ตามลำดับ

3.15.5 ในระหว่างการทดลองอัดภาพ ได้ทำการล้างภาพที่อัดด้วยวิธีการเช่นเดียวกับการล้างฟิล์มที่ถ่ายด้วยรังสีเอกซ์ โดยใช้น้ำยาชนิดเดียวกัน แต่เวลาที่ใช้แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 3.10



รูปที่ 3.18 การจัดอุปกรณ์การอัดภาพลงบนกระดาษอัดภาพ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

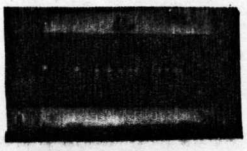


รูปที่ 3.19 ภาพของชิ้นงานและภาพที่อัดได้จากฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท

1

ภาพชิ้นงาน PSW ซึ่งใช้เวลาถ่าย 30 นาที
(ส่วนที่หนาที่สุดอยู่ทางซ้ายของภาพ)

2

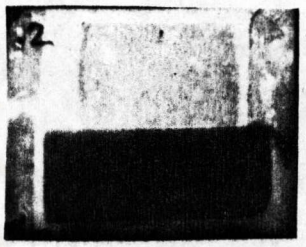


ภาพที่อัดจากแผ่นแคดเมียม
ซึ่งใช้เวลาถ่าย 75 นาที

3

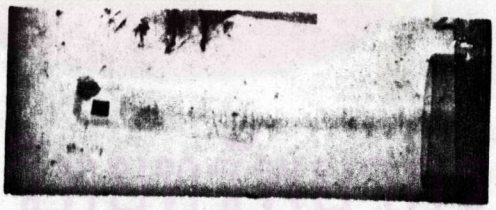
ภาพที่อัดจากชิ้นงาน S-1
ซึ่งใช้เวลาถ่าย 60 นาที

4



ภาพที่อัดจากโพลีเอทิลีนผสมโบรอน ฯ
ซึ่งใช้เวลาถ่าย 2.5 ชั่วโมง

5



ภาพที่อัดจากอิริเดียม-192
ซึ่งใช้เวลาถ่าย 60 นาที

รูปที่ 3.19 (ต่อ)

ตารางที่ 3.7 ข้อมูลการอัดภาพที่ถ่ายจากฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท

ชิ้นงาน	รูรับแสง (มิลลิเมตร)	ระยะเวลาที่เปิดแสง (วินาที)	หมายเหตุ
ชิ้นงาน PSW	4.5	6	ใช้กระดาษอัดภาพ
แผ่นแคดเมียม	4.5	4	เบอร์ 4
ชิ้นงาน S-1	4.5	4	อัตราส่วน 1:1
จากเครื่องปฏิกรณ์ฯ			ตั้ง dimmer สูงสุด
โพลีเอทิลีน ฯ	4.5	5	
อิริเดียม-192	4.5	3	

ตารางที่ 3.8 ข้อมูลการอัดภาพจากฟิล์ม AA-5

ชิ้นงาน	รูรับแสง (มิลลิเมตร)	ระยะเวลาที่เปิดแสง (วินาที)	หมายเหตุ
S-1	22	6	ใช้กระดาษอัดภาพ
โพลีเอทิลีน ฯ	22	90	เบอร์ 4
			อัตราส่วน 1:1
			ตั้ง dimmer สูงสุด

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.9 ข้อมูลการอัดภาพจากฟิล์มที่ถ่ายรอยอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์

ชิ้นงาน	รูรับแสง (มิลลิเมตร)	ระยะเวลาที่เปิดแสง (วินาที)	หมายเหตุ
รอยอนุภาค	4.5	2.0	ใช้กระดาษอัดภาพเบอร์ 4 อัตราส่วน 2:1

ตารางที่ 3.10 ข้อมูลการสร้างภาพบนกระดาษอัดภาพเบอร์ 4

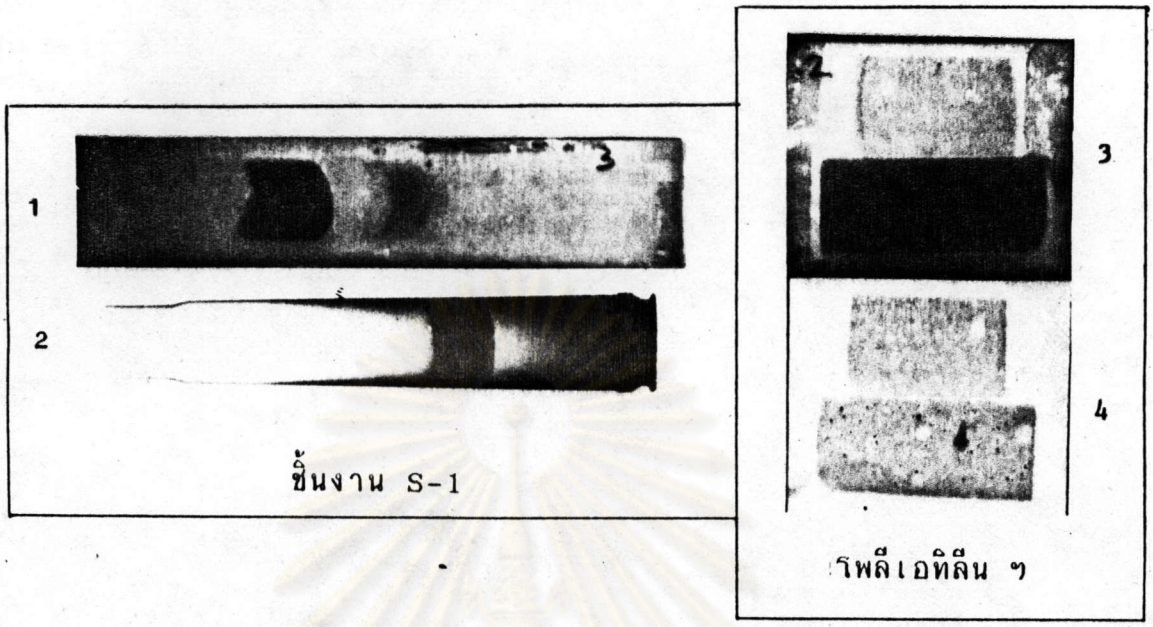
ระยะเวลาที่กระดาษอัดจุ่มอยู่ใน			
น้ำยาสร้างภาพ (developer)	ตัวหยุดปฏิกริยา (น้ำ) (stop bath)	น้ำยาคงสภาพ (fixer)	น้ำสะอาดธรรมดา
1.5 นาที	1 นาที	10 นาที	30 นาที

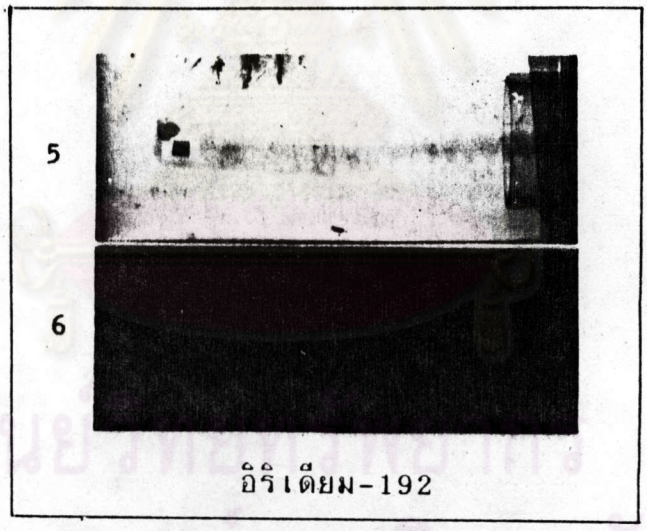
หมายเหตุ อุณหภูมิของน้ำยาสร้างภาพ น้ำยาคงสภาพ และน้ำสะอาดธรรมดา ประมาณ 20 ± 2 เซลเซียส

3.16 <u>เปรียบเทียบผลการถ่ายภาพชิ้นงานด้วยรังสีนิวตรอนกับรังสีเอกซ์</u>

เมื่ออัดภาพถ่ายจากฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท และฟิล์ม AA-5 ซึ่งถ่ายภาพชิ้นงาน S-1 ก้อนริพลีเอทิลีน ฯ และอิริเดียม-192 แล้ว จากนั้นนำภาพต่าง ๆ มาเปรียบเทียบผลการถ่าย เพื่อแสดงให้เห็นถึงข้อได้เปรียบ ของการถ่ายภาพด้วย

นิวตรอน ด้วยเทคนิคแทร็ก-เอตช์ (ดังแสดงในรูปที่ 3.20)





1,3,5 เป็นภาพที่ถ่ายด้วยนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ ฯ

2,4,6 เป็นภาพที่ถ่ายด้วยรังสีเอกซ์

รูปที่ 3.20 เปรียบเทียบภาพถ่ายชิ้นงานด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์

ตารางที่ 3.11 เปรียบเทียบผลการถ่ายชิ้นงานด้วยนิวตรอนและรังสีเอกซ์

ชิ้นงาน	ผลการถ่ายภาพด้วยนิวตรอน			ผลการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์		
	ความคม	คอนทรัสต์	เรโซลูชัน	ความคม	คอนทรัสต์	เรโซลูชัน
S-1	พอใช้	ต่ำ	ดี	พอใช้	ดี	ต่ำ
โพลีเอทิลีน ฯ	พอใช้	ต่ำ	ดี	พอใช้	พอใช้	ต่ำ
อิริเดียม-192	พอใช้	ต่ำ	ดี	-	-	-

ตารางที่ 3.12 ผลการวัดความเข้มของฟิล์มที่ถ่ายภาพด้วยนิวตรอน

ชิ้นงาน S-1					โพลีเอทิลีนผสมโบรอน		อิริเดียม-192	
พื้นฟิล์ม	โบรอนไนไตรด์	คาร์บอน	ลิเทียมฟลูออไรด์	แมงกานีส	พื้นฟิล์ม	ร้อยละ 5 32	พื้นฟิล์ม	ตำแหน่งอิริเดียม
0.13	0.06	0.12	0.10	0.12	0.15	0.12 0.07	0.12	0.05

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.13 ผลการวัดความเข้มของฟิล์มที่ถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์

ชิ้นงาน S-1					โพลีเอทิลีนผสมโบรอน		อิริเดียม-192	
พื้นฟิล์ม	โบรอนไนไตรด์	คาร์บอน	ลิเทียมฟลูออไรด์	แมงกานีส	พื้นฟิล์ม	ร้อยละ 5 32	พื้นฟิล์ม	ตำแหน่งอิริเดียม
4.15	2.80	2.00	1.57	0.80	2.22	2.02 1.95	4.92	4.06

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย