

การเตรียมแผ่นกรองชนิดแอลฟาแทรก-เอตซ์โดยใช้ฟิล์ม LR-115 แบบลอกได้



นางสาวศิริธร บุราณรักษ์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-4849-3

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

PREPARATION OF ALPHA TRACK-ETCH FILTERS
USING STRIPPABLE LR-115 FILMS



Miss Siritorn Buranurak

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-4849-3

ศิริธร บุราณุรักษ์ : การเตรียมแผ่นกรองชนิดแอลฟาแทรก-เอตช์โดยใช้ฟิล์ม LR-115 แบบลอกได้. (PREPARATION OF ALPHA TRACK-ETCH FILTERS USING STRIPPING LR-115 FILMS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว, อ.ที่ปรึกษาร่วม : ศศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ 137 หน้า. ISBN 194-17-4849-3.

ปัจจัยสำคัญในการเตรียมแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตช์ ได้แก่ ชนิด พลังงาน และทิศทาง การเคลื่อนที่ของอนุภาคมีประจุ รวมถึงเงื่อนไขในการล้างกัดรอย จากการวิจัยโดยใช้ฟิล์ม Kodak LR115 แบบลอกได้ ซึ่งเป็นฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทหนา 12 ไมโครเมตร ทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟา ทั้งจากปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ และจาก ^{241}Am ที่เป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคแอลฟาโดยตรง ในเบื้องต้นสังเกตลักษณะรอยของอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มภายหลังการล้างกัดรอย ด้วยกล้องจุลทรรศน์ ที่มีระบบไมโครคอมพิวเตอร์ช่วยในการดูภาพ จากนั้นใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดในการพิจารณาลักษณะรอย ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และการทะลุผ่านแผ่นฟิล์มของรอยอนุภาค

จากผลการวิจัยพบว่า อนุภาคที่เป็นผลผลิตจากปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ มีพลังงานไม่เพียงพอที่จะเคลื่อนที่ทะลุผ่านความหนาของฟิล์มได้ ในทางตรงกันข้ามอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดรอยทะลุแผ่นฟิล์มได้ โดยรอยที่เกิดขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.2 – 1 ไมโครเมตร และ 0.24 – 2.3 ไมโครเมตร ตามลำดับ การกัดรอยฟิล์มก่อนการลอกฟิล์มออกจากฐานโพลีเอสเตอร์ แม้ว่าจะทำให้ความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคด้านหน้ากับด้านหลังลดลง แต่กลับทำให้รอยอนุภาคทางด้านหน้าของแผ่นฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้น

ภาควิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่อนิสิต.....ศิริธร บุราณุรักษ์
สาขาวิชา.....นิวเคลียร์เทคโนโลยี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....รศ.นเรศร์ จันทน์ขาว
ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....ศศ.สุวิทย์ ปุณณชัยยะ

#4670523021 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD : NUCLEAR TRACKS MICROFILTER / CELLULOSE NITRATE MEMBRANE

SIRITORN BURANURAK : PREPARATION OF ALPHA TRACK-ETCH FILTERS USING STRIPPABLE LR-115 FILMS. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NARES CHANKOW, THESIS COADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA, 137 pp. ISBN 974-17-4849 -3.

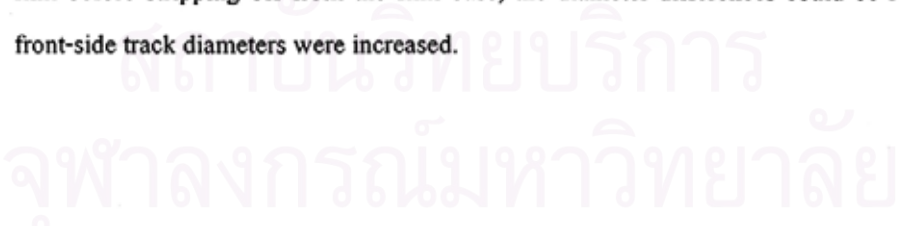
Type, energy and direction of charged particles as well as the etching condition are of importance in preparation a track-etch filter. In this study, 12 µm thick strippable Kodak LR115 cellulose nitrate films were exposed to alpha-particles from ¹⁰B(n,α)⁷Li reaction and from ²⁴¹Am then etched with NaOH solution under different controlled conditions. The tracks were preliminarily viewed by using an optical microscope coupled a microcomputer based image viewing system. Track diameter, shape and its penetration through the film were examined under a scanning electron microscope.

It was found that alpha-particles and recoiled nuclei from ¹⁰B(n,α)⁷Li reaction could not produce penetrating tracks through the films due to having too low kinetic energies. Conversely, alpha-particles from ²⁴¹Am could successfully produce penetrating tracks of diameters between 0.2 – 1.0 µm on the front side and 0.24 – 2.3 µm on the back side of the films. By pre-etching the film before stripping off from the film base, the diameter differences could be reduced but the front-side track diameters were increased.

Department.....Nuclear Technology.....Student's signature..... *ศิริอร บวรานุรักษ์*.....

Field of study.....Nuclear Technology.....Advisor's signature..... *น.ส. นเรศ ชันคอ*.....

Academic year.....2005.....Co-advisor's signature..... *สุวิทย์ พูนชาติยา*.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือ แนะนำ ทั้งทางด้านวิชาการ และปฏิบัติการจาก รองศาสตราจารย์ นเรศร์ จันทน์ขาว อาจารย์ที่ปรึกษา และผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวิทย์ ปุณณชัยยะ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือด้านอุปกรณ์ ตลอดจนแนวคิดและเทคนิคต่าง ๆ ที่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยได้เป็นอย่างดี ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ สมยศ ศรีสถิตย์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อรรถพร ภัทรสุมันต์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รวมทั้งคณาจารย์ประจำภาควิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยีทุกท่านสำหรับความรู้ที่ได้กรุณาอมอบให้ตลอดระยะเวลาของการศึกษาในภาควิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยีแห่งนี้ ซึ่งทางผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

ขอขอบคุณเพื่อน ๆ พี่ ๆ นิสิตภาควิชานิเวศวิทยาเทคโนโลยีทุกท่าน ให้ความช่วยเหลือและให้กำลังใจมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ สำหรับความรักและกำลังใจที่มอบให้ และเป็นพลังให้ผู้วิจัยสามารถที่จะก้าวเดินต่อไปข้างหน้าได้อย่างมั่นคง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง	ฎ
สารบัญภาพ	ฏ
บทที่	
1. บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนและวิธีดำเนินการดำเนินการวิจัย.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2. ทฤษฎี.....	6
2.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นกรองฟิล์มบาง	6
2.2 ทฤษฎีทางด้านแทรก-เอตซ์ ในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง.....	7
2.2.1 กลไกการเกิดรอย.....	7
2.2.2 ชนิด และคุณสมบัติของต้นกำเนิดรังสี	11
2.2.2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี	11
2.2.2.2 ต้นกำเนิดแอลฟาแบบไอโซโทปรังสี	13
2.2.3 หลักการสำคัญของกระบวนการผลิตแผ่นกรอง ชนิดแทรก-เอตซ์ ด้วยนิวตรอน	15
2.2.4 หลักการสำคัญของกระบวนการผลิตแผ่นกรอง ชนิดแทรก-เอตซ์ ด้วยอนุภาคแอลฟา.....	21
2.2.4.1 กำล้างหุคยั้ง.....	22
2.2.4.2 พิสัย.....	23
2.2.4.3 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก	25
2.2.5 ลักษณะรอยของอนุภาค.....	28
2.2.6 การกัดรอย.....	32

บทที่	ช หน้า
3. วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย	35
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	35
3.2 สารเคมี.....	35
3.3 เครื่องมือ	35
3.4 การผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน	36
3.4.1 การออกแบบและสร้างท่อบังคับลำนิวตรอน.....	37
3.4.2 การหาค่า Relative flux และอัตราส่วนแคดเมียม ของท่อบังคับลำนิวตรอน	38
3.4.3 ขั้นตอนการอาบนิวตรอน และการสร้างรอยอนุภาค	39
3.4.3.1 ขั้นตอนการอาบนิวตรอน	39
3.4.3.2 ขั้นตอนการกัดขยายรอย.....	42
3.5 การผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา	43
3.5.1 การนำแม่เหล็กมาใช้ในการบังคับ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค.....	43
3.5.2 ปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการอาบฟิล์ม ที่มีผลต่อความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม	46
3.5.3 ปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีผลต่อการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรกเอตซ์.....	47
3.5.4 ปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีผลต่อการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์	47
3.5.5 ปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์	48
3.5.6 เทคนิคการกัดรอยในการควบคุม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคแอลฟา	48
4. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	52
4.1 การทดลองผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน	52
4.1.1 ผลการวัด Relative flux	52

บทที่	ณ หน้า
4.1.2 ผลการหาอัตราส่วนแคดเมียม	54
4.1.3 ผลจากการอาบนิวตรอนและลักษณะของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้น	58
4.1.4 ผลจากการกัดผิวฟิล์มเพื่อลดความหนาของฟิล์ม ก่อนการอาบนิวตรอน	60
4.2 การทดลองผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา	62
4.2.1 ผลจากการนำแม่เหล็กมาใช้ในการควบคุม ทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา	62
4.2.2 ผลจากปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการอาบฟิล์ม ที่มีต่อความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม	67
4.2.3 ผลจากปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม	68
4.2.4 ผลจากปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม	70
4.2.5 ผลจากปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการกัดรอยที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม	73
4.2.6 ผลจากสัดส่วนของเวลา ก่อนและหลังการลอกฟิล์มในการกัดรอย กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบ ทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นฟิล์ม	75
5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	79
สรุปผลการวิจัย	79
5.1 สรุปผลการวิจัยการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ จากปฏิกิริยา (n,α) โดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน	79
5.2 สรุปผลการวิจัยการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ อะเมริเซียม-241 เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา	80
5.2.1 สรุปผลการวิจัย เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ใน การอาบฟิล์มกับความหนาแน่นรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม	81
5.2.2 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ใน การกัดรอยฟิล์มกับเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ผลิตได้	82

5.2.3	สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการสกัดรอยฟิล์มกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่ผลิตได้.....	83
5.2.4	สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่ผลิตได้.....	84
5.2.5	สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนของเวลา ก่อนและหลังการลอกฟิล์มในการสกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้าและด้านหลังแผ่นกรองที่ผลิตได้.....	85
5.3	วิจารณ์ผลการทดลอง.....	86
5.4	ข้อเสนอแนะ.....	87
รายการอ้างอิง	.....	88
บรรณานุกรม	.....	90
ภาคผนวก	.....	91
ภาคผนวก ก	.....	92
ภาคผนวก ข	.....	95
ภาคผนวก ค	.....	97
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....		137

สารบัญญัตราง

ฉ

ตาราง	หน้า
2.1 แสดงอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคกับขนาดของอนุภาค	6
2.2 แสดงต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n)	12
2.3 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV ของไอโซโทปบางชนิด.....	16
2.4 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน	17
2.5 ค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด	18
2.6 ความไวในการบันทึกรอยของแผ่นวัสดุบันทึกรอยบางชนิด.....	29
4.1 ผลการทดลองหาค่า Relative flux ของท่อบังคับลำนิวตรอน	52
4.2 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนแคดเมียมของท่อบังคับลำนิวตรอน	55
4.3 ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนฟลักซ์ ณ ตำแหน่งต่างๆบริเวณปากท่อบังคับลำนิวตรอน	57
4.4 เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทางด้านหน้า-หลัง ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน.....	58
4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทางด้านหน้า – หลัง ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ Cf-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน เมื่อทำการกัดผิวฟิล์มก่อนอบนิวตรอน.....	60
4.6 เส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะการกระจายตัวของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม เปรียบเทียบระหว่างการใช้ และไม่ใช้แม่เหล็กในการบังคับ ทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา.....	64
4.7 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม ที่มีต่อความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม.....	67
4.8 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยด้านเวลาที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม.....	69
4.9 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม.....	70
4.10 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยด้านความเข้มข้นของสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม.....	73
4.11 ผลจากสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยก่อนและหลังการลอกฟิล์ม กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้า-หลังแผ่นฟิล์ม.....	76
5.1 สรุปผลการวิจัยการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ จากปฏิกิริยา (n, α) โดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน.....	79

ตาราง	หน้า
5.2 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม กับความหนาแน่นรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม	81
5.3 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดรอยฟิล์ม กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม.....	82
5.4 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอยฟิล์ม กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่ผลิตได้.....	83
5.5 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย ที่ใช้ในการกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่ผลิตได้.....	84
5.6 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสัดส่วนของเวลาก่อนและหลัง การลอกฟิล์มในการกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบ ทางด้านหน้าและด้านหลังแผ่นกรอง.....	85

สารบัญญภาพ

iii

ภาพประกอบ	หน้า
2.1 ลักษณะผิวหน้าของ (ก) Depth membrane filter (ข) Screen membrane filter จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน	7
2.2 แสดงภาพการเกิดรอยในตัวกลางที่เป็นผลึก (a) และในตัวกลางที่เป็น โพลิเมอร์ (b).....	8
2.3 แผนภาพแสดงกลไกการเกิดรอย.....	10
2.4 แผนภาพการสลายตัวของ ^{226}Ra	13
2.5 ตัวอย่างสเปกตรัมการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาของนิวไคลด์รังสี.....	15
2.6 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของ Fast neutron recoil tracks บนแผ่นฟิล์มโพลีคาร์บอเนต	15
2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำ กับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค	19
2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มินัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำ กับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี.....	20
2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มินัลนิวตรอน กับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนในสารหน่วงนิวตรอน.....	21
2.10 การแตกตัวจำเพาะที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทาง ที่อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง.....	22
2.11 พิสัยในอากาศของอิเล็กตรอน โปรตอน และแอลฟา ที่ค่าพลังงานต่างๆ	24
2.12 การเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็ก.....	26
2.13 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้า ในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก	27
2.14 เมื่อประจุเคลื่อนที่ท่ามกลางสนามแม่เหล็ก (ก) แสดงการแตกความเร็วย่อยออกเป็น 2 ทาง (ข) ทิศทางของความเร็วย่อยทั้งสองที่กระทำต่อสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ประจุมีการเคลื่อนที่แบบเกลียว	28
2.15 แผนภาพแสดงการเกิดรอยของอนุภาคในวัสดุ เมื่ออนุภาคมีพลังงานจลน์ต่างกัน	31
2.16 แผนภาพแสดงการกัดรอยของฟิล์มเซลลูโลสในอะซิเตต CA-80 ที่เกิดจากอนุภาคแอลฟาพลังงานต่าง ๆ กัน โดยใช้ 2.5 N NaOH เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 18 °C	31

ภาพประกอบ	หน้า
2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนรอยสัมพันธ์ ของอนุภาคแอลฟาบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยชนิดต่างๆ กับเวลาในการกักรอยโดยใช้สารละลาย KOH 30% ที่ 60 °C	32
2.18 แสดงรอยของอนุภาคที่จะปรากฏหลังการกักรอย เมื่ออนุภาควิ่งผ่านแผ่นฟิล์มในมุมต่าง ๆ	33
3.1 แผนภาพต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ที่ใช้ในงานวิจัย	36
3.2 แผนภาพแสดงระบบบรรจุของต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252	37
3.3 ท่อบังคับลำนิวตรอน	37
3.4 ลักษณะการจัดวางท่อบังคับลำนิวตรอนจากระบบห่วงนิวตรอนมาใช้งาน	38
3.5 อุปกรณ์นับรังสี Eberline และหัววัดชนิด Boron line detector	39
3.6 ลักษณะของฟิล์ม LR-115 ที่ใช้ในงานวิจัย	40
3.7 ลักษณะของ BE-10 converter screen	40
3.8 การจัดอุปกรณ์สำหรับการอาบเทอร์มัลนิวตรอน	41
3.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่เข้าชนแผ่นฟิล์มของ Recoil products จากปฏิกิริยา (n,α) ระหว่าง thermal neutron กับ ¹⁰ B converter screen ทำให้เกิดรอยแฝงบนแผ่นฟิล์ม LR-115	41
3.10 การกักรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ใน Water bath	42
3.11 Americium-241 ที่ใช้ในการทดลอง	43
3.12 การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณ ตำแหน่งที่ทำการติดตั้งฟิล์มด้วย Gauss meter	44
3.13 การติดตั้งฟิล์ม และต้นกำเนิดรังสีในกระปุกใส่ฟิล์ม	45
3.14 การอาบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาใน Vacuum chamber	45
3.15 Vacuum pump	46
3.16 การจัดวางฟิล์มที่มีขนาดรอยอนุภาคทั้งสองด้านไม่เท่ากัน ในกระบวนการกรองแบบ Cross flow	49
3.17 ลักษณะของ Optical microscope ที่ใช้ในงานวิจัย	50
3.18 ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ในงานวิจัย	51
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative flux กับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอน กับท่อนำลำนิวตรอน	54

ภาพประกอบ	หน้า
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแคดเมียม กับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังกับลำนิวตรอน.....	56
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวตรอนที่นับได้ กับตำแหน่งของปากท่อที่ทำการตรวจวัด.....	57
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการกักรอย เปรียบเทียบทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ เมื่อใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน.....	59
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการกักรอย เปรียบเทียบทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ Cf-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน เมื่อทำการกักรอยฟิล์มก่อนอบนิวตรอน.....	61
4.6 ภาพถ่ายทางด้านหน้าของฟิล์มจาก SEM 3,500X : ^{241}Am 30 นาที ระยะ 1 cm ความเข้มข้น NaOH 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เมื่อไม่ใช้แม่เหล็ก (ก) และใช้แม่เหล็ก (ข).....	62
4.7 ภาพถ่ายทางด้านหน้าของฟิล์มจาก SEM 3,500X : ^{241}Am 30 นาที ระยะ 2 cm ความเข้มข้น NaOH 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เมื่อไม่ใช้แม่เหล็ก (ก) และใช้แม่เหล็ก (ข).....	63
4.8 ภาพถ่ายทางด้านหน้าของฟิล์มจาก SEM 3,500X : ^{241}Am 30 นาที ระยะ 3 cm ความเข้มข้น NaOH 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เมื่อไม่ใช้แม่เหล็ก (ก) และใช้แม่เหล็ก (ข).....	63
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม กับระยะห่างจากขอบฟิล์ม เปรียบเทียบระหว่างการใช้ และไม่ใช้แม่เหล็ก ในการควบคุมทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา.....	65
4.10 การเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาที่พุ่งออกจากอะเมริเซียม-241 ในสนามแม่เหล็ก.....	66
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม กับความหนาแน่น ของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม เปรียบเทียบทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นฟิล์ม.....	68
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลาง ของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม เปรียบเทียบทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นฟิล์ม.....	69

ภาพประกอบ	หน้า
4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหน้าโดยเปรียบเทียบกับอุณหภูมิค่าต่างๆ ที่ใช้ในการสกัดรอย	72
4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหลังโดยเปรียบเทียบกับอุณหภูมิค่าต่างๆ ที่ใช้ในการสกัดรอย	72
4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหน้า โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสกัดรอยต่างกัน	74
4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสกัดรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหลัง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสกัดรอยต่างกัน	75
4.17 ผลจากสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการสกัดรอยก่อนและหลังการลอกฟิล์มกับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้า-หลังแผ่นฟิล์ม	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

กระบวนการกรอง (Filtration) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการคัดแยกวัสดุที่แขวนลอยปะปนอยู่ในสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นการคัดแยกสารที่แขวนลอยอยู่เพื่อนำสารนั้นกลับมาใช้ หรือเป็นการกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่แขวนลอยอยู่ เพื่อเป็นการทำความสะอาดสารละลาย ในอดีตกระบวนการกรองอาจใช้ในการคัดแยกวัสดุที่มีขนาดระดับมิลลิเมตรขึ้นไป เช่น เม็ดกรวด ทราย ซึ่งสามารถใช้ตะแกรง ผ้า หรือแผ่นกรองแบบหยาบช่วยในการกรองได้ ต่อมาเมื่อมนุษย์มีวิวัฒนาการมากขึ้น มีการค้นพบอนุภาคที่มีขนาดเล็กลงเรื่อย ๆ เทคโนโลยีด้านการกรองจึงได้มีการพัฒนาตามไปด้วยจากการใช้เพียงกระดาษ หรือเส้นใยมาสานต่อกันเพื่อใช้ทำแผ่นกรอง ซึ่งนอกจากจะไม่ทนต่อความร้อนและความดันแล้ว ยังไม่ทนต่อกรด ด่าง และสารเคมีอีกด้วย จึงได้มีการคิดค้นวัสดุที่ใช้ทำแผ่นกรองขึ้นมาใหม่ ให้มีความคงทนต่อสภาวะดังกล่าว จึงเป็นที่มาของการนำวัสดุโพลีเมอร์มาใช้ในการทำแผ่นกรอง

โดยทั่วไปแล้วหลักการเลือกชนิดของวัสดุโพลีเมอร์ ที่จะนำมาใช้ในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง (Membrane filter) จะพิจารณาจากขนาดของอนุภาคและกระบวนการที่จะใช้ในการกรอง ซึ่งกระบวนการกรองแบบ Microfiltration (MF) สามารถคัดกรองอนุภาคขนาด 0.05 ถึง 10 ไมโครเมตรได้ เหมาะสำหรับการกรองพวกแบคทีเรีย และ emulsion ซึ่งโพลีเมอร์ที่ใช้ในการทำแผ่นกรองชนิดนี้ ได้แก่ polycarbonate, nylon, polyvinylidenedifluoride (PVDF), polypropylene, polysulfone, polyethersulfone และ polytetrafluoroethylene (PTFE) ส่วนการกรองแบบ Ultrafiltration (UF) สามารถคัดกรองอนุภาคขนาด 30 ถึง 1000 อังสตรอม ใช้ในการกรองโปรตีน ไวรัส และ colloids การกรองแบบ Nanofiltration (NF) สามารถคัดกรองอนุภาคที่มีขนาด 10 ถึง 30 อังสตรอม ใช้ในการกรองโมเลกุลของน้ำตาล โมเลกุลของสารอินทรีย์ขนาดเล็ก และพวก herbicides รวมทั้งการกรองแบบ Hyperfiltration (HF) หรือที่รู้จักกันในชื่อของการกรองแบบ Reverse Osmosis (OS) ซึ่งสามารถกรองอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 10 อังสตรอม สามารถกรองโมเลกุลของก๊าซ ไอออนของโลหะ และไอออนของเกลือได้เกือบสมบูรณ์ โดยทั้งสามกระบวนการ คือ Ultrafiltration, Nanofiltration และ Reverse Osmosis สามารถผลิตได้จากโพลีเมอร์ ชนิด polysulfone, polyamides, cellulose acetate (CA) และ PVDF

สำหรับกรรมวิธีในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง ปัจจุบันสามารถทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้มีด้วยกัน 4 วิธี ได้แก่

- Stretch membrane หรือ Extrusion stretching method จะใช้การยืดฟิล์มออกที่อุณหภูมิสูง โดยการดึงโพลีเมอร์ที่หลอมเหลวออกจากเครื่อง Extruder ในสองทิศทางที่ตั้งฉากกัน ทำให้เส้นใยโพลีเมอร์มีลักษณะเป็นช่องตาข่าย

- Phase inversion หรือ Template leaching method จะใช้วิธีละลายโพลีเมอร์ในตัวทำละลายแล้วนำไปขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์มบาง ซึ่งเมื่อตัวทำละลายระเหยไป จะทำให้เกิดเป็นช่องบนแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ที่แห้งและแข็งตัว

- Skin casting หรือ Double casting เป็นการขึ้นรูปฟิล์มบางที่มีช่องขนาดเล็ก ด้วยฟิล์มที่มีช่องขนาดใหญ่

แต่จะเห็นว่าทั้งสามวิธีดังกล่าวข้างต้น นอกจากจะมีกรรมวิธีการผลิตที่ย่างยากแล้ว ทั้งยังไม่สามารถกำหนดขนาดของรู และความหนาแน่นของรูที่แน่นอนได้ ดังนั้นจึงได้มีการนำเทคนิคทางด้านนิวเคลียร์มาใช้ในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบางขึ้น

- Track-etch membrane มีการผลิตโดยอาศัยการยิงอนุภาคมีประจุพลังงานสูงให้เคลื่อนที่ทะลุผ่านฟิล์มบางโพลีเมอร์ แล้วนำไปล้างกัดขยายรอยในสารละลายกรดหรือด่างเข้มข้น เพื่อให้รอยอนุภาคละลายออกจนเกิดรูบนฟิล์ม ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้เป็นต้นกำเนิดอนุภาคพลังงานสูง ได้แก่

1. เครื่องเร่งอนุภาค (Particle accelerator) แบบ Tandem หรือ Cyclotron ซึ่งอาศัยหลักการของสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเร่งอนุภาคมีประจุที่มีมวลมาก ให้มีพลังงานสูงพอที่จะเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ ทำให้เกิดรอยของอนุภาค

2. เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Nuclear research reactor) ปลดปล่อยนิวตรอนความเข้มสูงออกมาทำปฏิกิริยาฟิชชัน กับยูเรเนียม-235 ซึ่ง Fission fragment ที่เกิดขึ้นเป็นอนุภาคมีประจุ และมีพลังงานสูง จึงสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มทำให้เกิดรอยบนฟิล์มโพลีเมอร์

แผ่นกรองฟิล์มบางที่ผลิตโดยเทคนิคนี้ นอกจากจะมีลักษณะเด่นตรงที่สามารถกำหนดขนาดของรูจากเงื่อนไขของเวลาที่ใช้ในการกัดรอย และความหนาแน่นของรูจากระยะเวลาที่ใช้ในการอบแผ่นฟิล์ม ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงแล้ว เนื้อวัสดุที่ใช้ทำฟิล์มยังทำจากโพลีเมอร์ซึ่งไม่ละลายน้ำ และทนต่อสารเคมี อีกทั้งเนื้อฟิล์มยังมีความเหนียวแน่น ทนต่อแรงดัน จึงเหมาะกับการใช้งานในเกือบทุกสภาวะ

แต่เนื่องจากแผ่นกรองฟิล์มบางที่ผลิตขึ้นโดยเทคนิคนี้ มีข้อจำกัดทางด้านต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง โดยเฉพาะค่าใช้จ่ายในการเดินเครื่อง สำหรับการผลิตด้วยเครื่องเร่งอนุภาค นอกจากนี้ขั้นตอนและกรรมวิธีในการผลิตยังถูกปกปิดไว้เป็นความลับทางการค้า เป็นสาเหตุทำให้แผ่นกรองฟิล์มบางส่วนใหญ่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ ส่งผลให้อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่มีการใช้แผ่นกรองฟิล์มบาง

ดังกล่าวเป็นส่วนประกอบไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ในทางการแพทย์ เกษษกรรม ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ อุตสาหกรรมอาหาร มีราคาสูงตามไปด้วย

จากปัญหาดังกล่าว จึงเป็นที่มาของงานวิจัยในครั้งนี้ที่จะศึกษาถึงโอกาสความเป็นไปได้ในการลดต้นทุนการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง โดยการประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาแบบไอโซโทป รังสี และ/หรือ จากปฏิกิริยา (n,α) แทนการใช้เครื่องเร่งอนุภาคหรือเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณู ซึ่งอนุภาคแอลฟาจากปฏิกิริยาดังกล่าว จะเคลื่อนที่เข้าชนแผ่นฟิล์ม ทำให้เกิดการรอยแผลงของอนุภาคบนแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ โดยผลการวิจัยที่ได้จะใช้เป็นข้อมูลในการเทียบหาค่าเวลาที่เหมาะสมสำหรับการอาบรังสีแอลฟา ในการทำให้เกิดรอยของอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจำนวนความหนาแน่นรอยตามที่ต้องการ นอกจากนี้จะทำการศึกษาถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ของกระบวนการล้างกัศขยารอย เพื่อกำหนดขนาดของรูบนแผ่นฟิล์มในขนาดที่ต้องการเช่นกัน

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษากระบวนการเตรียมแผ่นกรองชนิดแอลฟาแทรก-เอตซ์จากฟิล์ม LR-115 แบบลอกได้ โดยการบันทึกรอยของอนุภาคแอลฟา จากอนุภาคแอลฟาโดยตรง และ/หรือ จากปฏิกิริยา (n,α)

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างรอยและการล้างกัศรอย เพื่อผลิตแผ่นกรองชนิดแอลฟาแทรก-เอตซ์ที่มีขนาดรอยต่างๆกันตามต้องการ
2. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ควบคุมการเกิดรอย ที่สามารถควบคุมขนาดของรอยและทิศทางของอนุภาคแอลฟา

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้า รวบรวมข้อมูลและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
2. หาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างรอยและการล้างกัศรอย เพื่อผลิตแผ่นกรองชนิดแอลฟาแทรก-เอตซ์ที่มีขนาดรอยต่าง ๆ กันตามต้องการ
3. ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ควบคุมการเกิดรอย ที่สามารถควบคุมขนาดของรอยและทิศทางของอนุภาคแอลฟา
4. ทำการล้างกัศขยารอยบนฟิล์ม LR-115 ที่ช่วงเวลาต่าง ๆ และเปรียบเทียบขนาดของรอยที่เกิดขึ้น
5. นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ผล
6. สรุปผลงานวิจัย และเขียนรายงานวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

ได้กระบวนการเตรียมแผ่นกรองชนิดแอลฟาแทรก-เอตซ์ จากฟิล์ม LR-115 แบบลอกได้ โดยการบันทึกรอยของอนุภาคแอลฟาที่มีขนาดตามต้องการ

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ปี 2547 พินพรรณ วิชาลัธตพันธ์[1] และคณะ ได้เสนอผลงานวิจัยเรื่อง การศึกษาประสิทธิภาพจากเปลี่ยนนิวตรอนเพื่อใช้ผลิตแผ่นกรองรูพรุนขนาดเล็ก โดยทำการศึกษาการผลิตแผ่นกรองรูพรุนจากฟิล์มโพลีเมอร์ โดยใช้อนุภาคแอลฟาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ (n,α) ของโบรอน $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ และลิเทียม $^6\text{Li}(n,\alpha)^3\text{H}$ รวมถึงฟิชชันแฟรกเมนต์จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชันของยูเรเนียม-235 ในการทำให้เกิดรอยแ่งบนแผ่นฟิล์ม แล้วล้างกัดขยายรอยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 6.25 นอร์มอล อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 80 นาที จากการทดสอบโดยใช้ฟิล์มโพลีเมอร์ 4 ชนิด ได้แก่ ฟิล์ม CR-39, ฟิล์ม Cellulose acetate, ฟิล์ม Polyethylene terephthalate และฟิล์ม Polycarbonate อนุภาคแอลฟาสามารถทำให้เกิดรอยได้บนฟิล์ม CR-39 เพียงชนิดเดียว โดยมีพิสัยต่ำกว่าความหนาของฟิล์ม ส่วนฟิชชันแฟรกเมนต์สามารถทำให้เกิดรอยได้บนฟิล์มทั้ง 4 ชนิด โดยสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่าน ทำให้เกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม Polycarbonate ความหนา 6 ไมโครเมตรได้ สำหรับจากเปลี่ยนนิวตรอนที่เตรียมขึ้นจากสารประกอบยูเรเนียม สามารถทำให้เกิดรูพรุนบนแผ่นฟิล์ม Polycarbonate มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.43 ± 0.87 ไมโครเมตร มีความหนาแน่น 220 ± 70 รูต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนรูบนแผ่นฟิล์มต่อนิวตรอนฟลักซ์ คิดเป็นประสิทธิภาพของจากเปลี่ยนนิวตรอน $1.5 \times 10^{-8} - 2.9 \times 10^{-8}$ รูต่อนิวตรอน

2. ปี 2546 วิเชียร รัตนธงชัย[2] และคณะ ได้เสนอผลงานวิจัยเรื่อง แผ่นกรองฟิล์มบางจากอนุภาคของปฏิกิริยาฟิชชัน โดยทำการศึกษาถึงรอยแ่งบนแผ่นฟิล์มบางโพลีคาร์บอเนต ซึ่งทำให้เกิดขึ้นได้โดยใช้ฟิชชันแฟรกเมนต์จากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนจากเครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย กับยูเรเนียม-235 ในฉกยูเรเนียม การล้างกัดรอยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 6 นอร์มอล ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการล้างกัดรอย 30 – 120 นาที รอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 – 8 ไมโครเมตร โดยแปรผันตามเวลาที่ใช้ในการล้างกัดรอย เมื่อใช้แผ่นคัดกรองอนุภาคที่ทำจากโพลีเอทิลีนซึ่งมีความหนา 1 – 6 มิลลิเมตร วางระหว่างฉกยูเรเนียมกับฟิล์มโพลีคาร์บอเนต ขณะทำการอาบนิวตรอน แผ่นคัดกรองอนุภาคจะทำให้ฟิชชันแฟรกเมนต์ตกกระทบแผ่นฟิล์มในแนวตั้งจากหรือใกล้เคียงกับแนวตั้งจากผ่านไปยังฟิล์มได้ การเปลี่ยนความหนาของแผ่นคัดกรองอนุภาคตั้งแต่ 0 – 6 มิลลิเมตร ทำให้เกิดความหนาแน่นรอยอยู่ในช่วง 12,000 – 20,000 รอยต่อตารางมิลลิเมตร ตามลำดับ

3. ปี 2543 D. Gopalani[3] และคณะ ได้เสนอผลงานวิจัยเรื่อง A novel method for production of polyester films-based nuclear track microfilters ซึ่งเป็นงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบางระดับไมโครเมตร โดยการใช้ฟิล์มชนิดโพลีเอสเตอร์ด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์ โดยทำการอบฟิล์มโพลีเอสเตอร์ (ความหนา 12 - 25 ไมโครเมตร) ที่ผ่านกระบวนการ pre-treatment แล้ว ด้วยอนุภาคของ ^{28}Si พลังงาน 120 MeV จากเครื่องเร่งอนุภาค จากนั้นทำการกัดรอยด้วย 6 N NaOH ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยจะควบคุมอัตราเร็วของการกัดรอยจากชนิดและเวลาของกระบวนการ pre-treatment และขนาดรูบนแผ่นฟิล์มจากเวลาที่ใช้ในการกัดรอย ซึ่งขนาดรูที่ผลิตได้อยู่ในช่วงระหว่าง 0.4 - 1.4 ไมโครเมตร จากนั้นจะทำการทดสอบประสิทธิภาพแผ่นกรองด้วยการกรองแบคทีเรียชนิด Escherichia coli ซึ่งพบว่าแผ่นกรองที่มีรูขนาด 0.4 ไมโครเมตร ให้ประสิทธิภาพในการกรองแบคทีเรียสูงถึง 94 เปอร์เซ็นต์

4. ในปี 2545 Y.K. Vijay[4] และคณะ ได้เสนอผลงานวิจัยเรื่อง การตัดกรองอนุภาคไฮโดรเจนด้วยแผ่นกรองระดับนาโนเมตร ซึ่งเป็นการใช้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 5.3 MeV จากต้นกำเนิดรังสีอะเมริเซียม-241 (^{241}Am) ที่มี Dose rate 10^7 particles/cm² และ อนุภาคคาร์บอน (C^{5+}) พลังงาน 60 MeV จากเครื่องเร่งอนุภาค NSC pelletron, New Delhi โดยมีค่า Dose rate 10^5 และ 10^7 ion/cm² ให้เคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มโพลีคาร์บอนเนต จากนั้นทำการกัดขยายรอยด้วย 6 N NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยทำการควบคุมขนาดของรูบนแผ่นฟิล์มจากเวลาที่ใช้ในการกัดรอย ซึ่งเมื่อนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการคัดแยกก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่มีขนาดโมเลกุล 0.21 นาโนเมตร ออกจากก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ที่มีขนาดโมเลกุล 0.4 นาโนเมตร พบว่าใช้เวลาในการกัดรอยฟิล์มที่ 30 นาที สำหรับแผ่นกรองที่ผลิตด้วยเทคนิคการอบด้วยอนุภาคแอลฟา และ 5 นาที สำหรับแผ่นกรองที่ผ่านการยิงด้วยอนุภาคคาร์บอน จากเครื่องเร่งอนุภาค ในการที่จะทำได้ขนาดของรูบนแผ่นฟิล์มที่เหมาะสมที่ทำให้ประสิทธิภาพในการคัดแยกก๊าซสูงสุด

5. ในปี 2542 C.W.Y. Yip[5] และคณะ ได้เสนอผลงานวิจัยเรื่อง Effects of stirring on bulk etch rate of LR-115 detector ซึ่งเป็นการศึกษาถึงผลของการกวนสารละลาย (Stirring) ที่มีผลต่ออัตราการกัดรอยของผิวฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท (LR-115 type 2) โดยพบว่า เมื่อทำการกัดรอยฟิล์ม LR-115 type 2 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 2.5 N อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อฟิล์มที่ใช้ทดสอบมีความหนาเริ่มต้นเท่ากัน คือ 12 μm เปรียบเทียบระหว่างการกัดรอยปกติ กับการกวนสารละลายด้วยเครื่อง Magnetic stirring พบว่า อัตราการกัดรอย (Bulk etch rate) เมื่อใช้เครื่อง Magnetic stirring ช่วยในการกวนสารละลาย มีค่า $6.65 \pm 0.34 \mu\text{m/h}$ ซึ่งสูงกว่าอัตราการกัดรอยปกติที่มีค่า $3.61 \pm 0.14 \mu\text{m/h}$

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ลักษณะทางกายภาพของแผ่นกรองฟิล์มบาง

ตามปกติแล้ววัตถุที่แขวนลอยปะปนอยู่ในสารละลาย สามารถที่จะตกตะกอนแยกชั้นออกจากสารละลายด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกได้เอง แต่จากข้อมูลแสดงอัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาค (ดังแสดงในตารางที่ 2.1) จะเห็นได้ว่า ต้องใช้เวลาในการตกตะกอนตั้งแต่ช่วงเวลานั้น ๆ เพียงไม่กี่วินาที ไปจนถึงนานหลายสิบปี ขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคที่แขวนลอยอยู่ในสารละลายนั้น ๆ

ตารางที่ 2.1 อัตราเร็วในการตกตะกอนของอนุภาคกับขนาดของอนุภาค[6]

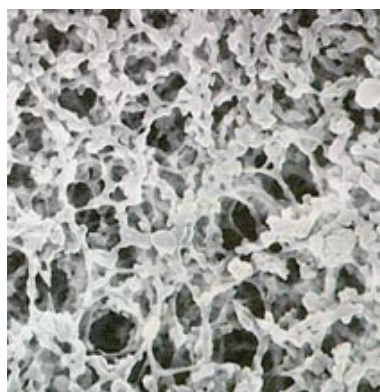
ขนาดรัศมีของอนุภาค	ชนิดของอนุภาค	อัตราเร็วในการตกตะกอน
10 มิลลิเมตร	กรวด (Gravel)	0.3 วินาที
1 มิลลิเมตร	ทรายหยาบ (Coarse sand)	3 วินาที
100 ไมโครเมตร	ทรายละเอียด (Fine sand)	38 วินาที
10 ไมโครเมตร	ทรายแป้ง (Silt)	33 นาที
1 ไมโครเมตร	แบคทีเรีย (Bacteria)	55 ชั่วโมง
100 นาโนเมตร	คอลลอยด์ (Colloid)	230 ชั่วโมง
10 นาโนเมตร	คอลลอยด์ (Colloid)	6.3 ปี
1 นาโนเมตร	คอลลอยด์ (Colloid)	63 ปี

สำหรับกระบวนการกรองระดับไมโคร (Microfiltration) เล็กกลงไปจนถึงการกรองระดับนาโน (Nanofiltration) จะทำการแบ่งแผ่นกรองฟิล์มบาง (Membrane filter) ออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะโครงสร้างของรู คือ

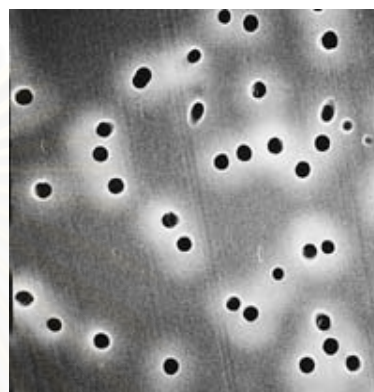
1. Depth membrane filter ซึ่งมีโครงสร้างของรูบิดไปมา (Tortuous-type pores) สามารถเตรียมได้จากโพลีเมอร์ประเภท โพลีไวนิลคลอไรด์ (Polyvinylchloride : PVC), โพลีไวนิลิดีนไดฟลูออไรด์ (Polyvinylidenedifluoride : PVDF), โพลีเอเทอร์ซัลโฟน (Polyethersulfone), ไนลอน (Nylon) และพวกสารประกอบเซลลูโลส โดยจะใช้เทคนิคการเปลี่ยนเฟส (Phase inversion) ในการทำให้เกิดรูบนแผ่นฟิล์ม ส่วนแผ่นกรองฟิล์มบางที่ทำจากโพลีเมอร์ประเภท โพลีเอเทอร์ซัลโฟนโรเอทีลิน

(Polytetrafluoroethylene : PTFE) และ โพลีโพรพิลีน (Polypropylene : PP) จะใช้เทคนิคการยืดฟิล์ม (Stretching) ในการทำให้เกิดรูบนแผ่นฟิล์ม (ดังแสดงในรูป 2.1 ก.)

2. Screen membrane filter ซึ่งมีโครงสร้างของรูเป็นแบบทรงกระบอกตรง (Capillary-type pores) โดยส่วนมากเตรียมจากโพลีเมอร์ประเภท โพลีคาร์บอเนต (Polycarbonate) หรือ โพลีเอสเตอร์ (Polyester) ซึ่งจะใช้เทคนิคแทรก-เอตซ์ (Track-etching technique) ในการสร้างรูบนแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ (ดังแสดงในรูป 2.1 ข.)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.1 ลักษณะผิวหน้าของ (ก) Depth membrane filter (ข) Screen membrane filter จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน[7]

จะเห็นได้ว่าลักษณะของ Depth membrane filter นั้นมีขนาดรูใหญ่กว่าขนาดรูพิคัด (Rated pore size) สำหรับการกรองอนุภาคระดับไมโครเมตรมากนัก แม้ว่าความหนาของรู รวมถึงการเพิ่มความหนาของฟิล์มจะทำให้สามารถกักเก็บอนุภาคไว้ได้ก็ตาม ดังนั้นเทคนิคทางด้านแทรก-เอตซ์ จึงได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง

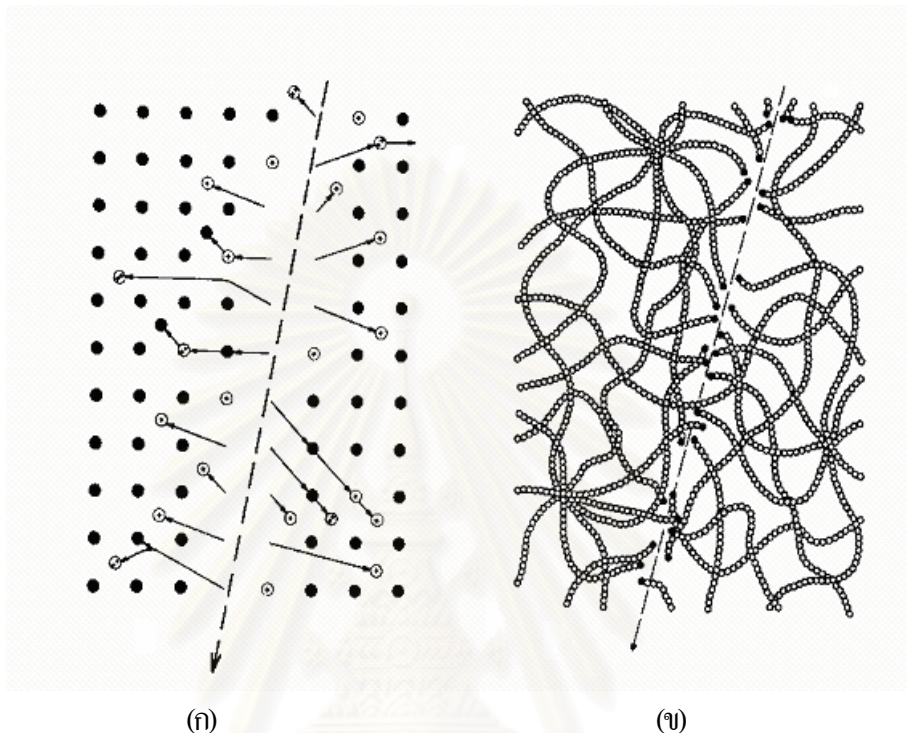
2.2 ทฤษฎีทางด้านแทรก-เอตซ์ ในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง

เนื่องจากแผ่นกรองฟิล์มบางที่ผลิตขึ้นจากเทคนิคทางด้านแทรก-เอตซ์นั้น อาศัยการยิงอนุภาคมีประจุพลังงานสูงให้เคลื่อนที่ผ่านแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ ก่อนนำไปล้างกัดขยายรอยอนุภาคด้วยกรดหรือด่างเข้มข้นเพื่อให้ฟิล์มโพลีเมอร์ละลายออกเกิดเป็นรูบนแผ่นฟิล์ม ดังนั้นจึงจำเป็นอย่างยั้งที่จะต้องศึกษาถึงเงื่อนไขต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ชนิด และสมบัติของอนุภาคที่จะใช้ยิงแผ่นฟิล์ม กลไกในการเกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม รวมถึงเงื่อนไขในการกัดขยายรอยบนแผ่นฟิล์ม

2.2.1 กลไกการเกิดรอย (Track formation mechanism)

ในปี ค.ศ. 1959 ซิลค์และบาร์น (E.C.H. Silk and R.S. Barnes) ได้พบว่า เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัสดุที่เป็นฉนวนบางชนิด เช่น ไมกา (Mica) จะเกิดรอยเล็ก ๆ ขึ้นตามทางที่

อนุภาคมีประจุวิ่งผ่าน ซึ่งรอยนี้มีขนาดเล็กมากจนต้องดูด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจึงจะเห็นได้ ต่อมาพบว่าไม่เพียงแต่ไมกาเท่านั้นที่จะเกิดรอยขึ้นได้ ไมลาร์ (Mylar) และพลาสติก (Plastics) ก็สามารถเกิดรอยขึ้นได้เช่นกัน ซึ่งสามารถแสดงภาพการเกิดรอยในตัวกลางที่เป็นผลึก (รูปที่ 2.2 ก.) และในตัวกลางที่เป็นโพลิเมอร์ (รูปที่ 2.2 ข.)



รูปที่ 2.2 การเกิดรอยในตัวกลางที่เป็นผลึก (ก) และตัวกลางที่เป็นโพลิเมอร์ (ข)[8]

ต่อมา ฟไลซ์เชอร์ (R.L. Fleischer) ไพรส์และวอล์คเกอร์ (P.B. Price and R.M. Walker) ได้หาวิธีขยายรอยเหล่านี้ให้มีขนาดใหญ่ขึ้น จนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบธรรมดา โดยการนำวัสดุดังกล่าวไปแช่ในสารละลายเคมีที่เหมาะสมเพื่อกัดขยายรอย (Etch) ให้ใหญ่ขึ้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวนี้ต่อมาได้มีการนำไปประยุกต์ใช้กันอย่างแพร่หลายในกระบวนการตรวจวัดกัมมันตภาพรังสีในสิ่งแวดล้อม หรือแม้กระทั่งใช้ในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง (Track-etch membrane filter)

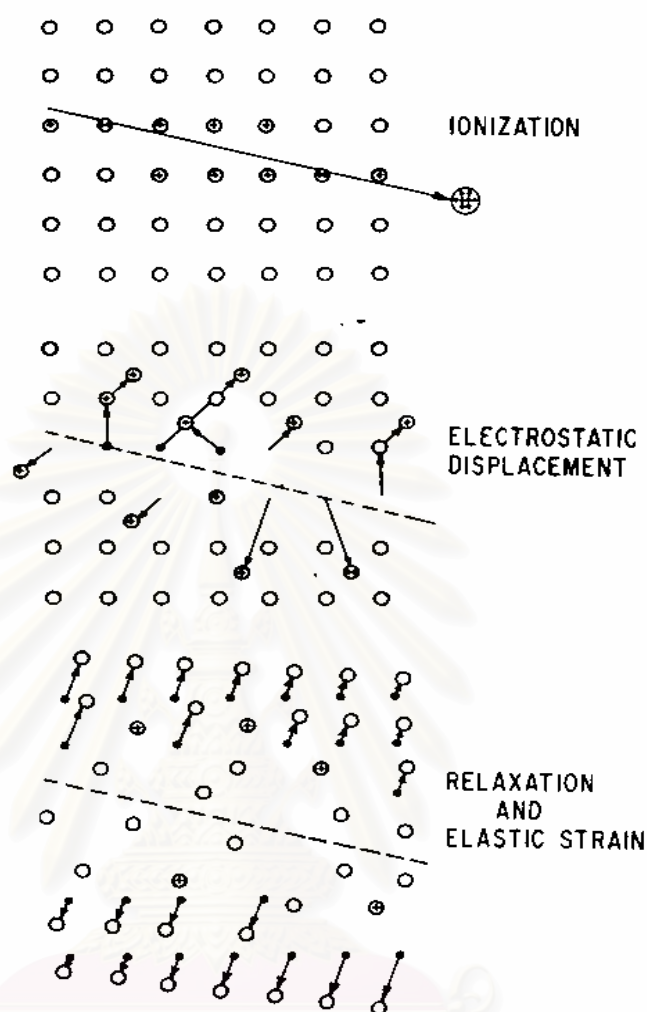
สำหรับกลไกในการเกิดรอยบนวัสดุนั้น นักฟิสิกส์หลายท่านได้ให้คำอธิบายไว้หลายทฤษฎีด้วยกัน เช่น

- Direct atomic displacement ได้รับการเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1949 โดย เซียส (F. Seitz) ซึ่งอธิบายว่า เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุตัวกลางใด ๆ จะชนกับอะตอมที่อยู่ในวัสดุตัวกลางนั้น ผลจากการชนดังกล่าวจะทำให้เกิดรอยพร่องหรือช่องว่างระหว่างอะตอมขึ้น โดยช่องว่างเหล่านี้จะหนาแน่นและกว้างขึ้นบริเวณจุดสิ้นสุดของการเคลื่อนที่ของอนุภาค แต่ทฤษฎี

ดังกล่าวปัจจุบันไม่ได้รับการยอมรับ เนื่องจากไม่สามารถอธิบายเหตุผลของการไม่เกิดรอยบนวัสดุตัวนำและกึ่งตัวนำได้

- Thermal spike ได้รับการเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1961 โดยนักฟิสิกส์ 3 ท่าน คือ บองฟิกลิโอไล (G. Bonfiglioli) เฟอร์โรและโมโจนิ (A. Ferro and A. Mojoni) ซึ่งอธิบายว่า เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านวัสดุตัวกลางใด ๆ จะคายพลังงานให้กับวัสดุตัวกลางที่วิ่งผ่านเกิดเป็นความร้อนขึ้น ในกรณีที่วัสดุตัวกลางนั้นเป็นตัวนำความร้อนที่ดี ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแผ่กระจายออกไปอย่างรวดเร็วทำให้บริเวณดังกล่าวมีอุณหภูมิไม่สูงมากนัก แต่สำหรับตัวกลางที่เป็นฉนวน ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแผ่กระจายออกไปได้น้อยและช้า ทำให้อุณหภูมิบริเวณนั้นสูงขึ้นจนมากพอที่จะทำให้โครงสร้างของตัวกลางบริเวณนั้นถูกทำลายไป ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดรอยขึ้น แต่ทฤษฎีดังกล่าวไม่ได้รับการยอมรับในปัจจุบัน เนื่องจากไม่สามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นกับวัสดุตัวกลางต่างชนิดกันทั้งในเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณได้ ไม่ว่าจะเป็ขนาด ความหนาแน่น ความดันล็ก หรือลักษณะต่าง ๆ ของรอยได้

- Ion explosion spike ซึ่งได้รับการเสนอขึ้นในปี ค.ศ. 1965 โดยนักฟิสิกส์ 3 ท่าน คือ ฟไลซ์เชอร์ (R.L. Fleischer) ไพรส์และวอล์คเกอร์ (P.B. Price and R.M. Walker) อธิบายว่า เมื่ออนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุตัวกลางที่เป็นฉนวน จะทำให้อะตอมเกิดการสั่น (Vibration) ซึ่งถ้าหากพลังงานของอนุภาคมีค่ามากกว่าค่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน (Binding energy) จะทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากวงโคจรเกิดการไอออไนซ์ (Ionization) ทำให้เกิดประจุบวกขึ้นรอบ ๆ แนวทางที่อนุภาคนั้นเคลื่อนที่ผ่าน โดยอะตอมที่มีประจุบวกเหล่านั้นจะผลักรันทำให้อะตอมที่มีประจุเคลื่อนที่ไปเบียดกันกับอะตอมที่อยู่ถัดไป เกิดความเครียดขึ้น ซึ่งความเครียดนี้จะแผ่กระจายไปยังอะตอมถัดไปทุกทิศทางทำให้โมเลกุลต้องมีการจัดเรียงตัวใหม่เพื่อรักษาสมดุล เกิดเป็นช่องว่างขึ้นในบริเวณนั้น จนสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (ดังแสดงในรูปที่ 2.3) โดยกระบวนการดังกล่าวนี้จะเกิดได้กับสารที่เป็นฉนวน เช่น แก้ว ไมกา พลาสติก เป็นต้น แต่ถ้าเป็นตัวกลางที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือสารตัวนำ จะไม่เกิดรอยขึ้นบนวัสดุ เนื่องจากอะตอมที่กลายเป็นไอออนบวกดังกล่าวจะสามารถจับเอาอิเล็กตรอนจากอะตอมที่อยู่ข้างเคียงเข้าไปแทนที่ ทำให้อะตอมนั้นกลายเป็นกลางกลับสู่สภาพเดิม จึงไม่เกิดช่องว่างขึ้น ซึ่งเป็นทฤษฎีที่ได้รับการยอมรับในปัจจุบัน



รูปที่ 2.3 แผนภาพแสดงกลไกการเกิดรอย[8]

จากทฤษฎีดังกล่าว สามารถสรุปได้ว่าการเกิดรอยบนวัสดุตัวกลางนั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ

1. คุณสมบัติของอนุภาคที่มีประจุ ได้แก่ ชนิด พลังงาน และประจุของอนุภาค
2. คุณสมบัติของตัวกลาง ได้แก่ ชนิดของวัสดุตัวกลาง ว่าเป็นฉนวน สารกึ่งตัวนำ หรือสารตัวนำ เป็นวัสดุนำความร้อนที่ดีหรือไม่ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมมากหรือน้อย เป็นต้น

ในการเกิดรอยนี้จะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานของอนุภาคมีประจุ โดยอนุภาคมีประจุจะต้องถ่ายเทพลังงานให้กับวัสดุตัวกลางมากกว่าค่าพลังงานวิกฤติ (Critical energy) ของวัสดุนั้น จึงจะปรากฏรอยขึ้น ดังนั้นการที่จะเกิดรอยหรือไม่ขึ้นขึ้นอยู่กับชนิด ระดับพลังงานของอนุภาคมีประจุ รวมทั้งชนิดของวัสดุตัวกลาง

รอยในสารพวกโพลิเมอร์จะสามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าการเกิดรอยในผลึก เพียงแค่อนุภาคมีประจุวิ่งผ่านเข้าไปในโพลิเมอร์นั้น ๆ และกระตุ้นอิเล็กตรอนให้มีพลังงานสูงขึ้นก็จะเป็นการทำลายแขนพันธะ (Bond) ระหว่างโครงสร้างของโพลิเมอร์นั้น เป็นผลทำให้เกิดรอยขึ้น เช่น เซลลูโลสไนเตรท (Cellulose nitrate : CN), เซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate : CA) เป็นต้น

สำหรับอนุภาคที่ไม่มีประจุ เช่น นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) ก็สามารถทำให้เกิดรอยบนวัสดุพวกโพลิเมอร์บางชนิดได้เช่นกัน เนื่องจากโพลิเมอร์ส่วนใหญ่ประกอบด้วย คาร์บอนและไฮโดรเจน ซึ่งธาตุดังกล่าวจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับนิวตรอนเร็วได้ดี โดยอันตรกิริยาที่สำคัญคือ การกระเจิงแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) และการดูดกลืน แล้วให้อนุภาคมีประจุออกมา เช่น โปรตอน และอนุภาคแอลฟา อนุภาคดังกล่าวจะเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมของวัสดุตัวกลางทำให้เกิดรอยขึ้น ซึ่งรอยที่เกิดในลักษณะนี้จะเรียกว่า Recoil track

2.2.2 ชนิด และคุณสมบัติของต้นกำเนิดรังสี

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จะใช้เทคนิคการผ่านอนุภาคมีประจุ (Particle tracks) เพื่อทำให้เกิดรอยแฝงบนแผ่นฟิล์มโพลิเมอร์ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสี 2 ชนิดด้วยกัน คือ

- Radioisotope neutron source ซึ่งเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี
- Radioisotope alpha source ซึ่งเป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาแบบไอโซโทปรังสี

ผลการวิจัยที่ได้จะนำไปใช้ในการพิจารณาเลือกชนิดของต้นกำเนิดรังสี และเทคนิคการผลิตที่สามารถควบคุมขนาดและทิศทางของรอยอนุภาค เพื่อใช้ในการสร้างแผ่นกรองฟิล์มบางที่จะสามารถให้ประสิทธิภาพในการกรองสูงสุดได้

2.2.2.1 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotope neutron source) มี 3 ประเภท ได้แก่

(1) ประเภท (α, n) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยาอนุภาคแอลฟา-นิวตรอน (α, n) ประกอบด้วยไอโซโทปรังสีที่มีการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา เช่น พอลอเนียม-210 (^{210}Po), เรเดียม-226 (^{226}Ra), พลูโตเนียม-238 (^{238}Pu) และ อะเมอริเซียม-241 (^{241}Am) เป็นต้น โดยจะสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานในช่วง 4 - 6 MeV เมื่อนำไปผสมกับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำ เช่น เบริลเลียม-9 (^9Be) ซึ่งเป็นไอโซโทปของธาตุเบริลเลียมที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนต่ำเพียง 1.67 MeV ทำให้สามารถที่จะผลิตนิวตรอนออกมาทำปฏิกิริยาได้โดยง่าย ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นคือ $^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$ โดยอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนของต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ประมาณ 2.2×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อกรัมของธาตุกัมมันตรังสี ซึ่งชนิดของต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n) แสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปรังสีประเภท (α, n) [9]

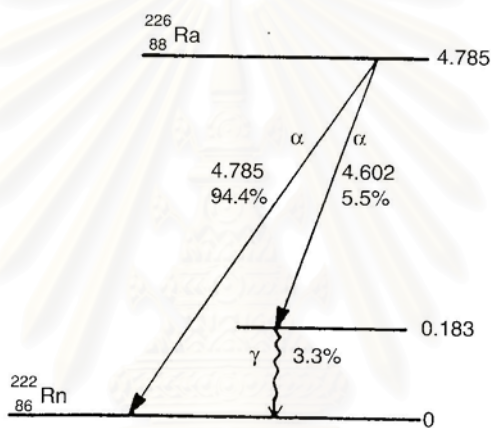
ต้นกำเนิดนิวตรอน	ค่าครึ่งชีวิต (Half-life)	พลังงานของอนุภาคแอลฟา (MeV)	พลังงานเฉลี่ยของนิวตรอน (MeV)	อัตราการปลดปล่อยนิวตรอน (neutrons/Ci.second)
$^{210}\text{Po-Be}$	138 วัน	5.30	4.54	3.0×10^6
$^{226}\text{Ra-Be}$	1620 ปี	7.69	3.94	1.5×10^7
$^{238}\text{Pu-Be}$	86.40 ปี	5.50	4.00	2.2×10^6
$^{239}\text{Pu-Be}$	2.43 ปี	5.14	4.59	1.6×10^6
$^{241}\text{Am-Be}$	458 ปี	5.48	4.46	2.2×10^6

(2) ประเภท (γ, n) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ผลิตนิวตรอนจากปฏิกิริยา (γ, n) โดยการใช้การผสมไอโซโทปรังสีที่สลายตัวให้รังสีแกมมาเข้ากับธาตุที่มีพลังงานยึดเหนี่ยวของนิวตรอนในนิวเคลียสต่ำ รังสีแกมมาจะเข้าทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของธาตุและปลดปล่อยนิวตรอนออกมา นิยมใช้พลวง-124 (^{124}Sb) ซึ่งสลายตัวให้รังสีแกมมาพลังงาน 1.70 MeV ผสมกับเบริลเลียม-9 (^9Be) โดยที่มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอน ออกจากต้นกำเนิดรังสี $^{124}\text{Sb-}^9\text{Be}$ ประมาณ 1.3×10^6 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของ ^{124}Sb แต่ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีรังสีแกมมาพลังงานสูงปะปนอยู่มาก อีกทั้งพลังงานของนิวตรอนที่ได้มีค่าต่ำเพียง 0.024 MeV

(3) ประเภทแตกตัวเอง (Self fission หรือ Spontaneous fission) เป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่ได้จากปฏิกิริยาฟิชชันของไอโซโทปรังสีบางชนิด พบว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทนี้ จะสามารถแตกตัวเป็นนิวเคลียส 2 ส่วนได้เอง โดยลักษณะการแตกตัวจะเป็นไปอย่างสม่ำเสมอและต่อเนื่อง ในการแตกตัวแต่ละครั้งจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาครั้งละหลายตัว เช่น แคลิฟอร์เนียม-252 (^{252}Cf) ซึ่งเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนที่เลือกใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้ มีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี มีการสลายตัวด้วยการแตกตัวเองประมาณร้อยละ 3.2 โดยการแตกตัวแต่ละครั้งจะปลดปล่อยนิวตรอนออกมาเฉลี่ย 3.76 ตัว ซึ่งอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 จะสูงกว่าต้นกำเนิดนิวตรอนประเภท (α, n) และ (γ, n) คือ ประมาณ 4.3×10^9 นิวตรอนต่อวินาทีต่อคูรีของแคลิฟอร์เนียม-252 หรือประมาณ 2.34×10^{12} นิวตรอนต่อวินาที ต่อแคลิฟอร์เนียม-252 จำนวน 1 กรัม พบว่านอกจากแคลิฟอร์เนียม-252 แล้วยังมีไอโซโทปของธาตุอื่นอีกที่สามารถแตกตัวเองให้นิวตรอนได้เอง ได้แก่ พลูโตเนียม-236 (^{236}Pu), พลูโตเนียม-238 (^{238}Pu), ยูเรเนียม-238 (^{238}U), พลูโตเนียม-240 (^{240}Pu), พลูโตเนียม-242 (^{242}Pu), คูเรียม-242 (^{242}Cm), พลูโตเนียม-244 (^{244}Pu), คูเรียม-244 (^{244}Cm) และแคลิฟอร์เนียม-254 (^{254}Cf)

2.2.2.2 ต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาแบบไอโซโทปรังสี (Radioisotope alpha source)

อนุภาคแอลฟา (α -particle) เป็นนิวเคลียสของธาตุฮีเลียม มีสัญลักษณ์ ${}^4_2\text{He}$ อนุภาคแอลฟาประกอบด้วยโปรตอน 2 อนุภาค มีประจุไฟฟ้า $+2e$ และมีมวล 4.001516 amu เท่ากับนิวเคลียสของฮีเลียม อนุภาคแอลฟามักจะเกิดจากการสลายตัวของอะตอมที่หนัก ๆ ซึ่งมีเลขเชิงอะตอมตั้งแต่ 83 ขึ้นไป เนื่องจากนิวไคลด์ที่หนักจะทำให้มีแรงผลักรวมระหว่างโปรตอนมากขึ้นทำให้แรงนิวเคลียร์ลดลง เมื่อโปรตอน 2 อนุภาค รวมกับนิวตรอน 2 อนุภาค แล้วมีพลังงานมากพอที่จะเอาชนะพลังงานศักย์ของนิวเคลียสได้ นิวคลีออนกลุ่มนี้จะหลุดออกจากนิวเคลียส หลังการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาแล้วอาจจะเกิดการปลดปล่อยรังสีแกมมาตามมา ซึ่งในกรณีที่หลังการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟาแล้ว มีนิวคลีออนอยู่ในสถานะกระตุ้น (Excited state) นิวคลีออนนี้จะกลับลงมาสู่สถานะพื้น โดยการปล่อยพลังงานออกมาในรูปของรังสีแกมมา (ดังรูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 แผนภาพการสลายตัวของ ${}^{226}\text{Ra}$ [10]

สมการทั่วไปของการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา[10] สามารถแสดงได้ดังนี้



เมื่อ	${}^A_Z\text{P}$	คือ นิวไคลด์แม่ (parent nuclide)
	${}^{A-4}_{Z-2}\text{D}$	คือ นิวไคลด์ลูก (daughter nuclide)
	${}^4_2\text{He}$	คือ อนุภาคแอลฟา
	Q	คือ พลังงานจากการสลายตัว (decay energy)

โดยทั่วไปแล้ว อนุภาคแอลฟาสามารถที่จะรับพลังงานของการสลายตัวไปมากถึงประมาณ 98% ส่วนที่เหลือเพียง 2% เป็นพลังงานของนิวไคลด์ลูก ซึ่งพลังงานที่นิวไคลด์ลูกรับไปนั้น แม้ว่าจะมีค่าน้อย แต่ก็มีความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากค่าพลังงานดังกล่าวอาจทำให้

นิวไคลด์ลูกที่อยู่บริเวณผิวของสารกัมมันตรังสีสามารถที่จะหลุดออกไปได้ แม้ว่าอาจจะไม่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ไกลก็ตาม

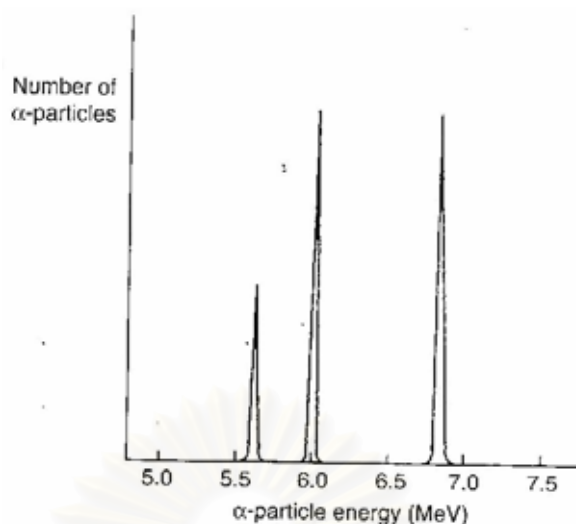
ตามปกติแล้วนิวไคลด์กัมมันตรังสีที่สลายตัวให้อนุภาคแอลฟา มักมีช่วงของค่าครึ่งชีวิตกว้างมาก ตั้งแต่ไม่กี่วินาที จนถึงนับล้านล้านปี โดยทั่วไปแล้วนิวไคลด์ที่มีมวลมาก จะให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานในช่วง 5 - 8 MeV ในขณะที่นิวไคลด์ที่มีมวลน้อยจะให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานในช่วง 1 - 2.5 MeV เช่น ^{216}Rn มีครึ่งชีวิต 45 ไมโครวินาที สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 8.05 MeV ส่วน ^{144}Nd มีครึ่งชีวิต 2.1×10^{15} ปี สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 1.83 MeV โดยความสัมพันธ์ส่วนกลับนี้สามารถแสดงได้จากกฎไกเกอร์-นัตทอล (Geiger-Nattal rule)[10] ดังนี้

$$\log t_{1/2} \propto \frac{1}{\log E_{\alpha}} \quad (2.2)$$

เมื่อ $t_{1/2}$ คือ ค่าครึ่งชีวิตของนิวไคลด์กัมมันตรังสี
 E_{α} คือ พลังงานของอนุภาคแอลฟา

พลังงานของอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจากนิวไคลด์กัมมันตรังสี จะมีลักษณะไม่ต่อเนื่อง (Discrete) โดยมีค่าเฉพาะแต่ละนิวไคลด์ ซึ่งเมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของอนุภาคแอลฟากับพลังงาน จะได้สเปกตรัมเชิงเส้น (Line spectrum) จากรูปที่ 2.5 แสดงลักษณะของสเปกตรัมการสลายตัวให้อนุภาคแอลฟา ของนิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง จะเห็นว่าสเปกตรัมของอนุภาคแอลฟามี 3 ยอด (peak) หมายความว่า นิวไคลด์กัมมันตรังสีชนิดนี้ สลายตัวให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงานแตกต่างกัน 3 ค่า

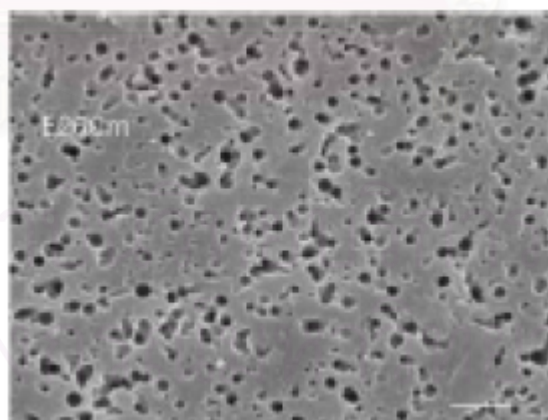
สำหรับแหล่งกำเนิดอนุภาคแอลฟา ที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการมักจะอยู่ในรูปของ Solid state source ที่มีลักษณะเป็นเหรียญ (Disc source) โดยมีนิวไคลด์รังสีที่ผ่านการคำนวณสัดส่วนค่าความแรงรังสีกับปริมาณความเข้มข้นของสารรังสี จนกระทั่งทราบค่าความแรงรังสีที่แท้จริง จึงใช้วิธีการ Electro deposit coat ลงบนกลางเหรียญโลหะที่เป็นฐาน จากนั้นจึงทำการสอบเทียบค่าความแรงรังสีที่แท้จริง เพื่อใช้เป็นสารรังสีมาตรฐาน ซึ่งในงานวิจัยในครั้งนี้เลือกใช้ ^{241}Am เป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคแอลฟา



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างสเปกตรัมอนุภาคแอลฟาของนิวไคลด์รังสี[10]

2.2.3 หลักการสำคัญของกระบวนการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ด้วยนิวตรอน

เนื่องจากนิวตรอนที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวแต่ละครั้งของแคลิฟอร์เนียม-252 มีค่าพลังงานเฉลี่ยประมาณ 2.14 MeV จัดเป็นชนิด นิวตรอนเร็ว (Fast neutron) ซึ่งสามารถทำให้เกิดรอยแ่งบนแผ่นฟิล์ม หรือที่เรียกว่า Recoil tracks ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาการชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering) ระหว่างนิวตรอนเร็วกับนิวเคลียสของธาตุไฮโดรเจนที่เป็นส่วนประกอบของฟิล์มโพลิเมอร์ แต่เนื่องจากการควบคุมทิศทางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นทำได้ยาก โอกาสที่จะเกิดรอยซ้อนกันมีมาก ทำให้ขนาดของรูไม่สม่ำเสมอ (ดังรูปที่ 2.6)



รูปที่ 2.6 ภาพจาก SEM แสดงลักษณะของ Fast neutron recoil tracks บนแผ่นฟิล์มโพลิคาร์บอเนต[11]

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงได้นำท่อบังค้ำลำนิวตรอน (Neutron collimator) และฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen) มาช่วยในการบังค้ำทิศทางของนิวตรอน ซึ่งฉาก

เปลี่ยนนิวตรอนที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้เลือกใช้ BE-10 ผลิตโดยบริษัท Kodak Pathe ประเทศฝรั่งเศส ซึ่ง BE-10 เป็นโบรอนคาร์ไบด์ (Borocarbide, B₄C) ที่มีโบรอน-10 เสริมสมรรถนะร้อยละ 93 (Enriched 93% ¹⁰B) เป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่เหมาะสมกับฟิล์มเซลล์ลูโลสในเตรท และเซลล์ลูโลสอะซิเตท โดยเป็นฉากที่นำคุณสมบัติของการดูดกลืนนิวตรอนของโบรอน-10 ซึ่งมีค่าภาคตัดขวางต่อเทอร์มัลนิวตรอนสูง (ดังตารางที่ 2.3) เมื่อดูดกลืนนิวตรอนแล้วจะให้อนุภาคแอลฟาจากปฏิกิริยา ¹⁰B(n,α)⁷Li โดยอนุภาคมีประจุที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็อนุภาคแอลฟา หรือลิเทียม-7 จะเคลื่อนที่เข้าชนแผ่นฟิล์มทำให้เกิดรอยแผลงของอนุภาค ซึ่งรอยแผลงดังกล่าวจะถูกนำไปก๊อชขยายรอยด้วยสารเคมีที่เหมาะสม เพื่อใช้ในการสร้างรูสำหรับแผ่นกรองฟิล์มบางต่อไป

ตารางที่ 2.3 ค่าภาคตัดขวางของนิวตรอนพลังงาน 0.0253 eV ของไอโซโทปบางชนิด[12]

Element	A	%Abundance	σ_s	σ_a
Li	Natural		1.40	70.5000
	6	7.5	0.98	940.0000
	7	82.5	1.44	0.0454
B	Natural		5.01	767.000
	10	20	0.98	3837.000
	11	80	5.80	0.006
Al	27	100	1.506	0.231
Fe	Natural		11.66	2.560
	54	5.8	2.20	2.300
	56	91.72	12.80	2.600
	57	2.20	<1.00	2.500
	58	0.28	28.00	1.280
Cd	Natural		5.7	2520.00
	106	1.25		1.00
	108	0.89		1.10
	110	12.51		11.00
	111	12.81		24.00
	112	24.13	7.0	2.20
	113	12.22		20600.00
	114	28.72	5.3	0.34
	116	7.47	6.5	0.07
In	Natural		2.75	194.00
	113	4.28	3.80	12.00
	115	95.72	2.60	202.00
Gd	Natural			49000.00
	152	0.2		1100.00
	154	2.1		85.00
	155	14.8		60900.00
	156	20.6		1.50
	157	15.7		254000.00
	158	24.8		2.00
160	21.8		0.77	
Pb	Natural		11.11	0.1700
	204	1.4		0.6600
	206	24.1		0.0305
	207	22.1		0.7090
	208	52.4		0.0049

จากคุณสมบัติของฉากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ จะเห็นได้ว่าจำเป็นต้องทำการหน่วงนิวตรอน (Neutron moderation) เพื่อเป็นการลดระดับพลังงานของนิวตรอนลงจากนิวตรอนเร็วให้เหลือเป็นระดับเทอร์มัลนิวตรอน โดยให้นิวตรอนชนกับอะตอมของวัสดุที่มีค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงต่อนิวตรอนสูง เช่น น้ำ น้ำมวลหนัก แกรไฟต์ และโพลีเอทิลีน เป็นต้น ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสามารถแบ่งระดับพลังงานของนิวตรอนได้ดังตารางที่ 2.4 เพื่อใช้ในการพิจารณาเลือกระดับพลังงานของนิวตรอนให้เหมาะสมกับการใช้งาน

ตารางที่ 2.4 การจำแนกชนิดของนิวตรอนตามระดับพลังงาน[13]

ชนิดของนิวตรอน	ระดับพลังงาน
นิวตรอนช้า (Slow neutron)	$0 \text{ eV} - 10^3 \text{ eV}$
นิวตรอนเย็น (Cold neutron)	$< 0.01 \text{ eV}$
เทอร์มัลนิวตรอน (Thermal neutron)	$0.01 \text{ eV} - 0.3 \text{ eV}$
อีพิเทอร์มัลนิวตรอน (Epithermal neutron)	$0.3 \text{ eV} - 10^4 \text{ eV}$
เรโซแนนซ์นิวตรอน (Resonance neutron)	$1 \text{ eV} - 10^2 \text{ eV}$
นิวตรอนเร็ว (Fast neutron)	$10^3 \text{ eV} - 20 \text{ MeV}$
นิวตรอนสัมพัทธภาพ (Relativistic neutron)	$> 20 \text{ MeV}$

นิวตรอนเร็วที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากต้นกำเนิดรังสี จะถูกลดทอนพลังงานลงโดยการชนกับตัวหน่วงนิวตรอน ซึ่งจะทำให้ความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน (Peak thermal neutron flux) ในตัวหน่วงนิวตรอนลดลงประมาณ 50 ถึง 500 เท่า ของอัตราการปลดปล่อยนิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิด อัตราส่วนการลดลงของความเข้มนิวตรอนนี้เรียกว่า “เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ (Thermalization factor)” โดย

$$\text{เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์} = \frac{\text{อัตราการปลดปล่อยนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอน}(n/s)}{\text{เทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์สูงสุดในสารหน่วงนิวตรอน}(n/cm^2 \cdot s)} \quad (2.3)$$

จะเห็นว่าค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์จะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัยด้วยกัน คือ ชนิดของต้นกำเนิดนิวตรอน (ดังแสดงในตารางที่ 2.5) ซึ่งพบว่าในสารหน่วงชนิดเดียวกันต้นกำเนิดนิวตรอนที่มีพลังงานต่ำกว่าจะให้ความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนสูงกว่า โดยเปรียบเทียบที่อัตราการปลดปล่อยเทอร์มัลนิวตรอนเท่ากัน (ดังรูปที่ 2.7 และ 2.8) และอีกปัจจัยหนึ่ง คือ ชนิดของสารหน่วงนิวตรอน เนื่องจากธาตุที่สามารถหน่วงพลังงานของนิวตรอนได้ดีที่สุด คือ ไฮโดรเจน ดังนั้นสารหน่วงนิวตรอนที่เป็นสารประกอบไฮโดรเจน ที่มีความหนาแน่นของอะตอมของไฮโดรเจนสูง จะ

สามารถให้ความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอน สูงกว่าสารหน่วงนิวตรอนที่มีความหนาแน่นของอะตอมของไฮโดรเจนต่ำ (ดังรูปที่ 2.9)

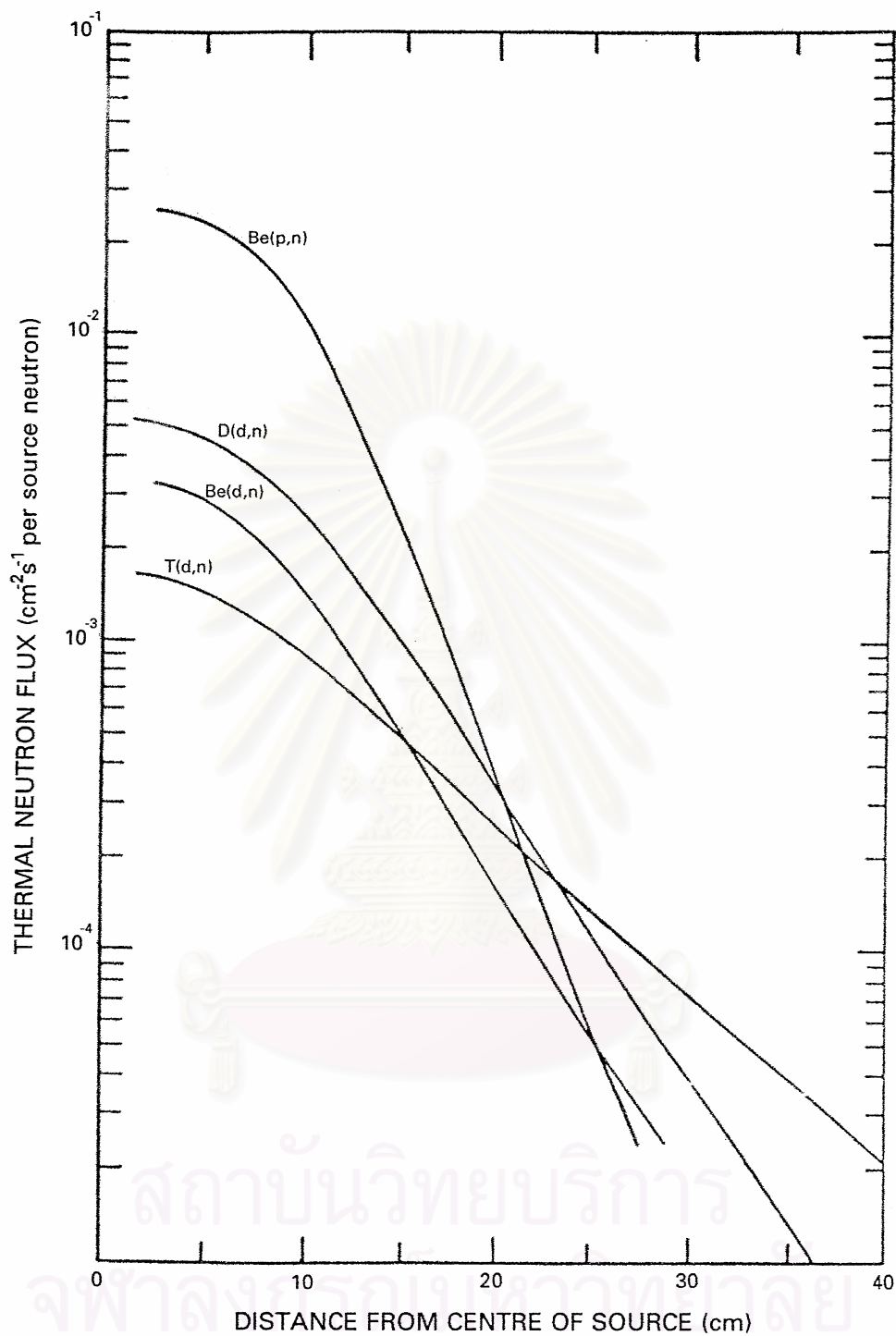
ตารางที่ 2.5 ค่าเทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์ในน้ำของนิวตรอนจากต้นกำเนิดนิวตรอนบางชนิด[13]

พลังงานนิวตรอน	ต้นกำเนิดนิวตรอน	ปฏิกิริยาผลิตนิวตรอน	เทอร์มัลไลเซชันแฟกเตอร์
0.024 MeV	$^{124}\text{Sb-Be}$	$^9\text{Be}(\gamma, n)\text{Be}$	50
2 MeV	^{252}Cf	Self fission	100
4.5 MeV	$^{241}\text{Am-Be}$	$^9\text{Be}(\alpha, n)^{12}\text{C}$	200
6.5 MeV*	เครื่องเร่งอนุภาค	$^9\text{Be}(d, n)^{10}\text{B}$	300
14 MeV**	เครื่องเร่งอนุภาค	$^3\text{T}(d, n)^4\text{He}$	650

หมายเหตุ : * เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 2.8 MeV

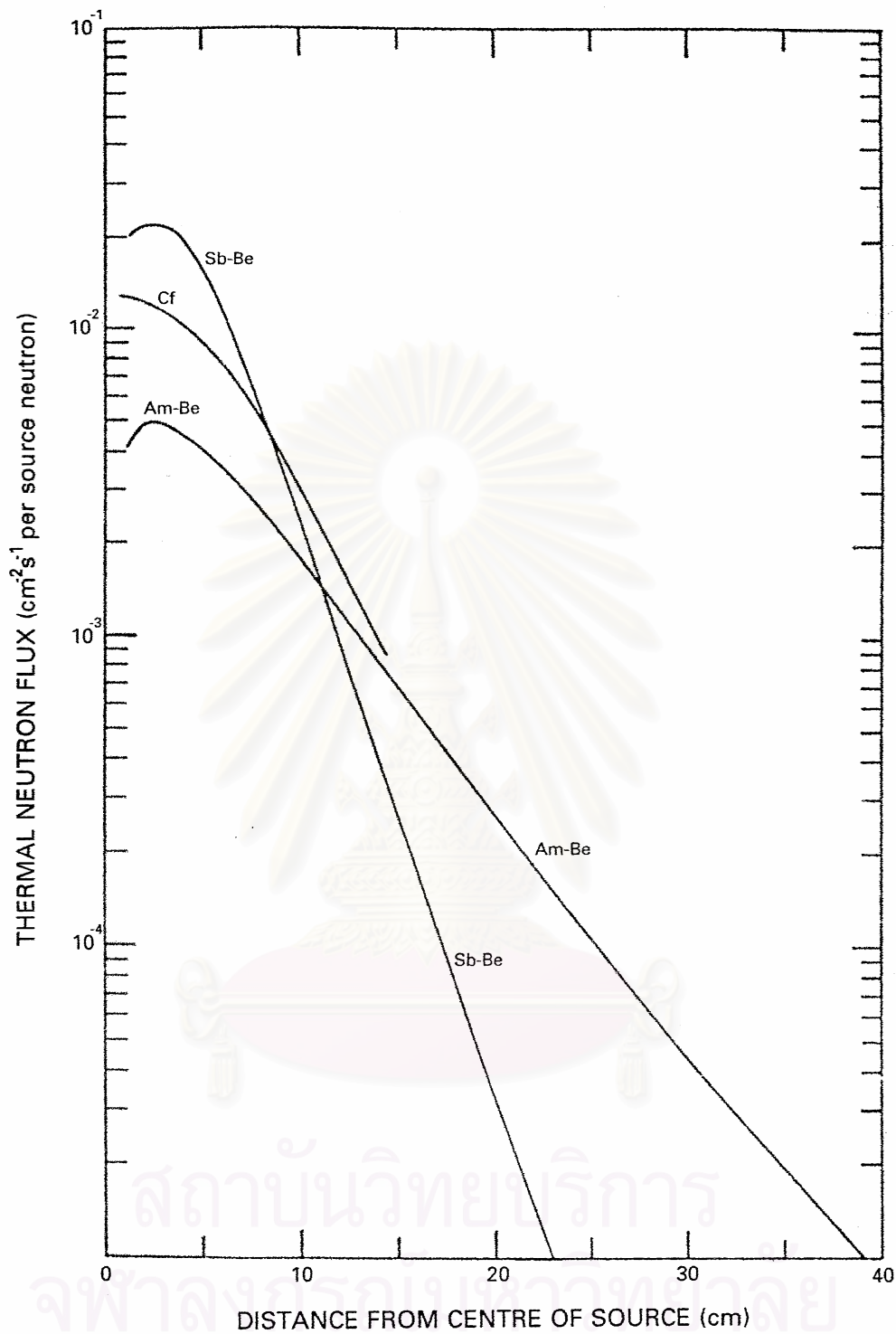
** เมื่อพลังงานของอนุภาคดิวทีรอนเท่ากับ 150 MeV

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

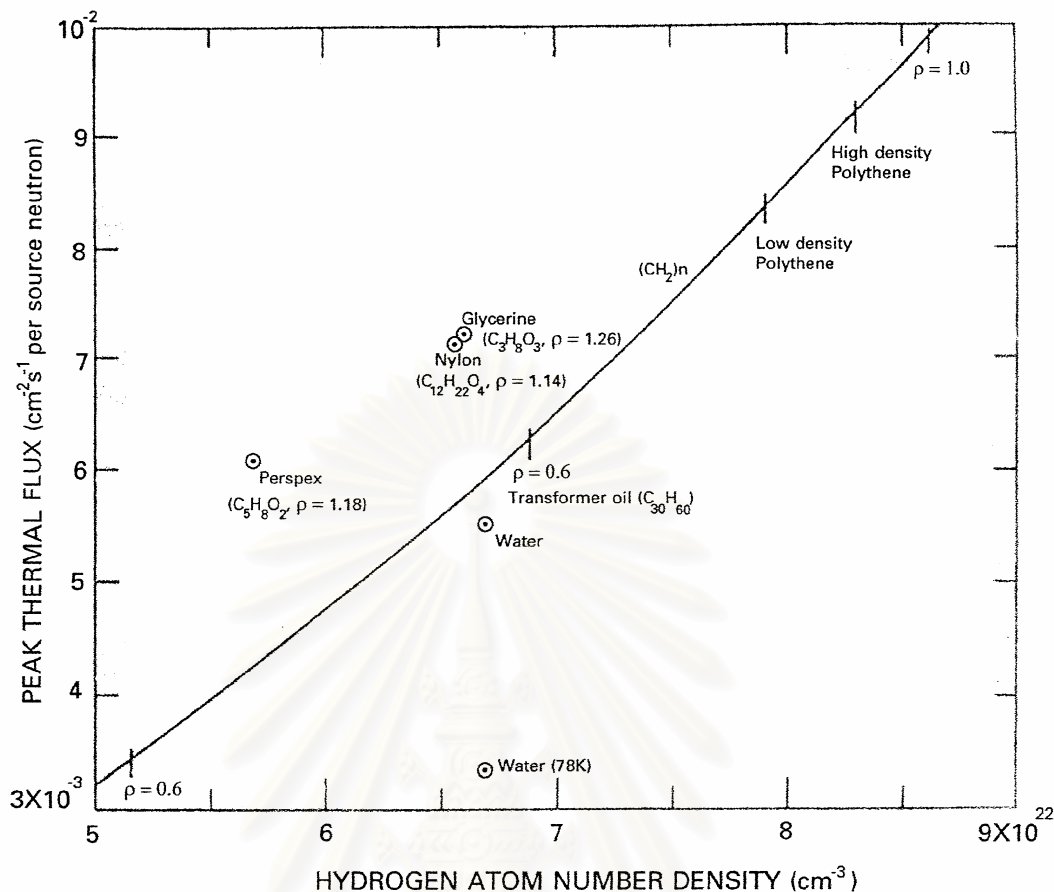


Thermal neutron flux distributions (experimental) produced by various accelerator neutron sources in a water moderator. The beryllium-target reactions refer to a bombarding ion energy of 2.8 MeV and a thick stainless-steel target chamber of 6 cm outside diameter, the hydrogen-target reactions refer to a bombarding energy of 150 keV and a light aluminium target chamber 2.5 cm in outside diameter.

รูปที่ 2.7 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากเป้าของเครื่องเร่งอนุภาค[14]



รูปที่ 2.8 ความสัมพันธ์ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ในน้ำกับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนแบบไอโซโทปปรังสี[14]



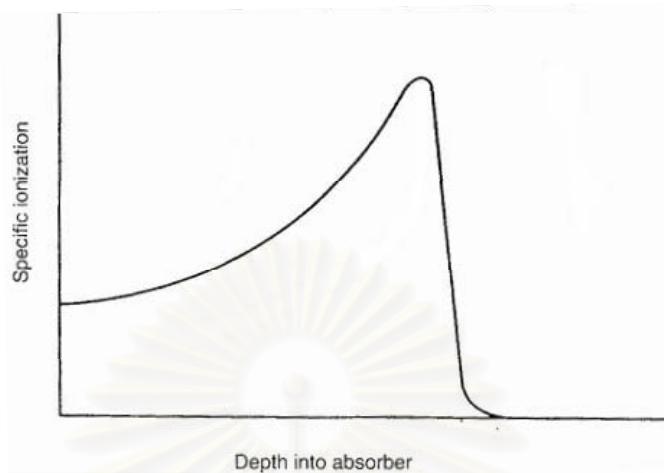
รูปที่ 2.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสูงสุดของเทอร์มัลนิวตรอนกับความหนาแน่นอะตอมของไฮโดรเจนของตัวหน่วงนิวตรอน[14]

2.2.4 หลักการสำคัญของกระบวนการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ด้วยอนุภาคแอลฟา

โดยปกติแล้วอนุภาคแอลฟาจะสามารถเกิดอันตรกิริยากับตัวกลาง จากการชนกับอิเล็กตรอนของตัวกลางนั้นโดยตรง หรือโดยสนามไฟฟ้าของอนุภาคแอลฟาปะทะกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดกระบวนการแตกตัวเป็นไอออน ดังนั้นจึงเรียกจำนวนคู่อิออนที่เกิดขึ้น เมื่อรังสีเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง 1 หน่วยระยะทางว่า “การแตกตัวจำเพาะ (Specific ionization)” ซึ่งองค์ประกอบที่มีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนของตัวกลาง คือ ประจุและความเร็วของอนุภาค โดยอนุภาคที่มีประจุมากจะมีความเข้มของสนามไฟฟ้ามาก ทำให้เกิดการแตกตัวต่อระยะทางมาก

ในการชนแต่ละครั้งอนุภาคจะสูญเสียพลังงานให้กับตัวกลาง ส่งผลให้อนุภาคมีความเร็วลดลง โดยอนุภาคที่มีความเร็วสูงจะมีค่าการแตกตัวจำเพาะต่ำ ซึ่งอนุภาคเมื่อเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางจะมีค่าการแตกตัวจำเพาะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ และจะมีค่ามากที่สุดเมื่ออนุภาคเกือบหยุดนิ่งในตัวกลาง (ดังภาพที่ 2.10) ซึ่งกราฟนี้เป็นที่รู้จักกันในชื่อของเส้นโค้งแบรกก์ (Bragg curve) โดยอนุภาคแอลฟาจะมีค่าการแตกตัวจำเพาะในอากาศ 10,000 – 70,000 คู่อิออนต่อ 1 เซนติเมตร ซึ่ง

การแตกตัวจะมีค่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนกว่าอนุภาคแอลฟาจะสูญเสียพลังงานจนหมด แล้วรวมกับอิเล็กตรอนใด ๆ 2 ตัว กลายเป็นอะตอมของฮีเลียม



รูปที่ 2.10 การแตกตัวจำเพาะที่มีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะทางที่อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง[10]

2.2.4.1 กำลังหยุดยั้ง (Stopping power)

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในอะตอมของตัวกลางใด ๆ จะเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวกลางและส่งผลให้อนุภาคมีการสูญเสียพลังงานนั้น สามารถคิดอัตราการสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยต่อระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ เรียกว่า “กำลังหยุดยั้ง (Stopping power)”[10] โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi z^2 e^4 N Z \times (3 \times 10^9)^4}{M v^2 \times 1.6 \times 10^{-6}} \left[\ln \frac{2 M v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad \frac{\text{MeV}}{\text{cm}} \quad (2.4)$$

เมื่อ e คือ ประจุของอิเล็กตรอน มีค่า 1.6×10^{-19} C

Z คือ เลขอะตอมของอนุภาค

M คือ มวลของอนุภาค หน่วย กรัม

v คือ ความเร็วของอนุภาค หน่วย เซนติเมตร/วินาที

N คือ จำนวนอะตอมของตัวกลาง ต่อ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร

Z คือ เลขอะตอมของตัวกลาง

c คือ ความเร็วของแสงในอากาศ มีค่า 3×10^{10} เซนติเมตร/วินาที

I คือ พลังงานศักย์กระตุ้นการแตกตัวเป็นไอออนเฉลี่ย

(Mean ionization and excitation potential)

ในอากาศ $I = 1.38 \times 10^{10}$ erg

ในตัวกลางใดๆ $I = 2.16 \times 10^{11} Z$ erg

สำหรับตัวกลางที่เป็นของผสม ค่ากำลังหยุดยั้งสำหรับตัวกลางที่เป็นสารประกอบหรือของผสม[10] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dk} \right)_{comp} = \sum_i w_i \frac{1}{\rho_i} \left(\frac{dE}{dk} \right)_i \quad (2.5)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของสารประกอบหรือของผสม

ρ_i คือ ความหนาแน่นของธาตุที่ i

$\frac{1}{\rho} \left(\frac{dE}{dk} \right)_i$ คือ กำลังหยุดยั้งในหน่วย MeV/(kg.m²) สำหรับธาตุที่ i

2.2.4.2 พิสัย (Range)

สำหรับคำจำกัดความของความหนาแน่นของวัสดุตัวกลาง หรือระยะทางเป็นเส้นตรงที่สามารถหยุดการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้พอดีเรียกว่า “พิสัย (Range)” โดยพิสัยของอนุภาคมีประจุ อาจแสดงในหน่วยความยาว เช่น เซนติเมตร หรือ มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 2.11) แต่เนื่องจากอิทธิพลของอุณหภูมิ และความดัน ซึ่งมีผลต่อความหนาแน่นของวัสดุตัวกลางนั้น ส่งผลให้ค่าพิสัยมีการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว จึงได้มีการใช้หน่วยที่มีการระบุค่าความหนาแน่นของตัวกลางมาสัมพันธ์ด้วย เรียกว่า “หน่วยความหนาแน่น (Mass thickness unit)” [10] ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร โดยมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$R_m = R_L \times \rho \quad (2.6)$$

เมื่อ R_m คือ ค่าพิสัยเชิงมวล (mg/cm²)

R_L คือ ค่าพิสัยเชิงเส้น (cm)

ρ คือ ความหนาแน่น (mg/cm³)

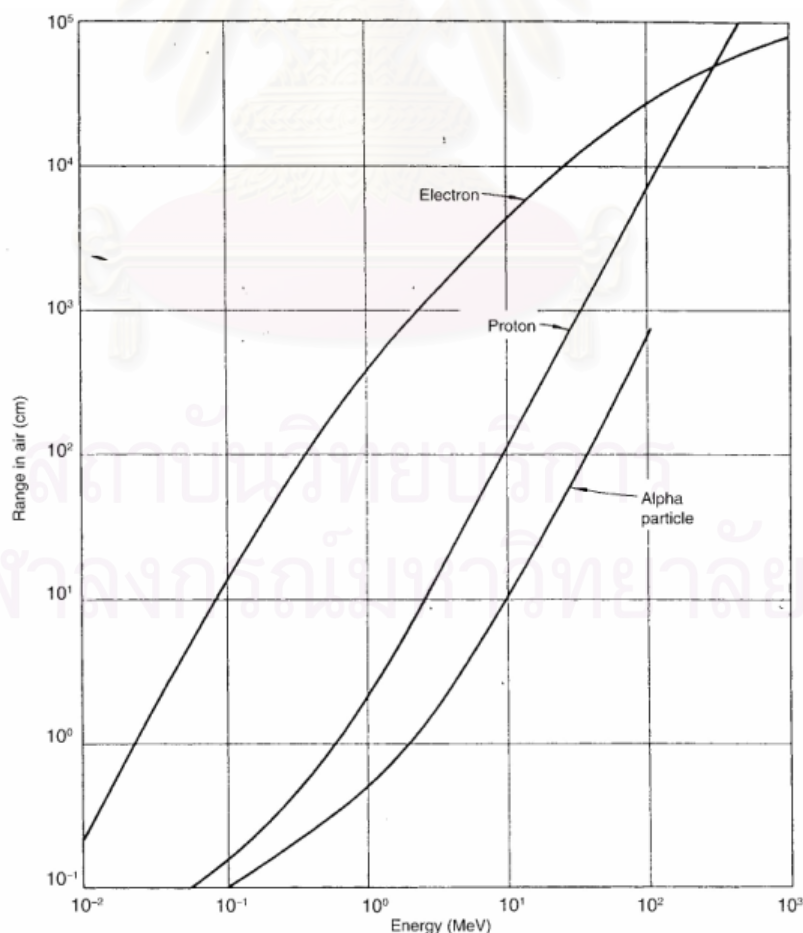
โดยทั่วไปแล้ว พิสัยของอนุภาคมีประจุจะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบหลายประการ เช่น

(1) เลขอะตอม และเลขมวลของสาร โดยอนุภาคมีประจุที่มีเลขอะตอมสูง จะมีพิสัยในการเคลื่อนที่สั้นกว่าอนุภาคมีประจุที่มีเลขอะตอมต่ำ เนื่องจากอนุภาคดังกล่าวสามารถเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนระหว่างการเคลื่อนที่ได้มากกว่า ซึ่งจะทำให้อนุภาคนั้นมีการสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระยะทางการเคลื่อนที่สั้น

(2) พลังงานของอนุภาค โดยอนุภาคที่มีพลังงานต่ำจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางได้ระยะทางที่สั้นกว่าอนุภาคที่มีพลังงานสูง

(3) มวลของอนุภาค พบว่าอนุภาคที่มีมวลมากจะมีพิสัยสั้นกว่าอนุภาคที่มีมวลน้อยในกรณีที่มีพลังงานจลน์เท่ากัน

(4) ประจุของอนุภาค พบว่าอนุภาคที่มีประจุมากจะมีพิสัยสั้น เนื่องจากอิทธิพลของแรงทางไฟฟ้าจากประจุของอนุภาค สามารถส่งผลต่อการเกิดไอออไนเซชันกับอิเล็กตรอนในอะตอมของตัวกลาง ดังนั้นอนุภาคที่มีประจุมากจะสูญเสียพลังงานเร็วกว่าอนุภาคที่มีประจุน้อย



รูปที่ 2.11 พิสัยในอากาศของอิเล็กตรอน โปรตอน และอนุภาคแอลฟา ที่ค่าพลังงานต่าง ๆ [10]

แต่เนื่องจากพิสัยของอนุภาคแอลฟาแปรผันตามค่าพลังงาน ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างพิสัยและพลังงานของอนุภาค ที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส ความดัน 760 มิลลิเมตรปรอท ในอากาศ[10] คือ

$$R(cm) = 0.56E \quad (E < 4 \text{ MeV}) \quad (2.7)$$

$$R(cm) = 1.24E - 2.62 \quad (4 \leq E \leq 8 \text{ MeV}) \quad (2.8)$$

เมื่อ E คือ พลังงานของอนุภาคแอลฟา

สำหรับพิสัยของอนุภาคแอลฟาในตัวกลางใด ๆ [10] สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$R_m = 0.56A^{1/3} R_{air} \quad (2.9)$$

เมื่อ R_m คือ พิสัยในตัวกลางใด ๆ (mg/cm²)

R_{air} คือ พิสัยในอากาศ (cm)

A คือ เลขมวลของสาร

2.2.4.3 แม่เหล็กและสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากอนุภาคแอลฟาจะพุ่งออกจากแหล่งกำเนิดรังสี แบบ Disc source ในลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม ส่งผลให้รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นจะมีลักษณะตรงเป็นกระจุกอยู่เพียงตรงกลางฟิล์ม และจะค่อย ๆ เบนออกโดยรอบ ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นกรองไม่สม่ำเสมอ จึงได้มีการทดลองนำสนามแม่เหล็กมาใช้ในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา ให้สามารถเคลื่อนที่ตกกระทบแผ่นฟิล์มในลักษณะที่ตรงขึ้น

มนุษย์รู้จักอำนาจแม่เหล็ก จากแม่เหล็กธรรมชาติซึ่งจัดเป็นสารประกอบประเภท แมกเนไทต์ (Fe₂O₃) นำไปใช้ประโยชน์ในการบอกทิศ การศึกษาเรื่องอำนาจแม่เหล็กเริ่มต้นอย่างจริงจังเมื่อต้นคริสต์ศตวรรษที่ 19 โดย เออร์สเตด (Oersted, คศ. 1777-1851) พบว่า เมื่อนำเข็มทิศไปวางไว้ใกล้ ๆ ตัวนำที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เข็มทิศจะเบี่ยงเบนไปจากแนวปกติ ซึ่งเรียกบริเวณที่แท่งแม่เหล็กหรือตัวนำสามารถแสดงอำนาจแม่เหล็กว่า “สนามแม่เหล็ก (Magnetic field, B)” สนามแม่เหล็กเป็นปริมาณเวกเตอร์ สามารถใช้ “ความหนาแน่นเส้นแรงแม่เหล็ก (Magnetic flux density)” บอกทิศและขนาดของเส้นแรงแม่เหล็กได้

ในระบบ SI ความหนาแน่นสนามแม่เหล็กมีหน่วยเป็น เวเบอร์ต่อตารางเมตร (Wb/m²) หรือ เทสลา (Tesla, T) เพื่อเป็นเกียรติให้แก่ นิโกลัส เทสลา (Nicolas Tesla) วิศวกรชาวอเมริกันเชื้อสายยูโกสลาเวีย โดยนิยามว่า ความหนาแน่นสนามแม่เหล็ก 1 เทสลา หมายถึงความ

เข้มของสนามที่ทำให้เกิดแรง 1 นิวตัน บนประจุ 1 คูลอมบ์ ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 1 เมตรต่อวินาที ในทิศทางที่ตั้งฉากกับสนามแม่เหล็ก

เนื่องจากแรงที่สนามแม่เหล็กกระทำบนประจุ จะเป็นปฏิภาคโดยตรงกับขนาดและความเร็วของประจุนั้น โดยทิศทางของแรงจะตั้งฉากกับความเร็วของประจุ[15] (ดังรูปที่ 2.12) นั่นคือ

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (2.10)$$

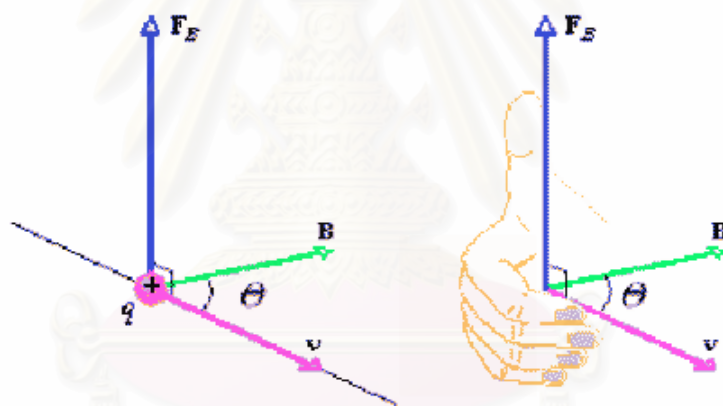
หรือ $F = qvB \sin \theta \quad (2.11)$

เมื่อ F คือ แรงแม่เหล็กที่กระทำบนประจุ (newton)

q คือ ขนาดของประจุที่เคลื่อนที่ในสนามแม่เหล็ก (coulomb)

v คือ ความเร็วในการเคลื่อนที่ของอนุภาค (m/s)

B คือ สนามแม่เหล็ก (tesla)



รูปที่ 2.12 การเคลื่อนที่ของประจุในสนามแม่เหล็ก[15]

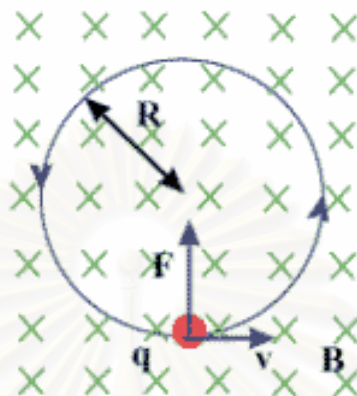
เมื่อประจุเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณสนามแม่เหล็กที่มีค่าสม่ำเสมอ เส้นทางเคลื่อนที่ของประจุ จะขึ้นอยู่กับมุมระหว่างทิศทางการเคลื่อนที่ของประจุกับทิศของเส้นแรงแม่เหล็กบริเวณนั้น ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะ คือ

(1) กรณีที่ประจุเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกัน หรือทิศตรงข้ามกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ($\theta = 0^\circ$ หรือ $\theta = 180^\circ$) แรงที่กระทำจะเป็นศูนย์ ประจุจะมีการเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมไม่เปลี่ยนแปลง

(2) กรณีที่ประจุเคลื่อนที่ในทิศทางที่ตั้งฉากกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็ก ($\theta = 90^\circ$) แรงที่กระทำต่อประจุจะมีค่ามากที่สุด ประจุจะมีการเคลื่อนที่เป็นวงกลม (ดังรูปที่ 2.13) ซึ่งสามารถหารัศมีของวงกลมได้จาก[15]

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (2.12)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของวงกลม
m คือ มวลของประจุ



รูปที่ 2.13 ลักษณะการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าในทิศทางที่ตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็ก[15]

(3) ในกรณีที่ประจุเคลื่อนที่ในทิศทางที่ทำมุมใด ๆ กับทิศของเส้นแรงแม่เหล็ก ($\theta \neq 0^\circ, 90^\circ$ หรือ 180°) จะทำให้ความเร็วถูกแตกออกเป็น 2 ส่วน คือความเร็วย่อยในแนวตั้งฉากกับเส้นแรงแม่เหล็กซึ่งจะทำให้ประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลม และความเร็วย่อยในแนวขนานกับเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งจะทำให้ประจุเคลื่อนที่ขนานกับเส้นแรงแม่เหล็ก (ดังรูปที่ 2.14 ก.) จากผลของทั้ง 2 ความเร็วย่อย จึงทำให้ประจุเคลื่อนที่เป็นเกลียว (ดังรูปที่ 2.14 ข.) ซึ่งรัศมีของเกลียว[15] สามารถหาได้จาก

$$R = \frac{mv \sin \theta}{qB} \quad (2.13)$$

เมื่อ R คือ รัศมีของเกลียว

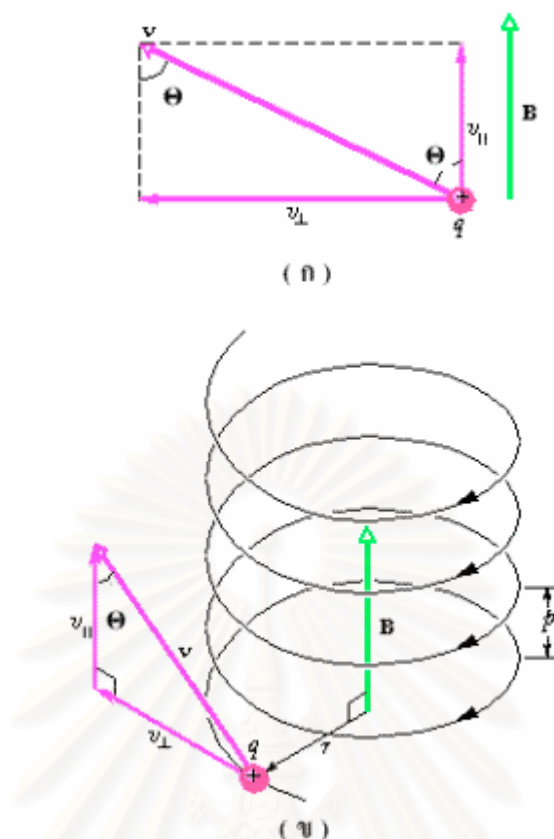
สำหรับการหาค่าระยะห่างระหว่างเกลียว[15] นั้น สามารถคำนวณได้จาก

$$P = (v \cos \theta)T \quad (2.14)$$

$$= \frac{(v \cos \theta)(2\pi m)}{qB} \quad (2.15)$$

เมื่อ P คือ ระยะห่างระหว่างเกลียว

T คือ คาบของการเคลื่อนที่เป็นวงกลม



รูปที่ 2.14 เมื่อประจุเคลื่อนที่ท่ามกลาง ๑ กับทิศของเส้นแรงแม่เหล็ก[15]

- (ก) แสดงการแตกความเร็วย่อยออกเป็น 2 ทิศทาง
- (ข) ทิศทางของความเร็วย่อยทั้งสองที่กระทำต่อสนามแม่เหล็ก ส่งผลให้ประจุมีการเคลื่อนที่แบบเกลียว

2.2.5 ลักษณะของรอยอนุภาค

การเกิดรอยของอนุภาคบนแผ่นวัสดุบันทึกรอยจะอยู่ในระดับแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับระดับพลังงานจลน์ของอนุภาค โดยอนุภาคที่มีพลังงานจลน์สูงกว่าจะมีอัตราการสูญเสียพลังงานให้กับตัวกลางน้อยกว่า และเมื่ออนุภาคมีพลังงานจลน์ลดลงก็จะมีอัตราการสูญเสียพลังงานเพิ่มขึ้น จากตารางที่ 2.6 พบว่าแผ่นวัสดุบันทึกรอยเซลลูโลสในเตรท จะเกิดรอยอนุภาคขึ้นได้ ต้องใช้อนุภาคมีประจุ คือ โปรตอนที่มีพลังงานตั้งแต่ 0.55 MeV ลงไป ซึ่งหมายความว่าถ้าเลือกใช้แผ่นเซลลูโลสในเตรทแล้ว จะสามารถบันทึกรอยของอนุภาคโปรตอนที่มีพลังงานจลน์ตั้งแต่ 0.55 MeV ลงไปได้ อย่างไรก็ตามในกรณีที่อนุภาคโปรตอนมีพลังงานสูงกว่า 0.55 MeV ขึ้นไป สามารถทำให้เกิดรอยบนแผ่นเซลลูโลสในเตรทได้เช่นกัน แต่เป็นช่วงที่อนุภาคโปรตอนสูญเสียพลังงานไปบางส่วนก่อน จนกระทั่งมีพลังงานเหลือ 0.55 MeV จึงจะเกิดรอยให้เห็นได้ ในกรณีเช่นนี้รอยที่เกิดขึ้นจะอยู่ลึกจากผิวของวัสดุบันทึกรอยลงไป ดังแสดงในรูปที่ 2.15

ตารางที่ 2.6 ความไวในการบันทึกรอยของแผ่นวัสดุบันทึกรอยบางชนิด[8]

A. Inorganic Detectors		
Detector	Atomic Composition	Least Ionizing Ion Seen
Hypersthene	$Mg_{1.5}Fe_{0.5}Si_2O_6$	100 MeV ^{56}Fe
Olivine	$MgFeSiO_4$	
Labradorite	$Na_2Ca_3Al_8Si_{12}O_{40}$	
Zircon	$ZrSiO_4$	
---	---	---
Bronzite	$Mg_{1.7}Fe_{0.3}Si_2O_6$	
Enstatite	$MgSiO_3$	
Diopside	$CaMg(SiO_3)_2$	170 MeV ^{56}Fe
Augite	$CaMg_3Fe_3Al_2Si_4O_{19}$	170 MeV ^{56}Fe
Oligoclase	$Na_4CaAl_6Si_{14}O_{40}$	4 MeV ^{28}Si
Bytownite	$NaCa_4Al_9Si_{11}O_{40}$	4 MeV ^{28}Si
Orthoclase	$KAlSi_3O_8$	100 MeV ^{40}Ar
Quartz	SiO_2	100 MeV ^{40}Ar
---	---	---
Phlogopite Mica	$KMg_2Al_2Si_3O_{10}(OH)_2$	
Muscovite Mica	$KAl_3Si_3O_{10}(OH)_2$	2 MeV ^{20}Ne
---	---	---
Silica Glass	SiO_2	16 MeV ^{40}Ar
Flint Glass	$18SiO_2:4PbO:1.5Na_2O:K_2O$	2-4 MeV ^{20}Ne
Tektite Glass (Obsidian similar)	$22SiO_2:2Al_2O_3:FeO$	
Soda Lime Glass	$23SiO_2:5Na_2O:5CaO:Al_2O_3$	20 MeV ^{20}Ne
Phosphate Glass	$10P_2O_5:1.68BaO:Ag_2O:2K_2O:2Al_2O_3$	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

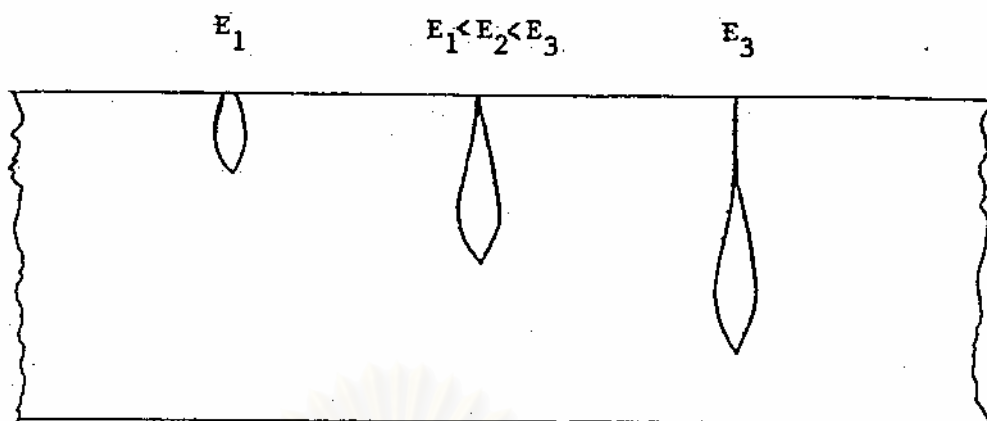
ตารางที่ 2.6 ความไวในการบันทึกรอยของแผ่นวัสดุบันทึกรอยบางชนิด (ต่อ)

B. Organic Detectors		
Detector	Atomic Composition	Least Ionizing Ion Seen
Amber	$C_2H_3O_2$	Full-energy fission fragments
Phenoplaste	C_7H_6O	
Polyethylene	CH_2	Fission fragments
Polystyrene	CH	
Polyvinylacetochloride	$C_6H_9O_2Cl$	42 MeV ^{32}S
Polyvinylchloride Polyvinylidene chloride copolymer	$C_2H_3Cl + C_2H_2Cl_2$	42 MeV ^{32}S
Polyethylene Terephthalate (Cronar, Melinex)	$C_5H_4O_2$	
Polyimide	$C_{11}H_4O_4N_2$	36 MeV ^{16}O
Ionomeric Polyethylene (Surlin)		36 MeV ^{16}O
Bisphenol A-polycarbonate (Lexan, Makrofol)	$C_{16}H_{14}O_3$	0.3 MeV 4He
Polyoxymethylene (Delrin)	CH_2O	28 MeV ^{11}B
Polypropylene	CH_2	1 MeV 4He
Polyvinylchloride	C_2H_3Cl	
Polymethylmethacralate (Plexiglas)	$C_5H_8O_2$	3 MeV 4He
Cellulose Acetate Butyrate	$C_{12}H_{18}O_7$	
Cellulose Triacetate (Cellit, Triafol-T, Kodacel TA-401 unplasticized)	$C_3H_4O_2$	
Cellulose Nitrate (Daicell)	$C_6H_8O_9N_2$	0.55 MeV 1H

Notes: Solid lines represent relatively clear separations; broken lines represent unclear but likely separations.

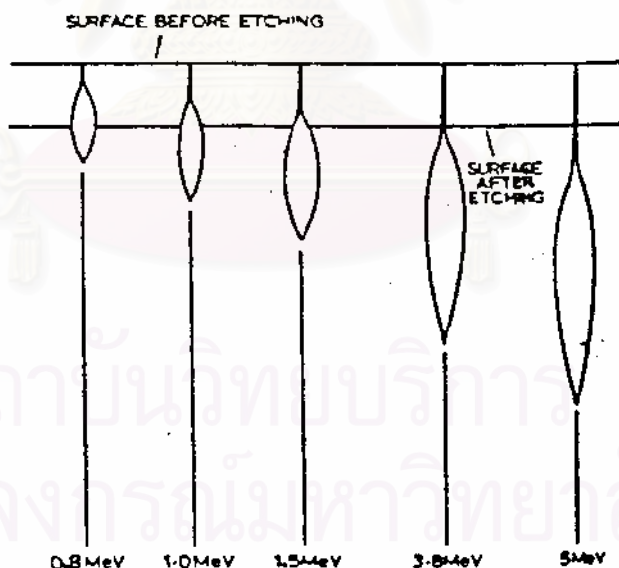
Many materials have different sensitivities depending on their exposure to oxygen, ultra-violet light, ..., and on the etchant used.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการเกิดรอยของอนุภาคในวัสดุ เมื่ออนุภาคมีพลังงานจลน์ต่างกัน[17]

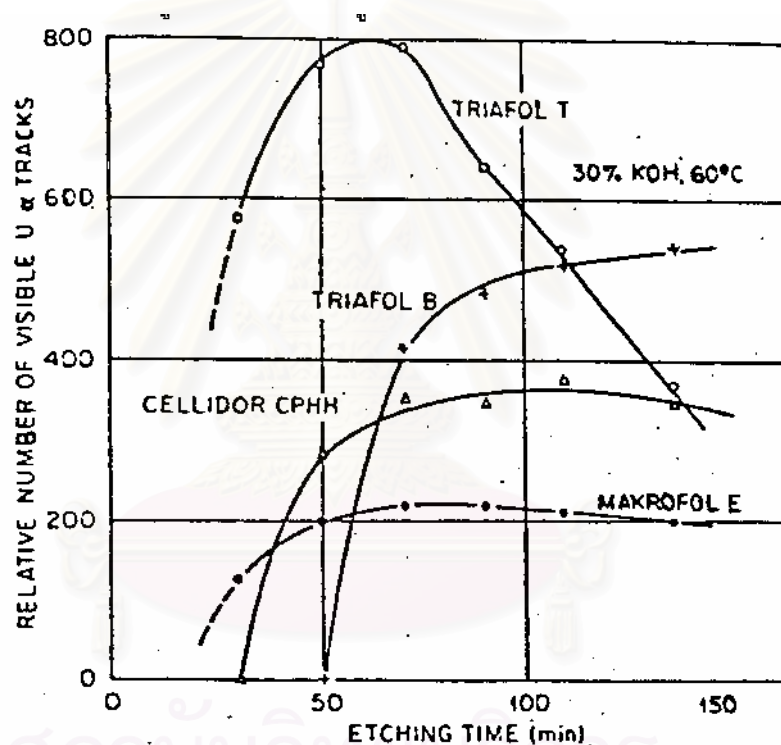
เมื่อนำแผ่นวัสดุบันทึกรอย ไปกัดรอยในสารละลายที่เหมาะสมจะได้รอยอนุภาคปรากฏขึ้น โดยรอยอนุภาคที่ผิวของแผ่นวัสดุบันทึกรอยจะปรากฏให้เห็นก่อน ส่วนที่อยู่ลึกลงไปจะยังไม่ปรากฏให้เห็น เมื่อใช้เวลากัดรอยมากขึ้นรอยอนุภาคที่ผิวหน้าฟิล์มที่มีขนาดเล็กบางรอยจะถูกกัดจนลบเลือนหายไป แต่รอยอนุภาคที่อยู่ลึกลงไปจะปรากฏให้เห็นมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ซึ่งเป็นการกัดรอยของอนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นบนฟิล์มเซลลูโลสอะซิเตท



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงการกัดรอยฟิล์มเซลลูโลสอะซิเตท CA80 ที่เกิดจากอนุภาคแอลฟาพลังงานต่างๆกัน โดยใช้ 2.5 N NaOH เป็นเวลา 20 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 18 °C [17]

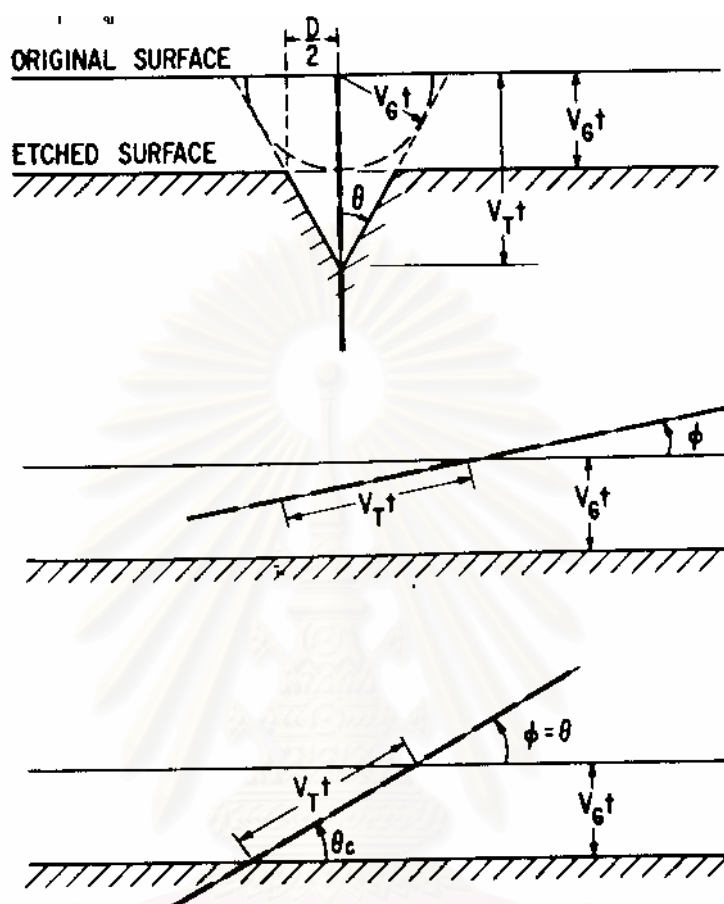
2.2.6 การกัดกร่อน (Etching)

ในการผลิตแผ่นฟิล์มโพลีเมอร์ เพื่อใช้ในกระบวนการกรอนั้น จำเป็นที่จะต้องพิจารณาถึงชนิดของฟิล์มโพลีเมอร์ ให้เหมาะสมกับพลังงานของอนุภาคมีประจุ ที่จะใช้ในการยิง (Bombard) เนื่องจากโพลีเมอร์แต่ละชนิดมีความไวต่อพลังงานของอนุภาคไม่เท่ากัน หากเลือกไม่เหมาะสมอาจเกิดรอยเพียงผิวตื้น ๆ ของฟิล์ม แทนที่จะทะลุฟิล์ม ซึ่งไม่สามารถใช้กรองได้ สำหรับการเลือกสารเคมี ความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลา ที่จะใช้ในการกัดกร่อนให้เหมาะสมกับชนิดของฟิล์มโพลีเมอร์ที่ใช้ทำแผ่นกรองก็มีความสำคัญมากเช่นกัน เนื่องจากฟิล์มแต่ละชนิดมีความเหมาะสมกับสารเคมี อุณหภูมิ และเวลาในการกัดกร่อนต่างกัน ซึ่งปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม (ดังรูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของจำนวนรอยสัมพันธ์ของอนุภาคแอลฟานบนแผ่นวัสดุบันทึกชนิดต่าง ๆ กับเวลาในการกัดกร่อน โดยใช้สารละลาย KOH 30% ที่อุณหภูมิ 60°C [17]

นอกจากนี้ การจะปรากฏรอยบนแผ่นฟิล์มหรือไม่ยังขึ้นอยู่กับมุมที่อนุภาคมีประจุกระทำกับวัสดุตัวกลางนั้น ๆ (ดังรูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 แสดงรอยอนุภาคที่จะปรากฏหลังการกัดรอย เมื่อมีประจุวิ่งผ่านแผ่นฟิล์มในมุมต่าง ๆ [8]

- (ก) รูปของรอยจะปรากฏเมื่อ $V_T > V_G$
- (ข) รูปของรอยจะหายไปเมื่อ $V_T \sin \phi < V_G$
- (ค) รูปของรอยจะเริ่มหายไปเมื่อ $V_T \sin \phi = V_G$

จากรูปที่ 2.18 (ก) แสดงรอยที่เกิดจากอนุภาคมีประจุเคลื่อนที่ดังฉากกับวัสดุตัวกลาง เมื่อกัดรอยไม่นานนักจะได้รับความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางและความยาวของรอยดังสมการ[8]

$$L = (V_T - V_G)t \quad (2.16)$$

$$D = 2V_G t \sqrt{\{(V_T - V_G)(V_T + V_G)\}} \quad (2.17)$$

- เมื่อ L คือ ความยาวมองเห็นได้
- D คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอย
- t คือ เวลาที่ใช้ในการกัดรอย

V_T คือ ความเร็วของการกัศรอยตามแนวอนุภาคมีประจุ

V_G คือ ความเร็วของการกัศรอยตามบริเวณทั่วไป มีค่าคงที่

โดยค่า $V_G < V_T$ และ V_T / V_G มีค่าคงที่ตลอดเวลาในการกัศรอย และ ค่า $1/D$ จะหายไปเมื่อ $V_T = V_G$

รูปที่ 2.18 (ข) แสดงรอยที่เกิดจากอนุภาคมีประจุวิ่งทำมุม ϕ กับวัสดุตัวกลาง และมีค่าของ $V_T t \sin \phi$ น้อยกว่า $V_G t$ รอยของอนุภาคมีประจุในกรณีนี้จะหายไป เมื่อผ่านการกัศรอยเป็นเวลา t

รูปที่ 2.18 (ค) แสดงถึงค่า $V_T t \sin \phi = V_G t$ ซึ่งเป็นจุดที่รอยเริ่มหายไป



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

วัสดุ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- 3.1.1 ฟิล์ม LR-115 Type 2 ผลิตโดยบริษัท Kodak Pathe ประเทศฝรั่งเศส
- 3.1.2 ดันกำเนิดนิวตรอน ^{252}Cf ความแรงรังสี 10.7 มิลลิวรี ผลิตโดยบริษัท AEA Technology
- 3.1.3 ดันกำเนิดแอลฟา ^{241}Am ความแรงรังสี 40 kBq
- 3.1.4 ท่อบังกับลำนิวตรอน (Neutron collimator)
- 3.1.5 ฉากเปลี่ยนนิวตรอน (Neutron converter screen) ชนิด BE-10 ผลิตโดยบริษัท Kodak Pathe ประเทศฝรั่งเศส
- 3.1.6 กระจกบอทวง ขนาด 100 มิลลิลิตร
- 3.1.7 ปีกเกอร์ ขนาด 50, 100 และ 500 มิลลิลิตร
- 3.1.8 เทอร์โมมิเตอร์
- 3.1.9 แม่เหล็กความเข้มสูง

3.2 สารเคมี

- 3.2.1 โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) AR Grade ผลิตโดยบริษัท MERCK จำกัด
- 3.2.2 น้ำกลั่น

3.3 เครื่องมือ

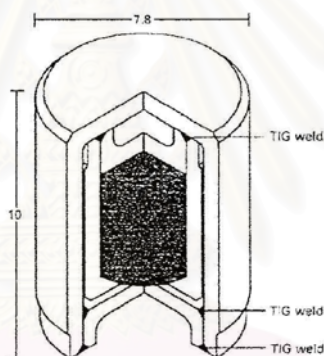
- 3.3.1 หัววัดรังสีนิวตรอนแบบฉาบโบรอน (Boron lined detector)
- 3.3.2 เครื่องนับ Eberline รุ่น Mini Scaler MS-2 ผลิตโดยบริษัท Eberline Instrument Corporation
- 3.3.3 Water bath
- 3.3.4 กล้องจุลทรรศน์ชนิดสองตาของ Olympus รุ่น BH-2
- 3.3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope)
- 3.3.6 โปรแกรม Image J สำหรับการคำนวณขนาด และความหนาแน่นของรอยอนุภาค
- 3.3.7 เครื่องสูบลมสุญญากาศ
- 3.3.8 เกาส์มิเตอร์

สำหรับการดำเนินการวิจัยเพื่อผลิตแผ่นกรองฟิล์มบางด้วยเทคนิคแทรก-เอตซ์ โดยใช้ต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปปรังสีนั้น ได้แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

- การผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน
- การผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา

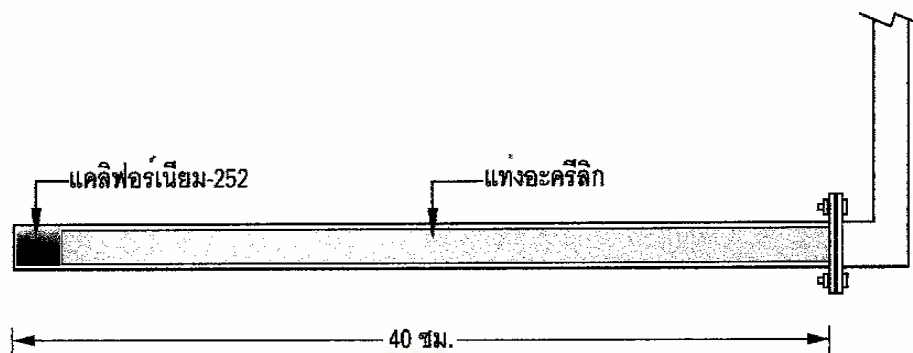
3.4 การผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน

สำหรับแคลิฟอร์เนียม-252 (Californium-252, ^{252}Cf) ที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้มีขนาด 20 ไมโครกรัม หรือ 10.7 มิลลิคูรี ณ เดือนกุมภาพันธ์ ปี พ.ศ. 2545 มีอัตราการปลดปล่อยนิวตรอน 4.58×10^7 นิวตรอนต่อวินาที มีค่าครึ่งชีวิต 2.65 ปี จัดเป็นต้นกำเนิดนิวตรอนประเภทแตกตัวเอง (Self fission) ซึ่งในการแตกตัวแต่ละครั้งจะมีการปลดปล่อยนิวตรอนออกมาโดยเฉลี่ย 3.76 ตัว โดยมีพลังงานเฉลี่ยของนิวตรอนประมาณ 2 MeV ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 นี้จะถูกบรรจุอยู่ในภาชนะปิดรูปทรงกระบอก สูง 10 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.8 มิลลิเมตร (ดังรูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 ภาพตัดขวางของต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 ที่ใช้ในงานวิจัย[16]

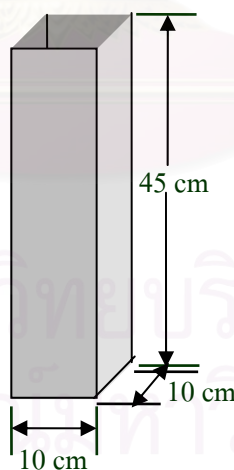
ต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียมที่ได้รับการบรรจุอยู่ในภาชนะปิด จะถูกนำมาบรรจุอยู่ในท่ออะลูมิเนียมที่ได้ออกแบบและสร้างขึ้นให้มีลักษณะเป็นรูปตัวแอล (L) เพื่อให้ต้นกำเนิดนิวตรอนสามารถเข้าชิดปลายนิวตรอนคอลลิเมเตอร์ได้มากที่สุด ซึ่งท่ออะลูมิเนียมที่ใช้มีขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.8 เซนติเมตร หนา 0.2 เซนติเมตร ยาว 40 เซนติเมตร มีแผ่นอะลูมิเนียมรูปวงกลมปิดปากท่อ เพื่อกันน้ำเข้าสู่ภายใน ภายในของท่ออะลูมิเนียมจะมีแท่งอะคริลิกเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร ยาว 39 เซนติเมตร ดันต้นกำเนิดนิวตรอนไว้ให้อยู่ที่ตำแหน่งเดิม และลดช่องว่างภายในท่ออะลูมิเนียม (ดังแสดงในรูปที่ 3.2) ท่ออะลูมิเนียมที่บรรจุต้นกำเนิดนิวตรอนแคลิฟอร์เนียม-252 นี้จะถูกจุ่มอยู่ในถังพลาสติกโพลีเอทิลีนที่ซ้อนกัน 2 ถัง เพื่อความปลอดภัยในกรณีที่เกิดรั่ว โดยถังใบนอกจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 125 เซนติเมตร สูง 122 เซนติเมตร ปริมาตร 1,500 ลิตร ส่วนถังใบในจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 เซนติเมตร สูง 105 เซนติเมตร ปริมาตร 1,000 ลิตร ซึ่งถังใบในนี้จะบรรจุน้ำเพื่อทำหน้าที่เป็นสารหน่วงนิวตรอนและกำบังรังสี



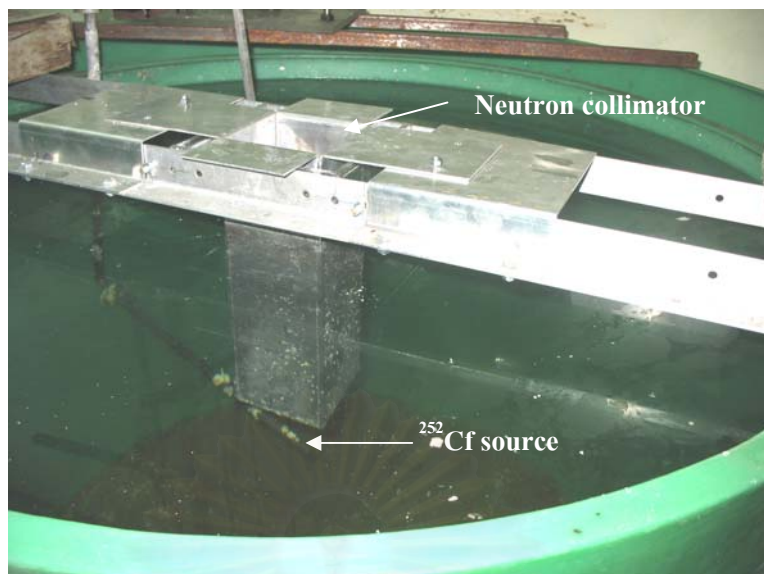
รูปที่ 3.2 แผนภาพแสดงระบบบรรจุของต้นกำเนิดนิวตรอนแคดมิฟอร์เนียม-252[16]

3.4.1 การออกแบบและสร้างท่อบังคับลำนิวตรอน (Design and production of neutron collimator)

ท่อบังคับลำนิวตรอน (Neutron collimator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการบังคับลำนิวตรอนจากระบบห่วงพลังงานของนิวตรอน (Neutron moderation system) ออกมาใช้งาน โดยลักษณะของท่อบังคับลำนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้จะมีลักษณะเป็น คอลลิเมเตอร์แบบขนาน (Parallel collimator) สร้างจากแผ่นอะลูมิเนียมหนา 2 มิลลิเมตร มาทำการตัดให้เป็นท่อสี่เหลี่ยมขนาด กว้าง 10 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 45 เซนติเมตร (ดังรูปที่ 3.3) ปากท่อทั้งสองด้านจะถูกตัดให้บานออกเพื่อใช้ยึดกับแท่นวาง ก่อนนำไปจุ่มในถังเพื่อบังคับลำนิวตรอนมาใช้งาน (ดังรูปที่ 3.4)



รูปที่ 3.3 ท่อบังคับลำนิวตรอน



รูปที่ 3.4 ลักษณะการจัดวางท่อบังกับลำนิวตรอนจากระบบห่วงนิวตรอนมาใช้งาน

3.4.2 การหาค่า Relative flux และอัตราส่วนแคดเมียมของท่อบังกับลำนิวตรอน

เนื่องจากจากเปลี่ยนนิวตรอนที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้ เลือกใช้จากเปลี่ยนนิวตรอนชนิด BE-10 ซึ่งมีค่าโอกาสในการเกิดอันตรกิริยา (Cross section) กับเทอร์มัลนิวตรอนสูง จึงจำเป็นต้องทำการห่วงพลังงานของนิวตรอนลงมา เพื่อหาตำแหน่งที่เหมาะสมที่จะให้ฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนสูงสุดสำหรับการนำไปใช้งาน ซึ่งสามารถทำได้โดยการวัดค่าความเข้มฟลักซ์ของเทอร์มัลนิวตรอนเทียบกับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังกับลำนิวตรอน โดยขั้นตอนการหาค่า Relative flux และอัตราส่วนแคดเมียม (Cadmium ratio) สามารถทำได้ดังนี้

(1) จัดระบบการวัดนิวตรอนช้า โดยใช้หัววัดนิวตรอนชนิดฉาบโบรอน (Boron lined detector) ซึ่งเป็นหัววัดที่ใช้ โบรอน-10 (^{10}B) ฉาบที่ผนังด้านในของหัววัดหนาประมาณ 0 - 3 mg/cm^2 อันตรกิริยาที่เกิดขึ้น คือ $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ อนุภาคแอลฟาที่เกิดขึ้นจะทำให้ก๊าซที่บรรจุในหัววัดเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เกิดเป็นพัลส์เข้าสู่เครื่องนับรังสี Eberline (ดังรูปที่ 3.5) ซึ่งสัญญาณไฟฟ้าดังกล่าวจะถูกส่งไปขยายยังภาคขยายหลัก (Amplifier) จากนั้นสัญญาณที่ผ่านการขยายแล้วจะถูกส่งต่อไปยังเครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดี่ยว แล้วเข้าสู่เครื่องนับโดยมีวงจรตั้งเวลาเป็นตัวกำหนดเวลาในการนับ

(2) ทำการวัดค่า Relative flux ที่ตำแหน่งปากท่อ โดยเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอน กับท่อบังกับลำนิวตรอน ตั้งแต่ 0 - 30 เซนติเมตร ทำการวัดตำแหน่งละ 3 ครั้ง ครั้งละ 30 วินาที

(3) นำแผ่นแคดเมียม หนา 0.5 มิลลิเมตร มาปิดหัววัดไว้ สำหรับใช้ในการหาค่าอัตราส่วนแคดเมียม โดยจะทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอน กับท่อบังกับลำนิวตรอน ตั้งแต่ 0 – 30 เซนติเมตร แล้วทำการวัดเหมือนข้อ (2)

(4) สร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative flux กับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนของท่อบังกับลำนิวตรอน

(5) คำนวณค่าอัตราส่วนแคดเมียม และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนแคดเมียมที่คำนวณได้ กับระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนของท่อบังกับลำนิวตรอน

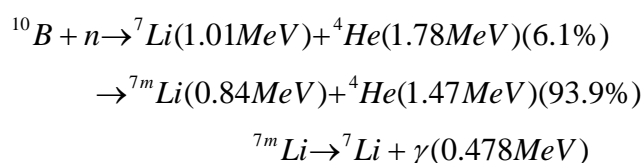


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์นับรังสี Eberline และหัววัดชนิด Boron line detector

3.4.3 ขั้นตอนการอบนิวตรอนและการสร้างรอยอนุภาค (Neutron exposure and track formation)

3.4.3.1 ขั้นตอนการอบนิวตรอน

หลังจากหาค่าตำแหน่งที่เหมาะสม สำหรับการอบฟิล์มด้วยเทอร์มัลนิวตรอนแล้ว ในขั้นตอนของการสร้างรอยอนุภาคให้เกิดบนแผ่นฟิล์ม LR-115 (ดังรูปที่ 3.6) จะนำแผ่นฟิล์มด้านที่เคลือบด้วยเซลล์โลสไนเตรท หรือที่เรียกว่า Active layer side ไปประกบกับฉากเปลี่ยนนิวตรอน BE-10 ซึ่งมี ^{10}B เสริมสมรรถนะร้อยละ 93 (ดังรูปที่ 3.7) โดยใช้อันตรกิริยาจาก $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ ในการทำให้เกิดรอยบนแผ่นฟิล์มดังนี้





รูปที่ 3.6 ลักษณะของฟิล์ม LR-115 Type 2 ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.7 ลักษณะของ BE-10 converter screen

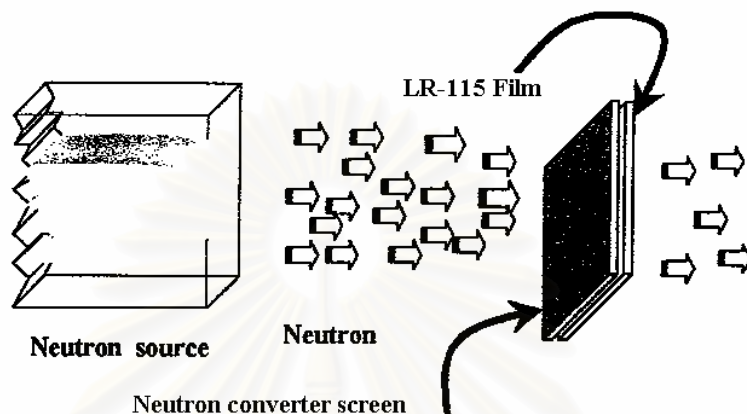
จากอันตรกิริยาดังกล่าว เทอร์มัลนิวตรอนจะเคลื่อนที่เข้าทำปฏิกิริยา (n, α) กับฉากเปลี่ยนนิวตรอน ซึ่ง Recoil products ที่เกิดขึ้นภายหลังปฏิกิริยา คือ อนุภาคแอลฟา พลังงาน 1.47 MeV และ รีคอยล์นิวเคลียสของลิเทียม-7 (Recoil ${}^7\text{Li}$ nucleus) พลังงาน 0.84 MeV จะเคลื่อนที่เข้าชนแผ่นฟิล์ม (ดังรูปที่ 3.8 และ 3.9) ทำให้เกิดรอยแฉ่งขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ก่อนทำการกัดขยายรอยฟิล์ม เพื่อสร้างแผ่นกรองต่อไป

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการทดสอบโดย

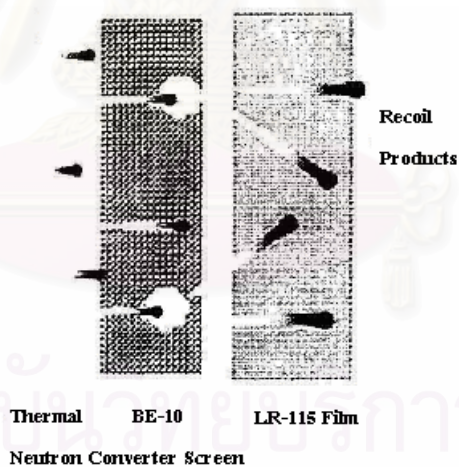
(1) ตัดฟิล์ม LR-115 ให้มีขนาด 8 ซม. \times 8 ซม. ซึ่งเป็นขนาดที่เล็กกว่าพื้นที่หน้าตัดของปากท่อบังคับลำนิวตรอนเล็กน้อย

(2) นำแผ่นฟิล์มประกบติดกับฉากเปลี่ยนนิวตรอน จากนั้นจะประกบทับทั้งสองด้านด้วยกระดาษแข็งเพื่อให้ฟิล์มแนบชิดกับฉากเปลี่ยนนิวตรอนให้มากที่สุด

(3) นำฟิล์มไปอบนิวตรอนที่ตำแหน่งปากท่อบังค้ำลำนิวตรอน โดยให้ระยะห่างระหว่างท่อบังค้ำลำนิวตรอนกับต้นกำเนิดนิวตรอน 9 เซนติเมตร ทำการอบฟิล์มเป็นเวลา 5 ชั่วโมง



รูปที่ 3.8 การจัดอุปกรณ์สำหรับการอบเทอร์มัลนิวตรอน



รูปที่ 3.9 แสดงลักษณะการเคลื่อนที่เข้าชนแผ่นฟิล์มของ Recoil products จากปฏิกิริยา (n, α) ระหว่าง Thermal neutron กับ BE-10 converter screen ทำให้เกิดรอยแผลงบนแผ่นฟิล์ม LR-115

3.4.3.2 ขั้นตอนการกัดขยายรอย

จากการที่อนุภาคแอลฟา และรีคอยล์นิวเคลียสของลิเทียมเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในเนื้อฟิล์มทำให้เกิดการไอออไนซ์ขึ้น ส่งผลให้สายโซ่โพลีเมอร์ตลอดแนวทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ผ่าน ถูกทำลาย รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า “รอยแฝง” ที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม เมื่อนำฟิล์มไปล้างกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (ดังรูปที่ 3.10) เมื่อวัสดุตรงส่วนที่เกิดรอยแฝงจะมีอัตราการละลายเร็วกว่าบริเวณอื่น ส่งผลให้รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีขนาดใหญ่จนสามารถสังเกตเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์

ซึ่งงานวิจัยในครั้งนี้จะทำการทดสอบโดย

- (1) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10% (2.5 N) ซึ่งสามารถเตรียมได้โดยการชั่งสารโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10 กรัม ผสมกับน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร
- (2) สารละลายที่เตรียมได้จะนำไปอุ่นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิใน Water bath ซึ่ง จะทำการทดสอบโดยกำหนดอุณหภูมิคงที่ ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
- (3) ตัดแบ่งฟิล์มที่ผ่านการอบนิวตรอนให้เล็กลง ขนาดประมาณ 2 ซม. × 2 ซม. ลอกเอาฟิล์มเซลลูโลสในเตรท ออกจากฟิล์ม โพลีเอสเตอร์ที่เป็นฐาน ก่อนนำไปกัดขยาย รอยในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นเวลา 10 นาที
- (4) ทำซ้ำดังข้อ (3) แต่เพิ่มเวลาในการกัดขยายรอยเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 นาที ตามลำดับ
- (5) เปรียบเทียบลักษณะและเส้นผ่านศูนย์กลางรอยอนุภาค ที่เกิดขึ้นบน แผ่นฟิล์ม เมื่อใช้เวลาในการกัดขยายรอย ตั้งแต่ 10 – 60 นาที



รูปที่ 3.10 การกัดรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ใน Water bath

3.5 การผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา

สำหรับอะเมริเซียม-241 (Americium-241, ^{241}Am) ที่ใช้ในงานวิจัยในครั้งนี้มีความแรงรังสี 40 kBq มีค่าครึ่งชีวิตประมาณ 458 ปี ให้พลังงานของอนุภาคแอลฟา 5.545 MeV มีพิสัยของการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาในอากาศประมาณ 1.5 นิ้ว (ดังรูปที่ 3.11)



รูปที่ 3.11 อะเมริเซียม-241 ที่ใช้ในการทดลอง

3.5.1 การนำแม่เหล็กมาใช้ในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา

เนื่องจากอะเมริเซียม-241 ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีลักษณะเป็น Disc source ทำให้อนุภาคแอลฟาจะพุ่งออกจากต้นกำเนิดรังสีดังกล่าวในลักษณะครึ่งทรงกลม ส่งผลให้รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นมีลักษณะเป็นกระจุกอยู่ตรงกลางและจะค่อย ๆ เบนออกโดยรอบ ซึ่งนอกจากจะทำให้ขนาดรอยอนุภาคบนแผ่นกรองที่ผลิตได้ไม่สม่ำเสมอแล้ว ยังส่งผลถึงประสิทธิภาพในการกรองอีกด้วย จึงได้มีการทดลองนำแม่เหล็กขนาด 1.64 กิโลเกาส์ มาช่วยในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาค (ดังรูปที่ 3.12)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

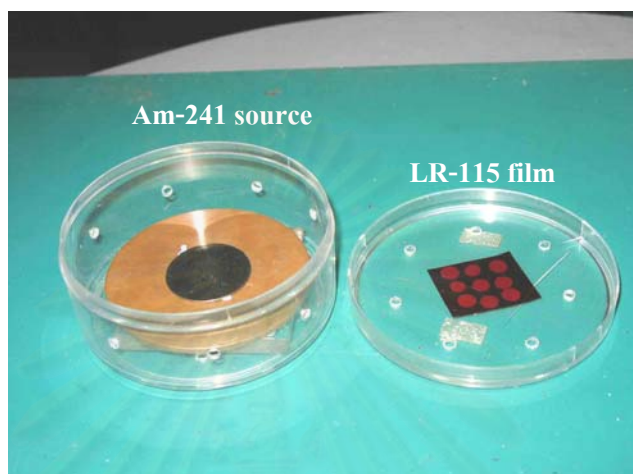


รูปที่ 3.12 การวัดค่าความเข้มสนามแม่เหล็กบริเวณตำแหน่งที่ทำการติดตั้งฟิล์มด้วย Gauss meter

การหาค่าพิสัยของอนุภาคแอลฟาในฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท ที่มีความหนา 12 ไมโครเมตร นั้น จากการคำนวณพบว่าอนุภาคแอลฟาที่ใช้ต้องมีพลังงานมากกว่า 3.561 MeV จึงจะสามารถเคลื่อนที่ทะลุฟิล์มได้ (ภาคผนวก ก) ซึ่งหมายความว่าระยะห่างที่มากที่สุดระหว่างต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟากับฟิล์ม LR-115 ในการที่จะทำให้อนุภาคแอลฟามีพลังงานมากพอที่จะเคลื่อนที่ทะลุผ่านฟิล์มได้ จะไม่เกินระยะ 1 เซนติเมตร ในอากาศ ซึ่งถือว่าเป็นระยะที่สั้นเกินกว่าที่จะแสดงให้เห็นถึงความแตกต่างจากผลของสนามแม่เหล็ก ในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาได้ ดังนั้นจึงทำการทดลองในแชมเบอร์สุญญากาศ (Vacuum chamber) โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (Vacuum pump) ที่ระดับแรงดัน 10^{-2} torr (ดังรูปที่ 3.13, 3.14 และ 3.15) ซึ่งมีขั้นตอนการทดลองดังนี้ คือ

- (1) ตัดฟิล์ม LR-115 ให้มีขนาด 2 ซม. × 2 ซม. เท่า ๆ กัน
- (2) ทำการอบฟิล์ม LR-115 ด้วยอนุภาคแอลฟา โดยกำหนดให้ระยะห่างระหว่างอะเมอริเซียม-241 กับฟิล์ม LR-115 ที่ระยะ 1 เซนติเมตร เวลาในการอบฟิล์ม 30 นาที โดยทำการทดลองใน Vacuum chamber
- (3) ทำการล้างก๊าดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการก๊าดรอย 30 นาที โดยทำการลอกฟิล์มออกจากฐานโพลีเอสเตอร์ก่อนทำการก๊าดรอย
- (4) ทำการติดแม่เหล็กเพิ่มทั้งทางด้านบน ซึ่งเป็นด้านเดียวกับที่ติดฟิล์ม โดยหันขั้ว S เข้าหาฟิล์ม และด้านล่างซึ่งเป็นด้านเดียวกับที่วางอะเมอริเซียม-241 โดยหันขั้ว N เข้าหาต้นกำเนิดรังสี ที่อยู่ภายในคลับไส้ฟิล์ม แล้วทำซ้ำตามข้อ (1), (2) และ (3)

- (5) เพิ่มระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดแอลฟา กับฟิล์ม LR-115 เป็น 2, 3 และ 4 เซนติเมตร ตามลำดับ พร้อมทั้งทำซ้ำตามข้อ (1), (2), (3) และ (4)
- (6) เปรียบเทียบลักษณะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม



รูปที่ 3.13 การติดตั้งฟิล์ม และต้นกำเนิดรังสีในถ้ำใส่ฟิล์ม



รูปที่ 3.14 การอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาใน Vacuum chamber



รูปที่ 3.15 Vacuum pump

3.5.2 ปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มที่มีผลต่อความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

เวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม จะเป็นเกณฑ์ที่ใช้กำหนดความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการกรอง เนื่องจากหากจำนวนรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมีจำนวนน้อย จะทำให้แผ่นฟิล์มมีรูพรุนน้อย เวลาที่ใช้ในการกรองย่อมนานขึ้น แต่ในทางตรงกันข้าม หากรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมีจำนวนมากเกินไป โอกาสที่จะเกิดรอยซ้อนกันนั้นก็มีมาก ทำให้รอยเฉลี่ยมีขนาดใหญ่กว่าปกติ อีกทั้งการที่ฟิล์มมีความพรุนมากเกินไปจะทำให้ความทนทานต่อแรงดันและสารเคมีของฟิล์มมีค่าลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองไม่ดีเช่นกัน ซึ่งในการทดลองเพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มกับความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มสามารถทำได้โดย

- (1) ตัดฟิล์ม LR-115 ให้มีขนาด 2 ซม. × 2 ซม. เท่า ๆ กัน
- (2) ตัดฟิล์มในตลับยึดฟิล์ม โดยให้ระยะห่างระหว่างฟิล์มกับต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา 2 เซนติเมตร (ซึ่งพบว่าเป็นระยะที่ดีที่สุดจากผลการทดลองที่ 3.5.1)
- (3) ประกอบตลับใส่ฟิล์มทั้งสองด้านด้วยแท่งแม่เหล็ก และนำไปใส่ใน Vacuum chamber เพื่อทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาเป็นเวลา 30 นาที
- (4) นำฟิล์มที่ได้ ไปทำการกัดยาวยรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- (5) ทำการทดลองซ้ำตามข้อ (1), (2), (3) และ (4) โดยเพิ่มเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาเป็น 60, 90 และ 120 นาที ตามลำดับ
- (6) ทำการเปรียบเทียบจำนวนรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม กับความหนาแน่นรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

3.5.3 ปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยที่มีผลต่อการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์

จากผลการทดลองที่ผ่านมา เมื่อทำการเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา กับฟิล์มใน Vacuum chamber พบว่ารอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนฟิล์มที่มีการใช้สนามแม่เหล็กในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา จะมีการเบี่ยงเบนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคน้อยกว่าฟิล์มที่ไม่ได้ใช้สนามแม่เหล็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสนามแม่เหล็กมีผลต่อทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา และเลือกใช้ที่ระยะ 2 เซนติเมตร เป็นระยะห่างระหว่างอะเมอริเซียม-241 ซึ่งเป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา กับฟิล์ม LR-115 เพื่อเป็นการศึกษาปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีผลต่อลักษณะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มสามารถทำการทดลองได้โดย

- (1) ทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาจากอะเมอริเซียม-241 โดยให้ระยะห่างระหว่างฟิล์มกับต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาที่ระยะ 2 เซนติเมตร ทำการอบฟิล์มเป็นเวลา 30 นาที ภายใน Vacuum chamber โดยประกบแท่งแม่เหล็กทั้งด้านบนและด้านล่างของตลับใส่ฟิล์ม
- (2) กัดขยายรอยอนุภาคด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 10 ชั่วโมง โดยทำการลอกฟิล์มออกจากฐานโพลีเอสเตอร์ก่อนทำการล้างกัดขยายรอย
- (3) ทำซ้ำตามข้อ (1) และ (2) โดยเพิ่มเวลาในการกัดขยายรอยเป็น 15, 20, 25 และ 30 ชั่วโมงตามลำดับ
- (4) เปรียบเทียบลักษณะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

3.5.4 ปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอยที่มีผลต่อการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีผลต่อลักษณะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาค ในการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ สามารถทำได้โดย

- (1) ทำการอบฟิล์ม LR-115 ด้วยอะเมอริเซียม-241 ที่ระยะห่างระหว่างฟิล์มกับต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา 2 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที ภายใน Vacuum chamber โดยจะประกบแท่งแม่เหล็กทั้งด้านบนและด้านล่างของตลับใส่ฟิล์ม
- (2) ฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยอนุภาคแอลฟาแล้ว จะถูกนำมาล้างกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดขยายรอย 10 นาที
- (3) ทำซ้ำตามข้อ (1) และ (2) โดยเพิ่มเวลาในการกัดขยายรอยเป็น 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 และ 130 ตามลำดับ

- (4) ทำซ้ำตามข้อ (1) จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิในการกัดขยายรอยเป็น 50, 60 และ 70 องศาเซลเซียส
- (5) เปรียบเทียบลักษณะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

3.5.5 ปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์

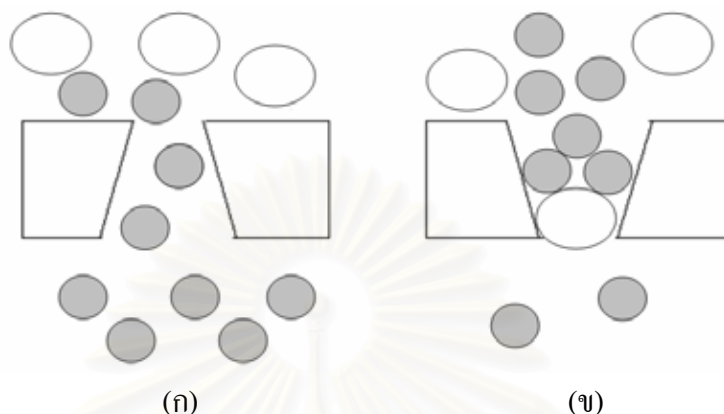
สำหรับการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกัดขยายรอย ที่มีผลต่อลักษณะและเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคในการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ สามารถทำได้โดย

- (1) ทำการอบฟิล์ม LR-115 ด้วยอะเมอริเซียม-241 ระยะห่างระหว่างฟิล์มกับต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา 2 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที ภายใน Vacuum chamber โดยประกบแท่งแม่เหล็กทั้งด้านบนและด้านล่างของดรัมใส่ฟิล์ม
- (2) นำฟิล์มที่ผ่านการอบด้วยอนุภาคแอลฟาแล้ว มาทำการล้างกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- (3) ทำซ้ำตามข้อ (1) และ (2) โดยเพิ่มเวลาในการกัดรอยเป็น 20, 30, 40, 50 และ 60 นาทีตามลำดับ
- (4) ทำซ้ำตามข้อ (1), (2) และ (3) โดยเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็น 15% (4.375 N) และ 20% (6.25 N) ตามลำดับ
- (5) เปรียบเทียบลักษณะ และเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม

3.5.6 เทคนิคการกัดรอยในการควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาค

เนื่องจากอนุภาคแอลฟาเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในแผ่นฟิล์ม จะมีค่าการแตกตัวจำเพาะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และมีค่ามากที่สุดเมื่ออนุภาคเกือบหยุดนิ่งในแผ่นฟิล์ม ดังนั้นรอยแฝงที่เกิดขึ้นในฟิล์มเซลลูโลสไนเตรท จะมีรอยที่มีขนาดใหญ่อยู่ลึกลงไปเนื้อฟิล์ม จากการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการลอกฟิล์มออกจากฐานโพลิเอสเตอร์ก่อนนำไปกัดรอย จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยทางด้านหลังฟิล์มมีขนาดใหญ่กว่าทางด้านหน้าฟิล์มมาก

การที่ขนาดรอยอนุภาคทั้งสองด้านมีความแตกต่างกันมาก ส่งผลโดยตรงต่อการนำฟิล์มไปใช้กรอง เนื่องจากการนำฟิล์มด้านที่มีรอยอนุภาคขนาดใหญ่ไปใช้กรองโอกาสที่จะเกิดการอุดตันมีสูงทำให้ประสิทธิภาพการกรองไม่ดี (ดังรูปที่ 3.16 ก. และ ข.)



รูปที่ 3.16 การจัดวางฟิล์มที่มีขนาดรอยอนุภาคทั้งสองด้านไม่เท่ากันในกระบวนการกรองแบบ Cross flow

- (ก) การจัดวางฟิล์มด้านที่มีขนาดรอยอนุภาคเล็กกว่าเป็นด้านที่ใช้กรอง สามารถใช้กรองอนุภาคขนาดตามต้องการได้
- (ข) การจัดวางฟิล์มด้านที่มีขนาดรอยอนุภาคใหญ่กว่าเป็นด้านที่ใช้กรอง โอกาสเกิดการอุดตันของอนุภาคมีสูง ทำให้ประสิทธิภาพในการกรองลดลง

จากปัจจัยดังกล่าว จะเห็นว่าหากต้องการหลีกเลี่ยงการอุดตันของอนุภาค จะต้องทำการจัดวางฟิล์ม โดยนำด้านหน้าซึ่งเป็นด้านที่มีขนาดรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเล็กกว่าเป็นด้านที่ใช้กรองเสมอเพื่อหลีกเลี่ยงการอุดตันของอนุภาค

เพื่อป้องกันความยุ่งยากในการจัดวางฟิล์ม จึงได้ทำการทดลองหาเทคนิคในการกัดรอยที่เหมาะสมในการสร้างแผ่นกรอง ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งสองด้านใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งสามารถทำการทดลองได้โดย

(1) ทำการอบฟิล์มด้วยอะเมอริเซียม-241 ระยะห่างระหว่างฟิล์มกับต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา 2 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที ภายใน Vacuum chamber โดยประกบแท่งแม่เหล็กทั้งสองด้านของตลับใส่ฟิล์ม

(2) ทำการกัดรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดรอย 40 นาที โดยไม่ลอกฟิล์มออกจากฐานโพลิเอสเตอร์

(3) ทำซ้ำตามข้อ (1) และ (2) จากนั้นทำการกัดรอยฟิล์มเป็นเวลา 10 นาที ก่อนลอกฟิล์มออกจากฐานโพสิเอสเทอร์ และทำการกัดรอยต่อไปอีก 30 นาที รวมเวลาในการกัด รอยทั้งหมด 40 นาที

(4) ทำซ้ำตามข้อ (1), (2) และ (3) โดยเพิ่มสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการ กัดรอยฟิล์มทางด้านหน้าก่อนลอกฟิล์มออกจากฐานโพสิเอสเทอร์ ต่อเวลาที่เหลือที่ใช้ในการกัดรอย ฟิล์มทางด้านหลังภายหลังจากการลอกฟิล์มออกจากฐาน เพื่อให้เวลาในการกัดรอยรวมทั้งหมด 40 นาที เป็นสัดส่วน 15 : 25, 20 : 20, 25 : 15 และ 30 : 10 นาที ตามลำดับ

(5) เปรียบเทียบลักษณะ และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งสองด้านของฟิล์ม

ในการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้น นั้น จะใช้กล้องจุลทรรศน์ชนิดส่องตาในการดูลักษณะของรอย (ดังรูปที่ 3.17) ก่อนการใช้กล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) ในการวัดขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางที่แน่นอนของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม (ดังรูปที่ 3.18) เนื่องจากเทคนิคการกระเจิงของ อิเล็กตรอนทำให้สามารถพิจารณาลักษณะของรอยบนพื้นผิวฟิล์มในแต่ละด้านได้ อีกทั้งยังสามารถ เพิ่มกำลังขยายได้หลายพันเท่า ทำให้สามารถมองเห็นรอยอนุภาคที่มีขนาดเล็กเกินกว่าขีดจำกัดของ กล้องจุลทรรศน์ทั่วไปได้



รูปที่ 3.17 ลักษณะของ Optical microscope ที่ใช้ในงานวิจัย



รูปที่ 3.18 ลักษณะของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ใช้ในงานวิจัย



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การทดลองผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ แคลิฟอร์เนียม-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน

4.1.1 ผลการวัด Relative flux

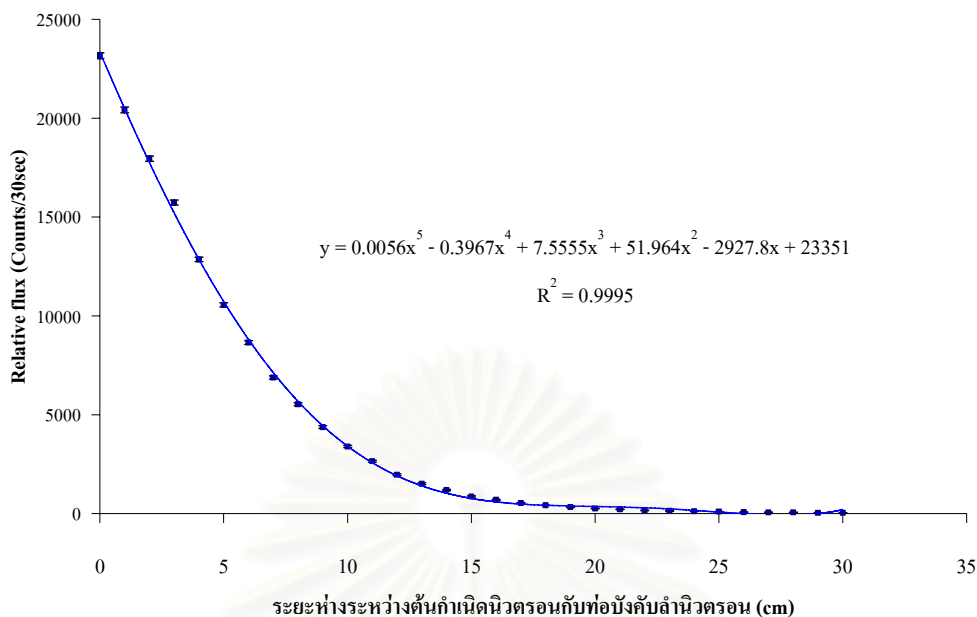
ค่า Relative flux เป็นค่าที่แสดงถึงจำนวนนิวตรอนที่นับได้เทียบกับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนในสารหน่วงนิวตรอน ซึ่งเป็นค่าเฉพาะตัวสำหรับต้นกำเนิดนิวตรอน ท่อบังคับลำนิวตรอน และสารหน่วงนิวตรอนแต่ละชนิด สำหรับการทดลองวัดค่า Relative flux ของท่อบังคับลำนิวตรอนเปรียบเทียบกับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังคับลำนิวตรอน ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.1 และสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative flux กับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังคับลำนิวตรอน ได้ดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่า Relative flux ของท่อบังคับลำนิวตรอน

ระยะห่างระหว่าง ต้นกำเนิดนิวตรอน กับท่อบังคับ ลำนิวตรอน (cm)	Relative flux(Counts / 30 sec)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
0	23,016	23,270	23,185	23,157.00 ± 152.17
1	20,559	20,365	20,330	20,418.00 ± 142.89
2	18,094	17,950	17,821	17,955.00 ± 153.99
3	15,836	15,741	15,623	15,733.33 ± 125.43
4	12,874	12,853	12,845	12,857.33 ± 113.39
5	10,588	10,531	10,565	10,561.33 ± 102.77
6	8,550	8,703	8,720	8,657.67 ± 93.05
7	6,992	6,883	6,766	6,880.33 ± 82.95
8	5,465	5,592	5,523	5,526.67 ± 74.34
9	4,351	4,331	4,450	4,377.33 ± 66.16
10	3,436	3,370	3,377	3,394.33 ± 58.26
11	2,630	2,666	2,665	2,653.67 ± 51.51
12	1,974	1,950	1,977	1,967.00 ± 44.35

ตารางที่ 4.1 ผลการทดลองหาค่า Relative flux ของท่อบังค้ำลำนิวตรอน (ต่อ)

ระยะห่างระหว่าง ต้นกำเนิดนิวตรอน กับท่อบังค้ำ ลำนิวตรอน (cm)	Relative flux(Counts / 30 sec)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
13	1,512	1,472	1,550	1,511.33 ± 38.88
14	1,257	1,155	1,159	1,190.33 ± 34.50
15	891	861	850	867.33 ± 29.45
16	722	676	698	698.67 ± 26.43
17	524	528	545	532.33 ± 23.07
18	409	414	445	422.67 ± 20.56
19	347	311	339	332.33 ± 18.23
20	285	244	254	261.00 ± 16.16
21	203	220	234	219.00 ± 14.80
22	158	161	168	162.33 ± 12.74
23	145	137	125	135.67 ± 11.64
24	119	114	123	118.67 ± 10.89
25	99	107	89	98.33 ± 9.92
26	70	76	85	77.00 ± 8.78
27	64	63	71	66.00 ± 8.12
28	59	59	62	60.00 ± 7.75
29	43	37	43	41.00 ± 6.40
30	40	42	35	39.00 ± 6.24



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างค่า Relative flux กับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอน

เมื่อพิจารณาผลการทดลองดังรูปที่ 4.1 พบว่าค่า Relative flux จะแปรผกผันกับตำแหน่งของต้นกำเนิดนิวตรอน คือ เมื่อระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอนเพิ่มขึ้น ค่า Relative flux จะมีค่าลดลง

4.1.2 ผลการหาอัตราส่วนแคดเมียม

อัตราส่วนแคดเมียมเป็นค่าที่บอกถึงความเข้มของเทอร์มัลนิวตรอนฟลักซ์ โดยเทียบกับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอน ซึ่งอัตราส่วนแคดเมียมสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{อัตราส่วนแคดเมียม} = \frac{\text{จำนวนนิวตรอนที่นับได้เมื่อไม่มีแผ่นแคดเมียมปิด}}{\text{จำนวนนิวตรอนที่นับได้เมื่อมีแผ่นแคดเมียมหนา 0.5 มิลลิเมตรปิด}}$$

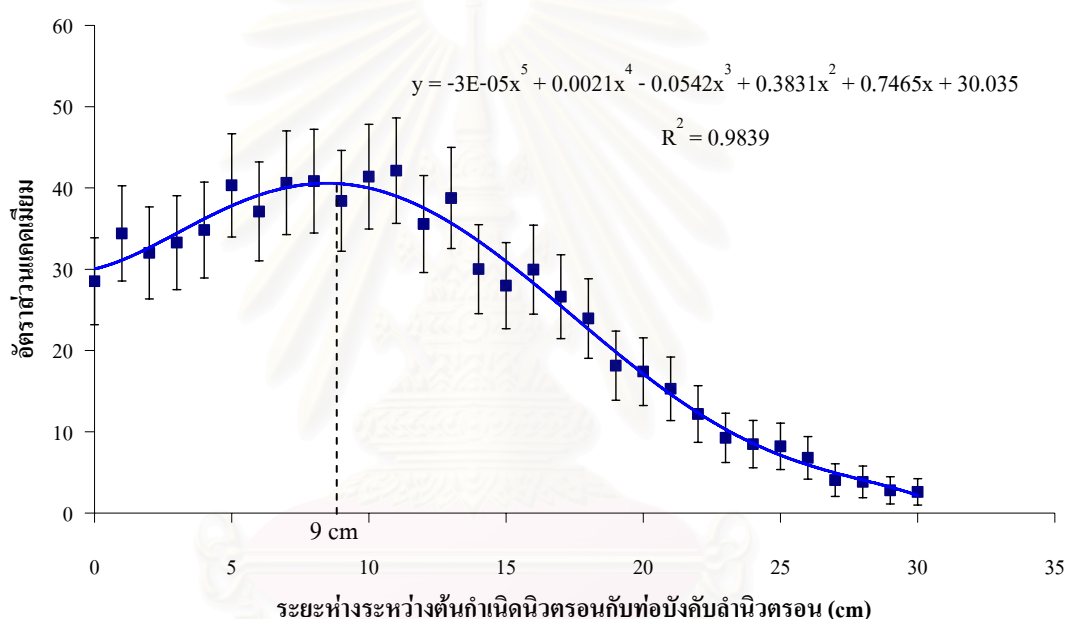
ซึ่งผลการหาอัตราส่วนแคดเมียม เทียบกับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอนแสดงดังตารางที่ 4.2 และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแคดเมียมกับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอนได้ดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนแคดเมียมของท่อบังกับลำนิวตรอน

ระยะห่างระหว่างต้น ก้านนิวตรอนกับท่อ บังกับลำนิวตรอน (cm)	ค่าเฉลี่ยของ Relative flux ในแต่ละตำแหน่ง (Counts/30sec)	ค่าเฉลี่ยของ Neutron flux (Counts/30sec) เมื่อหุ้มด้วยแคดเมียม	อัตราส่วนแคดเมียม (Cadmium ratio)
0	23,157.00 ± 152.17	812.00 ± 28.50	28.52 ± 5.34
1	20,418.00 ± 142.89	593.67 ± 24.37	34.39 ± 5.86
2	17,955.00 ± 153.99	561.00 ± 23.69	32.00 ± 5.66
3	15,733.33 ± 125.43	473.00 ± 21.35	33.26 ± 5.77
4	12,857.33 ± 113.39	369.33 ± 19.22	34.81 ± 5.90
5	10,561.33 ± 102.77	262.00 ± 16.87	40.31 ± 6.35
6	8,657.67 ± 93.05	233.33 ± 15.28	37.10 ± 6.09
7	6,880.33 ± 82.95	169.33 ± 13.01	40.63 ± 6.37
8	5,526.67 ± 74.34	135.33 ± 11.63	40.84 ± 6.39
9	4,377.33 ± 66.16	114.00 ± 10.68	38.40 ± 6.20
10	3,394.33 ± 58.26	82.00 ± 9.06	41.39 ± 6.43
11	2,653.67 ± 51.51	63.00 ± 7.94	42.12 ± 6.49
12	1,967.00 ± 44.35	55.33 ± 7.44	35.55 ± 5.96
13	1,511.33 ± 38.88	39.00 ± 6.25	38.75 ± 6.23
14	1,190.33 ± 34.50	39.67 ± 6.30	30.01 ± 5.48
15	867.33 ± 29.45	31.00 ± 5.57	27.98 ± 5.29
16	698.67 ± 26.43	23.33 ± 4.83	29.94 ± 5.47
17	532.33 ± 23.07	20.00 ± 4.47	26.62 ± 5.16
18	422.67 ± 20.56	17.67 ± 4.20	23.92 ± 4.89
19	332.33 ± 18.23	18.33 ± 4.28	18.13 ± 4.26
20	261.00 ± 16.16	15.00 ± 3.87	17.40 ± 4.17
21	219.00 ± 14.80	14.33 ± 3.79	15.28 ± 3.91
22	162.33 ± 12.74	13.33 ± 3.65	12.18 ± 3.49
23	135.67 ± 11.64	14.67 ± 3.83	9.25 ± 3.04
24	118.67 ± 10.89	14.00 ± 3.74	8.48 ± 2.91
25	98.33 ± 9.92	12.00 ± 3.46	8.19 ± 2.86
26	77.00 ± 8.78	11.33 ± 3.36	6.79 ± 2.61

ตารางที่ 4.2 ผลการทดลองหาค่าอัตราส่วนแคดเมียมของท่อบังค้ำลำนิวตรอน (ต่อ)

ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอน (cm)	ค่าเฉลี่ยของ Relative flux ในแต่ละตำแหน่ง (Counts/30sec)	ค่าเฉลี่ยของ Neutron flux (Counts/30sec) เมื่อหุ้มด้วยแคดเมียม	อัตราส่วนแคดเมียม (Cadmium ratio)
27	66.00 ± 8.12	16.33 ± 4.04	4.04 ± 2.01
28	60.00 ± 7.75	15.67 ± 3.96	3.83 ± 1.86
29	41.00 ± 6.40	14.67 ± 3.83	2.80 ± 1.67
30	39.00 ± 6.24	15.00 ± 3.87	2.60 ± 1.61



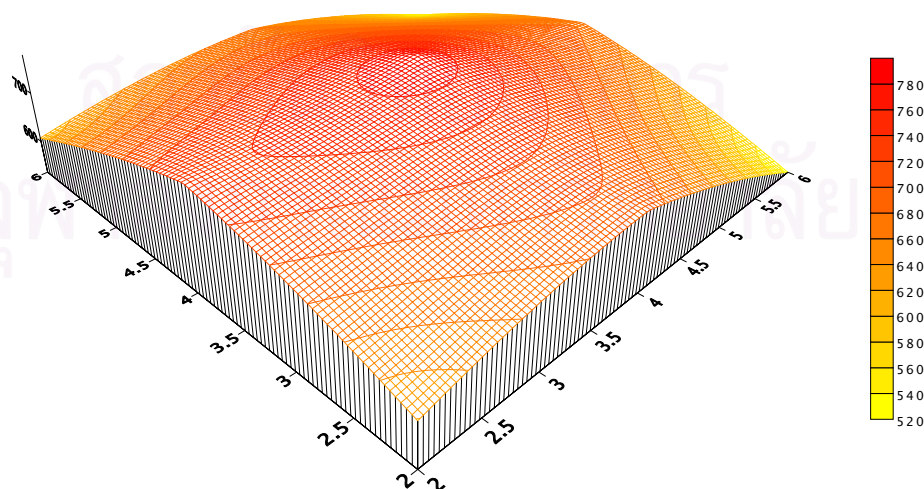
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราส่วนแคดเมียมกับระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอน

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอน พบว่าค่าอัตราส่วนแคดเมียมจะมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆหนึ่งแล้วจะมีค่าลดลง เนื่องจากเมื่อเลื่อนระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดนิวตรอนกับท่อบังค้ำลำนิวตรอนมากขึ้น จะทำให้ความหนาของสารหน่วงนิวตรอน (ซึ่งในที่นี้คือน้ำ) มีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้นิวตรอนเร็วจากต้นกำเนิดนิวตรอนถูกลดทอนพลังงานลงเป็นเทอร์มัลนิวตรอนเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงความหนาของสารหน่วงนิวตรอนค่าหนึ่ง หลังจากนั้นเมื่อเลื่อนระยะห่างออกไปอีกค่าอัตราส่วนแคดเมียมจะเริ่มลดลง เนื่องจากเทอร์มัลนิวตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกสารหน่วงนิวตรอนลดทอนพลังงานลงจนไม่เพียงพอที่จะผ่านความหนาของสารหน่วงนิวตรอนนั้นเข้าสู่ท่อบังค้ำลำนิวตรอนได้

พบว่าตำแหน่งที่มีค่าอัตราส่วนแคดเมียมสูงสุดจากผลการทดลอง คือระยะที่ต่อบังคับลำนิวตรอนอยู่ห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นระยะทาง 9 เซนติเมตร ซึ่งเมื่อทำการวัดค่าความเข้มของนิวตรอนฟลักซ์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ ของปากท่อ ที่ระยะดังกล่าว เพื่อหาลักษณะการกระจายตัวของนิวตรอน พบว่าค่าความเข้มของนิวตรอนฟลักซ์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณปากท่อสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4.3 และสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวตรอนที่นับได้ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณปากท่อ เพื่อพิจารณาถึงลักษณะการกระจายตัวของนิวตรอนบริเวณปากท่อ ได้ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนฟลักซ์ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บริเวณปากท่อบังคับลำนิวตรอน

ตำแหน่งที่ทำการวัด	ค่าเฉลี่ยของนิวตรอนฟลักซ์ (Counts/10 sec)
1-1	619 ± 24.88
1-2	690 ± 26.68
1-3	533 ± 23.09
2-1	739 ± 27.19
2-2	777 ± 27.88
2-3	678 ± 26.04
3-1	607 ± 24.64
3-2	664 ± 25.77
3-3	540 ± 23.24



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนิวตรอนที่นับได้ กับตำแหน่งของปากท่อที่ทำการตรวจวัด

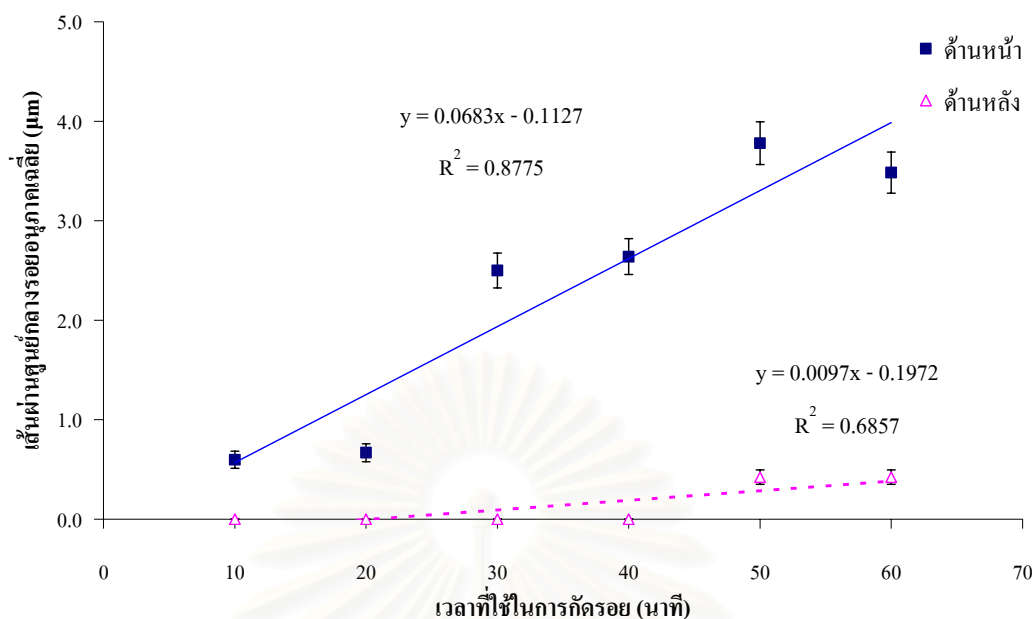
ดังนั้นในขั้นตอนของการอบฟิล์มด้วยนิวตรอน จึงควรทำการวางฟิล์มบนปากท่อบังกัมมันตภาพรังสี โดยให้ระยะห่างระหว่างปลายท่อบังกัมมันตภาพรังสีกับนิวตรอนอยู่ห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอนเป็นระยะ 9 เซนติเมตร และทำการอบฟิล์มด้วยนิวตรอนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง

4.1.3 ผลจากการอบนิวตรอนและลักษณะของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้น

แผ่นกรองที่ผลิตโดยใช้เทคนิคการผ่านอนุภาคมีประจุจากปฏิกิริยา (n,α) ระหว่างโบรอน-10 กับเทอร์มัลนิวตรอนนั้น หลังจากผ่านการกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิที่ใช้ในการกัดขยายรอย 60 องศาเซลเซียสแล้ว เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ทั้งด้านหน้า และด้านหลัง โดยเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอยตั้งแต่ 10 – 60 นาที จะได้ผลดังตารางที่ 4.4 ซึ่งสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาค กับเวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอยเปรียบเทียบทั้งทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นฟิล์มได้ดังรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งทางด้านหน้า - หลัง ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน

ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการกัด ขยาย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	60	10	0.598 \pm 0.137	รอยไม่ทะลุ
		20	0.668 \pm 0.090	รอยไม่ทะลุ
		30	2.450 \pm 0.175	รอยไม่ทะลุ
		40	2.638 \pm 0.180	รอยไม่ทะลุ
		50	3.780 \pm 0.215	0.423 \pm 0.071
		60	3.485 \pm 0.207	0.423 \pm 0.071



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการกัศรอย เปรียบเทียบทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นกรองชนิดเทรค-เอตซ์ เมื่อใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม จะแปรผันโดยตรงกับเวลาที่ใช้ในการกัศรอย โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจะกว้างขึ้นเมื่อใช้เวลาในการกัศรายนานขึ้น ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า ต้องใช้เวลาในการกัศรายนานถึง 50 นาที จึงจะเริ่มเกิดรอยที่สามารถทะลุถึงด้านหลังของแผ่นฟิล์มได้ เนื่องจากอนุภาคมีประจุ ทั้งแอลฟา และ ริกอยล์นิวเคลียสของลิเทียม-7 ที่ได้จากปฏิกิริยา (n,α) ระหว่างโบรอน-10 กับเทอร์มัลนิวตรอนจากแคลิฟอร์เนียม-252 นั้น มีค่าพิสัยในฟิล์มเซลลูโลสในเตรทน้อยกว่าค่าความหนาของฟิล์ม (ภาคผนวก ก) ดังนั้นเมื่อทำการกัศรอย ส่วนที่เป็นรอยแผลงของอนุภาค และผิวฟิล์มทั้งสองด้านจะถูกกัดหลุดลอกออกไป เกิดรอยอนุภาคในลักษณะที่เป็นรูปกรวยจากทางด้านหน้าของฟิล์มลึกลงไปในเนื้อฟิล์ม แต่ไม่ทะลุฟิล์ม

แต่เมื่อทำการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกัศรอย ผิวฟิล์มและรอยอนุภาคจะถูกกัดลอกออกมามากขึ้น ส่งผลให้รอยอนุภาคทางด้านหน้าของฟิล์มมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีรอยลึกลงไปในเนื้อฟิล์มมากขึ้น ในขณะที่ฟิล์มทั้งสองด้านถูกกัดหลุดลอกออกจนบางลง จนกระทั่งเริ่มเห็นรอยทะลุทางด้านหลังของฟิล์มเมื่อใช้เวลาในการกัศรายนานถึง 50 นาที

ผลจากการกัศรายนานถึง 50 นาที ทำให้ฟิล์มบางลงมาก จาก 12 ไมโครเมตร เหลือเพียง 3.8 ไมโครเมตร[5] ซึ่งไม่เหมาะที่จะนำไปใช้ในการทำแผ่นกรอง เนื่องจากฟิล์มบางเกินกว่าที่จะทนต่อการใช้งานในสภาวะการกรองจริง ที่มีการใช้สารเคมี และแรงดันในการกรองอนุภาค

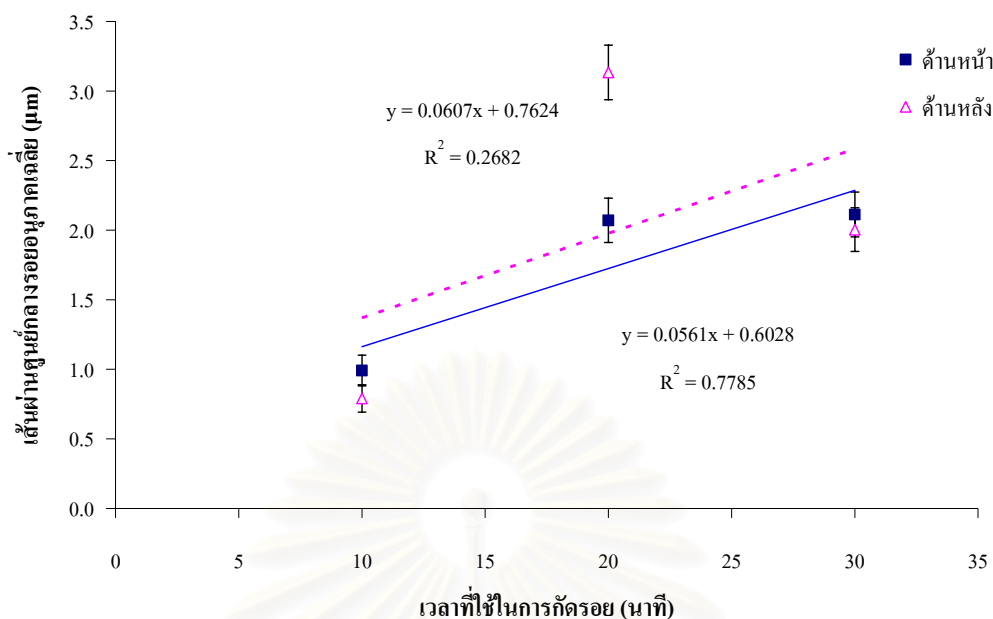
4.1.4 ผลจากการกัดผิวฟิล์มเพื่อลดความหนาของฟิล์ม ก่อนการอบนิวตรอน

จากการคำนวณค่าพิสัยของอนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 1.47 MeV จากปฏิกิริยา (n, α) ของโบรอน-10 (ภาคผนวก ก) พบว่าไม่สามารถทะลุผ่านความหนาของฟิล์มได้ และจากผลการทดลองในข้อที่ 4.1.3 เป็นสิ่งยืนยันได้ว่า การใช้เทคนิคทางการกัดรอยเพียงอย่างเดียว ไม่สามารถที่จะใช้ผลิตแผ่นกรองได้ หากอนุภาคมีประจุที่ใช้ทำอันตรกิริยามีพิสัยน้อยกว่าค่าความหนาของแผ่นฟิล์ม จึงได้ทำการทดลองกัดผิวฟิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อลดความหนาของแผ่นฟิล์ม ก่อนนำมาอบนิวตรอน โดยทำการกัดรอยฟิล์มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 75 นาที เพื่อลดความหนาของฟิล์ม จาก 12 ไมโครเมตร ให้เหลือเพียง 6.5 ไมโครเมตร (ภาคผนวก ข) เพื่อให้อนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 1.47 MeV สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านฟิล์มได้

ฟิล์มที่ผ่านการกัดผิวฟิล์มเพื่อลดความหนาแล้วจะนำไปอบนิวตรอนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นจะนำไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น และอุณหภูมิเดิมอีกครั้ง โดยทำการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม เมื่อใช้เวลาในการกัดรอยที่ 10, 20 และ 30 นาที ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 4.5 และสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดรอย กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มได้ดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทางด้านหน้า - หลัง ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน เมื่อทำการกัดผิวฟิล์มก่อนอบนิวตรอน

ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการ กัดรอย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	60	10	0.991 ± 0.110	0.791 ± 0.098
		20	2.070 ± 0.159	3.134 ± 0.192
		30	2.113 ± 0.161	2.004 ± 0.157



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคกับเวลาที่ใช้ในการกัตรอยเปรียบเทียบทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน เมื่อทำการกัตผิวฟิล์มก่อนอบนิวตรอน

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า การกัตผิวฟิล์มให้บางลง จาก 12 ไมโครเมตร ให้เหลือเพียง 6.5 ไมโครเมตร ส่งผลให้อนุภาคแอลฟา พลังงาน 1.47 MeV สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มได้ ภายหลังจากการกัตรอยจึงปรากฏรอยอนุภาคทะลุทางด้านหลังของแผ่นฟิล์ม ซึ่งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม จะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาที่ใช้ในการกัตรอยนานขึ้นสอดคล้องกันทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์ม

แต่เนื่องจากอนุภาคแอลฟา และรีคอยล์นิวเคลียสของลิเทียม-7 ที่เข้าชนแผ่นฟิล์มนั้น เป็น Recoil products ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา (n,α) ระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนกับโบรอน-10 อนุภาคทั้งสองจึงมีทิศทางการเคลื่อนที่ไม่แน่นอน จึงพุ่งเข้าชนแผ่นฟิล์มแบบสุ่ม (Random) ส่งผลให้การควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มทำได้ยาก ทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเฉลี่ยบนแผ่นฟิล์มมีช่วงกว้าง

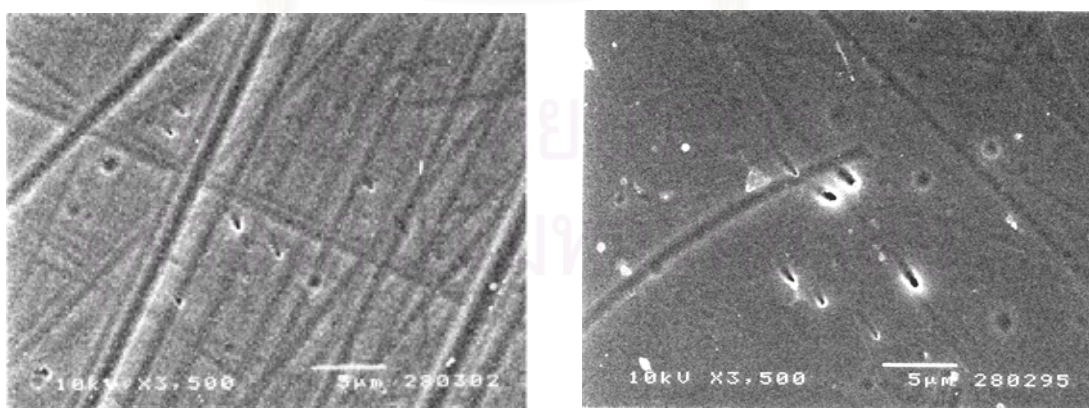
อีกทั้งการกัตผิวฟิล์มก่อนนำไปอบนิวตรอน ถึงแม้ว่าจะทำให้ฟิล์มของอนุภาคแอลฟาสามารถทะลุแผ่นฟิล์มได้ แต่ก็ทำให้ฟิล์มบางลง และยังบางลงทุกครั้งที่มีการเพิ่มเวลาในการกัตรอย ส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรงของฟิล์มเมื่อนำไปใช้งาน

4.2 การทดลองผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา

สำหรับการทดลองเพื่อศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟานั้น ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 4 หัวข้อหลัก คือ การศึกษาผลของความเข้มข้นแม่เหล็ก ที่ใช้ในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา ที่ระยะต่าง ๆ ซึ่งเมื่อได้ระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟากับฟิล์มที่ระยะเหมาะสมแล้ว จะทำการศึกษาถึงผลของเวลาในการกักรอยที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง และลักษณะของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มในแต่ละอุณหภูมิ รวมทั้งเปรียบเทียบระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกักรอย ท้ายสุดจะเป็นการศึกษาถึงเทคนิคในการกักรอย เพื่อให้ควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งด้านหน้าและด้านหลังฟิล์ม โดยผลการทดลองทั้งหมดจะนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาเงื่อนไขที่ดีที่สุดในการสร้างแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ เมื่อใช้อะเมริเซียม-241 เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา

4.2.1 ผลจากการนำแม่เหล็กมาใช้ในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา

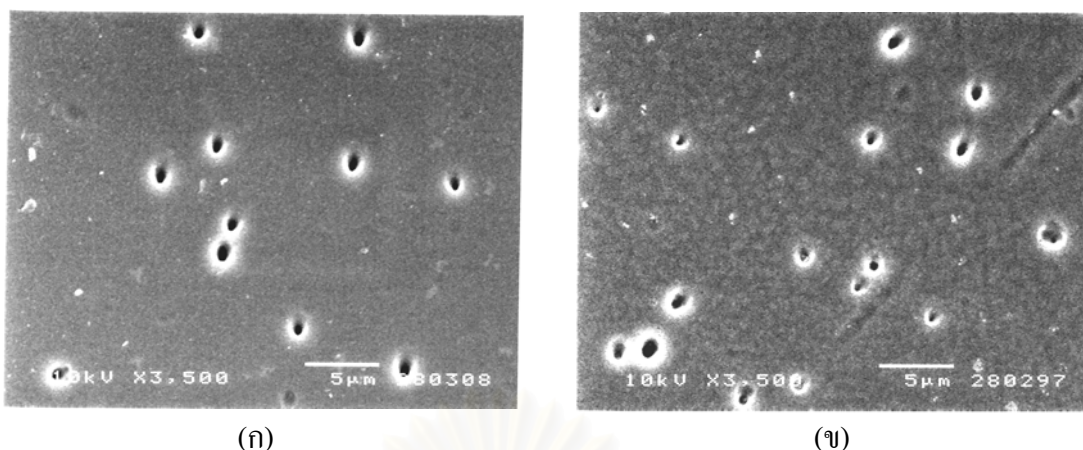
แม่เหล็กที่จะนำมาใช้ในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟานั้น มีขนาด กว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 3 เซนติเมตร หนา 0.5 เซนติเมตร มีความแรงสนามแม่เหล็ก ณ ตำแหน่งที่ทำการติดฟิล์ม ประมาณ 1.64 กิโลเกาส์ เมื่อระยะห่างระหว่างแท่งแม่เหล็ก 3 เซนติเมตร ซึ่งผลจากภาพถ่ายของฟิล์มจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างการใช้แม่เหล็กและไม่ใช้แม่เหล็ก ในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาที่ระยะต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 – 4.8 โดยทำการทดลองใน Vacuum chamber ที่ระดับความดัน 10^{-2} torr



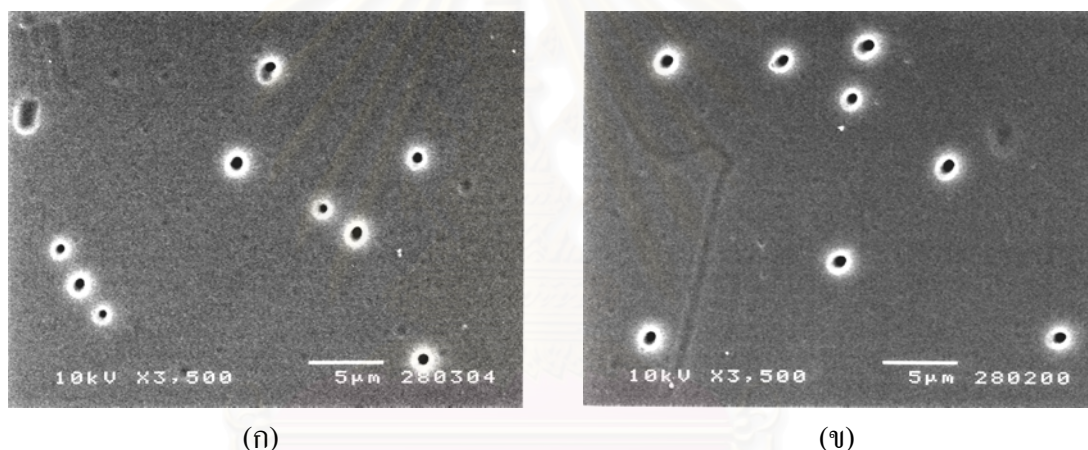
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายทางด้านหน้าของฟิล์มจาก SEM 3,500× : อาบ ^{241}Am 30 นาที ระยะ 1 cm ความเข้มข้น NaOH 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เมื่อไม่ใช้แม่เหล็ก (ก) และใช้แม่เหล็ก (ข)



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายทางด้านหน้าของฟิล์มจาก SEM 3,500× : อาบ ^{241}Am 30 นาที ระยะ 2 cm ความเข้มข้น NaOH 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เมื่อไม่ใช้แม่เหล็ก (ก) และใช้แม่เหล็ก (ข)

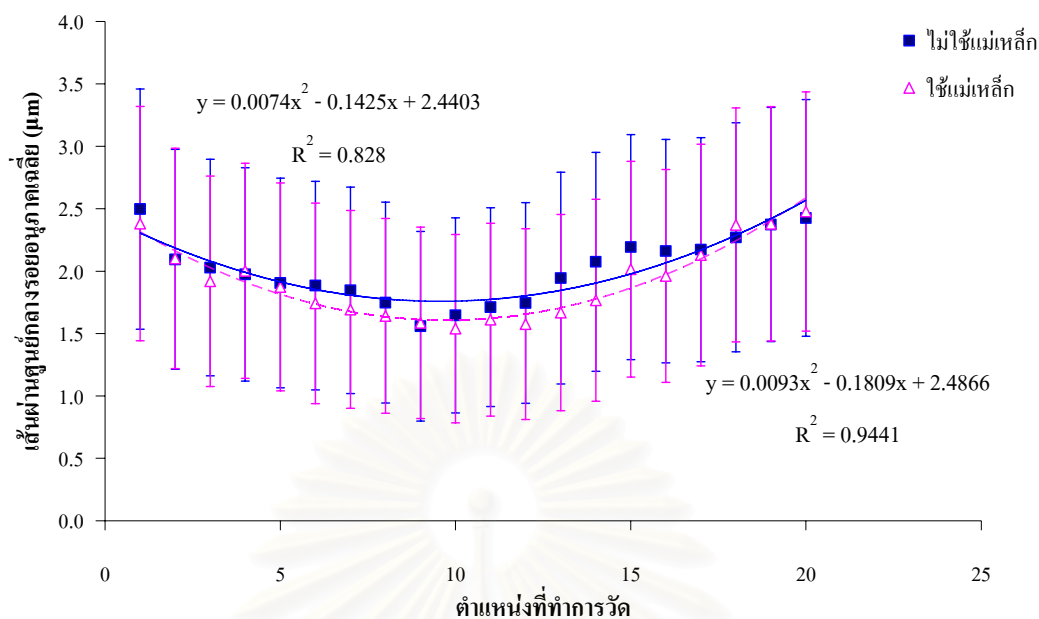


รูปที่ 4.8 ภาพถ่ายทางด้านหน้าของฟิล์มจาก SEM 3,500× : อาบ ^{241}Am 30 นาที ระยะ 3 cm ความเข้มข้น NaOH 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เมื่อไม่ใช้แม่เหล็ก (ก) และใช้แม่เหล็ก (ข)

เพื่อเป็นการยืนยันถึงผลของสนามแม่เหล็ก ที่มีต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา จึงได้ทำการทดลอง เพื่อเปรียบเทียบขนาดและลักษณะการกระจายตัวของรอยอนุภาคในแต่ละตำแหน่งบนแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในตารางที่ 4.6 และสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มกับระยะห่างจากขอบฟิล์ม เมื่อเริ่มทำการวัดบริเวณตรงกลางของขอบด้านซ้ายทางด้านหน้าของแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.9

ตารางที่ 4.6 เส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะการกระจายตัวของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้แม่เหล็กในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา

ตำแหน่งที่ทำ การวัด	ระยะห่างจากขอบด้านซ้าย ของฟิล์ม (μm)	เส้นผ่านศูนย์กลางรอยอนุภาคเฉลี่ย (μm)	
		ไม่ใช้แม่เหล็ก	ใช้แม่เหล็ก
1	0 – 115	2.497 \pm 0.961	2.380 \pm 0.934
2	1,150 – 1,265	2.094 \pm 0.881	2.102 \pm 0.882
3	2,415 – 2,530	2.029 \pm 0.867	1.919 \pm 0.843
4	3,680 – 3,795	1.974 \pm 0.855	2.003 \pm 0.861
5	4,945 – 5,060	1.904 \pm 0.840	1.873 \pm 0.853
6	6,210 – 6,325	1.885 \pm 0.827	1.741 \pm 0.803
7	7,475 – 7,590	1.846 \pm 0.804	1.693 \pm 0.792
8	8,740 – 8,855	1.748 \pm 0.760	1.642 \pm 0.779
9	10,005 – 10,120	1.558 \pm 0.781	1.586 \pm 0.766
10	11,270 – 11,385	1.656 \pm 0.760	1.539 \pm 0.754
11	12,535 – 12,650	1.711 \pm 0.796	1.611 \pm 0.772
12	13,800 – 13,915	1.745 \pm 0.804	1.575 \pm 0.764
13	15,065 – 15,180	1.943 \pm 0.849	1.667 \pm 0.786
14	16,330 – 16,445	2.074 \pm 0.876	1.766 \pm 0.808
15	17,595 – 17,710	2.192 \pm 0.901	2.016 \pm 0.864
16	18,860 – 18,975	2.161 \pm 0.895	1.962 \pm 0.852
17	20,125 – 20,240	2.172 \pm 0.897	2.128 \pm 0.888
18	21,390 – 21,505	2.270 \pm 0.917	2.370 \pm 0.937
19	22,655 – 22,770	2.374 \pm 0.938	2.379 \pm 0.939
20	23,920 – 24,035	2.426 \pm 0.948	2.477 \pm 0.958

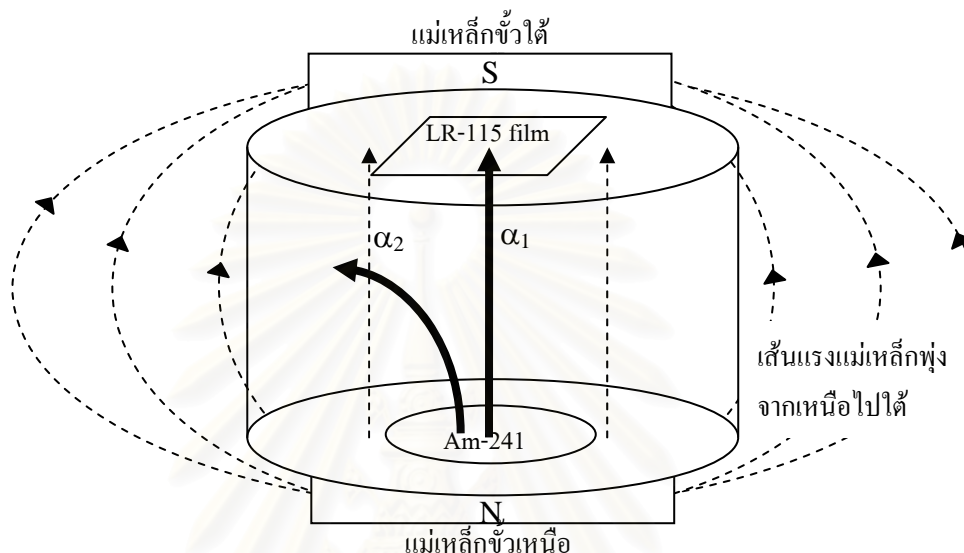


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม กับระยะห่างจากขอบทางด้านซ้ายของฟิล์ม เปรียบเทียบระหว่างการใช้และไม่ใช้แม่เหล็กในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา

จากผลการทดลอง พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างจากขอบทางด้านซ้ายของฟิล์มมากขึ้น จนถึงบริเวณตรงกลางของแผ่นฟิล์ม เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจะมีค่าน้อยที่สุด จากนั้นเมื่อเลื่อนระยะห่างจากขอบฟิล์มออกไปอีก จะทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อเลื่อนระยะห่างจนถึงขอบทางด้านขวาของแผ่นฟิล์ม เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคจะเพิ่มขึ้น ใกล้เคียงกับขอบทางด้านซ้ายของฟิล์ม ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ทั้งฟิล์มที่ไม่ใช้แม่เหล็กและฟิล์มที่มีการใช้แม่เหล็กในการควบคุมทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา แต่พบว่าค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาค ในแต่ละตำแหน่งบนแผ่นฟิล์มที่ไม่ใช้แม่เหล็กจะมีการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงกว้าง แตกต่างกับรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มที่มีการใช้แม่เหล็กที่มีการกระจายของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงแคบกว่า

เหตุที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจากการนำแม่เหล็กมาใช้ในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา จะทำให้อ่อนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีลักษณะตรงขึ้น เนื่องจากผลของสนามแม่เหล็ก ส่งผลทำให้อ่อนุภาคแอลฟาที่มีทิศทางเคลื่อนที่ที่ทามุมใด ๆ กับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กถูกแรงจากสนามแม่เหล็กกระทำ ทำให้อ่อนุภาคแอลฟาเบี่ยงเบนออกจากแนวการเคลื่อนที่เดิม บางส่วนถูกเหวี่ยงออกพ้นแนวขอบของฟิล์ม ส่วนอนุภาคแอลฟาที่เคลื่อนที่ในแนวเดียวกับทิศทางของเส้นแรงแม่เหล็กนั้น พบว่าแรงจากสนามแม่เหล็กจะไม่ส่งผลใด ๆ ต่อทิศทางเคลื่อนที่ของ

อนุภาคแอลฟา อนุภาคจึงเคลื่อนที่เข้าชนแผ่นฟิล์มในลักษณะตรง รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม จึงตรงกว่ากรณีที่ไม่ใช้แม่เหล็ก ที่แม่จะมีแนวโน้มของการกระจายของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอย อนุภาคบนแผ่นฟิล์มในทิศทางเดียวกัน แต่อนุภาคแอลฟาก็ยังมีการเคลื่อนที่แบบสุ่ม (Random) ทำให้ มีการกระจายของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มในช่วงกว้างดังแสดงในรูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 การเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟาที่พุ่งออกจากอะเมริเซียม-241 ในสนามแม่เหล็ก โดย α_1 แทนอนุภาคแอลฟาที่เคลื่อนที่ทำมุม 0° กับทิศของเส้นแรงแม่เหล็ก ซึ่งจะไม่ถูกแรงจากสนามแม่เหล็กกระทำ อนุภาคจึงมีการเคลื่อนที่ในทิศทางเดิมไม่เปลี่ยนแปลง α_2 แทนอนุภาคแอลฟาที่มีการเคลื่อนที่ทำมุมใด ๆ กับทิศของเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกแรงจากสนามแม่เหล็กกระทำ อนุภาคจะเคลื่อนที่เบี่ยงเบนออกจากแนวการเคลื่อนที่เดิม

ส่วนระยะห่างจากแหล่งกำเนิดของอนุภาคแอลฟา จะส่งผลต่อลักษณะของรอยอนุภาคที่ปรากฏบนฟิล์มเช่นกัน เนื่องจากแหล่งกำเนิดอนุภาคแอลฟาที่ใช้เป็น Disc source ซึ่งจะมีการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมาในลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม ดังนั้นการเพิ่มระยะห่างจากต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา จะส่งผลทำให้รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มมีลักษณะตรงขึ้น ในขณะที่ความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มกลับมีค่าลดลง

ที่สำคัญ คือ ต้องคำนึงถึงค่าพิสัยของอนุภาคแอลฟาทั้งในอากาศ และในแผ่นฟิล์ม เซลลูโลสในเตรทด้วย (ภาคผนวก ก) โดยระยะห่างระหว่างต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟากับฟิล์มต้องมีระยะที่เหมาะสม ที่จะทำให้อนุภาคแอลฟายังเหลือพลังงานมากพอที่จะสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มได้ จากเหตุผลดังกล่าวจึงได้ทำการทดลองใน Vacuum chamber ที่ระดับความดัน 10^{-2} torr

โดยกำหนดระยะห่างระหว่างฟิล์มกับต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา 2 เซนติเมตร ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า เป็นระยะที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้อนุภาคแอลฟาจะสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มได้

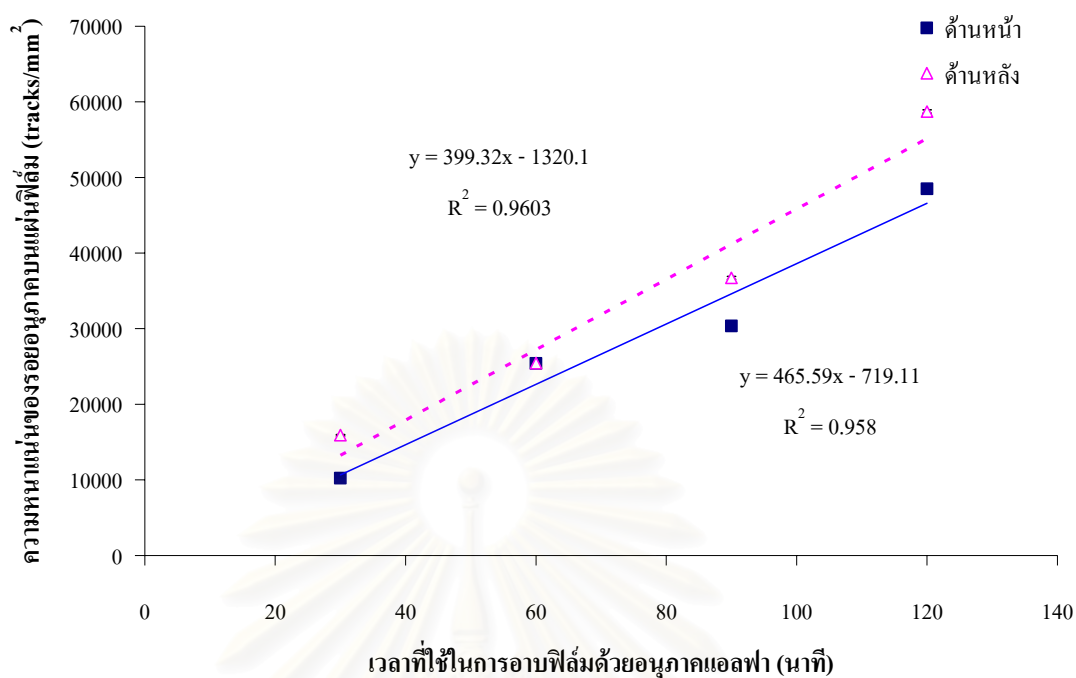
4.2.2 ผลจากปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มที่มีต่อความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

จากการทดลองในหัวข้อที่ 4.2.1 แสดงให้เห็นว่า การใช้สนามแม่เหล็กมีส่วนช่วยให้รอยอนุภาคที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มนั้นมีลักษณะตรงขึ้น อีกทั้งระยะห่างระหว่างแผ่นฟิล์มกับต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาที่เพิ่มขึ้น ยังมีส่วนช่วยเสริมให้รอยอนุภาคที่ปรากฏบนแผ่นฟิล์มนั้นยิ่งตรงขึ้นอีก

เวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม ก็เป็นอีกปัจจัยสำคัญในการควบคุมความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม โดยทำการทดลองเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม กับความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.7 และสามารถสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม กับจำนวนรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม ได้ดังรูปที่ 4.11

ตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มที่มีต่อความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

เวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม (min)	ความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม (tracks/mm ²)	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง
30	10,230 ± 101	15,905 ± 126
60	25,411 ± 159	25,465 ± 160
90	30,361 ± 174	36,717 ± 192
120	48,512 ± 220	58,713 ± 242



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์ม กับความหนาแน่นของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม เปรียบเทียบทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นฟิล์ม

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อทำการอบฟิล์มนานขึ้น เนื่องจากอนุภาคแอลฟาสามารถทำอันตรกิริยากับฟิล์มได้มากขึ้น เมื่อนำไปล้างก็คยขยรอยจึงทำให้เกิดรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมากขึ้น

ความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกรอง โดยเมื่อความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมากขึ้น จะใช้เวลาในการกรองน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการกรองดีขึ้น จนกระทั่งถึงความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มค่าหนึ่งเท่านั้น หลังจากนั้นความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มที่เพิ่มมากขึ้นไป กลับจะทำให้ประสิทธิภาพในการกรองจะลดลง เนื่องจากการที่ความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมากขึ้นจะทำให้โอกาสเกิดรอยซ้อนกันมีมากขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจึงเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกรองอนุภาคลดลง

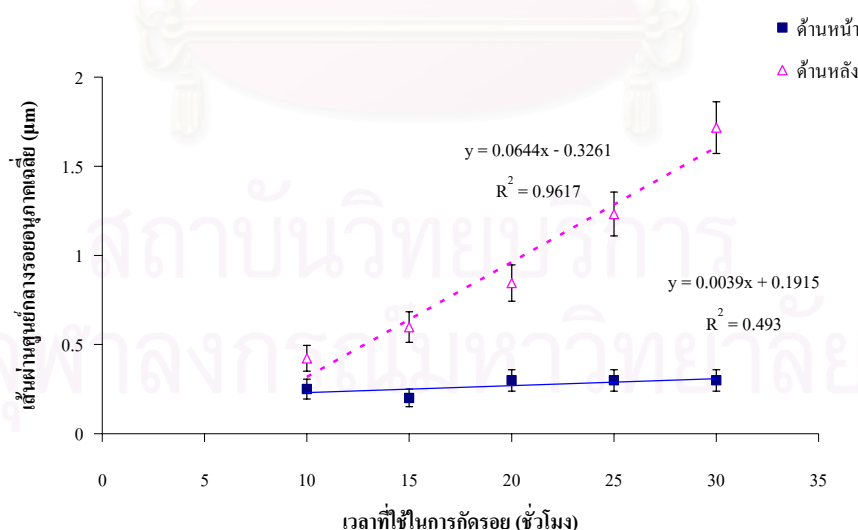
4.2.3 ผลจากปัจจัยของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยที่มีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

เนื่องจากการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม ที่จะให้ค่าที่ถูกต้อง และมีค่าความแปรปรวนของข้อมูลน้อยที่สุดนั้น รอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มควรมีลักษณะเป็นรอยเดี่ยว และมีจำนวนรอยมากพอในการประมาณค่าทางสถิติ

จากเหตุผลดังกล่าว จึงเลือกทำการอบฟิล์มที่ระยะเวลา 30 นาที เพราะโอกาสในการเกิดรอยร่อนกันน้อยที่สุด อีกทั้งความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมีจำนวนมากพอที่จะสามารถประมาณค่าเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม ได้ใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคจริงมากที่สุด ก่อนนำฟิล์มไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2.5 N ที่อุณหภูมิห้อง (30 องศาเซลเซียส) ทำการเปรียบเทียบเวลาที่ใช้ในการกัดรอยตั้งแต่ 10 – 30 ชั่วโมง ดังแสดงในตารางที่ 4.8 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดรอย กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มทั้งทางด้านหน้า และด้านหลังของฟิล์ม ดังรูปที่ 4.12

ตารางที่ 4.8 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของเวลาที่มีต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการกัด รอย (ชั่วโมง)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (µm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	30	10	0.251 ± 0.055	0.423 ± 0.072
		15	0.200 ± 0.050	0.598 ± 0.086
		20	0.299 ± 0.061	0.845 ± 0.102
		25	0.299 ± 0.061	1.232 ± 0.123
		30	0.299 ± 0.061	1.716 ± 0.145



รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดรอย กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นกรองชนิดเทรค-เอตซ์ เมื่อใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา

จากรูปที่ 4.12 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกัดรอยจะส่งผลทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมีค่ามากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อใช้เวลาในการกัดรอยนานขึ้น เนื้อฟิล์มทั้งส่วนที่เป็นรอยอนุภาคและผิวฟิล์มจะถูกกัดหลุดลอกออกมามากขึ้น ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มกว้างขึ้นในขณะที่ความหนาของฟิล์มลดลง

4.2.4 ผลจากปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

สำหรับการทดลอง เพื่อศึกษาปัจจัยของอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอยว่ามีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์มหรือไม่นั้น จะทำการทดลองโดยอาบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟา ในเงื่อนไขเดียวกันกับการทดสอบปัจจัยของเวลาในหัวข้อที่ 4.2.3

ฟิล์มที่ผ่านการอาบด้วยอนุภาคแอลฟาแล้ว จะถูกนำมากัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 2.5 N โดยทำการเปรียบเทียบอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอยตั้งแต่ 40 องศาเซลเซียส ไปจนถึง 70 องศาเซลเซียส ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.9 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มได้ดังรูปที่ 4.13 และรูปที่ 4.14

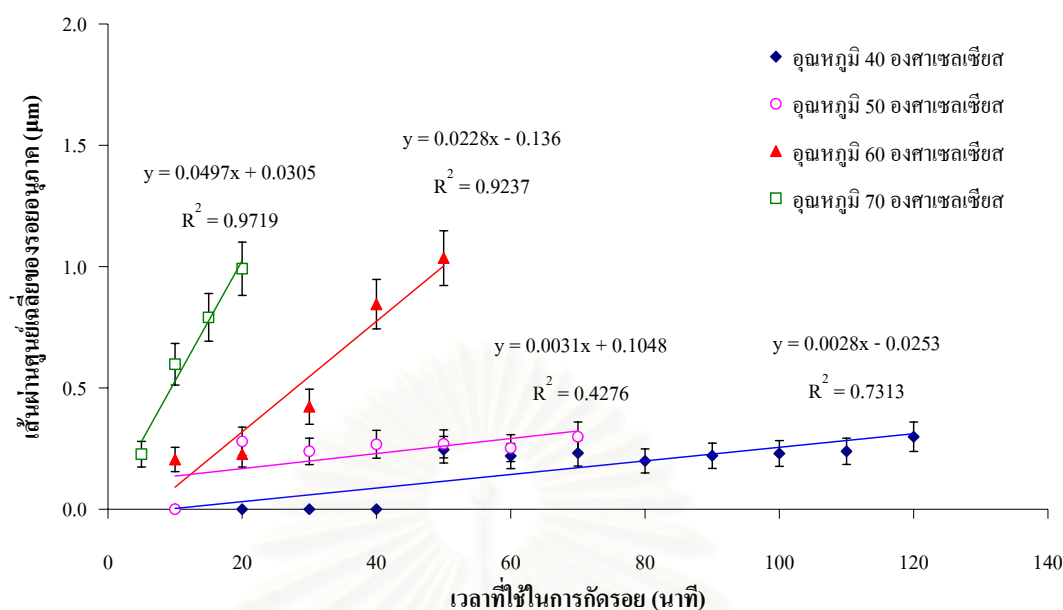
ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการกัดรอย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	40	10	ไม่ปรากฏรอย	ไม่ปรากฏรอย
		20	ไม่ปรากฏรอย	ไม่ปรากฏรอย
		30	ไม่ปรากฏรอย	ไม่ปรากฏรอย
		40	ไม่ปรากฏรอย	ไม่ปรากฏรอย
		50	0.245 ± 0.055	0.243 ± 0.054
		60	0.219 ± 0.052	0.265 ± 0.057
		70	0.231 ± 0.053	0.423 ± 0.072
		80	0.199 ± 0.049	0.453 ± 0.075
		90	0.221 ± 0.052	0.518 ± 0.080
		100	0.230 ± 0.053	0.543 ± 0.082

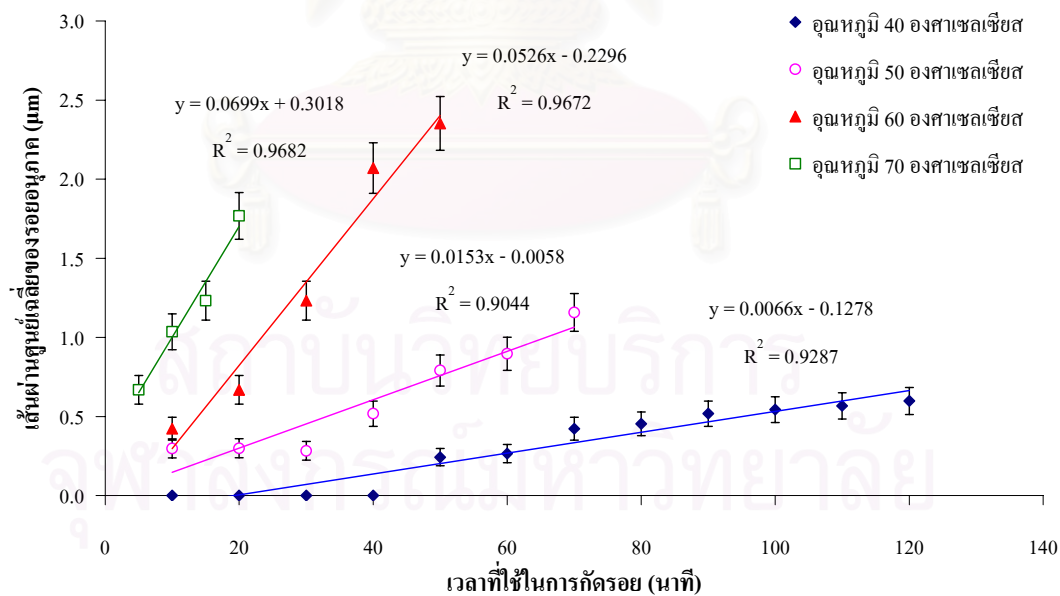
ตารางที่ 4.9 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของอุณหภูมิที่มีผลต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม (ต่อ)

ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการกัดรอย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	40	110	0.239 ± 0.054	0.537 ± 0.083
		120	0.299 ± 0.061	0.598 ± 0.086
	50	10	ไม่เห็นรอย	0.298 ± 0.060
		20	0.280 ± 0.059	0.299 ± 0.061
		30	0.239 ± 0.054	0.283 ± 0.059
		40	0.267 ± 0.057	0.518 ± 0.080
		50	0.270 ± 0.057	0.791 ± 0.098
		60	0.252 ± 0.056	0.896 ± 0.105
		70	0.299 ± 0.061	1.157 ± 0.119
	60	10	0.205 ± 0.050	0.423 ± 0.072
		20	0.228 ± 0.053	0.668 ± 0.090
		30	0.423 ± 0.072	1.232 ± 0.123
		40	0.845 ± 0.102	2.070 ± 0.159
		50	1.035 ± 0.113	2.353 ± 0.170
	70	5	0.227 ± 0.053	0.668 ± 0.090
		10	0.598 ± 0.086	1.035 ± 0.113
		15	0.791 ± 0.099	1.232 ± 0.123
		20	0.991 ± 0.110	1.768 ± 0.147

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหน้า โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการกักรอย



รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักรอยกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหลัง โดยเปรียบเทียบที่อุณหภูมิต่าง ๆ ที่ใช้ในการกักรอย

จากกราฟแสดงผลการทดลองพบว่า เมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการกัดกร่อนของทั้งรอยอนุภาคและผิวฟิล์มเพิ่มขึ้น ทำให้ฟิล์มถูกกัดหลุดลอกออกได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับช่วงเวลาเดียวกันของการกัดกร่อนในอุณหภูมิต่ำกว่า ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเมื่อกัดกร่อนที่อุณหภูมิสูง จะมีการเปลี่ยนแปลงในช่วงกว้างกว่าการกัดกร่อนที่อุณหภูมิต่ำ แม้ว่าการกัดกร่อนในสารละลายที่มีอุณหภูมิสูง จะใช้เวลาน้อยกว่าในการสร้างรอยอนุภาคให้เกิดบนแผ่นฟิล์มเทียบกับที่อุณหภูมิต่ำ แต่การควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคกลับทำได้ยาก เนื่องจากอัตราการกัดกร่อนที่เร็วย่อมส่งผลทำให้การเปลี่ยนแปลงช่วงเวลาแม้เพียงเล็กน้อย ก็สามารถทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเบี่ยงเบนไปจากขนาดที่ต้องการอย่างมากได้ ดังนั้นในการเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดกร่อนจึงควรเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สามารถควบคุมการเบี่ยงเบนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคได้ โดยไม่ใช้เวลานานจนเกินไป

4.2.5 ผลจากปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ใช้ในการกัดกร่อนที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

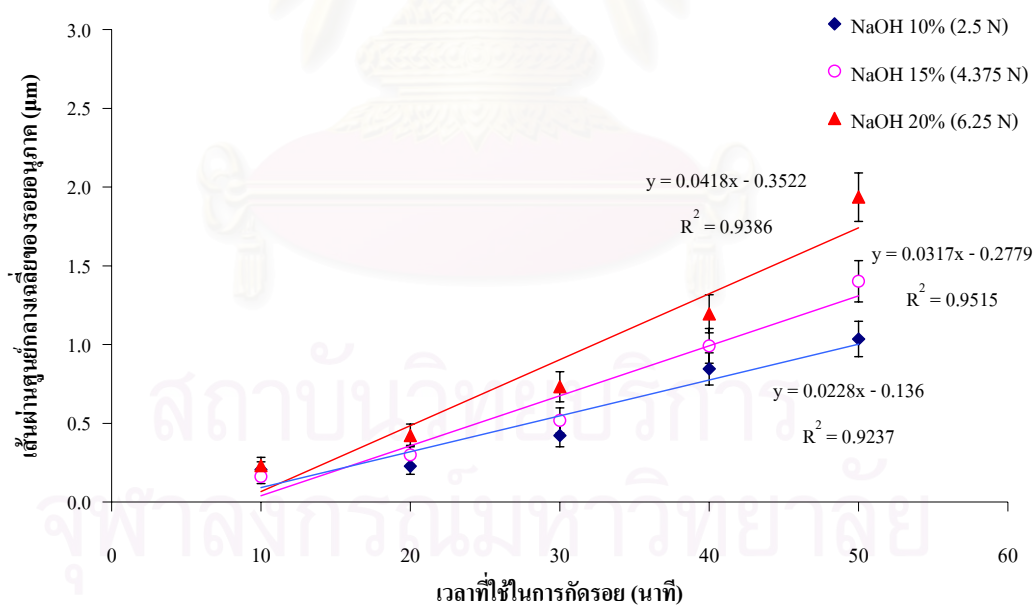
นอกจากปัจจัยทางด้าน อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกัดกร่อนแล้ว ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ในการกัดกร่อน ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเช่นกัน ซึ่งเมื่อทำการทดลองโดยการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกัดกร่อนจาก NaOH 10% (2.5 N), 15% (4.375 N) และ 20% (6.25 N) ตามลำดับ โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดกร่อนที่ 60 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.10 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม ดังแสดงในรูปที่ 4.15 และรูปที่ 4.16

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

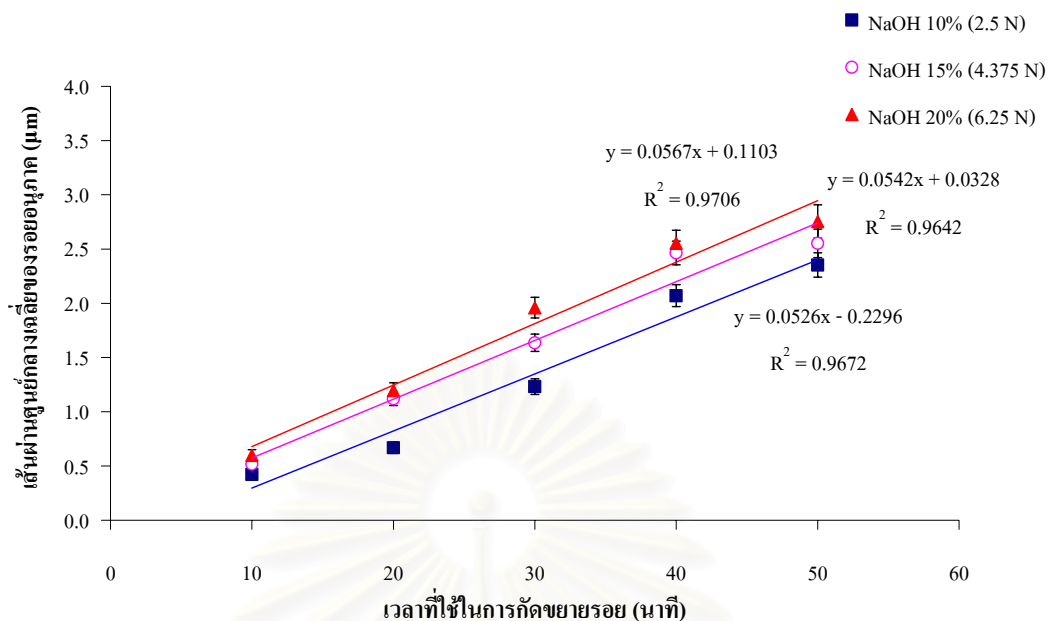
ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการกัด กร่อน (นาท)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (µm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	60	10	0.205 ± 0.050	0.423 ± 0.072
		20	0.228 ± 0.053	0.668 ± 0.090
		30	0.423 ± 0.072	1.232 ± 0.123
		40	0.845 ± 0.102	2.070 ± 0.159
		50	1.035 ± 0.113	2.353 ± 0.170

ตารางที่ 4.10 ผลการเปรียบเทียบปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีผล
ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม (ต่อ)

ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	เวลาในการกัด รอย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
4.375	60	10	0.161 ± 0.044	0.517 ± 0.080
		20	0.299 ± 0.061	1.118 ± 0.117
		30	0.518 ± 0.080	1.637 ± 0.142
		40	0.991 ± 0.110	2.464 ± 0.174
		50	1.401 ± 0.131	2.552 ± 0.177
6.25	60	10	0.230 ± 0.053	0.598 ± 0.086
		20	0.423 ± 0.072	1.195 ± 0.121
		30	0.732 ± 0.094	1.959 ± 0.155
		40	1.195 ± 0.121	2.553 ± 0.177
		50	2.092 ± 0.160	2.755 ± 0.184



รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดรอย กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหน้า เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกัดรอยต่างกัน



รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสกัดรอย กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มด้านหลัง เมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสกัดรอยต่างกัน

จากกราฟแสดงผลการทดลองพบว่า ลักษณะของกราฟทั้งสองด้านของฟิล์ม (รูปที่ 4.15 และ 4.16) จะเป็นไปในทิศทางเดียวกัน คือ ลักษณะของกราฟเมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้น กราฟจะชันขึ้น แสดงให้เห็นว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จะทำให้อัตราการสกัดรอยของทั้งรอยอนุภาคและผิวฟิล์มเพิ่มขึ้น โดยฟิล์มจะถูกกัดหลุดลอกออกได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบที่เวลาเดียวกันของการสกัดรอยที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลายต่ำกว่า ซึ่งจากปัจจัยดังกล่าวจะส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเมื่อทำการสกัดรอยในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงกว่า จะมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วงกว้างกว่าการสกัดรอยในสารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำกว่า

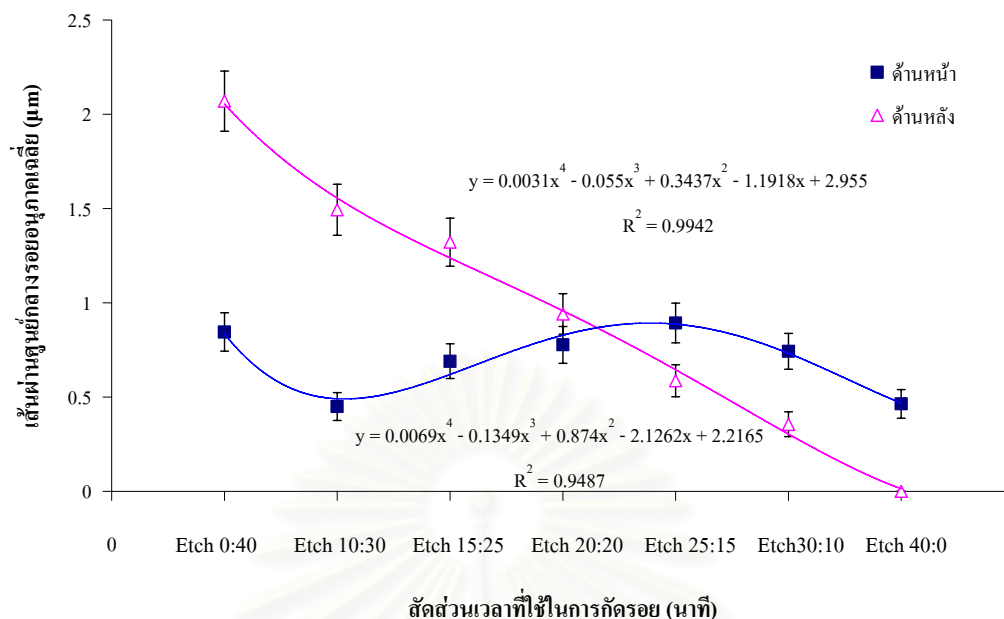
4.2.6 ผลจากสัดส่วนของเวลาก่อนและหลังการลอกฟิล์มในการสกัดรอย กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้าและหลังของแผ่นฟิล์ม

เนื่องจาก การแตกตัวจำเพาะของอนุภาคแอลฟาในตัวกลางจะมีค่ามากที่สุดเมื่ออนุภาคแอลฟาที่เคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางใด ๆ มีการสูญเสียพลังงานจนเกือบหยุดนิ่งในตัวกลางนั้น ส่งผลให้รอยอนุภาคที่อยู่ติดลงไปบนเนื้อฟิล์มมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าบนผิวฟิล์ม ซึ่งจากผลการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าการลอกฟิล์มก่อนนำไปสกัดรอย มีผลทำให้แผ่นกรองที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งสองด้านไม่เท่ากัน โดยรอยอนุภาคทางด้านหลัง

ของแผ่นฟิล์มจะมีขนาดใหญ่กว่าทางด้านหน้า เพื่อป้องกันความยุ่งยากในการจัดวางฟิล์ม จึงได้ทำการทดลองหาเทคนิคในการกัดรอยที่เหมาะสม ที่สามารถสร้างแผ่นกรองที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งสองด้านใกล้เคียงกันมากที่สุด ซึ่งเมื่อทำการทดลองกัดรอยฟิล์มที่ผ่านการอบอนุภาคแอลฟา ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดรอย 40 นาที เปรียบเทียบระหว่างการกัดรอยโดยไม่ลอกฟิล์มกับการกัดรอยที่มีการกำหนดสัดส่วนของเวลาก่อนและหลังการลอกฟิล์ม ซึ่งสามารถแสดงผลการทดลองดังตารางที่ 4.11 และสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยก่อนและหลังการลอกฟิล์มกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาค เปรียบเทียบทางด้านหน้าและด้านหลังแผ่นฟิล์มได้ดังรูปที่ 4.17

ตารางที่ 4.11 ผลจากสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยก่อนและหลังการลอกฟิล์ม กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์ม

ความเข้มข้น NaOH (N)	อุณหภูมิ (°C)	สัดส่วนของเวลาที่ใช้ ในการกัดรอยก่อน และหลังการลอกฟิล์ม (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (μm)	
			ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	60	40 : 0	0.845 ± 0.102	2.070 ± 0.159
		30 : 10	0.450 ± 0.074	1.494 ± 0.135
		25 : 15	0.690 ± 0.092	1.322 ± 0.127
		20 : 20	0.777 ± 0.098	0.941 ± 0.107
		15 : 25	0.893 ± 0.105	0.587 ± 0.084
		10 : 30	0.743 ± 0.095	0.356 ± 0.066
		0 : 40	0.464 ± 0.075	รอยไม่ทะลุ



รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยก่อนและหลังการลอกฟิล์ม กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังแผ่นฟิล์ม

จากกราฟแสดงให้เห็นว่า เมื่อเพิ่มสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยฟิล์มก่อนลอกฟิล์มออกจากฐานโพลิเอสเตอร์จากนั้นทำการกัดรอยซ้ำจนครบ 40 นาที จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังฟิล์มแตกต่างกัน ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่สัดส่วนเวลา 0 : 40 หมายถึง ลอกฟิล์มก่อน แล้วจึงทำการกัดรอยฟิล์ม 40 นาที พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มทางด้านหลังจะมีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้า เช่นเดียวกันกับที่สัดส่วนเวลา 10 : 30 ซึ่งหมายถึงกัดรอยฟิล์มเป็นเวลา 10 นาทีก่อนลอกฟิล์มแล้วจึงทำการกัดรอยฟิล์มต่อไปอีก 30 นาที จนครบ 40 นาที และสัดส่วนเวลา 15 : 25 นาที ซึ่งหมายถึงการกัดรอยฟิล์มเป็นเวลา 15 นาที ก่อนลอกฟิล์มแล้วจึงทำการกัดรอยฟิล์มต่อไปอีก 25 นาที จนครบ 40 นาทีเช่นกัน โดยพบว่าความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มมีแนวโน้มลดลง เมื่อสัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยฟิล์มก่อนลอกฟิล์มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งที่สัดส่วนเวลา 20 : 20 หมายความว่า กัดรอยฟิล์มเป็นเวลา 20 นาที ก่อนลอกฟิล์มแล้วจึงทำการกัดรอยฟิล์มต่อไปอีก 20 นาที จนครบเวลา 40 นาที ซึ่งพบว่าที่สัดส่วนเวลาดังกล่าวความแตกต่างระหว่างรอยอนุภาคทั้งสองด้านของแผ่นฟิล์มจะมีค่าน้อยที่สุด จากนั้นเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเวลาในการกัดรอยฟิล์มก่อนลอกฟิล์มขึ้นไปอีก เป็น 25 : 15 และ 30 : 10 กลับพบว่าความแตกต่างระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังกลับค่อย ๆ เพิ่มขึ้น จนกระทั่งเมื่อเพิ่มสัดส่วนของเวลาในการกัดรอยเป็น 40 : 0 ซึ่งหมายถึงกัดรอยฟิล์มโดยไม่ลอก

ฟิล์มออกจากฐานโพลิเอสเทอร์เป็นเวลา 40 นาที พบว่าไม่ปรากฏรอยอนุภาคทางด้านหลังของแผ่นฟิล์ม

เหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเมื่ออนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในฟิล์ม จะมีค่าการแตกตัวจำเพาะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ และมีค่ามากที่สุดเมื่ออนุภาคเกือบหยุดนิ่งในฟิล์ม ดังนั้นรอยแผลงที่เกิดขึ้นในฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทจะมีรอยที่มีขนาดใหญ่อยู่ลึกลงไปใต้อีกชั้นฟิล์ม จากการทดลองที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเมื่อทำการลอกฟิล์มออกจากฐานโพลิเอสเทอร์ก่อนนำไปกัดรอย จะทำให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยทางด้านหลังฟิล์มมีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้าฟิล์มมาก ซึ่งสามารถประเมินได้ว่าการติดตั้งฟิล์มที่ระยะห่างจากอะเมริเซียม 2 เซนติเมตร แม้ว่าอนุภาคแอลฟาจะยังมีพลังงานมากพอที่จะทะลุผ่านฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทหนา 12 ไมโครเมตรได้ แต่พลังงานของอนุภาคแอลฟาที่ถูกลดทอนลงเรื่อย ๆ จนถึงช่วงรอยต่อระหว่างฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทกับโพลิเอสเทอร์ที่เป็นฐาน ซึ่งอนุภาคแอลฟาจะถูกลดทอนพลังงานลงมากที่สุดก่อนหยุดนิ่งในฐานโพลิเอสเทอร์ ทำให้การแตกตัวจำเพาะบริเวณดังกล่าวมีค่าสูง รอยแผลงที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ตามไปด้วย เมื่อทำการกัดรอยฟิล์มรอยของอนุภาคด้านหลังฟิล์มจึงมีขนาดใหญ่กว่าด้านหน้าอย่างเห็นได้ชัด



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถนำมาใช้ในการวิเคราะห์หาเทคนิคที่เหมาะสมที่สุด ในการผลิตแผ่นกรองแบบแทรก-เอตซ์ ด้วยฟิล์ม LR-115 Type 2 ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัยการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ จากปฏิกิริยา (n,α) โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน

เมื่อพิจารณาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและลักษณะของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม ที่ผลิตจากการใช้แคลิฟอร์เนียม-252 เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน โดยอาศัยผลจากปฏิกิริยาระหว่างเทอร์มัลนิวตรอนกับโบรอน-10 ซึ่งเป็นฉากเปลี่ยนนิวตรอน เมื่อทำการอบนิวตรอนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ทำการกัดขยายรอยอนุภาคด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดรอย 10 – 60 นาที และทำการกัดผิวฟิล์มเป็นเวลา 75 นาที เพื่อลดความหนาของฟิล์มก่อนการอบนิวตรอน สามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 สรุปผลการวิจัยการผลิตแผ่นกรองด้วยเทคนิคแทรก-เอตซ์ จากปฏิกิริยา (n,α) โดยใช้ ^{252}Cf เป็นต้นกำเนิดนิวตรอน

เงื่อนไขเฉพาะในการกัดรอย	เวลาการกัดรอย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของแผ่นกรองที่ผลิตได้ (μm)	
		ด้านหน้า	ด้านหลัง
	10 – 40	$0.598 \pm 0.086 - 2.638 \pm 0.180$	รอยไม่ทะลุ
	50	3.780 ± 0.215	0.423 ± 0.071
กัดผิวฟิล์ม 75 นาที	10 - 30	$0.991 \pm 0.110 - 2.113 \pm 0.161$	$0.791 \pm 0.098 - 3.134 \pm 0.192$

พบว่า Recoil products ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าว ไม่ว่าจะเป็อนุภาคแอลฟาและรีคอยล์ นิวเคลียสของลิเทียม-7 นั้น มีพลังงานไม่เพียงพอที่จะทะลุผ่านความหนาของเซลล์โลสในตรงที่ใช้ทำแผ่นฟิล์มได้ เมื่อทำการกัดรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดรอย 10 – 40 นาที ผลคือทำให้เกิดรอยอนุภาคขนาดตั้งแต่

0.598 ± 0.086 ถึง 2.638 ± 0.180 ไมโครเมตร ทางด้านหน้าของฟิล์มเพียงด้านเดียว ไม่ทะลุผ่านฟิล์ม จึงไม่สามารถนำไปใช้ทำแผ่นกรองได้

เมื่อทำการเพิ่มเวลาที่ใช้ในการกักรอย พบว่าแผ่นฟิล์มจะถูกกัดหลุดลอกออกมามากขึ้นทำให้แผ่นฟิล์มบางลง จนถึงระดับที่รอยทั้งสองด้านสามารถทะลุถึงกันได้ คือที่เวลาในการกักรอย 50 นาทีเป็นต้นไป โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าของแผ่นฟิล์ม 3.780 ± 0.215 ไมโครเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหลังของแผ่นฟิล์ม 0.423 ± 0.071 ไมโครเมตร แต่ผลคือทำให้ฟิล์มบางลงจาก 12 ไมโครเมตร เหลือเพียง 3.8 ไมโครเมตร ซึ่งบางเกินกว่าที่จะนำไปใช้ในการกรองจริง ที่มีการใช้แรงดัน และสารเคมี ในการกรองได้

จึงได้มีการทดลองกัดผิวฟิล์ม เพื่อลดความหนาของฟิล์มลงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 75 นาที เพื่อลดความหนาของฟิล์มลงจาก 12 ไมโครเมตร เหลือเพียง 6.5 ไมโครเมตร ก่อนนำไปอบนิวตรอนเพื่อให้ฟิสิกของอนุภาคแอลฟา พลังงาน 1.47 MeV จากอันตรกิริยาดังกล่าวสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มได้ ก่อนนำไปกักรอยอีกครั้งในเงื่อนไขเดิม พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.991 ± 0.110 ถึง 2.113 ± 0.161 ไมโครเมตร และ 0.791 ± 0.098 ถึง 3.134 ± 0.192 ไมโครเมตร ที่เวลาในการกักรอยตั้งแต่ 10 ถึง 30 นาที แม้ว่าเทคนิคดังกล่าวจะสามารถผลิตแผ่นกรองได้ แต่ผลคือทำให้ฟิล์มยิ่งบางลงทุกครั้งที่มีการกักรอยเพื่อเพิ่มขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง อีกทั้งเทคนิคนี้ยังไม่สามารถควบคุมทิศทางของ Recoil products ที่จะตกกระทบแผ่นฟิล์มได้ ทำให้รอยอนุภาคที่เกิดขึ้นมีขนาดและทิศทางไม่แน่นอน ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคมีช่วงความแปรปรวนของข้อมูลกว้าง ดังนั้นจึงไม่นิยมใช้เทคนิคนี้ในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง

5.2 สรุปผลการวิจัยการผลิตแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ โดยใช้ ^{241}Am เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา

สำหรับเทคนิคที่มีการใช้ อะเมริเซียม-241 เป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟาในการผลิตแผ่นกรองฟิล์มบาง พบว่าพลังงานอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจากอะเมริเซียม มีระดับพลังงานสูงพอที่จะทะลุผ่านความหนาของเซลลูโลสไนเตรทที่ใช้ทำแผ่นฟิล์มได้ แต่เนื่องจากต้นกำเนิดอะเมริเซียมที่ใช้ มีลักษณะเป็น Disc source ซึ่งมีการปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาออกมาทุกทิศทางในลักษณะเป็นครึ่งทรงกลม หมายความว่ายิ่งระยะห่างระหว่างอะเมริเซียมกับฟิล์มมากขึ้น อนุภาคแอลฟาที่จะตกกระทบฟิล์มจะมีทิศทางตรงขึ้น แต่เนื่องจากฟิสิกของอนุภาคแอลฟาจากอะเมริเซียมในอากาศมีค่าประมาณ 1.5 นิ้ว และจำเป็นที่อนุภาคแอลฟาต้องมีพลังงานอย่างน้อยที่สุด 3.561 MeV จึงจะสามารถทะลุผ่านความหนา 12 ไมโครเมตร ของฟิล์มเซลลูโลสไนเตรทที่ใช้ในการทดลองได้ (ภาคผนวก ก) ส่งผลให้ระยะห่างที่จะสามารถที่ใช้ในการทดลองจริงเหลือเพียง 1 เซนติเมตรเท่านั้น

จึงได้ทำการทดลองใน Vacuum chamber ความดันสุญญากาศประมาณ 10^{-2} torr เพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอะเมอริเซียมกับฟิล์ม และนำแท่งแม่เหล็ก ซึ่งมีความเข้มสนามแม่เหล็กประมาณ 1.64 กิโลเกาส์ มาช่วยในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา โดยประกบแท่งแม่เหล็กระหว่าง อะเมอริเซียม กับฟิล์มทั้งสองด้านของคลับใส่ฟิล์ม จากนั้นทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาที่ระยะห่างระหว่าง อะเมอริเซียมซึ่งเป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา กับฟิล์ม 2 เซนติเมตร เป็นเวลา 30 นาที โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้ และไม่ใช้แม่เหล็กในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา พบว่าการใช้แม่เหล็กมีส่วนช่วยให้ช่วงความแปรปรวนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคในแต่ละตำแหน่งบนแผ่นฟิล์มลดลง เนื่องจากอนุภาคแอลฟาที่มีทิศทางเคลื่อนที่ทำมุมใด ๆ กับทิศของเส้นแรงแม่เหล็กจะถูกแรงจากสนามแม่เหล็กเหวี่ยงออกจกพื้นแนวขอบของฟิล์ม ในขณะที่อนุภาคแอลฟาที่มีการเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับทิศของเส้นแรงแม่เหล็ก จะไม่ได้รับผลจากสนามแม่เหล็ก อนุภาคจึงเคลื่อนที่ชนแผ่นฟิล์มโดยตรง ต่างจากฟิล์มที่ไม่มีการใช้แม่เหล็กในการบังคับทิศทางของอนุภาคแอลฟา ทำให้อนุภาคแอลฟาเคลื่อนที่ชนแผ่นฟิล์มแบบสุ่ม จึงมีความแปรปรวนของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมากกว่า

5.2.1 สรุปผลการวิจัย เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มกับความหนาแน่นรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

จากผลการวิจัย เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มกับความหนาแน่นรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม เมื่อทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาที่ระยะห่างระหว่างอะเมอริเซียมซึ่งเป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา กับฟิล์ม 2 เซนติเมตร เวลาในการอบฟิล์ม 30, 60, 90 และ 120 นาที โดยใช้แม่เหล็กช่วยในการบังคับทิศทางเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา และทำการกัดขยายรอยอนุภาคด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิในการกัดรอย 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มกับความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

เวลาในการอบฟิล์มด้วย อนุภาคแอลฟา (นาที)	ความหนาแน่นรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม (Tracks/mm ²)	
	ด้านหน้า	ด้านหลัง
30 - 120	10,230 ± 101 – 48,512 ± 220	15,905 ± 126 – 15,713 ± 242

พบว่าความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจะมีค่ามากขึ้น เมื่อเพิ่มเวลาในการอบฟิล์มให้นานขึ้น โดยความหนาแน่นของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ที่ $10,230 \pm 101$ ถึง $48,512 \pm 220$ รอยต่อตารางมิลลิเมตร และ $15,905 \pm 126$ ถึง $58,713 \pm 242$

รอยต่อตารางมิลลิเมตร เมื่อใช้เวลาในการอบฟิล์ม 30 – 120 นาที โดยมีสัดส่วนการเพิ่มขึ้นของความหนาแน่นของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มกับเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มสอดคล้องกันทั้งทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์ม

5.2.2 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักรอยฟิล์ม กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคที่ผลิตได้

จากผลการทดลองเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักรอยฟิล์ม กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นบนแผ่นฟิล์ม เมื่อทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาเป็นเวลา 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างอะเมริเซียม ซึ่งเป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา กับฟิล์ม 2 เซนติเมตร โดยใช้แท่งแม่เหล็กช่วยในการบังคับทิศทางของอนุภาคแอลฟา และทำการกักรอยอนุภาคด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลาในการกักรอย 10 -30 ชั่วโมง สามารถสรุปผลการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างเวลาที่ใช้ในการกักรอยฟิล์มกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคที่ผลิตได้

อุณหภูมิ (°C)	เวลาการ กักรอย (ชั่วโมง)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาค (µm)	
		ด้านหน้า	ด้านหลัง
30	10 - 30	$0.200 \pm 0.050 - 0.299 \pm 0.061$	$0.413 \pm 0.072 - 1.716 \pm 0.145$

พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจะมีค่ามากขึ้น เมื่อทำการกักรอยนานขึ้น โดยสอดคล้องกันทั้งสองด้านของฟิล์ม เนื่องจากการเพิ่มเวลาในการกักรอยจะส่งผลให้ฟิล์มทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์นานขึ้น รอยอนุภาคและผิวฟิล์มจะถูกกัดหลุดลอกออกมามากขึ้น เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจึงกว้างขึ้น โดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังฟิล์ม อยู่ในช่วง 0.200 ± 0.050 ถึง 0.299 ± 0.061 ไมโครเมตร และ 0.413 ± 0.072 ถึง 1.716 ± 0.145 ไมโครเมตร เมื่อใช้เวลาในการกักรอย 10 – 30 ชั่วโมง

5.2.3 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอยฟิล์ม กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคที่ผลิตได้

เมื่อทำการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในการกัดรอย ที่มีต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม เมื่อทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาเป็นเวลา 30 นาที ระยะห่างระหว่างอะเมอริเซียม ซึ่งเป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา กับฟิล์ม 2 เซนติเมตร โดยใช้แม่เหล็กช่วยในการบังคับทิศทางของอนุภาคแอลฟา และทำการกัดขยายรอยอนุภาคด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) ทำการเปรียบเทียบขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาค เมื่อใช้อุณหภูมิในการกัดรอย 40 – 70 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดรอย 5 – 120 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 สรุปผลการวิจัยเมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดรอยฟิล์มกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคที่ผลิตได้

อุณหภูมิ (°C)	เวลาการ กัดรอย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาค (µm)	
		ด้านหน้า	ด้านหลัง
40	10 – 40	ไม่ปรากฏรอย	ไม่ปรากฏรอย
	50 – 120	$0.199 \pm 0.049 - 0.299 \pm 0.061$	$0.243 \pm 0.054 - 0.598 \pm 0.086$
50	10 – 70	$0.239 \pm 0.054 - 0.299 \pm 0.061$	$0.283 \pm 0.059 - 1.157 \pm 0.119$
60	10 – 50	$0.205 \pm 0.050 - 1.035 \pm 0.113$	$0.423 \pm 0.076 - 2.353 \pm 0.170$
70	5 - 20	$0.287 \pm 0.053 - 0.991 \pm 0.110$	$0.668 \pm 0.090 - 1.768 \pm 0.147$

พบว่า การเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกัดรอย จะส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มอุณหภูมิจะเป็นการเร่งปฏิกิริยาทำให้ฟิล์มถูกกัดหลุดลอกออกมามากขึ้น การเพิ่มขึ้นของขนาดรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มจึงเกิดได้เร็วกว่า ส่งผลให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อเทียบกับที่เวลาเดียวกันของการกัดรอยในอุณหภูมิต่ำ ซึ่งเมื่อทำการกัดรอยฟิล์มที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดรอย 10 – 40 นาที พบว่าไม่ปรากฏรอยอนุภาคทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์ม เนื่องจากรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มมีขนาดเล็กเกินกว่าที่กำลังขยาย 3,500 เท่าของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนจะสามารถโฟกัสภาพได้ แต่ก็ไม่สามารถเพิ่มกำลังขยายของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนให้มากกว่านี้ได้ เนื่องจากการเพิ่มความเข้มของ Electron beam มีผลทำให้ฟิล์มเกิดรอยแตกเสียหาย เมื่อเพิ่มเวลาในการกัดรอย 50 – 120 นาที พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.199 ± 0.049 ถึง 0.299 ± 0.061 ไมโครเมตร และ

0.243 ± 0.054 ถึง 0.598 ± 0.086 ไมโครเมตร การเพิ่มอุณหภูมิในการกักรอยเป็น 50 องศาเซลเซียส เวลาในการกักรอย 10 - 70 นาที พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.239 ± 0.054 ถึง 0.299 ± 0.061 ไมโครเมตร และ 0.283 ± 0.059 ถึง 1.157 ± 0.119 ไมโครเมตร เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกักรอยเป็น 60 องศาเซลเซียส เวลาในการกักรอย 10 - 60 นาที เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.205 ± 0.050 ถึง 1.035 ± 0.113 ไมโครเมตร และ 0.423 ± 0.072 ถึง 2.353 ± 0.170 ไมโครเมตร และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการกักรอยเป็น 70 องศาเซลเซียส เวลาในการกักรอย 5 - 20 นาที เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.227 ± 0.053 ถึง 0.991 ± 0.110 ไมโครเมตร และ 0.668 ± 0.090 ถึง 1.768 ± 0.147 ไมโครเมตร

5.2.4 สรุปผลการวิจัย เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกักรอย กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคที่ผลิตได้

สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่มีผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม เมื่อทำการอบฟิล์มด้วยอนุภาคแอลฟาเป็นเวลา 30 นาที ที่ระยะห่างระหว่างอะเมอริเซียม ซึ่งเป็นต้นกำเนิดอนุภาคแอลฟา กับฟิล์ม 2 เซนติเมตร โดยใช้แม่เหล็กช่วยในการบังคับทิศทางของอนุภาคแอลฟา เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการกักรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 10% (2.5 N), 15% (4.375 N) และ 20% (6.25 N) กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์ม โดยกำหนดอุณหภูมิที่ใช้ในการกักรอยคงที่ 60 องศาเซลเซียส เวลาในการกักรอย 10 - 50 นาที สามารถสรุปผลการวิจัยดังแสดงในตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 สรุปผลการวิจัย เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการกักรอยกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคที่ผลิตได้

ความเข้มข้น (N)	เวลาการกักรอย (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาค (µm)	
		ด้านหน้า	ด้านหลัง
2.5	10 - 50	0.205 ± 0.050 – 1.035 ± 0.113	0.423 ± 0.072 – 2.353 ± 0.170
4.375		0.161 ± 0.044 – 1.401 ± 0.131	0.517 ± 0.080 – 2.552 ± 0.177
6.25		0.230 ± 0.053 – 2.092 ± 0.160	0.598 ± 0.086 – 2.755 ± 0.184

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีผลทำให้เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคบนฟิล์มเพิ่มมากขึ้น พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 10% (2.5 N) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.205 ± 0.050 ถึง 1.035 ± 0.113 ไมโครเมตร และ 0.423 ± 0.072 ถึง 2.353 ± 0.170 ไมโครเมตร ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 15% (4.375 N) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.161 ± 0.044 ถึง 1.401 ± 0.131 ไมโครเมตร และ 0.517 ± 0.080 ถึง 2.552 ± 0.177 ไมโครเมตร และที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 20% (6.25 N) เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นฟิล์มอยู่ในช่วง 0.230 ± 0.053 ถึง 2.092 ± 0.160 ไมโครเมตร และ 0.598 ± 0.086 ถึง 2.755 ± 0.184 ไมโครเมตร แม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จะมีผลทำให้การเกิดปฏิกิริยาเร็วขึ้น แต่กลับพบว่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มน้อยกว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการกัศรย

5.2.5 สรุปผลการวิจัยระหว่างสัดส่วนของเวลาก่อนและหลังการลอกฟิล์มในการกัศรย กับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นกรองที่ผลิตได้

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่า การลอกฟิล์มก่อนนำไปกัศรยมีผลทำให้แผ่นกรองที่ผลิตได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งสองด้านไม่เท่ากัน โดยรอยอนุภาคทางด้านหลังของแผ่นฟิล์มจะมีขนาดใหญ่กว่าทางด้านหน้า จึงได้ทำการวิจัยเพื่อหาสัดส่วนของเวลาที่เหมาะสมในการกัศรยฟิล์ม ให้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งสองด้านใกล้เคียงกันมากที่สุด เพื่อป้องกันความยุ่งยากในการจัดวางแผ่นฟิล์มในการกรอง จึงทำการทดลองกัศรยฟิล์มที่ผ่านการอบอนุภาคแอลฟาด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10% (2.5 N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยกำหนดเวลาในการกัศรยเป็นสัดส่วน 0 : 40, 10 : 30, 15 : 25, 20 : 20, 25 : 15, 30 : 10 และ 40 : 0 นาที ซึ่งสามารถสรุปผลการวิจัยดังตารางที่ 5.6

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการวิจัยระหว่างสัดส่วนของเวลาก่อนและหลังการลอกฟิล์มในการกัศรย กับเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นกรอง

สัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัศรยก่อนและหลังการลอกฟิล์ม (นาที)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาค (μm)		ผลต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทางด้านหน้า-หลัง ของแผ่นกรอง
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	
0 : 40	0.845 ± 0.102	2.070 ± 0.159	1.225 ± 0.189
10 : 30	0.450 ± 0.074	1.494 ± 0.135	1.044 ± 0.154

ตารางที่ 5.6 สรุปผลการวิจัยระหว่างสัดส่วนของเวลาก่อนและหลังการลอกฟิล์มในการกัดรอย กับ เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเปรียบเทียบทางด้านหน้าและด้านหลังแผ่นกรอง(ต่อ)

สัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการกัดรอยก่อนและหลังการลอกฟิล์ม (นาทีก่อนและหลัง)	เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรอยอนุภาค (μm)		ค่าสัมบูรณ์ของผลต่างของเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยด้านหน้า-หลังแผ่นกรอง
	ด้านหน้า	ด้านหลัง	
15 : 25	0.690 ± 0.092	1.322 ± 0.127	0.632 ± 0.157
20 : 20	0.777 ± 0.098	0.941 ± 0.107	0.164 ± 0.145
25 : 15	0.893 ± 0.105	0.587 ± 0.084	0.306 ± 0.135
30 : 10	0.743 ± 0.095	0.356 ± 0.066	0.387 ± 0.116
40 : 0	0.464 ± 0.075	รอยไม่ทะลุ	0.464 ± 0.075

เนื่องจาก รอยอนุภาคทางด้านหลังฟิล์มจะมีขนาดใหญ่กว่าทางด้านหน้าฟิล์มเสมอ แม้ก่อนทำการกัดรอย ดังนั้นหากต้องการให้เส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทั้งสองด้านมีขนาดใกล้เคียงกันจึงควรเพิ่มสัดส่วนเวลาในการกัดรอยฟิล์มทางด้านหน้าให้นานกว่าทางด้านหลัง โดยจะทำการกัดรอยฟิล์มช่วงเวลาหนึ่งก่อนลอกฟิล์มและทำการกัดรอยซ้ำ เพื่อให้รอยของอนุภาคบนผิวฟิล์มทางด้านหน้า ที่มีขนาดเล็กกว่าได้ทำปฏิกิริยากับสารละลายที่ใช้ในการกัดรายนานกว่าทางด้านหลัง ที่มีขนาดรอยอนุภาคใหญ่กว่า เพื่อให้ได้รอยอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่าที่สัดส่วนเวลาในการกัดรอย 20 : 20 จะทำให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคทางด้านหน้าและด้านหลังใกล้เคียงกันที่สุด ซึ่งพบว่าค่าสัมบูรณ์ของผลต่างของขนาดรอยทั้งสองด้านมีค่าน้อยที่สุด คือ 0.164 ± 0.145 ไมโครเมตร

5.3 วิจัยผลการทดลอง

เนื่องจากจำนวนรอยอนุภาคที่บันทึกจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า สามารถบันทึกภาพรอยอนุภาคบนพื้นที่ของแผ่นฟิล์มเพียง 946.27 ตารางไมโครเมตร จากพื้นที่ของแผ่นฟิล์มทั้งหมดขนาด 4 ตารางเซนติเมตร ทำให้รอยอนุภาคที่คำนวณได้เป็นเพียงค่าประมาณของขนาดรอยของอนุภาคบนแผ่นฟิล์มในแต่ละเงื่อนไขของงานวิจัยเท่านั้น ทั้งนี้เพราะมีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายในการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

5.4 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองเพื่อศึกษาผลของสนามแม่เหล็กที่มีผลต่อทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา ควรทำการทดลองเปลี่ยนแท่งแม่เหล็กที่ให้ความแรงสนามแม่เหล็กต่างๆกัน เพื่อเปรียบเทียบผลของความแรงของสนามแม่เหล็กในการบังคับทิศทางการเคลื่อนที่ของอนุภาคแอลฟา ที่มีผลต่อลักษณะและเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม

2. ในการเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการกัศรอยฟิล์ม ควรเลือกกัศรอยในช่วงอุณหภูมิต่ำ เนื่องจากมีการเปลี่ยนแปลงของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคเทียบกับเวลา น้อยกว่าการกัศรอยที่อุณหภูมิสูง ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วหากมีการเปลี่ยนแปลงเวลาที่ใช้ในการกัศรอย ซึ่งทำให้การควบคุมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคบนแผ่นฟิล์มให้คงที่ทำได้ยากกว่า

3. ในการบันทึกภาพรอยอนุภาคจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ในแต่ละเงื่อนไขของงานวิจัย ควรทำการสุ่มบันทึกหลาย ๆ ตำแหน่งบนแผ่นฟิล์มก่อนนำมาคำนวณหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย เพื่อให้ค่าที่ได้ มีความใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอยอนุภาคส่วนใหญ่บนแผ่นฟิล์มมากที่สุด

รายการอ้างอิง

1. พินพรรณ วิศาลอรรถพันธ์, อินทิรา ศรีพิชัย, วิเชียร รัตนธงชัย, อารีรัตน์ คอนดวงแก้ว และสมพร จองคำ. การศึกษาประสิทธิภาพจากเปลี่ยนนิวตรอนเพื่อใช้ผลิตแผ่นกรองรูพรุนขนาดเล็ก. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร ปีที่ 27 (เมษายน 2547) : 213-226
2. วิเชียร รัตนธงชัย, พรพรรณ มรรคผล และสมพร จองคำ. แผ่นกรองฟิล์มบางจากอนุภาคของปฏิกิริยาฟิชชัน. วารสารสมาคมนิวเคลียร์แห่งประเทศไทย ปีที่ 4 (ธันวาคม 2546) : 27-46
3. D. Gopalani, S. Kumar, A.S. Jodha, R. Singh, P.K. Khatri and R. Gopal. A novel method for production of polyester films-based nuclear track microfilters. Journal of Membrane Science 178 (2000) : 93-98
4. Y.K. Vijay, N.K. Acharya, S. Wate and D.K. Avasthi. Nanofilter for hydrogen purification. International Journal of Hydrogen Energy 28 (2003) : 1015 - 1018
5. C.W.Y. Yip, J.P.Y. Ho, V.S.Y. Koo, D. Nikezic and K.N. Yu. Effects of stirring on the bulk etch rate of LR 115. Applied radiation and Isotope 56 (2002) : 953 – 956
6. ชันทอง สุนทรภา. เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2547.
7. GE Water and Process Technology. Membrane filter. [Online]. Available from : http://www.gewater.com/products/equipment/mf_uf_mbr/mf.jsp. [2006, march 3]
8. R.L. Fleischer, P.B. Price and R.M.Walker. Nuclear Tracks in Solids : Principles and Applications. California : University of California Press, 1975
9. H. Berger. Neutron Radiography. Amsterdam : Elsevier Publishing Company, 1975.
10. นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ. วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545
11. T. Chittrakarn, T. Bhongsuwan, P. Wanichapichart, P.Nuanuin, S. Chongkum, A.Khonduangkaew and S. Bordepong. Nuclear track-etched pore membrane production using neutron from the Thai research reactor TRR-1/M1. Songklanakarin J. Sci. Technology 24 (2002) : 863-870
12. L. Koester and W.B. Yelon. Practical Neutron Radiography. Dordrecht , Natherland : Kluwer Academic Publishers, 1992.
13. D.A. Garret, and H. Berger. The Technological Development of Neutron Radiography. Atomic Energy Review 15 (1977) : 1325-141

14. M.R. Hawkesworth. Neutron radiography : Equivalent and methods. Atomic Enregy Review 15 (1977) :169-220
15. ภาควิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยราชวมงคล. ไฟฟ้า-แม่เหล็ก. [Online] Available from : <http://www.rmutphysics.com/CHARUD/scibook/electromagnetic1/electromagindex3.htm>. [2006, March 3]
16. ศราวุธ ใจเย็น. การพัฒนาต้นแบบระบบการถ่ายภาพด้วยเทอร์มินิวตรอนโดยใช้แคลิฟอร์เนียม-252. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545
17. สิทธิชัย สุนันท์ศิริกุล. ผลของการลบล้างของรอยอนุภาคแอลฟาจากก๊าซเรดอนบนฟิล์มเซลลูโลสไนเตรต. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต, ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณานุกรม

ภาษาไทย

นเรศ จันทร์ขาว. ศึกษาการสำรวจยูเรเนียมด้วยวิธีแทรค-เอทซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2522

ณรงค์ ซอนตะวัน. การศึกษาและออกแบบสร้างเครื่องนับรอยรังสีแอลฟาบนฟิล์ม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2523

ภาษาอังกฤษ

K. L. Tung, J.L. Chang and C. J. Chuang. Effect of Pore Morphology on Fluid Flow Through Track-Etched Polycarbonate Membrane. Tamkang Journal of Science and Engineering 4 (2001) : 127-132

Satorius Coporation. Satorius Microfilter Product Overview. [Online] Available from : http://www.sartorius.com/fileadmin/sartorius_pdf/Prospekt/englisch/Broch_Microfilters SM-1503-e.pdf [2006, Marth 3]

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

การหาพิสัยของอนุภาคแอลฟาในฟิล์มเซลล์ูโลสในเตรท

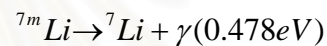
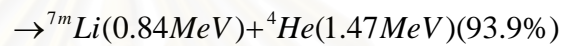
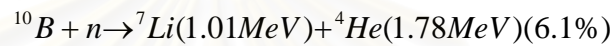
ความหนาแน่นของฟิล์ม เซลล์ูโลสในเตรท

$$\rho = 1.490 \text{ g/cm}^3$$

เลขเชิงมวลของฟิล์มเซลล์ูโลสในเตรท

$$A = 9.372 \text{ mg/cm}^3$$

ก.1 อนุภาคแอลฟาจากปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$



จะเห็นว่าพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยาดังกล่าว มีค่า 1.47 MeV เป็นสัดส่วนที่สูงถึง 93.9%

คำนวณพิสัยของอนุภาคแอลฟาในอากาศ

$$\begin{aligned} R(\text{cm}) &= 0.56E(E < 4\text{MeV}) \\ &= 0.56 \times 1.47 \\ &= 0.823 \end{aligned}$$

โดยพิสัยของอนุภาคแอลฟาในเซลล์ูโลสในเตรท สามารถคำนวณได้จาก

$$\begin{aligned} R_m &= 0.56A^{1/3}R_{air} \\ &= 0.56 \times (9.372)^{1/3} \times 0.823 \\ &= 0.972(\text{mg} / \text{cm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก } R &= \frac{R_m}{\rho} \\ &= \frac{0.972 \times 10^{-3} (\text{mg} / \text{cm}^2)}{1.490 (\text{g} / \text{cm}^3)} \\ &= 6.523 \mu\text{m} \end{aligned}$$

จากผลการคำนวณค่าพิสัย จะเห็นได้ว่าพลังงานของอนุภาคแอลฟาจากอันตรกิริยาดังกล่าวไม่เพียงพอที่จะทะลุผ่านแผ่นฟิล์มเซลล์ูโลสในเตรทหนา 12 μm ได้

ก.2 อนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจาก ^{241}Am

^{241}Am จะปลดปล่อยอนุภาคแอลฟาพลังงาน 5.545 MeV (100%)

^{241}Am จะปลดปล่อยแกมมาพลังงาน 0.06 MeV (35.7%) ถึง 0.026 MeV (2.4%)

Physical half life = 458 ปี

Biological half life = 50 ปี

Effective half life = 45 ปี

สามารถคำนวณพิสัยของอนุภาคแอลฟาในอากาศได้จาก

$$\begin{aligned} R(\text{cm}) &= 1.24E - 2.62 (4 \leq E \leq 8 \text{MeV}) \\ &= 1.24(5.545) - 2.62 \\ &= 4.256 \end{aligned}$$

โดยสามารถคำนวณพิสัยของอนุภาคแอลฟาในฟิล์มเซลล์ลูโลสในเตรทได้จาก

$$\begin{aligned} R_m &= 0.56A^{1/3}R_{air} \\ &= 0.56 \times (5.618)^{1/3} \times 4.256 \\ &= 4.237 (\text{mg} / \text{cm}^2) \end{aligned}$$

จาก $R = \frac{R_m}{\rho}$

$$\begin{aligned} &= \frac{4.237 \times 10^{-3} (\text{mg} / \text{cm}^2)}{1.490 (\text{g} / \text{cm}^3)} \\ &= 28.436 \mu\text{m} \end{aligned}$$

จากการคำนวณ จะเห็นว่าอนุภาคแอลฟาที่ปลดปล่อยจาก ^{241}Am มีพลังงานสูงพอที่จะทะลุผ่านแผ่นฟิล์มเซลล์ลูโลสในเตรทหนา $12 \mu\text{m}$ ได้

ดังนั้นค่าพลังงานของอนุภาคแอลฟาที่น้อยที่สุดที่สามารถทะลุแผ่นฟิล์มได้ คือ

$$\begin{aligned} R_m &= R \times \rho \\ &= (12 \times 10^{-4}) \times 1.490 \\ &= 17.88 (\text{g} / \text{cm}^2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} R_{air} &= \frac{R_m}{0.56A^{1/3}} \\ &= \frac{1.788}{0.56 \times (5.618)^{1/3}} \\ &= 1.796 \text{cm} \\ E &= \frac{R_{air} + 2.62}{1.24} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1.796 + 2.62}{1.24} \\ &= 3.561 \text{ MeV} \end{aligned}$$

จากการคำนวณ สามารถสรุปได้ว่า อนุภาคแอลฟาจะต้องมีพลังงานอย่างน้อยที่สุด 3.561 MeV จึงจะสามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มเซลลูโลสในเตรทหนา 12 ไมโครเมตร ได้



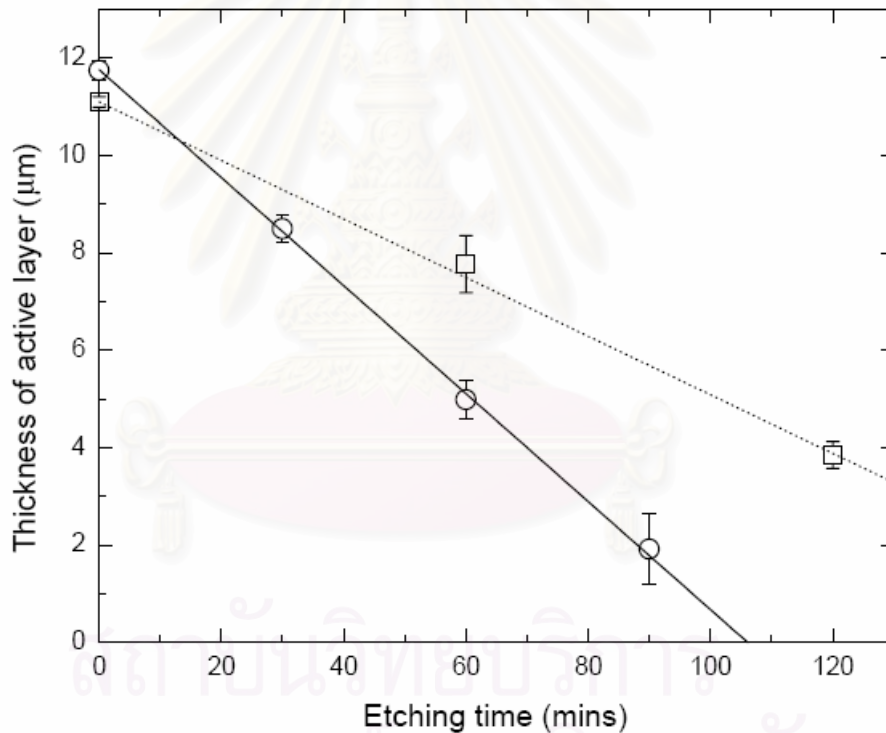
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแผ่นฟิล์มกับเวลาที่ใช้ในการกัดรอย

จากผลการวิจัยของ C.W.Y. Yip และคณะ แห่งมหาวิทยาลัยฮ่องกง พบว่าความหนาของผิวฟิล์ม LR-115 ด้าน Active layer จะมีค่าลดลงเมื่อเวลาในการกัดรอยเพิ่มขึ้น

ซึ่งจากผลการทดลอง กัดรอยผิวฟิล์ม LR-115 type 2 ขนาด $1.5 \times 1.5 \text{ cm}^2$ กำหนดเงื่อนไขในการกัดรอย ที่ 10% NaOH อุณหภูมิในการกัดรอย 60 องศาเซลเซียส เวลาในการกัดรอย 0 – 120 นาที เปรียบเทียบระหว่างการกัดรอยปกติ กับการใช้เครื่อง Magnetic stirring ช่วยในการกวนสารละลาย ซึ่งภาคตัดขวางของฟิล์มจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถนำมาใช้ในการคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดรอย กับความหนาของแผ่นฟิล์มที่ลดลงได้ดังรูปที่ ข.1



รูปที่ ข.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการกัดรอยกับความหนาของแผ่นฟิล์มที่ลดลงเปรียบเทียบระหว่างการกัดรอยปกติ กับการใช้เครื่อง Magnetic stirring ช่วยในการกวนสารละลาย

จากกราฟสามารถสร้างสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการสกัดกับความหนาของแผ่นฟิล์มที่ลดลง ได้ดังสมการ

$$Y = A + BX$$

เมื่อ Y คือ ความหนาของแผ่นฟิล์ม (μm)

X คือ เวลาที่ใช้ในการสกัดผิวฟิล์ม (นาที)

สำหรับค่าคงที่ A และ B นั้น จากการผลการทดลองสามารถหาความสัมพันธ์ได้ดังนี้

เมื่อทำการสกัดผิวฟิล์มตามปกติ

$$A = 11.11 \pm 0.11$$

$$B = -0.062 \pm 0.0024$$

เมื่อใช้เครื่อง Magnetic stirring ช่วยในการกวนสารละลาย

$$A = 11.77 \pm 0.19$$

$$B = -0.1109 \pm 0.0057$$

ดังนั้นหากต้องการลดความหนาของแผ่นฟิล์ม จาก 12 ไมโครเมตร เหลือเพียง 6.5 ไมโครเมตร เพื่อให้อนุภาคแอลฟาพลังงาน 1.47 MeV จากปฏิกิริยา $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ สามารถเคลื่อนที่ทะลุผ่านแผ่นฟิล์มได้ สามารถคำนวณได้จาก

$$Y = A + BX$$

$$X = \frac{Y - A}{B}$$

$$= \frac{6.5 - 11.11}{(-0.0602)}$$

$$= 76.58 \text{ min}$$

หรือประมาณ 75 นาที

ภาคผนวก ค

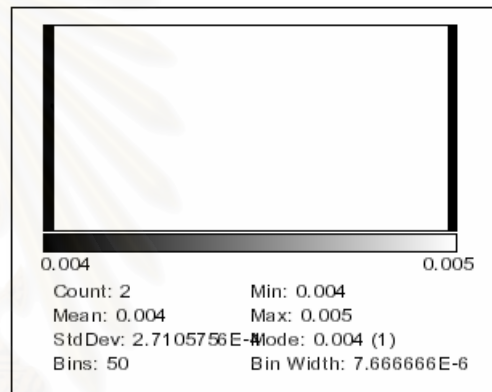
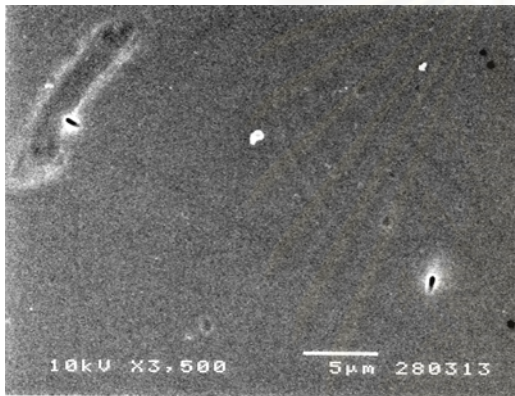
ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน และHistogram แสดงผลการหาขนาดของรูบนแผ่นฟิล์มจากโปรแกรม Image J

ค.1 ลักษณะของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มัลนิวตรอนจาก ^{252}Cf

อาบนิวตรอน 5 ชั่วโมง ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน 9 เซนติเมตร

เงื่อนไขการกัดรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 10 นาที



ด้านหน้า

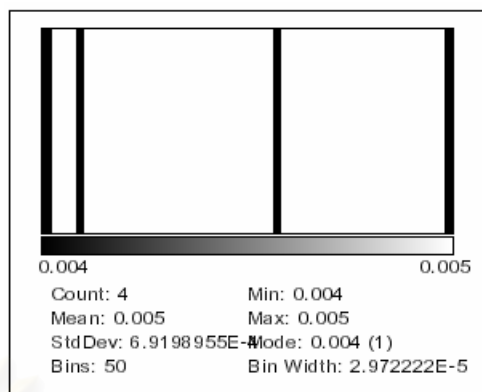
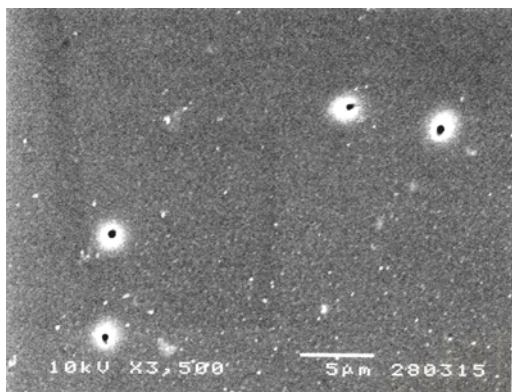


ไม่เกิดรอย

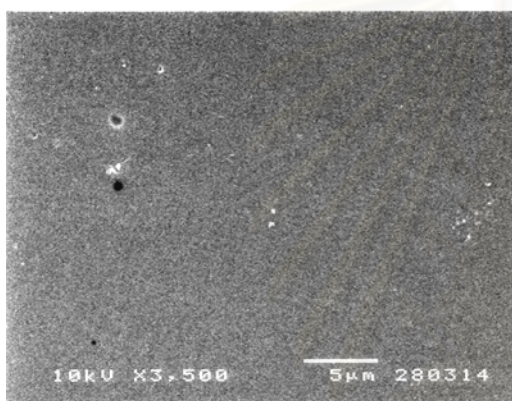
ด้านหลัง

รูปที่ ค.1 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มัลนิวตรอนจาก ^{252}Cf

เวลาในการกัศรอย 20 นาที



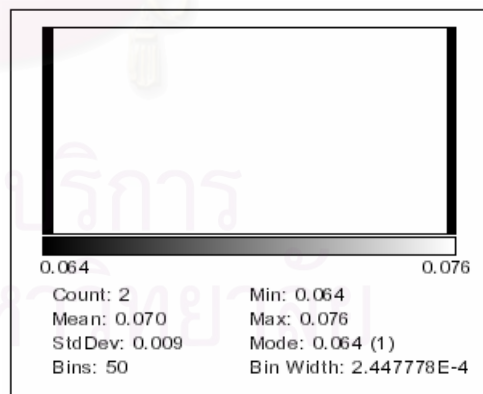
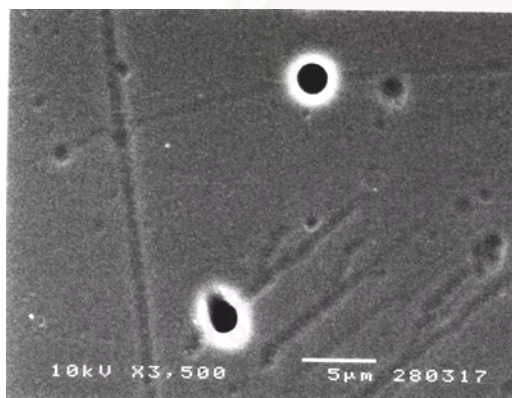
ด้านหน้า



ไม่เกิดรอย

ด้านหลัง

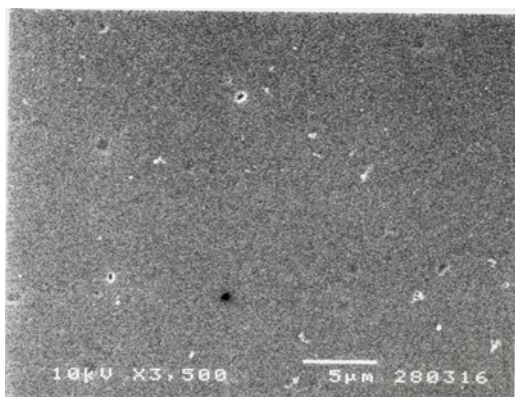
เวลาในการกัศรอย 30 นาที



ด้านหน้า

รูปที่ ค.1 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มัลนิวตรอนจาก ^{252}Cf

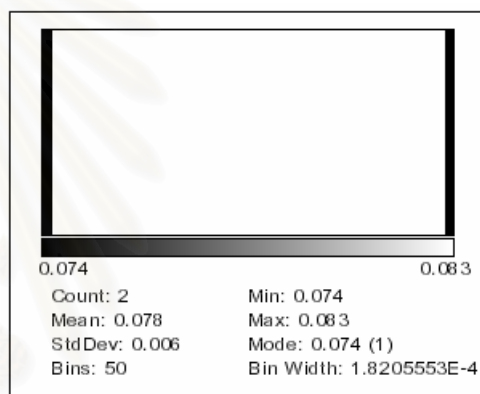
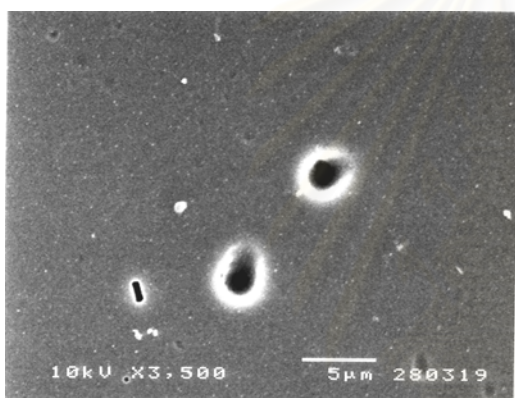
เวลาในการกัศรอย 30 นาที (ต่อ)



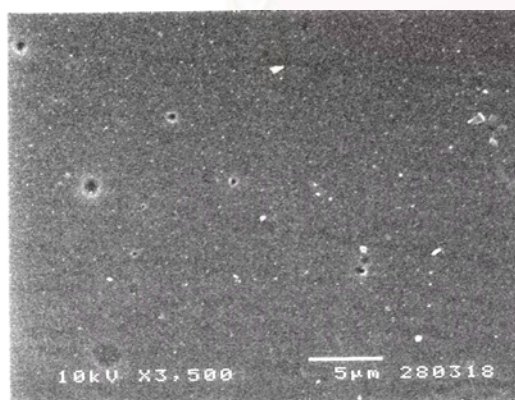
ไม่เกิดรอย

ด้านหลัง

เวลาในการกัศรอย 40 นาที



ด้านหน้า

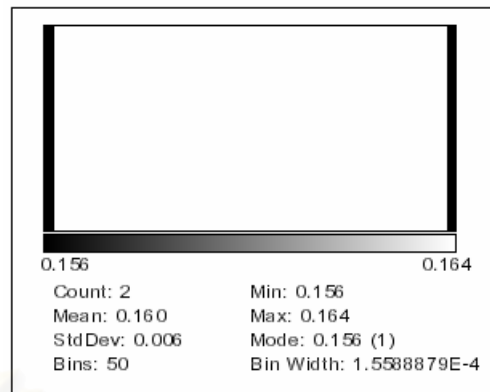
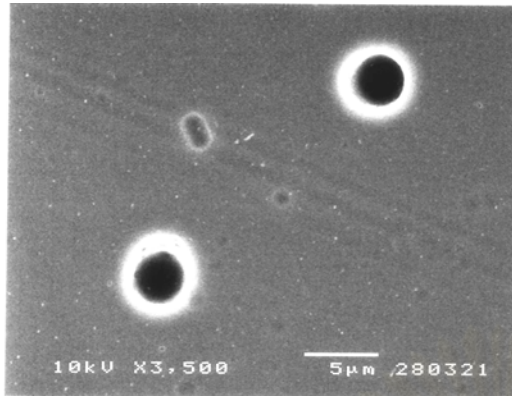


ไม่เกิดรอย

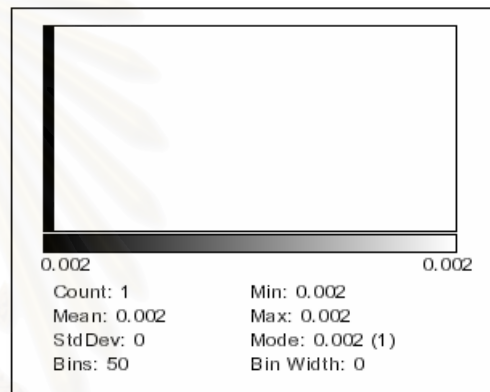
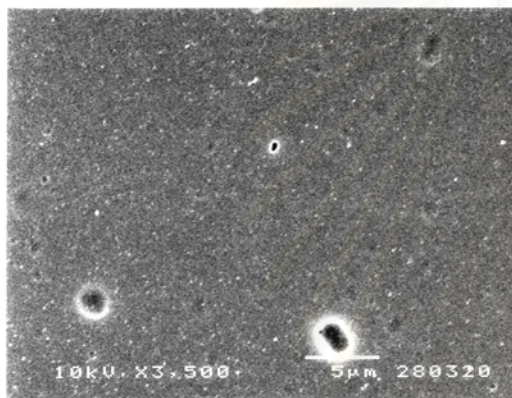
ด้านหลัง

รูปที่ ค.1 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มินิวตรอนจาก ^{252}Cf

เวลาในการกัศรอย 50 นาที

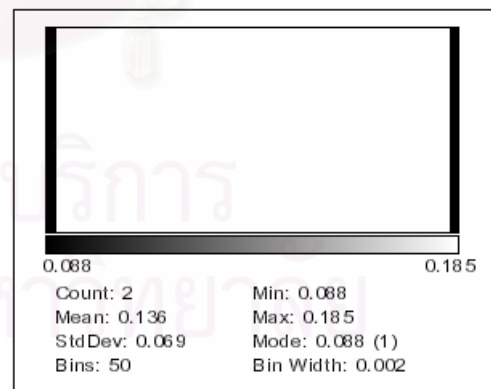


ด้านหน้า



ด้านหลัง

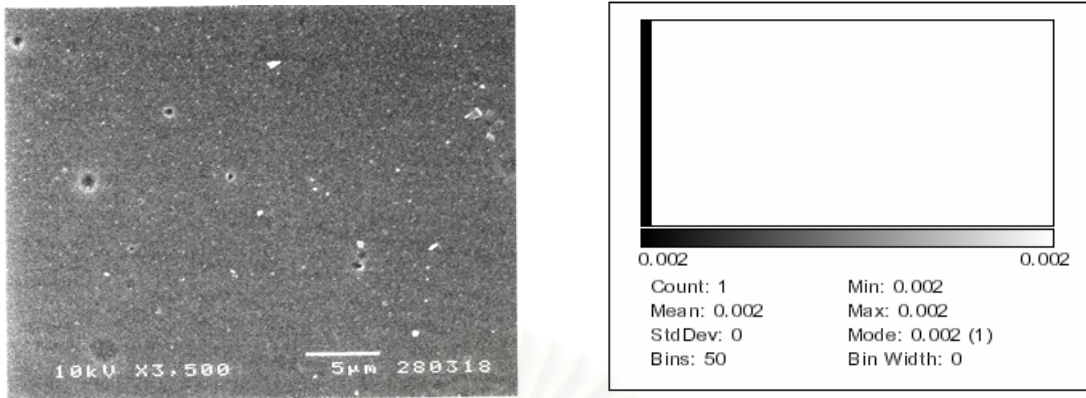
เวลาในการกัศรอย 60 นาที



ด้านหน้า

รูปที่ ค.1 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มัลนิวตรอนจาก ^{252}Cf

เวลาในการกัดรอย 60 นาที (ต่อ)

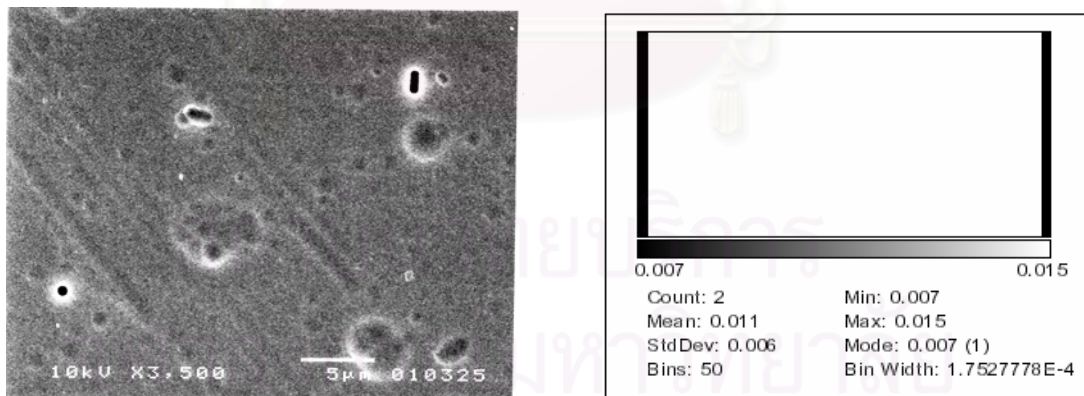


ด้านหลัง

รูปที่ ค.1 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มินิวตรอนจาก ^{252}Cf

ค.2 ลักษณะของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มินิวตรอนจาก ^{252}Cf กัดผิวฟิล์มก่อนอบนิวตรอนด้วย NaOH 10% อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 75 นาที อบนิวตรอน 5 ชั่วโมง ระยะห่างจากต้นกำเนิดนิวตรอน 9 เซนติเมตร
เงื่อนไขการกัดรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

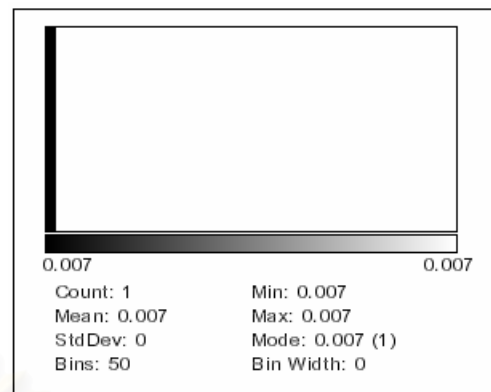
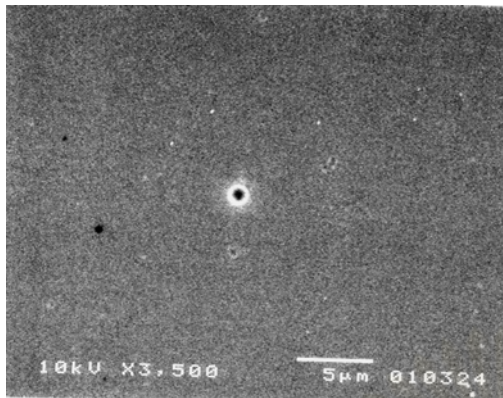
เวลาในการกัดรอย 10 นาที



ด้านหน้า

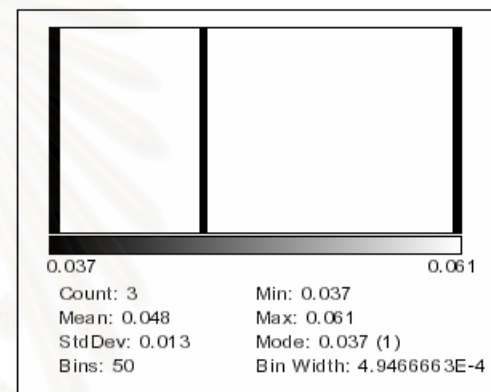
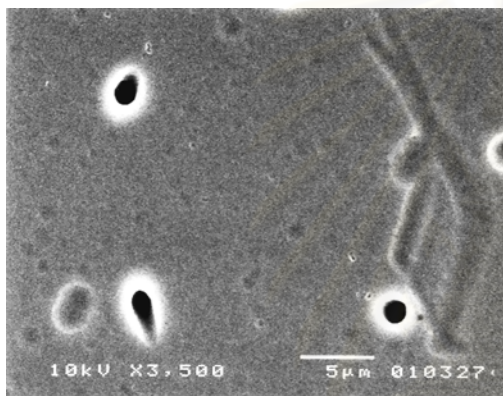
รูปที่ ค.2 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มินิวตรอนจาก ^{252}Cf เมื่อทำการกัดผิวฟิล์มด้วย 10% NaOH ก่อนการอบนิวตรอนเป็นเวลา 75 นาที

เวลาในการกัดรอย 10 นาที (ต่อ)

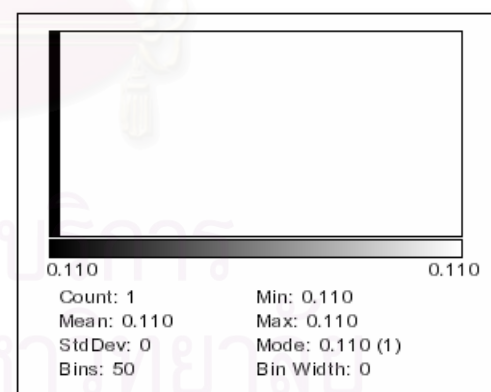
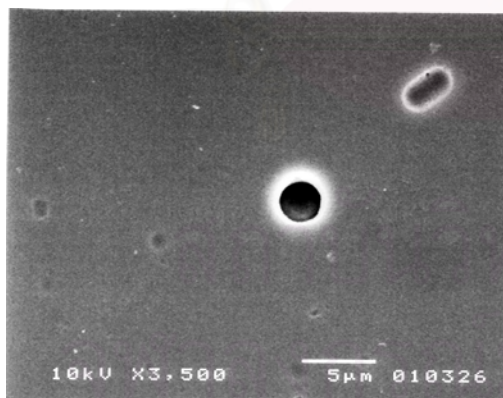


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 20 นาที



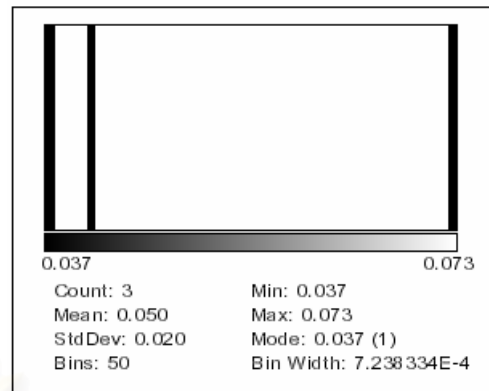
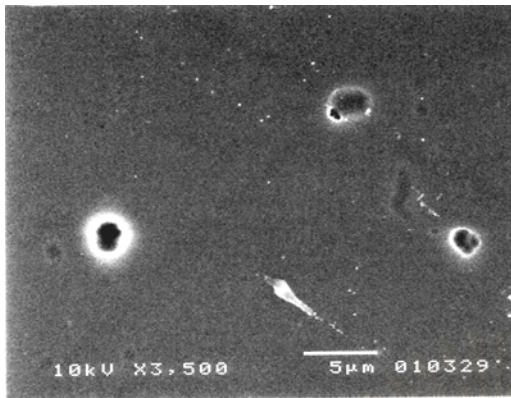
ด้านหน้า



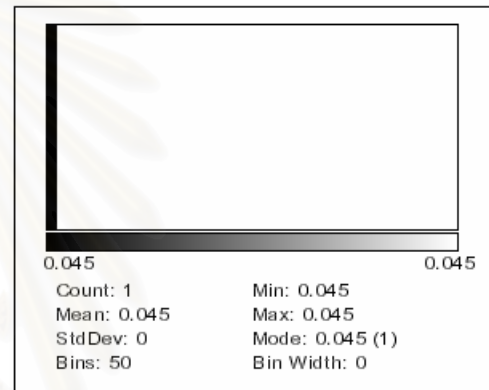
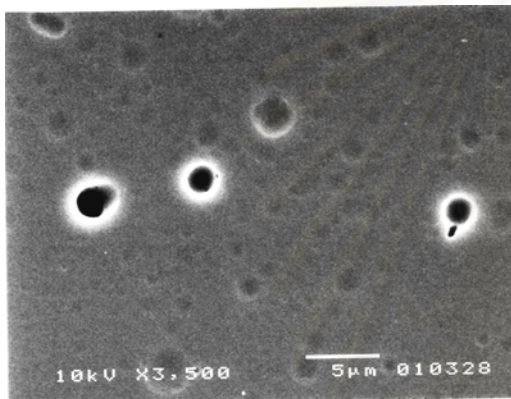
ด้านหลัง

รูปที่ ค.2 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มัลนิวตรอนจาก ^{252}Cf เมื่อทำการกัดผิวฟิล์มด้วย 10% NaOH ก่อนการอบนิวตรอนเป็นเวลา 75 นาที เวลาในการกัดรอย 30 นาที

เวลาในการกัดรอย 30 นาที



ด้านหน้า



ด้านหลัง

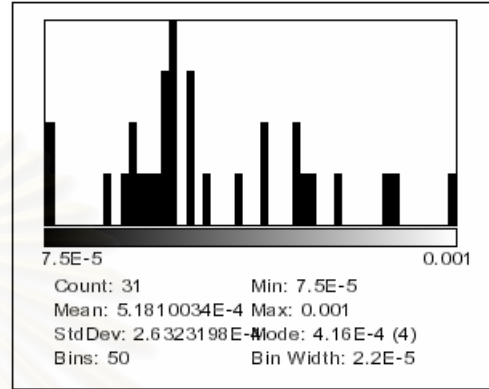
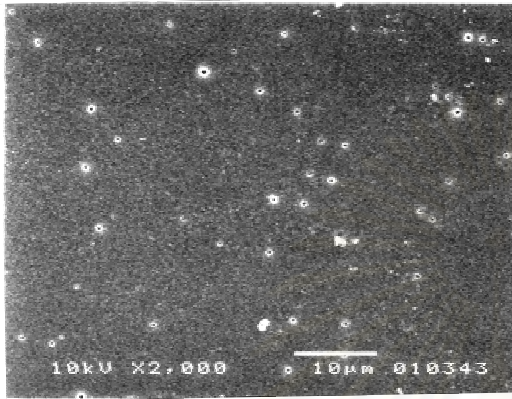
รูปที่ ค.2 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของเทอร์มัลนิวตรอนจาก ^{252}Cf เมื่อทำการกัดผิวฟิล์มด้วย 10% NaOH ก่อนการอบนิวตรอนเป็นเวลา 75 นาที เวลาในการกัดรอย 30 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

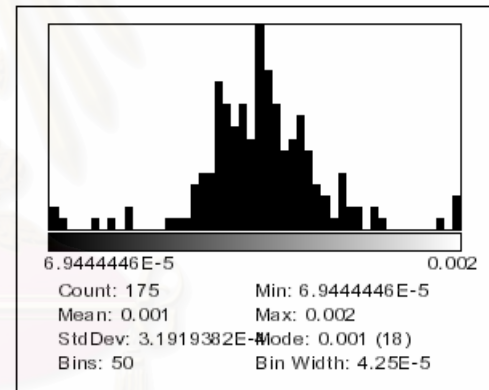
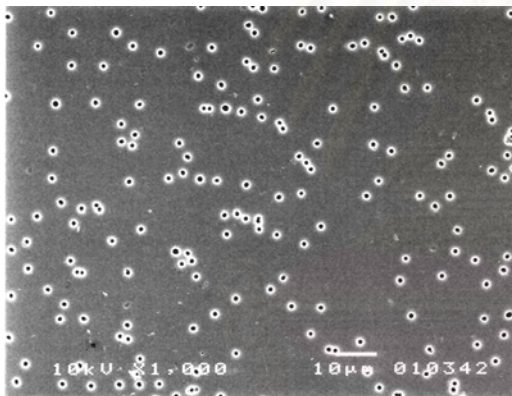
ค.3 ลักษณะของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am

ค.3.1 เงื่อนไขการกัดกรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
เวลาในการกัดกรอย 30 นาที

เวลาในการอบฟิล์ม 30 นาที



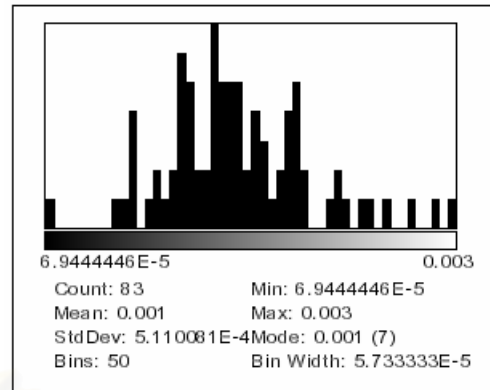
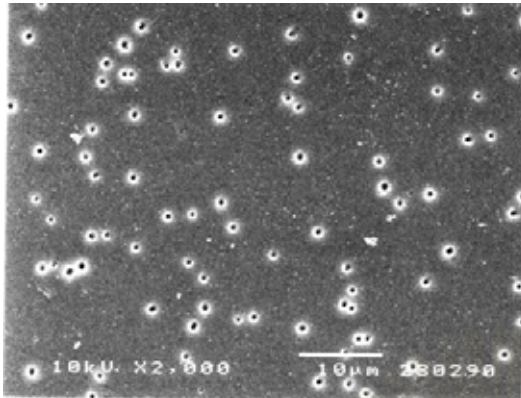
ด้านหน้า



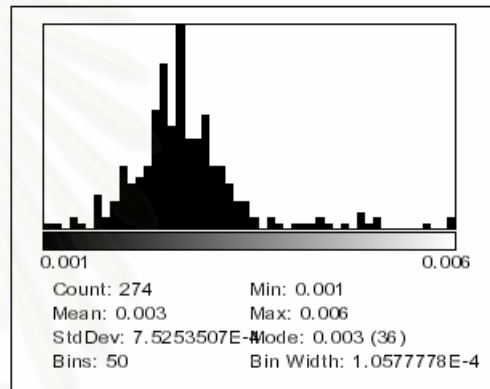
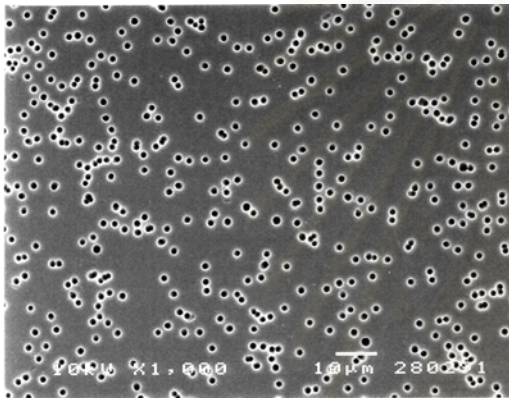
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.1 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดกรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มที่มีผลต่อความหนาแน่นของรูบนแผ่นฟิล์ม

เวลาในการอบฟิล์ม 60 นาที

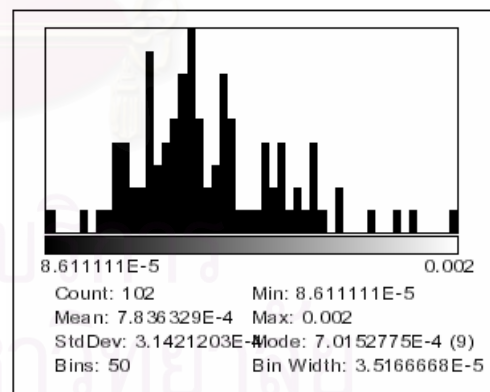
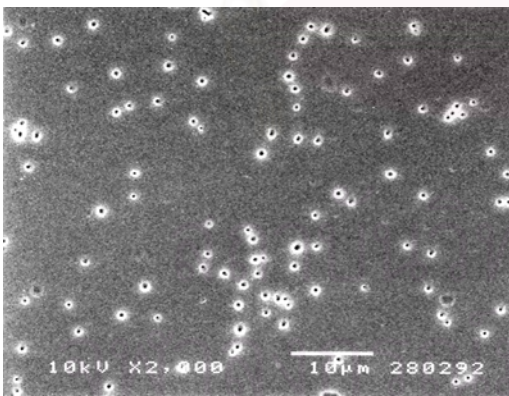


ด้านหน้า



ด้านหลัง

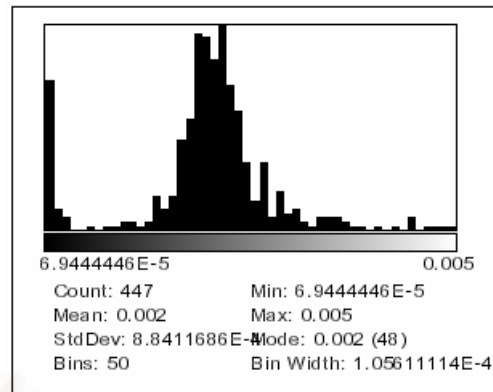
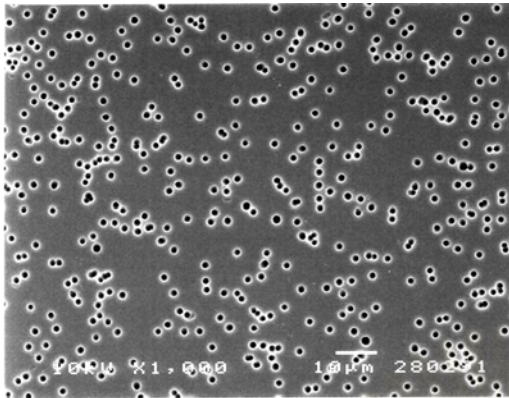
เวลาในการอบฟิล์ม 90 นาที



ด้านหน้า

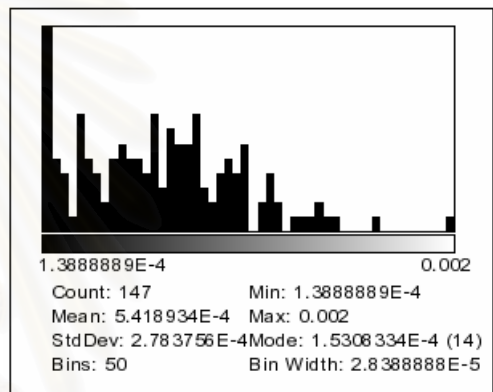
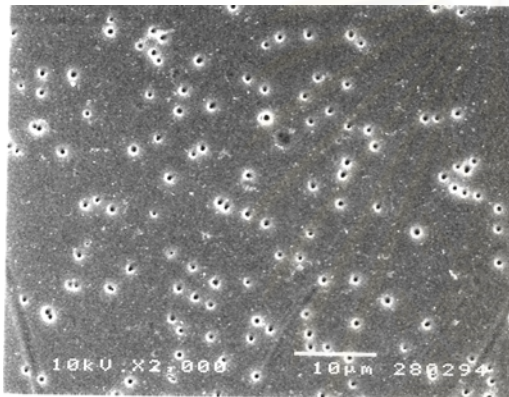
รูปที่ ค.3.1 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า ของแผ่นกรองชนิด แทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอย ด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มที่มีผลต่อความหนาแน่นของรูบนแผ่นฟิล์ม

เวลาในการอบฟิล์ม 90 นาที (ต่อ)

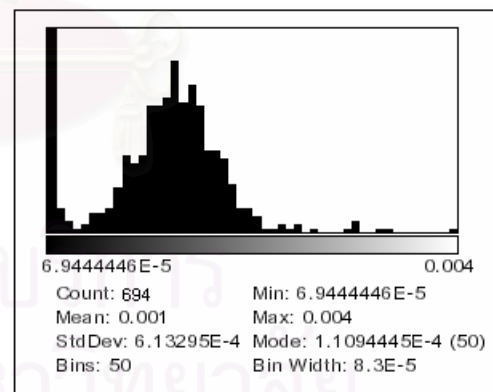
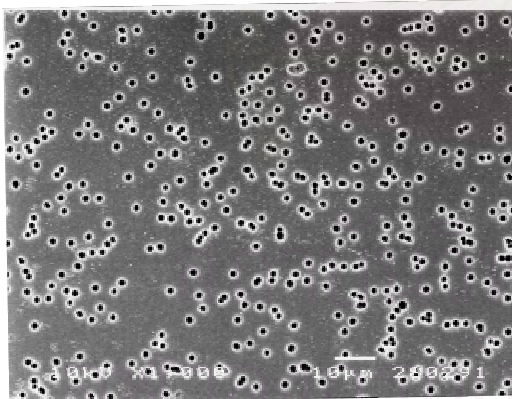


ด้านหลัง

เวลาในการอบฟิล์ม 120 นาที



ด้านหน้า

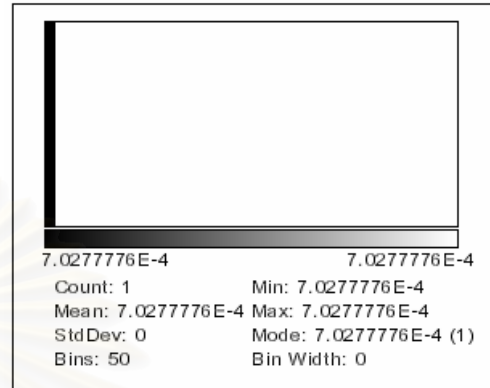
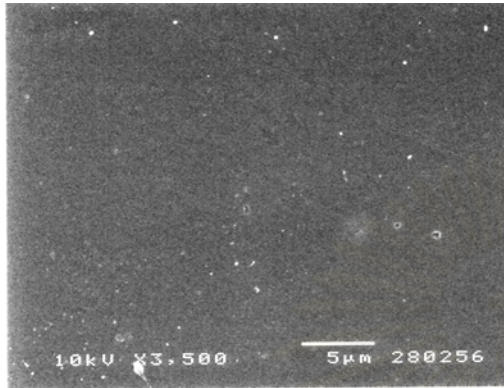


ด้านหลัง

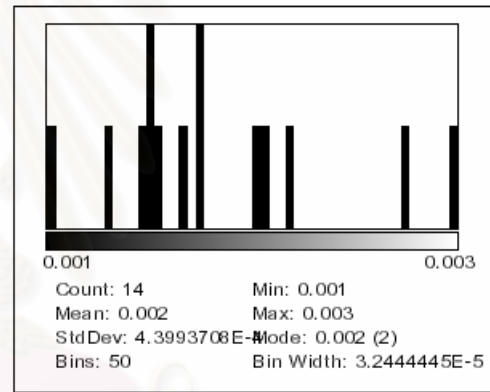
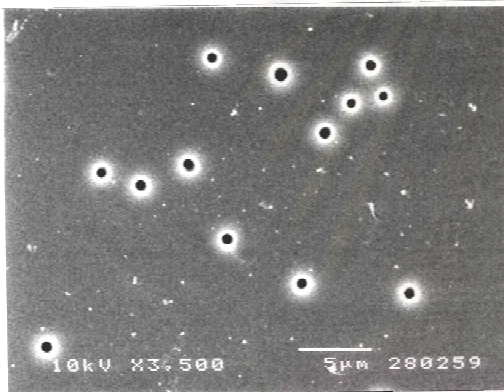
รูปที่ ค.3.1 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 1,000 และ 2,000 เท่า ของแผ่นกรองชนิด แทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอย ด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที เปรียบเทียบระยะเวลาที่ใช้ในการอบฟิล์มที่มีผลต่อความหนาแน่นของรูบนแผ่นฟิล์ม

ค.3.2 อาบฟิล์ม 30 นาที ระยะห่างจากต้นกำเนิดแอลฟา 2 เซนติเมตร
เงื่อนไขการกัดรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 10 ชั่วโมง

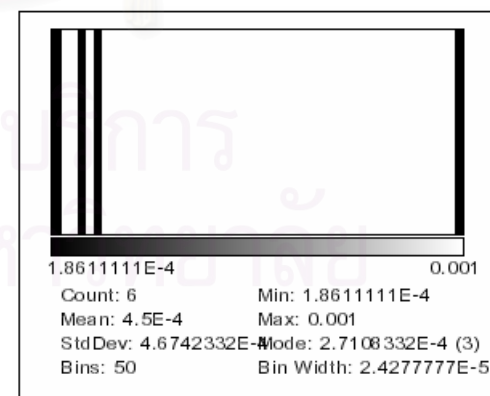
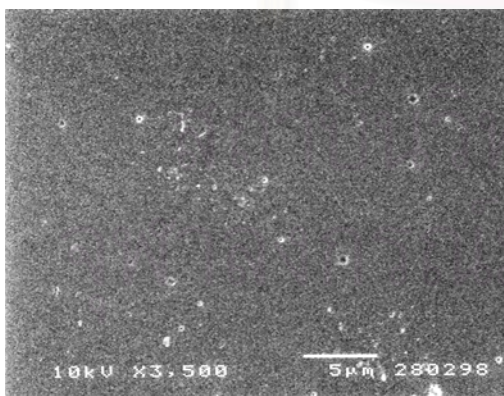


ด้านหน้า



ด้านหลัง

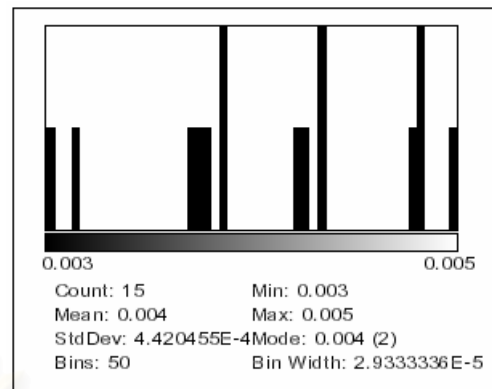
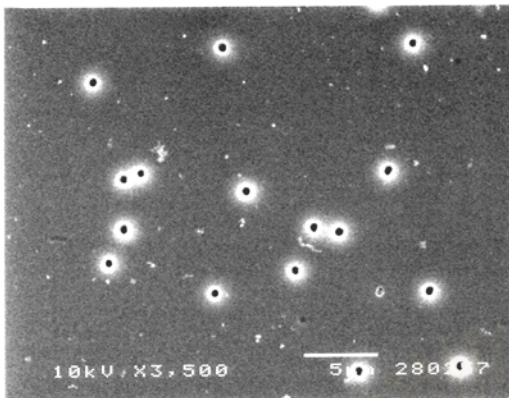
เวลาในการกัดรอย 15 ชั่วโมง



ด้านหน้า

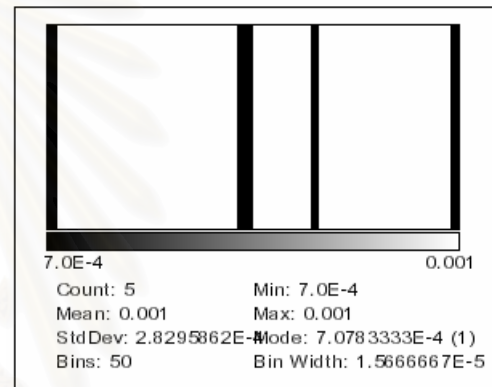
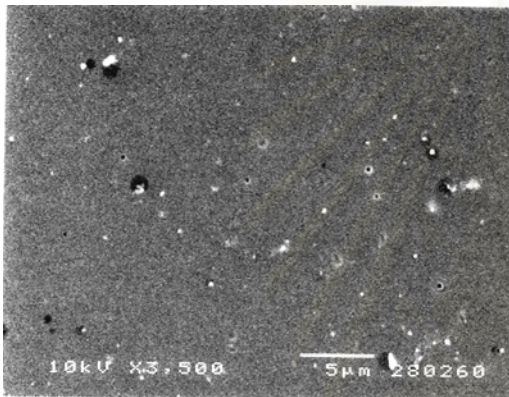
รูปที่ ค.3.2 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดเทรค-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 15 ชั่วโมง (ต่อ)

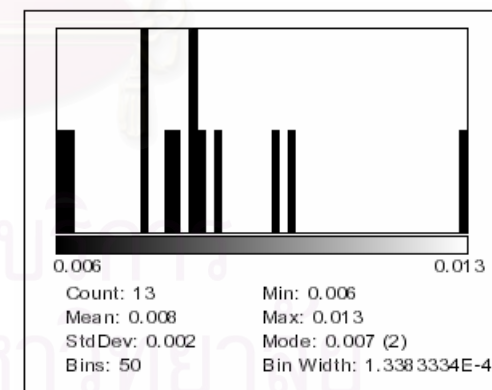
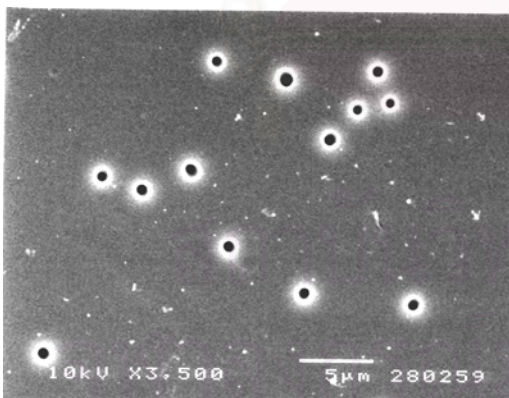


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 20 ชั่วโมง



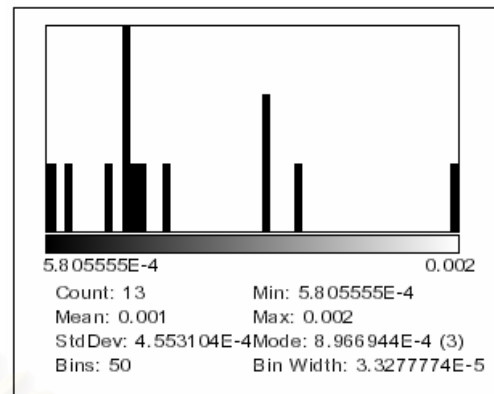
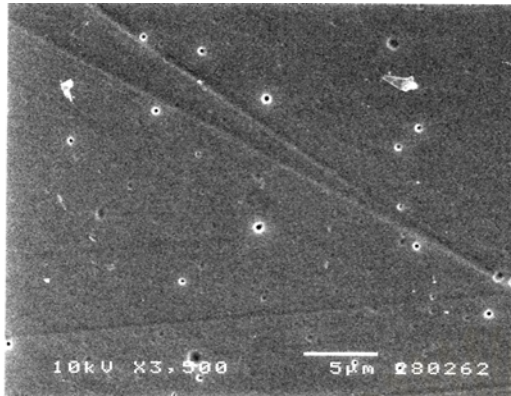
ด้านหน้า



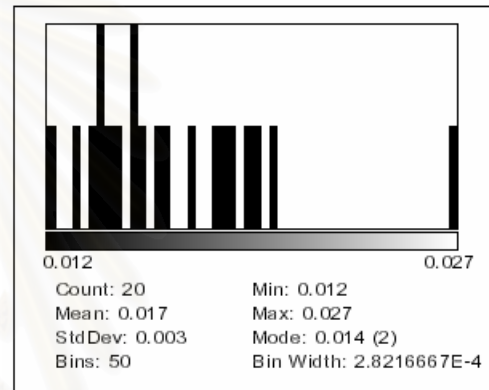
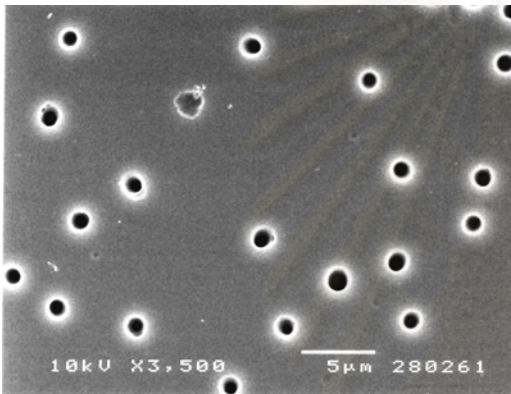
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.2 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เวลาในการกักรอย 25 ชั่วโมง

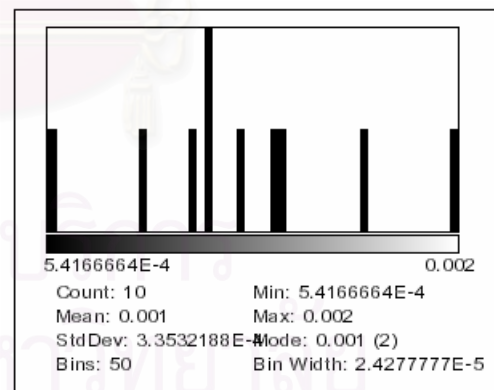
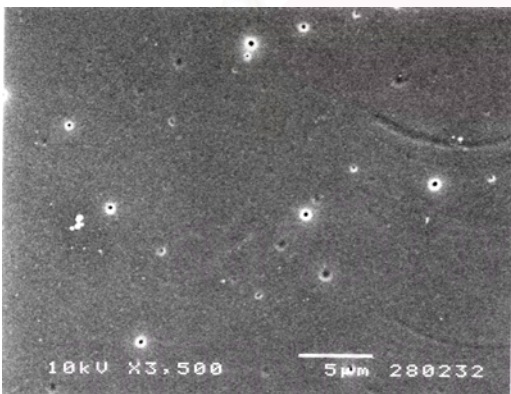


ด้านหน้า



ด้านหลัง

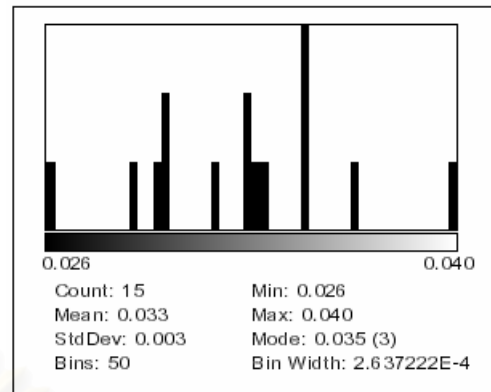
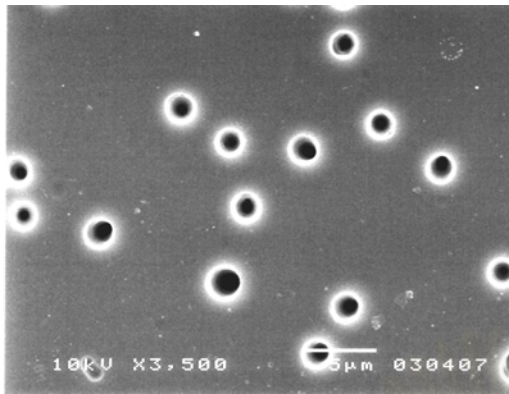
เวลาในการกักรอย 30 ชั่วโมง



ด้านหน้า

รูปที่ ค.3.2 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกักรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 30 ชั่วโมง (ต่อ)

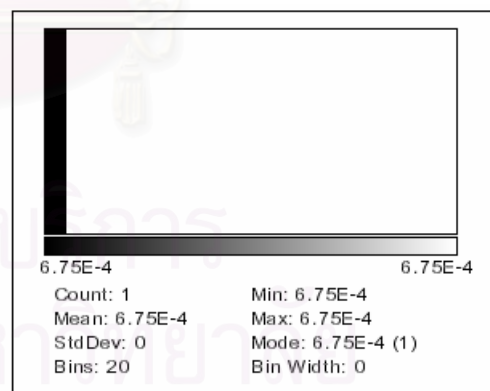
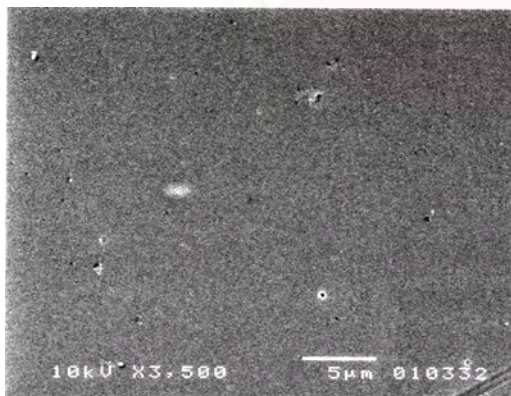


ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.2 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส

ค.3.3 อาบฟิล์ม 30 นาที ระยะห่างจากต้นกำเนิดแอลฟา 2 เซนติเมตร
เงื่อนไขการกัดรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

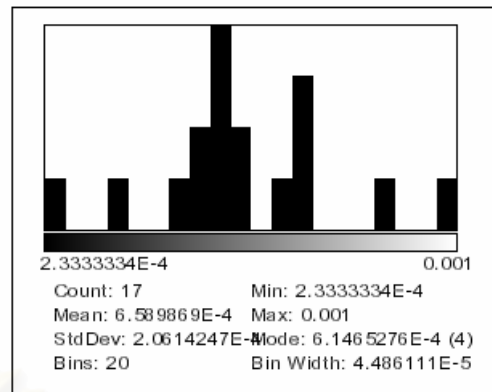
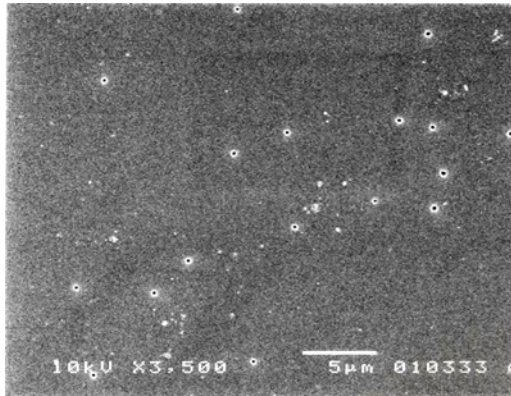
เวลาในการกัดรอย 50 นาที



ด้านหน้า

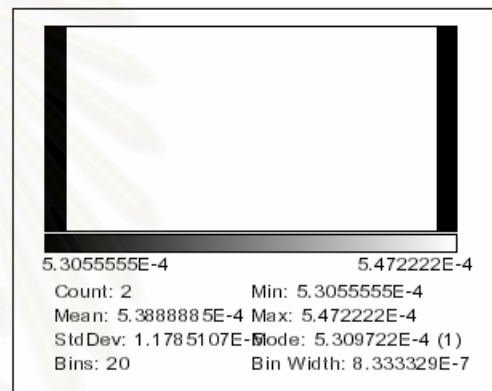
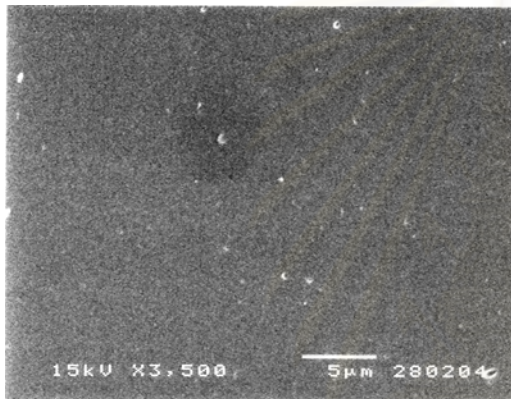
รูปที่ ค.3.3 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 50 นาที (ต่อ)

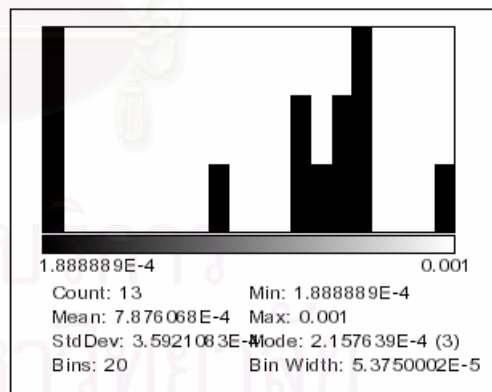
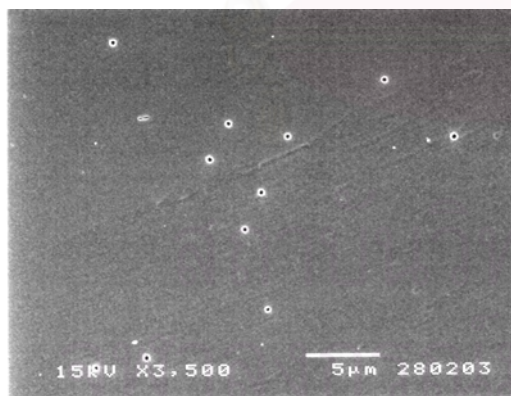


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 60 นาที



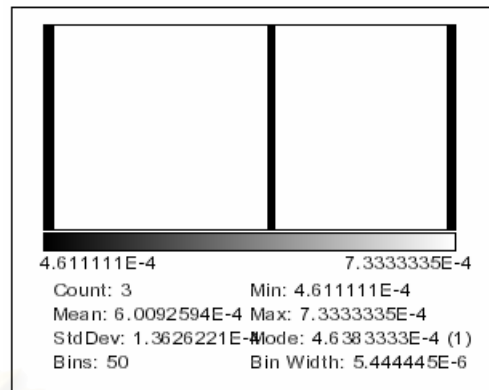
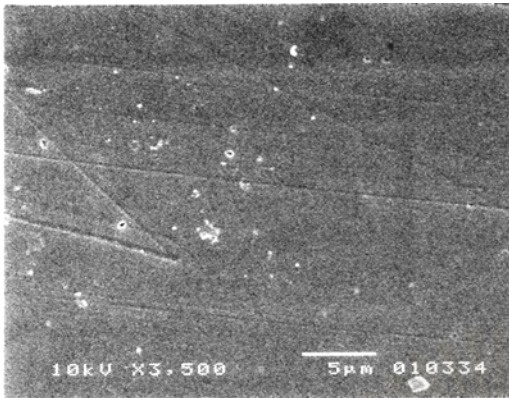
ด้านหน้า



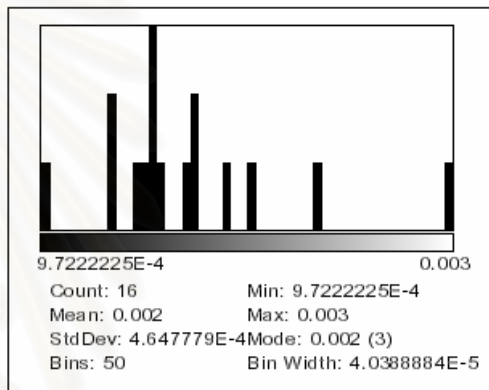
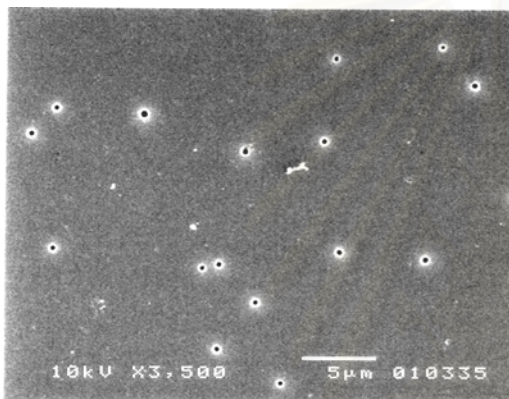
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.3 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัศรอย 70 นาที

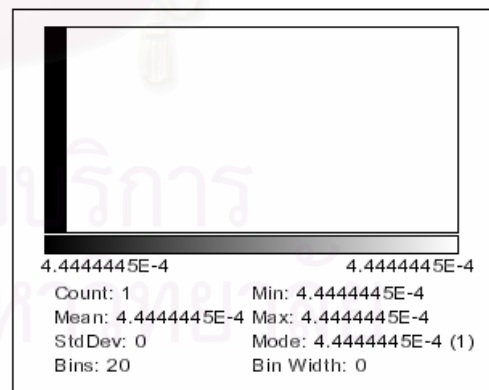


ด้านหน้า



ด้านหลัง

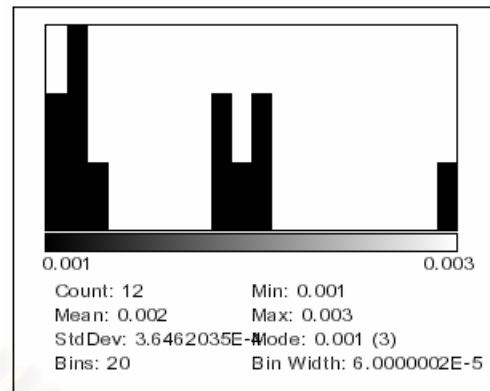
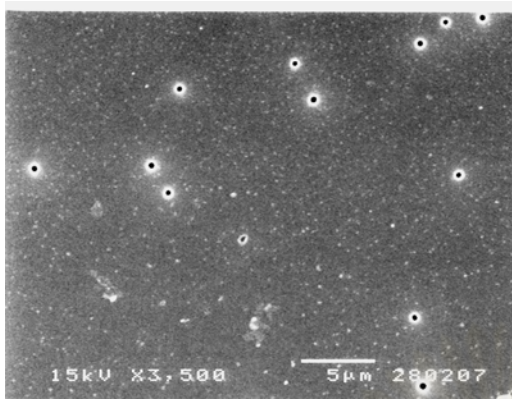
เวลาในการกัศรอย 80 นาที



ด้านหน้า

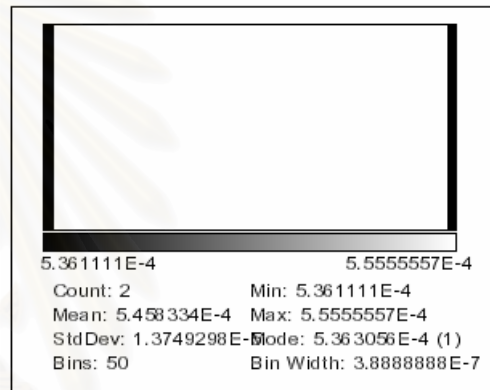
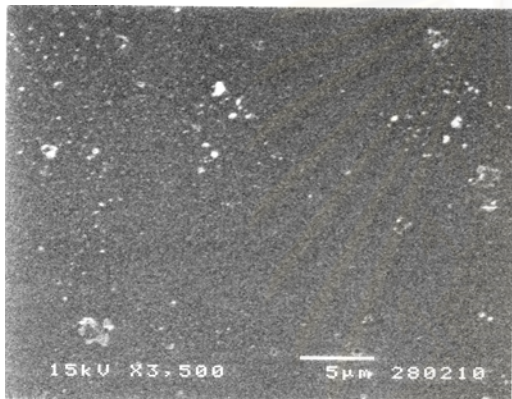
รูปที่ ค.3.3 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัศรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 80 นาที (ต่อ)

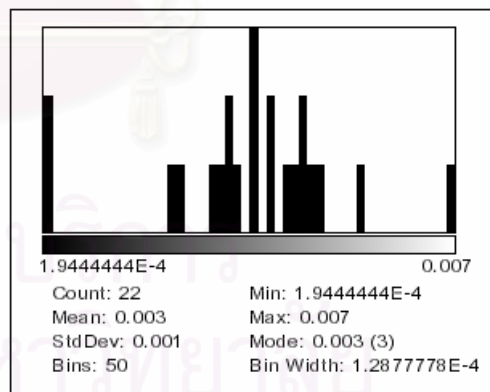
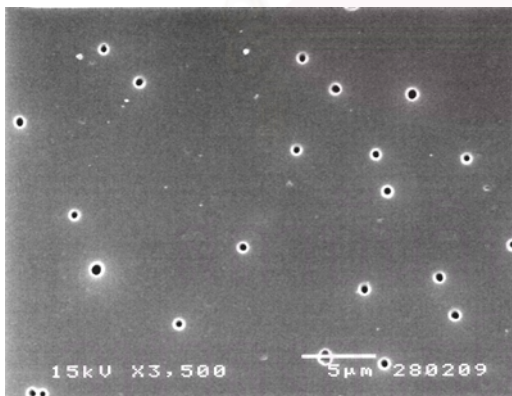


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 90 นาที



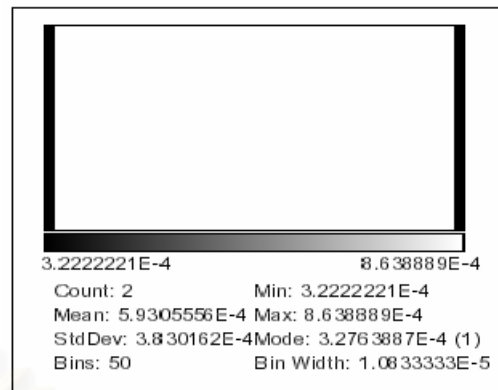
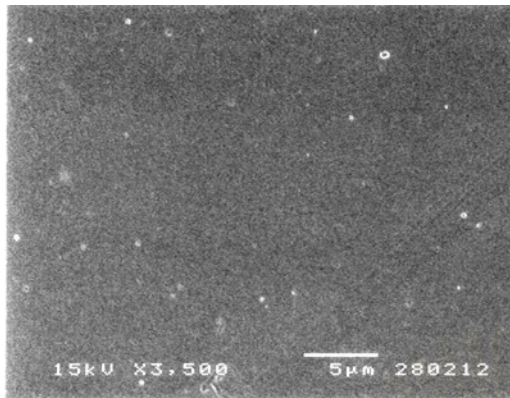
ด้านหน้า



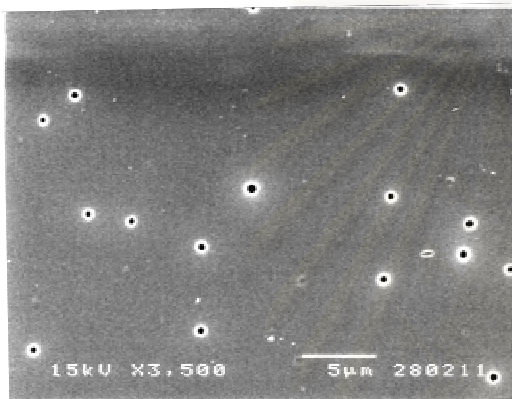
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.3 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัศรอย 100 นาที

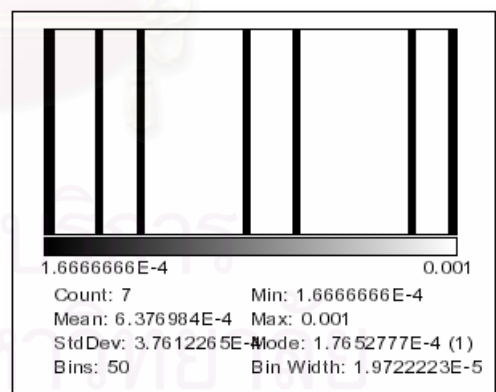
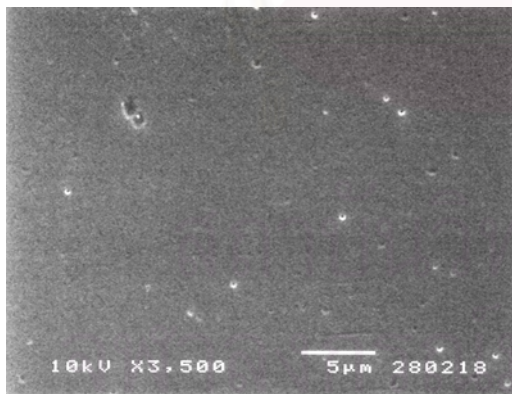


ด้านหน้า



ด้านหลัง

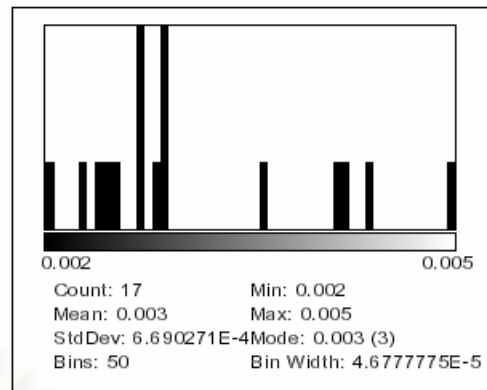
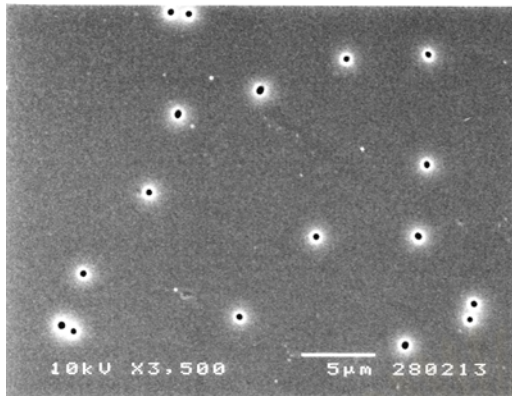
เวลาในการกัศรอย 110 นาที



ด้านหน้า

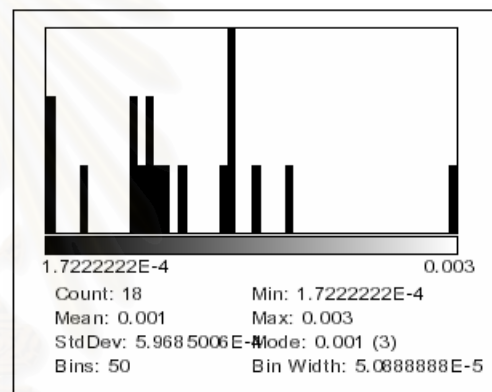
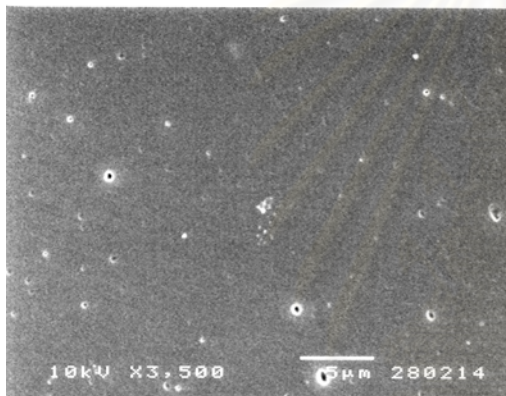
รูปที่ ค.3.3 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดเทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัศรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 110 นาที (ต่อ)

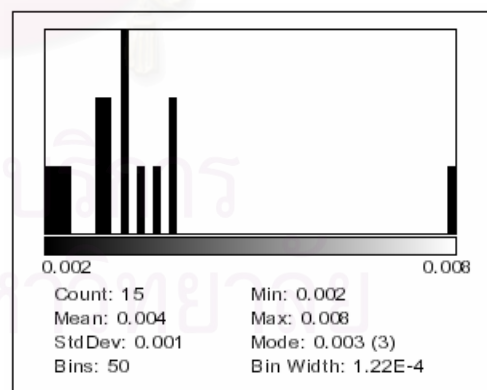
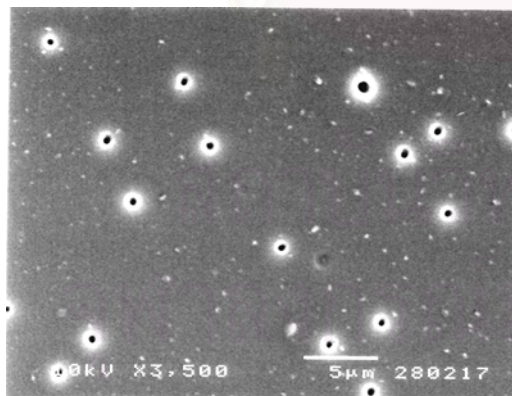


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 120 นาที



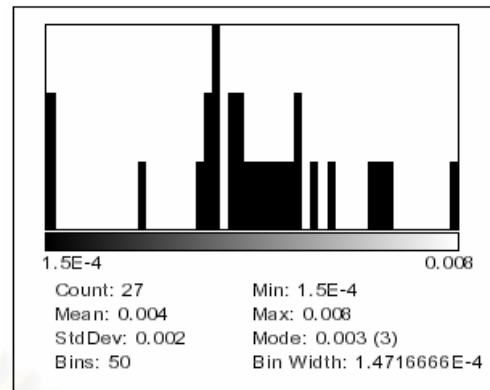
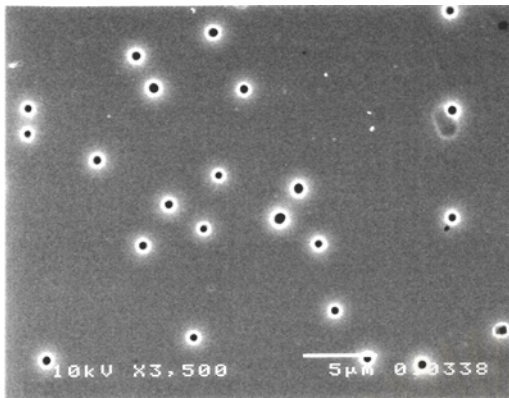
ด้านหน้า



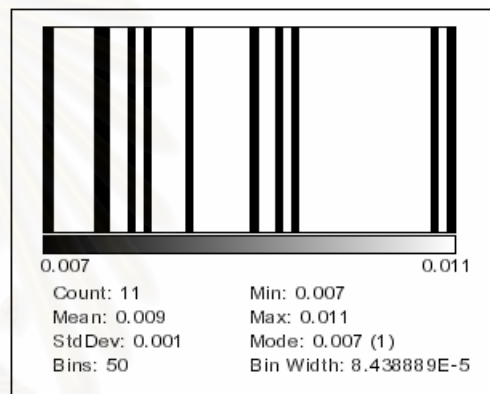
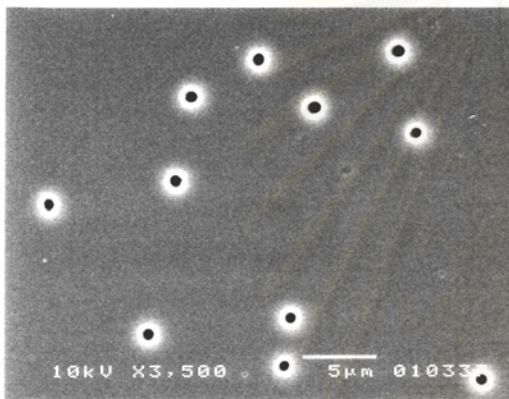
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.3 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

เวลาในการกักรอย 130 นาที



ด้านหน้า



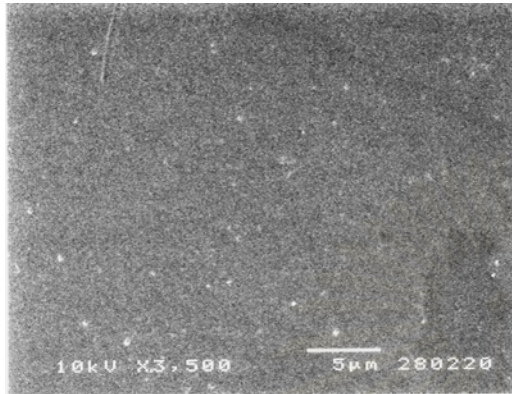
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.3 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดเทรก-เอตซ์
ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกักรอยด้วย 10% NaOH
อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

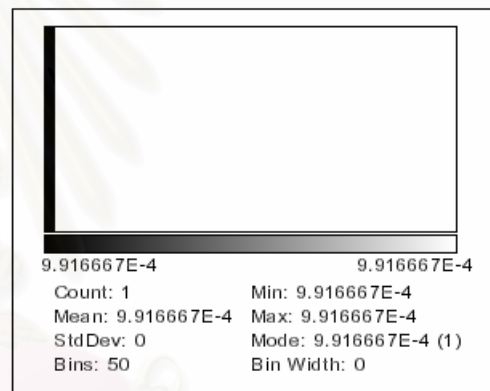
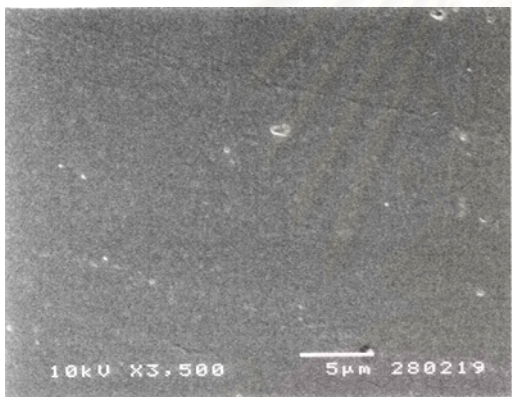
ค.3.4 อาบฟิล์ม 30 นาที ระยะห่างจากต้นกำเนิดแอลฟา 2 เซนติเมตร
เงื่อนไขการกัดรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 10 นาที



ขนาดรอยเล็กกว่ากำลังขยาย

ด้านหน้า

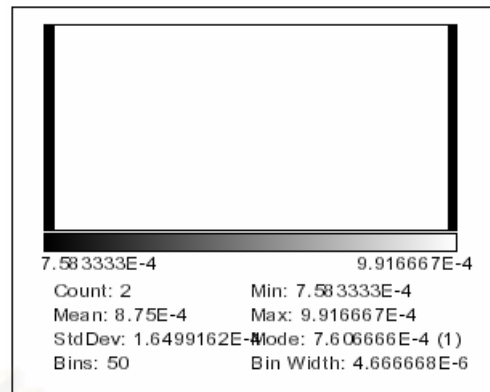
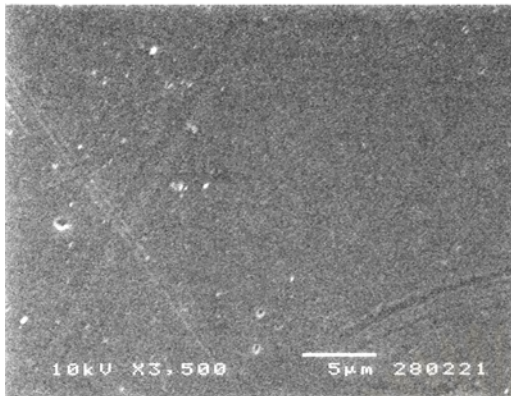


ด้านหลัง

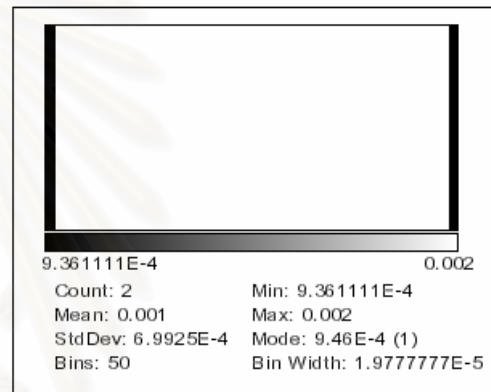
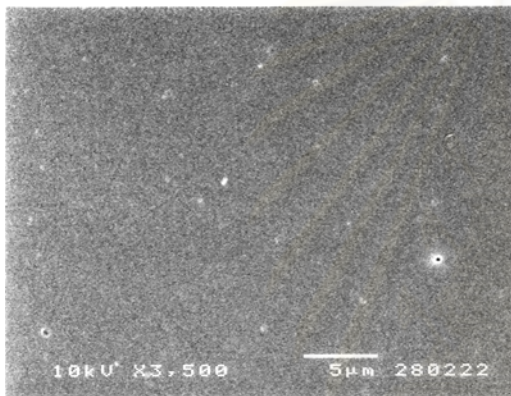
รูปที่ ค.3.4 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดเทรค-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เวลาในการกัดรอย 20 นาที

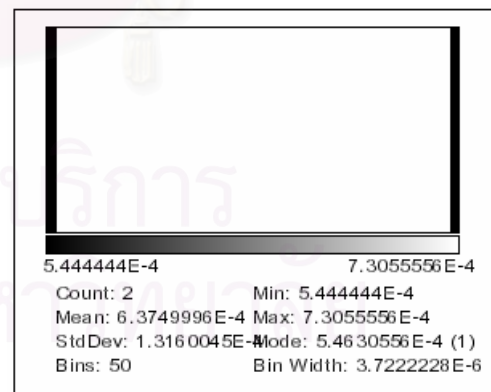
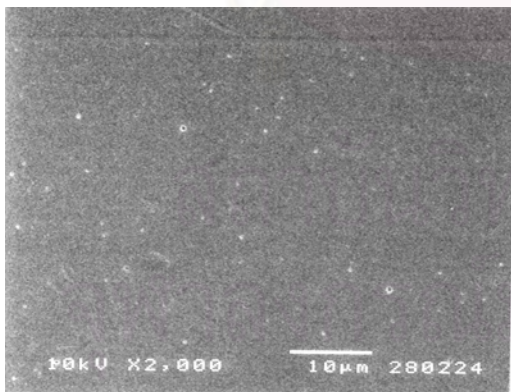


ด้านหน้า



ด้านหลัง

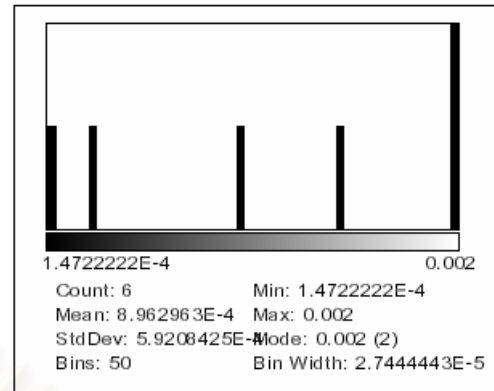
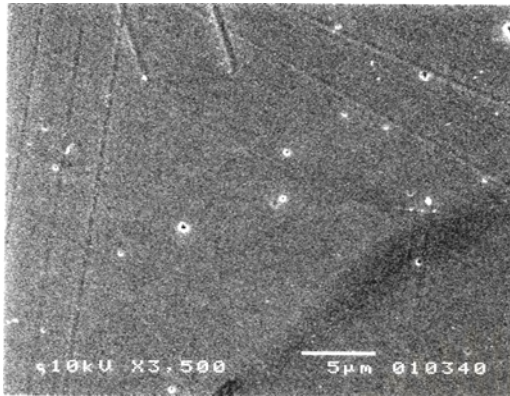
เวลาในการกัดรอย 30 นาที



ด้านหน้า

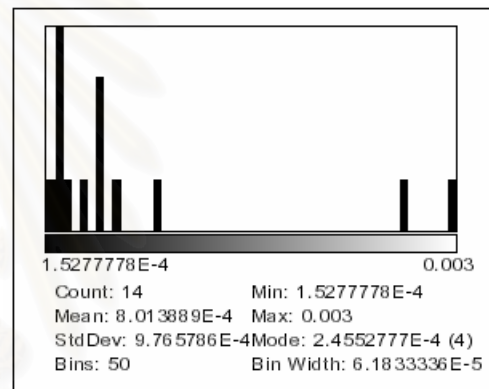
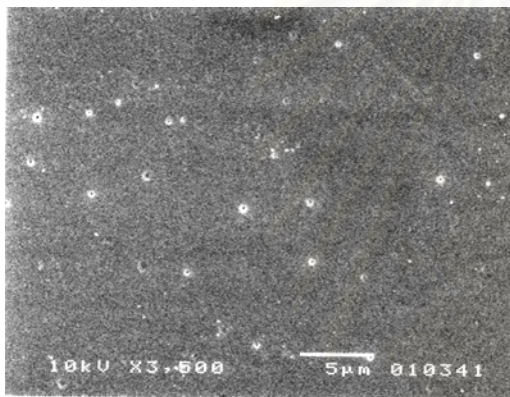
รูปที่ ค.3.4 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 30 นาที (ต่อ)

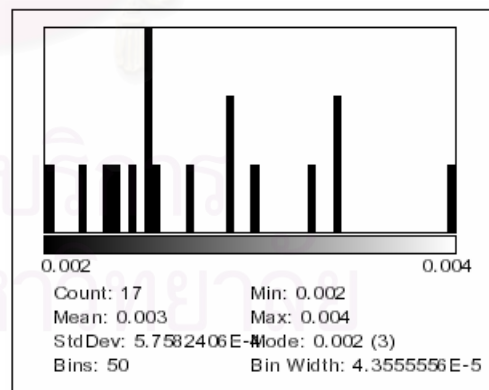
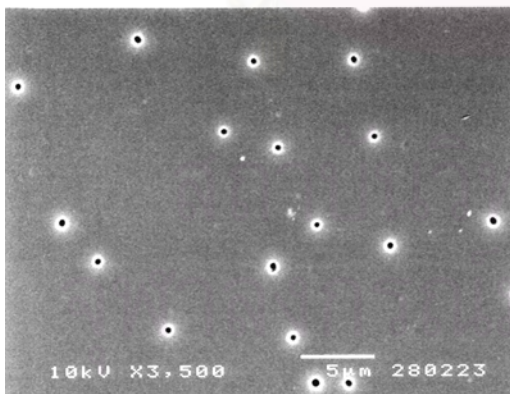


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 40 นาที



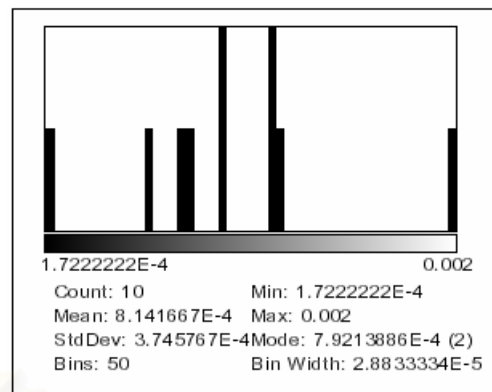
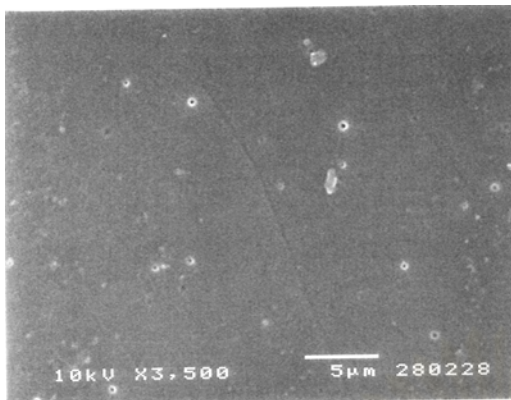
ด้านหน้า



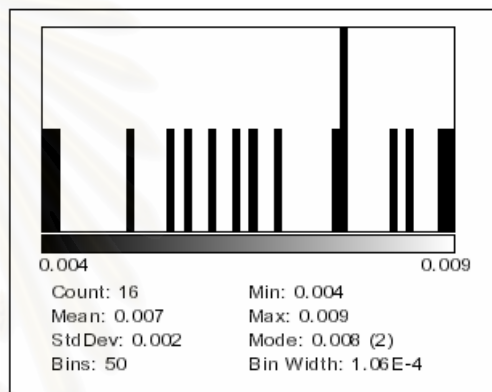
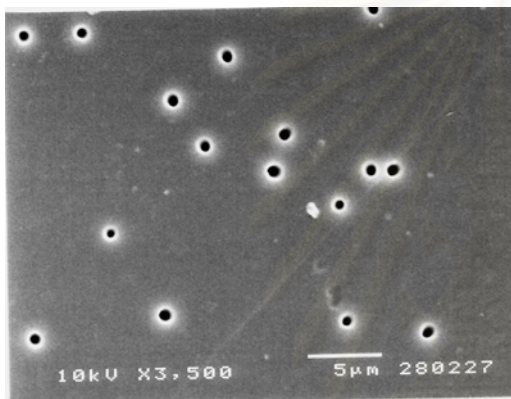
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.4 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 50 นาที

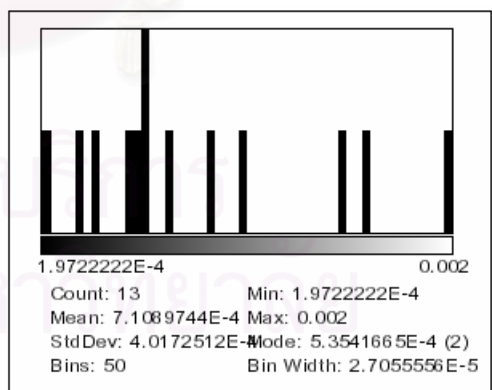
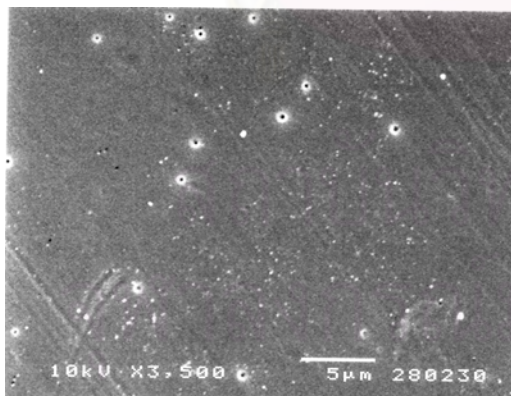


ด้านหน้า



ด้านหลัง

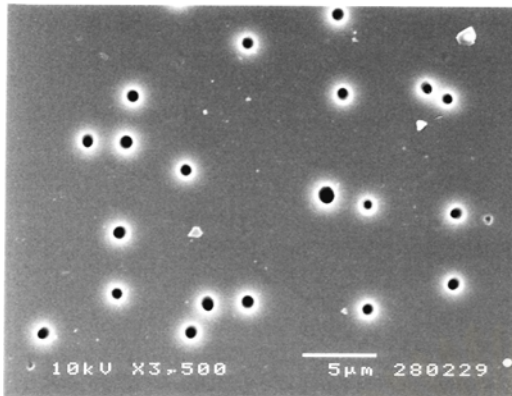
เวลาในการกัดรอย 60 นาที



ด้านหน้า

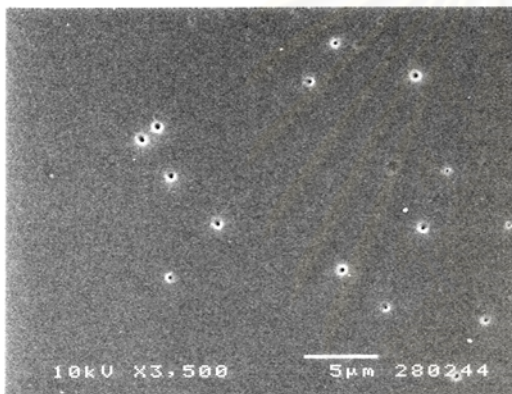
รูปที่ ค.3.4 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 60 นาที (ต่อ)

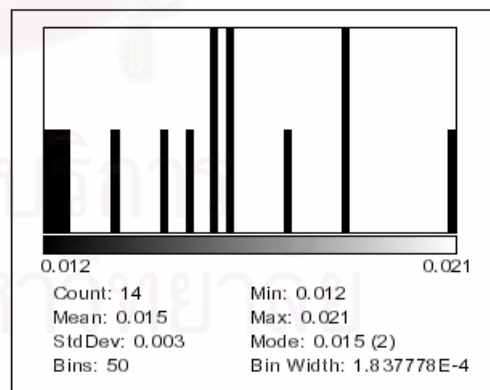
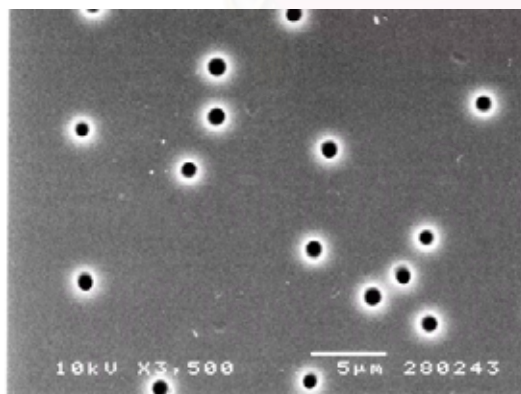


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 70 นาที



ด้านหน้า

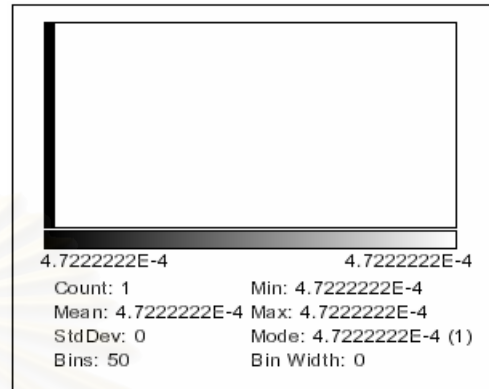
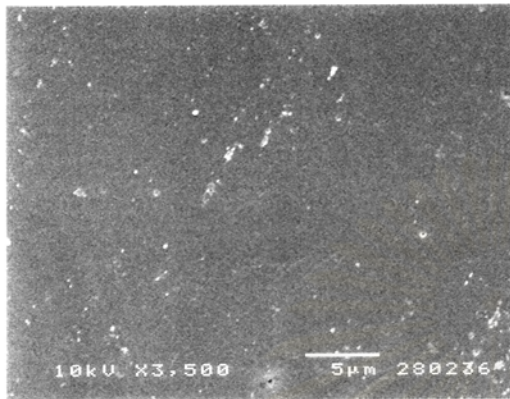


ด้านหลัง

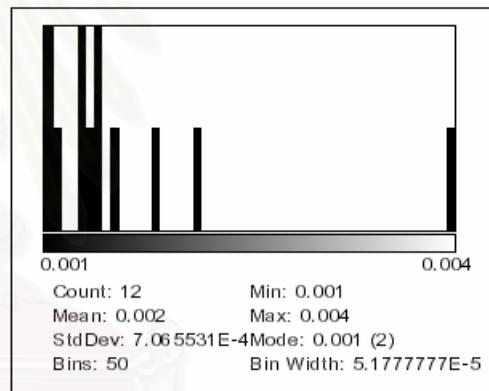
รูปที่ ค.3.4 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

ค.3.5 อาบฟิล์ม 30 นาที ระยะห่างจากต้นกำเนิดแอลฟา 2 เซนติเมตร
เงื่อนไขการกัดรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 10 นาที



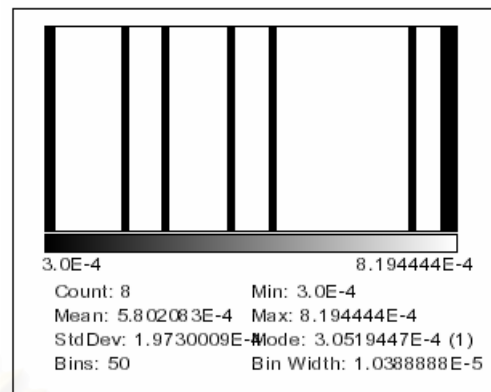
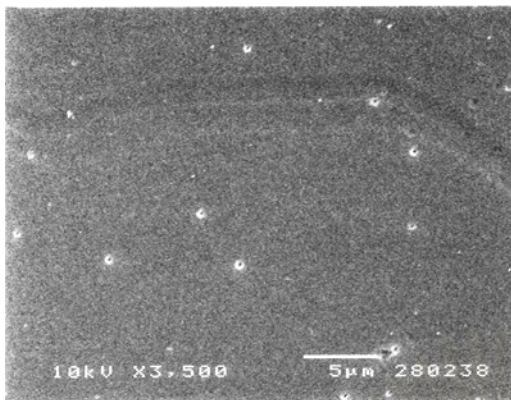
ด้านหน้า



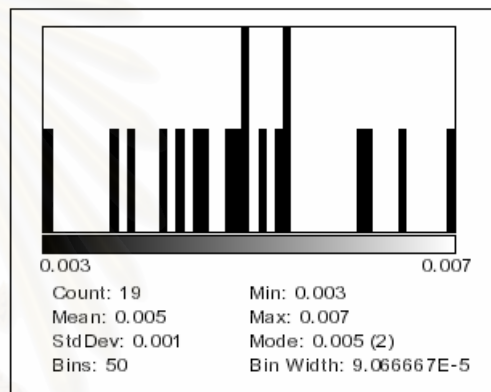
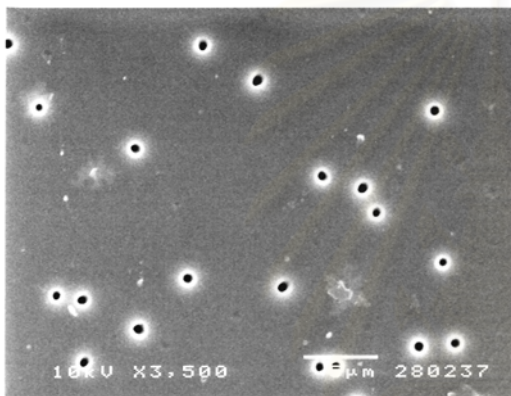
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.5 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 20 นาที

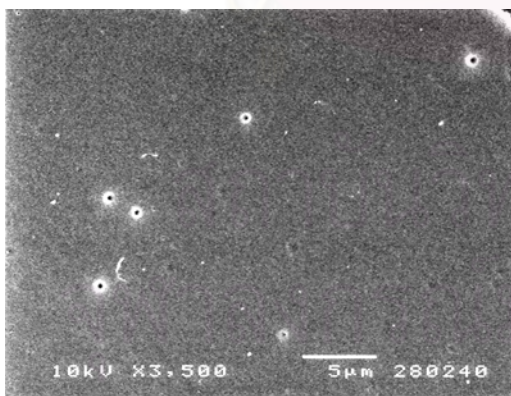


ด้านหน้า



ด้านหลัง

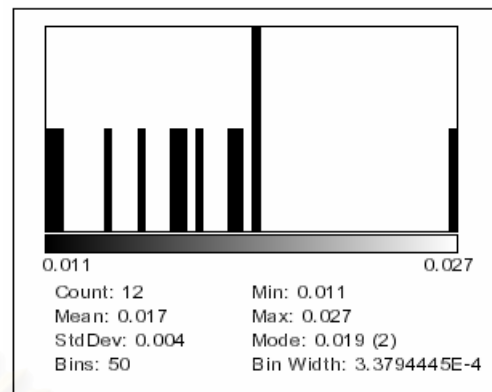
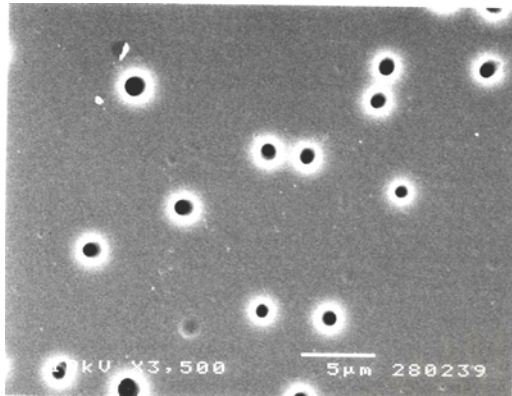
เวลาในการกัดรอย 30 นาที



ด้านหน้า

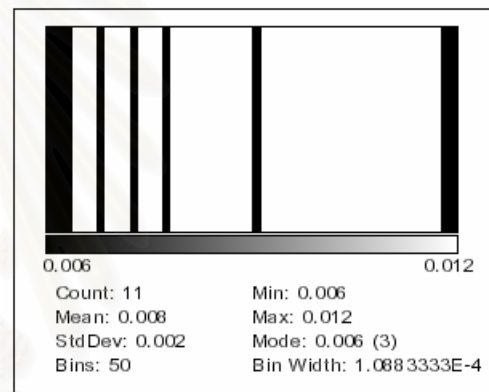
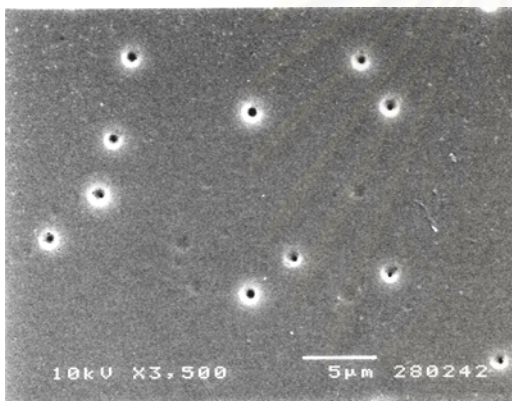
รูปที่ ค.3.5 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 30 นาที (ต่อ)

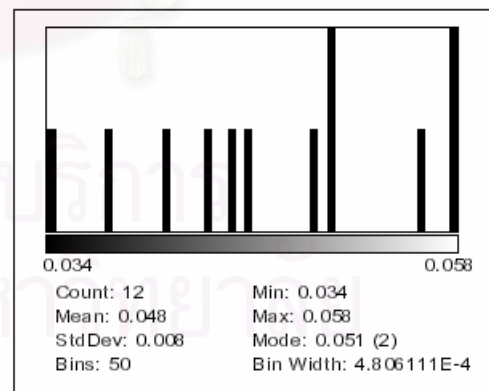
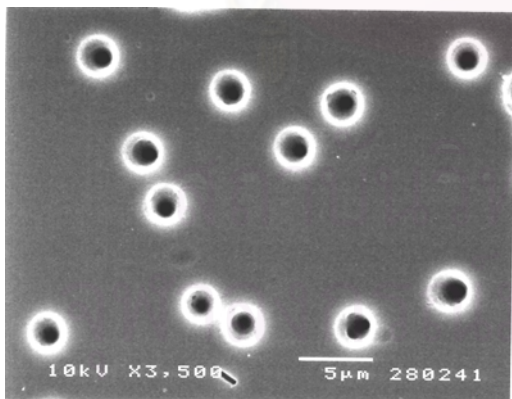


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 40 นาที



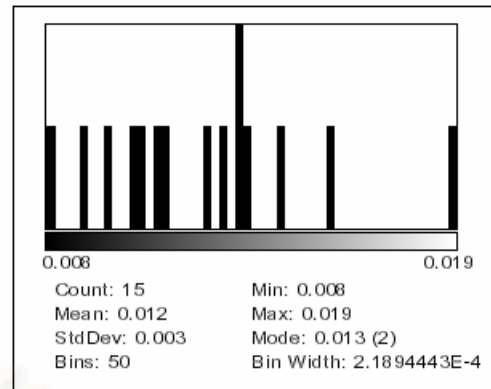
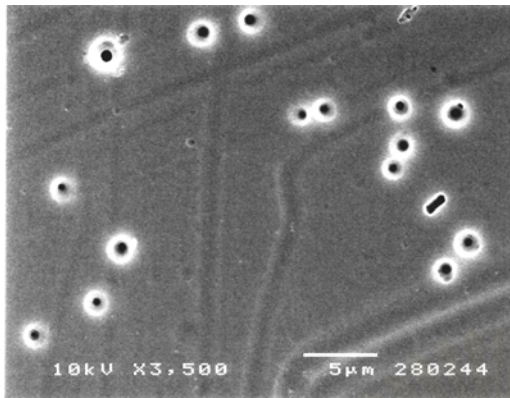
ด้านหน้า



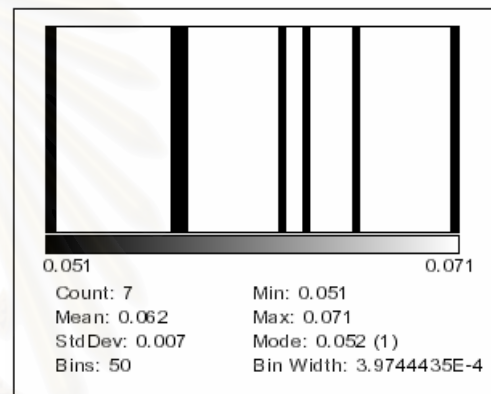
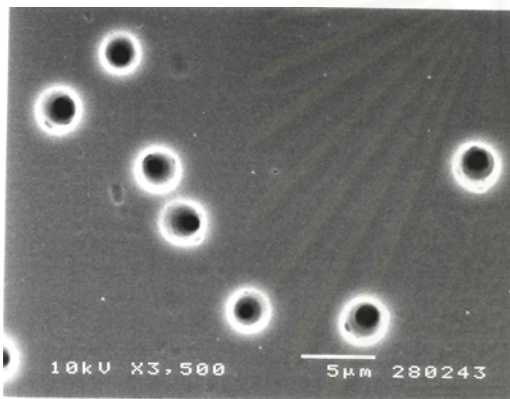
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.5 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัศรย 50 นาที



ด้านหน้า



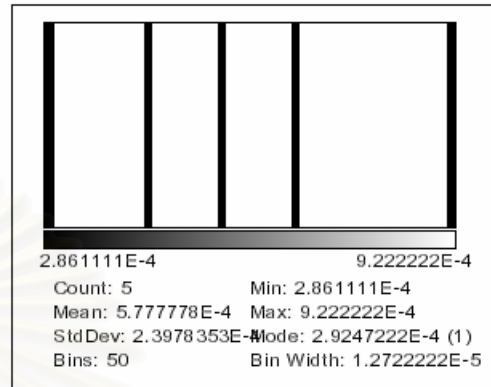
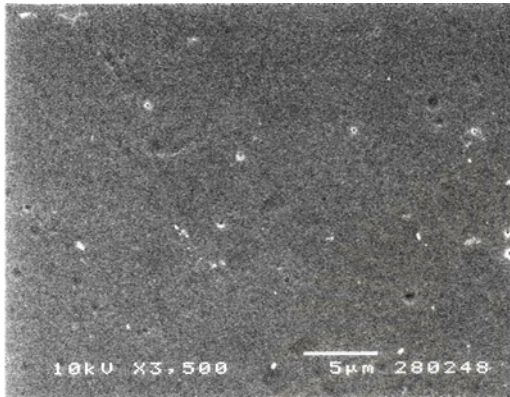
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.5 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัศรยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

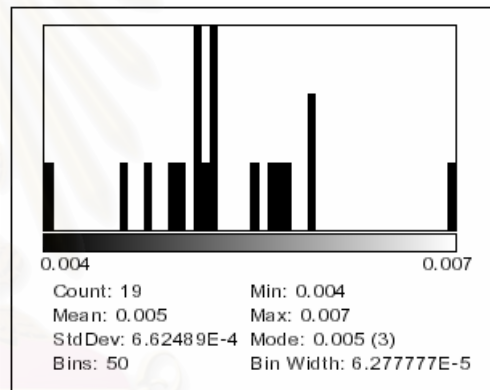
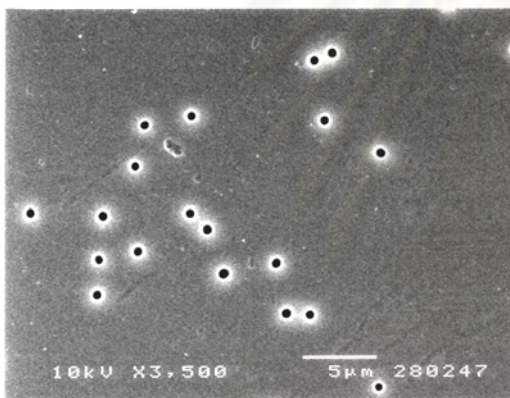
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.3.6 อาบฟิล์ม 30 นาที ระยะห่างจากต้นกำเนิดแอลฟา 2 เซนติเมตร
เงื่อนไขการกัดรอย : NaOH 10% (2.5N) อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 5 นาที

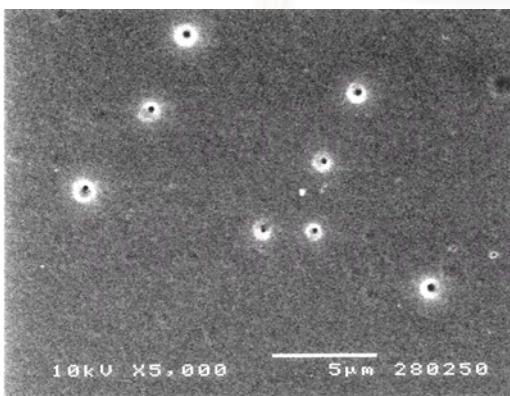


ด้านหน้า



เวลาในการกัดรอย 10 นาที

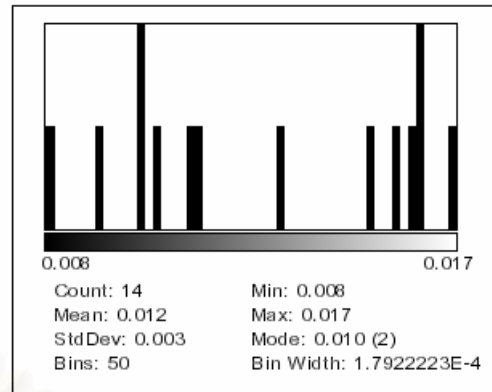
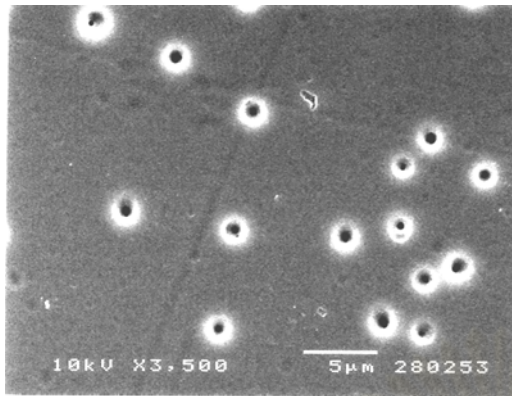
ด้านหลัง



ด้านหน้า

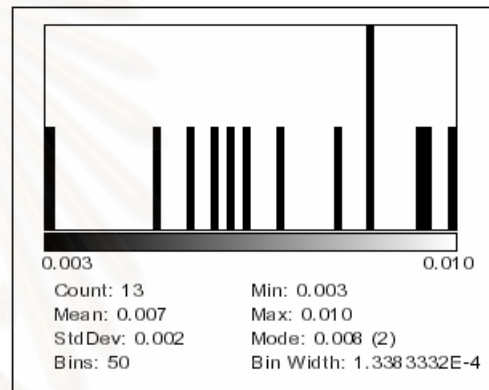
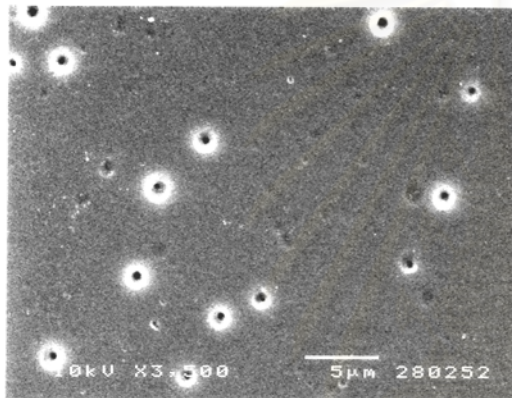
รูปที่ ค.3.6 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 10 นาที (ต่อ)

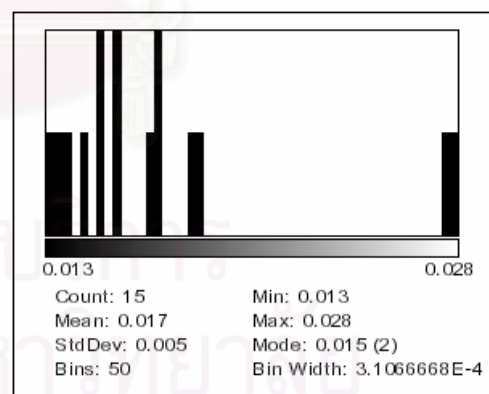
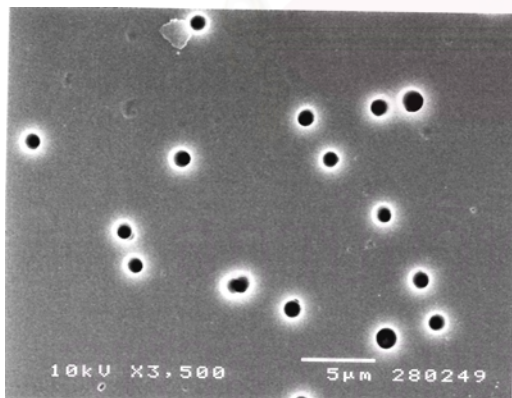


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 15 นาที



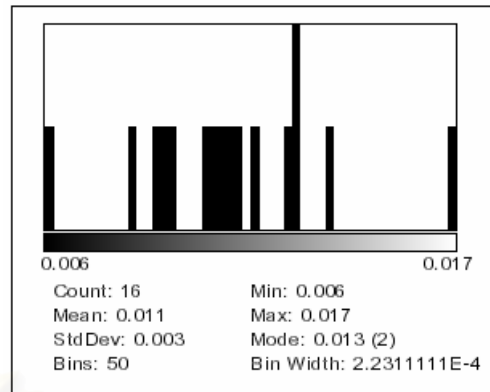
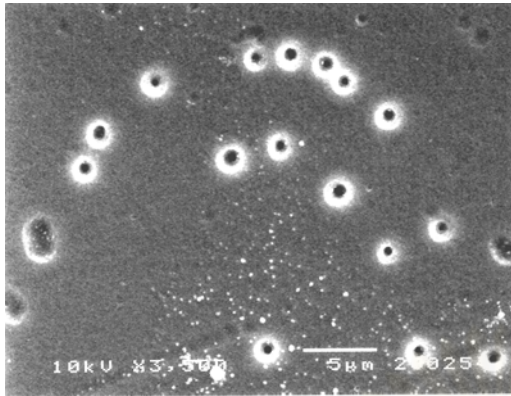
ด้านหน้า



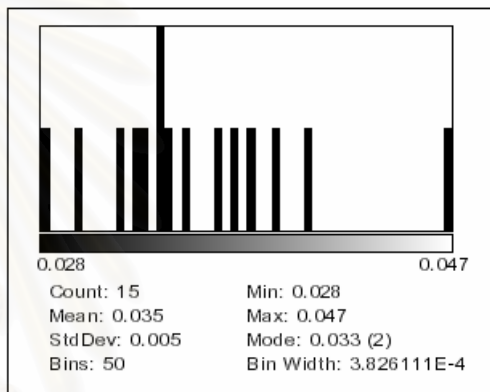
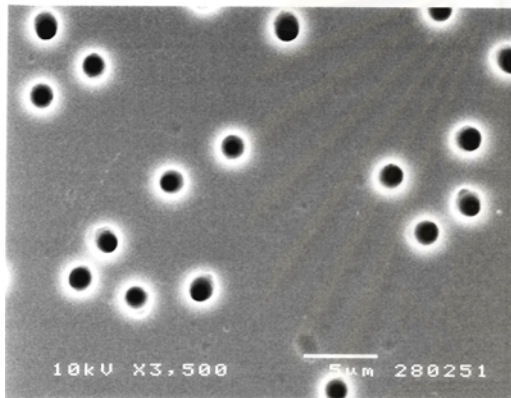
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.6 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 20 นาที



ด้านหน้า



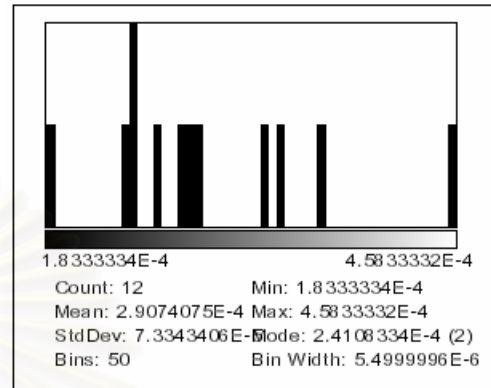
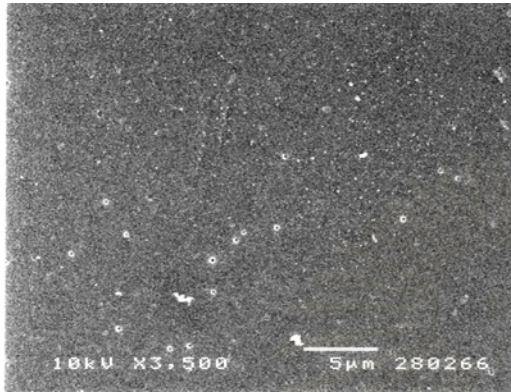
ด้านหลัง

รูปที่ ก.3.6 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 10% NaOH อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส

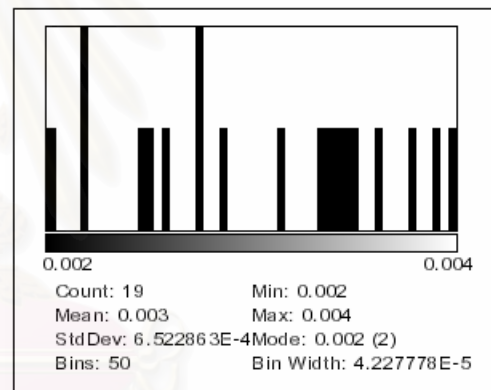
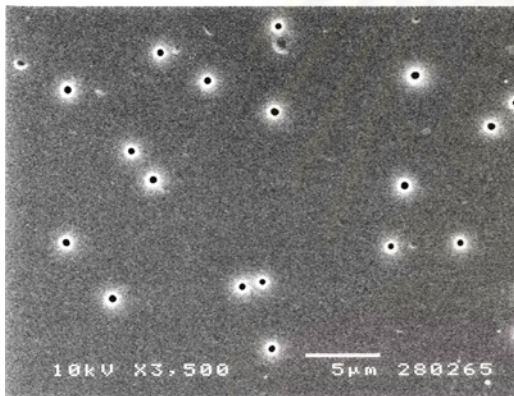
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.2.7 อาบฟิล์ม 30 นาที ระยะห่างจากต้นกำเนิดแอลฟา 2 เซนติเมตร
 เส้นใยการกัดรอย : NaOH 15% (4.375N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 10 นาที



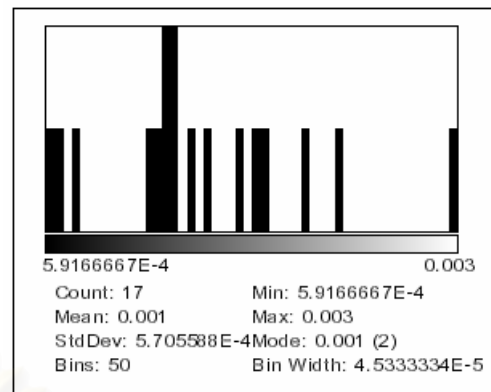
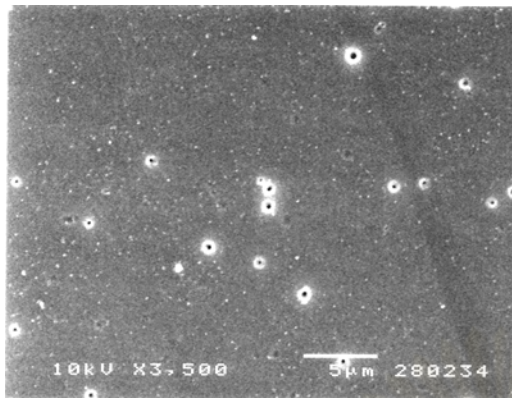
ด้านหน้า



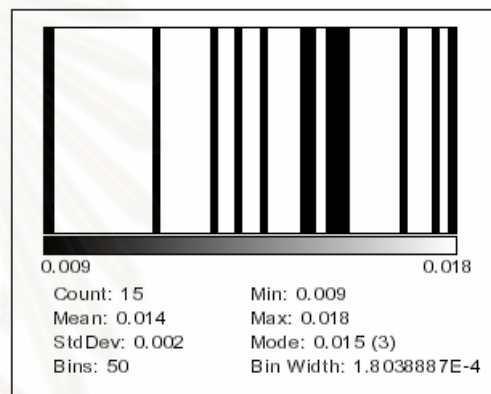
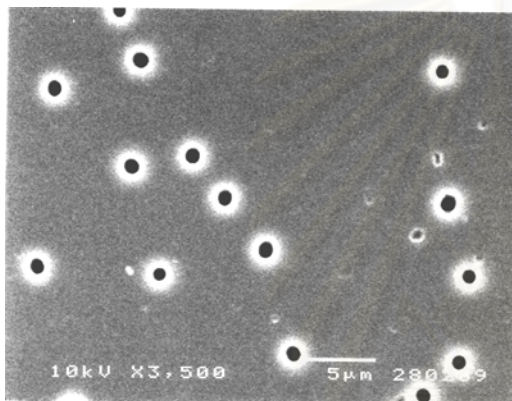
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.6 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดเทรค-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 15% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 20 นาที

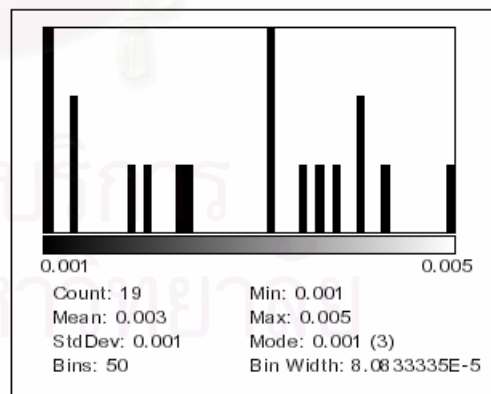
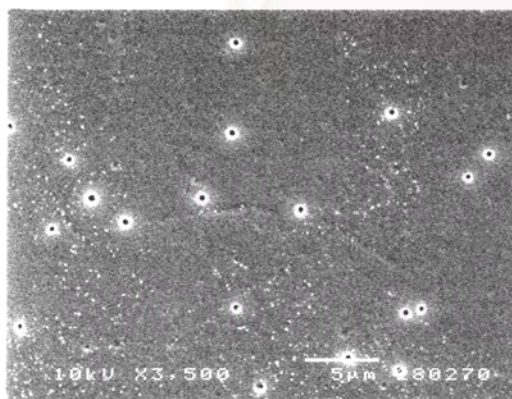


ด้านหน้า



ด้านหลัง

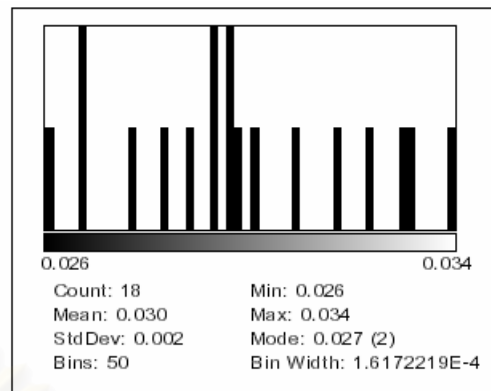
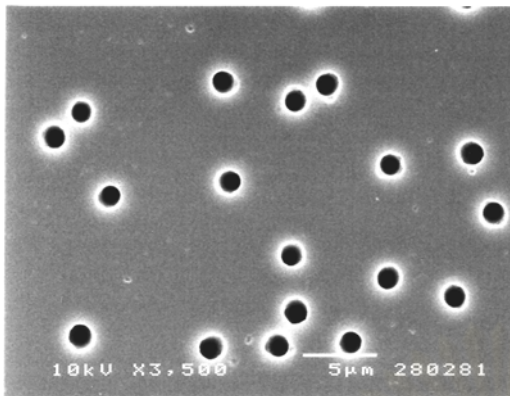
เวลาในการกัดรอย 30 นาที



ด้านหน้า

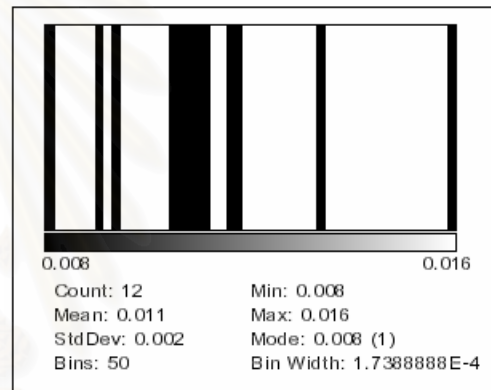
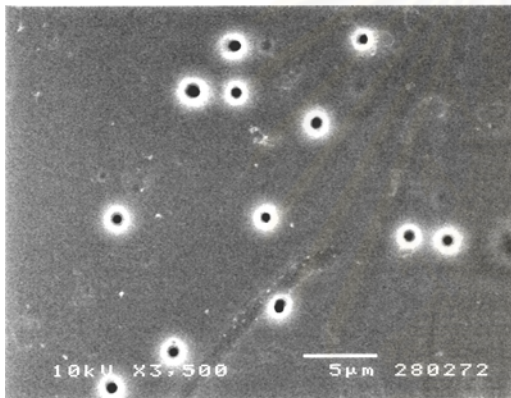
รูปที่ ค.3.6 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 15% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 30 นาที (ต่อ)

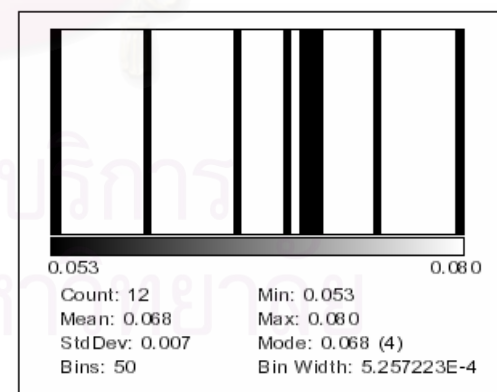
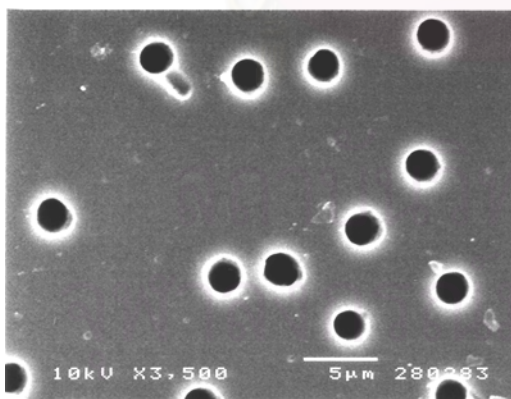


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 40 นาที



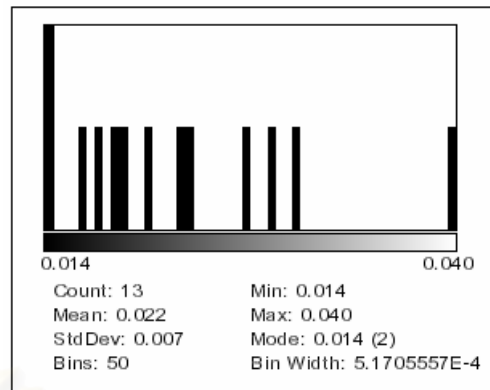
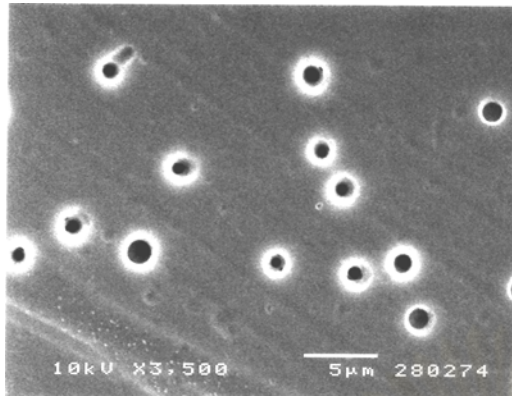
ด้านหน้า



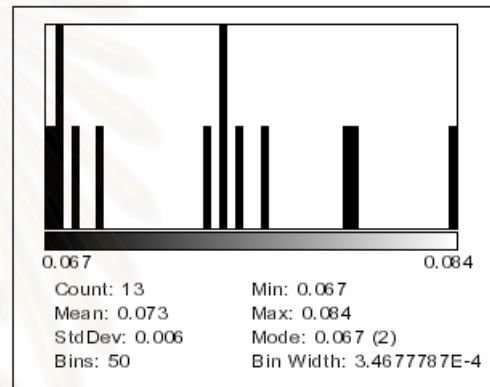
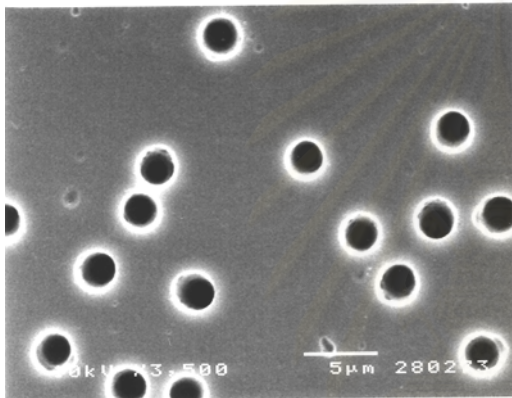
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.6 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 15% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัศรย 50 นาที



ด้านหน้า



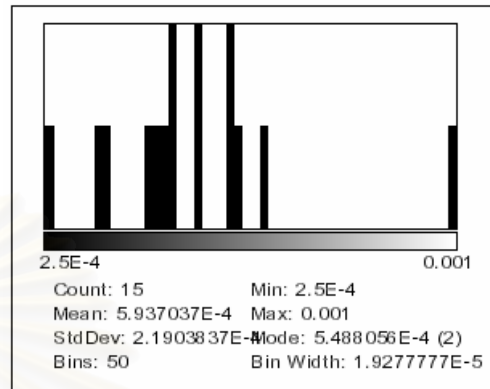
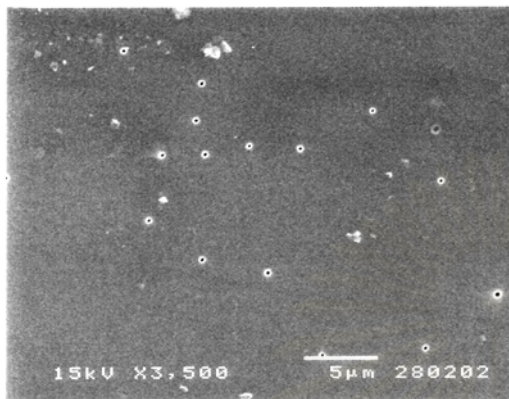
ด้านหลัง

รูปที่ ก.3.6 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัศรยด้วย 15% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

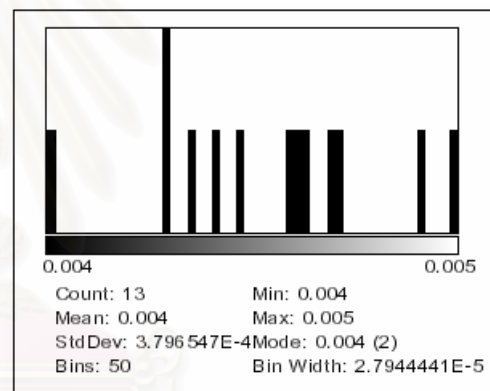
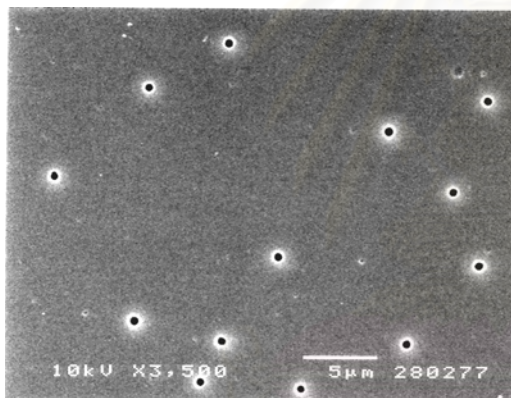
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ค.3.7 อาบฟิล์ม 30 นาที ระยะห่างจากต้นกำเนิดแอลฟา 2 เซนติเมตร
 เส้นใยการกัศรอย : NaOH 20% (6.25N) อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัศรอย 10 นาที



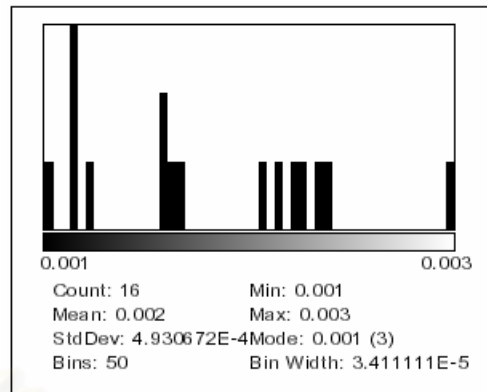
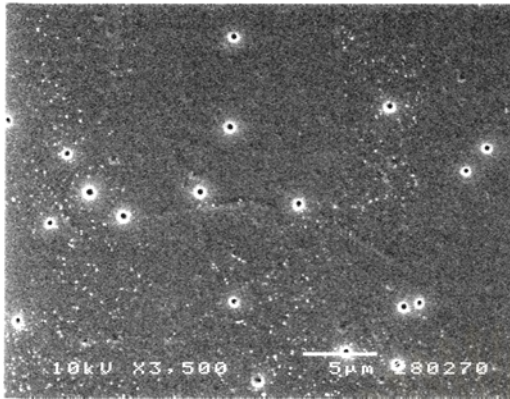
ด้านหน้า



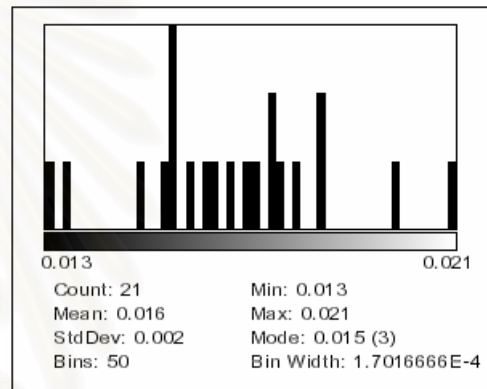
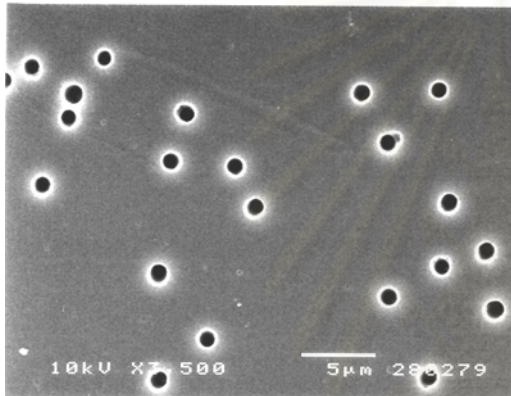
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.7 ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดเทรค-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัศรอยด้วย 20% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 20 นาที

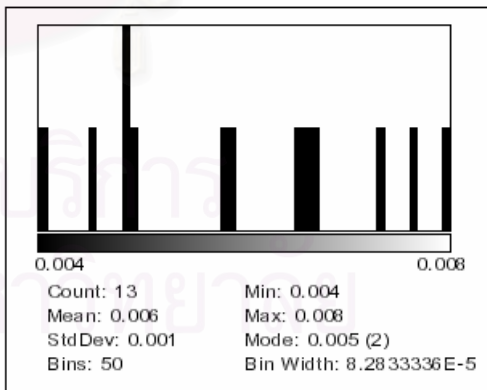
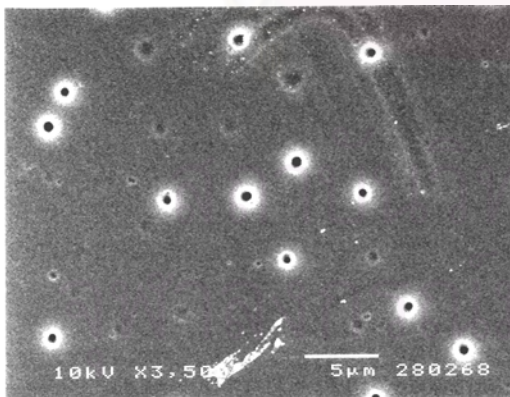


ด้านหน้า



ด้านหลัง

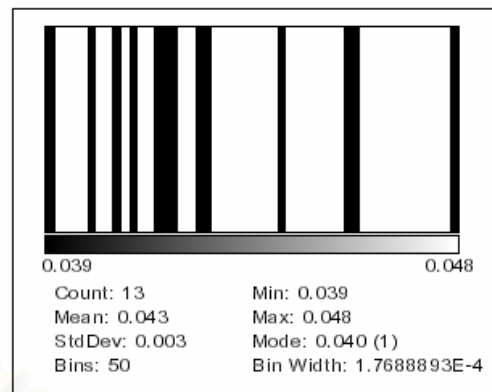
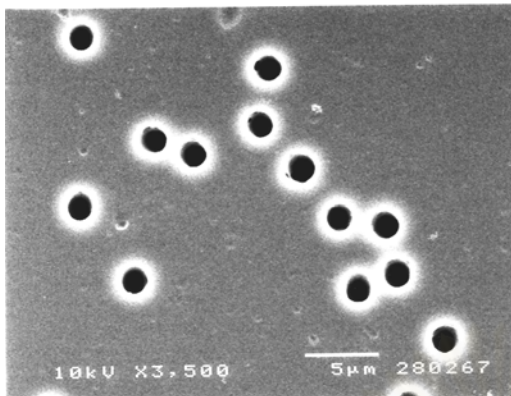
เวลาในการกัดรอย 30 นาที



ด้านหน้า

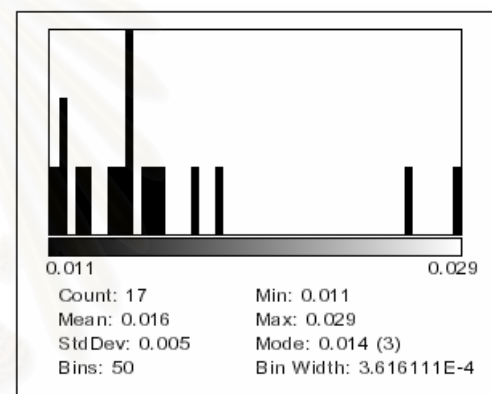
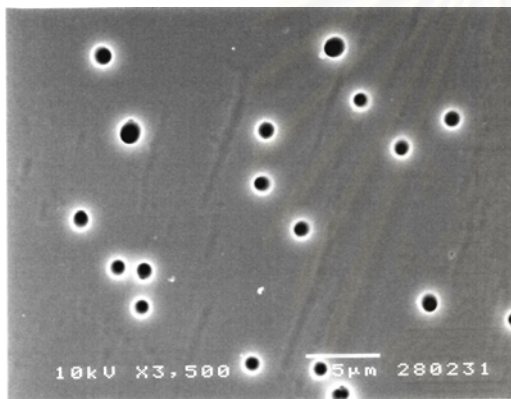
รูปที่ ค.3.7 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 20% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัดรอย 30 นาที (ต่อ)

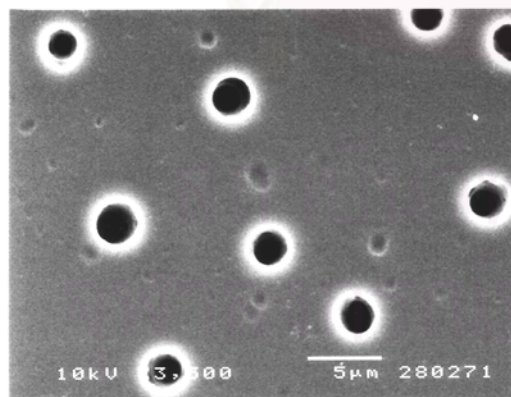


ด้านหลัง

เวลาในการกัดรอย 40 นาที



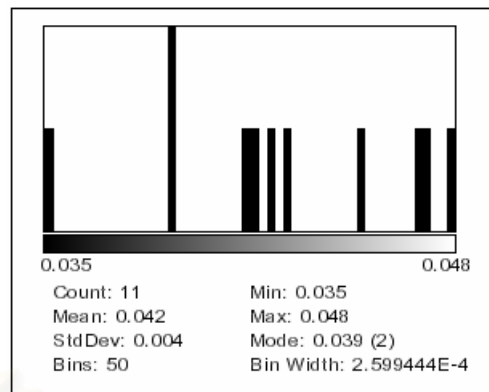
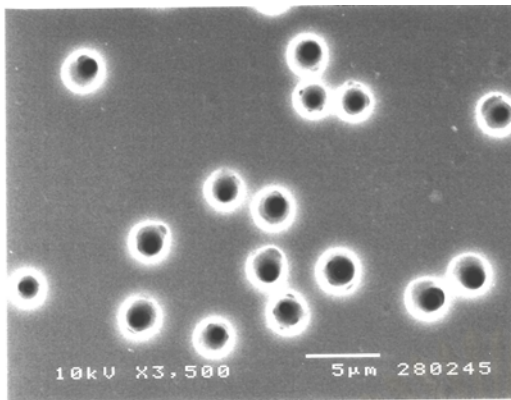
ด้านหน้า



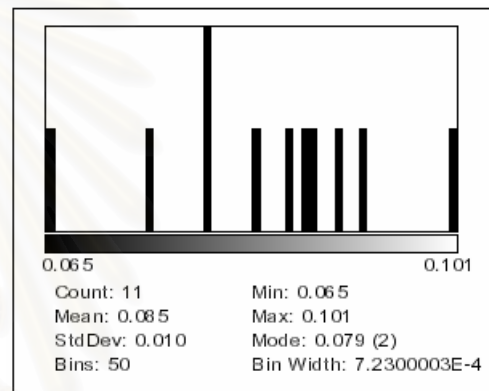
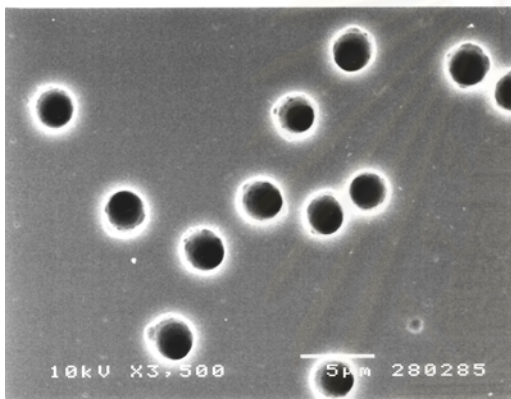
ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.7 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัดรอยด้วย 20% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

เวลาในการกัศรอย 50 นาที



ด้านหน้า



ด้านหลัง

รูปที่ ค.3.7 (ต่อ) ลักษณะภาพถ่ายจาก SEM ที่กำลังขยาย 3,500 เท่า ของแผ่นกรองชนิดแทรก-เอตซ์ ที่ผลิตจากเทคนิคของอนุภาคแอลฟาจาก ^{241}Am เมื่อทำการกัศรอยด้วย 20% NaOH อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวศิริธร บุราณรักษ์ เกิดเมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2522 ที่อำเภอเมือง จังหวัดยะลา สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตร วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2546



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย