การผลิตแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดนาโนแปรผัน โดยอาศัยเทคนิคการกัดรอยนิวเคลียร์

Variation of Nanopore Membrane Fabrication Using Nuclear Track-Etched Technique

วิทวัส วัชรจิตตานนท์

Wittawat Watcharajittanont

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science in Physics,
Prince of Songkla University
2556

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์	การผลิตแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดนาโนแปรผันโดยอาศัยเทคนิคการกัดรอยนิวเคลียร์
ผู้เขียน	นายวิทวัส วัชรจิตตานนท์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช ชิตตระการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

.....

(ดร. สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล)

คณะกรรมการสอบ

.....ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประสงค์ เกษราธิคุณ**)**

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช ชิตตระการ)

.....กรรมการ

(ดร.สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล)

.....กรรมการ

(ดร.สุทธิดา รักกะเปา)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์

.....

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้เป็นผลมาจาการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และขอแสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนเกี่ยวข้อง

ลงชื่อ.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัช ชิตตระการ)
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....
(นายวิทวัส วัชรจิตตานนท์)
นักศึกษา

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายวิทวัส วัชรจิตตานนท์)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์ การผลิตแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดนาโนแปรผันโดยอาศัยเทคนิคการกัดรอยนิวเคลียร์

ผู้เขียน นายวิทวัส วัชรจิตตานนท์

สาขาวิชา ฟิสิกส์

ปีการศึกษา 2555

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการผลิตเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนแปรผันไปตามความยาวของแผ่นเมมเบรน ซึ่งผลิตจาก แผ่นฟิล์มพอลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ความหนา 6 μm ซึ่งเป็นแผ่นฟิล์มที่ผ่านการระดมยิงด้วยอนุภาคไอออนหนัก (^{58}Ni) มีพลังงาน 10.7 MeV/u และฟลักซ์ไอออน 8 x 10^6 cm^{-2} จากเครื่องเร่งอนุภาค (ion beam) ที่ประเทศฝรั่งเศส ดำเนินการฉายแผ่นฟิล์มด้วยรังสี UV ที่ความยาวคลื่น 312 nm เป็นเวลานาน 4 ชั่วโมง และผ่านกระบวนการกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซน์ความเข้มข้น 2 N อุณหภูมิ 60 °C โดยแต่ละตำแหน่งบนเมมเบรน ใช้ระยะเวลาการกัดขยายรอยต่างกัน ศึกษาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน รวมทั้งความหนาแน่นของรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่โดยอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ซึ่งเมมเบรนมีเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 100-300 นาโนเมตร ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะของเมมเบรนที่ผลิตได้ ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนกลาง (d) และระยะทางบนแผ่นเมมเบรน (x) สอดคล้องตามสมการ d =8.71x + 87.72 และค่าความหนาแน่นของอนุภาคของแต่ละตำแหน่งบนเมมเบรนที่ค่าลดลงตามความยาวที่เพิ่มขึ้น เป็นดังความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรูพรุน (n) และความยาวของเมมเบรน (x) คือ $n = 19.49e^{-0.17x}$ ค่าสภาพการซึมผ่านของเมมเบรน (Permeability, P) $P = n\pi r^4$ มีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่นเมมเบรน และผลการทดสอบการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนของแต่ละตำแหน่งพบว่าอัตราการไหลของน้ำมีค่าไหลคงที่ตลอดทั้งแผ่นเมมเบรนที่ผลิตได้

Thesis Title	Variation of nanopore membrane fabrication using nuclear track-etched technique.
Author	Mr. Wittawat Watcharajittanont
Major Program	Physics
Academic year	2012

Abstract

To produce nanopore membrane base on polycarbonate, PC film was studied. The 6 μm thickness bombarded by ion beam (^{58}Ni, 10.7 MeV/u) from an accelerator in France. The latent track were irradiated with UV light wavelength 312 nm for 4 hrs before chemical etching process. Pore formation produce by immersion of the track-etched film in NaOH solution (2N) with temperature 60° C . Morphological property of the film etching process e.g. pore size , pore shape and cross section were characterized by scanning electron microscope (SEM) and Image J program. The pore size are 100-300 nm along the membrane length. The relationship between pore diameter (d) and distance on membrane (x) can be written as linear regression $d = 8.71x + 87.72$ and the relationship between pore density in membrane (n) and distance on membrane (x) can be written as $n = 19.49e^{-0.17x}$. The membrane permeability, $P = n\pi r^4$ is constant along the membrane length . The result of the water filtration through each position of membrane are constant.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความร่วมมือ ช่วยเหลือ แนะนำ ทั้งด้าน วิชาการ และ ปฏิบัติด้วยความกรุณาจากบุคคลหลายๆท่าน จึงขอบพระคุณไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธวัช ชิตตระการ และ ดร. สุขสวัสดิ์ ศิริจารุกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำแนะนำแนวทางในการดำเนินการแก้ไขปัญหาต่างๆ ตลอดจนแนวคิดอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ความรู้ และแนวคิดใหม่ๆ อันเป็นประโยชน์ ต่องานวิจัย และพัฒนาศักยภาพของการทำงานให้มีศักยภาพของการทำงานให้มีระบบแบบแผนที่ดีมากขึ้น

ขอบขอบคุณ Dr. Emmanuel Balanzat และ Dr. Phillip Dejadin ที่ช่วยเหลืองาน ในส่วนของการระดมยิงอนุภาคด้วยเครื่องอนุภาคไซโคลตรอน รวมทั้ง ผศ.ดร.ประสงค์ เกษราธิคุณ และ ดร. สุทธิดา รักกะเปา คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาเสนอแนะแนวทางแก้ไขเพิ่มเติม ทำให้วิทยานิพนธ์มีความถูกต้องสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณ โครงการพัฒนาและส่งเสริมผู้มีความสามารถพิเศษทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (พสวท.) ศูนย์ความเป็นเลิศด้านฟิสิกส์ (ThEP-Center) สถาบัน GANIL (National Large Heavy-Ion Accelerator) ประเทศฝรั่งเศส และ บัณฑิตวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ รวมทั้ง ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ และศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ให้การสนับสนุน และอนุเคราะห์เครื่องมือ สำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ ขอบคุณเพื่อน ๆ นักศึกษาปริญญาโท น้อง ๆ พี่ ๆ ภาควิชาฟิสิกส์ ภาควิชาเคมี ตลอดจนอาจารย์อีกหลาย ๆ ท่าน ที่มิได้เอ่ยนาม ที่ได้ให้คำแนะนำที่มีประโยชน์ และคอยช่วยเหลือ ด้วยดีตลอดมา

ท้ายสุด ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และบุคคลในครอบครัวที่ช่วยเหลือเป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนทุก ๆ ด้าน ของการทำวิทยานิพนธ์โดยตลอด

วิทวัส วัชรจิตตานนท์

สารบัญ

	หน้า
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1. บทนำ	1
1.1 บทนำต้นเรื่อง	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตรูพรุนบนเมมเบรน	4
2.2 หลักการของเครื่องเร่งอนุภาค	7
2.2.1 แหล่งกำเนิดไอออน	8
2.2.2 ห้องเร่งอนุภาค	9
2.3 การเกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม	12
2.3.1 ทฤษฎีเทอมัลสไปค์	13
2.3.2 ทฤษฎีไอออนเอกซ์โพลชันสไปค์	13
2.4 กำลังหยุดยั้งและพิสัย	14
2.4.2 กำลังหยุดยั้ง	14
2.4.2 พิสัย	16
2.5 ทฤษฎีการกัดขยายรอย	17
2.5.1 ผลของการกัดขยายรอยโดยใช้เวลานาน	22
2.6 ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการกรอง	23

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3. วิธีการวิจัย	27
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	27
3.1.1 อุปกรณ์ขั้นตอนการระดมยิงแผ่นฟิล์ม PC ด้วยอนุภาค ^{58}Ni	27
3.1.2 อุปกรณ์การอาบแผ่นฟิล์มด้วยรังสี UV	28
3.1.3 อุปกรณ์การกัดขยายรอยแฝงของแผ่น PC	28
3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ วัดขนาด และ ภาพตัดขวางของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรน	29
3.1.5 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการไหลของน้ำ	30
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย	30
3.2.1 ขั้นตอนการระดมยิงฟิล์ม ด้วยอนุภาค ^{58}Ni	30
3.2.2 ขั้นตอนการอาบแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	34
3.2.3 กระบวนการกัดขยายรอยทางนิวเคลียร์	35
3.2.4 การวิเคราะห์ วัดขนาด และ ภาพภาคตัดขวางของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรน	37
3.2.5 การหากำลังหยุดยั้งของแผ่นฟิล์ม PC	40
3.2.6 ขั้นตอนการศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นเมมเบรนที่ผลิตได้	42
4. ผลและการอภิปรายผล	45
4.1 การวิเคราะห์หาค่า ขนาดของรูพรุน	45
4.2 การถ่ายภาพพื้นผิวแผ่นเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	47
4.3 การทดสอบการกรองน้ำ	60
4.3.1 การทดสอบการกรองด้วยเมมเบรน ในส่วน A	61
4.3.2 การทดสอบการกรองด้วยเมมเบรน ในส่วน B	67
5. สรุปผลการวิจัย	74

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
5.1 สรุปผลการวิจัย	74
5.2 ข้อเสนอแนะ	75
บรรณานุกรม	76
ภาคผนวก	80
ก ชนิดการกรองอนุภาคผ่านเมมเบรนต่างๆ	81
ข เงื่อนไขการกัดขยายรอยสำหรับสารต่างๆ	82
ค การเตรียมความเข้มข้นของสารละลาย NaOH	86
ง ภาพถ่าย SEM ของแผ่นพอลิคาร์บอเนต ที่ตำแหน่งต่าง	87

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
3.1	ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน กับ ความหนาแน่นของอนุภาค	34
3.2	ค่าพลังงานของอนุภาค ^{58}Ni เมื่อผ่านฟิล์ม PC แต่ละแผ่น	41
4.1	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ระยะจริงจากขอบด้านซ้ายสุดของแผ่นเมมเบรน รวมทั้งระยะเวลาของการกัดขยายรอยแฝงด้วยสารละลาย NaOH	47
4.2	เวลาของการกัดขยายรอย ตำแหน่งและระยะห่างจากขอบซ้ายของแผ่นเมมเบรน	53
4.3	ข้อมูล ความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน และค่าสภาพซึมผ่านของเมมเบรน	58
4.4	ผลการทดลองไหลของน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุน100 nm –200 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 1 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที	61
4.5	ผลการทดลองการไหลของน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 100 - 200 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 3 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที	63
4.6	ผลการทดลองการไหลของน้ำ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 100 - 200 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 5 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที	64
4.7	ผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 200 nm - 300 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 1 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที	67
4.8	การทดลองอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 200 nm - 300 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 3 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที	68
4.9	แสดงผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 200 nm - 300 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 5 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที	69

รายการภาพประกอบ

ภาพประกอบที่		หน้า
2.1	วิธีการ 4 วิธีของแหล่งกำเนิดอนุภาคเพื่อสร้างรอยแฝงบนแผ่นวัสดุ	4
2.2	องค์ประกอบของเครื่องเร่งอนุภาค	8
2.3	ส่วนประกอบหลักของแหล่งผลิตลำไอออน	9
2.4	อนุภาคในเครื่องเร่งอนุภาคแบบไซโคลตรอน	10
2.5	รอยแฝงที่เกิดจากปฏิกิริยาฟิชชันที่ปรากฏบนแผ่นพลาสติก	12
2.6	ปรากฏการณ์การเกิดรอยแฝงในวัสดุ ตามทฤษฎีเทอมัลสไปค์	13
2.7	การเกิดรอยอนุภาคตามทฤษฎีไอออนเอกซ์โพลชันสไปค์	14
2.8	การเกิดไอออนกับระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในตัวกลาง	15
2.9	การกัดขยายรอยแฝง และ กัดตามผิวหน้าโดยใช้หลักการออยเกนส์	18
2.10	แผนภาพด้านข้างของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นและมุมวิกฤติ α_0	19
2.11	รูปร่างการเกิดรอยที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านแบบตรง ๆ ตั้งฉากกับผิววัสดุ	19
2.12	รูปร่างของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับผิวที่ผ่านการกัดขยาย	21
2.13	รูปทรงเรขาคณิตของรอยที่เกิดขึ้นในแนวมุมเอียง ø กับผิวแผ่นเมมเบรน	21
2.14	การเกิดรอยบนแผ่นพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากอนุภาค และผลของ Prolong etching	22
2.15	อัตราการกัดขยายรอยตามชนิดของพอลิเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายในการกัดขยายรอย	23
2.16	โครงสร้างทางเคมีของ พอลีคาร์บอเนต	24
2.17	แสดงตัวอย่างโมเลกุลหรืออนุภาคที่สามารถแยกโดยเมมเบรน	24
2.18	แสดงอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนแต่ละตำแหน่งของเมมเบรนที่มีความพรุนคงที่ตลอดทั้งแผ่น	26
3.1	เครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต	28
3.2	อ่างควบคุมอุณหภูมิ	29
3.3	Syringe pump	29

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
3.4	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	29
3.5	ชุดฟิล์มที่ซ้อนกันแต่ละชั้นก่อนนำไปวางบนแท่นวางฟิล์ม และระดมยิงด้วยอนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาค GANIL, France	31
3.6	ชุดฟิล์มเมื่อประกอบกับแท่นวางฟิล์ม	32
3.7	เมมเบรนที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน	33
3.8	แผนภาพอุปกรณ์การทดลองการอาบแผ่นฟิล์ม PC ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	35
3.9	การจัดวางตำแหน่งของอ่างควบคุมความร้อนและ เครื่องควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นฟิล์มในระหว่างการกัดขยายรอยแฝง	36
3.10	การล้างสารเคมีออกจากแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตในขั้นตอนแรก	37
3.11	การล้างสารเคมีออกจากแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตในขั้นตอนสุดท้าย	37
3.12	ตำแหน่งบนเมมเบรนที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเพื่อนำไปกัดขยายรอย	38
3.13	การถ่ายภาพรูพรุนบนแผ่นเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
3.14	แสดงภาพการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป imageJ สำหรับวิเคราะห์ขนาดของรูพรุน	39
3.15	การคำนวณหาค่าศักย์หยุดยั้งของแผ่นฟิล์ม PC โดยใช้โปรแกรม PIM	40
3.16	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ของอนุภาค ^{58}Ni เมื่อผ่านแผ่นฟิล์ม PC	41
3.17	การประกอบแผ่นเมมเบรนเข้ากับชุดการทดสอบอัตราการไหลของน้ำ	42
3.18	ภาพการกำจัดฟองอากาศจากชุดการทดสอบอัตราการไหล	43
3.19	แสดงภาพชุดระบบทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน	44
4.1	แสดงแผนภาพเมมเบรนที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเพื่อให้เหมาะสม กับชุดการทดสอบการอัตราการไหล	45
4.2	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 2	48

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่		หน้า
4.3	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 4	48
4.4	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 6	49
4.5	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 8	49
4.6	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 10	50
4.7	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 12	50
4.8	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 14	51
4.9	ภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 16	51
4.10	ภาพภาคตัดขวางของแผ่นเมมเบรน	52
4.11	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูพรุนกับเวลาในการกัดรอย	5
4.12	ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูพรุนกับตำแหน่งต่าง ๆ บนเมมเบรน	55
4.13	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรูพรุนของแผ่นเมมเบรน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ	56
4.14	แสดงสัมพันธ์ระหว่างความหนานแน่นของรูพรุนในเมมเบรน ณ ตำแหน่งต่างๆ บนเมมเบรน	57
4.15	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน และค่าซึมผ่านของเมมเบรนที่แต่ละตำแหน่งบนแผ่นเมมเบรน	59
4.16	แสดงชุดการทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน	60
4.1.7	ผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำของเมมเบรนส่วน A ผ่านช่องน้ำไหลออกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชุดการทดลองอัตราการไหล	65
4.18	ผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำของเมมเบรนส่วน B ผ่านช่องน้ำไหลออกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชุดการทดลองอัตราการไหล	70

รายการภาพประกอบ(ต่อ)

ภาพประกอบที่ **หน้า**

4.19 ผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำ ของเมมเบรนทั้งสองส่วน A และ B 72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 บทนำเรื่อง

ปัจจุบันเทคโนโลยีการกรองโดยใช้แผ่นเมมเบรนมีความสำคัญอย่างมาก ไม่ว่าจะเป็นการกรองเพื่อคัดแยกอนุภาคที่แขวนลอยในสารละลายเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ หรือเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนเพื่อทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้นทั้งในอุตสาหกรรมอาหาร เภสัชกรรม หรืออุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ เทคโนโลยีการกรองจะเข้ามามีบทบาทในทางเศรษฐกิจมากขึ้น การกรองโดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของเมมเบรนได้ตามขนาดของอนุภาคที่จะต้องกรองดังนี้

การกรองแบบ ไมโครฟิลเตรชัน (Micro filtration, MF) อัลตราฟิลเตรชัน(Ultra filtration , UF) โดยอาศัยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนของแผ่นเมมเบรน ในการแยกประเภท ไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนโดยปกติจะกรองอนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.02 – 10 μm ส่วนอัลตราฟิวเตรชันเมมเบรนจะเหมาะสำหรับการกรองอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางในช่วง 0.001 – 0.02 μm สามารถกรองไอออนของโซเดียม (Na^+) ที่มีขนาดโตกว่า 0.02 μm จะใช้กระบวนการกรองแบบผันกลับ (Reverse osmosis, RO) ซึ่งต้องใช้ความดันสูง อยู่ในช่วง 1-10 MPa หรือ 10 – 100 atm ดังนั้นการผลิต เมมเบรนเพื่อให้ได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน และมีคุณสมบัติที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์โดยเฉพาะความต้องการในการกรองจึงมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง

ปัจจุบันเมมเบรนที่ใช้กันอยู่ส่วนมากต้องสั่งซื้อมาจากต่างประเทศ จึงจำเป็นที่ต้องศึกษาวิธีการผลิตเมมเบรนขึ้นมาใช้งานเอง เพื่อลดการนำเข้าและให้เหมาะสมแก่การนำมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด จากการศึกษาพบว่าเมื่อระดมยิงด้วยอนุภาคพลังงานสูงอนุภาคดังกล่าวเคลื่อนที่เข้าไปกระทบกับแผ่นวัตถุที่เป็นฉนวน จะทำให้อะตอม หรือโมเลกุลของฉนวนเกิดการเสียหาย หรือแยกออกเป็นรูปกรวย ตามแนวของอนุภาคที่พุ่งชน (Track Particle) ร่องรอยนี้ถูกตรวจพบโดยตรงครั้งแรก โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy : TEM) ต่อมาพบว่าโครงสร้างที่ถูกทำลายนี้เมื่อใช้สารเคมีที่เหมาะสมในการกัดรอย สามารถทำให้ร่องรอยนี้ขยายขนาดให้กว้างขึ้น จนมีขนาดใหญ่พอที่สามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ (Optical

microscope) ชนิดทั่วไปได้(Fleischer et al., 1975) การผลิตเมมเบรนด้วยวิธีการกัดรอยทางนิวเคลียร์ คือการสร้างรอยแฝงขึ้นในวัสดุที่เป็นฉนวนโดยอาศัยอนุภาคที่มีพลังงานสูง ซึ่งแหล่งกำเนิดของอนุภาคพลังงานสูง หลัก ๆ มีสองแหล่งกำเนิด คือ อนุภาคที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน และอนุภาคที่ถูกปล่อยจากเครื่องเร่งอนุภาค

วิธีการสร้างรอยแฝงด้วยผลผลิตฟิชชันนั้นเกิดโดยนิวเคลียสของธาตุหนัก ซึ่งถูกระดมยิงด้วยนิวตรอน ธาตุหนักใช้เป็นเป้าและเหมาะสมกับการใช้งานบ่อยคือ พลูโตเนียม-238 (Pu-238) คาลิฟอร์เนียม-252 (Cf-252) โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ยูเรเนียม-235 (U-235) อนุภาคที่เกิดจากการแตกตัวของธาตุ (Fission products) ดังกล่าว จะพุ่งชนกับแผ่นฟิล์มทำให้เกิดรอยแฝงในแผ่นฟิล์มที่จะนำมาผลิตเมมเบรน

วิธีสร้างรอยแฝงบนแผ่นฉนวนด้วยอนุภาคหรือไอออนที่มีพลังงานสูงจากเครื่องเร่งอนุภาค สำหรับในงานในภาคอุตสาหกรรม อนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาคจะมีพลังงานอยู่ในระดับ MeV ประโยชน์ของการสร้างรอยแฝงบนแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยวิธีการนี้คือ ไม่มีการปนเปื้อนของสารกัมมันตรังสีบนแผ่นฟิล์ม อนุภาคที่เกิดจากเครื่องเร่งอนุภาคจะมีพลังงานสูงกว่าผลิตภัณฑ์ฟิชชันและมีพลังงานคงที่ รวมทั้งอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องเร่งอนุภาคจะมีฟลักซ์ความหนาแน่นสูง จึงทำให้ เมมเบรนมีความเป็นรูพรุนสูง และโดยวิธีการนี้สามารถที่จะควบคุม การเกิดแนวของรอยแฝง แผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดรูพรุนที่ขนานกันทั่วตลอดแผ่นกรอง (Flerov et al., 1989)โดยทั่วไปเมมเบรนมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากันตลอดทั้งแผ่นซึ่งเหมาะสำหรับการกรองสารแขวนลอยที่มีขนาดที่จำกัด สำหรับการผลิตเมมเบรนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดรูพรุนแปรผันตามความยาวของแผ่นเมมเบรนนั้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรน โดยเฉพาะการกรองสารที่มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกันอยู่รวมกัน อาศัยการกรองเพียงครั้งเดียว (Suksawat *et al*., 2007) เริ่มต้นการผลิต โดยการระดมยิงแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยอนุภาคพลังงานสูงโดยควบคุมความหนาแน่นของอนุภาค (n) ของแต่ละตำแหน่งบนแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ให้เหมาะกับขนาดของรูพรุนที่ต้องการ หลังจากนั้นนำไปกัดขยายรอยโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดรูพรุน (Suksawat et al., 2007) บนแผ่นฟิล์มบาง PET

งานวิจัยนี้ ต้องการที่จะศึกษาการผลิตแผ่นเมมเบรนที่มีขนาดของรูพรุนแบบแปรผันตามระยะทางบนผิวเมมเบรน โดยต้องการที่จะผลิตจากแผ่นฟิล์มบาง ชนิดพอลิเมอร์คาบอเนต (Polycarbonate : PC) โดยการระดมยิงด้วยลำอนุภาคพลังงานสูง ในงานวิจัยนี้อาศัยไอออนหนัก

^{58}Ni พลังงาน 10.7 MeV/u ที่ GANIL ประเทศฝรั่งเศส โดยค่าความหนาแน่นของอนุภาคบนแผ่นฟิล์มถูกควบคุมให้เป็นไปตามค่าที่คำนวณไว้เพื่อให้เมมเบรนมีสภาพการซึมผ่าน (Permeability) คงที่ตลอดทั่วทั้งแผ่น กำหนดให้ n(x) คือจำนวนความหนาแน่นของอนุภาคที่ระดมยิงเพื่อสร้างรอยแฝงบนแผ่นฟิล์ม และ r(x) คือ รัศมีของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรน โดยทั้งค่าความหนาแน่นของอนุภาค และ รัศมี มีค่าแปรผันตามระยะทาง x บนแผ่นเมมเบรน จากการศึกษาของ ดร.สุขสวัสดิ์และคณะ ได้ศึกษาเมมเบรนที่มีความเป็นรูพรุน (Porosity, p) ของเมมเบรนมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่นเมมเบรนตามสมการ $p= n\pi r^2$ แต่ผลการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนในแต่ละตำแหน่งนั้นอัตราการไหลของน้ำมีค่าลดลงเมื่อระยะทางของเมมเบรนมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงกำหนดวัตถุประสงค์เพื่อผลิตแผ่นเมมเบรนที่มีค่าอัตราการไหลคงที่ตลอดทั้งแผ่นโดยมีค่าสภาพการซึมผ่าน (Permeability, P) ของเมมเบรนให้มีค่าคงที่โดยตลอดทั้งแผ่นเมมเบรน โดยที่ค่าความสัมพันธ์ของ ค่าสภาพการซึมผ่านของเมมเบรน ค่าความหนาแน่นของอนุภาคที่แต่ละตำแหน่งของเมมเบรน และ รัศมีของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรนเป็นดังสมการ $P=n\pi r^4$ เพื่อให้ค่าความสัมพันธ์ดังกล่าวจึงจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการศึกษาเงื่อนไขการกัดขยายรอดเพื่อให้ได้รัศมีที่ตำแหน่งต่างๆ ตามที่ต้องการ

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ผลิตแผ่นฟิล์มบางพอลิคาร์บอเนตโดยมีค่าสภาพการซึมผ่านของเมมเบรนคงที่ตลอดทั้งแผ่น ด้วยเทคนิคการกัดรอยนิวเคลียร์ (Nuclear track-etching technique) โดยใช้เงื่อนไขการกัดขยายรอยที่เหมาะสม

1.2.2 ทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนที่ผลิตได้ว่าค่าสภาพการซึมผ่านสอดคล้องกับสมมติฐานในข้อ 1.2.1

บทที่ 2

ทฤษฎี

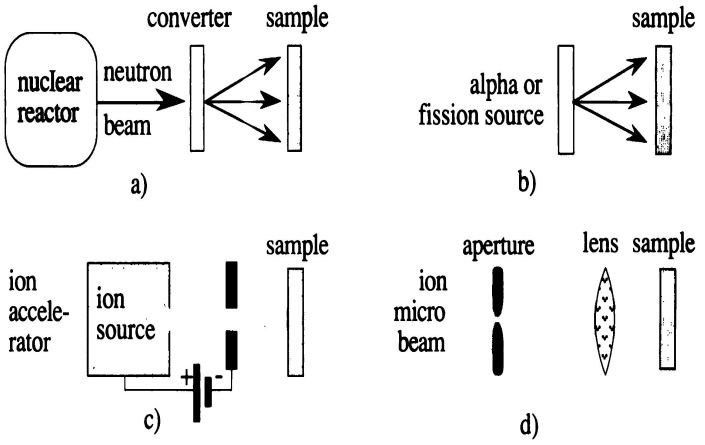
บทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับ ทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทำให้เกิดรอยแฝงบนวัสดุ และทฤษฎีการกัดขยายรอยให้ได้เมมเบรนรูพรุนตามขนาดที่ต้องการ

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการผลิตรูพรุนบนเมมเบรน

การผลิตเมมเบรนมี 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ

การทำให้เกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม (Track Formation) และการกัดขยายรอย (Track Etching) เพื่อให้รอยแฝงบนแผ่นฟิล์มบางอันเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างอนุภาคที่พุ่งชนแผ่นฟิล์มและก่อให้เกิดรอยแฝงดังกล่าวมีขนาดที่ใหญ่และปรากฏชัดขึ้น

มีวิธีการสร้างรอยแฝงในวัตถุของแข็งนั้นอาศัยอนุภาคที่มีพลังงานสูงเพื่อสร้างรอยแฝงในวัสดุวิธีการสร้างแหล่งกำเนิดของอนุภาคนั้นมีวิธีหลัก ๆได้ 4 วิธี คือ a. การใช้อนุภาคจากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor) b. อนุภาคจากแหล่งกำเนิดกัมมันตรังสี (Radioactive source) c. อนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาค (Ion accelerator) และ d. อนุภาคจากลำอนุภาคขนาดเล็ก (Ion micro beam) ดังภาพประกอบที่ 2.1



ภาพประกอบที่ 2.1 แสดงวิธีการ 4 วิธีของแหล่งกำเนิดอนุภาคเพื่อสร้างรอยแฝงบนแผ่นวัสดุ

(ที่มา : Spohr R., 1990,14)

จากสี่วิธีหลักที่เป็นแหล่งกำเนิดของอนุภาคที่ใช้ในการผลิตรอยแฝงบนแผ่นฟิล์มบาง มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. เครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์ (Nuclear reactor)

เป็นวิธีที่การใช้แพร่หลายโดยเฉพาะการสร้างเมมเบรนในทางการค้า โดยใช้อนุภาคที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์นิวเคลียร์เป็นแหล่งกำเนิด คือ นิวตรอน เนื่องจากความเข้มข้นของนิวตรอนสูงที่สุด ความหนาแน่นฟลักซ์นิวตรอน 10^{10} n /cm^2. s โดยอาศัยนิวตรอนในการยิง เพื่อสร้างรอยแฝงในวัตถุที่จะนำมาทำเป็นตัวกรอง นิวตรอนที่ได้ เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัว (Fission) ของ U-235 เครื่องปฏิกรณ์ปรมาณูวิจัย (Research Reactor) ประกอบด้วยท่อนำนิวตรอน และมีการแพร่กระจายของมวลอย่างกว้างๆ อนุภาคดังกล่าวจะมีความเข้มสูง มีลำของอนุภาคที่ตรง ค่อนข้างชัดเจน และมีขนาดใหญ่.

2. วัสดุกัมมันตรังสี (Radioactive source)

เป็นแหล่งกำเนิดอนุภาคอีกวิธีหนึ่งเพื่อนำรอยแฝงนั้นมาสร้างรอยแฝงบนแผ่นฟิล์มบาง อนุภาคจากวัสดุกัมมันตรังสี หากแบ่งย่อยตามการปล่อยอนุภาคสามารถแบ่งย่อยได้จาก 3 แหล่ง คือ

- ต้นกำเนิดนิวตรอนจากปฏิกิริยา (α,n) ประกอบด้วยสารไอโซโทปรังสีที่ปลดปล่อยอนุภาคแอลฟา เช่น เรเดียม (Ra) หรือพลูโตเนียม (Pu) ผสมกับเบอริเลี่ยม (Be) หรือโบรอน (B) แล้วผนึกเข้าด้วยกัน นิวตรอนที่ปลดปล่อยออกมา เกิดจากปฏิกิริยา (α,n) ดังสมการ

$$^{4}_{2}\mathrm{He} + {}^{9}_{4}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}\mathrm{n}$$

- ต้นกำเนิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน (Fission) ได้แก่สารไอโซโทปรังสีที่มีการฟิชชันแล้วปลดปล่อยอนุภาคนิวตรอนอย่างต่อเนื่อง เช่น แคลิฟอเนียม- 252 (^{252}Cf)

ไอโซโทปของสารกัมมันตรังสีนั้นจะแผ่รังสีออกมาด้วยมุมที่กว้าง ความเข้มต่ำ โดยอนุภาคแอลฟา มีพลังงาน 1 MeV ซึ่งพิสัยของการทะลุผ่านวัสดุ อยู่ในช่วง 10 - 20 ไมโครเมตร โดยเราจะศึกษาการกัดรอยที่อยู่ในช่วง 10^{6} -10^{8} รอยต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นช่วงจำนวนรอยของการ

กัดรอยต่อหน่วยพื้นที่ที่ต่ำ อันเนื่องมาจากแหล่งกำเนิดรังสีที่มีค่ากัมมันตภาพรังสีต่ำ ประมาณ 0.1 μCi

3. เครื่องกำเนิดอนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาค (Accelerator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กความเข้มสูง เร่งอนุภาคให้มีพลังงานสูงและควบคุมให้พุ่งเข้าชนกับวัสดุที่เป็นเป้า เป็นวิธีที่มีการใช้อย่างแพร่หลายและกว้างขวางมากในปัจจุบัน ด้วยวิธีนี้ให้อนุภาคที่ปล่อยออกมาขนานกัน อนุภาคที่ออกมาสามารถที่จะกำหนด ขนาดของมวล ระดับพลังงาน มุมที่ต้องการให้พุ่งชนกับวัสดุ และความหนาแน่นของอนุภาคที่ปล่อยออกมาได้หลายค่า ขึ้นกับความต้องการนำวัสดุไปใช้หลังจากการสร้างรอยแฝงแล้ว ด้วยวิธีนี้สามารถควบคุม ขนาดและ รูปร่างของเมมเบรนได้เนื่องจากพลังงานของอนุภาคที่ปล่อยออกมา มีได้หลายค่าในช่วง ตั้งแต่เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ (MeV) ถึง กิกะอิเล็กตรอนโวลต์ (GeV) ซึ่งเมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงเหล่านั้นผ่านเข้าไปในวัสดุจะทำให้เกิดรอยแฝง (Cornelius T.W., *et al*., 2007)โดยขนาดรอยแฝงน้อยกว่า 10 นาโนเมตร และสามารถนำไปกัดขยายรอย ให้ขยายจนมีรูปร่าง ต่าง ๆ เช่น รูปกรวย รูปทรงกระบอก หรือรูปร่างอื่น ๆ

4.อนุภาคจากลำอนุภาคขนาดเล็ก (Ion micro beam) หรือ ระบบไอออนเดี่ยว (Single ion system) เป็นเทคนิคที่อาศัยลำไอออน (Ion beam) อนุภาคที่ได้เป็นลักษณะเป็นพลังงานเดี่ยว ใช้สำหรับงานกัดรอย หรือสร้างรอยแฝง ระดับไมโครเมตร หรือ นาโนเมตร เช่น การสร้างโครงสร้างเป็นกรวย เป็นช่อง เป็นเข็ม เทคนิคนี้มีลักษณะเฉพาะคือ ลำไอออนที่ปล่อยออกมาจะมีลักษณะไอออนกำลังอ่อน (Weak ion) ถูกหยุดยั้งได้เมื่อแทรกซึมผ่านเข้าไปในวัสดุที่พุ่งชน

จากแหล่งกำเนิดอนุภาคสี่วิธีดังกล่าวข้างต้นสามารถแบ่งได้เป็นสองวิธีหลัก ๆ คือ อนุภาคที่เกิดจาก ปฏิกิริยานิวเคลียร์และ อนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาค ซึ่งมีลักษณะเฉพาะตัวที่แตกต่างกันดังนี้

วิธีแรกอนุภาคที่เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน

อนุภาคและพลังงานที่ถูกปล่อยออกมาจากการ ฟิชชันของนิวเคลียสของธาตุหนัก ที่โดนยิงด้วยอนุภาคนิวตรอน ธาตุหนักที่พบบ่อยคือ พลูโตเนียม และ คาลิฟอร์เนียม ยูเรเนียม โดยเฉพาะ

อย่างยิ่ง ยูเรเนียม 235 (U-235) อนุภาคที่เกิดจากการฟิชชันของธาตุพุ่งชนกับแผ่นฟิล์มทำให้เกิดรอยแฝงในแผ่นฟิล์มที่จะนำมาผลิตเมมเบรน ข้อดีของ การสร้างรอยแฝงบนแผ่นฟิล์มด้วยวิธีนี้คือ จำนวนอนุภาคที่ถูกปล่อยออกมามีปริมาณคงที่ อนุภาคที่ปล่อยออกมามีหลายทิศทาง ทำให้รูพรุนมีความหนาแน่นสูง และ เป็นวิธีที่ประหยัด (Apel *et al*., 2001) แต่ วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ เมมเบรนที่ได้มีการปนเปื้อนรังสีที่ปล่อยออกมาพร้อมกับอนุภาคที่อาบบนแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ และ ด้วยวิธีนี้ต้องคำนึงถึงความหนาของแผ่นฟิล์มที่นำมาทำแผ่นเมมเบรนเพื่อการกรอง เพราะหากฟิล์ม พอลิเมอร์หนาเกินไป อนุภาคไม่อาจผ่านทะลุฟิล์มพอลิเมอร์ได้ รอยแฝงที่เกิดขึ้นจึงไม่ทะลุแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ เมื่อนำมากัดขยายรอยรูพรุนที่เกิดขึ้นจะไม่ทะลุแผ่นพอลิเมอร์ แผ่นเมมเบรนที่ผลิตได้จึงไม่สมบูรณ์

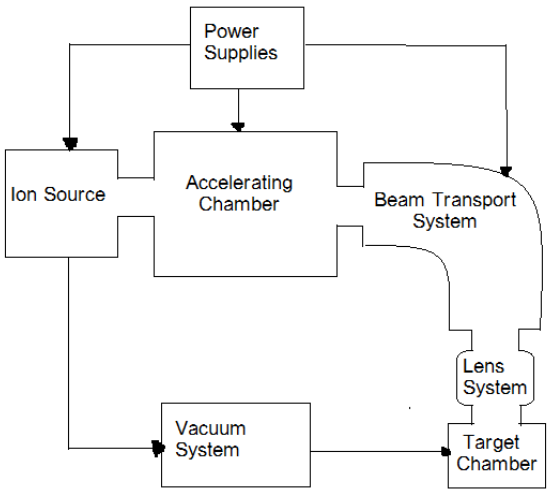
วิธีที่สอง การใช้อนุภาคที่เกิดจากเครื่องเร่งอนุภาค

อนุภาคที่ทำให้เกิดรอยแฝงบนแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ จากเครื่องเร่งอนุภาค (Fleischer et al ., 1975) ฟลักซ์ของอนุภาคมีค่าน้อยสุดในช่วง 10^9 อนุภาคต่อวินาที และฟลักซ์อนุภาคมากขึ้นเพื่อให้เมมเบรนมีรูพรุนมากขึ้นหากเป็นการใช้สำหรับงานในอุตสาหกรรม อนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาคจะมีพลังงาน ระดับ MeV เครื่องเร่งอนุภาคสามารถที่จะปล่อยอนุภาคออกมา แบบต่อเนื่อง หรือ แบบเป็นช่วง ได้ประโยชน์ของการสร้างรอยแฝงบนแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยวิธีการนี้คือ ไม่มีการปนเปื้อนของรังสีบนแผ่นฟิล์ม อนุภาคที่เกิดจากเครื่องเร่งอนุภาคมีพลังงานสูงกว่า อนุภาคจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ฟิชชัน อนุภาคที่ถูกปล่อยออกมาจากเครื่องเร่งอนุภาคมีความหนาแน่นสูง ($> 10^9$ / cm^2•s) จึงทำให้เมมเบรนมีความเป็นรูพรุนสูงจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการกรองได้ดี และโดยวิธีการนี้สามารถที่จะควบคุม การเกิดมุม รอยแฝง และความขนานกันของรอยแฝงในแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ เพื่อให้เกิดรูพรุนที่ขนานกันทั่วตลอดแผ่นกรอง (Flerov et al., 1989)

2.2 หลักการของเครื่องเร่งอนุภาค

เครื่องเร่งอนุภาคโดยทั่วไปประกอบขึ้นจากส่วนสำคัญสามส่วน ดังนี้ คือ แหล่งกำเนิดไอออน (ion source) หรือแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (electron gun) ห้องเร่งอนุภาคสำหรับเร่งอนุภาคให้มี ความเร็วสูงขึ้นโดยใช้สนามไฟฟ้า (accelerating chamber) และระบบนำส่งอนุภาค (beam transport system) ซึ่งประกอบด้วยท่อนำส่งอนุภาค (beam pipe) และระบบแม่เหล็กหลาย

ขั้วที่ใช้ในการจำแนก ไอออนชนิดต่างๆ และปรับขนาดของบีมไปตกกระทบเป้า (target) ซึ่งอยู่ห่างจากห้องเร่งความเร็วตั้งแต่ไม่กี่เมตรจนถึงระดับกิโลเมตรขึ้นไป ไอออนหรืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแหล่งกำเนิดไปยังเป้าภายในความดันที่ต่ำมากๆ ตั้งแต่ 10^{-6} torr จนถึง 10^{-11} torr ขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องเร่งอนุภาค (ภาพประกอบที่ 2.2)



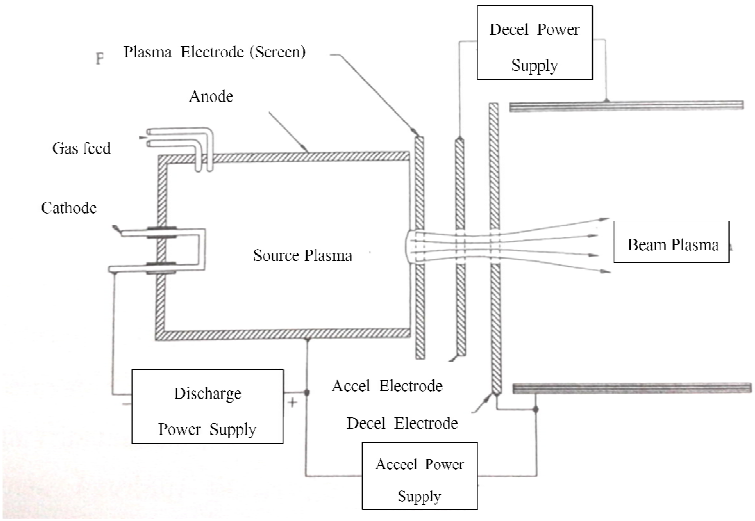
ภาพประกอบที่ 2.2 แสดงองค์ประกอบของเครื่องเร่งอนุภาค ที่ประกอบด้วย แหล่งกำเนิดไอออน ห้องเร่งอนุภาค และระบบนำส่งอนุภาค
(ที่มา : ถิรพัฒน์ วิลัยทอง , 2540)

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องเร่งอนุภาค คือ แหล่งกำเนิดไอออนซึ่งเป็นส่วนที่สร้างไอออนจากธาตุหรือสารประกอบต่างๆ ประกอบด้วยชิ้นส่วนหลักสองส่วนคือ discharge chamber สำหรับสร้างพลาสมา และ electrostatic ion optical system ที่ใช้ดึงไอออนจากพลาสมา ทำให้มีความเร็วเพิ่มขึ้นและบังคับให้ไอออนเหล่านี้เคลื่อนที่เป็นลำในทิศทางที่ต้องการ

2.2.1 แหล่งกำเนิดไอออน (Ion source)

แหล่งกำเนิดไอออนประกอบด้วยแชมเบอร์ซึ่งบรรจุก๊าซหรือไอของธาตุที่ต้องการทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออน แคโทด (cathode) ซึ่งมีโวลเตจเป็นลบประมาณ 80-100 โวลต์คร่อมอยู่ ทำหน้าที่ปลดอิเล็กตรอนเข้าชนโมเลกุลของก๊าซภายใต้ความดันที่เหมาะสม ทำให้เกิดกลุ่มพลาสมา ขึ้นภายในแชมเบอร์ และสนามแม่เหล็กซึ่งทำหน้าที่กักพลาสมาเพื่อให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิเข้าชนโมเลกุลของก๊าซหรือไอธาตุให้แตกตัวเป็นไอออนได้อย่างมีประสิทธิภาพ กระแส

ไอออนถูกดึงออกจากแชมเบอร์ผ่านรูเปิดของอิเล็กโทรดดึง (extraction electrode)

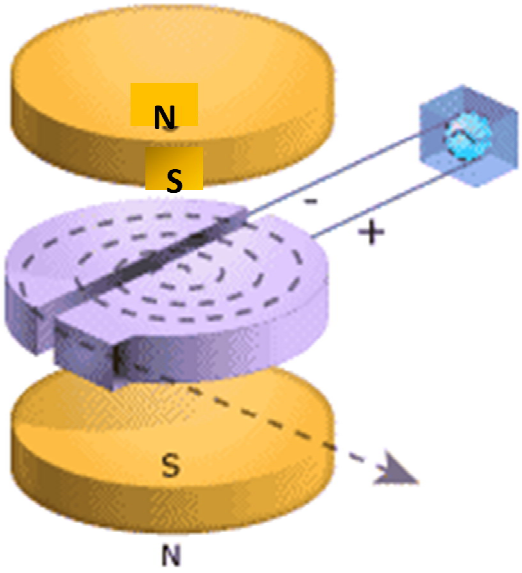


ภาพประกอบที่ 2.3 แสดงส่วนประกอบหลักของแหล่งผลิตลำไอออน (ถิรพัฒน์ วิลัยทอง, 2540)

เมื่ออนุภาคจากแหล่งกำเนิดอนุภาคถูกปล่อยออกมา สู่ส่วนประกอบที่สำคัญเครื่องเร่งอนุภาคคือ ส่วนบริเวณที่การเร่งอนุภาคให้มีความเร็วสูงขึ้น เครื่องเร่งอนุภาคส่วนนี้มีประเภทตามการเคลื่อนที่ของอนุภาค คือ แบบเชิงเส้น (Linear accelerator) และ แบบวงกลม (Cyclotrons)

2.2.2 ห้องเร่งอนุภาค (Accelerating chamber)

เครื่องเร่งอนุภาคไซโคลตรอนเป็นเครื่องเร่งอนุภาคเชิงวง (Circular accelerator) ถูกเร่งให้เป็นวงเพื่อให้มีพลังงานสูง หลักการพื้นฐานของเครื่องเร่งอนุภาคแบบไซโคลตรอนคือใช้สนามแม่เหล็กกระแสตรงบังคับอนุภาค ให้เคลื่อนที่เป็นวง และกระโดดกลับไปกลับมาข้ามช่องว่างระหว่างแท่งแม่เหล็กครึ่งวงกลมสองแท่งคล้ายตัวดี (D-shaped) ที่วางประกอบกัน และมีสนามไฟฟ้าจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่คลื่นวิทยุ (Radio Frequency, RF) คร่อมอยู่ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.4



ภาพประกอบที่ 2.4 อนุภาคในเครื่องเร่งอนุภาคแบบไซโคลตรอน ไอออนบวกของก๊าซจะถูกปล่อยออกมาจากตรงกลางเครื่องกำเนิดไอออน หลังจากนั้นถูกทำให้เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้ากระแสสลับซึ่งเคลื่อนที่ภายใต้สนามแม่เหล็กคงที่ B

เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่เป็นวงกลมครบหนึ่งรอบอยู่ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก (B) คงที่ ใช้เวลาในการเคลื่อนที่ครบหนึ่งรอบ (T) เป็น

$$T = \frac{2\pi r}{V} \qquad (2.1)$$

r คือ รัศมีของวงโคจรของอนุภาคที่มีประจุในแท่งแม่เหล็กครึ่งวงกลม

v คือ ความเร็วของอนุภาคที่เคลื่อนที่ในวงโคจรนั้น ๆ

ขนาดของแรง (F) เนื่องจากสนามแม่เหล็ก (B) ที่กระทำต่ออนุภาค นี้เป็น

$$F = qvB \qquad (2.2)$$

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เป็นวงกลม ในระนาบที่ตั้งฉากแรงที่กระทำต่ออนุภาคมีค่าเป็น

$$F = \frac{mv^2}{r} \qquad (2.3)$$

เนื่องจากแรงทั้งสองมีขนาดเท่ากัน ดังนั้นสามารถหาค่าของความเร็ว (v) ของอนุภาคได้ดังนี้

$$v = \frac{qrB}{m} \tag{2.4}$$

และเวลาการเคลื่อนที่เป็นวงของ อนุภาคคือ

$$T = \frac{2\pi m}{qB} \tag{2.5}$$

จากสมการพบว่าเวลาที่อนุภาคเคลื่อนที่ ในหนึ่งรอบ (T) ไม่ขึ้นกับรัศมีซึ่งหมายความว่า อนุภาคที่อยู่ในวงโคจรที่มีรัศมีมากวิ่งเร็วกว่าวงโคจรที่มีรัศมีน้อย เพราะในทั้งสองวงโคจรอนุภาคใช้เวลาเท่ากัน และเนื่องจากสมการความถี่เชิงมุมของอนุภาคที่เคลื่อนที่เป็นวงกลมคือ

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \tag{2.6}$$

ดังนั้นความถี่เชิงมุมของสนามไฟฟ้าของคลื่นวิทยุที่ใส่เข้าไปมีขนาดคงที่เป็น

$$\omega = \frac{2\pi m}{qB} \tag{2.7}$$

และเมื่ออนุภาควิ่งเร็วขึ้นเรื่อย ๆ จนหลุดออกจากครึ่งวงกลมคล้ายตัวดีจะมีพลังงานสูงมากขึ้น สามารถคำนวณพลังงานได้จากสมการ $E = mc^2$ ซึ่งพลังงานที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับมวล (m) ของอนุภาคที่นำมาเร่งและอนุภาคมีการเคลื่อนที่เข้าใกล้แสงจึงทำให้อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงตามทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ ดังนั้นจากพลังงานรวมของพลังงานจลน์ (T : kinetic energy) และพลังงานจากมวลนิ่ง (Rest mass energy) เขียนเป็นสมการได้คือ $mc^2 = m_0c^2 + K$ เมื่อ m_0 คือมวลนิ่งของอนุภาค (Rest mass) เมื่ออนุภาคที่เคลื่อนที่น้อยเมื่อเทียบกับความเร็วแสง $m \approx m_0$ และ $T \approx m_0v_{max}^2/2$ จะได้ค่าวงโคจรสูงสุด R_{max} ดังต่อไปนี้

$$R_{max} = \frac{\sqrt{2\, m_0 T_{max}}}{qB} \tag{2.8}$$

สำหรับการพิจารณาเฉพาะค่าพลังงานจลน์ ของอนุภาค (T_s) หลังจากเคลื่อนที่ผ่านวงโคจรสูงสุด R_{max} และอยู่ภายใต้สนามแม่เหล็กที่คงที่ B

$$T_s = \frac{T_{max}}{A} = \frac{\mu v_{max}^2}{2} = \frac{\mu}{2}\left(\frac{qBR_{max}}{m}\right)^2 = \frac{1}{2\mu}\left(\frac{qBR_{max}}{A}\right)^2 \tag{2.9}$$

เมื่อ T_s คือ พลังงานจลน์ของแต่ละอนุภาค

T_{max} คือ พลังงานงานจลน์สูงสุดของระบบ

V_{max} คือ ความเร็วสูงสุดที่อนุภาคสามารถเร่งได้

R_{max} คือ รัศมีโคจรสูงสุดของการเคลื่อนที่

q คือ จำนวนประจุของไอออนแต่ละชนิด

B คือ สนามแม่เหล็ก

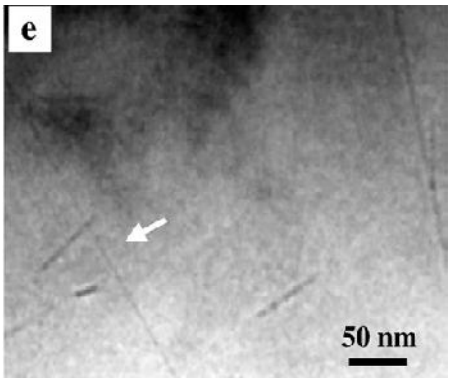
A คือ เลขอะตอม (Atomic mass number)

u คือ หน่วยมวลอะตอม (atomic mass unit)

หลังจากไอออนบวกของธาตุที่มีพลังงานสูงออกจากเครื่องเร่งอนุภาคแล้ว ไอออนเหล่านั้นถูกนำมาใช้สร้างรอยแผลให้เกิดในวัสดุที่จะนำมาทำเมมเบรน ซึ่งเมื่ออนุภาคพุ่งเข้าชนในวัสดุก็จะเกิดปรากฏการณ์ดังต่อไปนี้

2.3 การเกิดรอยบนแผ่นฟิล์ม

เมื่อไอออนที่มีพลังงานสูง พุ่งชนฟิล์มซึ่งเป็นวัสดุที่นำมาผลิตเป็นเมมเบรน ทำให้ภายในโครงสร้างของฟิล์มเกิดการแตกตัว (Ionization) ในเนื้อฟิล์มเป็นรอยแผล (Latent Track) ขนาด 2-6 นาโนเมตร สามารถสังเกตได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ดังภาพประกอบที่ 2.5

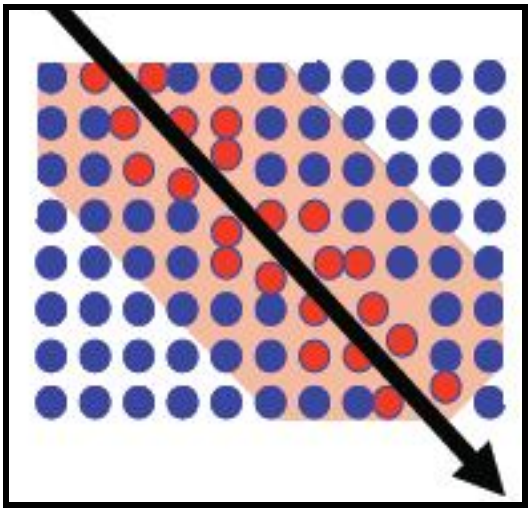


ภาพประกอบที่ 2.5 รอยแผลที่เกิดจากอนุภาค จากปฏิกิริยาฟิชชันที่ปรากฏบนแผ่นพลาสติก

ที่มา : Weixing Li.และคณะ , 2011 : 302

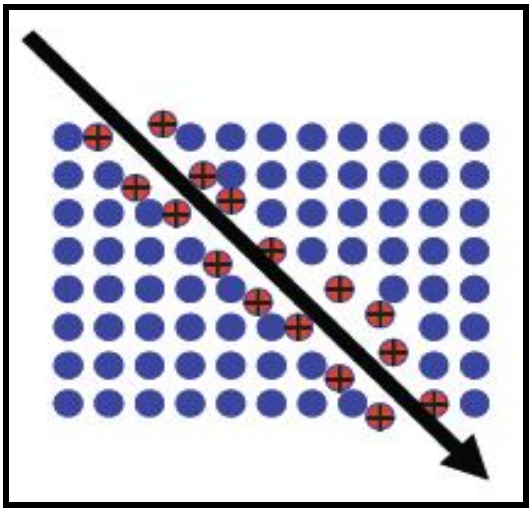
เมื่ออนุภาคที่มีประจุและพลังงานสูงผ่านเข้าไปในวัสดุจะมีการสูญเสียพลังงานโดยการคายพลังงานให้แก่โมเลกุลของสารในตัวกลาง ทำให้โมเลกุลของวัสดุที่ต้องการผลิตเป็นเมมเบรนแตกตัวเป็นไอออนตามแนวทางที่ประจุนั้นวิ่งผ่าน ในกรณีของวัสดุที่เป็นฉนวน จะปรากฏรอยอย่างถาวร ในการเกิดรอยมีทฤษฎีที่อธิบาย (Fleischer *et al*., 1975) เพื่อเป็นแนวการศึกษา ดังนี้

2.3.1. ทฤษฎีเทอมัลสไปค์ (Thermal spike) กล่าวไว้ว่า เมื่ออนุภาควิ่งผ่านเข้าสู่วัสดุ ทำให้เกิดความร้อนในตัววัสดุ หากวัตถุสามารถนำความร้อนได้จะกระจายความร้อนสู่บริเวณข้าง ๆ หาก วัตถุเป็นฉนวนซึ่งไม่สามารถนำความร้อนได้ดี ความร้อนจะทำให้เกิดความเครียดขึ้นจนเกิดการขยายตัว มากกว่าพื้นที่รอบ และเกิดรอยเสียหายขึ้นมาแทนดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.6



ภาพประกอบที่ 2.6 แสดงปรากฏการณ์การเกิดรอยแฝงในวัสดุ ตามทฤษฎีเทอมัลสไปค์
ที่มา : Brinkman J.A. และคณะ, 1956 : 246

2.3.2.ทฤษฎีไอออนเอกซ์โพลชันสไปค์ (Ion explosion spike) เมื่ออนุภาคที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในวัสดุใด ๆ อะตอมจะเกิดการสั่นสะเทือนและเมื่ออะตอมได้รับพลังงานมากจนทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ทำให้อะตอมบริเวณนั้นเป็นประจุบวก แล้วเกิดการผลักกันของประจุเดียวกัน ทำให้อะตอมที่มีประจุบวก แทรกไปอยู่กับอะตอมข้างเคียงจนทำให้เกิดช่องว่างขึ้น หลังจากโมเลกุลได้จัดเรียงตัวอย่างสมดุลแล้ว ดังภาพประกอบที่ 2.7



ภาพประกอบที่ 2.7 การเกิดรอยอนุภาคตามทฤษฎีไอออนเอกซ์โพลชันสไปค์
ที่มา : Freisher, R. L. และคณะ.1975 : 32

จากภาพประกอบที่ 2.7 แสดงให้เห็นขั้นตอนของการเกิดรอยแฝง ขั้นแรกเมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงวิ่งผ่านเข้าไปในวัสดุ ภายในโครงสร้างของวัสดุนั้นเกิดเป็นไอออนไนเซชัน หลังจากนั้น ขั้นต่อมา อะตอมที่อยู่ถัดไปจะถูกชนและถูกแทนที่ ขั้นสุดท้ายเกิดความเครียดแผ่กระจายกว้างออกไป

2.4 กำลังหยุดยั้งและพิสัย (Stopping Power and Range)

2.4.1 กำลังหยุดยั้ง (Stopping Power)

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางจะเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของตัวกลาง อนุภาคจะสูญเสียพลังงานของอนุภาค ในการคิดอัตราการสูญเสียพลังงานจะคิดในรูปอัตราการสูญเสียพลังงานโดยเฉลี่ยต่อระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ เรียกว่า “กำลังหยุดยั้ง” (stopping power) โดยสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{dE}{dx}(MeV/m) = 4\pi r_0^2 z^2 \frac{mc^2}{\beta^2} NZ\left[\ln\left(\frac{2mc^2}{I}\beta^2\right) - \ln(1-\beta^2) - \beta^2\right] \qquad (2.10)$$

เมื่อ m คือมวลนิ่งของอนุภาค

β คือ v/c (ความเร็วของอนุภาคต่อความเร็วแสงในอากาศ)

N คือความหนาแน่นอะตอมของตัวกลาง หน่วยอะตอมต่อลูกบาศก์เมตร

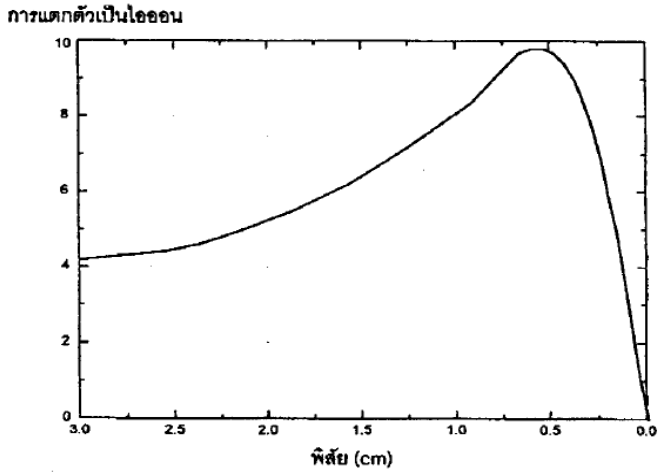
Z คือเลขอะตอมของตัวกลาง

z คือขนาดประจุของอนุภาค

I คือพลังงานศักย์กระตุ้นเฉลี่ย (Mean Excitation Potential) ของตัวกลางหน่วย MeV

สามารถคำนวณได้จากสูตร $I\,(eV) = (9.76 + 58.8\,Z^{-1.19})Z$ (2.11)

อัตราการสูญเสียพลังงานต่อหน่วยระยะทางจะเพิ่มขึ้นเมื่ออนุภาคมีความเร็วลดลง ดังนั้น ความหนาแน่นของการแตกตัวเป็นไอออน (Density of Ionization) ในช่วงท้ายๆ ของการเคลื่อนที่จะมีค่าสูง และเมื่ออนุภาคมีความเร็วลดลงจนใกล้จะหยุดอนุภาคจะรวมตัวกับอิเล็กตรอนในตัวกลางกลายเป็นอะตอมที่เป็นกลางทำให้ประจุของอนุภาคลดลงค่าอัตราสูญเสียพลังงานต่อระยะทางก็ลดลงด้วย สามารถแสดงได้ด้วยกราฟของแบรกก์ (Bragg Curve) ดังแสดงในภาพประกอบที่ 2.8



ภาพประกอบที่ 2.8 แสดงการเกิดไอออนกับระยะทางที่อนุภาคเคลื่อนที่ในตัวกลาง

(ที่มา : พงศกร สุวรรณเดชา ,2540)

ค่ากำลังหยุดยั้งมีข้อสังเกตดังนี้ คือ ขึ้นกับมวลของอนุภาค แปรผันกับ z^2 (ขนาดประจุ)^2 ของอนุภาค ขึ้นอยู่กับอัตราเร็วของอนุภาค และแปรผันกับความหนาแน่นของตัวกลาง

เมื่ออนุภาคเคลื่อนที่เข้าไปในตัวกลางที่เป็นของผสม กำลังหยุดยั้งสำหรับตัวกลางที่เป็นสารประกอบหรือของผสมสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\frac{1}{\rho}\left(\frac{dE}{dk}\right)_{comp} = \sum_i w_i \frac{1}{\rho_i}\left(\frac{dE}{dk}\right) \qquad (2.7)$$

เมื่อ ρ คือความหนาแน่นของสารประกอบหรือของผสม

ρ_i คือความหนาแน่นของธาตุที่ i

$\frac{1}{\rho_i}\left(\frac{dE}{dk}\right)_i$ คือกำลังหยุดยั้งในหน่วย MeV/ kg / mg^2 สำหรับธาตุที่ i

2.4.2 พิสัย (Range)

อนุภาคที่มีประจุเมื่อเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสสารจะสูญเสียพลังงานเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนหรือนิวเคลียสของสสาร ผลที่สุดอนุภาคจะหยุดนิ่งและรวมตัวกับอิเล็กตรอนอิสระในสสารกลายเป็นอะตอมที่เป็นกลาง เช่น

โปรตอน + อิเล็กตรอน → อะตอมของไฮโดรเจน

แอลฟา + อิเล็กตรอนสองตัว → อะตอมของฮีเลียม

ความหนาของสสารที่สามารถหยุดการเคลื่อนที่ของอนุภาคได้พอดีเรียกว่า “พิสัย” (Range) R มีหน่วยเป็นระยะทาง หน่วยที่นิยมใช้คือ kg/m^2 และ g/cm^2

ความหนาของตัวกลางที่ทำให้จำนวนอนุภาคที่ทะลุผ่านตัวกลางเหลือครึ่งหนึ่งของอนุภาคทั้งหมดเรียกว่า “พิสัยเฉลี่ย” (Mean Range) ส่วนความหนาของตัวกลางที่ทำให้ไม่มีอนุภาค ใดๆ สามารถทะลุผ่านมาได้เลย เรียกว่า “พิสัยประมาณ” (Extrapolated, R_e) ค่าที่นิยมใช้คือค่า พิสัยเฉลี่ย ซึ่งมักจะเรียกว่า “พิสัย”

พิสัยของอนุภาคแอลฟาในตัวกลางใดๆสามารถหาได้จาก

$$R(mm) = 3.2x10^{-1}\frac{\sqrt{A_{ef}}}{\rho\left(\frac{kg}{m^3}\right)}R_{air}(mm) \qquad (2.8)$$

$$\sqrt{A_{ef}} \quad = \left(\sum_{i=1}^{L} \frac{w_i}{\sqrt{A_i}}\right) - 1 \qquad (2.9)$$

$$R_{air}(mm) \; = \; e^{[1.61\sqrt{E_k(MeV)}]}(1 \; < \; E_k \; \leq 4 \; MeV) \qquad (2.10)$$

$$= \quad (0.05E_k + 2.85)E_k^{3/2}(4 \; \leq \; E_k \; \leq 15 \; MeV)$$

2.5 ทฤษฎีการกัดขยายรอย

การกัดขยายรอยของวัสดุที่ถูกระดมยิงด้วยอนุภาค จนเกิดรอยแฝง ทำให้รอยแฝงที่เกิดขึ้นสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์หรือเพื่อให้รอยแฝงเกิดเป็นรูพรุนเชื่อมต่อกันตลอดรอยแฝงโดยใช้สารเคมีที่เหมาะสมสำหรับการกัดรอย โดยมีปัจจัยสำคัญ 3 ประการดังต่อไปนี้

1. ความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้สำหรับกัดรอย
2. อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยาเคมี
3. เวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเคมี

สำหรับการกัดขยายรอยโดยสารเคมี วัสดุจะถูกสารเคมีกัดขยายพร้อมกันสองตำแหน่ง ซึ่งแต่ละตำแหน่งจะมีอัตราการกัดขยายรอยที่ต่างกัน อัตราการหลุดไปทั้ง 2 แบบ คือ (Fleischer R.L. และคณะ.1975)

1. อัตราการขยายรอยทั่วไป (General etching rate, V_G) คืออัตราการกัดผิวหน้าซึ่งจะเกิดบนผิวหน้าของแผ่นบันทึกรอยบริเวณที่ถูกทำลายและไม่ถูกทำลาย
2. อัตราการขยายรอยอนุภาค (Track etching rate, V_T) คืออัตราการกัดขยายรอย เป็นการกัดขยายรอยตามแนวทางที่อนุภาคผ่านทำให้เกิดรอย หรือเรียกว่ารอยแฝงในวัตถุ

พิจารณาผิวหน้าของแผ่นบันทึกรอย ดังภาพประกอบ 2.9 การกัดรอยจะปรากฏทุก ๆ ตำแหน่งโดยมีอัตราการกัดรอยด้วยอัตราเร็วเท่ากัน ลักษณะการกัดรอยจะมีลักษณะเป็นวงกลม เมื่อเวลาผ่านไป t การกัดรอยในแต่ละตำแหน่งจะถูกกัดเป็นเป็นรัศมี $V_G t$ ทำให้ผิวหน้าถูกกัดรอยเป็นระยะทาง H

$$H = V_G t \qquad (2.10)$$

สำหรับการกัดขยายรอยตามรอยแฝงของอนุภาค (Etching track , V_T) เกิดการกัดขยายรอยทุก ๆ ตำแหน่งของแนวทางที่อนุภาคผ่าน จะมีอัตราการกัดตามรอย เป็น V_T ซึ่งค่า ขึ้นอยู่กับพลังงานของอนุภาคที่สูญเสียให้แก่โมเลกุลของสสาร ในการพิจารณาจะให้มีค่าคงที่ ดังนั้นเมื่อเวลาที่ถูกกัดขยายรอยเป็น V_t ความยาวของรอยที่ถูกกัดขยายลงไป เป็นตามสมการ

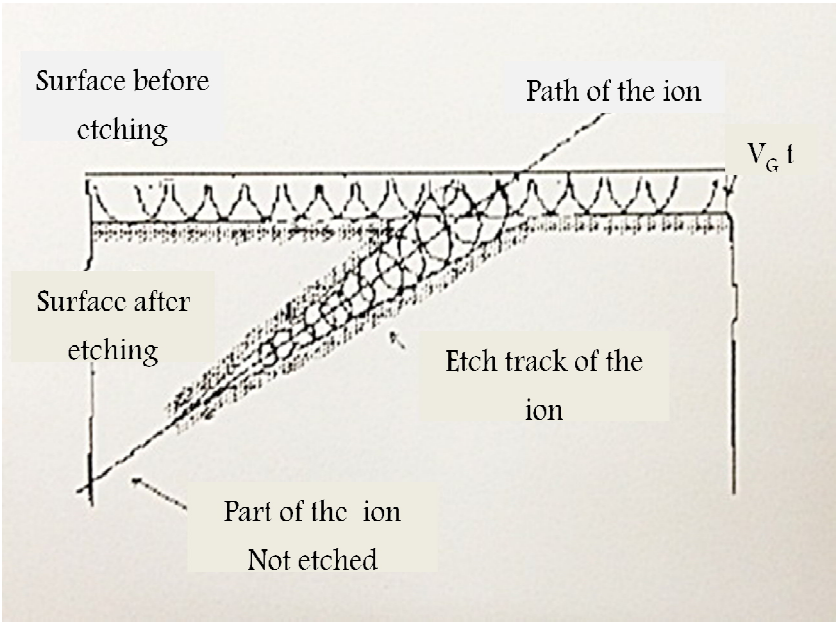
$$L = V_t t \tag{2.11}$$

สิ่งที่พิจารณาอีกอย่างหนึ่งในการเกิดรอยที่ได้จากการกัดขยายรอย คือมุมของการชนระหว่างอนุภาคกับแผ่นบันทึกรอย ในการกัดขยายรอยแฝงด้วยกระบวนการทางเคมี รอยที่ยังปรากฏอยู่ได้ก็ต่อเมื่อมุมที่อนุภาคตกกระทบ (α) กับแผ่นบันทึกรอย ต้องมากกว่ามุมวิกฤติ α_0 และการกัดขยายรอยในแนวการเคลื่อนที่ของอนุภาคมากกว่าอัตราการกัดขยายผิวดังภาพประกอบที่ 2.11 จะได้ว่า

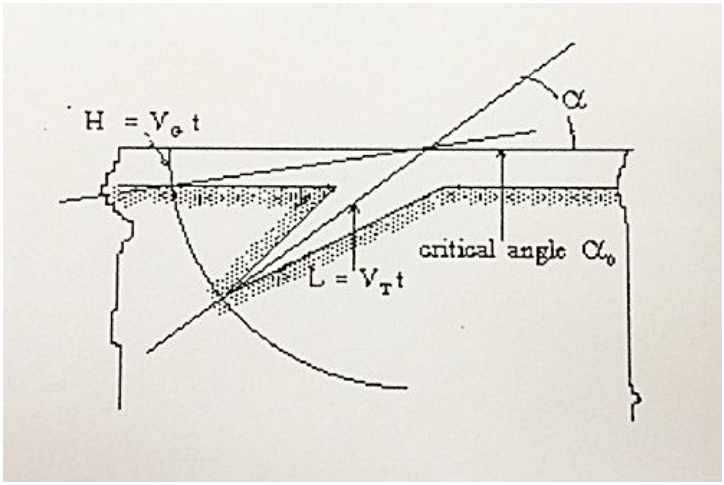
$$\text{Sin}\,\alpha_0 = \frac{H}{L} = \frac{V_G t}{V_T t} = \frac{V_G}{V_T} \tag{2.12}$$

หรือ

$$\alpha_0 = \text{Sin}^{-1}\left(\frac{V_G}{V_T}\right) \tag{2.13}$$



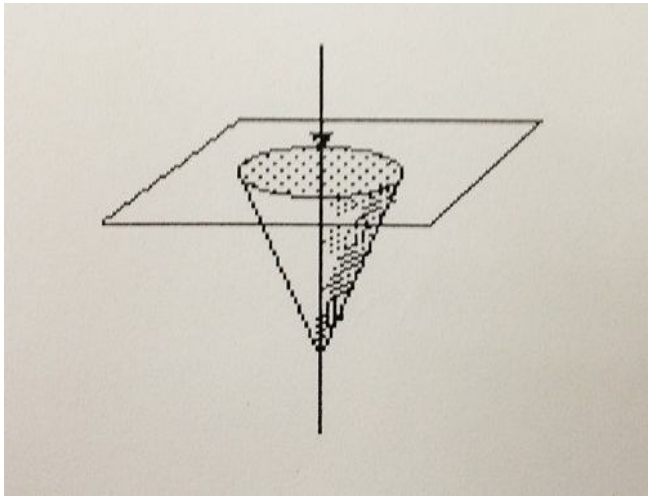
ภาพประกอบที่ 2.9 แสดงการกัดตามรอยแฝง และ การกัดตามผิวหน้าโดยใช้หลักการออยเกนส์อธิบาย (ที่มา : สมชาย ช่างเขียน , 2539 : 5)



ภาพประกอบที่ 2.10 แสดงแผนภาพด้านข้างของรอยที่เกิดขึ้นและมุมวิกฤติ α_0

(ที่มา : สมชาย ช่างเขียน , 2539 : 5)

การกัดรอยต้องมีเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อให้รอยที่ได้จากการกัดขยายรอยเป็นรอยที่เด่นชัดและทะลุไปอีกด้านหนึ่งเพื่อใช้ประโยชนสำหรับการกรองได้ เช่นสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงหรืออุณหภูมิที่สูง อัตราการกัดขยายรอยจะเกิดขึ้นรวดเร็วกว่า สารละลายที่มีความเข้มข้นต่ำ หรืออุณหภูมิต่ำกว่า ลักษณะของการเกิดรอยหลังจากที่อนุภาคผ่านจะขึ้นอยู่กับพลังงานที่สูญเสียไปของอนุภาค โดยพลังงานจะแผ่กระจายไปในแนวตั้งฉากกับแนวทางการเคลื่อนที่ของอนุภาค หลังจากกัดขยายรอยแล้วพบว่าจะมีลักษณะเป็นรูปกรวย (สมชาย ช่างเขียน, 2539) ดังภาพประกอบที่ 2.11



ภาพประกอบที่ 2.11 แสดงรูปร่างการเกิดรอยที่มีประจุเคลื่อนที่ผ่านแบบตรง ๆ ตั้งฉากกับผิววัสดุ

(ที่มา : สมหมาย ช่างเขียน , 2539 : 6)

ในกรณีที่อนุภาคผ่านเข้าไปในแนวตั้งฉากกับผิวหน้าของพอลิเมอร์เมื่อกระบวนการกัดขยายรอยจะได้รูปร่างบนผิวหน้าของพอลิเมอร์เป็นวงกลมและรอยที่ถูกกัดขยายนั้นจะเป็นไปตามเงื่อนไขของตัวแปรต่าง ๆ ตามภาพประกอบที่ 2.11 ดังนี้ ถ้ากำหนดให้

V_t = อัตราเร็วของการกัดขยายรอยตามแนวทาง

V_G = อัตราเร็วของการกัดขยายรอยตามผิว

l = ระยะความลึกของผิวหน้าที่ถูกกัดลึกลงไป

L = ระยะความลึกของผิวหน้าเดิม

R = ระยะความลึกของผิวหน้าถึงตำแหน่งที่อนุภาคเคลื่อนที่ลึกลงไป

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรอย

T = เวลาของการกัดขยายรอย

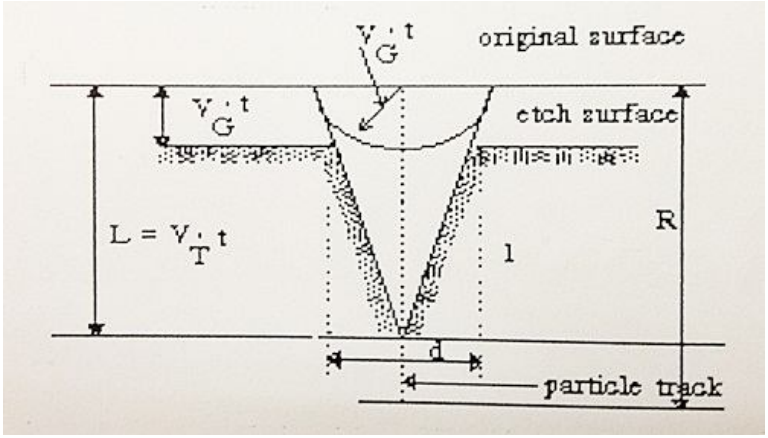
ถ้า V_t เป็นค่าคงที่ตลอดตามแนวทาง และ V_G เป็นค่าคงที่ทุกทิศทาง (Constance and isotropic)

จะได้ $\frac{V_G}{V_T}$ เป็นค่าคงที่

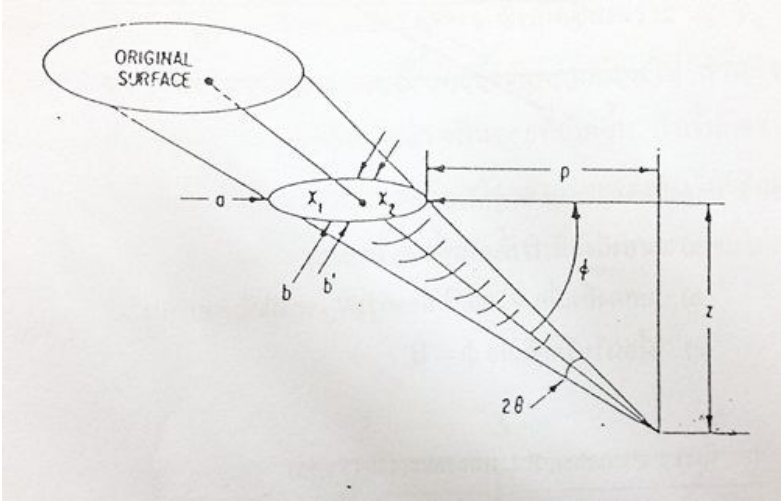
$$l = (V_T - V_G) \quad (2.14)$$

$$d = 2V_G t\sqrt{\frac{V_T - V_G}{V_T + V_G}} \quad (2.15)$$

จากสมการ ที่ 2.14 และ 2.15 พบว่า ถ้า $V_T = V_G$ แล้ว l และ d จะมีค่าเป็นศูนย์มีความหมายคือไม่เกิดรอยบนวัสดุ



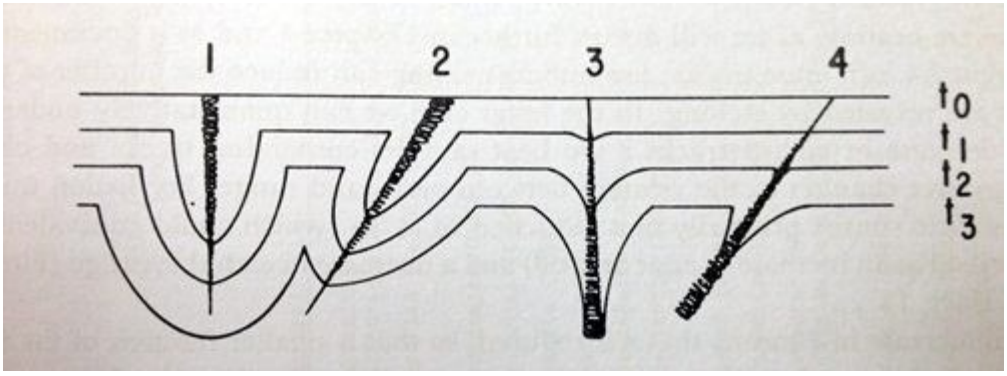
ภาพประกอบที่ 2.12 แสดงรูปทรงของรอยอนุภาคที่เกิดขึ้นในแนวตั้งฉากกับผิวที่ผ่านการกัดขยายรอยแล้ว (ที่มา : Fleischer, R.L. และคณะ ,1975 : 51)



ภาพประกอบที่ 2.13 แสดงรูปทรงเรขาคณิตของรอยที่เกิดขึ้นในแนวมุมเอียง ø กับผิวที่ผ่านการกัดขยายรอยแล้ว (ที่มา : Fleischer, R.L. และคณะ ,1975 : 51)

2.5.1 ผลของการกัดขยายรอยโดยใช้เวลานาน (Prolong Etching Effect)

เมื่อการกัดขยายรอยนานขึ้น จะไม่มีผลต่อรอยมากนัก สมมุติให้ θ คงที่ ในช่วงเวลาสั้นๆ รอบรอยบางจะถูกตัดให้เห็น แต่รอยบางก็ไม่ถูกกัดขยายรอย สัมประสิทธิ์การกัดขยายรอยจะเพิ่มขึ้นทั้งการคำนวณเชิงตัวเลขและจากการวัดโดยตรง ซึ่งเกิดขึ้นเพราะ V_T / V_G สูง ๆ การกัดขยายรอยตามความยาวจะมากขึ้น ถ้าเริ่มคิดจากการเริ่มต้น ของการกัดขยายรอย θ ที่เกิดขึ้นไม่ลึกแนวอนุภาคที่ถูกกัดขยายรอยจะเห็นได้ชัดแต่เมื่อกัดขยายรอยต่อไปรอยพวกนี้จะมองไม่ชัด แต่ถ้า θ เกิดที่ลึกๆ ก่อนการกัดขยายรอยจะไม่เห็นแต่เมื่อกัดขยายรอยนานจะเห็นชัดขึ้น ดังภาพประกอบที่ 2.15



ภาพประกอบที่ 2.14 การเกิดรอยบนแผ่นพอลิเมอร์ซึ่งเกิดจากอนุภาค และผลของ Prolong etching effect (ที่มา Fleischer, R.L. และคณะ.1975 : 63)

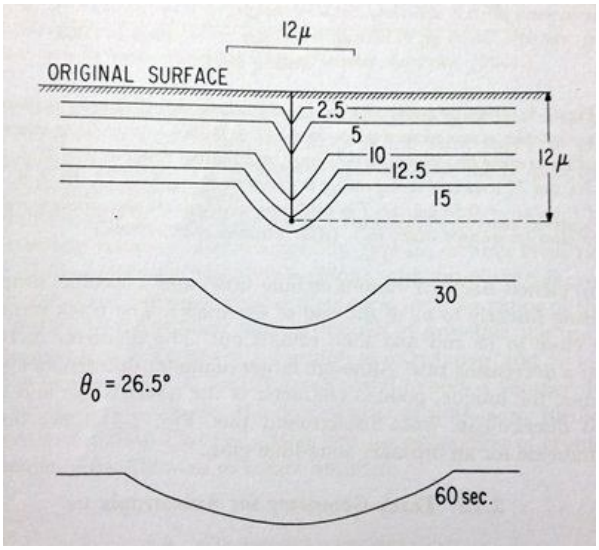
จากภาพประกอบที่ 2.15 รอยหมายเลข 3 และหมายเลข 4 ที่ t เป็นผลของ Prolonged etching effect หมายเลข 1 และ หมายเลข 2 เกิดจากการกัดขยายรอย จากเริ่มแรก ทำให้เกิดรอยสำหรับ 3 เหตุผลหลักคือ

1) ร่องรอยเล็ก ๆ ที่ไม่ได้เกิดจากการเริ่มต้นจะถูกขยาย
2) รอยใหม่จากเริ่มต้นและสุดท้ายภายใต้ผิวเริ่มต้นถูกขยายให้ใหญ่ขึ้น
3) ผลจากข้างต้น การกัดตามรอยมีรอยบุ๋มลงไปและการทำลายเพิ่มขึ้น ทำให้ส่วนของรอยเกิดตามยาวมากขึ้น

ดังแสดงในภาพประกอบ 2.16 ซึ่งจะทำให้รอยไม่ชัดเจนเมื่อกำหนดเงื่อนไขการกัดรอยและเวลา V_G T จะถูกกัดออกจากผิวฟิล์มมาตรฐานหลุมก็จะเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อการนับจำนวนรอยเพราะอัตราที่ปรากฏสำหรับรอยใหม่จะสมดุลโดยเมื่อมีความยาวเต็มที่รอบ ๆ รอยเก่าซึ่งมีความหนาแน่น

โดยไม่ทับกัน แต่วิธีที่ดีที่สุดคือนับรอยเป็นฟังก์ชันของเวลาและแปลงกลับไปเป็นความหนาแน่นของรอยเมื่อเทียบเวลาเท่ากับศูนย์

การกัดขยายรอยมีการศึกษาเพื่อหาตัวแปรที่มีผลกระทบต่อการขยายรอยแฝงที่เกิดขึ้นในวัสดุ ความเข้มข้นของตัวทำละลายมีผลต่อการกัดขยายรอย ความเข้มข้นของตัวทำละลายสูงจะมีค่าการกัดขยายรอยที่สูงกว่า ความเข้มข้นของตัวทำละลายต่ำ (Blanford et al., 1970) และมีการศึกษาผลของอุณหภูมิ ความเข้มของตัวทำละลายเท่ากัน ถ้าอุณหภูมิสูงกว่าอัตราการกัดขยายรอย ย่อมมีค่ามากกว่าตัวทำละลายที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า



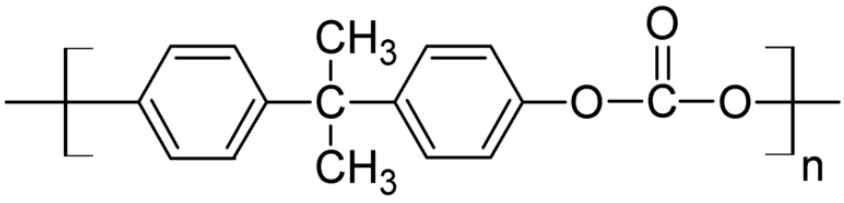
รูปภาพประกอบ 2.15 แสดงอัตราการกัดขยายรอยตามชนิดของพอลิเมอร์กับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายในการกัดขยายรอย
(ที่มา Fleischer,R.L. และคณะ 1975 : 55)

การกัดขยายรอยที่มีเงื่อนไขที่แตกต่างกันจะทำให้มีมุมกรวยที่แตกต่างกันในแต่ละวัสดุ สำหรับวัสดุที่มีมุมกรวยเล็ก ๆ จะมีความยาวตามสมการที่ 2.11 และสำหรับมุมกรวยขนาดใหญ่กว่าจะเป็นไปตามสมการที่ 2.14 การกัดขยายรอยนั้นทำให้เกิดรอยที่ชัดเจนและดูง่ายจากแผ่นฟิล์มที่มีความไวต่ออนุภาคเช่น พวกพอลีคาร์บอเนต หรือ เซลลูโลสไนเตรท ก็จะมีลักษณะรอยที่หลากหลาย

2.6 ทฤษฎีเกี่ยวข้องกับการกรอง

ปัจจุบันได้มีการนำแผ่นเมมเบรนพอลีคาร์บอเนต (polycarbonate, PC) ซึ่งเป็นวัสดุชนิดแรกที่เริ่มนำมาใช้ผลิตเป็นแผ่นกรอง (Fleischer et al., 1975) เพราะมีความยืดหยุ่นและแข็งแรง ทน

ต่อสภาพที่เป็นกรดและตัวทำละลายทางชีวภาพได้ดี สามารถกัดให้เกิดรูพรุนได้ในสารละลายที่เป็นด่าง (Ferrain et al., 1994 , Karim et al., 2009)



ภาพประกอบที่ 2.16 โครงสร้างทางเคมีของ พอลีคาร์บอเนต ()

มีการนำเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็กมาใช้ในกระบวนการกรองทั้งภาคอุตสาหกรรม เช่น การผลิตเหล้า ไวน์ รวมทั้งน้ำดื่ม ในทางการแพทย์ได้มีการใช้เยื่อบางในเครื่องกรองไตเทียม หรือระบบการกำจัดน้ำเสีย ที่ต้องการเพิ่มปริมาณออกซิเจนให้เจือในบ่อบำบัดน้ำเสีย ให้มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นการพัฒนากระบวนการกรองของเมมเบรน จึงมีการพัฒนาเพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งาน โดยเฉพาะ เมมเบรนที่มีความเป็นรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อให้เหมาะสมกับสารแขวนลอยที่ต้องการกรอง โดยตัวอย่างโมเลกุลหรืออนุภาคที่สามารถแยกโดยเมมเบรนประเภทต่าง ๆ ได้แสดงในภาพประกอบที่ 2.17

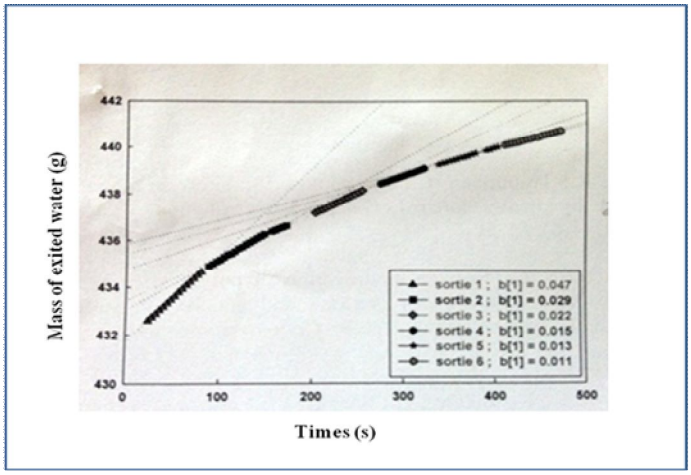
ภาพประกอบที่ 2.17 แสดงตัวอย่างโมเลกุลหรืออนุภาคที่สามารถแยกโดยเมมเบรน
(ที่มา : ขันทอง สุนทราภา 2547:4)

1. กระบวนการกรองออสโมซิสผันกลับได้ (Reverse Osmosis : RO) เป็นการกรองที่อาศัยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยบนแผ่นเมมเบรน เล็กกว่า 0.001 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับกรองสารแขวนลอยที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 100 – 100,000 ดาลตัน (Da) ตัวอย่างของสารแขวนลอยที่มีขนาดดังกล่าวได้แก่ ไอออนของโลหะ สารละลายเกลือ และน้ำตาลเป็นต้น

2. กระบวนการกรองแบบอัลตร้าฟิวเตชัน (Ultrafiltration : μF) อาศัยแผ่นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนบนแผ่นเมมเบรนเฉลี่ย อยู่ในช่วง 0.001- 0.1 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับการกรองสารแขวนลอยที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 1,000 - 100,000 ดาลตัน (Da) ตัวอย่างของสารแขวนลอยที่มีขนาดดังกล่าวได้แก่ ไวรัส คอลลอยด์ โปรตีน และอัลบูมิน เป็นต้น

3. กระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตชัน (Microfiltration : mF) นั้นจะอาศัยแผ่นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยบนแผ่นเมมเบรน อยู่ในช่วง 0.1 – 1.0 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับการกรองสารแขวนลอยที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 100,000 – 1,000,000 ดาลตัน (Da) ตัวอย่างการกรองของสารแขวนลอยที่มีขนาดดังกล่าว ได้แก่ เม็ดสี เป็นต้น

โดยทั่วไปเมมเบรนมีลักษณะและขนาดรูพรุนเท่ากันตลอดทั้งแผ่นเหมาะสำหรับการกรองสารแขวนลอยที่มีขนาดจำกัด เนื่องจากรูพรุนของเมมเบรนที่เท่ากันตลอดทั้งแผ่น การผลิตเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนแปรผันตามความยาวของแผ่นเมมเบรนนั้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองของเมมเบรน โดยเฉพาะการกรองสารที่มีขนาดของอนุภาคแตกต่างกันอยู่รวมกัน โดยอาศัยการกรองเพียงครั้งเดียว (Suksawat *et al*., 2007) เริ่มต้นการผลิต โดยการระดมยิงแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์ด้วยอนุภาคพลังงานสูงโดยความหนาแน่นของอนุภาคของแต่ละตำแหน่งบนแผ่นฟิล์มพอลิเมอร์แปรผันตามความยาวของฟิล์ม หลังจากนั้นนำไปกัดขยายรอยโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อให้เกิดรูพรุน ได้ศึกษาการกัดรอยแผ่นฟิล์มบาง PET ที่มีความเป็นรูพรุนแปรผันตามความยาวของเมมเบรน (Suksawat *et al*., 2007) โดยความหนาแน่นของอนุภาคบนแผ่นฟิล์ม n(x) ได้ถูกคำนวณเพื่อให้เมมเบรนมี ค่าความเป็นรูพรุน(Porosity) คงที่ตลอดทั้งแผ่น นั้นคือ $p = n\pi r^2$ มีค่าคงที่หรือเขียนในรูปตัวแปรของระยะทางของ (x) ก็คือ $n(x) = (\frac{p}{\pi})/(r_0+ax)^2$ ผลจากการศึกษาการกรองด้วยการผลิตแผ่นเมมเบรนที่มีค่าความเป็นรูพรุนคงที่ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 2.18



ภาพประกอบที่ 2.18 แสดงอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนแต่ละตำแหน่งของเมมเบรน ที่มีความพรุนคงที่ตลอดทั้งแผ่น ที่มา : Suksawat และคณะ, 2007

จากผลการทดลอง การกรองน้ำผ่าน เมมเบรนที่มีความเป็นรูพรุนคงที่ แต่มีขนาดของรูพรุนแปรผันตามระยะทางของเมมเบรน $p = n\pi r^2$ = ค่าคงที่ อัตราการไหลของน้ำจะลดลงตามระยะทางของเมมเบรน ดังนั้นอัตราการไหลออกของน้ำที่ผ่านแต่ละตำแหน่ง จะลดลงตามระยะทางที่ห่างจากทางน้ำเข้า สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานที่ต้องการให้มีการกรองสารที่มีขนาดอนุภาคผสมกันหลายขนาด ภายในครั้งเดียวและต้องการให้มีอัตราการกรองของแต่ละตำแหน่งเท่ากัน จึงต้องมีการพัฒนาให้เมมเบรนมีอัตราการไหลผ่านของน้ำที่คงที่ตลอดทั้งแผ่น

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการวิจัยการผลิตเมมเบรนที่มีขนาดรัศมีของรูพรุนแปรผันตามความยาวของเมมเบรนและการทดสอบการกรองโดยมีหกขั้นตอนที่สำคัญดังต่อไปนี้

1. เตรียมฟิล์ม PC โดยการระดมยิงด้วยอนุภาค ^{58}Ni พลังงาน 10.7 MeV/u
2. การอาบแผ่นฟิล์มด้วยรังสี UV ที่มีความยาวคลื่น 312 nm
3. การกัดขยายรอยแผ่งของแผ่นฟิล์มบาง PC ให้เป็นเมมเบรนที่มีรูพรุนแปรผันตามความยาวของ เมมเบรน
4. การวิเคราะห์ วัดขนาด และ ภาคตัดขวางของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรน
5. การหาค่ากำลังหยุดยั้งของแผ่นฟิล์ม PC
6. ศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน

3.1 วัสดุและอุปกรณ์

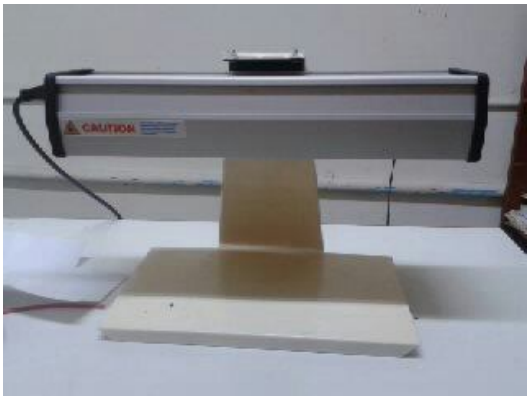
3.1.1. อุปกรณ์ขั้นตอนการระดมยิงแผ่นฟิล์ม PC ด้วยอนุภาค ^{58}Ni

1. เครื่องเร่งอนุภาค Cyclotron สำหรับเร่ง ^{58}Ni (GANIL, France)
2. แท่นวางฟิล์ม รูปสามเหลี่ยมด้านเท่า
3. แผ่นฟิล์ม พอลิคาร์บอเนต ขนาด กว้าง 4 cm ยาว 25 cm หนา 6 μm
4. แผ่นอลูมิเนียมบาง

3.1.2 อุปกรณ์การอาบแผ่นฟิล์มด้วยรังสี UV

1. เครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (VILBER รุ่น VL-215 mc)

2. แผ่นฟิล์ม PC ขนาด 4 x 25 cm^2



ภาพประกอบที่ 3.1 เครื่องฉายรังสีอัลตราไวโอเลต (VILBER รุ่น VL-215 mc)

3.1.3 อุปกรณ์การกัดขยายรอยแผ่งของแผ่น PC

1. อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Lap Companion รุ่น CW-1oG)

2. Syringe Pump (HARVAD รุ่น PHD 2000) (ดัดแปลงเพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นฟิล์ม)

3. อ่างอัลตราโซนิค

4. เตาให้ความร้อนไฟฟ้า (AMTAST Basic รุ่น AMTAST)

5. เครื่องชั่งสารเคมี (Sartorius รุ่น BS 4202 S)

6. แผ่นฟิล์ม PC ที่ผ่านการอาบรังสี UV แล้ว

7. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH จากบริษัท EMSURE UN1823)

ภาพประกอบที่ 3.2 อ่างควบคุมอุณหภูมิ (Lab Companion รุ่น CW-10G)

ภาพประกอบที่ 3.3 Syringe pump (HARVAD APPARATUS รุ่น PHD 2000)

3.1.4 วัสดุและอุปกรณ์สำหรับการวิเคราะห์ วัดขนาด และ ภาคตัดขวางของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรน

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
2. เครื่องคอมพิวเตอร์พร้อมโปรแกรม imageJ
3. ไนโตรเจนเหลว

ภาพประกอบที่ 3.4 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (FEI รุ่น Quanta 400)

3.1.5 อุปกรณ์ทดสอบอัตราการไหลของน้ำ

1. ชุดทดสอบอัตราการไหล**ของน้ำ**

2. หลอดฉีดยาขนาด 50 ml

3. Syringe pump

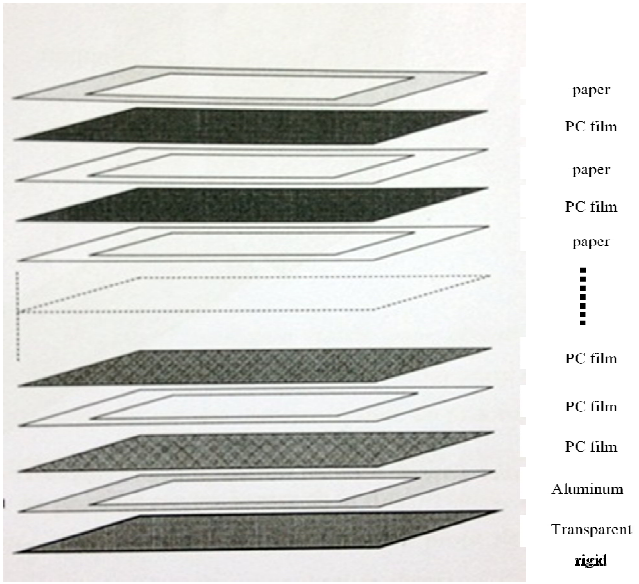
4. ปั๊มดูดอากาศ

5. โหลปรับความดันอะครีลิค

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

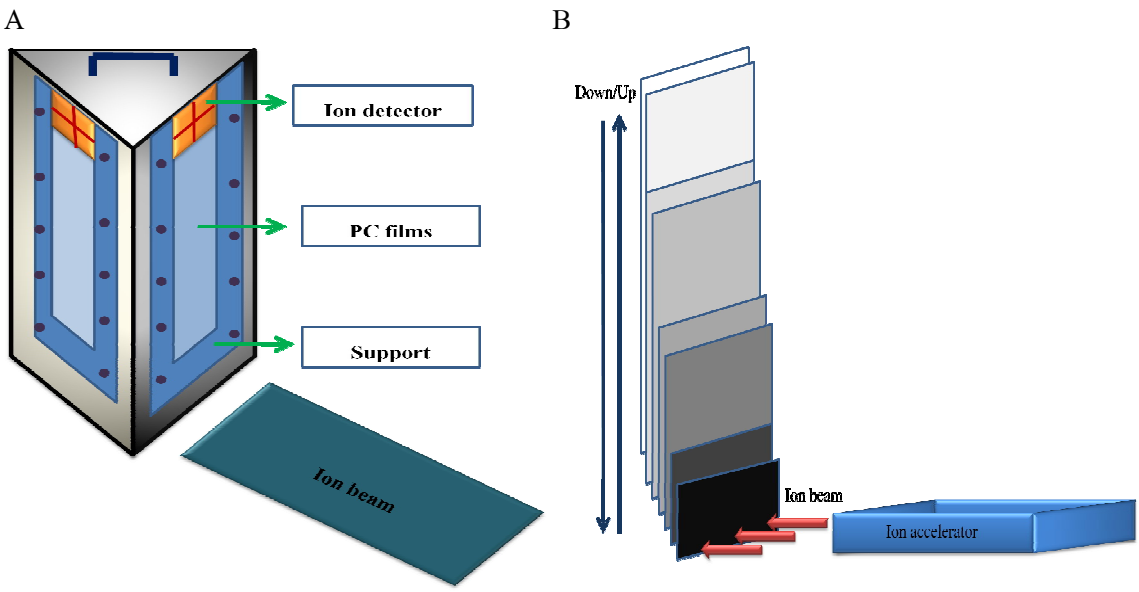
3.2.1 ขั้นตอนการระดมยิงฟิล์ม ด้วยอนุภาค ^{58}Ni

ขั้นตอนแรกในการผลิตเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนแปรผันตามความยาวของเมมเบรน เริ่มจากการสร้างรอยแฝงในแผ่นโดยฟิล์มบาง แผ่นฟิล์มที่นำมาศึกษาคือ ฟิล์มบางพอลิคาร์บอเนต ขนาด 4 X 25 cm^2 หนา 6 μm วางแผ่นฟิล์มซ้อนกัน 6 แผ่นซึ่งแต่ละแผ่นมีกระดาษที่มีขนาดเท่าแผ่นฟิล์ม คั่นไว้เพื่อกันไม่ให้แผ่นฟิล์มติดกัน กระดาษแต่ละแผ่นจะมีลักษณะเป็นกรอบ ด้านในช่องว่าง ขนาด 2 X 23 cm^2 ดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.5 เพื่อให้อนุภาคผ่านทะลุฟิล์มทั้งหกแผ่น หลังจากนั้นห่อด้วยแผ่นอลูมิเนียมบางที่ขอบเพื่อป้องกันไม่ให้อนุภาคชนกับขอบของฟิล์ม นำชุดฟิล์มที่เตรียมไว้ ติดที่แท่นวางฟิล์มดังแสดงในภาพประกอบที่ 3.6



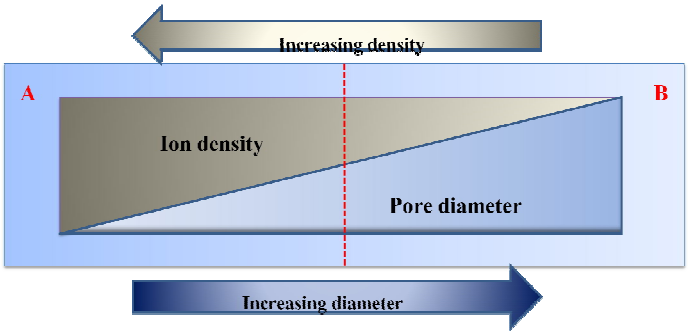
ภาพประกอบที่ 3.5 ชุดฟิล์มที่ซ้อนกันแต่ละชั้นก่อนนำไปวางบนแท่นวางฟิล์มและระดมยิงด้วยอนุภาคจากเครื่องเร่งอนุภาค ณ GANIL, France

ภาพประกอบที่ 3.5 แสดงชุดของฟิล์มซึ่งประกอบด้วยชั้นฟิล์ม กรอบกระดาษ แผ่นอลูมีเนียม นำชุดของฟิล์มไปติดที่ด้านแต่ละด้านของแท่นวางฟิล์ม พิจารณาจากภาพประกอบ 3.6 A มีลักษณะเป็นแท่งสามเหลี่ยมด้านเท่า การเคลื่อนที่ของแท่นวางฟิล์มจะเคลื่อนที่ขึ้นลงเพื่อให้ลำอนุภาคยิงที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของฟิล์ม ที่ตำแหน่งบนสุดของแท่นวางฟิล์มมีแผ่นตรวจวัดอนุภาคติดอยู่ เมื่อมีอนุภาคกระทบ แผ่นตัวตรวจวัดจะเรืองแสงเพื่อยืนยันว่ามีอนุภาคถูกปล่อยออกมา เมื่อชุดของฟิล์มถูกระดมยิงด้วยลำอนุภาค ^{58}**Ni** แล้ว แท่นวางฟิล์มจะหมุนอีกด้านเพื่อระดมยิงอนุภาค ^{58}**Ni** แก่ชุดฟิล์มอีกชุดหนึ่ง จากการทดลองนี้ต้องการระดมยิงแผ่นฟิล์มให้มีความหนาแน่นของอนุภาค ^{58}**Ni** ต่างกัน ดังนั้นแผ่นวางฟิล์มจะเคลื่อนที่ ขึ้น ลง ซ้ำกันไปในระยะทางที่ไม่เท่ากัน (โดยสอดคล้องกับการคำนวน)



ภาพประกอบที่ 3.6 ชุดฟิล์มเมื่อประกอบกับแท่นวางฟิล์ม (A) และภาพการจำลองการเคลื่อนที่ขึ้นลงของแท่นวางฟิล์ม ในขณะทำการระดมยิงด้วยลำอนุภาค ^{58}**Ni** (B)

จากภาพประกอบที่ 3.6 ด้านหน้าของแท่นวางฟิล์ม มีเครื่องควบคุมลำอนุภาค ซึ่งปล่อยอนุภาค ^{58}Ni ด้วยความหนาแน่นที่คงที่ เพื่อให้แผ่นฟิล์มมีความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกันสำหรับการผลิตเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของรูพรุนที่แตกต่างกันบนแต่ละตำแหน่งของแผ่นฟิล์ม ดังนั้นแท่นวางฟิล์มจะถูกควบคุมให้เคลื่อนที่ลง เพื่อให้อนุภาค ^{58}**Ni** ระดมยิงทั้งแผ่นในรอบแรก แล้วเคลื่อนที่ขึ้น ซ้ำไปซ้ำมา โดยในแต่ละครั้งของการขึ้นลงสามารถควบคุม ฟลักซ์ ได้ตลอดเวลาทุกครั้งของการขึ้นลง รวมทั้งสามารถควบคุมระยะทางการเคลื่อนที่ของรอยฟิล์มได้เช่นกัน โดยระยะการเคลื่อนที่ขึ้นลงแต่ละครั้ง ดังภาพประกอบที่ 3.6 B เพื่อให้ความหนาแน่นของอนุภาค ^{58}**Ni** มีค่าสูงขึ้นตรงปลายด้านล่างของแผ่นฟิล์ม เมื่อได้แผ่นฟิล์มที่มีความหนาแน่นรูพรุนตามที่ต้องการ แบ่งแผ่นฟิล์มให้มีความยาวเท่ากัน สองส่วนเพื่อความเหมาะสมกับชุดทดสอบอัตราการไหลของน้ำ ดังภาพประกอบที่ 3.7



ภาพประกอบที่ 3.7 เมมเบรนที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วน ส่วนที่มีความหนาแน่นสูงกว่าด้าน A กับ ส่วนที่มีความหนาแน่นต่ำกว่าด้าน B

ในการผลิตแผ่นเมมเบรนได้กำหนดให้มีขนาดของรูพรุนตลอดทั้งแผ่นเมมเบรนตั้งแต่ 100 – 300 nm โดยมีค่าสภาพซึมผ่านคงที่ตลอดทั้งแผ่นเมมเบรนดังนั้นค่าความหนาแน่นของรูพรุนของแผ่นเมมเบรนด้าน A จึงมีค่า สูงกว่าด้าน B และเพื่อความเหมาะสม กับชุดทดสอบอัตราการไหลของน้ำ จึงแบ่งเมมเบรนออกเป็น 2 ส่วน โดยส่วนที่ 1 มีขนาดรูพรุน ในช่วง 100 – 200 nm ส่วนที่ 2 มีขนาดรูพรุนในช่วง 200 – 300 nm

การระดมยิงอนุภาค ^{58}Ni บนแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนต ค่าความหนาแน่นของ ^{58}Ni แต่ละตำแหน่งบนแผ่นฟิล์มต่างกัน ดังนั้น การควบคุมความหนาแน่นอนุภาคบนตำแหน่งของฟิล์ม หาได้จาก การกำหนดค่า สภาพการซึมผ่านที่ต้องการซึ่งเป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง แก่เครื่องยิงลำไอออน โดยพิจารณาจากสมการ $P = n\pi r^4$ = ค่าคงที่ ดังนั้น ค่า $n = \frac{P}{\pi r^4}$ ซึ่งค่า P เป็นค่าคงที่ที่กำหนดให้แก่เครื่องยิงลำไอออน สำหรับ งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า สภาพซึมผ่านของเมมเบรนแก่เครื่องยิงลำไอออน คือ 5.00×10^{-4} ดังนั้นจากการคำนวณ แต่ละตำแหน่งบนเมมเบรน จะมีความหนาแน่นของอนุภาค (n) ที่สัมพันธ์ กับ เส้นผ่านศูนย์กลาง (d) ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงค่าความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน กับ ความหนาแน่นของอนุภาค ที่ได้จากการคำนวณเมื่อกำหนดให้ค่า สภาพซาบซึมผ่านของเมมเบรนมีค่า 5.00×10^{-4} n•μm^4

Diameter (nm)	**Density particle/μm^2**
100	25.5
120	12.3
140	6.6
160	3.9
180	2.4
200	1.6
220	1.1
240	0.8
260	0.6
280	0.4
300	0.3

3.2.2 ขั้นตอนการอาบแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV)

แผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนต มีขนาด 4 x 25 cm^2 แบ่งครึ่งฟิล์มตามความยาวของฟิล์มออกเป็นสองส่วน ได้ฟิล์มมี พื้นที่ 4 x 12.5 cm^2 สองแผ่น นำแผ่นฟิล์มมาวางบนแท่นปรับระดับความสูงได้ วางห่างจากเครื่องฉายรังสี UV เป็นระยะทาง 3 เซนติเมตร ปรับค่าความยาวคลื่นของรังสี UV เท่ากับ 312 nm ใช้เวลาในการอาบรังสีนาน 4 ชั่วโมง จัดอุปกรณ์การทดลองดังภาพประกอบที่ 3.8

ภาพประกอบที่ 3.8 การจัดอุปกรณ์การทดลองสำหรับการอาบแผ่นฟิล์ม PC ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต (UV)

3.2.3 กระบวนการกัดขยายรอยทางนิวเคลียร์ (Nuclear Track-etching Process)

แผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตที่ถูกระดมยิงด้วยอนุภาค ^{58}Ni และผ่านกระบวนการอาบรังสี UV จะถูกนำไปกัดขยายรอยแฝงด้วยปฏิกิริยาทางเคมี โดยการควบคุมตัวแปรที่เกี่ยวข้องคือความเข้มข้นของสารละลาย NaOH ขนาด 2 N อุณหภูมิ 60.7 ^{o}C นำแผ่นฟิล์มมาขึงตรึงด้วยกรอบพลาสติก แล้วนำไปผูกติดกับเครื่องปรับการเคลื่อนที่ ให้ตำแหน่งต่าง ๆ ของเมมเบรนใช้ระยะเวลาการกัดขยายรอยอยู่ในสารละลาย NaOH หลังจากนั้นให้แผ่นเมมเบรนค่อยๆจมลงในสารละลาย NaOH เพื่อให้เกิดกระบวนการกัดขยายรอยซึ่งภายหลังจากเสร็จกระบวนการ ขนาดของรูพรุนและเวลาการกัดขยายรอยจะถูกนำมาสร้างเป็นสมการความสัมพันธ์ $d_{nm} = mt_{min} + b$ เมื่อ d คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนหน่วยเป็น นาโนเมตร และ t คือระยะเวลาในการกัดขยายรอย หน่วยเป็น นาที

ภาพประกอบที่ 3.9 การจัดวางตำแหน่งของอ่างควบคุมความร้อนและเครื่องควบคุมการเคลื่อนที่ของแผ่นฟิล์มในระหว่างการกัดขยายรอยแฝง

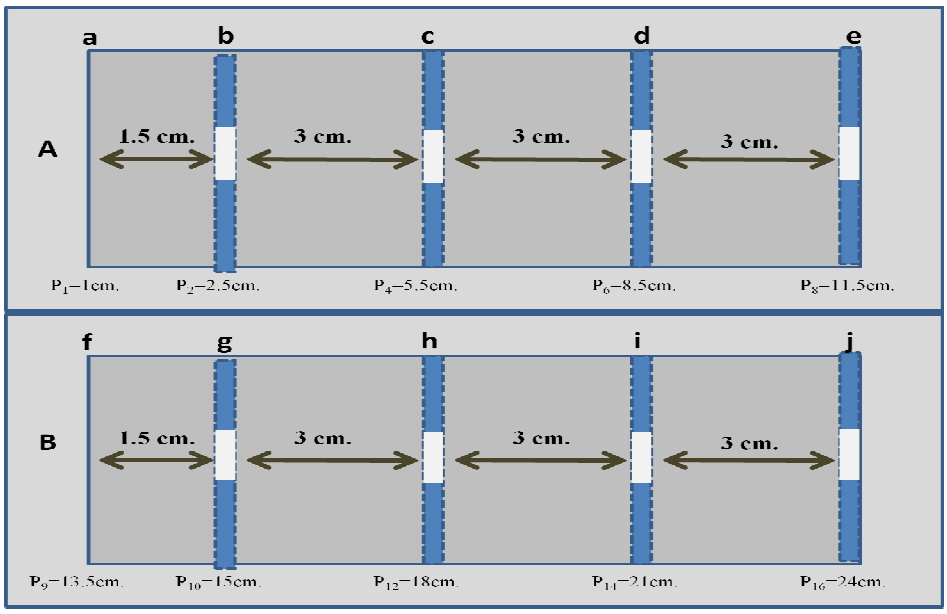
ภายหลังจากกระบวนการกัดขยายรอยในสารละลาย NaOH เสร็จสิ้น จึงนำแผ่นฟิล์มไปล้างสารละลายออกด้วย 4 ขั้นตอนคือ ขั้นแรกจะล้างด้วยน้ำกลั่นในเครื่องกวนสารละลายด้วยแม่เหล็ก (magnetic stirrer) ด้วยอุณหภูมิที่ใกล้เคียงกับอุณหภูมิระหว่างการกัดขยายรอยเป็นเวลาประมาณ 10 นาที (ภาพประกอบที่ 3.10) ขั้นที่สองล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิห้องด้วยเครื่องกวนสารละลายด้วยแม่เหล็ก ขั้นที่สามให้แผ่นฟิล์มผ่านการไหลของน้ำสะอาดประมาณ 2 -3 ครั้ง และครั้งสุดท้ายการขจัดฟองอากาศโดยการล้างด้วยน้ำกลั่นในเครื่องอัลตราโซนิกประมาณ 15 นาที (ภาพประกอบที่ 3.10) จากนั้นจึงนำแผ่นเมมเบรนไปผึ่งให้แห้งก่อนนำไปศึกษาวิเคราะห์ต่อไป

ภาพประกอบที่ 3.10 การชะล้างสารเคมีออกจากแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตในขั้นตอนแรก

ภาพประกอบที่ 3.11 การชะล้างสารเคมีออกจากแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนตด้วยเครื่องอัลตราโซนิคในขั้นตอนสุดท้าย

3.2.4 การวิเคราะห์ วัดขนาด และ ภาพภาคตัดขวางของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรน

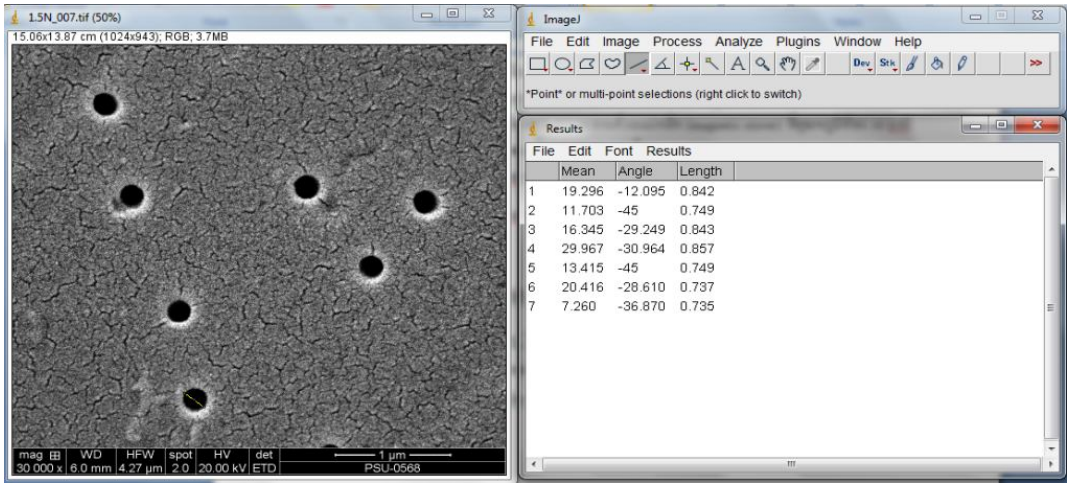
รอยแฝงที่ได้จากการกัดขยายรอยจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งสามารถทำการวิเคราะห์ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) โดยการตัดแผ่นฟิล์มเป็นชิ้นเล็กๆ แต่ละตำแหน่งของแผ่นเมมเบรน ดังภาพประกอบที่ 3.12 ซึ่งแต่ละตำแหน่งของฟิล์มใช้เวลาการกัดขยายรอยที่แตกต่างกัน



ภาพประกอบที่ 3.12 เมมเบรนที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเพื่อการนำไปกัดขยายรอยในแต่ละช่วง และ ตำแหน่งของเมมเบรนที่นำมาวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

จากนั้นนำแผ่นเมมเบรนที่ผลิตได้ไปดูลักษณะของรูพรุน (Morphology) ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ภาพประกอบที่ 3.13) นำภาพที่ถ่ายได้ไปวิเคราะห์หาขนาดของรูพรุนโดยใช้โปรแกรม imageJ โดยการเข้าโปรแกรม imageJ เปิดไฟล์รูปถ่ายที่ต้องการจะวัด แล้วลากเส้นตรงผ่านรูพรุนบนภาพถ่าย คลิกที่ปุ่ม Analyze และนำค่าที่ได้ไปคำนวณ ก็จะได้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน (ภาพประกอบที่ 3.14) ทำการเลือกแผ่นฟิล์มที่ให้ขนาดของรูพรุนที่เหมาะสม เพื่อนำไปศึกษาภาพภาคตัดขวางของรูพรุน โดยการนำแผ่นฟิล์มจากเงื่อนไขนั้นไปแช่ในไนโตรเจนเหลว แล้วนำมาหักให้ขาดออกจากกัน และจึงนำไปเคลือบด้วยทองเพื่อดูภาพภาคตัดขวางของรูพรุนด้วยเครื่อง SEM

ภาพประกอบที่ 3.13 การถ่ายภาพรูพรุนบนแผ่นเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (FEI รุ่น Quanta 400) ของศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



ภาพประกอบที่ 3.14 แสดงภาพการใช้โปรแกรมสำเร็จรูป imageJ สำหรับวิเคราะห์ขนาดของรูพรุน

3.2.5 การหากำลังหยุดยั้งของแผ่นฟิล์ม PC

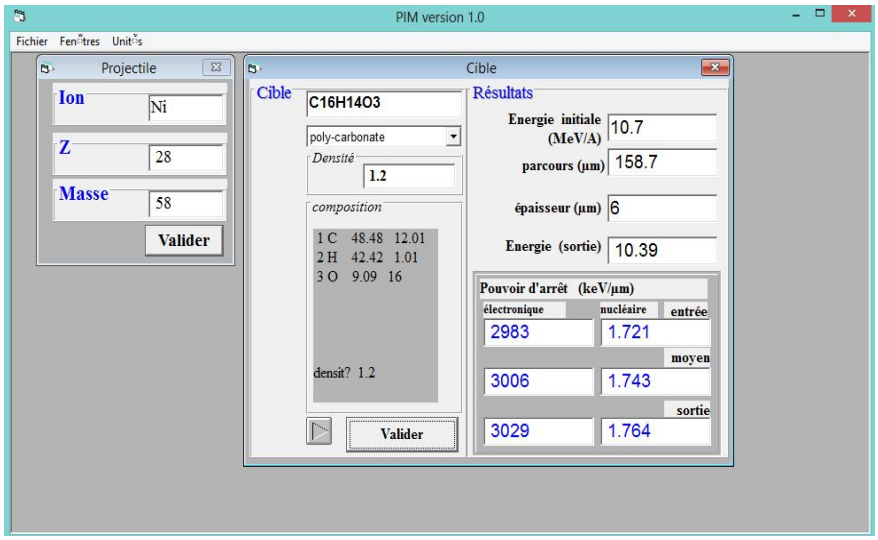
ในการใช้ลำอนุภาคไอออน ^{58}Ni ขนาดพลังงาน 10.7 MeV /u ระดมยิงบนแผ่นฟิล์ม PC หนา 6 μm ในการคำนวณหาค่าพิสัยของอนุภาค ^{58}Ni ว่าจะต้องเร่งด้วยขนาดพลังงานจลน์เท่าไรจึงจะทำให้สามารถทะลุผ่านแผ่นฟิล์ม PC ที่ความหนาต่าง ๆ รวมทั้งค่ากำลังหยุดยั้ง ได้ถูกคำนวณด้วยโปรแกรม PIM ของห้องปฏิบัติการ GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds) โดยการป้อนค่าต่างๆดังนี้

- ชนิด เลขมวลและเลขอะตอมของอนุภาคที่ใช้ระดมยิง

- สูตรโครงสร้าง ความหนาแน่นของเป้าหรือแผ่นฟิล์ม

- พลังงานเริ่มต้น ของอนุภาค

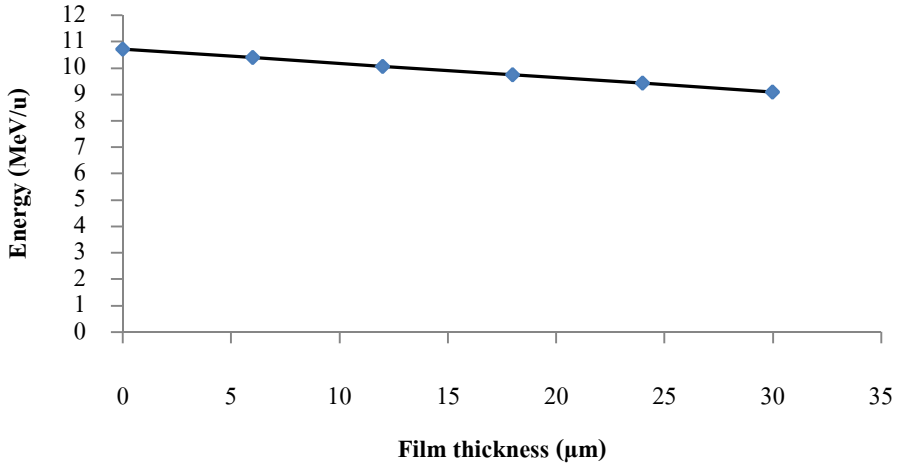
จากโปรแกรม PIM จะได้ค่า พิสัยของอนุภาค ^{58}Ni พลังงาน10.7 MeV/A คือ 158.7 μm และค่าพลังงานที่ความหนาต่าง ๆ ดังรูปในภาพประกอบที่ 3.15 และค่าในตาราง 3.1



ภาพประกอบที่ 3.15 การคำนวณหาค่าศักย์หยุดยั้งของแผ่นฟิล์ม PC โดยใช้โปรแกรม PIM

ตารางที่ 3.2 ค่าพลังงานของอนุภาค ^{58}Ni เมื่อผ่านฟิล์ม PC แต่ละแผ่น

Film order	Exit energy through the film	
	Thickness film (μm)	Energy exit (MeV/u)
1	0	10.70
2	6	10.39
3	12	10.07
4	18	9.75
5	24	9.42
6	30	9.09

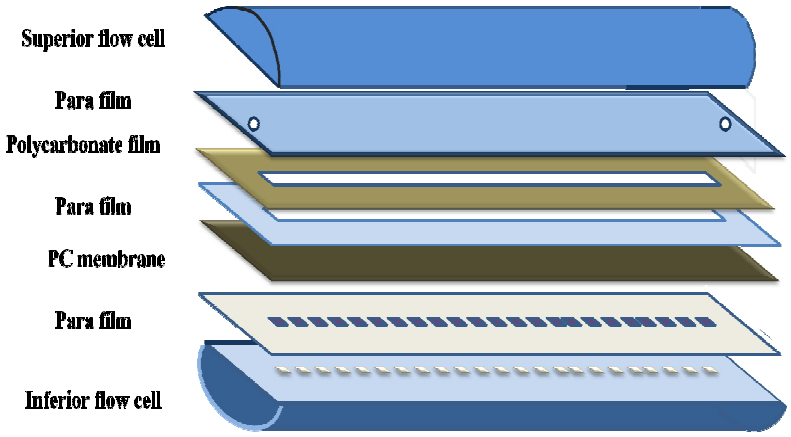


ภาพประกอบที่ 3.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานจลน์ของอนุภาค ^{58}Ni เมื่อผ่านแผ่นฟิล์ม PC แต่ละชั้นที่มีความหนาเพิ่มขึ้นตามลำดับ

จากภาพประกอบที่ 3.16 แสดงให้เห็นว่าอนุภาค ^{58}Ni พลังงานเริ่มต้น 10.7 MeV/u สามารถทะลุผ่านแผ่นฟิล์มพอลิคาร์บอเนต (ซึ่งแต่ละแผ่นมีความหนา 6 μm) ได้ทุกแผ่นเพราะยังคงมีพลังงานที่เหลือภายหลังจากการทะลุผ่านแผ่นฟิล์มลำดับที่ 6

3.2.6 ขั้นตอนการศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นเมมเบรนที่ผลิตได้

เพื่อทดสอบคุณสมบัติของเมมเบรนจึงทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน โดยการนำเมมเบรนที่ผลิตได้เข้าประกอบกับชุดทดสอบอัตราการไหลของน้ำดังภาพประกอบที่ 3.17 โดยเมมเบรนจะอยู่ตรงกลางของชุดการทดสอบและมีชั้นของวัสดุต่าง ๆ วางประกอบเพื่อป้องกันการรั่วของน้ำ



ภาพประกอบที่ 3.17 การประกอบแผ่นเมมเบรนเข้ากับชุดการทดสอบอัตราการไหลของน้ำ

เมื่อประกอบแผ่นเมมเบรนเข้ากับชุดการทดสอบดังภาพประกอบที่ 3.17 แล้ว นำชุดการทดสอบใส่ในกระบอกอะคริลิคเพื่อปรับความดัน ตรงด้านบนต่อท่อเข้ากับเครื่องปั๊มอากาศ ใส่น้ำกลั่นในกระบอกอะคริลิคให้ท่วมชุดการทดลอง จุดประสงค์ในขั้นตอนนี้ เพื่อกำจัดอากาศออกจากชุดการทดสอบอัตราการไหลซึ่งจะมีผลต่อการไหลผ่านของน้ำในขณะทำการศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน

ภาพประกอบที่ 3.18 ภาพการกำจัดฟองอากาศจากชุดการทดสอบอัตราการไหล

เมื่อกำจัดฟองอากาศจากชุดการทดสอบอัตราการไหลแล้ว นำชุดทดสอบประกอบกับระบบการทดสอบ ซึ่งระบบประกอบด้วยชุด Syringe pump ที่มีองค์ประกอบที่สำคัญคือหลอดฉีดยา ขนาด 50 ml ชุดการทดสอบอัตราการไหล และหลอดทดลองเพื่อรองรับน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรน จากนั้นนำชุดการทดสอบอัตราการไหลวางบนแท่นที่วางตัวอย่างอยู่ในแนวระนาบ ต่อสายน้ำเข้าจากกระบอกฉีดยา Syringe pump เข้าสู่ชุดการทดสอบการไหลของน้ำ ต่อท่อน้ำด้านล่างของชุดวัดอัตราการไหลเข้าสู่หลอดทดลอง จำนวน 23 หลอด โดยให้ขนาดของท่อน้ำออกทุกท่อมีขนาดเท่ากัน ดังภาพประกอบที่ 3. 19

ภาพประกอบที่ 3.19 แสดงภาพชุดระบบทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน

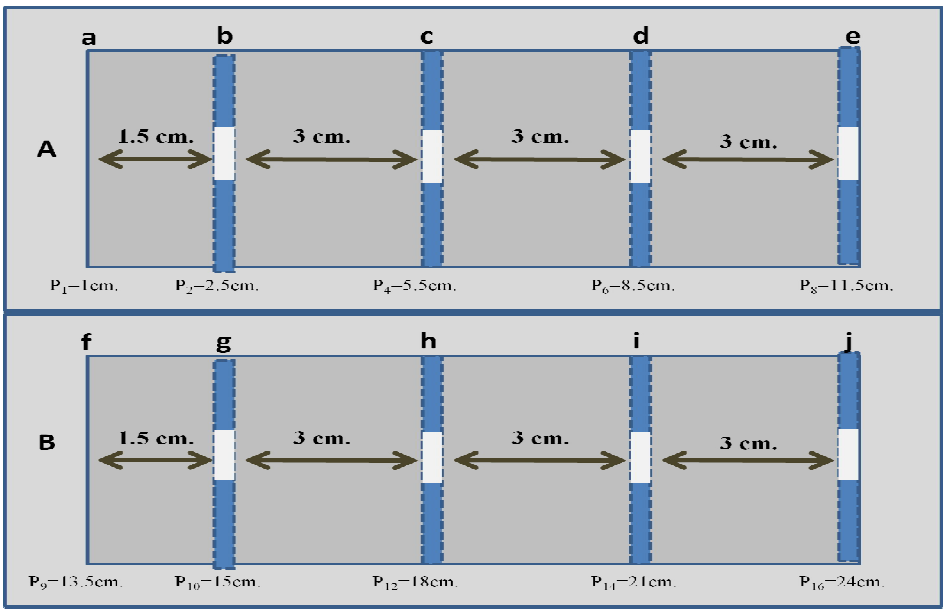
ศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นเมมเบรนที่ผลิตได้ โดย กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำที่เข้าสู่ชุดการทดสอบของน้ำด้วยอัตราเร็วคือ 1,3 และ 5ml/min ตามลำดับ จากนั้นทำการวัดปริมาณมวลของน้ำที่ไหลผ่านออกมาจากท่อแต่ละท่อทำการเก็บข้อมูลครั้งละ 5 นาที จากนั้นคำนวณเป็นอัตราการไหลในหน่วย ml/min

บทที่ 4

ผลและการอธิบายผล

4.1 การวิเคราะห์หาค่า ขนาดของรูพรุน

ฟิลม์บางที่ใช้สำหรับผลิตเมมเบรนคือพอลิเมอร์พอลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ขนาด ความกว้าง 4 เซนติเมตร และ ความยาว 25 เซนติเมตร หนา 6 μm โดยระดมยิงด้วย ลำอนุภาคไอออนหนัก ^{58}Ni ที่มีพลังงาน 10.7 MeV/u ที่ประเทศฝรั่งเศส (GANIL : Caen, France) ตลอดทั้งแผ่น โดยมีความหนาแน่นของอนุภาคที่แตกต่างกัน หลังจากนั้นนำไปอาบด้วยรังสียูวีที่ความยาวคลื่น 312 nm เป็นเวลานานสี่ชั่วโมง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำอันตรกิริยาของการกัดขยายรอยแฝง นำแผ่นฟิล์มดังกล่าวไปกัดขยายรอยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซน์ (NaOH) ความเข้มข้น 2 N อุณหภูมิ 60.7 องศาเซลเซียส โดยจุ่มแผ่นเมมเบรนลงไปในสารละลาย NaOH เพื่อให้สารละลาย ทำปฏิกิริยาทางเคมีกับแผ่นฟิล์มพอลีคาร์บอเนต โดยเฉพาะบริเวณรอยแฝงเพื่อกัดขยายรอยแฝงให้มีขนาดที่ใหญ่ขึ้นด้วยช่วงระยะเวลา 13 – 23 นาที ทั้งนี้ขึ้นกับความหนาแน่นและขนาดของรูพรุนที่ต้องการของแผ่นเมมเบรน จากนั้นนำแผ่นฟิล์มเมมเบรนที่ผลิตได้ ไปผึ่งให้แห้งในห้องที่ปราศจากฝุ่น ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 24 ชั่วโมง แบ่งแผ่นเมมเบรนที่ผ่านการระดมยิงด้วยอนุภาคและการอาบด้วยรังสียูวีเป็นสองส่วนเท่ากัน เพื่อให้เมมเบรนมีขนาดเหมาะสมกับชุดทดสอบการอัตราการไหลของน้ำ (flow cell) ซึ่งแผ่นเมมเบรนที่ต้องการผลิตมีความยาว 25 เซนติเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 - 300 nm เมื่อทำการแบ่งแผ่นฟิล์มออกเป็นสองส่วน คือ ส่วนแรก (A) ยาว 12.5 เซนติเมตร ขนาดรูพรุนที่ต้องการคือ 100 - 200 nm ส่วนที่สอง (B) ยาว 12.5 เซนติเมตร ขนาดรูพรุนที่ต้องการคือ 200 - 300 nm ดังภาพประกอบที่ 4.1



ภาพประกอบที่ 4.1 แสดงแผนภาพเมมเบรนที่ถูกแบ่งออกเป็นสองส่วนเพื่อให้เหมาะสมกับชุดการทดสอบการอัตราการไหล และตำแหน่งบนเมมเบรนที่นำมาหาค่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน

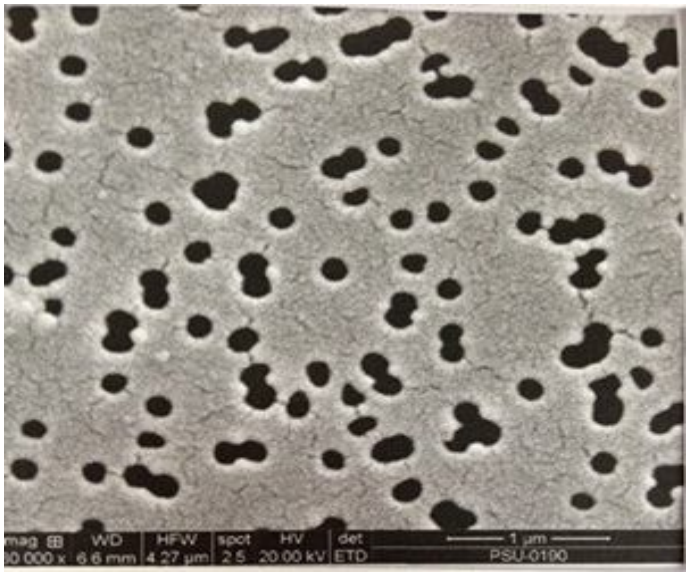
จากภาพประกอบที่ 4.1 แสดงส่วนของเมมเบรนที่แบ่งออกมาเป็นสองส่วน และช่องสี่เหลี่ยมสีขาวเล็กๆแสดง ตำแหน่งบนเมมเบรนที่นำมาศึกษาขนาดของรูพรุน เนื่องจากการผลิตเมมเบรนมีวัตถุประสงค์ให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนมีค่าแปรผันตามความยาวของแผ่นเมมเบรน ทำให้เวลาการที่ใช้ในการกัดขยายรอยแฝงในเมมเบรนของแต่ละตำแหน่งแตกต่างไป ดังนั้นในการทดลองได้ออกแบบระบบให้แผ่นเมมเบรนได้จุ่มอยู่ในสารละลาย NaOH ที่บรรจุอยู่ภายในบีกเกอร์ด้วยระยะเวลาที่เหมาะสม ในการทดลองได้ใช้ชุดควบคุมเพื่อให้แผ่นเมมเบรนค่อย ๆ เคลื่อนที่ในระหว่างที่แช่อยู่ในสารละลาย NaOH ด้วยอัตราความเร็วของการเคลื่อนที่ในสารละลายมีค่า 1.92 cm/min ซึ่งส่งผลให้แต่ละรอยแฝงบนแผ่นเมมเบรนมีระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารละลาย NaOH เพื่อขยายขนาดของรอยแฝงที่แตกต่างกัน (ซึ่งแต่ละตำแหน่งอ้างอิงดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.1) จะมีเวลาในการกัดขยายรอยดังสรุปในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างตำแหน่ง ระยะจริงจากขอบด้านซ้ายสุดของแผ่นเมมเบรน รวมทั้งระยะเวลาของการกัดขยายรอยแฝงด้วยสารละลาย NaOH

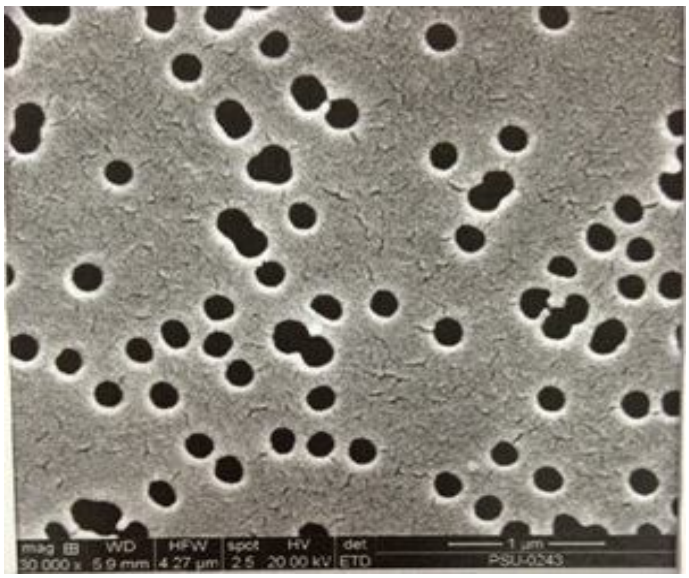
ตำแหน่งอ้างอิง (Position : P)	ระยะห่างจริงบนแผ่นเมมเบรนจากขอบด้านซ้ายมือ (cm.)	ระยะเวลานานของการกัดขยายรอยแฝง : Etching Time (min)
2	2.5	14.06
4	5.5	15.44
6	8.5	16.47
8	11.5	18.07
10	15.0	19.40
12	18.0	21.00
14	21.0	22.20
16	24.0	23.04

4.2 การถ่ายภาพพื้นผิวแผ่นเมมเบรนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

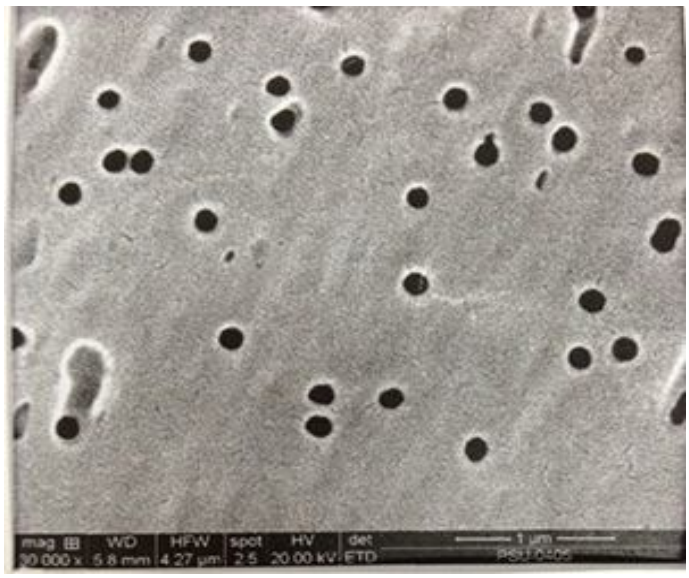
เพื่อให้ทราบลักษณะของแผ่นฟิล์มบางเมมเบรนที่ผลิตได้หลังจากถูกระดมยิงด้วยลำอนุภาคไอออนหนัก ^{58}Ni ที่มีพลังงาน 10.7 MeV/u และผ่านกระบวนการกัดขยายรอยด้วยสารละลาย NaOH ตามรายละเอียดและเงื่อนไขที่กล่าวในบทที่ 3 และตารางที่ 4.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy : SEM) ที่มีกำลังขยายสูงเหมาะสำหรับการศึกษาลักษณะของพื้นผิวแผ่นเมมเบรน ความหนาแน่นด้วยการถ่ายภาพ รวมทั้งวิเคราะห์ขนาดของรูพรุนของแต่ละตำแหน่ง เพียงแต่ก่อนที่จะดำเนินการถ่ายภาพจะต้องดำเนินการเคลือบผิวแผ่นฟิล์มบางเมมเบรนด้วยทอง ซึ่งผลของภาพถ่ายแผ่นฟิล์มเมมเบรนตั้งแต่ตำแหน่งที่ 2 ถึง 16 ที่กำลังขยาย 30,000 เท่าได้นำเสนอดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.2 – 4.9 ซึ่งสอดคล้องกับระยะ 2.5 - 24 เซนติเมตรจากขอบแผ่นเมมเบรนด้านซ้ายมือ รวมทั้งสอดคล้องกับระยะเวลาในการกัดขยายรอยตั้งแต่ 14.06 - 23.04 นาทีตามลำดับ



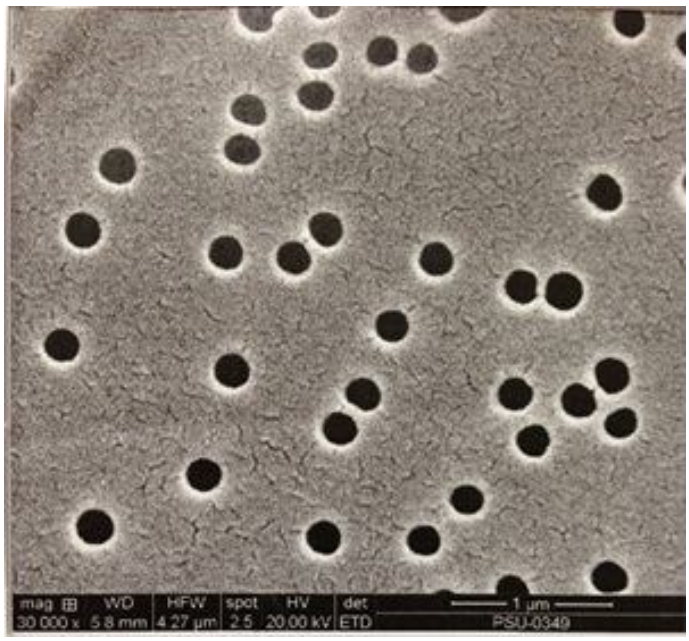
ภาพประกอบที่ 4.2 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 2 ระยะ 2.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น เมมเบรนระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 14.03 นาที



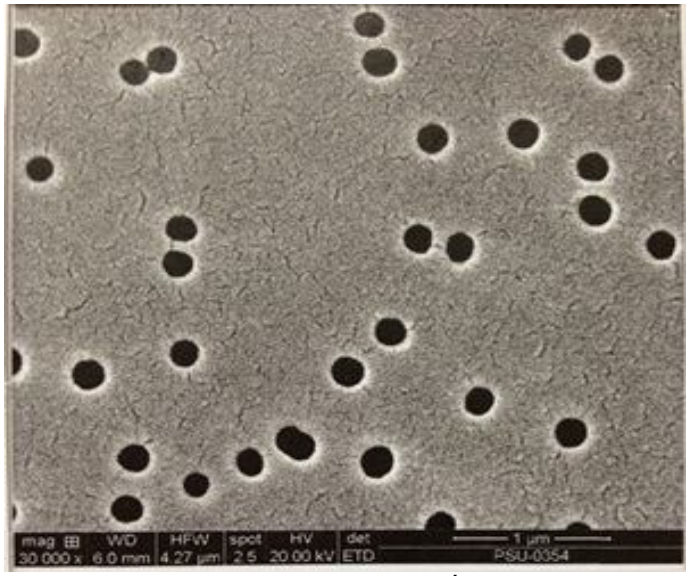
ภาพประกอบที่ 4.3 แสดงภาพ SEM (x30000) ตำแหน่งที่ 4 ระยะ 5.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น เมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 15.26 นาที



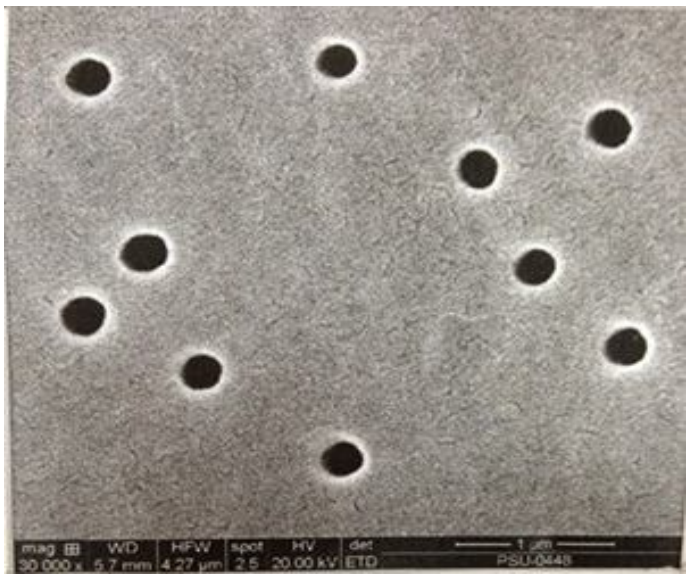
ภาพประกอบที่ 4.4 แสดงภาพ SEM (x30000) ตำแหน่งที่ 6 ระยะ 8.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 16.47 นาที



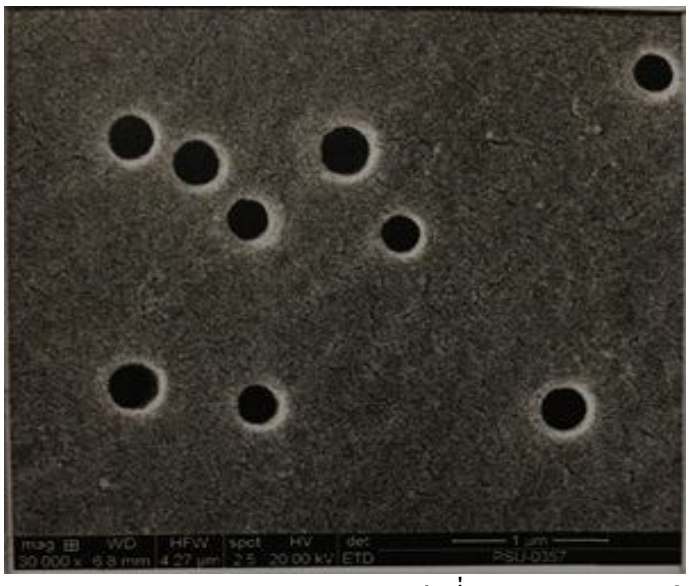
ภาพประกอบที่ 4.5 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 8 ระยะ 11.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 18.07 นาที



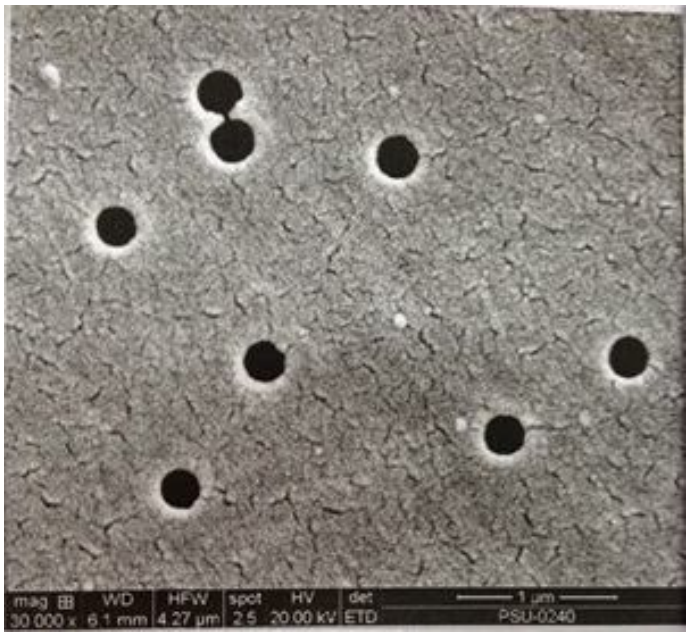
ภาพประกอบที่ 4.6 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 10 ระยะ 15 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น เมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 19.40 นาที



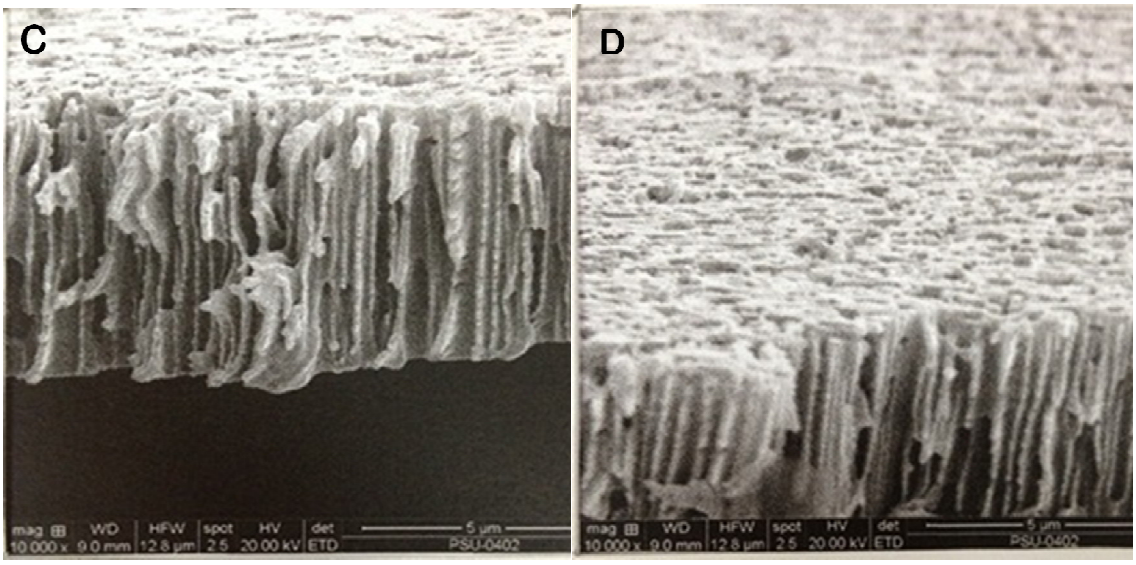
ภาพประกอบที่ 4.7 แสดงภาพ SEM (x 30,000) ตำแหน่งที่ 12 ระยะ 18 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 21.00 นาที



ภาพประกอบที่ 4.8 แสดงภาพ SEM (x 30,000) ตำแหน่งที่ 14 ระยะ 21 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น เมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 22.20 นาที



ภาพประกอบที่ 4.9 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 16 ระยะ 24 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น เมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 23.04 นาที



ภาพประกอบที่ 4.10 แสดงภาพภาคตัดขวางของแผ่นเมมเบรน (C) และ ภาพผิวหน้าของ แผ่นเมมเบรน (D) ตามลำดับ

จากภาพถ่าย SEM ของแผ่นเมมเบรนแต่ละตำแหน่ง ที่กำลังขยาย 30,000 เท่า ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.2 – 4.9 พบว่าลักษณะของรูพรุนที่ถูกระดมยิงด้วยอนุภาคไอออนหนัก ^{58}Ni จะมีลักษณะเป็นวงกลมเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจากภาพที่ปรากฏดังกล่าวนั้นน่าจะเกิดเนื่องจากอนุภาคดังกล่าวเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงมากขณะตกกระทบในแนวตั้งฉากกับแผ่นฟิล์มบางพอลิคาร์บอเนตที่ใช้ในการผลิตเมมเบรน ความหนาแน่นของรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่บนแผ่นเมมเบรนของภาพประกอบที่ 4.2 มีค่าสูงสุดซึ่งจะพบว่าบางตำแหน่งรูพรุนอยู่ใกล้กันมากจนเชื่อมเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งลักษณะดังกล่าวสามารถสังเกตได้ในภาพประกอบที่ 4.3 และไม่พบปรากฏการณ์ซ้อนทับหรือเชื่อมกันของรุพรุนในภาพประกอบที่ 4.3 จนถึงภาพประกอบที่ 4.9

ส่วนภาพประกอบที่ 4.10 แสดงภาพภาคตัดขวางของเมมเบรนในภาพประกอบที่ 4.10 (C) พบว่ารูพรุนของเมมเบรนทะลุผ่านตลอดความหนาของเมมเบรนโดยขนาดของรูพรุนแต่ละรูจะเท่ากันตลอดทั้งความยาวของรูพรุนนั้น โดยมีลักษณะขนาน และตั้งฉากกับผิวของเมมเบรน จึงสามารถที่จะนำเมมเบรนนี้ไปใช้สำหรับศึกษาการกรองได้ ส่วนภาพประกอบที่ 4.10 (D) แสดงให้เห็นความพรุนและความขรุขระบริเวณพื้นผิวของเมมเบรนที่ผ่านการกัดขยายรอยแล้ว สาเหตุที่มีลักษณะขรุขระปรากฏบนผิวของแผ่นเมมเบรนดังกล่าว เพราะผลจากการกัดขยายรอยด้วยกันสองส่วนคือ การกัดขยายรอยตามแนวของรอยแฝงและการกัดขยายรอยบริเวณผิวหน้าของวัสดุพร้อมกัน

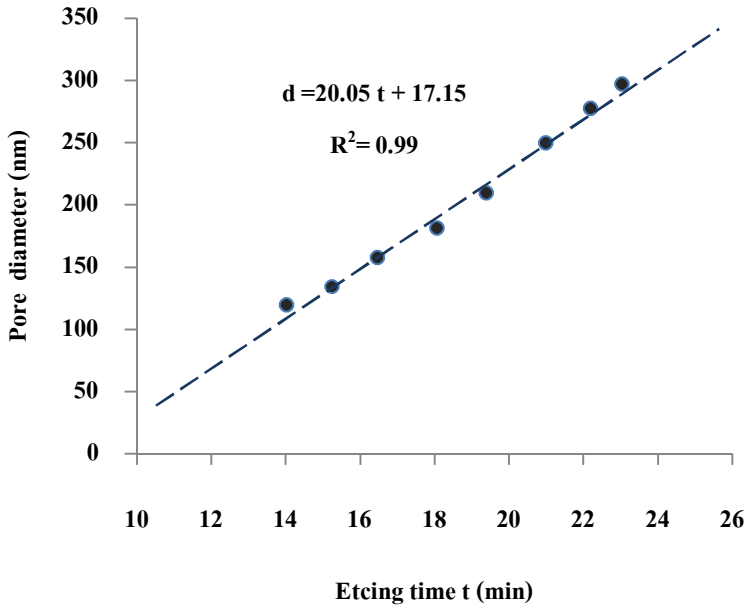
ในการวิเคราะห์หาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางและความหนาแน่นของจำนวนรอยต่อหน่วยพื้นที่จากภาพถ่าย SEM ในภาพประกอบที่ 4.2 จนถึงภาพประกอบที่ 4.9 ได้อาศัยโปรแกรม image J ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ดังกล่าวได้สรุปข้อมูลเวลาของการกัดรอย ตำแหน่งที่สอดคล้องกับระยะห่างจากขอบด้านซ้ายมือของแผ่นเมมเบรน ค่าความหนาแน่น รวมทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรนที่ตำแหน่งต่าง ๆ ดังแสดงในตารางข้อมูลที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าเวลาของการกัดขยายรอย ตำแหน่งและระยะห่างจากขอบซ้ายของแผ่นเมมเบรนค่าความหนาแน่น รวมทั้งขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนบนแผ่นเมมเบรนที่ตำแหน่งต่าง ๆ

Etching-time (min)	Distance (cm) Position,Distance (cm.)	Density particle/μm^2	Diameter (nm)
14.03	position 2 , 2.5	12.0	119
15.26	position 4 ,5.5	7.8	134
16.47	position 6 ,8.5	4.4	157
18.07	position 8,11.5	2.9	172
19.40	position 10 ,15	1.7	196
21.00	position 12 ,18	0.6	249
22.20	position 14 ,21	0.4	277
23.04	position 16 ,24	0.4	297

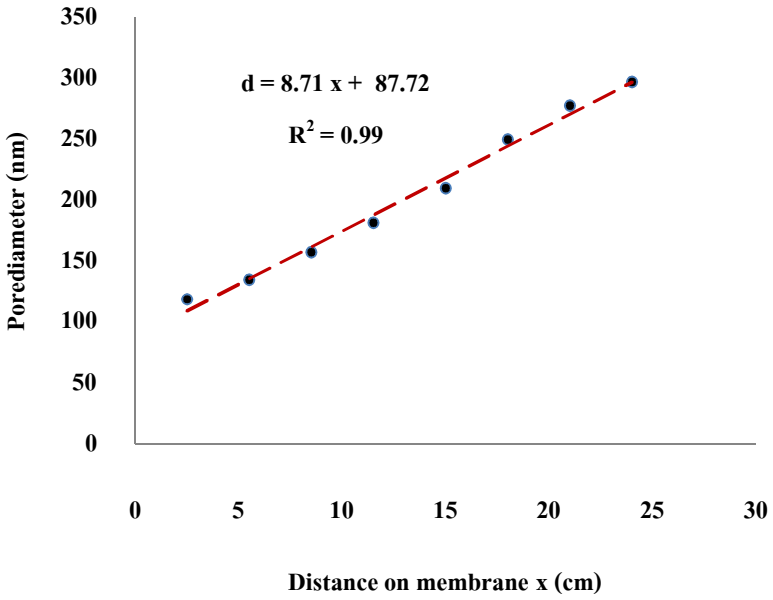
จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความหนาแน่นของรูพรุนต่อหน่วยพื้นที่ของภาพประกอบที่ 4.2 มีค่าสูงสุดที่ 12.0 รอย/μm^2 และความหนาแน่นดังกล่าวก็จะค่อย ๆ ลดลงตามลำดับ ซึ่งจะแปรผกผันกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลาง เช่นกรณีของภาพประกอบที่ 4.2 ที่ขนาดเฉลี่ยของเส้นผ่านศูนย์กลาง มีค่าเพียง 119 nm และขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางจะมีขนาดใหญ่ขึ้นเป็น 134, 157, 172, 196, 249, 277 และ 297 nm ที่ตำแหน่งที่ 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 แล 16 ตามลำดับ

และเพื่อให้สามารถเห็นมิติของความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูพรุนกับเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมี จึงได้นำเสนอข้อมูลในลักษณะของกราฟ จะได้ความสัมพันธ์ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.11



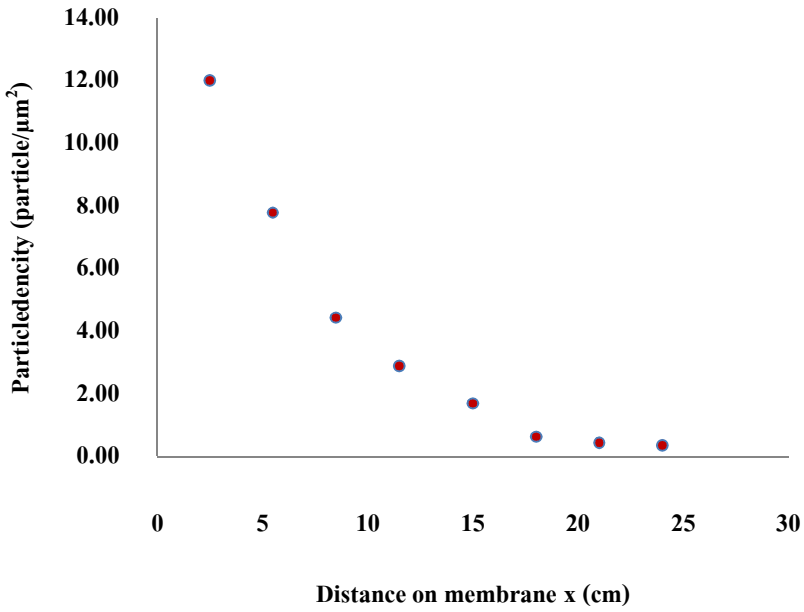
ภาพประกอบที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูพรุนกับเวลาในการกัดรอย

จากภาพประกอบที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของเมมเบรน และเวลาในการกัดรอย จากกราฟพบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อเวลาในการกัดรอยมีค่าเพิ่มขึ้น ในผลการทดลองครั้งนี้สามารถสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรนกับเวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอย ดังสมการ $d = 20.05t + 17.15$ เมื่อ d(nm) คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน t (min) เวลาในการกัดขยายรอย ส่วนภาพประกอบที่ 4.12 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของเมมเบรน และตำแหน่งของเมมเบรน เนื่องจากการกัดขยายรอยบนฟิล์มบางพอลิคาร์บอเนตใช้เวลาที่แตกต่างกัน ส่งผลให้ขนาดรูพรุนแต่ละตำแหน่งบนเมมเบรนมีค่าแตกต่างกัน



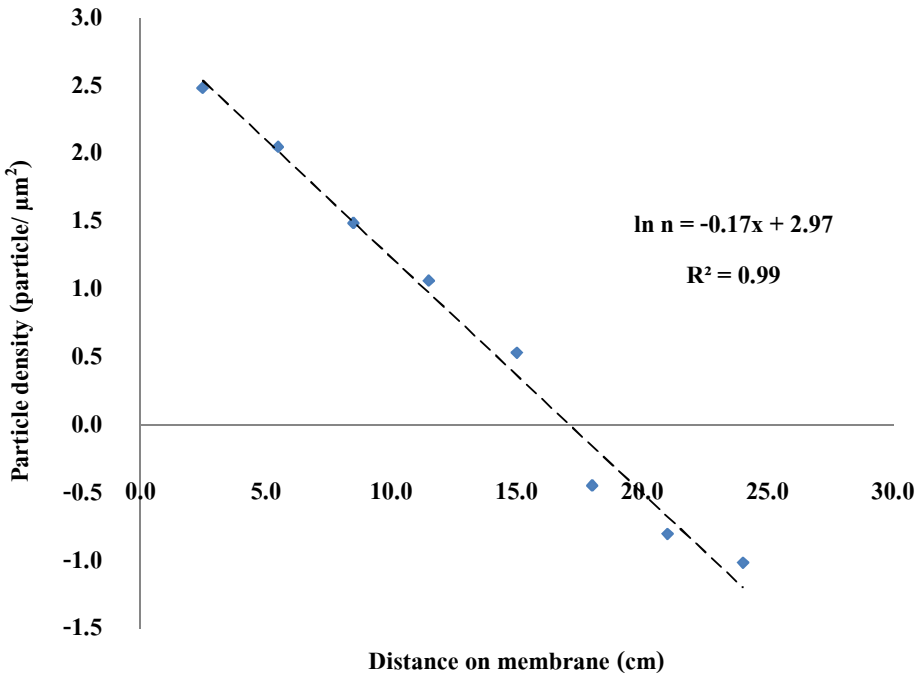
ภาพประกอบที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของรูพรุนกับขนาดของรูพรุนกับตำแหน่งต่าง ๆ บนเมมเบรน

ค่าความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนกับระยะทางบนแผ่นเมมเบรน เป็นดังสมการ $d = 8.71x + 87.72$ เมื่อ d (nm) คือเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน และ x คือ ระยะบนเมมเบรน จากกราฟทั้งสองแสดงให้เห็นว่า เวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอยเพิ่มมากขึ้น ทำให้ขนาดของรูพรุนบนเมมเบรนมีค่าสูงขึ้น และแต่ละตำแหน่งของเมมเบรนที่ใช้เวลาในการกัดขยายรอยต่างกัน ขนาดรูพรุนมีค่าต่างกัน จากรูป SEM นอกจากขนาดรูพรุนของเมมเบรนมีค่าแตกต่างกัน พบว่าความหนาแน่นของรูพรุนของเมมเบรนแต่ละตำแหน่งมีค่าต่างกันด้วย ซึ่งจากข้อมูลในตารางที่ 4.2 สามารถเขียนค่าความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาแน่นและขนาดของรูพรุนได้ดังภาพประกอบที่ 4. 12



ภาพประกอบที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นของรูพรุนของแผ่นเมมเบรน ณ ตำแหน่งต่าง ๆ

จากภาพประกอบที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ของตำแหน่ง กับ ความหนาแน่นของรูพรุน n กับระยะตำแหน่งของแผ่นฟิล์มเมมเบรน x ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ $n = 19.49\, e^{-0.17x}$ โดยจากกราฟจะพบว่า ความหนาแน่นจะละลดลงเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลกล่าว คือ จะลดลงมากในตำแหน่งแรก ๆ และความแตกต่างจะลดลงที่ตำแหน่งหลัง ๆ และเพื่อให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ได้ดำเนินการแปลงสมการ $n = 19.49\, e^{-0.17x}$ ให้ไปอยู่ในรูปของสมการ $\ln n = 2.97 - 0.17x$ โดย เมื่อพลอตความสัมพันธ์ระหว่างระยะทาง (x) และความหนาแน่นของจำนวนรูพรุน (n) ในกราฟกึ่งล๊อกดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.14



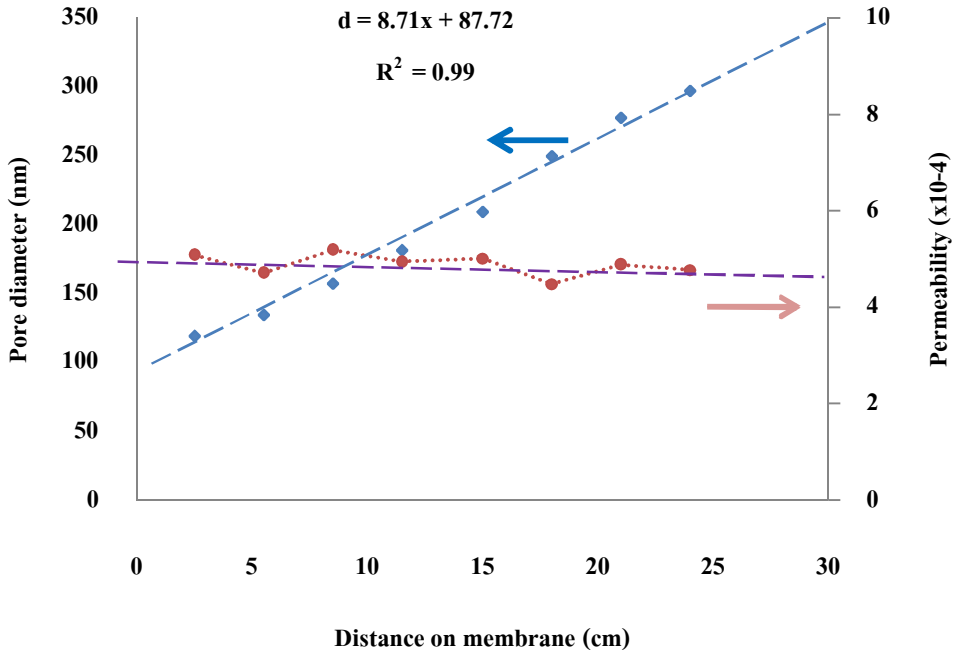
ภาพประกอบที่ 4.14 แสดงความหนาแน่นของรูพรุนในเมมเบรน ณ ตำแหน่งต่างๆ บนเมมเบรน

เนื่องจากจุดประสงค์ของการผลิตเมมเบรนนี้คือ ต้องการให้ค่าสภาพการซึมผ่าน (permeability) ของเมมเบรนมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น ซึ่งค่าการซึมผ่านของเมมเบรน มีค่าดังนี้ $P = n\pi r^4$ ดังนั้นจากข้อมูล ภาพถ่าย SEM สามารถคำนวนหาค่าการซึมผ่านของเมมเบรนได้ ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 แสดงข้อมูล ความหนาแน่น เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน และค่าสภาพซึมผ่านของเมมเบรนในแต่ละตำแหน่งบนแผ่นเมมเบรน

Distance (cm)	Density (particle/μm^2)	Diameter (nm)	Permeability ($x10^{-4}$)
2.5	12.03	119	5.08
5.5	7.80	134	4.71
8.5	4.44	157	5.19
11.5	2.91	172	4.94
15	1.71	196	5.01
18	0.64	249	4.48
21	0.45	277	4.88
24	0.36	297	4.77

จากตารางที่ 4.3 ได้นำข้อมูลมาสร้างกราฟเพื่อดูความสัมพันธ์ระหว่างระยะต่าง ๆ บนแผ่นเมมเบรนกับขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางและค่าซึมผ่านได้ ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.15

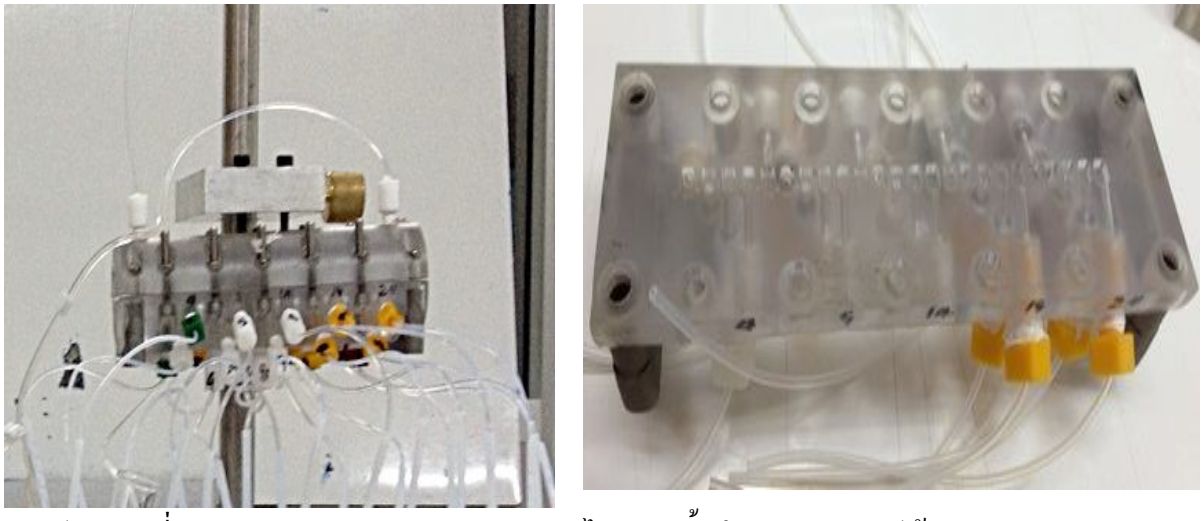


ภาพประกอบที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน และค่าซึมผ่านของเมมเบรนที่แต่ละตำแหน่งบนแผ่นเมมเบรน

จากภาพประกอบที่ 4.15 พบว่าค่าสภาพการซึมผ่านของเมมเบรน มีค่าค่อนข้างจะคงที่ตลอดทั้งแผ่น ในขณะที่ค่าเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะห่างจากขอบของเมมเบรน ดังนั้นค่าเมมเบรนที่มีความยาว 25 เซนติเมตร มีขนาดเส้นผ่านของรูพรุน 100 นาโนเมตร ถึง 300 นาโนเมตร ความหนาแน่นของรูพรุนในเมมเบรนตั้งแต่ 12– 0.4 n /μm^2 ตลอดความยาวของเมมเบรน เมื่อคำนวณค่าสภาพการซึมผ่านของเมมเบรน พบว่ามีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่นของเมมเบรน โดยมีค่าอยู่ในช่วง $4.48 \times 10^{-4} - 5.19 \times 10^{-4}$

4.3 การทดสอบการกรองน้ำ

การทดสอบการกรองทำโดยนำเมมเบรนใส่ใน ชุดทดสอบอัตราการไหล โดยมีลักษณะพิเศษคือช่องน้ำเข้าและออกสองทางอยู่ด้านบน และด้านล่างของชุดทดสอบนี้ มีช่องน้ำออก มีทั้งหมด 23 ช่อง เพื่อศึกษาอัตราการไหลของแต่ละตำแหน่ง



ภาพประกอบที่ 4.16 แสดงชุดการทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน รูปซ้าย แสดงการประกอบเข้าชุดของชุดการทดสอบ และรูปขวา แสดงด้านในของชุดการทดสอบ

จากภาพประกอบที่ 4. 16 เป็นชุดการทดสอบประกอบด้วยแท่งอคลีลิคทรงกระบอกครึ่งวงกลมสองแท่ง แท่งด้านบนมีทางน้ำไหลเข้าและออก ในส่วนของแท่งด้านล่าง ประกอบด้วยช่องน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรน และออกมาจากชุดการทดสอบอัตราการไหล จากภาพประกอบที่ 4.16 ด้านขวา แสดงภาพภายในของชุดการทดสอบที่มีตำแหน่งช่องทางน้ำออก 23 ช่อง อยู่ห่างกันช่องละ 4 mm เมื่อน้ำไหลผ่านเมมเบรนจะไหลออกจากช่องเหล่านี้เพื่อทำการวัดอัตราการไหลออกของน้ำเมื่อผ่านแต่ละตำแหน่งบนเมมเบรน

4.3.1 การทดสอบการกรองด้วยเมมเบรน ในส่วน A

การทดลองอัตราการไหล กำหนดให้อัตราการไหลของน้ำที่ไหลเข้า คือ 1 , 3 และ 5 ml / mn. โดยศึกษาเมมเบรนในส่วน A ที่มีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนของของเมมเบรนในช่วง 100 - 200 nm. ใช้เวลาในการทดสอบแต่ละครั้ง 5 นาที วัดปริมาณของน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนในแต่ละตำแหน่ง โดยทำการวัดค่าอัตราการไหล ที่ตำแหน่ง 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16. 18, 20 และ 22 ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 แสดงผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 100 - 200 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 1 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที

Pore position	**Distance on Flow cell (cm)**	**water flow rate out in 1 min (ml/min)**			
		r1	**r2**	**r3**	**Avg***
2	2.1	0.04	0.05	0.05	0.05
4	2.9	0.04	0.04	0.04	0.04
6	3.7	0.04	0.04	0.04	0.04
8	4.5	0.04	0.04	0.04	0.04
10	5.3	0.04	0.04	0.04	0.04
12	6.1	0.04	0.04	0.04	0.04
14	6.9	0.04	0.04	0.04	0.04
16	7.7	0.04	0.04	0.04	0.04
18	8.5	0.04	0.04	0.04	0.04
20	9.3	0.04	0.04	0.04	0.04
22	10.1	0.04	0.04	0.04	0.04

ตัวอย่างการคำนวณ

การทดสอบอัตราการไหลของน้ำที่ตำแหน่งที่ 2 ชุดการทดสอบอัตราการไหลของน้ำ โดยชั่งมวลของน้ำที่ไหลออก โดยเริ่มจาก ชั่งมวลหลอดทดลองก่อนบรรจุน้ำ ซึ่งได้มวล 14.14 g หลังจากนั้นชั่งมวลของน้ำที่ไหลออกจากรูตำแหน่งที่ 2 เป็นเวลา 5 นาที ชั่งมวลได้ 14.38 g แล้วน้ำหลอดเดิมไปวัดมวลของน้ำเป็นเวลา 5 นาที ซึ่งเวลารวม 10 นาที ได้มวล 14.60 g และน้ำหลอดเดิมไปรับน้ำน้ำที่ไหลออก เป็นเวลา 5 นาที รวมเวลาทั้งหมดสิ้น 15 นาที มวลของน้ำที่วัดได้ คือ 14. 84 g ดังข้อมูลด้านล่าง

		volume of water		
position	blank(g)	5 min(g)	10min(g)	15min(g)
2	14.14	14.38	14.60	14.84

วัดผลต่างมวลของน้ำที่ ทุก 5 นาที ได้ 3 ค่า ดังนี้ 0.24 0.22 และ 0.24 g มวลของน้ำกลั่น 1 g คิดเป็นปริมาตรเป็น 1 ml ดังนั้น ปริมาตรของน้ำ ทุก 5 นาที เป็นดังนี้ 0.24 0.22 และ 0.24 ml และทำให้มีหน่วยเป็น ml / min ดังนี้

ครั้งที่ 1 0.24 ml / 5 min = 0.048 ml/min

ครั้งที่ 2 0.22 ml / 5 min = 0.044 ml/min

ครั้งที่ 3 0.24 ml / 5 min = 0.048 ml/min

และนำทั้ง 3 ค่า หาค่าเฉลี่ย ได้ค่าเฉลี่ย ของน้ำที่ไหลออกมาจากรูที่ตำแหน่งที่ 2 ของชุดการทดลอง เท่ากับ 0.047 ml / min

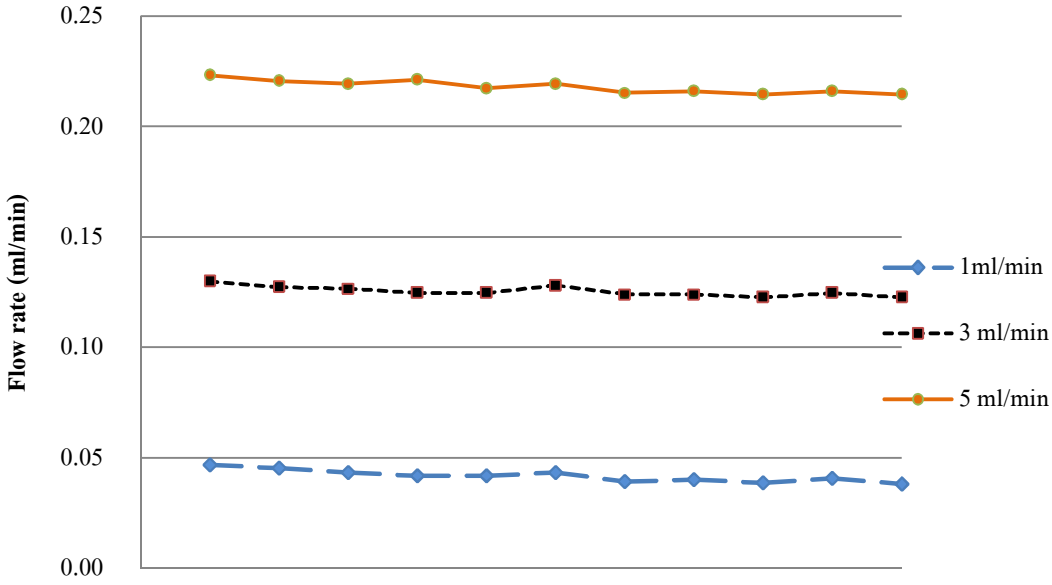
ตารางที่ 4.5 แสดงผลการทดลอง อัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 100 - 200 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 3 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที

Pore position	**Distance on Flow cell (cm)**	**water flow rate out in 1 min (ml/min)**			
		r1	**r2**	**r3**	**Avg**
2	2.1	0.13	0.13	0.13	0.13
4	2.9	0.13	0.13	0.12	0.13
6	3.7	0.13	0.12	0.13	0.13
8	4.5	0.12	0.13	0.12	0.12
10	5.3	0.13	0.12	0.12	0.12
12	6.1	0.13	0.13	0.13	0.13
14	6.9	0.13	0.12	0.12	0.12
16	7.7	0.12	0.13	0.12	0.12
18	8.5	0.12	0.12	0.12	0.12
20	9.3	0.12	0.12	0.13	0.12
22	10.1	0.12	0.12	0.12	0.12

ตารางที่ 4.6 แสดงผลการทดลองการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนอยู่ในช่วง 100 - 200 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 5 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที

Pore position	**Distance on Flow cell (cm)**	**water flow rate out in 1 min (ml/min)**			
		r1	**r2**	**r3**	**Avg**
2	2.1	0.22	0.23	0.22	0.22
4	2.9	0.22	0.22	0.22	0.22
6	3.7	0.22	0.21	0.21	0.21
8	4.5	0.22	0.21	0.21	0.21
10	5.3	0.21	0.21	0.20	0.21
12	6.1	0.23	0.21	0.22	0.22
14	6.9	0.22	0.21	0.20	0.21
16	7.7	0.21	0.21	0.21	0.21
18	8.5	0.22	0.21	0.21	0.21
20	9.3	0.21	0.22	0.21	0.21
22	10.1	0.22	0.21	0.21	0.21

เมื่อนำข้อมูลจากตารางข้อมูลที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 มาดำเนินการพลอตกราฟเพื่อแสดงผลการทดลอง เปรียบเทียบ การศึกษาการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 100 - 200 nm ด้วยอัตราการไหลของน้ำ 1,3 และ 5 ml / mn ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที ซึ่งผลของความสัมพันธ์ได้แสดงดังภาพประกอบที่ 4.17



Pore position	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Diameter (nm)		106	113	119	126	133	140	147	154	161	168	175
Particle density(n/μm^2)		13.6	11.8	10.3	9.0	7.8	6.8	5.9	5.2	4.5	3.9	3.4

ภาพประกอบที่ 4.17 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำของเมมเบรนส่วน A ผ่านช่องน้ำไหลออกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชุดการทดลองอัตราการไหล

จากการทดลองตอนที่ 4.3.1 การศึกษาอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนที่อยู่ในชุดการทดสอบอัตราการไหลโดยเมื่อให้อัตราการไหลเข้าของน้ำที่ต่างกันคือ 1, 3 และ 5 ml/min ทิศทางการไหลของน้ำจะผ่านตำแหน่งที่ 2 ต่อไปเรื่อย จนไปยังตำแหน่งที่ 23 พบว่าอัตราการไหลออกของน้ำผ่านทางน้ำออกของแต่ละตำแหน่ง มีอัตราที่ค่อนข้างคงที่โดยที่ อัตราการไหลของตำแหน่งเริ่มต้นสูงกว่าอัตราการไหลที่ตำแหน่งสุดท้ายเล็กน้อยแต่

จากการตรวจวัดอัตราการไหลผ่านของน้ำที่ตำแหน่งต่างโดยกำหนดให้อัตราการไหลเป็น 1 , 3 และ 5 ml/min พบว่าอัตราการน้ำไหลออกของทุก ๆ ตำแหน่งบนชุดการการทดลองเมื่ออัตราการไหลเข้าของน้ำมีค่าเป็น 1 ml/ min ค่าอยู่ในช่วง 0.05 – 0.04 ml/min โดยการไหลออกของน้ำคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เฉลี่ย คือ 92 % ของอัตราการไหลเข้า ซึ่งคำนวนได้ดังนี้

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งรูของชุดทดสอบการไหลมีค่า 0.04 ml/min ชุดการทดสอบการไหลมีทั้งหมด 23 รู ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำออกรวม ทั้งหมด

23 x 0.04 ml /min = 0.92 ml/min

อัตราน้ำไหลเข้า 1 ml/min คิดเป็น 100 %

อัตราน้ำไหลออก 0.92 ml คิดเป็น $\frac{0.92x100}{1}$ = 92 %

อัตราการไหลของน้ำที่ไหลออกของทุก ๆ ตำแหน่ง บนชุดการทดลอง เมื่ออัตราการไหลเข้าของน้ำ มีค่า 3 ml/min อยู่ในช่วง 0.13 – 0.12 ml/min โดยการไหลออกของน้ำคิดเป็นเปอร์เซ็นต์เฉลี่ย คือ 92 % ของอัตราการไหลเข้า ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

อัตราเฉลี่ยการไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งรูของชุดทดสอบการไหลมีค่า 0.12 ml/min ชุดการทดสอบการไหลมีทั้งหมด 23 รู ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำออกรวม ทั้งหมด

23 x 0.12 ml /min = 2.83 ml/min

อัตราน้ำไหลเข้า 1 ml/min คิดเป็น 100 %

อัตราน้ำไหลออก 2.83 ml คิดเป็น $\frac{2.83x100}{3}$ = 92 %

อัตราการไหลของน้ำไหลออกของทุก ๆ ตำแหน่งในชุดทดสอบอัตราการไหลเมื่อให้อัตราน้ำไหลเข้า 5 ml/min อยู่ในช่วง 0.22 – 0.21 ml/min โดยการไหลออกของน้ำคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เฉลี่ย คือ 96.6 % ของอัตราการไหลเข้า ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

อัตราเฉลี่ยการไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งรูของชุดการทดสอบการไหลมีค่า 0.21 ml/min ชุดการทดสอบการไหลมีทั้งหมด 23 รู ดังนั้นอัตราการไหลของน้ำออกรวม ทั้งหมด

23 x 0.21 ml /min = 4.83 ml/min

อัตราน้ำไหลเข้า 1 ml/min คิดเป็น 100 %

อัตราน้ำไหลออก 4.83 ml คิดเป็น $\frac{4.83x100}{5}$ = 96.6 %

โดยอัตราการไหลของน้ำจะมีค่าแปรผันตรงกับอัตราการไหลเข้าของน้ำ คือ อัตราการไหลของน้ำเข้าสูง อัตราการไหลออกของทุก ๆ ตำแหน่งจะมีค่าสูงกว่า อัตราไหลออกของทุก ๆ ตำแหน่งเมื่ออัตราการไหลเข้าน้อยกว่า

4.3.2 การทดสอบการกรองด้วยเมมเบรน ในส่วน B

การทดสอบการกรอง 4.3.2 เป็นการทดสอบอัตราการไหลของเมมเบรนส่วน B ที่ขนาดรูพรุนของเมมเบรนมีค่าในช่วง 200 - 300 nm โดยทำการทดสอบเหมือนกับเมมเบรนในส่วน A โดยใช้เวลาในการศึกษาอัตราการไหลเข้าของน้ำ คือ 1, 3 และ 5 ml/min โดยการใช้เวลาในการศึกษาการไหลนานเป็นเวลา 5 นาที ทำการทดสอบ 3 ครั้งเพื่อหาค่าเฉลี่ย อัตราการไหล ข้อมูลดังแสดงตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.7 แสดงผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 200 - 300 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 1 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที

Pore position	**Distance on Flow cell (cm)**	**water flow rate out in 1 min (ml/min)**			
		r1	**r2**	**r3**	**Avg**
2	2.1	0.05	0.04	0.04	0.04
4	2.9	0.04	0.04	0.04	0.04
6	3.7	0.05	0.04	0.03	0.04
8	4.5	0.04	0.04	0.04	0.04
10	5.3	0.04	0.04	0.04	0.04
12	6.1	0.04	0.04	0.04	0.04
14	6.9	0.04	0.04	0.04	0.04
16	7.7	0.04	0.04	0.04	0.04
18	8.5	0.04	0.04	0.04	0.04
20	9.3	0.04	0.04	0.03	0.04
22	10.1	0.04	0.04	0.03	0.04

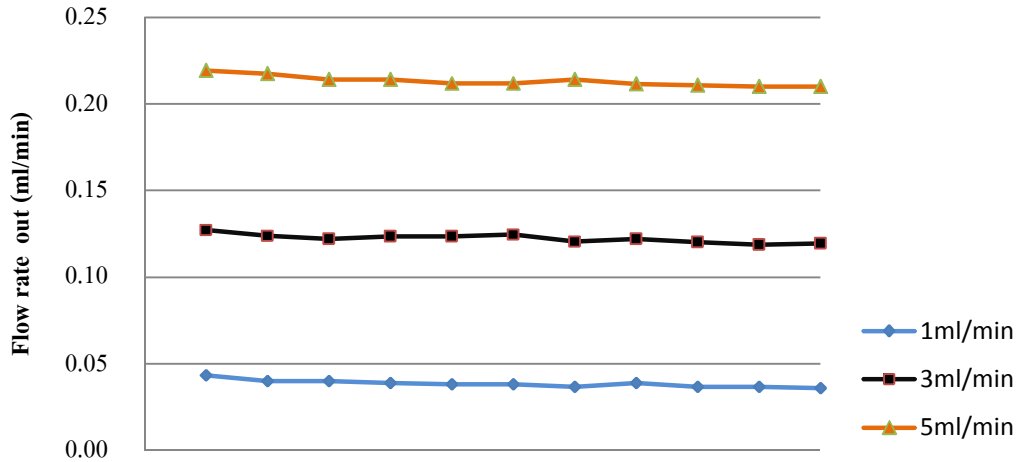
ตารางที่ 4.8 แสดงผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 200 - 300 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 3 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที

Pore position	**Distance on Flow cell (cm)**	**water flow rate out in 1 min (ml/min)**			
		r1	**r2**	**r3**	**Avg**
2	2.1	0.13	0.13	0.12	0.13
4	2.9	0.12	0.13	0.12	0.12
6	3.7	0.12	0.12	0.12	0.12
8	4.5	0.12	0.13	0.12	0.12
10	5.3	0.13	0.12	0.12	0.12
12	6.1	0.13	0.13	0.12	0.12
14	6.9	0.12	0.12	0.12	0.12
16	7.7	0.12	0.12	0.12	0.12
18	8.5	0.12	0.12	0.12	0.12
20	9.3	0.12	0.12	0.12	0.12
22	10.1	0.12	0.12	0.12	0.12

ตารางที่ 4.9 แสดงผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน 200 - 300 nm ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ 5 ml / min ระยะเวลาในการศึกษาคือ 5 นาที

Pore position	**Distance on Flow cell (cm)**	**water flow rate out in 1 min (ml/min)**			
		r1	**r2**	**r3**	**Avg**
2	2.1	0.22	0.22	0.22	0.22
4	2.9	0.22	0.22	0.22	0.22
6	3.7	0.21	0.21	0.22	0.21
8	4.5	0.22	0.21	0.21	0.21
10	5.3	0.21	0.21	0.22	0.21
12	6.1	0.21	0.21	0.21	0.21
14	6.9	0.21	0.21	0.21	0.21
16	7.7	0.21	0.21	0.21	0.21
18	8.5	0.21	0.21	0.21	0.21
20	9.3	0.22	0.20	0.21	0.21
22	10.1	0.21	0.21	0.20	0.21

จากตารางข้อมูลที่ 4.7, 4.8 และ 4.9 เมื่อนำผลการทดลอง อัตราการไหลออกของน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนในชุดการทดลองที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชุดการทดลอง นำมาเขียนกราฟแสดงอัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำที่ต่างกัน ดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.18



Pore position	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22
Diameter (nm)		214	221	228	235	240	249	256	263	278	270	284
Particle density(n/um^2)		1.6	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.4

ภาพประกอบที่ 4.18 แสดงผลการทดสอบอัตราการไหลของน้ำของเมมเบรนส่วนที่ B ผ่านช่องน้ำไหลออกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชุดการทดลองอัตราการไหล

จากการทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนชุด B พบว่า

อัตราการไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งเมื่ออัตราการไหลเข้า 1 ml/min มีค่าเฉลี่ยที่ 0.04 ml/min โดยการไหลออกของน้ำคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เฉลี่ย คือ 92 % ของอัตราการไหลเข้า

อัตราเฉลี่ยการไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งรูของชุดการทดสอบการไหลมีค่า 0.04 ml/min ชุดการทดสอบการไหลมีทั้งหมด 23 รู ดังนั้นอัตราการไหลออกของน้ำทั้งหมด

$$23 \times 0.04 \text{ ml /min} = 0.92 \text{ ml/min}$$

อัตราน้ำไหลเข้า 1 ml/min คิดเป็น 100 %

อัตราน้ำไหลออก 0.92 ml คิดเป็น $\frac{0.92 \times 100}{1}$ = 92 %

อัตราการไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งเมื่ออัตราการไหลเข้าของน้ำด้วยอัตรา 3 ml/min มีค่า 0.12 ml/min โดยการไหลออกของน้ำคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เฉลี่ย คือ 92 % ของอัตราการไหลเข้า ซึ่งคำนวนได้ดังนี้

อัตราเฉลี่ยการไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งรูของชุดทดสอบการไหลมีค่า 0.12 ml/min ชุดการทดสอบการไหลมีทั้งหมด 23 รู ดังนั้นอัตราการไหลออกของน้ำทั้งหมด

23 x 0.12 ml /min = 2.76 ml/min

อัตราน้ำไหลเข้า 1 ml/min คิดเป็น 100 %

อัตราน้ำไหลออก 2.76 ml คิดเป็น $\frac{2.76x100}{3}$ = 92 %

อัตราการไหลเข้าของน้ำผ่านชุดการทดสอบด้วยอัตรา 5 ml /min อัตราการไหลออกผ่านแต่ละตำแหน่งมีค่า 0.21 ml/min โดยการไหลออกของน้ำคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ เฉลี่ย คือ 96.6 % อัตราการไหลเข้า ซึ่งคำนวณได้ดังนี้

อัตราเฉลี่ยการไหลออกของน้ำแต่ละตำแหน่งรูของชุดทดสอบการไหลมีค่า 0.21 ml/min ชุดการทดสอบการไหลมีทั้งหมด 23 รู ดังนั้นอัตราการออกไหลของน้ำทั้งหมด

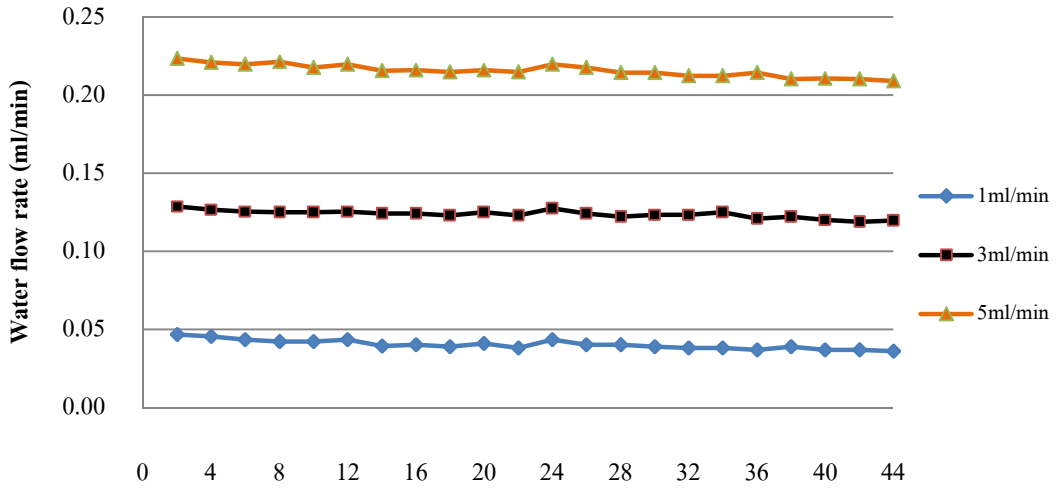
23 x 0.21 ml /min = 4.83 ml/min

อัตราน้ำไหลเข้า 1 ml/min คิดเป็น 100 %

อัตราน้ำไหลออก 4.83 ml คิดเป็น $\frac{4.83x100}{5}$ = 96.6 %

เมื่อพิจารณาจากกราฟพบว่า อัตราการไหลออกจะมีค่าแปรผันตรงกับอัตราการไหลเข้าของน้ำ กล่าวคือ อัตราการไหลเข้าของน้ำมีค่ามาก อัตราการไหลออกของน้ำผ่านแต่ละตำแหน่งมีค่าสูง เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการไหลออกของน้ำเมื่ออัตราการไหลที่ต่ำกว่า

ผลจากการรวม ผลการทดลองเข้าด้วยกันทั้ง เมมเบรนในส่วน A และ เมมเบรนในส่วน B (ซึ่งเมมเบรนทั้งสองมีขนาดรูพรุน และความหนาแน่นของรูพรุนที่ต่างกัน) พบว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนที่ตำแหน่งต่างกัน ให้ค่าใกล้เคียงกันมากไม่ว่าจะทดสอบโดยใช้อัตราการไหลเข้า 1 , 3 หรือ 5 ml/min ก็ตามผลการทดสอบเป็นดังภาพดังภาพประกอบที่ 4.19



0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40	44	
Diameter (nm)	106	119	113	147	161	175	221	235	249	263	270	
Particle density(n/μm^2)	13.6	10.3	7.8	5.9	4.5	3.4	1.4	1.0	0.8	0.6	0.4	

ภาพประกอบที่ 4.19 แสดงผลการทดลองอัตราการไหลของน้ำ ของเมมเบรนทั้งสองส่วน ผ่านช่องน้ำไหลออกที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของชุดการทดลองอัตราการไหล

จากกราฟทั้ง 3 เส้นดังแสดงในภาพประกอบที่ 4.19 พบว่าอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนทั้งสองส่วน และไหลออกมาจากแต่ละตำแหน่งของชุดทดสอบ กราฟแสดงอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรนทั้งสาม มีค่าคงที่ แสดงว่า อัตราการไหลออกของน้ำมีค่าคงที่ ณ แต่ละตำแหน่งของอัตราการไหลออกของน้ำของเมมเบรน เนื่องมาจากเมมเบรนมีขนาดมีรูพรุน และความหนาแน่นของแต่ละตำแหน่งแตกต่างกัน โดยเมื่อนำมาพิจารณาค่าการซึมผ่านของเมมเบรนแต่ละตำแหน่งตลอดทั้งแผ่นจะมีค่าคงที่ และแตกต่างกันด้วยอัตราการไหลเข้าของน้ำ จึงทำให้ผลการทดสอบการ

ไหลผ่านของน้ำออกมีค่าคงที่ ซึ่งผลจากการทดลองในงานวิทยานิพนธ์นี้สอดคล้องตามสมมติฐานที่กำหนดไว้ในวัตถุประสงค์ในการผลิตแผ่นฟิล์มบางพอลีคาร์บอเนต ด้วยวิธีเทคนิคการกัดรอยทางนิวเคลียร์ (Nuclear track-etching technique) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนแบบแปรผันตามระยะทางความยาวของแผ่นเมมเบรน โดยมีค่าสภาพการซึมผ่านของเมมเบรน (Permeability, $P=n\pi r^4$) มีค่าคงที่

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการผลิตแผ่นเมมเบรนที่ผลิตจากแผ่นฟิล์มบางพอลีคาร์บอเนต (Polycarbonate, PC) ขนาด 25 X 4 cm^2 ความหนา 6 μm ด้วยวิธีการกัดรอยทางนิวเคลียร์ โดยเริ่มจากการสร้างรอยแฝงให้เกิดขึ้นในแผ่นฟิล์มด้วยอนุภาคไอออนหนัก ^{58}Ni ที่มีพลังงาน 10.7 MeV/u ที่ประเทศฝรั่งเศส (GANIL : Caen, France) จากการควบคุมระดมยิงบนแผ่นฟิล์มโดยให้แต่ละตำแหน่งของแผ่นฟิล์มเกิดรอยแฝงที่มีความหนาแน่นแตกต่างกัน นำแผ่นฟิล์มดังกล่าวมาผ่านกระบวนการกัดขยายรอยด้วยสารละลาย NaOH ความเข้มข้น 2 N อุณหภูมิ 60.7 ^{o}C โดยอัตราการเคลื่อนที่ของแผ่นฟิล์มที่จุ่มลงในสารละลาย NaOH ด้วยอัตราเร็ว 1.91 cm / min จากนั้นนำแผ่นฟิล์มบางดังกล่าวไปล้างด้วยน้ำที่สะอาดเพื่อชะล้างสารละลาย NaOH ออกจนหมด นำไปผึ่งให้แห้งในบริเวณห้องที่ปราศจากฝุ่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานานประมาณ 24 ชั่วโมง จะได้แผ่นฟิล์มเมมเบรนที่มีความหนาแน่นและขนาดของรูพรุนที่แปรผันตามความยาวของแผ่นฟิล์มเมมเบรนดังกล่าว โดยความหนาแน่นของรูพรุน จะลดลงตามความยาวของแผ่นฟิล์มเมมเบรนที่เพิ่มขึ้น สมการความสัมพันธ์ ระหว่างความหนาแน่นของรูพรุน(n) และความยาวของเมมเบรน (x) คือ $n = 19.49e^{-0.17x}$ แต่ในทางกลับกันความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของแผ่นเมมเบรน เมื่อผ่านการกัดขยายรอยแล้ว จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงตั้งแต่ 100 - 300 nm ซึ่งจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามขนาดความยาวของเมมเบรนที่ผลิตได้ ความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนกลาง (d) และระยะทางบนแผ่นเมมเบรน (x) สอดคล้องตามสมการ d =8.71x + 87.72 และสำหรับการกัดขยายรอยนั้น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนมีค่าขึ้นกับเวลาของการกัดขยายรอยด้วยสารเคมี ด้วยความสัมพันธ์ระหว่าง เส้นผ่านศูนย์ของรูพรุน (d) กับเวลาที่ใช้กัดขยายรอย (t) เป็นดังสมการ d = 20.05t - 17.15 เมื่อ นำค่าความหนาแน่นของจำนวนรอยแฝง บนแผ่นฟิล์มเมมเบรนแต่ละตำแหน่ง (n) และ รัศมีของรูพรุน (r) มาหาค่าสภาพซึมผ่านได้ (Permeability, P) ตามสมการ $P = n\pi r^4$ พบว่า ค่าสภาพการซึมผ่านมีค่าคงที่ตลอดทั้งแผ่น

โดยมีค่าเท่ากับ 5.00×10^{-4} และเมื่อทดสอบอัตราการไหลของน้ำผ่านแผ่นฟิล์มเมมเบรนที่ผลิตได้ โดยให้อัตราการไหลของน้ำผ่านชุดทดสอบด้วยอัตราการไหล เป็น 1 , 3 และ 5 ml/min พบว่าแต่ละอัตราการไหลเข้าของน้ำ เมื่อนำไปทดสอบอัตราการไหลออกของน้ำ พบว่าอัตราการไหลออกของน้ำผ่านเมมเบรนดังกล่าวของแต่ละตำแหน่งมี ค่าเกือบคงที่ แสดงว่า เมื่อเมมเบรนมีค่าสภาพการซึมผ่านที่คงที่ อัตราการไหลของน้ำที่ไหลผ่านเมมเบรนมีค่าคงที่ ดังนั้นจากการศึกษาในครั้งนี้พบว่าอัตราการไหลผ่านของน้ำที่ไหลผ่านแผ่นฟิล์มเมมเบรนที่มีค่าสภาพซึมผ่านได้คงที่ของแต่ละตำแหน่ง จะมีอัตราการไหลออกของน้ำเท่ากันทุกตำแหน่งซึ่งสอดคล้องตามสมมติฐาน สภาพซึมผ่านได้ (Permeability, P) ตามสมการ $P = n\pi r^4$

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ควรใส่ถุงมือก่อนการจับแผ่นฟิล์มเมมเบรนทุกครั้ง ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้แผ่นฟิล์มบางเมมเบรนเปื้อนคราบน้ำมันจากฝ่ามือ

2. การเตรียมสารละลาย NaOH เมื่อเตรียมเสร็จควรดึงฟองอากาศออกจากสารละลายที่เตรียมได้ด้วยการใส่ลงไปในบีคเกอร์แล้วใส่ในอ่างอัลตราโซนิค ซึ่งคลื่นเสียงความถี่สูงจากแหล่งกำเนิดจากอ่างอัลตราโซนิคดังกล่าวจะไล่ฟองอากาศในสารละลายดังกล่าว ทั้งนี้เพื่อป้องกันฟองอากาศไปเกาะติดบนแผ่นฟิล์มเมมเบรนในระหว่างกระบวนการกัดรอย

3. การกัดขยายรอยแผ่นฟิล์มบางพอลิคาร์บอเนต ควรจะต้องขึงให้ตึงตลอดเวลาในขณะที่ทำการกัดขยายรอย รวมทั้งขั้นตอนการตัดชิ้นส่วนเพื่อมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ SEM

4. สำหรับการทดสอบอัตราการไหลผ่านของน้ำ ฟองอากาศมีผลต่อการทดสอบอย่างมาก ดังนั้นการกำจัดฟองอากาศต้องใช้วิธีอย่างระมัดระวัง กล่าวคือต้องประกอบแผ่นฟิล์มเมมเบรนบางที่ผลิตได้เข้ากับชุดการทดสอบในถังน้ำ แล้วนำชุดการทดสอบ ไปไล่ฟองอากาศอีกครั้งด้วยโดยใช้หลักการเช่นเดียวกับข้อที่ 2 ทั้งระบบ

5. ปริมาณตัวเลข 5×10^{-4} ซึ่งได้จากสมการความสัมพันธ์ $n\pi r^4$ โดยกำหนดขึ้นเพื่อความเหมาะสมในด้านความแข็งแรงของแผ่นเมมเบรน และสอดคล้องกับขนาดรูพรุนตั้งแต่ 100 -300 nm โดยแผ่นเมมเบรนมีขนาดความยาว 25 cm แต่อย่างไรก็ตามปริมาณตัวเลขดังกล่าวสามารถเพิ่มลดได้ แต่ต้อง

พิจารณา ถึงความแข็งแรงของแผ่นเมมเบรนด้วย เช่นกัน เช่นจำนวนรูพรุนที่มากเกินไป หรือ เวลาที่ใช้ในการกัดขยายรอยเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้ได้ขนาดรูพรุนที่ใหญ่ขึ้น จะทำให้เมมเบรนมีความเปราะบางมากขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้งานลดลง

บรรณานุกรม

ขันทอง สุนทราภา. 2547. “ เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

จิรยุ พุดพวง และ สุนิศา ฤกษ์อุดม. 2551“Fission track membrane filter” รายงานการฝึกงานภาคฤดูร้อน คณะวิทยศาตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

นวลฉวี รุ่งธนเกียรติ, 2545, วิทยาศาสตร์นิวเคลียร์, สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

พงศกร สุวรรณเดชา, 2540, ฟิสิกส์นิวเคลียร์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี.

วิทูร สุจริตธุรการ. 2548 “การทำรูพรุนขนาดเล็กมากบนแผ่นบางพอลิเมอร์ด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์”,วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขาลนครินทร์ (สำเนา)

สมหมาย ช่างเขียน. 2539, การวัดโดสนิวตรอนของแหล่งกำเนิดนิวตรอนชนิดพลูโตเนียม-เบอริเลียมในแบบจำลองชนิดน้ำโดยใช้ฟิล์มตรวจจับรังสีแบบกัดรอยและการคำนวณแบบส่งผ่านหลายกลุ่ม, วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

สันติ แผ่เต็ม. 2551 “ผลกระทบของการสมานรอยด้วยความร้อนต่อขนาดรูพรุนด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์บนแผ่นเมมเบรนพอลิคาร์บอเนต”.วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิตสาขาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขาลนครินทร์ (สำเนา)

Apel, P., Schulz, A., Spohr, R., Trautmann, C. and Vutsadakis V. “Track size and track structure in polymer irradiated by heavy ions” ,Nucl. Instr. and Meth. B. 146(1998), 468 - 474.

Apel, P., Spohr, R., Trautmann, C. and Vutsadakis V.,"Track structure in polyethylene terephthalate irradiated by heavy ions : let dependence of track daimeter" Radiation Measurements. 31(1999), 51 - 56.

Apel. P. 2001. "Track-etching technique in membrane technology" Radiation Measurements. 34 (2001) 559-566.

Cornelius T.W., Apel. P. Yu., Schiedt. B., et. al. 2007. " Invwetigation of nanopore evolution in ion track-etched polycarbonate membranes" Nuclear Instrument method in Physic resesrch. B. 265 (2007), 553-557.

Dauginet-De Pra. L., Ferain. E., Legras. R. 2002."Frabication of new generation of track-wtched templates and their use for the synthesis of metallic and organic nanostructure" Nuclear instrument and methode in physics research. B 196(2002), 81-88.

Ferain. E. and R. Legras., 1994. " Track-etched membrane: dynamics of pore formation" Nuclear Instrument and Methode in Physics Rearch. B 84(1994), 331-336.

Flesischer. R.L., Price. P.B., Walk. R. M. 1975. "Nuclear Tracks in Solid " University of California Press, Berkeley.

Flerov, G.N., Apel, P.Yu., Didyk, A.Yu. 1989. "The use of heavy ion accelerators for the production of track membranes " Energy (USSR) 67 (1989), 274–280

Guo.W., Xue.J.M. and Zhang W.M. 2008. "Electrolytic conduction properties of single conical nanopore" Radiation Measurement. 43 (2008), s623-s626.

Kaewsaennee. J., Rattanatongchai.W., Suppaphol. P. and Visal-athaphand. P. 2005. "Chemical Etching of latent tracks Formed by Bombardment with Nuclear Fragement for the Development of Track-Etched Polystyrene Membrane" 31th Congress on Science and Technology of Thailand at Suranaree of Technology.

Karim .S., Ensinger. W., Mujahid. S.A., *et.al*., 2009. " Effect of etching condition on pore shape in etched ion-track polycarbonate membranes" Radiation measurement. 44(2009).779-782.

Lazea. A., Kravets. L.I.,Dmitriev.S.V., and Dinescu. G., 2005 , "Deposition of acrylic acid plasma polymer onto poly (ethylene terephalate) nuclear track" Romanian Report in Physics. 57 (2005) , 396-400.

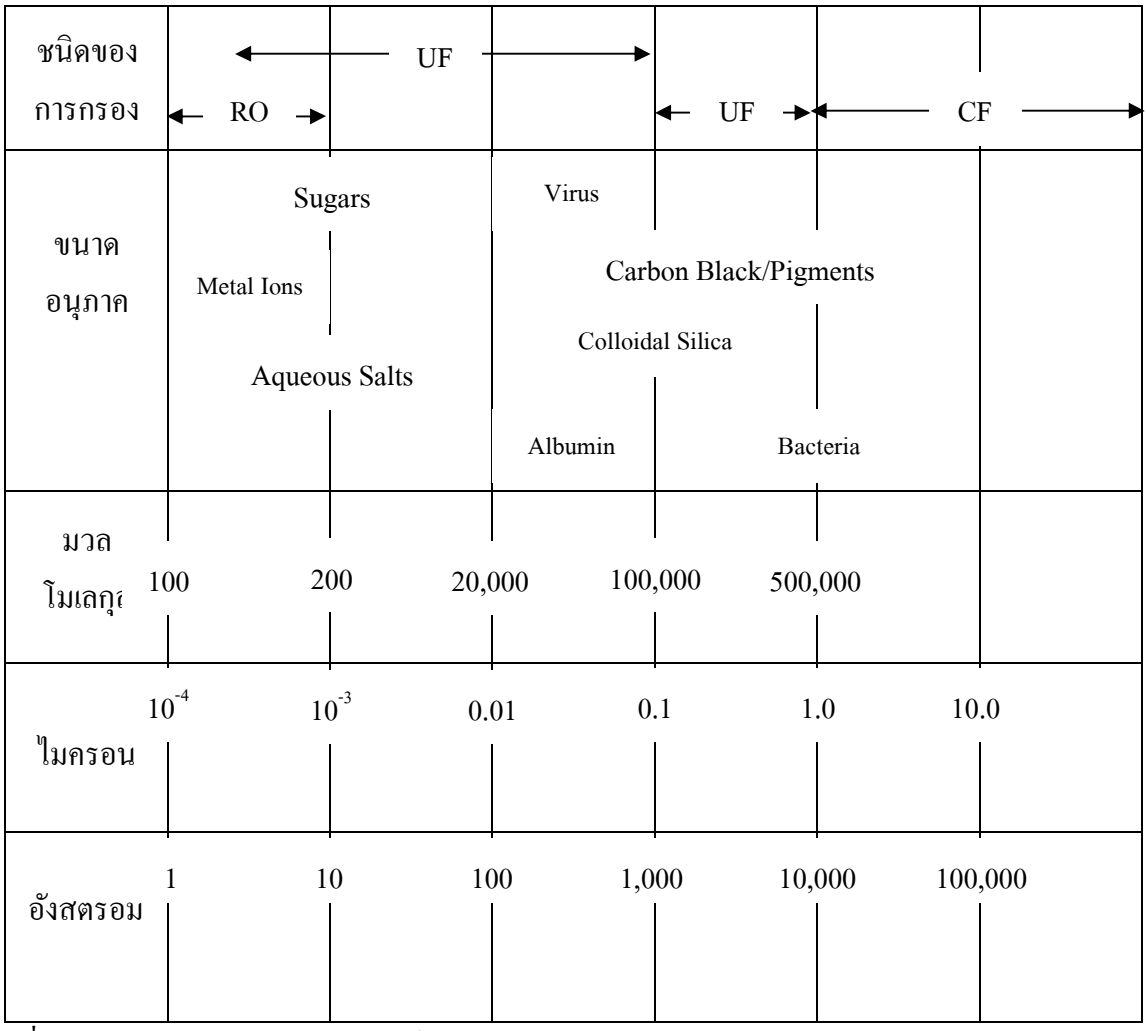
Sirijarukul. S., Balanzat. E., Vasina. B. N., and Dejardin. P., 2007. " Flate sheet membrane with controlled variation of pore density and pore size a direction parallel to the surface" Membrane science. 296 (2007)185-194.

Spohr. R. 1990. Ion Tracks and Microtechnology Frankfurt: Vieweg Company.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ตารางที่ ก.1 ชนิดการกรองอนุภาคผ่านเมมเบรนต่างๆ



ที่มา : สำนักวิจัยบริการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยลัยเทคโนโลยีพระจอเกล้าธนบุรี

(2542, หน้า 8)

RO = Reverse Osmosis

UF = Ultrafiltration

MF = Microfiltration

CF = Conventional Filtration

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 แสดงเงื่อนไขการกัดขยายรอยสำหรับสารต่างๆ(Fleischer และคณะ, 1975)

Mineral	Etching Coditions
Tektite	48%HF,30sec
	24HBF_4 : 5 % HNO_3 : 0.5 % acetic acid 90 min
	48% HF , 5 sec
Uranium-soda glass	50% HF , 5 sec
Uranium phosphate glass	48% HF , 10 sec
V_2O_5•$(P_2O_5)_5$(semiconducting)	30 g $K_2Cr_2O_7$: 50 ml conc. H_2SO_4, 40 h,28^oC
Amber	1 ml 15% NaCl 10: 2 ml 6.2 N NaOH, 1H, 40^oC
Cellulose acetate (Kodacel; Triafol T ; Cellit)	25 g NaOH: 20 g KOH: 4.5$Kmno_4$:90 g H_2O_2, 2-3 min.50^oC
	6.25 N NaOH, 12 min,70 ^oC
Cellulose acetate butyrate	6.25 N NaOH,2-4 h, 23 ^oC
Cellulose nitrate (Diacell ; Nixon-Baldwin)	28 % KOH, 100 min, 60^oC

Cellulose propionate (Cellidor)	1 ml 15 % NaC10 : 2 ml 6.25N NaOH, 1 h,40^{o}C
Cellulose triacetate (Kodacel TA401'unplasticized; Bayer TN)	25N NaOH, 3 min.115^{o}C
Dimethyl siloxane (crosslinked)	
Formophenol (ambrolithe,phenoplaste)	
	6N NaOH,1 h,40^{o}C; 48% HF,
HBpaIT(polyester, $C_{17}H_9O_2$)	30 sec,40^{o}C, in sequence
Ionomeric polyethylene (Surlyn)	6.25 N NaOH, 8min,70^{o}C
	10 g $K_2Cr_2O_7$: 35 ml 30% H_2SO_4,1h 50^{o}C
Polyamide (H-Film)	$KmnO_4$ (25%aq),1.5 h 100^{o}C
	6 N NaOH solution
	$KMnO_4$ in H_2O

Mineral	**Etching Coditions**
Polyimide	1 ml 6.25 N NaOH: 1ml ethanol, 24 h, 23^{o}C
Poly 1-4 buteylene terephthalate	6.25 N NaOH: ,20 min 50^{o}C
	6.25 N NaOH + 0.4 % Benax* , 20 min, 70^{o}C
Polycarbonate (Lexan; Makrofol; Merlon; Kimfol)	10 g $K_2Cr_2O_7$: 35 ml 30% H_2SO_4 ,30 min, 85 ^{o}C
Polyethylene	
Polyethylene terephthalate (Mylar; Chronar; Melinex; Kimfol)	$KMnO_4$ (25%, aq) 1 h, 55 ^{o}C
	5%$KMnO_4$, 10 h, 60^{o}C
Polyoxymethylene (Delrin)	$KMnO_4$, (25 % aq), 4 min, 100 ^{o}C
Polyphenoxide	
Polyphenylene oxide (PPO)	
Polypropylenw (Cryovoc-Y)	$KMnO_4$ aq.,sat., 24 h, 93 ^{o}C
	35 ml 30% H_2SO_4: 10 g, $Cr_2K_2O_7$, 5 min, 94^{o}C
Polystyrene	Sat. $KMnO_4$, 2.5 h, 85 ^{o}C
	10 g $K_2Cr_2O_7$: 35 ml, 30 % H_2SO_4, 3 h, 85 ^{o}C

	6.25 N NaoH, 200 h, 23 ^{o}C
Polyvinyl acetate (Formvar)	
Polyvinylacceto-chloride	$KMnO_4$ (25 % aq.) 30 min, 100 ^{o}C
Polyvinylchloride	Sat. $KMnO_4$,2.5 h, 85 ^{o}C
Polyvinylidene chloride (Saran)	$KMnO_4$(25 % aq.), 2h, 55^{o}C
Polyvinyl toluene	$KMnO_4$ sat., aq., 30 min, 100 ^{o}C
Silicone-polycarbonate copolymer	6.25N NaOH 20 min,50^{o} C
Siloxane-cellulose copolymer	8 N NaOH + 0.1 % Dowfax, 3h, 85 ^{o}C

ภาคผนวก ค

การเตรียมความเข้มข้นของสารละลาย NaOH

การคำนวนหน่วย Normal,N

ตัวอย่างการคำนวณสารละลาย NaOH (Na =23 , O = 16 , H =1)

ดังนั้น มวลโมเลกุลของ NaOH เท่ากับ 40

สูตร N = น.น.โมเลกุล x นอร์มัลที่ต้องการ x ปริมาตรที่ต้องการ

เช่น ต้องการเตรียมสารละลาย NaOH ที่ความเข้มข้น

2N ปริมาตร 200 ml

N = 40 *2*0.2

(0.2 มาจาก 200 ml/1000 ml) = ชั่ง 16 g เตรียมเป็น 200 m

ดังนั้นหากต้องการเตรียม NaOH ปริมาตร 1000 ml

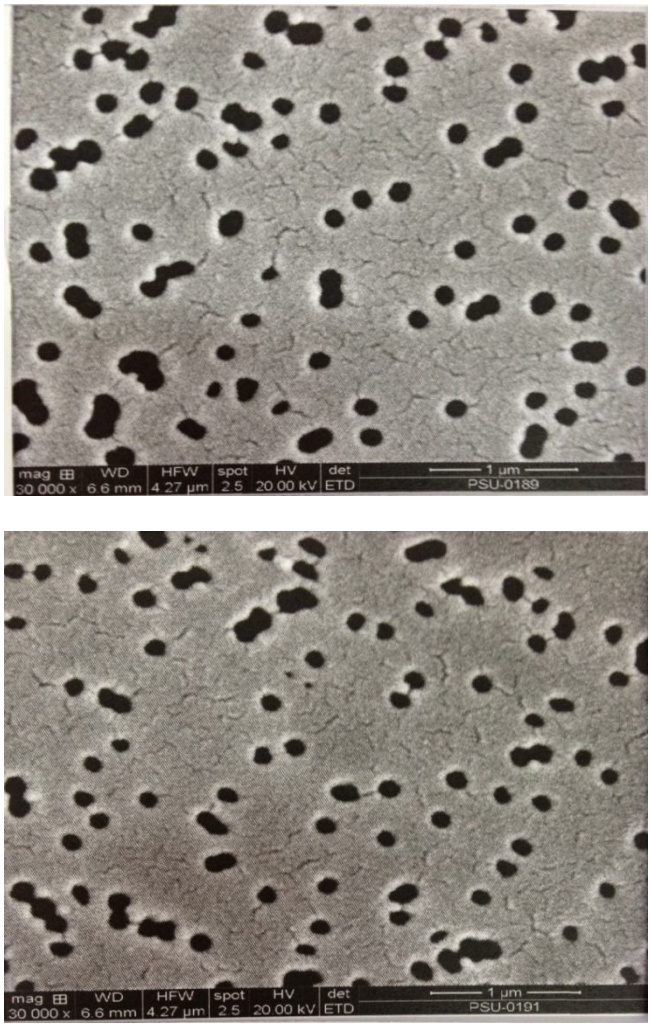
ความเข้มข้น ของ NaOH ที่ 2 N ใช้สาร NaOH 80 g แล้วเติมน้ำกลั่น 1,000 ml

ความเข้มข้น ของ NaOH ที่ 2.5 N ใช้สารNaOH 100 g แล้วเติมน้ำกลั่น 1,000 ml

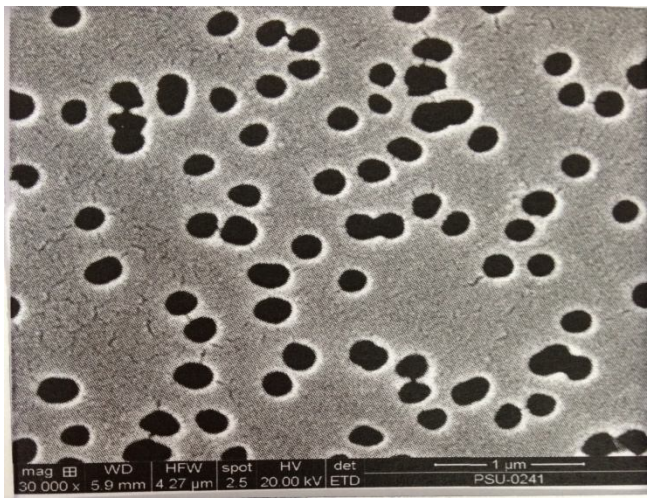
ความเข้มข้น ของ NaOH ที่ 4.5 N ใช้สาร NaOH 180 g แล้วเติมน้ำกลั่น 1,000 ml

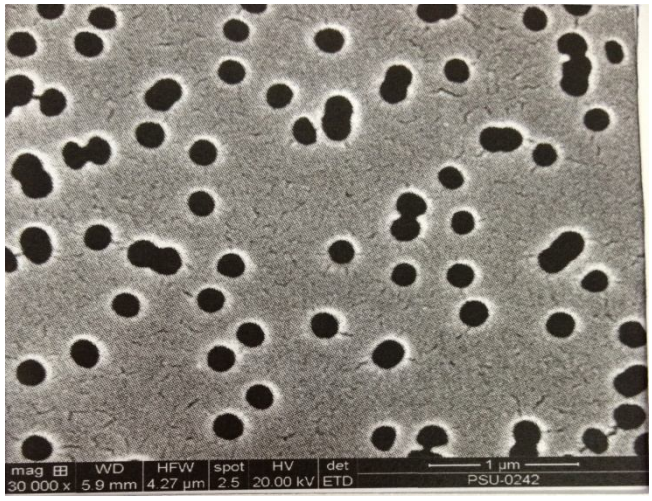
ภาคผนวก ง

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของแผ่นพอลิคาร์บอเนต สองภาพ สองตำแหน่ง ที่เหลือ ซึ่งกัดขยายรอยด้วย NaOH 2N อุณหภูมิ 60.7 ^{o}C ที่ตำแหน่งต่างๆ

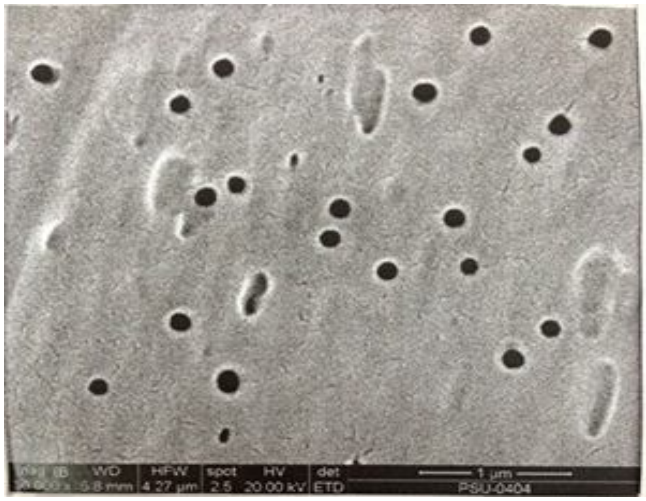


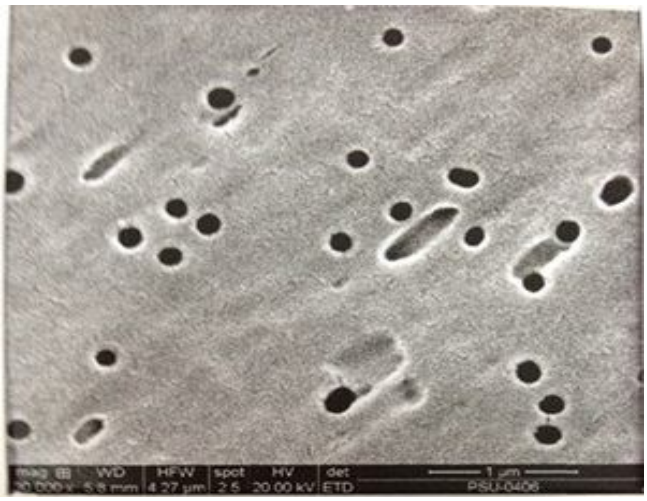
ภาพประกอบที่ ง.1 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 2 ระยะ 2.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรนระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 14.03 นาที ตำแหน่งที่ 2 (บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)



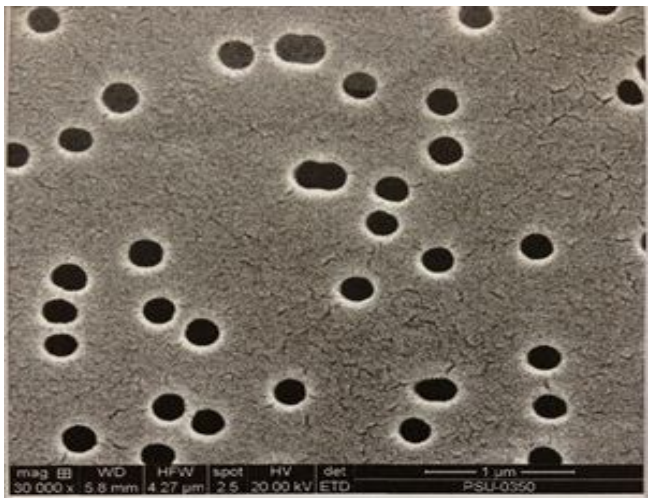


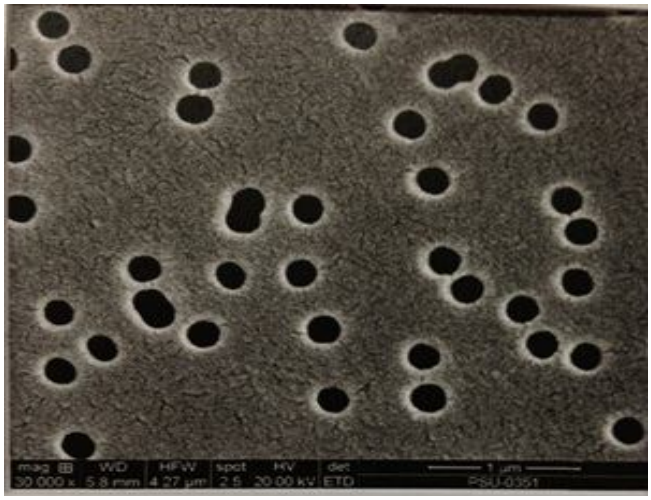
ภาพประกอบที่ ง.2 แสดงภาพ SEM (x30000) ตำแหน่งที่ 4 ระยะ 5.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 15.26 นาที ตำแหน่งที่ 2(บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)



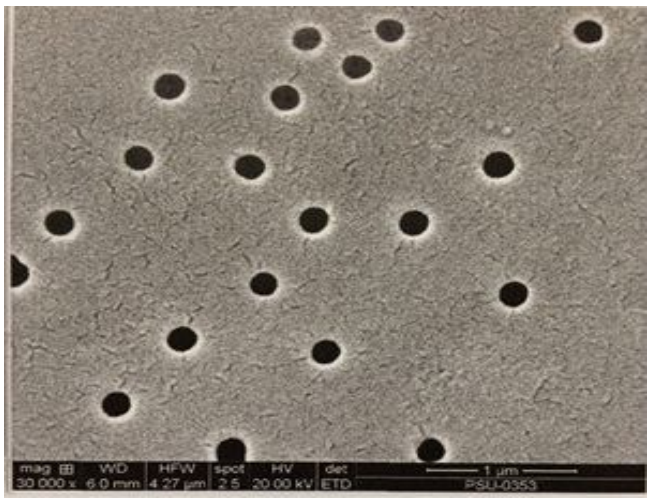


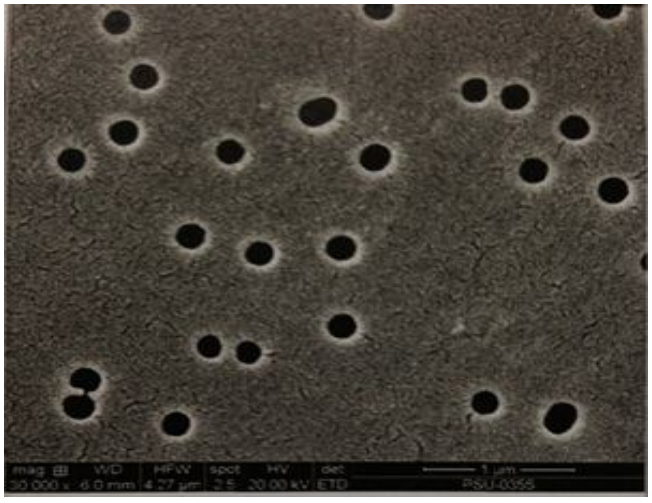
ภาพประกอบที่ ง.3 แสดงภาพ SEM (x30000) ตำแหน่งที่ 6 ระยะ 8.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 16.47 นาที ตำแหน่งที่ 2(บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)



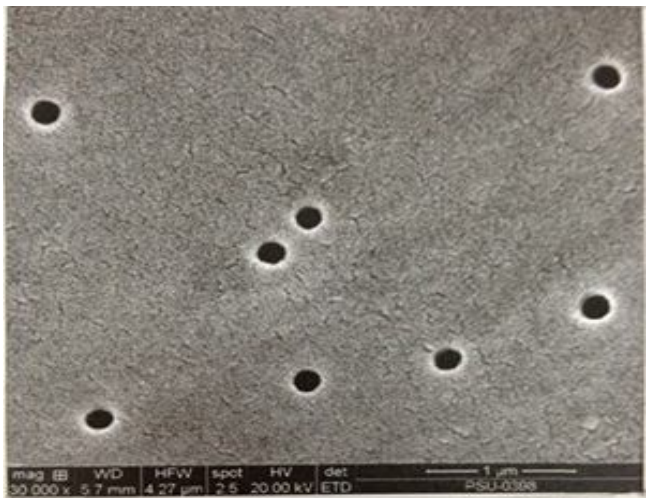


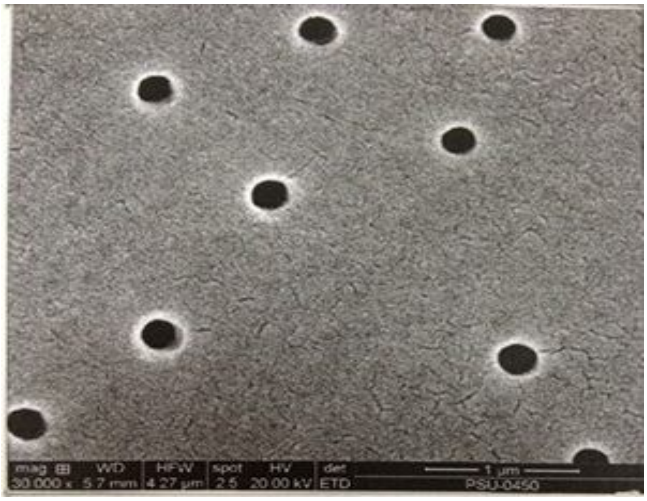
ภาพประกอบที่ ง.4 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 8 ระยะ 11.5 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 18.07 นาที ตำแหน่งที่ 2(บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)



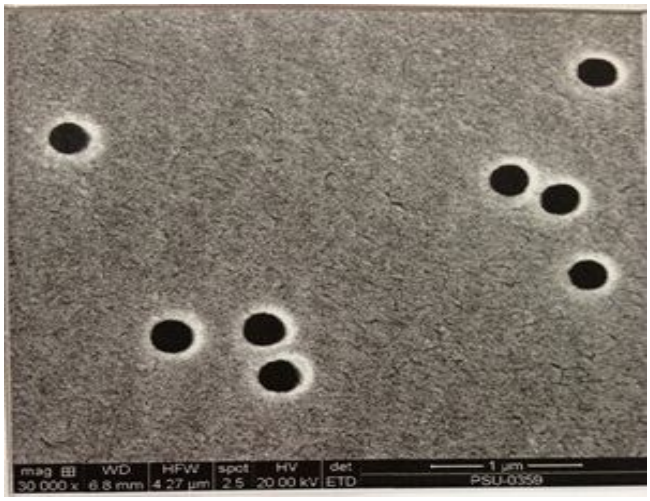


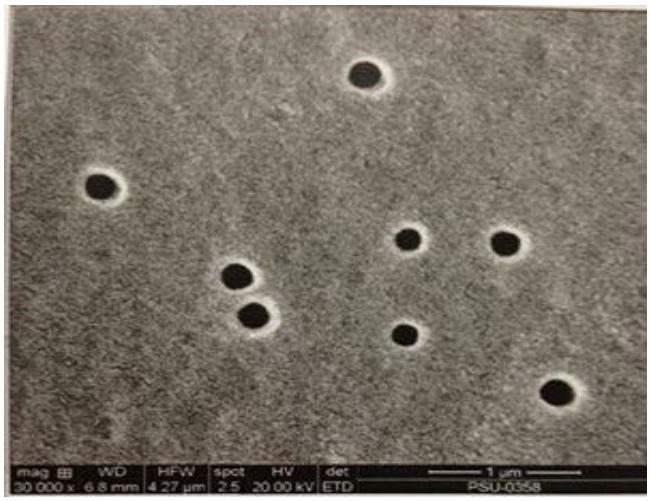
ภาพประกอบที่ ง.5 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 10 ระยะ 15 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น เมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 19.40 นาที ตำแหน่งที่ 2(บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)



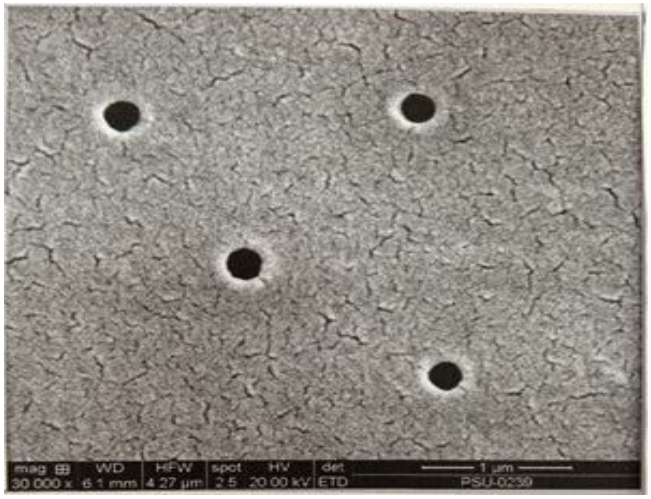


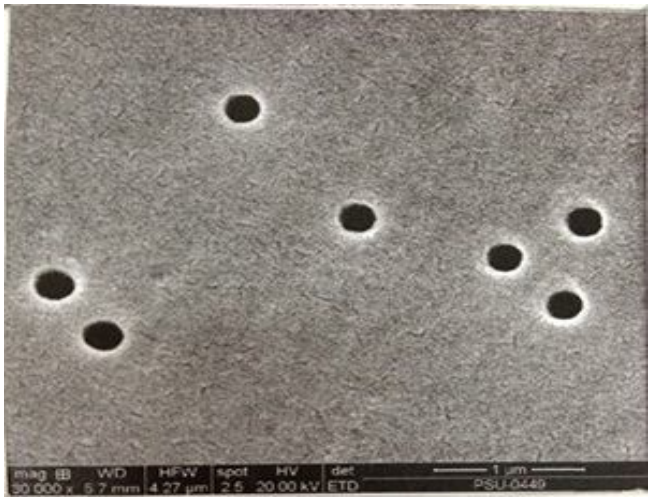
ภาพประกอบที่ ง.6 แสดงภาพ SEM (x 30,000) ตำแหน่งที่ 12 ระยะ 18 เซนติเมตรจากขอบของแผ่นเมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 21.00 นาที ตำแหน่งที่ 2(บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)





ภาพประกอบที่ ง.7 แสดงภาพ SEM (x 30,000) ตำแหน่งที่ 14 ระยะ 21 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น เมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 22.20 นาที ตำแหน่งที่ 2(บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)





ภาพประกอบที่ ง.7 แสดงภาพ SEM (x30,000) ตำแหน่งที่ 16 ระยะ 24 เซนติเมตรจากขอบของแผ่น

เมมเบรน ระยะเวลาในการกัดขยายรอยทางเคมีนาน 23.04 นาที ตำแหน่งที่ 2(บน) และตำแหน่งที่ 3 (ล่าง)

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ สกุล นายวิทวัส วัชรจิตตานนท์

รหัสประจำตัวนักศึกษา 5110220145

วุฒิการศึกษา

วุฒิ	ชื่อสภาบัน	ปีที่สำเร็จการศึกษา
วท.บ. (ฟิสิกส์)	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์	2551