

เครื่องกรองน้ำชนิดที่ใช้เยื่อแผ่นซีลิกาสำหรับชนบท



นายดอท บุญญานุกัษ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

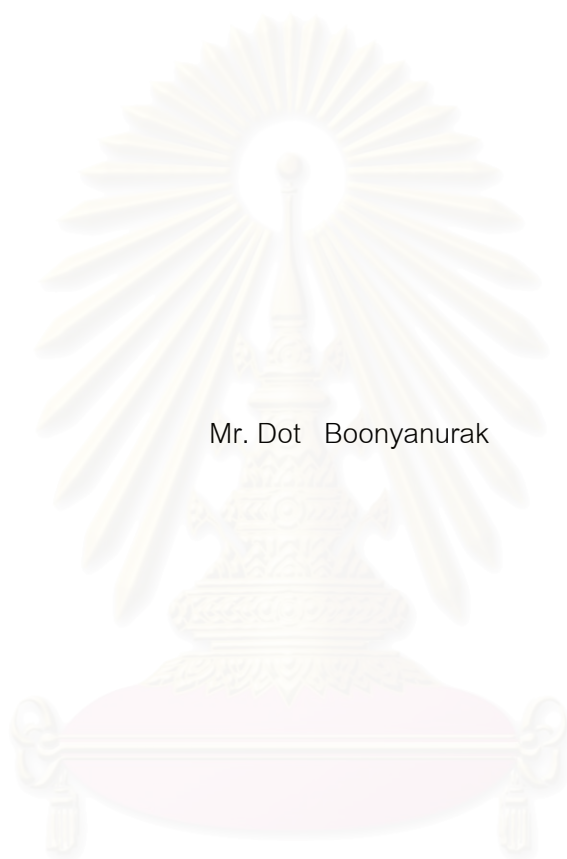
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2544

ISBN 974-03-1326-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

SILICA MEMBRANE FILTER FOR RURAL AREA



Mr. Dot Boonyanurak

สถาบันวิทยบริการ

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2001

ISBN 974-03-1326-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	เครื่องกรองน้ำชนิดที่ใช้เยื่อแผ่นซีลิกาสำหรับชนบท
โดย	นายดอท บุญญานุกรักษ์
สาขาวิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.จिरกานต์ เมืองนาโพธิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	คุณสรินทร์ ลิมปนาท

---

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วน  
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์  
(ศาสตราจารย์ ดร.สมศักดิ์ ปัญญาแก้ว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ  
(ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตันทะพานิชกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รองศาสตราจารย์ ดร.จिरกานต์ เมืองนาโพธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม  
(คุณสรินทร์ ลิมปนาท)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์)

ดอท บุญญานุรักษ์ : เครื่องกรองน้ำชนิดที่ใช้เยื่อแผ่นซิลิกาสำหรับชนบท.

(SILICA MEMBRANE FILTER FOR RURAL AREA) อ.ที่ปรึกษา :

รศ.ดร. จิรگانต์ เมืองนาโพธิ์ อ.ที่ปรึกษาร่วม : คุณสรินทร์ ลิมปนาท. 84 หน้า.

ISBN 974-03-1326-4

งานวิจัยนี้ศึกษาการพัฒนาไส้กรองเซรามิกส์สำหรับการใช้งานชนบท โดยการเคลือบเยื่อแผ่นซิลิกากับผิวหน้าของไส้กรองด้วยวิธีโซล-เจล การเตรียมสารละลายโซลเพื่อเคลือบเยื่อแผ่นเตรียมจากการนำสาร 3 ชนิดมาทำปฏิกิริยากันคือสารละลายโซเดียมซิลิเกต น้ำและกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ซึ่งสารละลายโซเดียมซิลิเกตสามารถเตรียมได้จากขี้เถ้าแกลบ ศึกษาผลขององค์ประกอบของสารทั้ง 3 ชนิดต่อเวลาในการเกิดเจล โดยแปรผันปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.015-0.055 % โดยโมลต่อปริมาตร และแปรผันสัดส่วนโดยโมลของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับสารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.6-7 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นและสารละลายโซเดียมซิลิเกต จะทำให้เวลาในการเกิดเจลลดลง โดยภาวะที่เหมาะสมคือความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต และสัดส่วนโดยโมลของกรดซัลฟิวริกเข้มข้นกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 0.025 % โดยโมลต่อปริมาตรและ 7 ตามลำดับ ซึ่งทำให้ได้เวลาในการเกิดเจลน้อยที่สุด

เมื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความหนืดตามเวลาในการเกิดเจล พบว่าความหนืดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงที่เริ่มมีการเกิดเจล ดังนั้นจึงต้องชลอปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำลงไป โดยเลือกความหนืดที่ 300, 600 และ 1000 เซนติพอยด์ มาทำการชลอปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเติมน้ำที่ปริมาณ 50 % ของปริมาณตั้งต้น จะทำให้ความหนืดมีค่าคงที่ และการเปลี่ยนแปลงของความหนืดตามเวลาเมื่อผลต่อขนาดของอนุภาคโซล โดยเมื่อความหนืดมีค่ามากขึ้น อนุภาคของโซลจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามเวลา ดังนั้นจึงเลือกใช้ความหนืดที่ 600 เซนติพอยด์เพราะจะได้ขนาดอนุภาคประมาณ 1 ไมโครเมตรและสามารถชลอปฏิกิริยาได้ และเมื่อเคลือบสารละลายโซลบนไส้กรอง อนุภาคของโซลจะซึมเข้าไปในไส้กรองได้มากทำให้รูพรุนของไส้กรองมีขนาดเล็กลง

การศึกษาเวลาในการเคลือบ โดยทำการเคลือบที่เวลา 2 – 60 วินาทีและ 2 - 60 นาที พบว่า ถ้าใช้เวลาในการเคลือบมากขึ้น ความพรุนตัวของไส้กรองมีค่าลดลง ไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาที มีค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าไส้กรองที่ใช้เวลาเคลือบนานๆ

เมื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ และค่าการกักเก็บอนุภาคในน้ำบาดาล (ขนาดเฉลี่ย 0.1-0.5 ไมโครเมตร) ยีสต์ (ขนาดเฉลี่ย 5 ไมโครเมตร) และแบคทีเรีย *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599 (ขนาดเฉลี่ย 2 ไมโครเมตร) ของไส้กรอง 4 ชนิด (ไส้กรองที่ไม่เคลือบชนิดหนา ไส้กรองที่ไม่เคลือบชนิดบาง ไส้กรองบางที่เคลือบที่เวลา 2 วินาที และไส้กรองบางที่เคลือบที่เวลา 60 วินาที) พบว่า ไส้กรองที่เคลือบที่เวลา 2 วินาทีให้ค่าการกักเก็บอนุภาค ยีสต์และแบคทีเรีย มากกว่าไส้กรองที่ใช้กันอยู่ทั่วไป โดยที่ค่าฟลักซ์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน

นอกจากนี้ยังพบว่าไส้กรองที่ปรับปรุงนี้มีลักษณะเป็นไส้กรองแบบอนุภาคติดบนผิวหน้าไส้กรอง

(Surface Filter)

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2544.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

# # 4170670121: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEY WORD: SILICA MEMBRANE/SOL-GEL TECHNIQUE/RURAL AREA

DOT BOONYANURAK: SILICA MEMBRANE FILTER FOR RURAL AREA. THESIS

ADVISOR: ASSO.PROF.CHIRAKARN MUANGNAPOH, THESIS COADVISOR:

MISS SARINTORN LIMPANART, 84 pp. ISBN 974-03-1326-4

In the present research, the improvement of ceramic filter for rural area was studied by Sol-Gel technique. Silica was coated on support surface to form the silica membrane. The sol solution was prepared from 3 chemicals: sodium silicate solution, water, and concentrated sulfuric acid. The sodium silicate solution was synthesized from rice husk ash.

To investigate the influence of chemicals ratio on the gel time, the concentration of sodium silicate was varied between 0.015-0.055 % by mole per volume and the mole ratio of concentrated sulfuric acid and sodium silicate was varied between 0.6-7. It was found that the increase of the concentrated sulfuric acid volume and sodium silicate ratio decreased gel time. The optimal sodium silicate concentration and molar ratio of concentrated sulfuric acid were 0.025 % by mole per volume and 7, respectively.

According to the variation of sol solution viscosity with respect to time. It was illustrated that sharply increased at the beginning. Therefore the reaction rate has to be decreased by adding the water in the solution to remain the solution viscosity. In this experiment, decreasing the reaction rate has performed at 3 viscosities (300, 600 and 100 centipoise). It could remain the solution viscosity by adding water 50 % of the initial volume. Moreover the variation of viscosity with time affect to the particle size of sol. The enhancement of the viscosity caused the increasing of the sol particle size. The optical viscosity for the preparation of sol solution was 600 centipoise, which resulted in 1 micrometer of sol solution. The supports coated by sol solution provide smaller pore size because the sol solution would penetrate in to pore.

The effect of dipping time was observed by changing the dipping time between 2 to 60 second and 2 to 60 minutes. It was found that the longer dipping time, the smaller porosity was observed. The dipping time of 2 seconds filter had more small volume change than other long dipping time filters.

Flux and rejection of particle in ground water (average size 0.1-0.5 micrometer) yeast (average size 5 micrometer) and bacteria *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599 (average size 2 micrometer) from four microfilters (Thick-non coated microfilter, Thin-non coated microfilter, Thin-non coated microfilter with dipping time of 2 seconds and Thin-non coated with dipping time of 60 seconds) were compared in order to get a suitable microfilter for rural area. The result showed that coated microfilter with dipping time of 2 seconds provide the higher particle, yeast and bacteria rejection than ordinary microfilter at nearly the same flux. In addition, the characteristic of improved microfilter was surface filter.

Department...Chemical engineering.....Student's signature.....

Field of study. Chemical engineering.....Advisor's signature.....

Academic year...2001.....Co-advisor's signature.....

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้ได้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความช่วยเหลือของรองศาสตราจารย์ ดร.จิรกานต์ เมืองนาโพธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คุณสรินทร์ ลิ้มปนาท อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม คุณสุรศักดิ์ ไวยวงค์สกุล ศ.ดร.วิวัฒน์ ตันตะพานิชกุล ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุทธิชัย อัสสะบำรุงรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ประเสริฐ ภวสันต์ และอาจารย์ท่านอื่นๆ ที่ได้ให้ความคิดเห็นและข้อคิดในการทำวิทยานิพนธ์ ด้วยดีตลอดมา จึงขอกราบขอบพระคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบคุณบริษัท T.C Filter โดยคุณชนพงษ์ พันธวงค์ภักดี ที่เอื้อเฟื้อให้กรองเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณคุณศรีไฉล ขุนทน คุณกฤษณา ศิริเลิศมุกด คุณปราณี รัตนวลีดิโรจน์ คุณวีระ ชูกระชั้น จากสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ รวมถึงสารเคมีในการทำวิจัย และเจ้าหน้าที่ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ในการทำวิจัย

ขอขอบคุณภาควิชาวัสดุศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อให้ใช้เตาเผาเซรามิกในการทำวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณประพันธ์ คุ่มภัย จากศูนย์พัฒนาและบริการเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ช่วยเหลือในการดัดแปลงปั๊มให้หมุนได้ด้วยแรงจักรยานสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณอาจารย์ พี่ๆ น้องๆ ห้องวิจัยชีวเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ได้ช่วยเหลือและให้กำลังใจในการทำวิจัยนี้

ท้ายนี้ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดา ซึ่งคอยให้กำลังใจและสนับสนุนผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย).....	ง
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ).....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญรูป.....	ญ
<b>บทที่</b>	
1 บทนำ.....	1
วัตถุประสงค์.....	2
ขอบเขตงานวิจัย.....	2
2 การสำรวจเอกสาร	
เยื่อแผ่น.....	4
กระบวนการโซล-เจล.....	7
การเคลือบ.....	10
3 ทฤษฎี	
ตัวรองรับ.....	15
เยื่อแผ่น.....	16
โซล.....	22
เจล.....	25
ทฤษฎีโซล-เจล.....	26
การขึ้นรูปด้วยวิธีการจุ่ม (Dipping).....	32
การอบแห้ง.....	33
การเผา.....	34
ทฤษฎีการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน.....	36

## สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4	อุปกรณ์และวิธีการทดลอง
	<ul style="list-style-type: none"> <li>อุปกรณ์และสารเคมี..... 41</li> <li>วิธีการทดลอง..... 42</li> <li>ศึกษาลักษณะของไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ..... 42</li> <li>การเตรียมสารละลายโซเดียมซิติลิกेट..... 42</li> <li>ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดที่ใช้กับค่าความเป็นกรดเบส..... 42</li> <li>ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารที่ใช้กับเวลาในการเกิดเจล..... 42</li> <li>ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความหนืด..... 44</li> <li>ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เติมลงไปกับความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป..... 44</li> <li>ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของโซลต่อความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป..... 44</li> <li>ศึกษาถึงลักษณะของอนุภาคของโซลที่เคลือบบนเยื่อแผ่นด้วยวิธีการจุ่ม (Dip Coating)..... 45</li> <li>ศึกษาสมบัติการกรองของไส้กรองที่เคลือบ..... 46</li> </ul>
5	ผลการทดลอง วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ลักษณะของไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ..... 48</li> <li>ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับค่าความเป็นกรดเบส..... 49</li> <li>อิทธิพลขององค์ประกอบในสารละลายต่อเวลาในการเกิดเจล..... 51</li> <li>ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับเวลาที่จะทำให้เกิดเจลและขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไป..... 53</li> <li>ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ขนาดรูพรุนและลักษณะของผิวหน้าเยื่อแผ่น..... 56</li> <li>สมบัติการกรองของไส้กรองชนิดต่างๆ..... 66</li> </ul>
	สรุปผลการทดลอง..... 72
	รายการอ้างอิง..... 74
	ภาคผนวก..... 77
	ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... 84



## สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	แสดงปริมาณ $r_w$ และ $r_H$ ที่มีผลต่อขนาดของซิลิกา (Naito, 1997).....	10
2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมซิลิเกตและกรดกับเวลาในการเกิด เจล.....	14
4.1	แสดงค่าสัดส่วนโมลของน้ำต่อโมลของ $Na_2SiO_3$ ( $R_w$ ) ที่ความเข้มข้นของ $Na_2SiO_3$ (%โมลต่อปริมาตร) และสัดส่วนโมลของกรดต่อโมลของ $Na_2SiO_3$ ( $R_a$ ) ต่างๆ.....	43
5.1	แสดงปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับค่า $R_a$ และค่าความเป็นกรดเบสที่วัดได้ .....	50
5.2	แสดงค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำที่เติมลงไปที่สารตั้งต้น ปริมาณ 20 มิลลิลิตร.....	55
5.3	แสดงการเปรียบเทียบระหว่างค่าการกักเก็บอนุภาค ยีสต์และเชื้อแบคทีเรียเมื่อ ใช้ใส่กรองต่างชนิดกัน.....	69
5.4	แสดงค่าการกักเก็บของสารที่ภาวะต่างๆของไส้กรอง.....	73

## สารบัญรูป

รูป		หน้า
2.1	แสดงขั้นตอนการผลิตซิลิกาที่มีรูพรุน.....	7
2.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความหนืด.....	9
2.3	แสดงขั้นตอนการผลิตเยื่อแผ่นซิลิกา.....	11
2.4	แสดงรูปร่างของซิลิกาในช่วงกรดและเบส.....	12
3.1	แสดงการแบ่งชนิดของเยื่อแผ่นตามโครงสร้าง.....	16
3.2	แสดงลักษณะของเยื่อแผ่นอสโมมาตรและเยื่อแผ่นสมมาตร.....	18
3.3	แสดงโครงสร้างของเยื่อแผ่นเซรามิกส์.....	18
3.4	แสดงการเตรียมเยื่อแผ่นเซรามิกโดยวิธี PMU และ DCS ซึ่งอาจจะผลิตฟิล์มเฉพาะชั้นผิวที่ไม่มีชั้นรองรับหรือเคลือบบนชั้นรองรับ.....	23
3.5	แสดงการเกิดพอลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกาที่มีการเกาะตัวกันเป็นโครงข่าย.....	24
3.6	ผลของค่าความเป็นกรดเบสต่อระบบคอลลอยด์ซิลิกากับน้ำ (colloidal silica-water system).....	25
3.7	การเกิดพันธะของโครงสร้างภายในระหว่างอนุภาคของซิลิกา.....	28
3.8	แสดงถึงลักษณะการเกาะตัวกันของซิลิกา.....	29
3.9	แสดงการขั้นตอนการเคลือบเยื่อแผ่นบนตัวรองรับด้วยวิธีการจุ่ม.....	32
3.10	แสดงชนิดของการเผาแบบต่างๆ.....	35
3.11	แสดงตัวอย่างโมเลกุลหรืออนุภาคที่สามารถแยกโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นซึ่งมีผลต่างของความดันเป็นแรงขับเคลื่อน.....	36
3.12	แสดงการเปรียบเทียบการกรองแบบไหลตั้งฉากและแบบไหลขนาน.....	37
3.13	แสดงลักษณะการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดต่างๆกันเทียบกับขนาดตัวถูกละลาย.....	40
4.1	อุปกรณ์การเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม.....	45
4.2	อุปกรณ์ในล้างชิ้นงานให้ได้ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 7.....	46
4.3	เครื่องกรองต้นแบบ.....	47
4.4	ปั๊มจักรยาน.....	47
5.1	แสดงภาพจาก SEM ของไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ.....	48

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
5.2	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่เติมในสารละลายกับค่าความเป็นกรดเบสที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ 0.0143 เปอร์เซ็นต์โดยโมลต่อปริมาตร.....	51
5.3	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ (%SiO <sub>2</sub> ) กับเวลาในการเกิดเจล (T <sub>g</sub> ).....	52
5.4	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ค่า R <sub>g</sub> เท่ากับ 5, 6, และ 7 ที่ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.025% โดยโมลต่อปริมาตร.....	54
5.5	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เติมลงไปกับความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป.....	55
5.6	รูปแสดงขนาดอนุภาคของโซลในสารละลายโซลที่ความหนืดต่างๆกัน.....	56
5.7	แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 2 วินาที.....	57
5.8	แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 15 วินาที.....	58
5.9	แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 60 วินาที.....	59
5.10	แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 2 นาที.....	60
5.11	แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 5 นาที.....	61
5.12	กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับความพรุนตัวและความหนาแน่นของไส้กรอง.....	62
5.13	แสดงการเปรียบเทียบของปริมาตรรูพรุนตามขนาดรูพรุนของไส้กรองที่ภาวะต่างๆ.....	63
5.14	แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงที่รูพรุนมีขนาด 0.0065 ถึง 0.01 ไมโครเมตร.....	63
5.15	แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงที่รูพรุนอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 1 ไมโครเมตร.....	64
5.16	แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงขนาดรูพรุนเท่ากับ 1 ถึง 10 ไมโครเมตร.....	65

### สารบัญรูป (ต่อ)

รูป		หน้า
5.17	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่เวลาในการเคลือบ 0 วินาที 2 วินาที 60 วินาที และ 60 นาที.....	65
5.18	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับเวลาโดยใช้ได้กรองชนิดต่างๆ.....	66
5.19	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำบาดาลกับเวลาโดยใช้ได้กรองชนิดต่างๆ.....	67
5.20	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของเชื้อ <i>Alcaligenes eutrophus</i> NCIMB 11599 กับเวลาโดยใช้ได้กรองชนิดต่างๆ.....	68
5.21	แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของยีสต์กับเวลาโดยใช้ได้กรองที่ภาวะต่างๆ.....	68
5.22	แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์การกรองของสารต่างชนิดกันโดยใช้ได้กรองต่างๆ.....	69
5.23	แผนภูมิแสดงค่าการกักเก็บได้กรองที่ภาวะต่างๆ.....	71

# บทที่ 1

## บทนำ

น้ำเป็นสิ่งจำเป็นอย่างหนึ่งในการดำรงชีวิต น้ำที่มีการใช้อยู่แบ่งเป็นน้ำที่ใช้สำหรับการอุปโภคและน้ำที่ใช้ในการบริโภค น้ำทั้งสองประเภทจะต้องมีความสะอาดตามมาตรฐานของกรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม กระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม การผลิตน้ำที่สะอาดที่นิยมใช้กันมากตามบ้านเรือนคือการกรองด้วยเครื่องกรองที่มีไส้กรองเซรามิกส์ เครื่องกรองน้ำที่ผลิตอยู่มีหลายประเภทด้วยกันโดยแบ่งตามลักษณะของไส้กรอง ไส้กรองที่ทำจากสารเซรามิกส์ จะมีความคงทนต่อความดันและใช้ได้นาน ในปัจจุบันได้มีการนำเครื่องกรองชนิดนี้ออกมาใช้อย่างแพร่หลายมากขึ้น โดยใช้ในบ้านเรือนจนถึงระดับอุตสาหกรรม

ไส้กรองเซรามิกส์ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปจะมีการกระจายขนาดของรูพรุนกว้างตลอดความหนาของไส้กรอง ดังนั้นไส้กรองชนิดนี้จะต้องมีความหนาของไส้กรองมากจึงจะกรองอนุภาคได้ดี แต่ทำ ความสะอาดได้ยาก เนื่องจากมีอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุนติดอยู่ภายในไส้กรอง แต่ถ้าเราสามารถสร้างเยื่อแผ่นเคลือบบนชั้นรองรับทำให้รูพรุนที่ผิวของไส้กรองมีขนาดเล็กลง จะทำให้สามารถกักเก็บอนุภาคได้มากขึ้นและการที่อนุภาคเกาะติดอยู่ที่ผิว เรายังสามารถที่จะทำความสะอาดออกได้ง่าย

ชั้นเยื่อแผ่นเป็นชั้นที่ใช้สำหรับการคัดแยกขนาดอนุภาค โดยอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะสามารถผ่านรูพรุนไปได้ และอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นก็จะไม่สามารถผ่านรูพรุนไปได้ ชั้นเยื่อแผ่นสามารถผลิตได้จากการเคลือบตัวรองรับด้วยสารประเภทเซรามิกส์ที่เรียกว่า “ สารละลายซิล ” ที่มีขนาดประมาณ 1 – 5 ไมโครเมตร สารละลายซิลที่ทำขึ้นสามารถทำได้จากสารหลายชนิด แต่ที่มีใช้กันอยู่ทั่วไปจะมีอยู่ 2 ชนิดด้วยกันคืออลูมินาซิล และซิลิกาซิล เราจะเลือกใช้ซิลิกาซิลจากสารละลายซิลเดี่ยวมซิลิเกต เนื่องจากสารละลายซิลเดี่ยวสามารถผลิตได้จากซีเถ้าของแกลบซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งที่มีอยู่มากในประเทศไทย นอกจากนี้ซิลิกาซิลยังสามารถผลิตได้จาก TEOS, TMOS แต่มีราคาแพงมาก อนุภาคของสารละลายซิลจะมีขนาดเล็ก เมื่อนำไปเคลือบแล้วอนุภาคของสารละลายซิลจะซึมเข้าไปในรูพรุนของไส้กรอง ทำให้รูพรุนของไส้กรองมีขนาดเล็กลง

ในงานวิจัยนี้จึงมีแนวความคิดว่าการพัฒนาไส้กรองเซรามิกส์ในปัจจุบันควรลดความหนาไส้กรองเพื่อลดความต้านทานการกรองอีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณสารที่ใช้ในการผลิตไส้กรองลงด้วยและควรปรับปรุงรูพรุนที่ผิวหน้าของไส้กรองให้มีขนาดเล็กลง โดยการเคลือบด้วยสารละลายซิลิกาซิล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาค ไส้กรองที่เตรียมได้จะนำมากรองสาร

แขวนลอยขนาดต่างๆกันโดยอาศัยปั๊มจักรยานเป็นแรงขับ เพื่อให้เหมาะกับชนบทที่ยังไม่มีไฟฟ้า และเป็นการส่งเสริมให้ชาวบ้านได้ออกกำลังกายอีกด้วย

### วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงการเคลือบตัวรองรับเพื่อให้ได้ชั้นเยื่อแผ่นที่ได้จากสารซิลิกา
2. เพื่อเปรียบเทียบสมบัติของไส้กรองที่มีชั้นเยื่อแผ่นที่เตรียมได้กับไส้กรองที่ยังไม่ได้เคลือบชั้นเยื่อแผ่น
3. เพื่อศึกษาถึงประสิทธิภาพการกรองสารแขวนลอยขนาดต่างๆด้วยไส้กรองที่ผลิตขึ้นโดยมีปั๊มจักรยานเป็นแรงขับ

### ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาถึงสมบัติต่างๆของชั้นตัวรองรับคือ
  - 1.1 ฟลักซ์ของน้ำกลั่น (Flux)
  - 1.2 ความพรุนตัว (Porosity)
  - 1.3 ขนาดรูพรุน (Pore size)
  - 1.4 ค่าการกักเก็บ (Rejection)
2. ใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตจากซีเมนต์แล้วกลายเป็นสารตั้งต้นเพื่อทำสารละลายโซล ปัจจัยที่ศึกษาคืออัตราส่วนของโซเดียมซิลิเกต กรดซัลฟิวริกและน้ำที่มีผลต่อเวลาในการเกิดเจลและความหนืดเพื่อให้ได้สารละลายโซลที่มีความเสถียร (Stable Sol)
3. เคลือบสารละลายโซลที่ได้บนตัวรองรับโดยใช้วิธีจุ่ม (Dipping) ปัจจัยที่ศึกษาคือ
  - 3.1 ระยะเวลาในการจุ่ม
4. ศึกษาสมบัติของไส้กรองที่ทำขึ้น
  - 4.1 ขนาดรูพรุน
  - 4.2 ความพรุนตัว
  - 4.3 ความหนา

5. ศึกษาการกรองสารแขวนลอยที่มีขนาดต่างๆกันคือน้ำบาดาล ยีสต์และเชื้อ

*Alcalirenes eutrophus* NCIMB 11599

5.1 พลั๊กซ์ของน้ำ

5.2 ค่าการกักเก็บ

6. ใช้ปั๊มจักรยานเป็นแรงขับ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 2

### การสำรวจเอกสาร

#### เยื่อแผ่น

Xia Changrong และคณะ(1995) ได้ทำการศึกษากการสร้างเยื่อแผ่น 2 ชั้นด้วยกระบวนการไฮดรอลิก-เจด บนตัวรองรับที่มีขนาดรูพรุน 0.9 ไมโครเมตร วิธีการเตรียมสารละลายไฮดรอลิก เรียกว่า “การไฮดรอลิซิสของอะลูมิเนียมไตรเซตบิวทอกไซด์” คือ นำเอาสารอะลูมิเนียมไตรเซตบิวทอกไซด์มาผสมกับน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสพร้อมกับทำการกวนไปด้วย เติมนกรดไนตริกลงไปเพื่อให้เกิดเป็นแอลกอฮอล์ เปิดฝาให้แอลกอฮอล์ระเหยระยะหนึ่ง จากนั้นทำการรีฟลักซ์ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 16-20 ชั่วโมงจนได้สารละลายไฮดรอลิก ในกรณีที่ศึกษาเฉพาะเยื่อแผ่นที่ไม่มีตัวรองรับนำสารละลายไฮดรอลิกที่ได้ไปเคลือบลงบนแผ่นกระจก ทิ้งไว้ให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำไปเผาที่อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสแล้วจึงทิ้งไว้ 10 ชั่วโมง ในกรณีที่เคลือบบนตัวรองรับ นำเอาตัวรองรับมาจุ่มลงในสารละลายไฮดรอลิกเป็นเวลา 2-3 วินาที แล้วปล่อยให้แห้งที่อุณหภูมิห้อง นำไปเผาที่อุณหภูมิเดียวกัน แล้วนำไปทดสอบหาขนาดรูพรุน จะได้ตัวรองรับที่มีรูพรุนขนาด 0.9 ไมโครเมตร และเยื่อแผ่นมีรูพรุนขนาด 0.15 ไมโครเมตร นำไปหาขนาดของโมเลกุลที่สามารถแยกได้ (Molecular Weight Cut-off) โดยใช้โพลีเอทิลีนไกลคอล ที่น้ำหนักโมเลกุลต่างกัน ความเข้มข้น 5%โดยน้ำหนักและความดัน 0.12 เมกกะปาสคาล พบว่าความหนืดของสารละลายไฮดรอลิกจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นและค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ขณะที่รูปร่างและขนาดของอนุภาคในสารละลายไฮดรอลิกจะขึ้นกับค่าความเป็นกรด-ด่าง ความหนาและลักษณะของพื้นผิวของเยื่อแผ่นจะมีผลมาจากเวลาในการจุ่ม ความหนืดของสารละลายไฮดรอลิกและอุณหภูมิในการเผา

สิทธิพันธ์(1995) ได้ศึกษาวิธีการผลิตตัวกรองเซรามิกชนิดไฮดรอลิกสำหรับการแยกทางชีวภาพ โดยตัวกรองประกอบด้วย 3 ชั้นคือชั้นตัวรองรับ ชั้นมัธยันตร์ และชั้นเยื่อแผ่น สภาวะและองค์ประกอบที่เหมาะสมในการเตรียมชั้นรองรับคือ อะลูมินา 55.55 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ตัวประสาน 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของของแข็ง และสารช่วยซินเทอร์ 0.683 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของของแข็ง แล้วนำไปซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1300 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากนั้นชั้นรองรับจะถูกเคลือบด้วยอะลูมินาชนิดพิเศษเพื่อสร้างชั้นมัธยันตร์ ชั้นมัธยันตร์ที่เคลือบตัวกรองประกอบด้วยอะลูมินาชนิด เอ16เอสจี โพลีไวนิลแอลกอฮอล์ กรดไฮโดรคลอริก สารป้องกันการเกิดฟอง แล้วนำไปซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำชั้นเยื่อแผ่นด้วยกระบวนการไฮดรอลิกโดยวิธีจุ่ม โดยไฮดรอลิกเกิดจากปฏิกิริยาระหว่างอะลูมินาเซคคันดา



รีปิวทอกไซด์ น้ำและกรดไนตริกในอัตราส่วน 1 : 100 : 0.07 ตามลำดับที่อุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส แล้วนำไปซินเทอร์ที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที พบว่าได้ขนาดรูพรุนของตัวรองรับ 0.9 ไมโครเมตร ชั้นมัธยันตร์ 0.12 ไมโครเมตรและชั้นเยื่อแผ่น 0.01 ไมโครเมตร และได้คาร์บอน 82.5 เปอร์เซ็นต์ ของชั้นมัธยันตร์ 95 เปอร์เซ็นต์ และของเยื่อแผ่น 100 เปอร์เซ็นต์

Avci GG และคณะ(1996) ได้ศึกษาการนำเอาอะลูมินาชนิดแอลคอลล เอ-16 เอสจี มาใช้ในการสร้างตัวรองรับของเยื่อแผ่น โดยงานวิจัยนี้จะทำการเปรียบเทียบการใช้อะลูมินาที่ต่างชนิดกันทั้งทางด้านกายภาพและทางด้านเคมี งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ Seydisehir alumina จากกระบวนการไบเยอร์ และทำเป็นเม็ดเล็กๆโดยการใช้เครื่องอบแห้งแบบสเปรย์ (Spray dryer) ซึ่งมีขนาดของรูพรุนของเยื่อแผ่นที่ได้ จะมีขนาดใหญ่

DASและคณะ(1996) ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นรูปร่างกลมที่มีความหนา 0.3-0.8 มิลลิเมตร เส้นผ่านศูนย์กลาง 25-30 มิลลิเมตร โดยใช้วิธีการรีด (Tape-casting) ได้ขนาดของรูพรุนอยู่ในช่วง 0.1-0.7 ไมโครเมตร และมีความพรุนตัวประมาณ 25%-55% ภายใต้เงื่อนไขที่เหมาะสม ตัวแปรที่สำคัญของขนาดรูพรุนคือขนาดอนุภาคเริ่มต้นที่นำมาใช้ โดยอุณหภูมิและเวลาที่อุณหภูมิคงที่ (soaking time) ในการเผาจะเป็นตัวแปรในการหาค่าความพรุนตัวของเยื่อแผ่น ผลการกรองของน้ำภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดจะอยู่ในช่วง 110-900 ลิตร/เมตร<sup>2</sup> ชั่วโมง ซึ่งขึ้นกับความพรุนตัว ขนาดของรูพรุนและความหนาของเยื่อแผ่น โดยเยื่อแผ่นส่วนใหญ่ที่ได้จะมีขนาดของรูพรุนน้อยกว่า 0.5 ไมโครเมตร เหมาะสำหรับการกรองเอาแบคทีเรียออกจากน้ำ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้เมื่อนำไปล้างกับกรดหรือการฆ่าเชื้อด้วยความร้อน

Yongan Yanและคณะ(1996) ได้ศึกษาคุณสมบัติของแผ่นฟิล์มบางจำนวนมากที่ทำจากไทเทเนียมบนตัวรองรับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่ทำจากซิลิกาโดยใช้กระบวนการโซล-เจลด้วยวิธีจุ่ม (dipping) สารที่ใช้ประกอบด้วย เตตระเอทิล ออโตซิลิเกต(TEOS) 0.04 โมลของแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ 2.45โมลของน้ำ 14 โมล เอทิลแอลกอฮอล์ นำไปผสมกันที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ในเอทิลีน ไกลคอล เป็นเวลา 30 นาที แล้วเติม TEOS 0.7 โมล ทิ้งไว้ทำปฏิกิริยาเป็นเวลามากกว่า 15 ชั่วโมง แล้วนำไปเคลือบที่เวลาต่างๆ นำไปเผาที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส จะได้ความพรุนมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ความหนาที่มากที่สุดสำหรับตัวรองรับที่เป็นซิลิกา คือ 31.3 นาโนเมตร

วีรวรรณ(1996) ได้ศึกษาการเตรียมตัวกรองอลูมินาโดยใช้กระบวนการโซลเจลเพื่อใช้ในการแยกแอมโมเนียมไนเตรตจากสารละลาย โดยสารละลายโซลเจลเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างอะลูมิเนียมเซคันดารีบิวทอกไซด์ น้ำและกรดไนตริกที่อุณหภูมิ 80-85 องศาเซลเซียส ในอัตราส่วน 1 : 100 : 0.07 โดยโมลตามลำดับ สารละลายโซลเจลที่ได้จะถูกนำไปเคลือบบนตัวกรองเป็นเวลา 10 วินาที ด้วยวิธีจุ่ม (Dipping) จากนั้นเผาตัวกรองที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 30 นาที แล้วทำการเคลือบอีกชั้นหนึ่ง ตัวกรองที่เคลือบสองชั้นจะได้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุน 73.9 อังสตรอม ปริมาตรรูพรุน 0.1322 ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม และความพรุนตัว 48.04 เปอร์เซ็นต์ ตัวกรองอะลูมินาที่ผลิตได้กักเก็บโพลิไวนิลแอลกอฮอล์ 0.2 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักได้

4

4

9

เปอร์เซ็นต์

De VosและVerweij(1998) ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นซิลิกา 2 ชั้นบนเยื่อแผ่นอัลฟาอลูมินา พบว่าเยื่อแผ่นซิลิกาที่ได้มีความหนาสูงสุด 30 นาโนเมตร และมีรูพรุนขนาด 5 อังสตรอม ในการเตรียมสารละลายโซล เจลเริ่มจากเตรียมสารละลายโซลเจลมาตรฐาน โดยมีอัตราส่วนของ TEOS:EtOH:H<sub>2</sub>O:กรด เท่ากับ 1:3.8:6.4:0.085 นำไปเจือจางด้วยแอลกอฮอล์ปริมาณ 19 เท่า ก่อนที่จะนำมาเคลือบ

Caro และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาถึงการพัฒนาเยื่อแผ่นเซรามิกด้วยการทำ 3 วิธีคือ

1. ใช้ TEOS เป็นเยื่อแผ่นต่อจากเยื่อแผ่นแกมมาอลูมินา จะได้เยื่อแผ่นที่ไม่ดูดน้ำ
2. ใช้ปฏิกิริยา silylation บนเยื่อแผ่นแกมมาอลูมินา จะได้เยื่อแผ่นที่ไม่จับสารอินทรีย์ และจะมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่ม Si-OH เข้าไปด้วย
3. ใช้สารประเภทอัลคิลหรืออาริลของกรดฟอสฟอนิก ทำปฏิกิริยากับแกมมาอลูมินา จะได้ Al-phosphonates ประสิทธิภาพจะดีขึ้นถ้าใช้ PPA

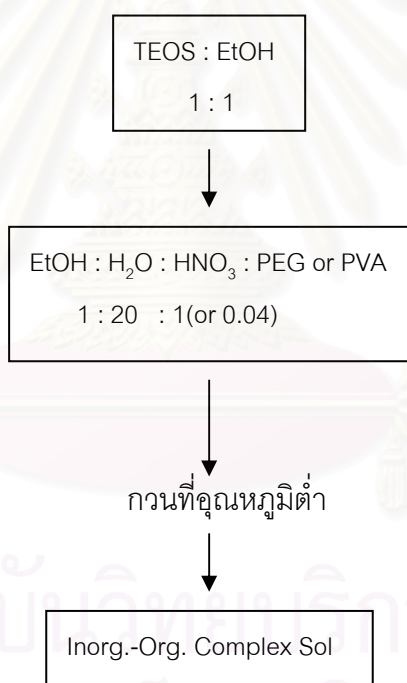
Kajiharaและคณะ (1998) ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นจากไททานเนียมโดยวิธีโซล-เจล โดยศึกษาถึงปริมาณของโพลิเอทิลีนไกลคอล, ความเร็วและอุณหภูมิในการจุ่ม พบว่าลักษณะของเยื่อแผ่นไททานเนียมจะเปลี่ยนแปลงไปตามปริมาณสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

Liu และ Azer (1998) ได้ศึกษาการเชื่อมต่อกันของสารเซรามิก เมื่อเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์และ TPM ลงในสารละลายโซล พบว่าความหนาแน่นเพิ่มขึ้นจาก 71.8% ถึง 77.5% และขนาดอนุภาคลดลงจาก 0.5-0.15 ไมโครเมตร

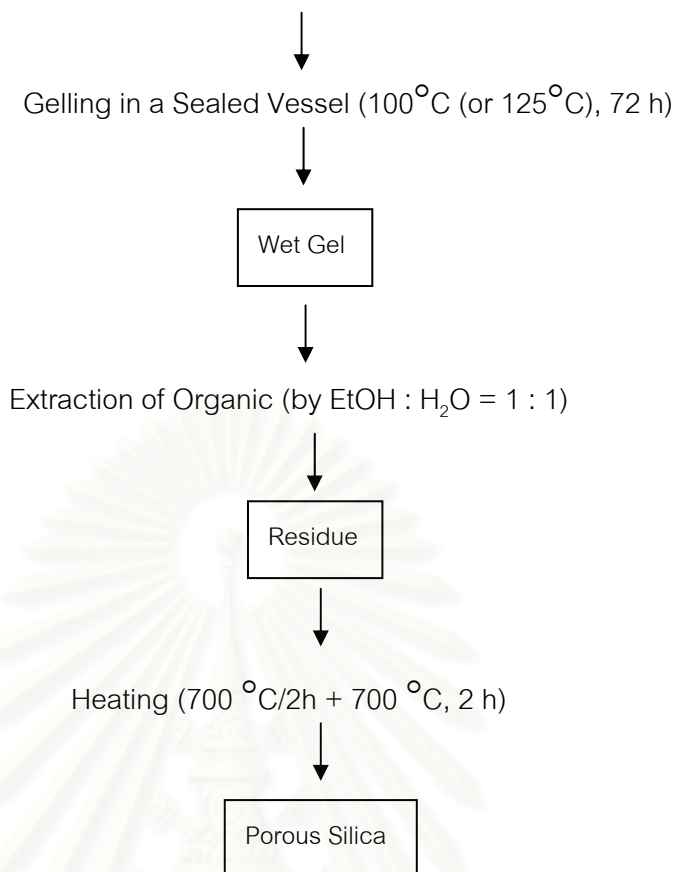
De Vos และคณะ (1999) ได้ศึกษาสมบัติการไม่ดูดนํ้า (hydrophobicity) ของเยื่อแผ่นซิลิกา โดยใช้ TEOS เป็นสารตั้งต้นในการผลิตสารละลายไฮโดรเจล และใช้วิธีจุ่มในการเคลือบเยื่อแผ่นบนตัวรองรับที่เป็นแกมมาอะลูมินา สารละลายไฮโดรเจลที่เตรียมได้จะนำไปเจือจางด้วยแอลกอฮอล์ปริมาณ 19 เท่าก่อนที่จะนำไปทำการเคลือบ พบว่าเมื่อเคลือบ 2 ชั้นแล้ว จะได้ความหนาของเยื่อแผ่นเท่ากับ 60 นาโนเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเท่ากับ 0.7 นาโนเมตร และมีสมบัติไม่ดูดนํ้าเพิ่มขึ้น

### กระบวนการโซล-เจล

Yoshiro Moriya และคณะ (1995) ได้ทำการผลิตซิลิกาที่มีรูพรุน ด้วยวิธีโซล-เจลโดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 4 นาโนเมตร ซึ่งมีขั้นตอนในการผลิตตามรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงขั้นตอนการผลิตซิลิกาที่มีรูพรุน (Yoshiro, 1995)

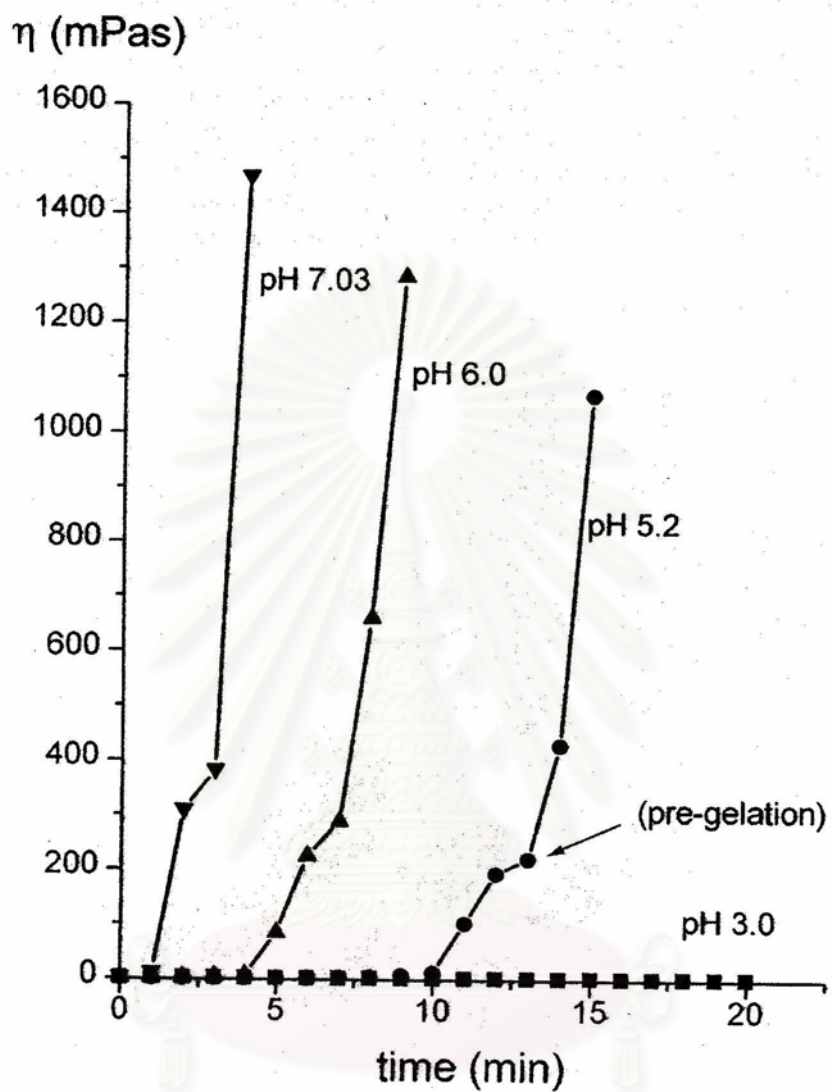


รูปที่ 2.1(ต่อ) แสดงขั้นตอนการผลิตซิลิกาที่มีรูพรุน (Yoshiro, 1995)

ซิลิกาที่มีรูพรุนที่ได้ มีรูพรุนเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 3 นาโนเมตร และมีการกระจายของรูพรุนในวงแคบ

Einarsrud และ Nilsen (1998) ได้ศึกษาความแข็งแรงของเจลที่ได้จากโซเดียมซิลิเกตและจาก TEOS ที่มีขนาด 3 และ 6 นาโนเมตร พบว่าเจลที่ได้จากโซเดียมซิลิเกตจะมีความแข็งแรงมากกว่าเจลที่ได้จาก TEOS 10 เท่า

Marx และคณะ (1998) ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะของโซลที่ได้จากซิลิกาที่มีค่าความเป็นกรดเบสประมาณ 3-7 โดยใช้ TEOS เป็นสารตั้งต้น จะได้ว่าเมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง จะเกิดเป็นเจลตันที่ตามรูปที่ 2.2 และพบว่าเวลาในการเกิดเจลจะขึ้นกับค่าความเป็นกรดเบส และอุณหภูมิ โดยเวลาในการเกิดเจลจะสามารถหาได้จากกราฟระหว่างความหนืดกับเวลาตามรูปที่ 2.2 ความหนืดจะไม่ขึ้นกับค่าแรงเฉือนและถ้าต้องการเพิ่มความหนืด ต้องเติมไฮดรอกซีโพรพิลเซลลูโลส เพื่อควบคุมความหนาของ เยื่อแผ่นทั้งการเคลือบแบบต่อเนื่องและแบบจุ่ม



รูปที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความหนืด (Marx, 1998)

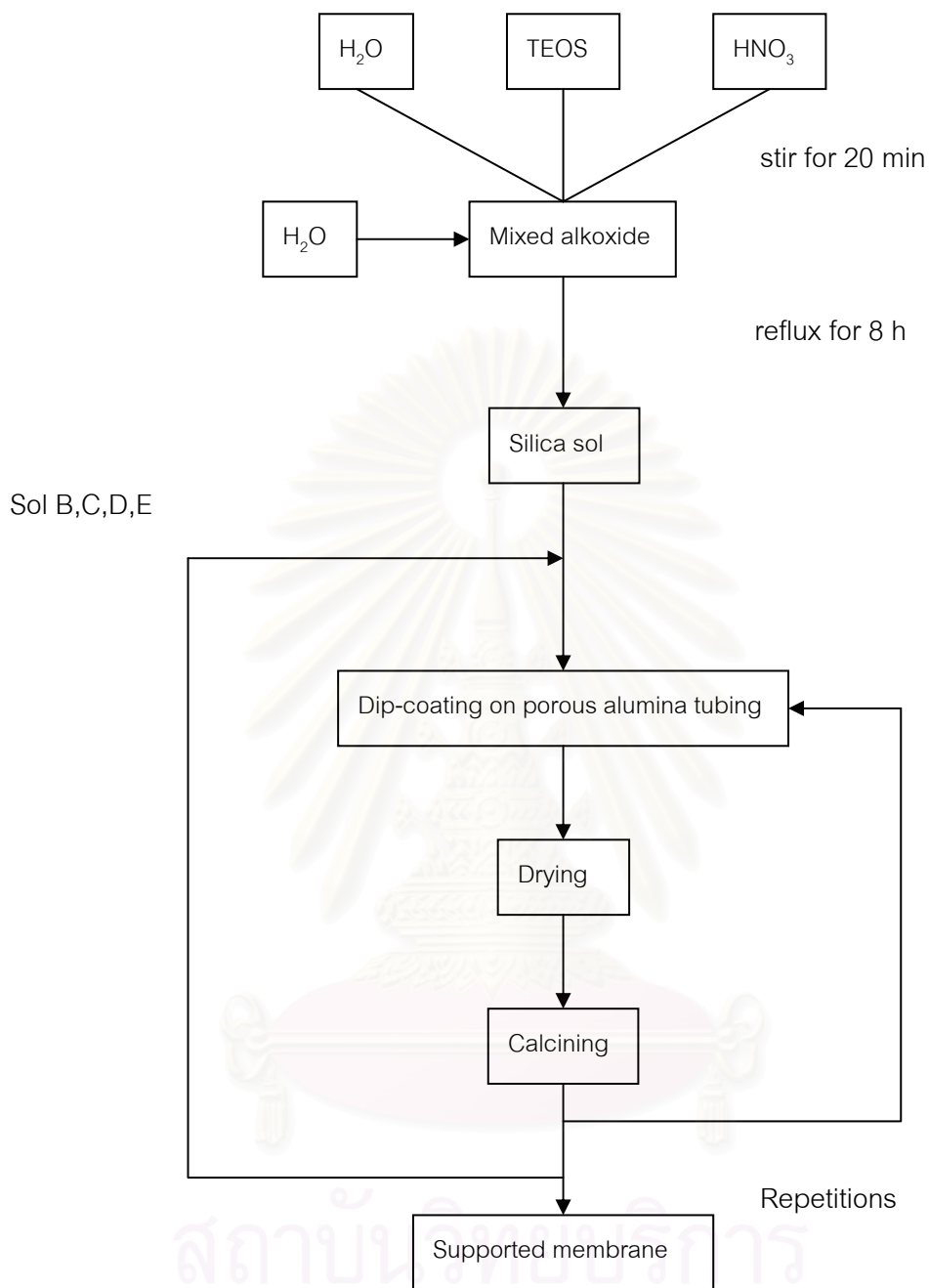
## การเคลือบ

Naito และคณะ (1997) ได้ศึกษาอัตราส่วนของสารตั้งต้นในการผลิตเยื่อแผ่นซิลิกาด้วยวิธีโซล-เจล โดยใช้อัลฟาลูมินาเป็นตัวรองรับ มี TEOS เป็นสารตั้งต้นและใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ศึกษาถึงความแตกต่างของอัตราส่วนของน้ำต่อ TEOS ( $r_w$ ) และ กรดต่อ TEOS ( $r_H$ ) ใช้วิธีจุ่มในการเคลือบเยื่อแผ่น โดยจะมีขั้นตอนการเตรียมตามรูปที่ 2.3

ก่อนที่จะนำมาทำการจุ่ม เมื่อเตรียมสารละลายโซลแล้ว จะนำไปเจือจางด้วยน้ำก่อน จะได้ว่าถ้า  $r_w$  และ  $r_H$  เพิ่มขึ้นจะทำให้ขนาดของซิลิกามีขนาดลดลงดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงปริมาณ  $r_w$  และ  $r_H$  ที่มีผลต่อขนาดของซิลิกา (Naito, 1997)

Sol	TEOS mol (mol ratio: X/TEOS)	H <sub>2</sub> O mol ( $r_w$ )	HNO <sub>3</sub> (1 N) mol ( $r_H$ )	$D_p$ nm
A	0.096 (1.0)	0.56 (5.8)	0.008 (0.083)	18.9
B	0.048 (1.0)	1.1 (22.9)	0.008 (0.17)	13.4
C	0.024 (1.0)	1.4 (58.3)	0.008 (0.33)	6.2
D	0.024 (1.0)	1.4 (58.3)	0.016 (0.67)	4.0
E	0.024 (1.0)	1.4 (58.3)	0.032 (1.33)	<3.8



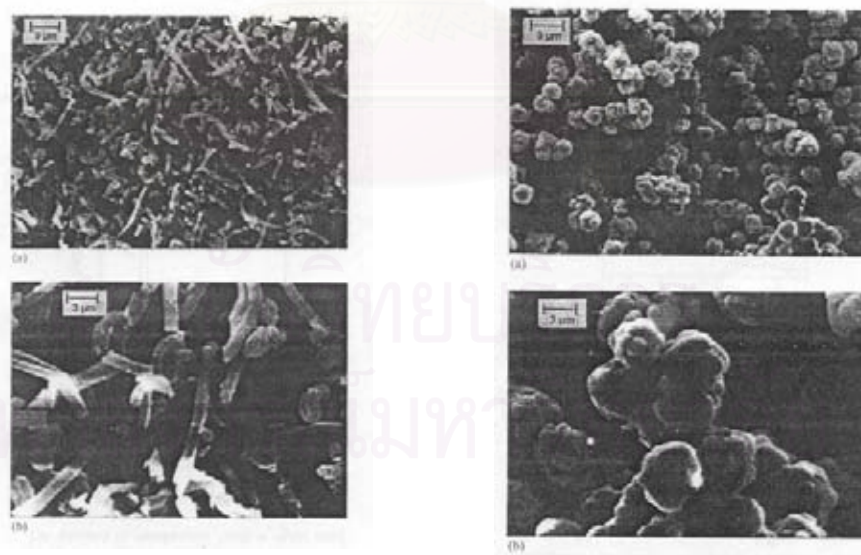
รูปที่ 2.3 แสดงขั้นตอนการผลิตเยื่อแผ่นซิลิกา (Naito, 1997)

Nikolic และ Radonjic (1997) ได้ศึกษาการเคลือบซิลิกาบนตัวรองรับที่เป็นอลูมินาเพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับตัวรองรับ พบว่าความแข็งแรงขึ้นกับลักษณะของโครงสร้างและการยึดเกาะกันของโมเลกุล เมื่อปรับค่าความเป็นกรดเบส และ ปริมาณน้ำ จะทำให้โครงสร้างของไฮลเจลเปลี่ยนแปลงไป

Tsai และคณะ (1999) ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นซิลิกาแบบ 2 ชั้น บนตัวรองรับที่เป็นแกมมาออกซิเดชันที่มีรูพรุนขนาด 20 อังสตรอม โดยมีอัตราส่วนของสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์:EtOH:H<sub>2</sub>O:HCl เท่ากับ 1:3.8:5:0.004 มีพีเอชเท่ากับ 4.7 และก่อนที่จะนำมาเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม จะนำไปเจือจางด้วย EtOH ปริมาณ 2 เท่าก่อน แล้วนำมาจุ่มเป็นเวลา 10 วินาที นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เมื่อเคลือบชั้นแรกแล้วจะมีรูพรุนขนาด 10-12 อังสตรอม และเมื่อเคลือบชั้นที่ 2 แล้วจะมีรูพรุนขนาด 3-4 อังสตรอม ความหนา 30 นาโนเมตร

Kumon และคณะ (2000) ได้ศึกษาการผลิตเยื่อแผ่นซิลิกาโดยวิธีโซล-เจล และเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม ซึ่งประกอบด้วย MTMS กรดไนตริก และ DMF พบว่าฟิล์มที่เกิดเร็วเกินไปจะทำให้การเคลือบไม่สม่ำเสมอและถ้าเพิ่มเวลาในการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลง

Schulz-Ekloff และคณะ (1998) ได้ศึกษาลักษณะของรูพรุนของซิลิกาที่มีรูพรุนขนาดใหญ่โดยการตกตะกอน MCM-41 ซึ่งจะเปลี่ยนแปลงตามค่าความเป็นกรดเบส การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดเบสควบคุมลักษณะของอนุภาค พบว่าลักษณะของอนุภาคในช่วงเบสจะมีรูปร่างเป็นทรงกลม และในช่วงกรดจะมีรูปร่างเป็นทรงรีคล้ายเม็ดข้าวตามรูปที่ 2.4



กรด

เบส

รูปที่ 2.4 แสดงรูปร่างของซิลิกาในช่วงกรดและเบส (Schulz-Ekloff, 1998)



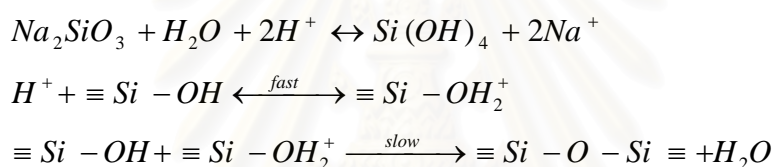
Venkateswars และคณะ (1998) ได้ศึกษาผลของอัตราส่วนของตัวกลางคือแอลกอฮอล์ และน้ำต่อ TEOS ต่อพื้นที่ผิวและความพรุนตัวของ TEOS พบว่า

1. ถ้าเพิ่ม EtOH/TEOS จะทำให้ค่าพื้นที่ผิว เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและความพรุนตัวเพิ่มขึ้น และจะได้ช่วงของรูพรุนที่แคบ ที่ค่า EtOH/TEOS เท่ากับ 6

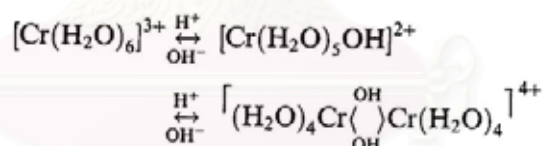
2. ถ้าเพิ่ม H<sub>2</sub>O/TEOS จะทำให้ค่าพื้นที่ผิว เส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนและความพรุนตัวเพิ่มขึ้น แต่ถ้ามากเกินไปก็จะทำให้ความพรุนตัวลดลงได้และจะได้ช่วงของรูพรุนที่แคบ ที่ค่า H<sub>2</sub>O/TEOS เท่ากับ 6

จะสามารถสรุปได้ว่าที่ค่า EtOH/TEOS ระหว่าง 4 ถึง 6 และ H<sub>2</sub>O/TEOS ระหว่าง 6 ถึง 9 จะทำให้ได้พื้นที่ผิวมาก ความพรุนตัวสูงและมีขนาดรูพรุนใหญ่

Godoi และคณะ (1999) ได้ศึกษาการผลิตอนุภาคของซิลิกาและซิลิกา-โครเมียม จากโซเดียมซิลิเกตด้วยวิธีโซล-เจล ในตัวกลางที่เป็นแอลกอฮอล์ โดยมีปฏิกิริยาในการเกิดโซล-เจลดังนี้



และจะอยู่ในรูปของเกลือโครเมียมดังสมการ



ตัวแปรที่สนใจคือค่าความเป็นกรดเบส ความเข้มข้น ตัวกลางและอุณหภูมิ เริ่มจากการเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตและสารผสมระหว่างแอลกอฮอล์กับโครเมียม นำสารทั้ง 2 ชนิดมาผสมกัน แล้วนำไปทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์เฟส จากผลการทดลองจะเห็นว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคประมาณ 0.05-0.2 ไมโครเมตร แล้วแต่ความแตกต่างของแอลกอฮอล์

Geddes และ Birch (2000) ได้ศึกษาขนาดของอนุภาคที่ได้จากวิธีโซล-เจล ด้วยแสงฟลูออเรสเซน (fluorescence) พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมซิลิเกตมีผลต่อปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (polymerization) ของเม็ดซิลิกาและมีผลต่อความหนืด ถ้าลดปริมาณโซเดียมซิลิเกตแต่ให้

ปริมาณกรดคงที่ที่มากเกินไปพอคงที่จะทำให้เวลาในการเกิดเจลนานขึ้น และถ้าเพิ่มปริมาณกรดแต่ให้ปริมาณโซเดียมซิลิเกตคงที่ จะทำให้เวลาในการเกิดเจลลดลงตามตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโซเดียมซิลิเกตและกรดกับเวลาในการเกิดเจล (Geddes, 2000)

Silicate		Acid		Flow rate (ml s <sup>-1</sup> )		Excess acid normality in sol-gel		Final % SiO <sub>2</sub> in sol-gel	t <sub>g</sub> (min)
Initial %	Initial °Tw	Initial %	Initial °Tw	Silicate	Acid	N	pH		
<i>System a</i>									
20.21	50	34	50.2	7.58	2.43	0.27	0.87	15.30	60-74
16.94	40	28	40	7.58	2.53	0.25	0.90	12.70	240-270
12.50	30	22	30	7.25	2.66	0.31	0.81	9.14	990-1050
8.62	20	15	20	6.76	2.92	0.30	0.82	6.02	2760-3240
<i>System b</i>									
20.07	50	30	45	7.81	2.60	0.21	0.98	15.13	77-96
19.79	50	34	50	8.62	2.75	0.37	0.73	15.00	68-74
19.81	50	40	60	8.20	2.55	0.60	0.52	14.97	47-55
20.81	50	42	65	6.76	2.58	1.40	0.15	14.81	13-16

SI conversion: Twaddle (°Tw) = 200 (density/g cm<sup>-3</sup> - 1).

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 3

### ทฤษฎี

#### ส่วนประกอบของไส้กรอง

ไส้กรองประกอบด้วยส่วนประกอบหลักๆดังนี้

1. ตัวรองรับ เป็นชั้นล่างสุดของไส้กรอง มีรูพรุนขนาดใหญ่ที่ให้ความแข็งแรงแก่เยื่อแผ่น
2. เยื่อแผ่น เป็นชั้นที่มีรูพรุนขนาดเล็ก ใช้ในการคัดแยกขนาดอนุภาค

#### ตัวรองรับ

ในการผลิตเยื่อแผ่นต่างๆ ไป เป็นการเคลือบสารละลายโพลีเมอร์หรือเจลของเซรามิกให้เป็นชั้นฟิล์มลงบนชั้นรองรับ เพื่อเสริมความแข็งแรงให้เยื่อแผ่น การที่ชั้นรองรับประกอบอยู่กับเยื่อแผ่นเสมือนแผ่นเดียวกัน เรียกว่ามีชั้นรองรับในตัว (Integral support) เยื่อแผ่นโพลีเมอร์ที่ไม่ได้คาสท์ (Cast) บนชั้นรองรับ แต่เมื่อใช้งานนำมาวางบนชั้นรองรับในกรณีนี้เรียกว่า ชั้นรองรับแบบแยกส่วน ชั้นรองรับของเยื่อแผ่นเซรามิกอาจผลิตจากวัสดุชนิดเดียวกับวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นเยื่อแผ่น แต่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า การเลือกชั้นรองรับมีความสำคัญมาก คืออาจมีผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของเยื่อแผ่นได้

ชั้นรองรับที่ดีต้องมีความแข็งแรงไม่ยุบตัวง่าย เกณฑ์ในการเลือกอื่น ๆ คล้ายกับเยื่อแผ่น คือต้องพิจารณาว่าไม่ชอบน้ำหรือชอบน้ำ มีความทนทานต่อสารเคมี มีความหนาสม่ำเสมอหาได้ง่ายและราคาไม่แพง เป็นต้น

การผลิตชั้นรองรับ วัสดุที่ใช้สำหรับผลิตชั้นรองรับได้แก่ ถ่าน อลูมินา และซิลิกา วัสดุที่เลือกต้องมีความพรุนตัวสูง แข็งแรงและสามารถยึดติดกับชั้นผิวได้ดี (วัสดุสำหรับ ชั้นรองรับ และชั้นผิวอาจเป็นชนิดเดียวกัน) วิธีการผลิตชั้นรองรับอาจใช้วิธีการอัด โดยนำผงวัสดุอนุภาคเล็ก ๆ มาเติมตัวประสาน (binder) และน้ำเพื่อให้เกาะตัว นำส่วนผสมไปอัดที่ความดันสูงในแบบที่เป็นรูปร่างตามต้องการแล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 1000-2000 องศาเซลเซียส ส่วนวิธีการขึ้นรูปโดยการอัดรีด มีการเตรียมส่วนผสมโดยนำผงวัสดุผสมกับน้ำปริมาณที่มากพอควร ให้ได้สารละลายแขวนลอย อาจต้องเติมตัวประสานแล้วนำมาขึ้นรูปเป็นรูปทรงตามต้องการ (เช่น เป็นท่อ) หลังจากนั้นปล่อยให้แห้งบางส่วนระเหย นำไปเผาที่ 1000-2000 องศาเซลเซียส

## เยื่อแผ่น

การแบ่งชนิดของเยื่อแผ่นสามารถแบ่งตามที่มาว่าได้จากธรรมชาติหรือจากการสังเคราะห์หรืออาจแบ่งตามโครงสร้างว่าเป็นเยื่อแผ่น ไม่มีรูพรุนหรือเยื่อมีรูพรุน บางกรณีอาจแบ่งตามการใช้งาน เช่น เยื่อแผ่นสำหรับการแยกของเหลว/ของเหลว ของเหลว/ก๊าซหรือก๊าซ/ก๊าซ และอาจแบ่งตามกลไกการทำงานของเยื่อแผ่น เช่น ถ้ากลไกการแยกเป็นการแพร่อาจเรียกว่า Diffusive membrane เป็นต้น



รูปที่ 3.1 แสดงการแบ่งชนิดของเยื่อแผ่นตามโครงสร้าง (รัตนา, 2543)

การแบ่งชนิดของเยื่อแผ่นที่จะทำให้เกิดเห็นความแตกต่าง ชัดเจน ในลักษณะทางกายภาพ และการใช้งาน และวิธีการผลิต ก็คือ การแบ่งตามชนิดของโครงสร้าง โดยแบ่งได้เป็น 4 ประเภท (รูปที่ 3.1) คือ

1. เยื่อแผ่นแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแน่น (Non porous/dense membrane) เยื่อแผ่นแบบแน่นส่วนมากผลิตจากพอลิเมอร์ แต่ก็มีบางชนิดที่เป็นเยื่อแผ่นอนินทรีย์ หรือผลิตจากโลหะบางชนิด

2. เยื่อแผ่นรูพรุน (Porous membrane) ความหมายของคำว่า “รูพรุน” ตามที่จำกัดความโดย IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) แบ่งตามขนาดรูพรุนออกเป็น 3 ระดับ ตามขนาดดังนี้

ขนาดใหญ่	:	ขนาดรูพรุน > 50 nm
ขนาดกลาง	:	2 nm < ขนาดรูพรุน < 50 nm
ขนาดเล็ก	:	ขนาดรูพรุน < 2 nm

โดยขนาดรูพรุน หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือความกว้างของรูพรุน ดังนี้ เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันจัดว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเป็นขนาดกลาง ถ้าขนาดรูพรุนเล็กกว่า 2 nm นิยมเรียกว่า เยื่อแผ่นแบบแน่นมากกว่า ที่จะเรียกว่ามีรูพรุนขนาดเล็ก

3. เยื่อแผ่นเตรียมขึ้นขณะใช้งาน (In situ formation membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่เตรียมเมื่อต้องการใช้งานหรือเพื่อนำไปใช้งานทันที ไม่ใช่เยื่อแผ่นสำเร็จรูปสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

3.1 เยื่อแผ่นไดนามิก เป็นชั้นหรือฟิล์มที่เกิดจากอนุภาคของสารคอลลอยด์ หรือสารแขวนลอยในสารละลายจับตัวหรือถูกดูดซับบนชั้นรองรับ ซึ่งก็คือเยื่อแผ่นรูพรุน เมื่อกรองสารละลายนั้น ๆ ภายใต้อันดัน อนุภาคที่ถูกดูดซับไว้จะทำหน้าที่เสมือนเป็นเยื่อแผ่นอีกแผ่นหนึ่งและไปเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของเยื่อแผ่นเดิมที่เป็นชั้นรองรับ

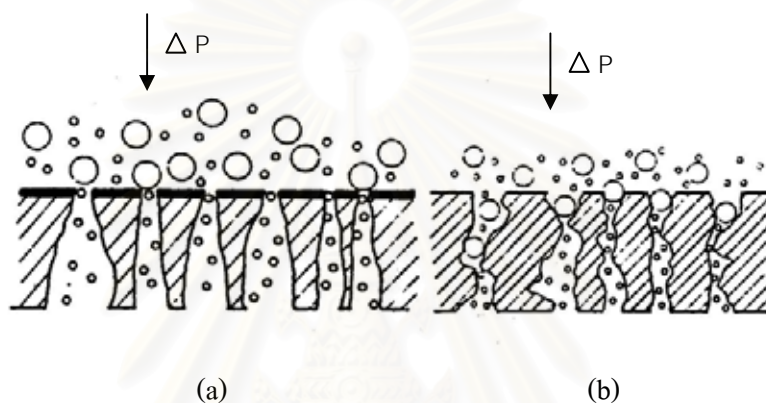
3.2 เยื่อแผ่นของเหลว (Liquid membrane) เยื่อแผ่นของเหลวสามารถสร้างขึ้น โดยทำให้เกิดฟิล์มของเหลวบนและภายในรูพรุนของชั้นรองรับลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า supported liquid membrane (SLM) ซึ่งมีความสามารถกักกันโมเลกุลขนาดเล็กที่ชั้นรองรับเดิมไม่สามารถกักกันได้ หรือเยื่อแผ่นของเหลวอาจอยู่ในรูปของอิมัลชันจำนวนมาก และอิมัลชันมีความสามารถในการเลือกผ่านสาร กรณีนี้เรียกว่า emulsion liquid membrane (ELM)

4. เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออนผลิตจากพอลิเมอร์ที่มีประจุอยู่ด้วยหรือจากพอลิอิเล็กโตรไลต์ และมีความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกหรือไอออนลบ จึงใช้สำหรับแยกสารละลายอิเล็กโตรไลต์

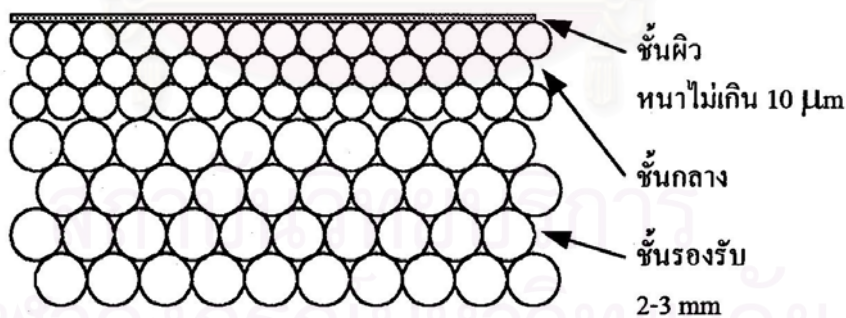
ลักษณะของเยื่อแผ่นสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด (รูปที่ 3.2 , รูปที่ 3.3) คือ

1. เยื่อแผ่นสมมาตร (Symmetric membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนขนาดเดียวกันในเยื่อแผ่น มีข้อดีคือทำงานง่าย แต่มีข้อเสียคือจะอุดตันง่าย

2. เยื่อแผ่นอสมมาตร (Asymmetric membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่ประกอบด้วยส่วนที่ทำหน้าที่เป็นเยื่อแผ่นซึ่งเป็นชั้นที่มีความหนาแน่นและมีรูพรุนขนาดเล็ก และส่วนที่ทำหน้าที่เป็นตัวรองรับซึ่งเป็นชั้นที่มีรูพรุนขนาดใหญ่และเป็นส่วนที่ให้ความแข็งแรงแก่เยื่อแผ่น มีข้อดีคือจะอุดตันยากและมีข้อเสียคือความต้านทานในการกรองมากกว่าเยื่อแผ่นแบบสมมาตร



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของเยื่อแผ่นอสมมาตร (a) และเยื่อแผ่นสมมาตร (b) (วีรวรรณ, 2539)



รูปที่ 3.3 แสดงโครงสร้างของเยื่อแผ่นเซรามิกส์ (รัตนนา, 2543)

## วัสดุที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่น

วัสดุที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ชนิดด้วยกันคือ

1. เยื่อแผ่นพอลิเมอร์ เป็นเยื่อแผ่นที่ผลิตได้จากสารพอลิเมอร์เช่นพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิโพรพิลีน เซลลูโลสอะซิเตด เป็นต้น ในการผลิตเยื่อแผ่นชนิดนี้สามารถควบคุมให้มีขนาดรูพรุนได้ตามต้องการ ราคาถูก และสามารถประยุกต์ใช้ในงานได้หลายประเภท เช่นใช้ในกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำทะเล การแยกตัวทำละลายออกจากสารละลาย เป็นต้น แต่เยื่อแผ่นชนิดนี้มีข้อจำกัดคือใช้งานได้ที่อุณหภูมิต่ำและไม่ทนต่อการกัดกร่อนของสารเคมี

2. เยื่อแผ่นเซรามิกส์ เป็นเยื่อแผ่นที่ผลิตได้จากสารเซรามิกส์ สารเซรามิกส์ที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นแบ่งได้เป็น 9 ชนิดคืออะลูมินา เซอร์โคเนีย ไทเทเนีย บอโรซิลิเกต คอर्टเดย์ไรท์ มัลไลท์ ซิลิกา ซิลิกอนคาร์ไบด์ และ ซิลิกอนไนไตรด์ เยื่อแผ่นชนิดนี้มีข้อดีคือสามารถทนต่อความดัน ความร้อน สารเคมีได้ดี แต่มีข้อเสียคือควบคุมขนาดของรูพรุนได้ยาก ราคาแพง ไม่ทนต่อการเปลี่ยนแปลงความร้อนอย่างฉับพลัน

3. เยื่อแผ่นโลหะ เป็นเยื่อแผ่นที่ผลิตจากการสานเส้นใยโลหะ เช่น เส้นใยสแตนเลส มีข้อดีคือมีอายุการใช้งานนาน มีความแข็งแรงสูง

โดยในวิทยานิพนธ์นี้ จะเน้นที่การทำเยื่อแผ่นเซรามิกส์ซึ่งมีข้อดีและข้อจำกัดดังนี้

## ข้อดีและข้อจำกัดของเยื่อแผ่นเซรามิกส์

ข้อดี

ก. ทนอุณหภูมิได้สูงกว่าเยื่อพอลิเมอร์ เช่น สามารถใช้งานได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 300 องศาเซลเซียส ทำให้ได้ฟลักซ์สูง สามารถใช้น้ำในการฆ่าเชื้อได้สำหรับอุตสาหกรรมอาหาร และเทคโนโลยีชีวภาพ

ข. ทนต่อตัวกลางที่ไม่ใช่ น้ำ เช่น สารเคมี ทนความเป็นกรด-ด่าง ของสารที่ใช้ทำความสะอาด

ค. ทนต่อการถูกทำลายด้วยจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นปัญหามากในเยื่อแผ่นพอลิเมอร์

ง. มีความต้านทานทางกลสูง

จ. อายุการใช้งานนาน 3-5 ปี

### ข้อจำกัด (รัตนานา, 2543)

- ก. ยังมีราคาแพง เยื่อแผ่นพอลิเมอร์มีราคาประมาณ 3,789-42,626 บาท/ตารางเมตร แต่เยื่อแผ่นเซรามิกส์อาจมีราคาสูงกว่าเป็น 10 เท่า คือ 47,362-142,088 บาท/ตารางเมตร
- ข. เปราะ แตกหักง่าย
- ค. ความสามารถกักกันโมเลกุลอยู่ในช่วงแคบเมื่อเทียบกับเยื่อแผ่นโพลีเมอร์ทำให้มีการสูญเสียโมเลกุลในการแยก

### วิธีการผลิตเยื่อแผ่น

การผลิตชั้นผิวมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันมากที่จะกล่าวถึงในที่นี้ 3 วิธีคือ

1. วิธีการตกตะกอนอนุภาค (Suspended powder) วิธีนี้คล้ายกับการเตรียมชั้นรองรับ คือใช้ผงเซรามิกส์ ขนาดเล็กหรือละเอียดมากผสมกับตัวทำละลายและตัวประสานที่เหมาะสม แล้วนำมาเคลือบบนชั้นรองรับทำให้แห้งแล้วนำไปเผา ขนาดของรูในชั้นผิวขึ้นกับขนาดอนุภาค การเติมตัวประสานจะช่วยป้องกันการแตกร้าวขณะทำแห้งและเผา เยื่อแผ่นที่ผลิตโดยวิธีนี้จะเป็นเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน มีขนาดรูพรุน 0.1-10 ไมโครเมตร

2. วิธีการแยกชั้น (Phase separation) และการชะ (Chemical leaching) ใช้ในการเตรียมเยื่อแผ่นแก้ว (glass membrane) โดยการนำส่วนผสมมาไฮโดรไลซ์ เคลือบบนชั้นรองรับ ทำให้แห้งแล้วเผา เมื่อผ่านขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะได้ส่วนผสม 2 เฟส คือ เฟสของ  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{B}_2\text{O}_3$  เมื่อนำเยื่อแผ่นซึ่งเผาแล้ว มาแช่ในกรด กรดจะละลาย  $\text{B}_2\text{O}_3$  ออกมาทำให้เกิดช่องว่าง/รูพรุน ส่วนที่เหลือเป็นโครงสร้าง หลักของเยื่อแผ่นคือ  $\text{SiO}_2$  วิธีนี้นอกจากจะใช้เตรียมเยื่อแผ่นจากแก้วแล้ว ยังสามารถใช้เตรียมเยื่อแผ่นโลหะได้

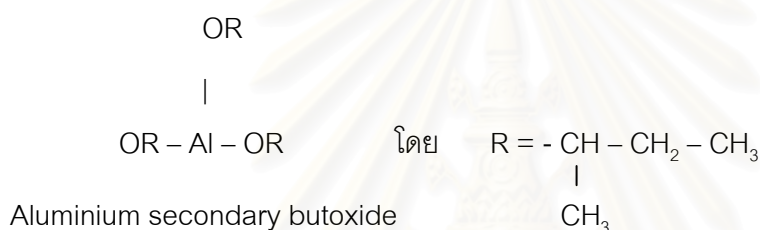
3. วิธีโซล-เจล (Sol-gel technique) วิธีนี้นิยมใช้ในการผลิต เยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชัน และเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันขนาดรูพรุนเล็ก คือมีขนาดรูพรุน 1-100 นาโนเมตร (10-100 อังสตรอม) มีข้อดีในการผลิต คือได้ส่วนผสมในการเคลือบที่เป็นเนื้อเดียว ใช้อุณหภูมิในการเผาต่ำ เยื่อแผ่นที่ได้มีการกระจายรูพรุนแคบกว่า



หลักการของวิธีโซล-เจล คือการเตรียมสารละลายจากสารตั้งต้นซึ่งเป็นสาร แอลคอกไซด์ (alkoxide) เช่น Si(OR)<sub>4</sub> หรือ Al(OR)<sub>3</sub> แล้วทำให้สารละลายหรือส่วนผสมเปลี่ยนภาวะจากโซลเป็น เจล (ทำนองเดียวกับวิธีการเปลี่ยนเฟส) วิธีโซล-เจล ยังแบ่งออกเป็นวิธีย่อยอีก 2 วิธีคือ

1. Polymerization of molecular units (PMU)

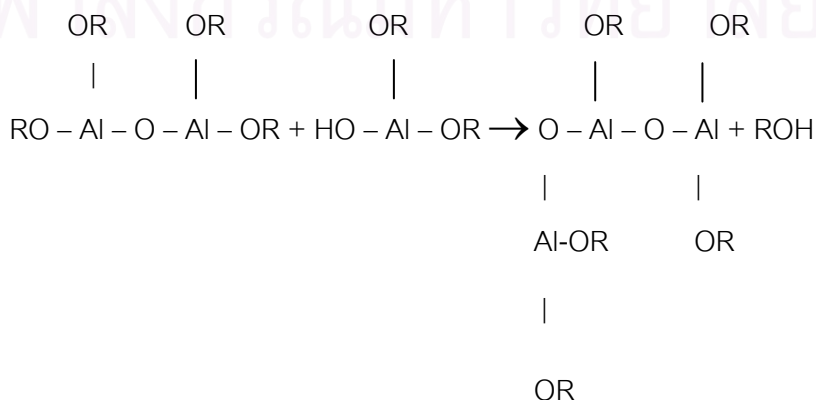
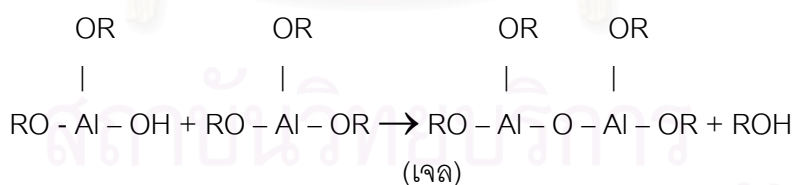
วิธีนี้ต้องควบคุมปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ของสารแอลคอกไซด์และปฏิกิริยาการเกิดโพลิเมอร์ แบบควบแน่น (Condensation polymerization) ซึ่งจะทำให้เกิดร่างแหของออกไซด์ (ซึ่งก็คือ เจล) โดยพันธะเคมี เพราะการควบคุมมีผลต่อเจลที่ได้ น้ำเป็นตัวที่เติมลงไปทำให้เกิดไฮโดรไลซิส ตัวอย่าง การเกิดปฏิกิริยาเมื่อแอลคอกไซด์เริ่มต้นเป็น aluminium secondary butoxide คือ



การเกิดไฮโดรไลซิส เป็นดังนี้



และการเกิด โพลิเมอร์ แบบควบแน่นซึ่งมีโครงสร้างต่อเนื่องเป็นร่างแหเพราะพันธะเคมี



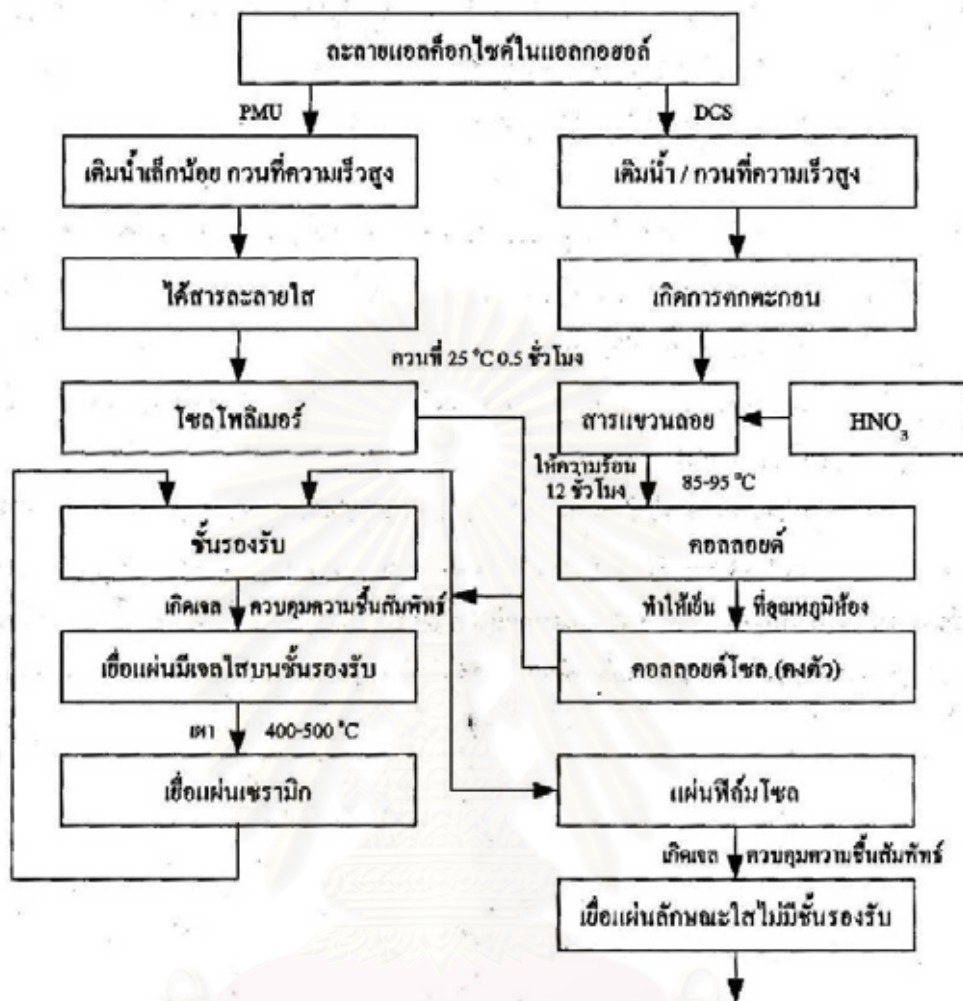
## 2. Destabilization of colloidal solution (DCS)

เป็นการไฮโดรไลซ์สารแอสค็อกไซด์เช่นเดียวกันแต่แตกต่างจากวิธี PMU ตรงสถานะวิธี DCS มีการเติมน้ำจำนวนมากเช่น ใช้น้ำ 100 โมล ต่อ 1 โมลของแอสค็อกไซด์เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาสมบูรณ จากปฏิกิริยาจะได้ตะกอนขุ่น ๆ ของโลหะ ไฮดรอกไซด์ หลังจากนั้นเติมอิเล็กโทรไลต์เช่น กรด ให้ตะกอนกระจายตัวได้คอลลอยด์ที่ใสขึ้น (ขั้นตอน นี้เรียกว่า Peptization) หรือเป็นโซลนั่นเอง นำโซลซึ่งมีสภาพคงตัวไปเคลือบบนชั้นรองรับโดยวิธีจุ่ม (dipping) เมื่อมีการระเหยน้ำโซลเปลี่ยนสภาพเป็นเจล ซึ่งคือชั้นผิวของเยื่อแผ่น รูปที่ 3.4 เปรียบเทียบการเตรียมชั้นผิวด้วยวิธีโซล-เจลแบบ PMU และ DCS ความแตกต่างที่เห็นชัดคือ เจลที่เกิดขึ้นใน PMU เป็นเจลเคมี (เกิดร่างแหโพลิเมอร์ จากการควบแน่น) ส่วน DCS เป็นเจลกายภาพ

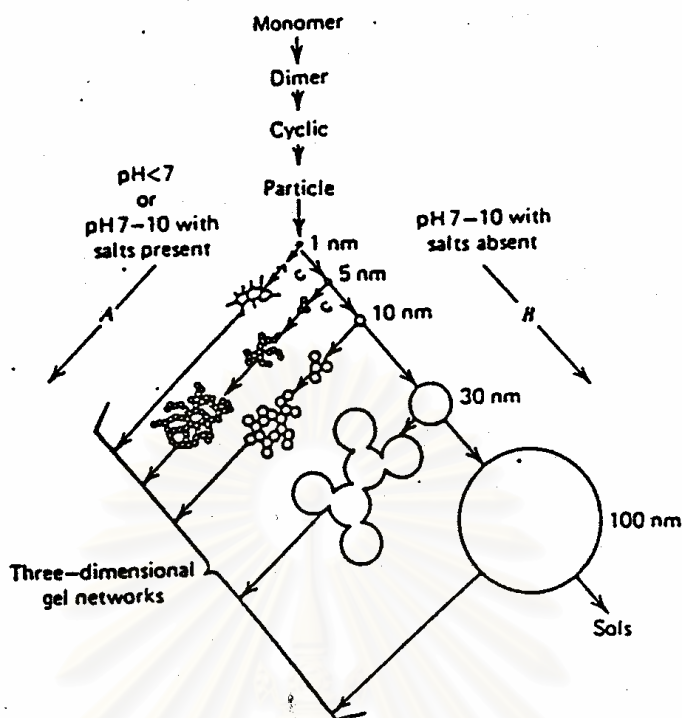
### โซล (ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ, 2538-2539)

คืออนุภาคคอลลอยด์ของสารผสมซึ่งเป็นของแข็งกระจายตัวอยู่ในตัวกลางของเหลว อนุภาคนี้อาจมีรูปผลึกหรือไม่ก็ได้ การเตรียมอนุภาคเริ่มต้นควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1-5 นาโนเมตร ขนาด และรูปร่างของอนุภาคมีผลต่อความสามารถการละลาย

อนุภาคจะเกิดการโตตาม Ostwald ripening ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจะเพิ่มขึ้น และค่าความเป็นกรดเบสก็ส่งผลต่อการโตของอนุภาคเช่นกัน (รูปที่ 3.5)

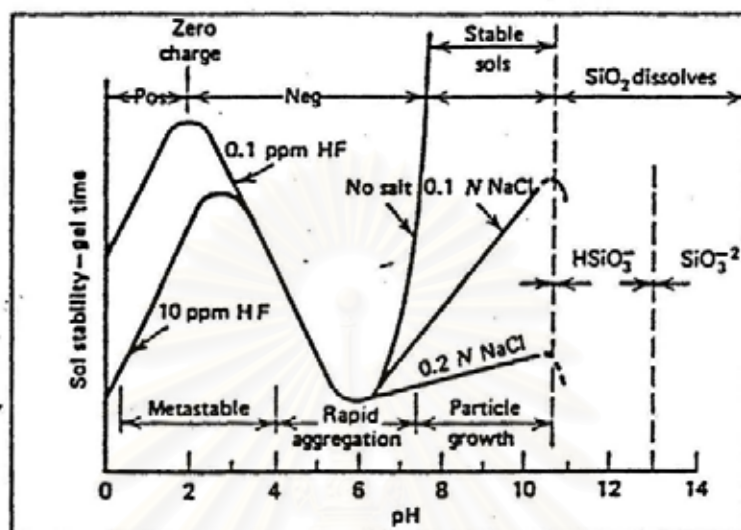


รูปที่ 3.4 แสดงการเตรียมเยื่อแผ่นเซรามิกโดยวิธี PMU และ DCS ซึ่งอาจจะผลิตฟิล์มเฉพาะชั้นผิวที่ไม่มีชั้นรองรับหรือเคลือบบนชั้นรองรับ (รัตนานา, 2543)



รูปที่ 3.5 แสดงการเกิด พอลิเมอร์ไรเซชันของซิลิกาที่มีการเกาะตัวกันเป็นโครงข่าย (Sol-Gel Science, 1990)

สารละลายซิลิกาที่เตรียมได้จะมีลักษณะเป็นคอลลอยด์ซิลิกา (Colloidal silica) และมีอมอร์ฟัสซิลิกา (amorphous silica) กระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ อนุภาคของซิลิกาจะมีขนาดถึง 300 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า 70 นาโนเมตร จะเกิดการตกตะกอนอย่างช้า ๆ สถานภาพของซิลิกาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย (รูปที่ 3.6) พีเอชจะมีผลต่อการละลายและเวลาในการเกิดเจล (Gel Time) โดยถ้าอยู่ในช่วงค่าความเป็นกรดเบส 0 ถึง 4 จะได้ซิลิกาที่มีลักษณะเสถียร (metastable) ถ้าค่าความเป็นกรดเบสอยู่ในช่วง 4 ถึง 7 จะได้ซิลิกาที่มีลักษณะเกิดการเติบโตอย่างรวดเร็ว (Rapid aggregation) และถ้าค่าความเป็นกรดเบสอยู่ในช่วง 7 ถึง 11 จะได้ซิลิกาที่มีลักษณะที่อนุภาคจะมีขนาดเพิ่มขึ้น (particle growth) โดยในช่วงที่มีค่าความเป็นกรดเบสต่ำ การจับตัวจะถูกเร่งให้เกิดได้ง่ายแม้มีกรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเพียงเล็กน้อย ในบริเวณที่ค่าความเป็นกรดเบสต่ำนี้ ตัวทำละลายอินทรีย์ที่รวมกับน้ำได้ เช่น แอลกอฮอล์ จะต้าน การเกิดเจล อย่างไรก็ตามการเกิดเจลจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ที่อุณหภูมิสูง ยิ่งปริมาณซิลิกา ในซิลิกาสูง การเกิดเจลก็ยิ่งง่าย ส่วนลักษณะผิว ของอนุภาค ซิลิกา ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่ง ในการควบคุม เสถียรภาพของซิลิกา



รูปที่ 3.6 ผลของค่าความเป็นกรดเบสต่อระบบคอลลอยด์ซิลิกากับน้ำ (Colloidal silica-water system) (Sol-Gel Science, 1990)

## เจล

เกิดจากการเปลี่ยนรูปร่างมาจากสารละลายซิลิก เมื่อได้รับแรงดึงดูดระหว่างอนุภาคเข้าด้วยกัน ซิลิกาเจล (Silica gel) แบ่งได้เป็น 3 ชนิดคือ ซิลิกาเจลชนิดที่มีความหนาแน่นปกติ (Regular-density silica gel) ซึ่งเตรียมได้โดยการทำให้อยู่ในสารละลายกรด จะได้อนุภาค ที่มีขนาดเล็กมากและพื้นที่ผิวสูง (750-800 ตารางเมตร/กรัม) ค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนเท่ากับ 2.2-2.6 นาโนเมตร และ ปริมาตรรูพรุนประมาณ 0.37-2.40 มิลลิลิตร/กรัม มีน้ำประมาณ 6% น้ำจะเกาะอยู่ที่ผิวซึ่งมีกลุ่มไฮดรอกซี (hydroxyl group) อยู่ ดังนั้นจะดูดซับน้ำได้มาก ชนิดที่สองคือ ซิลิกาเจลที่มีความหนาแน่นปานกลาง (Intermediate - density silica gel) มีพื้นที่ผิวดำ (300-350 ตารางเมตร/กรัม) แต่ปริมาตรรูพรุนสูง (0.9-1.1 มิลลิลิตร/กรัม) ค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนประมาณ 12-16 นาโนเมตร ขนาดของอนุภาค ใหญ่กว่า ซิลิกาเจลที่มีความหนาแน่นสูงด้วยเหตุผลที่มีขนาด

รูปพูนใหญ่ ซิลิกาเจลที่มีความหนาแน่นปานกลางจึงดูดซับน้ำได้ดีที่มีความชื้นสูง ชนิดสุดท้าย คือ ซิลิกาเจลที่มีความหนาแน่นต่ำ (Low-density silica gel) เช่น แอโรเจล (aerogel) มีพื้นที่ผิวต่ำ (100-200 ตารางเมตร/กรัม) ขนาดรูพูนประมาณ 18-22 นาโนเมตรและปริมาตรรูพูนประมาณ 1.4-2.0 มิลลิเมตร/กรัม

การเกิดเจล (Gelation) เป็นปรากฏการณ์ของอนุภาคที่มีการเกาะตัวกันเพื่อทำให้เกิดโครงสร้างตาข่าย ถึงแม้ว่าอนุภาคของซิลจะถูกรักษาจากอนุภาคคอลลอยด์ (โดยทั่วไปจะมีค่าต่ำกว่า 0.2 ไมโครเมตร) แต่ก็สามารถเตรียมเจลให้มีขนาดใหญ่ได้เนื่องจากแรงกระทำของอนุภาคซึ่งจะมีผลต่อค่าความหนืด และ สมบัติความยืดหยุ่น (elastic properties)

การขึ้นรูปของเจลโดยวิธีเทลงในแบบ (Casting) เป็นวิธีที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อเตรียมผลิตภัณฑ์เซรามิกส์ที่มีรูปร่างซับซ้อน ขนาดใหญ่ได้ ดังนั้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นที่ควรทราบว่าแพคเตอร์ใดบ้างที่มีผลต่อการขึ้นรูปโดยวิธีนี้ พฤติกรรมการไหลตัวเช่น ความหนืด (viscosity) เวลาของการเกิดเจล (setting rate) การเทลงในแบบ (drain properties) อัตราการปล่อยไอน้ำในแบบ (casting rate) การหดตัว (shrinkage) ความแข็งแรง (strength) ฟองอากาศ (air bubbles) เป็นสิ่งที่ต้องควบคุม

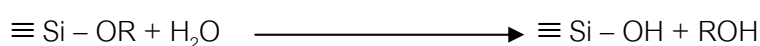
### ทฤษฎีซิล-เจล

กระบวนการซิล-เจล (Sol-Gel Process) เป็นกระบวนการสร้างชั้นฟิล์มบาง โดยซิล (Sol) เกิดจากอนุภาคของแข็งกระจายตัวอยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลว และเมื่ออนุภาคซิลเริ่มเกิดการรวมตัวกันก็จะทำให้อนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้นเรื่อยๆ จนสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ขณะที่เกิดการรวมตัวสิ่งที่เราเห็นได้นั้นคือเจล (Gel) โดยอนุภาคของซิลมีขนาดตั้งแต่  $10^5 - 10^2$  นาโนเมตร

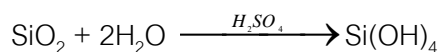
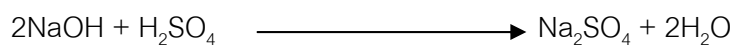
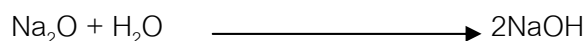
ดังนั้นการเตรียมสารละลายซิล จำเป็นต้องสร้างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นมา ในการเตรียมขนาดอนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่เตรียมได้จากกระบวนการทางเคมี คอลลอยด์สามารถเตรียมได้จากเกลืออนินทรีย์ของโลหะ เช่น  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  หรือสารประกอบแอลคอกไซด์เช่น Tetra-ethyl-ortho-silicate (TEOS) เป็นต้น สำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะเน้นที่การเตรียมสารละลายซิลจาก  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  โดยกระบวนการซิล-เจลจะเกิดปฏิกิริยาเคมี 2 ปฏิกิริยาดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) (Godoi, 1999)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาในการเกิดสารละลายซิล โดยมีปฏิกิริยาดังนี้



สำหรับ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  จะเกิดได้ 3 ปฏิกิริยา คือ



เมื่อรวมปฏิกิริยาแล้วจะได้เป็น



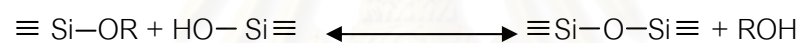
โดยมี  $\text{H}_2\text{SO}_4$  เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยานี้จะทำให้ซิลานอล (Silanol :  $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) เป็น

สารละลายซิล

## 2. ปฏิกิริยาควบแน่น (Condensation Reaction)

ปฏิกิริยาควบแน่นเป็นปฏิกิริยาที่เกิดจากการรวมตัวกันของ  $\text{Si}(\text{OH})_4$  โดยปกติปฏิกิริยาเกิดได้ 2 แบบด้วยกันคือ

2.1 ปฏิกิริยาควบแน่นที่ได้แอลกอฮอล์เป็นผลิตภัณฑ์ (alcohol condensation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้ ROH

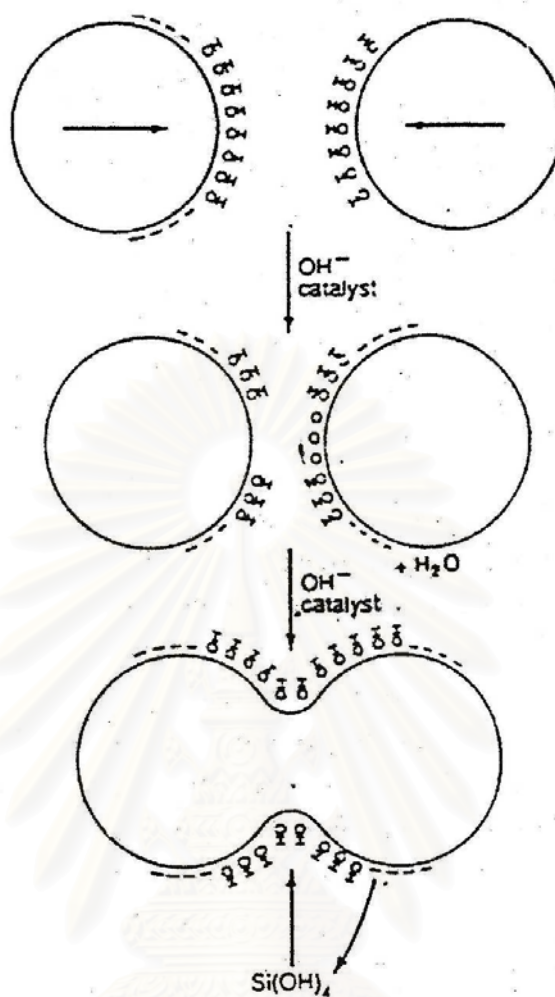


2.2 ปฏิกิริยาควบแน่นที่ได้น้ำเป็นผลิตภัณฑ์ (water condensation) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่ให้



โดยเรียกหมู่  $\equiv \text{Si}-\text{O}-\text{Si} \equiv$  นี้ว่าซิลอกเซน (Siloxane)

รูปที่ 3.7 แสดงถึงการเกิดพันธะของโครงสร้างภายในระหว่างอนุภาคของซิลิกาซึ่งมีกลุ่มไฮดรอกซี ( $\text{OH}^-$ ) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จะเห็นว่าในขั้นแรกอนุภาคจะค่อยๆ เคลื่อนเข้าหากันมากขึ้น และจะเริ่มมีการจับกันของหมู่  $\text{OH}^-$  ของอนุภาคหนึ่งและหมู่ไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ของอีกอนุภาคหนึ่ง เกิดเป็นน้ำขึ้นและก็จะเป็นอย่างนี้เรื่อยไปจนเกิดเป็น  $\text{Si}(\text{OH})_4$



รูปที่ 3.7 การเกิดพันธะของโครงสร้างภายในระหว่างอนุภาคของซิลิกา (สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ , 2540)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและควบแน่นจะเกิดต่อเนื่องกันแล้วแต่อัตราการเกิดปฏิกิริยาของแต่ละปฏิกิริยาซึ่งจะมีผลต่อเวลาในการเกิดเจล โดยปฏิกิริยาควบแน่นจะเป็นตัวควบคุมเวลาในการเกิดเจล ถ้าอัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเร็ว จะทำให้เวลาในการเกิดเจลสั้น สิ่งที่มีผลต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่นคือ (Balagopal, 1998)

#### 1. สารตั้งต้น

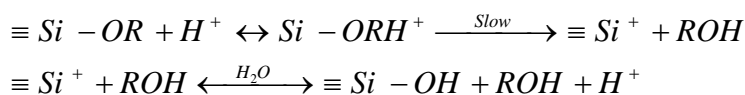
สารตั้งต้นที่ใช้ส่วนใหญ่จะเป็น TEOS หรือ TMOS จะพบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของซิลิกอนแอลคอกไซด์จะลดลงเมื่อเพิ่มขนาดของกลุ่มแอลคอกไซด์ เมื่อแทนที่กลุ่มแอลคอกไซด์ด้วยกลุ่มอัลคิลอัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเพิ่มขึ้นและจะลดลงเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นเบส



## 2. ตัวเร่งปฏิกิริยา







ตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีใช้ในกระบวนการโซล-เจล มีอยู่ 2 ประเภทด้วยกันคือตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดและตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสซึ่งมีผลดังนี้

### 2.1 กรด (Acid Catalyst)



จากปฏิกิริยาพบว่าที่ค่าความเป็นกรดเบสน้อยกว่า 2 โมเลกุลของซิลิกาจะรวมตัวกับไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ -ion) เกิดเป็น  $H^+$  ในปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันแทน ต่อจากนั้นจะเกิดการแตกตัวออกมาเป็น silica ion intermediate ( $\equiv Si^+$ ) กับแอลกอฮอล์ และเมื่อรวมตัวกับน้ำก็จะไฮเดรต (Silanol :  $\equiv Si-OH$ ) ดังนั้น อัตราการเกิดปฏิกิริยาของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเพิ่มขึ้นก็ต่อเมื่อมีหมู่  $H^+$  มากขึ้น

ปฏิกิริยาควบแน่นภายใต้ตัวเร่งที่เป็นกรดจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและจะเริ่มเมื่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดเกือบสมบูรณ์ ถ้ามีปริมาณน้ำมากจะยิ่งทำให้ช่วงระหว่างปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและควบแน่นยิ่งห่างมาก และถ้ามีปริมาณน้ำน้อย การจะแยกปฏิกิริยาระหว่างไฮโดรไลซิสและควบแน่นจะทำได้ยาก โดยในตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะเกิดลักษณะของ cluster-cluster aggregation (ได้สายพอลิเมอร์เป็นเส้นตรง) ซึ่งจะเปราะกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสซึ่งมีลักษณะเป็น monomer-cluster (ได้สายพอลิเมอร์ที่เป็นสาขา) ตามรูปที่ 3.8

	REACTION-LIMITED	BALLISTIC	DIFFUSION-LIMITED
MONOMER-CLUSTER	EDEK  $D = 1.00$	VOLD  $D = 1.66$	WITTEN-SANDER  $D = 2.50$
CLUSTER-CLUSTER	RLCA  $D = 2.08$	SUTHERLAND  $D = 1.95$	DLCA  $D = 1.60$

รูปที่ 3.8 แสดงถึงลักษณะการเกาะตัวกันของซิลิกา (Balagopal, 1998)

## 2.2 เบส (Base Catalyst)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสหรือมีพีเอชมากกว่า 2 จะเกิดขึ้นโดยการแตกตัวอย่างรวดเร็วของน้ำกลายเป็นไฮดรอกซิลแอนไอออนเป็นขั้นแรก แล้วทำการรวมไฮดรอกซิลแอนไอออนกับอะตอมของซิลิกอน

ปฏิกิริยาควบแน่นภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วกว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส โดยเมื่อรวมตัวกันจนเกิดเป็น Cluster แล้วขนาดของ cluster ที่รวมตัวกันจะขึ้นกับอุณหภูมิ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้การละลายของซิลิกาดีขึ้นและโมเลกุลขนาดเล็กก็จะละลายและไปรวมตัวกับโมเลกุลขนาดใหญ่ จะทำให้เมื่อใช้เบสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจะได้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ และจะได้สายพอลิเมอร์เป็นสาขาด้วย

ผลของกรดจะดูจากค่า  $R_a$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณของกรดต่อปริมาณของซิลิกาที่เข้าทำปฏิกิริยา

$$R_a = \frac{\text{mol H}_2\text{SO}_4}{\text{mol Na}_2\text{SiO}_3} \quad (1)$$

## 3. น้ำ

ปริมาณน้ำที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาจะทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนแปลงไป ถ้ามีปริมาณน้ำมากจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเร็วขึ้น มีผู้ศึกษาพบว่าถ้าอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อ TMOS น้อยกว่า 0.5 จะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของแอลกอฮอล์เร็วกว่าปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำ แต่ถ้ามีค่ามากขึ้นจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำสูงขึ้นด้วย และถ้ามีค่าเท่ากับ 2 จะทำให้มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นของน้ำมีค่าเท่ากับ 85% ดังนั้นเมื่อเพิ่มอัตราส่วนระหว่างน้ำต่อ TMOS จะไปลดความเข้มข้นของ Si-ion ในสารละลายและจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นลดลง นั่นคือทำให้เวลาในการเกิดเจลเพิ่มขึ้น

ผลของน้ำจะดูจากค่า  $R_w$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างปริมาณน้ำกับปริมาณของซิลิกาที่เข้าทำปฏิกิริยา

$$R_w = \frac{\text{mol H}_2\text{O}}{\text{mol Na}_2\text{SiO}_3} \quad (2)$$

## 4. ตัวทำละลาย

ตัวทำละลายที่เติมลงไปจะทำหน้าที่ป้องกันการแยกชั้นที่เกิดขึ้นในช่วงแรกของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ในบางกรณีตัวทำละลายมีประโยชน์ต่อการควบคุมความเข้มข้นของซิลิกาและการ

ควบคุมการเกิดเจล ยิ่งมีตัวทำละลายมากจะนำไปสู่การรวมตัวของพอลิเมอร์ได้ง่าย และยังนำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชันหรือดีพอลิเมอร์ไรเซชันอีกด้วย

#### 5. อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสหรือพอลิเมอร์ไรเซชัน ภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรด เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้นเท่ากับอัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่น โดยจะเป็นการเพิ่มกึ่งก้านให้กับสายโซ่ของโพลิเมอร์ ทำให้เกิดเจลเร็วขึ้น เวลาเป็นสิ่งสำคัญของปฏิกิริยาควบแน่น เมื่อเพิ่มเวลาในการเกิดเจล จะทำให้เกิดกึ่งให้กับสายโซ่ของโพลิเมอร์ได้เช่นกัน

การขึ้นรูปด้วยวิธีโซล-เจลที่เป็นสลิป(Slip) สิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึงคือ

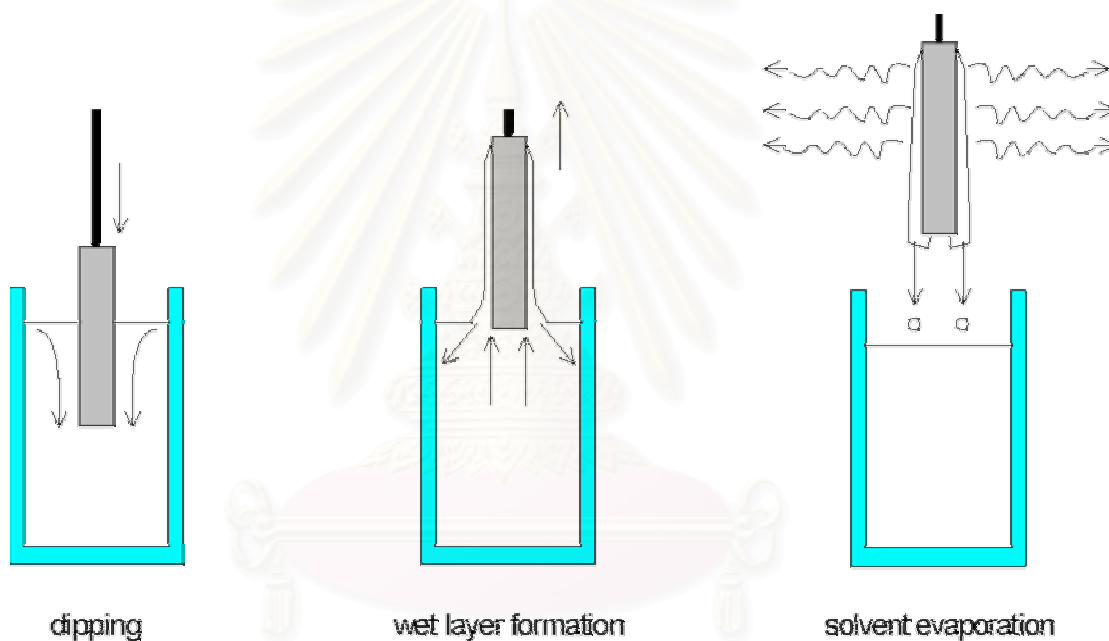
1. ความหนืด (Viscosity) ลักษณะของสลิปที่ดีจะต้องง่ายในการเท ไม่หนาจนเกินไป เมื่อเทเจลในแบบ
2. อัตราการแข็งตัว (Setting rate) ถ้าหากว่าอนุภาคมีการจับตัวกันเร็วเกินไป ทำให้มีผนังหนาเกินไปยากต่อการเทออก (Drain)
3. องค์ประกอบ (Composition) อัตราส่วนระหว่างของแข็งกับของเหลว และองค์ประกอบมีผลต่อความหนาของชั้นงาน หากว่าเทสลิปออกมาจากแบบได้ยากจำเป็นต้องปรับสัดส่วนของแข็งกับของเหลวให้น้อยลงแต่ยังคงมีความแข็งแรง
4. อัตราการขึ้นรูป (Casting rate) หากให้เวลาในอยู่ในแบบนานเกินไป ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีผนังหนา โดยทั่วไปจะมีการกำหนดเวลาตั้งแต่ 1 นาที จนถึง 1 ชั่วโมง
5. การหดตัว (Shrinkage) เป็นสิ่งจำเป็นที่ต้องทราบอัตราการหดตัวจากแบบเมื่อแห้ง เพื่อที่จะได้ถอดผลิตภัณฑ์ออกมาจากแบบ การหดตัวเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดรอยร้าวได้
6. ความแข็งแรง (Strength) การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จะต้องมีความแข็งแรงเพียงพอก่อนทำการเผา จึงมีความจำเป็นต้องควบคุมพฤติกรรมการไหลตัวซึ่งเป็นตัวช่วยเพิ่มความแข็งแรง อาจต้องมีการเพิ่มเติมสารเพิ่มความเหนียวลงไปปริมาณเล็กน้อย
7. ฟองอากาศ (Air bubbles) น้ำสลิปที่ดีไม่ควรจะมีฟองอากาศ ควรกำจัดออกก่อนโดยการเขย่า, ดูดออก, หรือเพิ่มเติมสารลดฟอง (antifoam) เช่น silicones, octyl alcohol

### การขึ้นรูปด้วยวิธีจุ่ม (Dipping)

การจุ่มเป็นการเคลือบตัวรองรับแบบหนึ่ง ทำโดยการจุ่มตัวรองรับลงในสารละลายที่ใช้ในการเคลือบ โดยควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการจุ่ม ความหนาของเยื่อแผ่นที่เกิดขึ้นจะขึ้นกับเวลาในการจุ่ม, ความเข้มข้นของสารละลายและความหนืดของสารละลาย

การจุ่มจะสามารถแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนตามรูปที่ 3.9 คือ

1. ขั้นในการจุ่ม
2. ขั้นในการดึงตัวรองรับขึ้นจะเกิดการสร้างเยื่อแผ่นขึ้น
3. ขั้นตอนในขณะที่ตัวกลางระเหยออกไปทำให้เกิดเป็นเจลขึ้น



รูปที่ 3.9 แสดงการขึ้นตอนการเคลือบเยื่อแผ่นบนตัวรองรับด้วยวิธีการจุ่ม (Dip coating)

### ข้อดีของกระบวนการโซล-เจล

1. อุณหภูมิในการเผาต่ำ
2. วัสดุตั้งต้นนำมาใช้มีความบริสุทธิ์สูง
3. ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีเนื้อสม่ำเสมอ
4. สามารถเกิดเจลได้ตามรูปร่างที่เราต้องการ
5. ใช้ขึ้นรูปวัสดุพิเศษได้

### ข้อเสียของกระบวนการโซล-เจล

1. มีความหนาแน่นต่ำและอาจเกิดการหดตัว
2. วัสดุดิบมีราคาแพง
3. ใช้เวลานาน

### การอบแห้ง

หลังจากการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์เจล ปริมาณของตัวทำละลายที่มีอยู่ภายในโครงสร้างจะถูกกำจัดออกไปเกิดเป็นช่องว่าง ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผลิตภัณฑ์เกิดการเสียรูปทรง (Warping) และการแตก (cracking) หากผลิตภัณฑ์มีปริมาณตัวทำละลายมาก จะมีการหดตัวสูงและมีปริมาตรของช่องว่าง (void volume) มาก การกระจายตัวของอนุภาค และขนาดจะมีผลต่อการผนึกอนุภาค (packing)

อุณหภูมิ ความชื้น ความเร็วลมมีอิทธิพลต่ออัตราการอบแห้ง

ปัญหาที่เกิดจากการอบแห้ง ถ้าหากว่าใช้ความร้อนมากเกินไปจะส่งผลให้ที่บริเวณผิวภายนอกแห้งก่อน บริเวณตรงกลางทำให้มีความชื้นไม่สม่ำเสมอ (Gradient of moisture) และหากได้รับความร้อนไม่สม่ำเสมอ (non uniform) ก็จะทำให้ผลิตภัณฑ์มีการหดตัว (shrinkage) อาจเกิดการโก่งตัว (warping) และแตก (cracking)

การอบแห้ง มีอยู่ 2 ระบบ ดังนี้

1. ระบบที่ไม่มีการควบคุมความชื้น ควรกำหนดความเร็วเพื่อให้มีความสม่ำเสมอ อุณหภูมิที่ใช้ในการอบแห้งควรเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ เพื่อป้องกัน ความแตกต่างของความชื้น (Moisture gradient) ระหว่างผิวนอกกับบริเวณตรงกลางของผลิตภัณฑ์เป็นระบบที่ไม่เหมาะต่อการอบผลิตภัณฑ์เจล

2. ระบบที่มีการควบคุมความชื้นควบคุม เพื่อต้องการควบคุมให้ค่าแรงเค้น (Stress) ต่ำสุด เป็นระบบที่ไม่มีความแตกต่างของความชื้น (no moisture gradient) แต่อุณหภูมิต้องมีความสม่ำเสมอ ความชื้นในเครื่องอบจะค่อย ๆ ลดลง เมื่อปริมาณน้ำออกไปจากผลิตภัณฑ์ นิยมใช้กับชิ้นงานที่มีขนาดใหญ่ หรือวัสดุพิเศษ เช่น ผลิตภัณฑ์เจล

## การเผา (sintering)

การเผาเป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนกับวัสดุเพื่อทำให้อนุภาคมีการผนึกตัว มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้นโดยมีกลไกทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์เข้ามาเกี่ยวข้อง เนื่องจากการเผาเป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) พลังงานอิสระจะมีค่าลดลงแล้วมีสะพาน (bridge) เกิดขึ้นภายในโครงสร้างซึ่งไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้

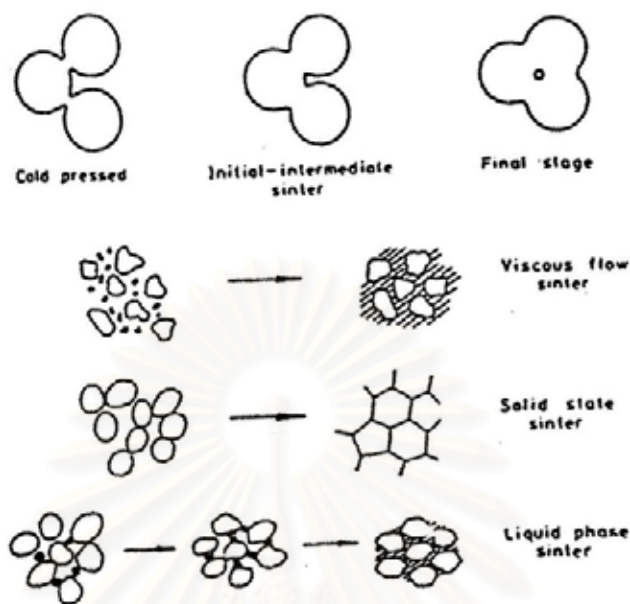
พฤติกรรมที่เกิดขึ้นของกระบวนการเผา

1. เวลาที่ใช้ในการเผาจะมีผลให้อนุภาคที่อยู่ภายในสัมผัสกันมากขึ้น
  2. มุมและรูปร่างของอนุภาค มาอยู่ใกล้เคียงกัน
  3. อนุภาคเกิดการรวมตัวกัน (Compact) ให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
  4. รูพรุนที่อยู่ใกล้เคียงกันจะเกิด การเชื่อมต่อ (Interconnect)
  5. เมื่อเวลานานขึ้นรูพรุน (Pores) จะถูกทำลายทำให้มีสภาพเป็นรูพรุนเดี่ยว (isolated pores)
  6. ขนาดของอนุภาคจะโตขึ้นและพื้นที่รอยต่อระหว่างอนุภาค (Grain boundary area) ลดลง
  7. รูพรุนเดี่ยว (Isolated pores) จะมีปริมาตรลดลงทำให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น
- พฤติกรรมในขั้นที่ 1-3 เป็นปรากฏการณ์ขั้นแรก (initial stage)

4-5 เป็นปรากฏการณ์ขั้นที่สอง (intermediated stage)

6-7 เป็นปรากฏการณ์ขั้นสุดท้ายของกระบวนการเผา

(Sintering stage)



รูปที่ 3.10 แสดงชนิดของการเผาแบบต่างๆ (สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ, 2540)

ปัจจัยที่มีผลต่อกลไกของปฏิกิริยาคือ

1. อุณหภูมิ
2. เวลาของการเผา
3. ขนาดและรูปร่างของอนุภาค
4. องค์ประกอบภายในของผลิตภัณฑ์ เช่น additive , sintered aid
5. ความดัน

การเผา (Sintering) สามารถแยกได้เป็น 3 ประเภท (รูปที่ 3.10) ดังนี้

1. การเผาในภาวะที่มีแต่อนุภาคของแข็งอยู่ในโครงสร้าง (Solid-state sintering)

เป็นการผนึกอนุภาคเข้าด้วยกัน โดยการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพื่อให้มีความหนาแน่นสูง (Densification) ความบริสุทธิ์ของวัสดุที่ใช้สำหรับการเผาชนิดนี้เป็นสิ่งสำคัญ

2. การเผาในภาวะที่มีของเหลวอยู่ในโครงสร้าง (Liquid-Phase sintering)

ภายในโครงสร้างจะมีของเหลว เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ที่มีความหนาแน่น (Densification) อนุภาคจะมีการจัดเรียงตัวภายในโครงสร้าง (re-arrangement stage) ทำให้รูปร่างของโครงสร้างเปลี่ยนแปลงไป

3. การเผาในภาวะที่มีการไหลของของเหลวที่มีความหนืด (Viscous flow sintering)

เป็นขบวนการเผาก่อนภาคสำหรับวัสดุเซรามิกส์สมัยใหม่ (Modern ceramic processing) ภายในโครงสร้างจะเกิดการรวมตัวของของเหลว (liquid-forms) ที่มีอยู่เพียงพอเข้าไปตามรูพรุน (fill the green stage porosity) ทำให้อนุภาคมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างเพียงเล็กน้อยและมีความหนาแน่นมากขึ้น (densification)

**ทฤษฎีการกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน**

การกรองเป็นการแยกสารออกจากกันโดยใช้การคัดเลือกขนาดอนุภาคในการแยก การกรองสามารถแบ่งออกตามขนาดของสารที่นำมากรอง ดังรูปที่ 3.11

ขนาด (micron)	0.001	0.01	0.1	1	10	100	1000
น้ำหนักโมเลกุล	100 200 1000 10000 20000 100000			500000			
โมเลกุล/อนุภาค	ไอออน สารละลายเกลือ น้ำตาล	โพรเจน	ผงถ่าน ไวรัส	เม็ดสี แบคทีเรีย ควีนเบอรี่	เซลล์ยีสต์	ฝุ่น เม็ดเลือด	แป้ง
กระบวนการ	ออสโมซิสต้นกลับ นาโนฟิลเตรชัน	อัลตราฟิลเตรชัน	ไมโครฟิลเตรชัน			การกรองระดับอนุภาค	

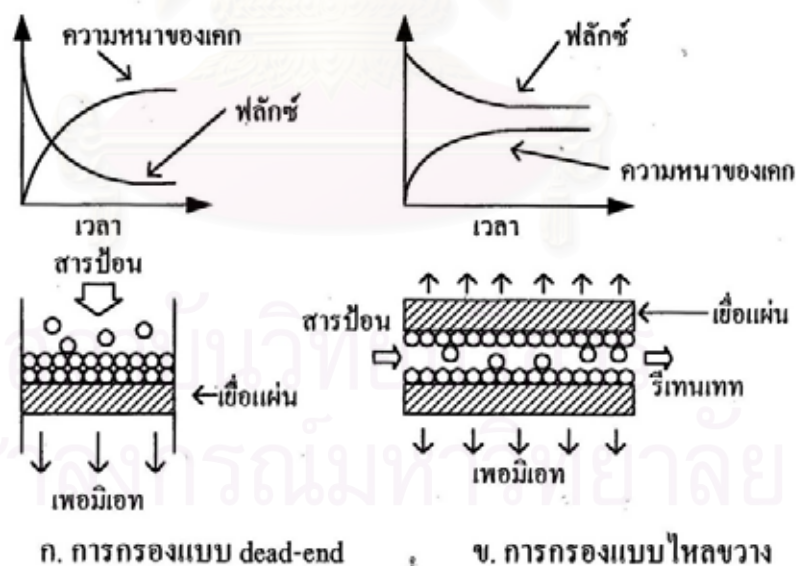
รูปที่ 3.11 แสดงตัวอย่างโมเลกุลหรืออนุภาคที่สามารถแยกโดยใช้กระบวนการเยื่อแผ่นซึ่งมีผลต่างของความดันเป็นแรงขับเคลื่อน (รัตนานา, 2543)



การกรองแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือการกรองแบบไหลตั้งฉาก (Dead-end microfiltration) และ การกรองแบบไหลขนาน (Cross-flow microfiltration)

1. การกรองแบบไหลตั้งฉาก (Dead-end microfiltration) เป็นการกรองโดยที่มีทิศทางของสายป้อนตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นที่เรียกว่าเค้ก (Cake) การสะสมของเค้กทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น และฟลักซ์ ลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องหยุดการกรองเพื่อนำเอาไส้กรองหรือเยื่อแผ่นออกมาล้างทำความสะอาด ดังนั้นการกรองแบบไหลตั้งฉาก จึงเหมาะสมกับสารละลายที่ประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และมีความเข้มข้นต่ำ

2. การกรองแบบไหลขวาง (Cross-flow microfiltration) เป็นการกรองโดยที่มีทิศทางของสายป้อนไหลขนานกับเยื่อแผ่น โดยใช้กันอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน การป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีผลต่อแรงเฉือนทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าเยื่อแผ่น ดังนั้นจึงลดการเกิดคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (concentration polarization : CP) จึงมีการสะสมของเค้กเพียงบาง ๆ เท่านั้น การลดลงของฟลักซ์ ไม่มากเท่ากับการกรองแบบไหลตั้งฉาก จึงเหมาะสำหรับสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันจึงเป็นไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 3.12 แสดงการเปรียบเทียบการกรองแบบไหลตั้งฉากและแบบไหลขนาน (สิทธิพันธ์, 2539)

### การกรองแบบไหลตั้งฉาก (Dead-end microfiltration)

เป็นการกรองที่มีทิศทางของสายป้อนตั้งฉากกับพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวของเยื่อแผ่นที่เรียกว่าเค้ก (Cake) การสะสมของเค้กทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้น และฟลักซ์ ลดลงอย่างรวดเร็ว ซึ่งเราจะสามารถหาค่าฟลักซ์ได้จากสมการ

$$J_v = \left( \frac{1}{A} \right) \times \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (3)$$

โดย  $J_v$  คือฟลักซ์ของเพอมีเอท (ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง)

$A$  คือพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ใช้ในการกรอง (ตารางเมตร)

$V$  คือปริมาตรของสายเพอมีเอท (ลิตร)

$t$  คือเวลา (ชั่วโมง)

และฟลักซ์ยังคิดได้จากค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นดังสมการ

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu_v (R_m + R_c)} \quad (4)$$

โดย  $\Delta P$  คือผลต่างความดันคร่อมเยื่อแผ่น (ปาสคาล)

$\mu_v$  คือความหนืดของสารละลาย (ปาสคาล.วินาที)

$R_m, R_c$  คือความต้านทานของเยื่อแผ่นและเค้ก (เมตร<sup>-1</sup>)

จากสมการจะเห็นว่าเมื่อเรากรองไปเรื่อยๆจะทำให้เค้กมีปริมาณมากขึ้น ซึ่งมีผลทำให้ค่าความต้านทานของเยื่อแผ่นมีค่ามากขึ้น จะส่งผลทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลง ในปัจจุบันมีการใช้การกรองแบบนี้ในการกรองน้ำบริโภคน้ำ เพราะน้ำที่นำมากรองจะมีความเข้มข้นของอนุภาคในน้ำต่ำจึงสามารถใช้การกรองแบบนี้ได้อย่างดี แต่ยังมีข้อเสียตรงที่ไส้กรองที่ทำขึ้นจะทำแบบชั้นเดียวและหนา (Deep-bed filter) ซึ่งมีข้อเสียคืออนุภาคสามารถที่จะเข้าไปอุดตันอยู่ในรูพรุนของไส้กรองซึ่งเรียกว่าการเกิดฟาวลิง (Fouling) ได้ มีผลทำให้ค่าฟลักซ์มีค่าลดลงและไม่สามารถล้างอนุภาคออกจากรูพรุนได้ วิธีการแก้ข้อเสียนี้นี้คือการเคลือบเยื่อแผ่นบนไส้กรองอีกครั้งหนึ่งซึ่งจะทำให้อนุภาคไม่สามารถเข้าไปอุดตันอยู่ในรูพรุนได้ แต่จะสะสมอยู่ที่ผิวของเยื่อแผ่นทำให้สามารถล้างไส้กรองได้ ช่วยยืดอายุการใช้งานของไส้กรอง

## ฟาวลิง (Fouling)

เกิดจากการเก็บกักอนุภาคหรือการดูดซับของตัวถูกละลายภายในรูพรุนและบนผิวหน้าเยื่อแผ่น ซึ่งเห็นได้ชัดว่าฟาวลิงจะเกิดได้ใกล้ชิดและยึดติดแน่นกับเยื่อแผ่นมากกว่า concentration polarization และ เจลโพลาริเซชัน

ลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของฟาวลิงคือ ไม่สามารถใช้วิธีการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (เช่นเพิ่มอัตราการไหลหรือปรับเปลี่ยนความดัน) หรือวิธีการง่ายๆ เช่นการล้างน้ำ ในการกำจัดชั้นฟาวลิงออกจากเยื่อแผ่น จึงจำเป็นต้องใช้สารทำความสะอาด ตรงกันข้ามกับคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน (concentration polarization) และ เจลโพลาริเซชันคือฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจากการเกิด concentration polarization และ เจลโพลาริเซชัน สามารถทำให้ฟลักซ์เพิ่มกลับคืนได้โดยการเปลี่ยนสภาวะการทำงานหรือการล้างน้ำ อาจกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า concentration polarization และ เจลโพลาริเซชันเป็นกระบวนการผันกลับ ส่วนฟาวลิงเป็นกระบวนการที่ไม่ผันกลับ

ดังนั้นจะสรุปได้ว่าฟาวลิงอาจเกิดด้วยปรากฏการณ์ต่อไปนี้

1. การดูดซับ
2. การเก็บกักพร้อมกับการหลุดออก
3. การเก็บกักโดยไม่มีการหลุดออก
4. การอุดตันหรือปิดกั้นรูพรุนของตัวถูกละลาย

ฟาวลิงนอกจากจะทำให้ฟลักซ์ลดลงแล้วยังทำให้คุณสมบัติการกักกันสารเปลี่ยนแปลงไปด้วย โดยกลไกการเกิดฟาวลิงมี 2 ขั้นตอนคือ การเกิดฟาวลิงภายในรูพรุน และการสร้างชั้นของตัวถูกละลายบนผิวเยื่อแผ่น ซึ่งขึ้นกับทั้งขนาดรูพรุนและขนาดตัวถูกละลาย แต่ฟาวลิงจะมีผลกระทบกับเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนใหญ่มากกว่าตัวถูกละลาย ดังนั้นการกักกันตัวถูกละลายของเยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันจึงขึ้นอยู่กับทั้งการเกิดเจลโพลาริเซชันและการเกิดฟาวลิงด้วย



(ก) เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าตัวถูกละลาย



(ข) เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลาย



(ค) เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายมาก

รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะการเกิดฟาวลิงของเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนขนาดต่างๆกันเทียบกับขนาดตัวถูกละลาย (รัตนา, 2543)

#### ค่าการกักเก็บสาร (Rejection)

เป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าเยื่อแผ่นนี้สามารถกักเก็บสารได้มากน้อยแค่ไหน ค่าการกักเก็บสามารถหาได้จากสมการ

$$R = \left(1 - \frac{C_P}{C_B}\right) \times 100$$

โดย R คือค่าร้อยละการกักเก็บ

$C_P$  คือค่าความเข้มข้นของอนุภาคในสายเพอร์มิเอท

$C_B$  คือค่าความเข้มข้นของอนุภาคในสายป้อน

โดยในงานวิจัยนี้จะใช้วิธีการนับจำนวนอนุภาคหรือเซลล์ในสารละลายต่อปริมาตรแทน เนื่องจากอนุภาคหรือเซลล์ในสารละลายที่ใช้ในการทดลองมีความเข้มข้นต่ำมาก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 4

### อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

#### สารเคมี

1. ไข่ไก่
2. น้ำกลั่น
3. กรดซัลฟิวริก 98% ยี่ห้อ AnalaR
4. ยีสต์
5. เชื้อ *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599
6. น้ำบาดาลจากอำเภอพระประแดง จังหวัดสมุทรปราการ

#### อุปกรณ์

1. ชุดกลั่น
2. บีกูญญากาศ
3. กรวยกรอง
4. กระจกกรองเบอร์ 1
5. เครื่องชั่งตวงวัดสองตำแหน่ง
6. เครื่องปั่น
7. เครื่องบดแบบลูกกลิ้ง (Ball Mill)
8. ชุดการเตรียมสารละลายซิลและเยื่อแผ่น
9. เตาอบ
10. เตาเผา 1200 องศาเซลเซียส
11. เครื่องตัดความเร็วสูงด้วยใบเพชร
12. เครื่องวัดความเหนียวแบบ Brookfield , Brookfield Inc., USA
13. เครื่องวิเคราะห์ขนาดรูพรุนด้วยปรอท (Pore sizer)
14. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron microscope)
15. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron microscope)
16. ชุดทดสอบการกรองและไส้กรองของบริษัท T.C Filter

## วิธีการทดลอง

### 1. ศึกษาลักษณะของไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ

1.1 ศึกษาถึงลักษณะพื้นผิวของไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบ โดยการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เตรียมตัวอย่างโดยนำไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบไปตัดด้วยเครื่องตัดความเร็วสูงแบบใบเพชรให้มีขนาดเท่ากับสตัด แล้วนำไปฉายด้วยทอง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด

1.2 ศึกษาถึงขนาดรูพรุนและความพรุนตัวของไส้กรอง โดยการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดรูพรุนด้วยปรอท เตรียมตัวอย่างโดยนำไส้กรองที่ตัดแล้วไปชั่งให้ได้น้ำหนักประมาณ 0.3-0.4 กรัม แล้วนำไปอบที่ 200 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10-15 ชั่วโมงเพื่อระเหยน้ำที่อยู่ในรูพรุน แล้วนำไปวัดขนาดรูพรุนและความพรุนตัวด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดรูพรุนด้วยปรอท

### 1.3 วัดความหนาของไส้กรองชนิดหนาปกติและชนิดบาง

ไส้กรองชนิดหนาปกติหมายถึงไส้กรองที่ใช้งานในปัจจุบัน

ไส้กรองชนิดบางหมายถึงไส้กรองที่ผ่านการลดความหนาแล้ว

### 2. การเตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต

นำซีเมนต์จากโรงงานมาทำการบดและผ่านกรรมวิธีต่างๆตามวิธีของสิรินธร (สถาบันโลหะและวัสดุ, 2542) จะได้สารละลายโซเดียมซิลิเกตที่มีฤทธิ์เป็นด่าง มีความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยมวลต่อปริมาตร

### 3. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดที่ใช้กับค่าความเป็นกรดเบส

#### 3.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตตามข้อ 2

3.2 นำสารละลายที่ได้มาผสมกับน้ำให้ได้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 0.0143 เปอร์เซ็นต์โดยโมลต่อปริมาตร แล้วกวนให้เข้ากัน แล้วค่อยๆเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นที่ละ 5 มิลลิลิตรจนถึง 75 มิลลิลิตรลงในสารละลายตั้งต้น 50 มิลลิลิตร แล้ววัดค่าความเป็นกรดเบสจนได้ค่าความเป็นกรดเท่ากับ 1

### 4. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างสารที่ใช้กับเวลาในการเกิดเจล (Gel Time , $T_g$ )

#### 4.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตตามข้อ 2

4.2 ปรับปริมาณของสารทั้งหมดที่เข้าทำปฏิกิริยาโดยใช้ปริมาตรทั้งหมดเท่ากับ 100 มิลลิลิตรคือใช้สารละลายโซเดียมซิลิเกตตั้งแต่ 0.015-0.055 % โดยโมลต่อปริมาตร ปรับปริมาณกรดตามค่าอัตราส่วนระหว่างกรดซัลฟูริกและสารละลายโซเดียมซิลิเกต โดยเลือกที่จะใช้ค่าเท่ากับ 0.6-7 ดังตารางที่ 4.1

4.3 ผสมสารเข้าด้วยกัน แล้วกวนแรงๆประมาณ 10 นาที

4.4 ทิ้งไว้จนกลายเป็นเจล โดยดูจากการใช้แท่งเหล็กจุ่มลงไปในส่วนละลาย ก่อนที่จะเกิดเจล ของเหลวจะไม่สามารถติดก้านเหล็กขึ้นมาได้ และเมื่อเวลาผ่านไประยะหนึ่งเมื่อลองจุ่มของเหลวจะสามารถติดขึ้นมาได้ และเมื่อเกิดเป็นเจลก็ลองจุ่มอีกครั้งจะทำให้ไม่ติดขึ้นมา นับเวลาตั้งแต่ไม่ติดครั้งแรกจนไม่ติดขึ้นมาอีกครั้งเป็นเวลาในการเกิดเจล

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าสัดส่วนโมลของน้ำต่อโมลของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $R_w$ ) ที่ความเข้มข้นของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (%โมลต่อปริมาตร) และสัดส่วนโมลของกรดต่อโมลของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $R_a$ ) ต่างๆ

$\text{Na}_2\text{SiO}_3$ (%mol/v)	$R_a=0.6$	$R_a=1$	$R_a=2$	$R_a=3$	$R_a=4$	$R_a=5$	$R_a=6$	$R_a=7$
0.015	369.33	369.33	369.33	369.33	369.33	369.33	369.33	369.33
0.016	346.25	346.25	346.25	346.25	346.25	346.25	346.25	346.25
0.017	325.88	325.88	325.88	325.88	325.88	325.88	325.88	325.88
0.018	307.22	307.22	307.22	307.22	307.22	307.22	307.22	307.22
0.019	291.05	291.05	291.05	291.05	291.05	291.05	291.05	291.05
0.02	276.50	276.50	276.50	276.50	276.50	276.50	276.50	276.50
0.021	262.86	262.86	262.86	262.86	262.86	262.86	262.86	262.86
0.022	250.91	250.91	250.91	250.91	250.91	250.91	250.91	250.91
0.023	240	240	240	240	240	240	240	240
0.024	230	230	230	230	230	230	230	230
0.025	220.4	220.4	220.4	220.4	220.4	220.4	220.4	220.4
0.035	156.29	156.29	156.29	156.29	156.29	156.29	156.29	156.29
0.045	120.22	120.22	120.22	120.22	120.22	120.22	120.22	120.22
0.055	97.09	97.09	97.09	97.09	97.09	97.09	97.09	97.09

\*หมายเหตุ จากการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนโมลของกรดต่อโมลของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $R_a$ ) ที่แต่ละความเข้มข้นของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  จะมีผลทำให้ค่าสัดส่วนโมลของน้ำต่อโมลของ  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  ( $R_w$ ) ลดลงน้อยมาก (ทศนิยมตำแหน่งที่ 4)

5. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับความหนืด
  - 5.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตตามข้อ 2
  - 5.2 เตรียมสารละลายโซลที่อัตราส่วนระหว่างกรดซัลฟิวริกกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 5 6 และ 7 ซึ่งเป็นภาวะที่ใช้เวลาในการเกิดเจลเร็ว เตรียมสารปริมาณ 20 มิลลิลิตร
  - 5.3 นำไปวัดความหนืดตามเวลาโดยใช้เครื่องวัดความหนืดและบันทึกค่า
  
6. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เติมลงไปกับความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป
  - 6.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต
  - 6.2 เตรียมสารละลายที่อัตราส่วนระหว่างกรดซัลฟิวริกกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 7 ซึ่งใช้เวลาในการเกิดเจลงน้อยที่สุด โดยเตรียมสารปริมาณ 20 มิลลิลิตร
  - 6.3 นำไปวัดความหนืดแล้วบันทึกค่า
  - 6.4 เมื่อได้ความหนืดที่ 300 เซนติพอยด์ก็นำออกมาเติมน้ำปริมาณ 5 มิลลิลิตร (คิดเป็น 25 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรตั้งต้น) แล้วนำกลับเข้าไปวัดความหนืดต่อ และบันทึกค่า
  - 6.5 ทำเหมือนข้อ 6.4 แต่เปลี่ยนปริมาณที่เติมเป็น 7.5 มิลลิลิตร (คิดเป็น 37.5 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรตั้งต้น), 10 มิลลิลิตร (คิดเป็น 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรตั้งต้น) และ 20 มิลลิลิตร (คิดเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรตั้งต้น)ตามลำดับ
  - 6.6 ทำเหมือนข้อ 6.4 และ 6.5 แต่เปลี่ยนความหนืด เป็น 600 และ 1000 เซนติพอยด์ตามลำดับ
  
7. ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดอนุภาคของโซลต่อความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป
  - 7.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกต
  - 7.2 เตรียมสารละลายที่อัตราส่วนระหว่างกรดซัลฟิวริกกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 7 ที่สารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.025 % โดยโมลต่อปริมาตร โดยเตรียมสารปริมาณ 20 มิลลิลิตร
  - 7.3 ทิ้งไว้ให้เริ่มเกิดปฏิกิริยา
  - 7.4 ดูดสารที่ความหนืด 3, 10, 15, 20, 30, 50, 100, 200, และ 300 เซนติพอยด์มาหยดในขวดที่เติมน้ำไว้ประมาณ 10 มิลลิลิตร 1-2 หยด เขย่าแรงๆให้เข้ากัน
  - 7.5 นำไปส่องด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (TEM)



8. ศึกษาถึงลักษณะของอนุภาคของโซลที่เคลือบบนเยื่อแผ่นด้วยวิธีการจุ่ม (Dip Coating)

8.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตตามข้อ 2

8.2 เตรียมสารละลายโซลที่ค่าอัตราส่วนระหว่างกรดซิลฟิวริกกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 7 เมื่อถึงเวลาที่ได้ความหนืดเท่ากับ 600 เซนติพอยด์ ก็เติมน้ำลงไปเป็นปริมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาตรตั้งต้น เพื่อลดอุณหภูมิความหนืด (ทำให้สารละลายโซลเสถียร) แล้วกวนแรงๆ ประมาณ 10 นาที เพื่อให้สารเข้ากันดี

8.3 นำไส้กรองมาตัดด้วยเครื่องตัดใบเพชรให้มีขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตรและยาว 3 เซนติเมตร จำนวน 10 ชิ้น นำชิ้นงานไปจุ่มในสารละลายโซลเป็นเวลา 2, 5, 15, 30, 60 วินาที และ 2, 5, 15, 30, 60 นาทีตามลำดับ ตามรูปที่ 4.1

8.4 นำชิ้นงานที่ได้ไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

8.5 นำชิ้นงานไปล้างกับน้ำกลั่น จนได้ค่าความเป็นกรดเบสประมาณ 7 ตามรูปที่ 4.2

8.6 นำไปอบที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

8.7 นำไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที โดยมีอัตราในการเพิ่มของอุณหภูมิเท่ากับ 5 องศาเซลเซียสต่ออนาที

8.8 นำชิ้นงานไปตัดขวาง แล้วนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) เพื่อดูภาพตัดขวางและภาพผิวหน้าของชิ้นงาน และวิเคราะห์หาความพรุนตัวและขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวิเคราะห์รูพรุนด้วยปรอท (Pore sizer)



รูปที่ 4.1 อุปกรณ์การเคลือบด้วยวิธีการจุ่ม



รูปที่ 4.2 อุปกรณ์ในล้างขึ้นงานให้ได้ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 7

9. ศึกษาสมบัติการกรองของไส้กรองที่เคลือบ

9.1 เตรียมสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ตามข้อ 4

9.2 นำไส้กรองชนิดบางมา 2 อัน อันหนึ่งจุ่มในสารละลายโซลที่เตรียมได้ เป็นเวลา 2 วินาที อันที่สองจุ่มในสารละลายโซลเป็นเวลา 60 วินาที แล้วนำขึ้นมาทิ้งไว้ให้แห้ง

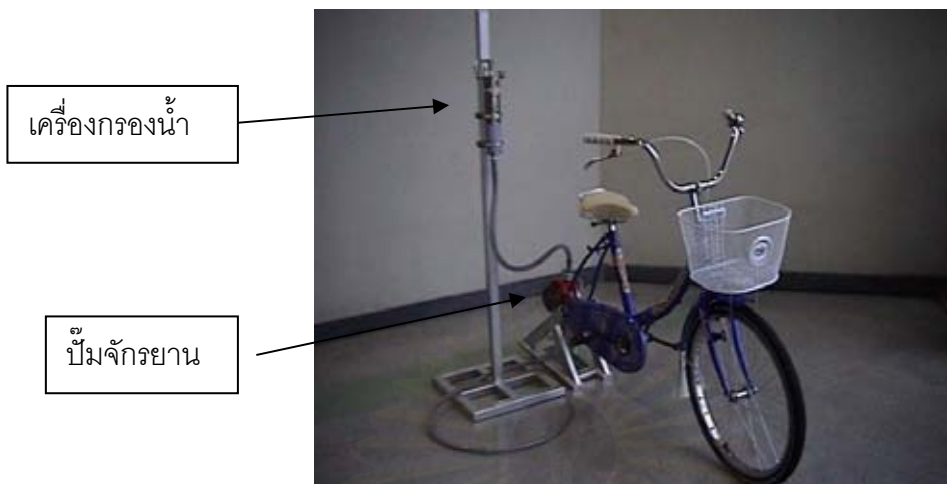
9.3 นำไส้กรองทั้ง 2 อันไปอบที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง

9.4 นำไส้กรองทั้ง 2 อันไปล้างด้วยน้ำกลั่น จนได้ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 7 แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

9.5 นำไส้กรองที่ได้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส/นาที เป็นเวลา 30 นาที

9.6 นำไส้กรองที่ได้และไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบชนิดหนาปกติและชนิดบางมาทดสอบหาฟลักซ์และค่าการกักเก็บด้วยน้ำกลั่น น้ำบาดาล ชื่อ *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599 และยีสต์ โดยการนำมาต่อเข้ากับปั๊มจักรยานตามรูปที่ 4.3 และ 4.4

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 เครื่องกรองต้นแบบ



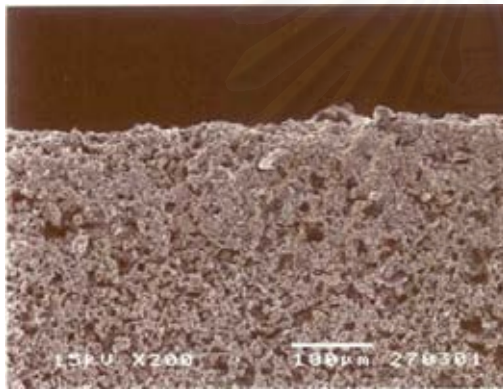
รูปที่ 4.4 ปั๊มจักรยาน

## บทที่ 5

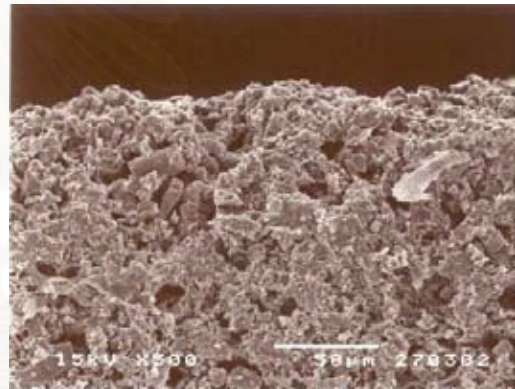
### ผลการทดลอง วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

#### 5.1 ลักษณะของไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ

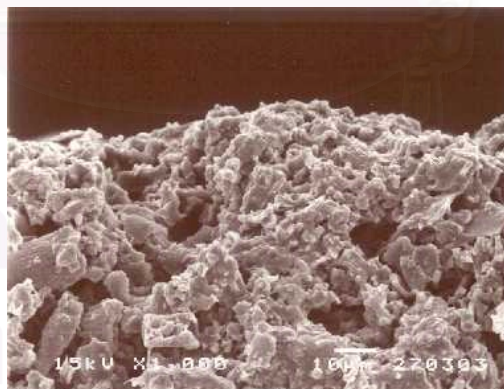
ไส้กรองจากบริษัท T.C. Filter มีลักษณะเป็นรูปทรงกระบอกปลายตันขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5.5 เซนติเมตร ความหนา 7 มิลลิเมตร ยาว 24 เซนติเมตร นำมากลึงผิวออก เพื่อให้ไส้กรองมีความหนาลดลง ไส้กรองชนิดบางมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.2 เซนติเมตร ความหนา 5.5 มิลลิเมตร ยาว 24 เซนติเมตร



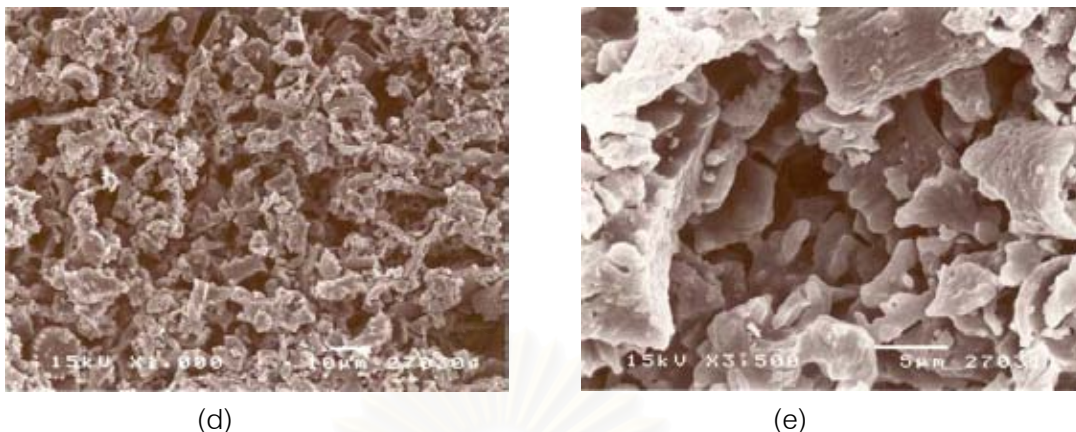
(a)



(b)



(c)



รูปที่ 5.1 ภาพจาก SEM ของไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ (a) ภาพตัดขวาง ขยาย 200 เท่า (b) ภาพตัดขวาง ขยาย 500 เท่า (c) ภาพตัดขวาง ขยาย 1000 เท่า (d) ภาพตัดขวางภายในไส้กรอง ขยาย 1000 เท่า (e) ภาพถ่ายผิวหน้าของไส้กรอง ขยาย 3500 เท่า

จากรูปที่ 5.1 แสดงภาพตัดขวางของไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบที่ถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) ไส้กรองมีลักษณะสมมาตร รูพรุนกระจายสม่ำเสมอตลอดแนวตัดขวาง มีความพรุนตัว 70.69 เปอร์เซ็นต์ รูพรุนส่วนใหญ่มีขนาด 2 ไมโครเมตร รูพรุนเฉลี่ย 0.05 ไมโครเมตร ไส้กรองชนิดนี้มีค่าฟลักซ์น้ำกลั่นเท่ากับ 874.83 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง ไส้กรองชนิดบางให้ค่าฟลักซ์น้ำกลั่น 972 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง

## 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับค่าความเป็นกรดเบส

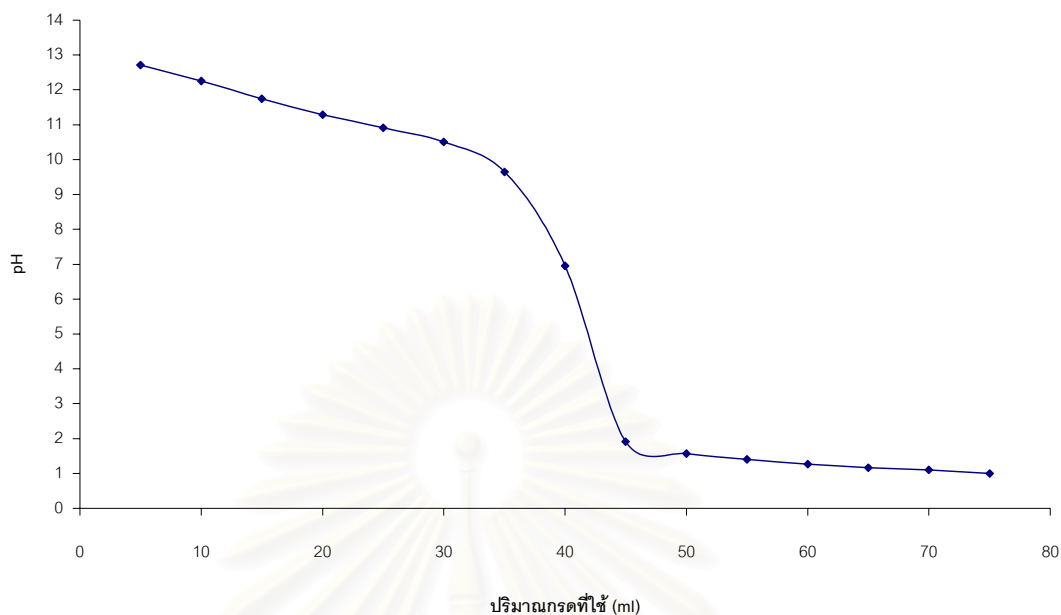
เนื่องจากอนุภาคโซลที่เกิดขึ้นในช่วงที่สารละลายมีค่าเป็นกรดจะมีขนาดเล็กกว่าในช่วงที่สารละลายมีค่าเป็นด่าง ดังนั้นในหัวข้อนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะหาอัตราส่วนระหว่างกรดซัลฟิวริกและสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ทำให้สารละลายมีค่าความเป็นกรดเบสอยู่ในช่วงกรดคือประมาณ 1

ในการทดลองใช้สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ 0.0143 เปอร์เซ็นต์โดยโมลต่อปริมาตร โดยใช้ปริมาตรตั้งต้น 50 มิลลิลิตร เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้นลงไปทีละ 5 มิลลิลิตรจนถึง 75 มิลลิลิตร คำนวณค่าสัดส่วนโมลของกรดต่อโมลของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ ( $R_p$ ) ได้แสดงในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 แสดงปริมาณกรดซัลฟิวริกที่ใช้กับค่า  $R_a$  และค่าความเป็นกรดเบสที่วัดได้

เติมกรด (ml)	$R_a$	PH
5	0.35	12.71
10	0.7	12.25
15	1.05	11.74
20	1.4	11.29
25	1.75	10.91
30	2.1	10.51
35	2.45	9.65
40	2.8	6.95
45	3.15	1.91
50	3.5	1.57
55	3.85	1.40
60	4.2	1.27
65	4.55	1.16
70	4.9	1.10
75	5.24	1.00

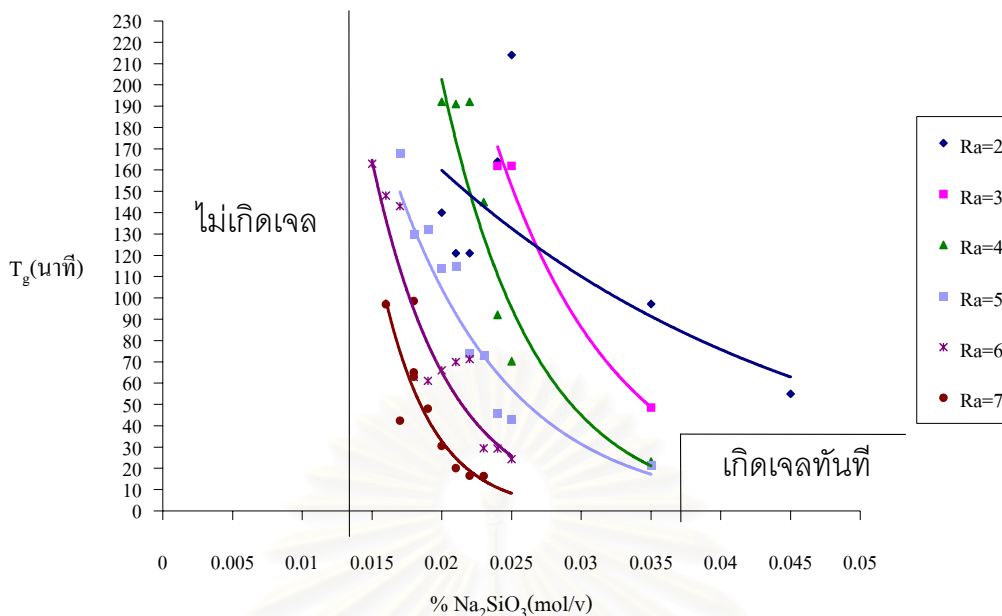
จากรูปที่ 5.2 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่เติมลง สารละลาย กับค่าความเป็นกรดเบส พบว่าเมื่อเติมกรดลงไปโดยที่ให้ค่า  $R_a$  มีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.35 ถึง 5.24 จะทำให้ค่าความเป็นกรดเบสมีค่าลดลงจนกระทั่งคงที่ที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 1 ดังนั้น ในการทดลองต่อไปจะใช้ค่า  $R_a$  ตั้งแต่ 0.6-7



รูปที่ 5.2 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของกรดซัลฟิวริกที่เติมในสารละลายกับค่าความเป็นกรดเบสที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่ 0.0143 เปอร์เซ็นต์โดยโมลต่อปริมาตร

### 5.3 อิทธิพลขององค์ประกอบในสารละลายต่อเวลาในการเกิดเจล

เนื่องจากสารละลายประกอบด้วย 3 องค์ประกอบคือสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ กรดซัลฟิวริกและน้ำ การแปรผลจะใช้ค่า  $R_a$  (โมลของกรดซัลฟิวริกต่อโมลของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์) และ  $R_w$  (โมลของน้ำต่อโมลของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์) ถ้ากำหนดความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซัลไฟด์คงที่ 0.025 % โมลต่อปริมาตรรวม 100 มิลลิลิตร เมื่อเพิ่มค่า  $R_a$  ค่า  $R_w$  จะลดลงดังแสดงในตารางในภาคผนวกและรูปที่ 5.3 ซึ่งมีผลต่อเวลาในการเกิดเจล



รูปที่ 5.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของโซเดียมซิลิเกตที่ใช้ ( $\% \text{SiO}_2$ ) กับเวลาในการเกิดเจล ( $T_g$ )

จากผลการทดลองพบว่า

1. เมื่อเพิ่มปริมาณกรดซัลฟิวริกและสารละลายโซเดียมซิลิเกต เวลาในการเกิดเจล ( $T_g$ ) จะมีค่าลดลงโดยมีค่า  $T_g$  ต่ำที่สุดอยู่ที่ 0.025 % สารละลายโซเดียมซิลิเกต (โมลต่อปริมาตร) และ  $R_a$  เท่ากับ 7 ถ้าเพิ่มปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตขึ้นไปอีกจะเกิดเจลทันที
2. เมื่อปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่ำกว่า 0.015 % โมลต่อปริมาตร ที่  $R_a$  ทุกค่า เวลาในการเกิดเจลนานขึ้นจนถึงขั้นไม่เกิดเจล

การเปลี่ยนแปลงจากสารละลายไหลไปสู่เจลนั้นต้องเกิด 2 ปฏิกริยาด้วยกันคือปฏิกริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกริยาควบแน่น โดยเวลาในการเกิดเจลจะช้าหรือเร็วนั้นขึ้นกับทั้ง 2 ปฏิกริยาเป็นหลักดังนี้

1. ถ้าปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาก กรดมาก น้ำน้อย อัตราการเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิสเร็วและปฏิกริยาควบแน่นเร็ว จะทำให้เวลาในการเกิดเจลเร็ว
2. ถ้าปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกตมาก กรดน้อย น้ำมาก อัตราการเกิดปฏิกริยาไฮโดรไลซิสเร็วและปฏิกริยาควบแน่นช้า จะทำให้เวลาในการเกิดเจลช้า



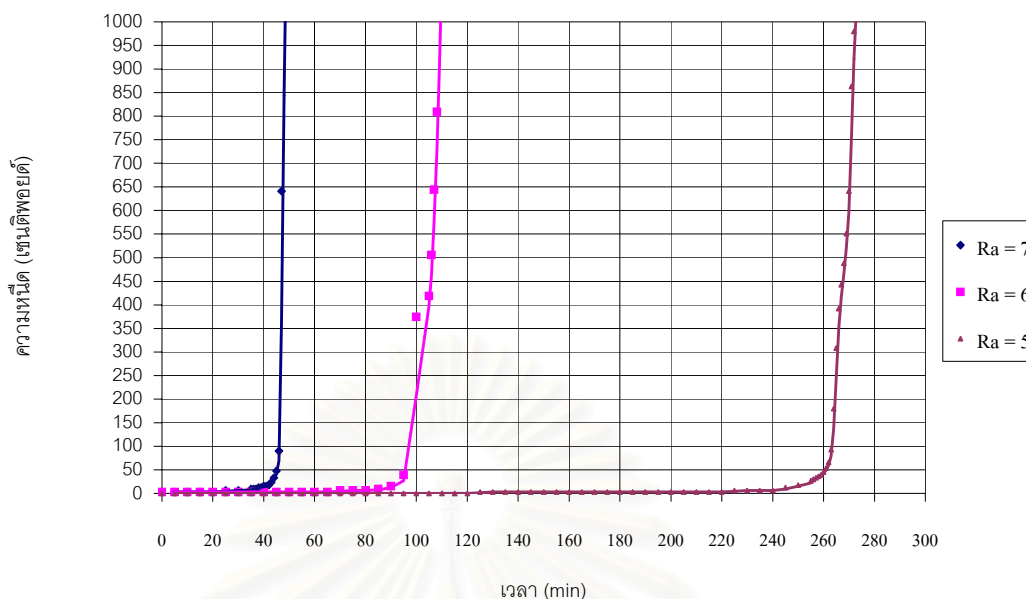
3. ถ้าปริมาณสารละลายโซเดียมซัลไฟต์น้อย กรดมาก น้ำมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสช้าและปฏิกิริยาควบแน่นช้า จะทำให้เวลาในการเกิดเจลช้า
4. ถ้าปริมาณสารละลายโซเดียมซัลไฟต์น้อย กรดน้อย น้ำมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสช้าและปฏิกิริยาควบแน่นช้า จะทำให้เวลาในการเกิดเจลช้า

ดังนั้นเราจึงเลือกใช้เวลาในการเกิดเจลที่เหมาะสม คือใช้ค่าปริมาณสารละลายโซเดียมซัลไฟต์ที่ 0.025 % โดยโมลต่อปริมาตร ปริมาณกรดที่ค่า  $R_u$  เท่ากับ 7 เพื่อเตรียมสารละลายโซลสำหรับการเคลือบไส้กรองต่อไป

#### 5.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดกับเวลาที่จะทำให้เกิดเจล และขนาดอนุภาคที่เปลี่ยนแปลงไป

ในการเกิดเจลจะเกิดจากการที่อนุภาคของโซลมาเกาะกันเป็นร่างแห ทำให้ความหนืดของสารละลายโซลมีค่ามากขึ้นและมีการเปลี่ยนแปลงขนาดอนุภาคของโซลตามความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปด้วย

จากรูปที่ 5.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปกับเวลา ที่ค่า  $R_u$  เท่ากับ 5, 6, และ 7 ที่ปริมาณสารละลายโซเดียมซัลไฟต์เท่ากับ 0.025 % โมลต่อปริมาตร พบว่าช่วงแรกค่าความหนืดจะคงที่ แต่เมื่อถึงเวลาหนึ่งความหนืดจะเพิ่มขึ้นทันทีจนกลายเป็นเจล และเวลาในการเกิดเจลมากขึ้นเมื่อ  $R_u$  มีค่าลดลง โดยเราจะเลือกที่ความหนืดประมาณ 300-1000 เซนติพอยด์มาทำการเคลือบเนื่องจากถ้าความหนืดมีค่ามากกว่า 1000 เซนติพอยด์ จะทำให้สารละลายโซลที่ได้เริ่มกลายเป็นเจล ไม่สามารถนำมาเคลือบได้ดี



รูปที่ 5.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ค่า  $R_a$  เท่ากับ 5, 6, และ 7 ที่ปริมาณสารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.025% โดยโมลต่อปริมาตร

จากผลการทดลองพบว่าความหนืดจะมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาทำให้ไม่สามารถที่จะจุ่มขึ้นงานได้เพราะว่าเมื่อเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสสมบูรณ์แล้วจะเกิดปฏิกิริยาควบแน่นอย่างต่อเนื่องทันที และจากปฏิกิริยาควบแน่นเมื่อใช้ปริมาณน้ำน้อยจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาควบแน่นเร็วขึ้น เวลาในการเกิดเจลจะสั้นลง จึงทำให้เกิดเจลได้อย่างรวดเร็ว ดังนั้นต้องทำการชลอปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำลงไปเพื่อให้ปฏิกิริยาควบแน่นมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้าลง

จากตารางที่ 5.2 และรูปที่ 5.5 แสดงค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไปกับปริมาณน้ำที่เติมลงไป พบว่าที่แต่ละความหนืดเมื่อเติมน้ำลงไปมากขึ้น ทำให้ค่าความหนืดรวมของสารละลายทั้งหมดมีค่าลดลง และพบว่าความหนืดมีค่าคงที่เมื่อเติมน้ำเท่ากับ 10 มิลลิลิตร (คิดเป็น 50 % ของปริมาณตั้งต้น) แต่ที่ความหนืด 1000 เซนต์โพยด์เมื่อเติมน้ำเพิ่มลงไป 10 มิลลิลิตร ของปริมาณตั้งต้น 20 มิลลิลิตร ยังไม่เพียงพอต่อการชลอปฏิกิริยา จะต้องเติมน้ำลงไป 12.5 มิลลิลิตร ของปริมาณตั้งต้น 20 มิลลิลิตร (คิดเป็น 62.5 % ของปริมาณตั้งต้น) จึงจะทำให้ความหนืดมีค่าคงที่ ดังนั้นการเติมน้ำลงไปในสารละลาย  $\geq 50\%$  ของปริมาณตั้งต้น จะช่วยชลอปฏิกิริยาควบแน่น ทำให้โซลมีความเสถียรอยู่ได้โดยไม่เป็นเจล

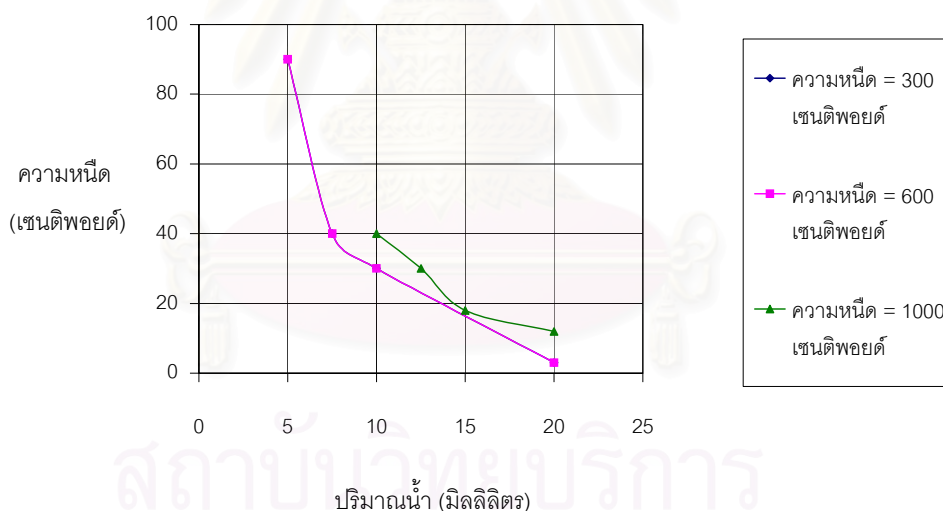
เมื่อทำการวัดขนาดอนุภาคโซลเสถียรที่ความหนืดเริ่มต้นต่างๆกัน พบว่าอนุภาคโซลในสารละลาย มีลักษณะเป็นแท่งยาว (Cluster-cluster aggregation) เป็นลักษณะของโซลที่เกิดจากการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาตามรูปที่ 5.6) เมื่อความหนืดเริ่มต้นเพิ่มขึ้น อนุภาคโซลมีขนาด

ยาวขึ้น โดยที่ความหนืดเริ่มต้น 300 เซนติพอยด์ อนุภาคโซลมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ไมโครเมตร ยาว 3 ไมโครเมตร

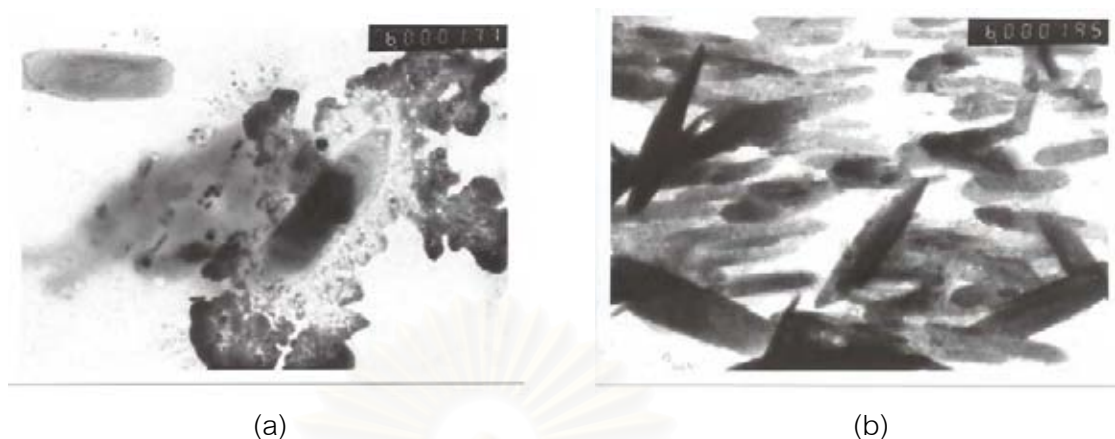
ตารางที่ 5.2 แสดงค่าความหนืดที่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณน้ำที่เติมลงไป ที่สารตั้งต้นปริมาณ 20 มิลลิลิตร

ความหนืด = 300 เซนติพอยด์		ความหนืด = 600 เซนติพอยด์		ความหนืด = 1000 เซนติพอยด์	
เติมน้ำ	ความหนืด	เติมน้ำ	ความหนืด	เติมน้ำ	ความหนืด
5	90+	5	90+	10	40+
7.5	40+	7.5	40+	12.5	30
10	30	10	30	15	18
20	3	20	3	20	12

+ หมายถึง ความหนืดยังมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้ไม่สามารถเคลือบได้



รูปที่ 5.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำที่เติมลงไปกับความหนืดที่เปลี่ยนแปลงไป



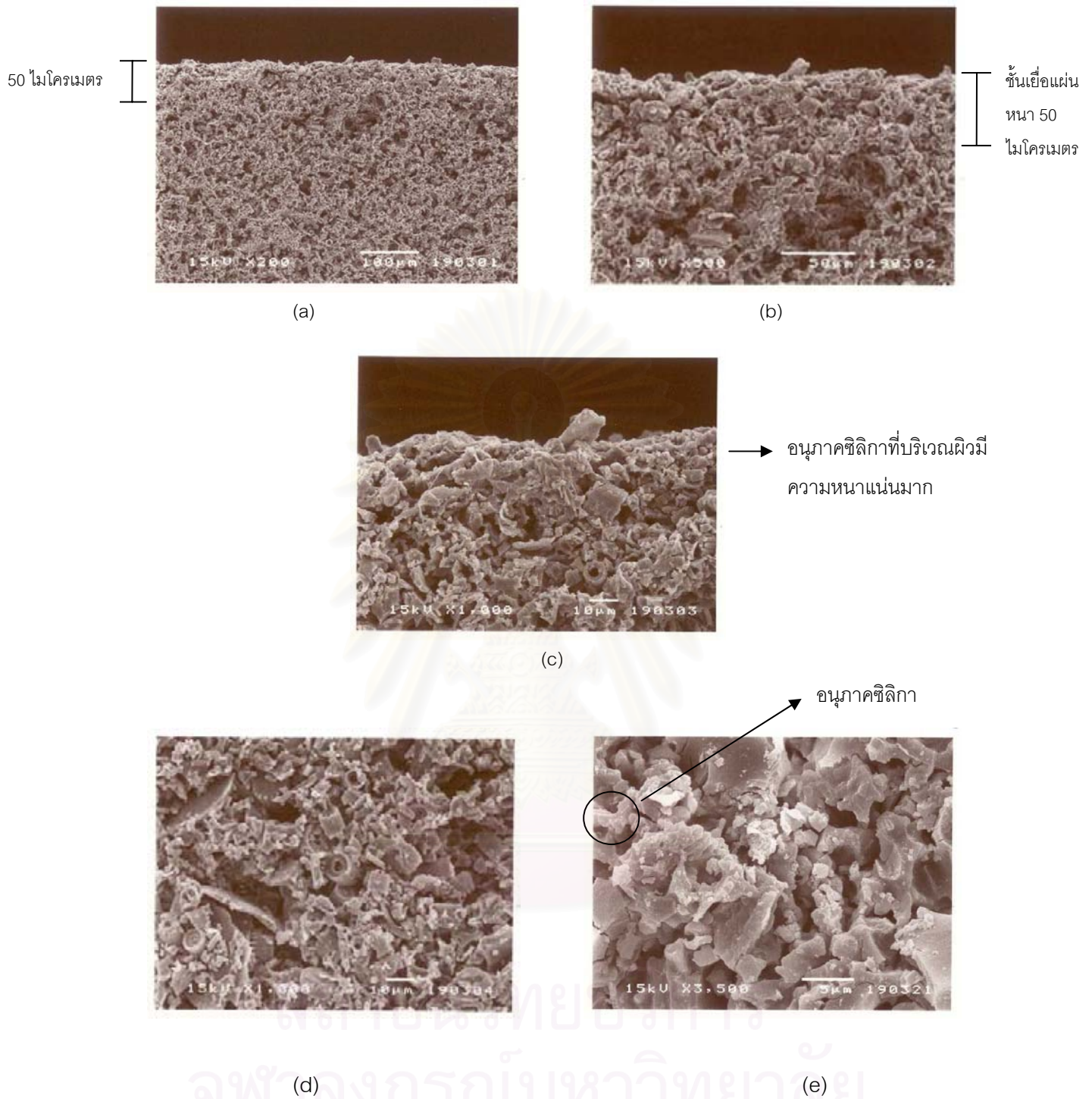
รูปที่ 5.6 รูปแสดงขนาดอนุภาคของโซลในสารละลายโซลที่ความหนืดต่างๆกัน (a) 3 เซนติพอยด์ (b) 300 เซนติพอยด์

### 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบ ขนาดรูปทูนและลักษณะของผิวหน้าเยื่อแผ่น

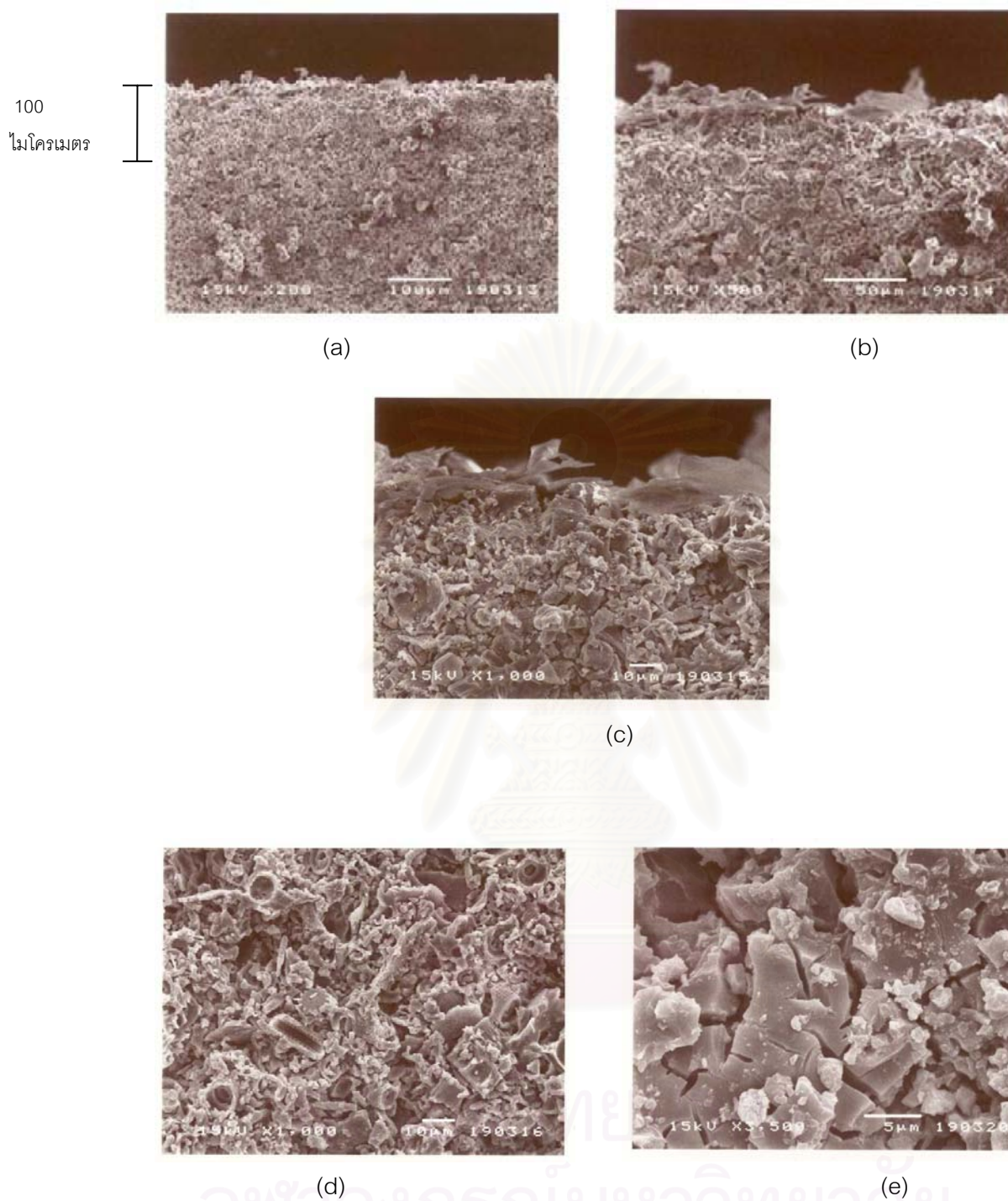
เริ่มต้นจากเตรียมสารละลายโซลที่สร้างขึ้นโดยผสมสารละลายโซเดียมซิลิเกต กรด และน้ำ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 0.025 % (โมลต่อปริมาตร) ค่าสัดส่วนโมลของกรดต่อโมลของสารละลายโซเดียมซิลิเกต ( $R_s$ ) เท่ากับ 7 กวนจนได้สารละลายโซลที่มีความหนืดที่ 600 เซนติพอยด์ ซึ่งทำให้ได้อนุภาคของโซลมีขนาดใหญ่กว่าสารละลายโซลที่ความหนืดเท่ากับ 300 เซนติพอยด์ (ผลจากข้อ 5.4 และรูปอนุภาคซิลิกาที่ปรากฏบนภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องผ่าน (TEM)) นำสารละลายที่ได้ไปทำการชลอปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำ 50 % ของปริมาณตั้งต้น ทำให้ได้สารละลายโซลมีความหนืดที่เหมาะสมต่อการเคลือบ นำสารละลายโซลที่ได้มาทำการเคลือบบนไส้กรองที่มีขนาดรูปทูนส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 2 ไมโครเมตร ที่เวลาในการเคลือบตั้งแต่ 2 วินาทีถึง 60 นาที จะทำให้ได้เยื่อแผ่นที่มีลักษณะรูปทูนดังแสดงในรูปที่ 5.7 ถึง 5.11

จากรูป 5.7 ถึง รูป 5.11 แสดงภาพตัดขวางและภาพพื้นผิวของไส้กรองที่ผ่านการเคลือบที่เวลาในการเคลือบต่างๆคือ 2 5 15 60 วินาทีและ 2 กับ 5 นาที พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบมากขึ้น อนุภาคของโซลจะเข้าไปอุดอยู่ในรูปทูนของไส้กรองที่บริเวณผิวของไส้กรองมากขึ้น

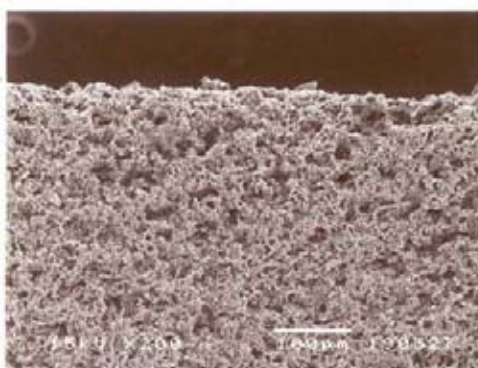
โดยพบว่าที่เวลา 2 วินาทีมีชั้นเยื่อแผ่นเกิดขึ้นหนาประมาณ 50 ไมโครเมตรและที่เวลา 15 วินาทีหนาประมาณ 100 ไมโครเมตร หลังจาก 15 วินาที ความหนาชั้นเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นเล็กน้อย แต่มีอนุภาคซิลิกาที่บริเวณผิวของไส้กรองหนาแน่นขึ้น



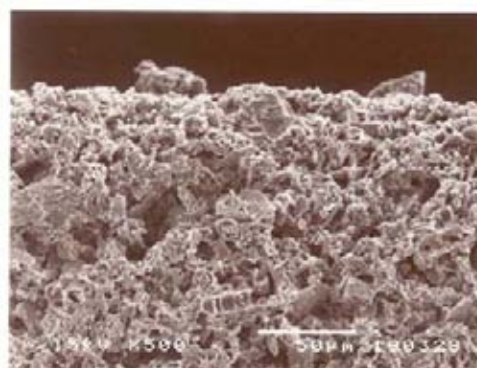
รูปที่ 5.7 แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 2 วินาที (a) ภาพตัดขวาง ขยาย 200 เท่า (b) ภาพตัดขวาง ขยาย 500 เท่า (c) ภาพตัดขวาง ขยาย 1000 เท่า (d) ภาพตัดขวาง ภายในไส้กรอง ขยาย 1000 เท่า (e) ภาพถ่ายผิวหน้าของไส้กรอง ขยาย 3500 เท่า (อนุภาคซิลิกา คือแท่งยาวๆ)



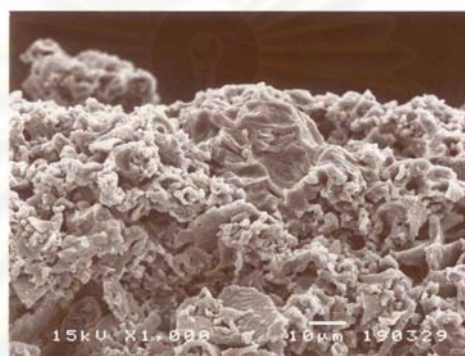
รูปที่ 5.8 แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 15วินาที (a) ภาพตัดขวาง ขยาย 200 เท่า (b) ภาพตัดขวาง ขยาย 500 เท่า (c) ภาพตัดขวาง ขยาย 1000 เท่า (d) ภาพตัดขวาง ภายในไส้กรอง ขยาย 1000 เท่า (e) ภาพถ่ายผิวหน้าของไส้กรอง ขยาย 3500 เท่า



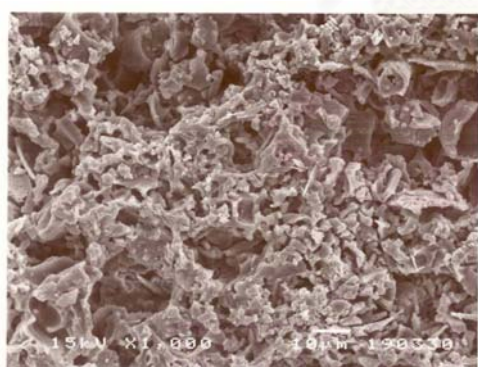
(a)



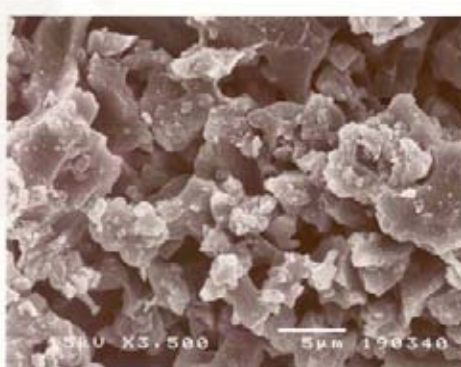
(b)



(c)

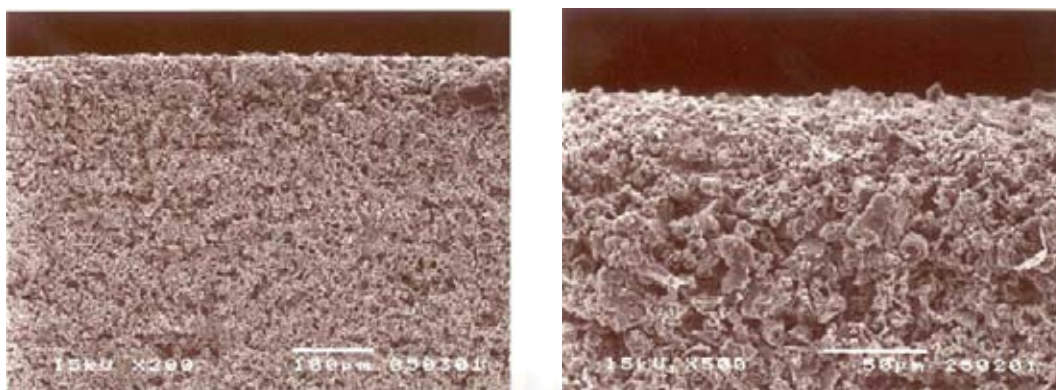


(d)



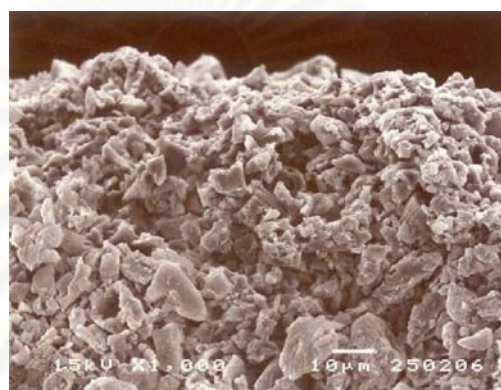
(e)

รูปที่ 5.9 แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 60 วินาที (a) ภาพตัดขวาง ขยาย 200 เท่า (b) ภาพตัดขวาง ขยาย 500 เท่า (c) ภาพตัดขวาง ขยาย 1000 เท่า (d) ภาพตัดขวางภายในไส้กรอง ขยาย 1000 เท่า (e) ภาพถ่ายผิวหน้าของไส้กรอง ขยาย 3500 เท่า

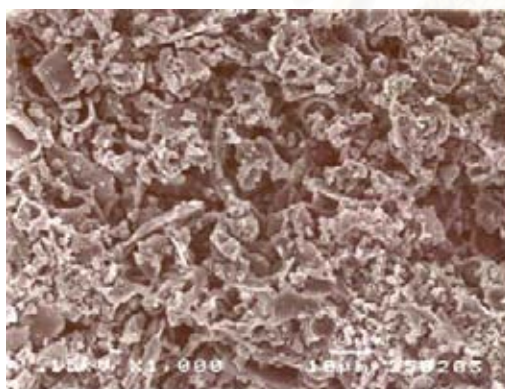


(a)

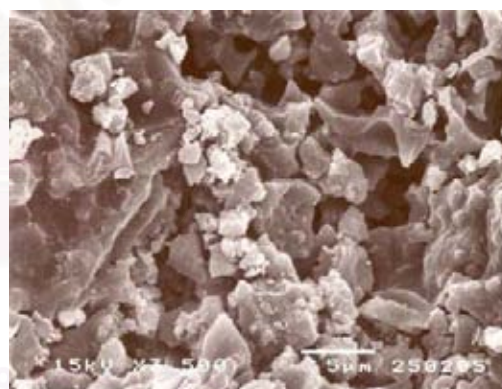
(b)



(c)



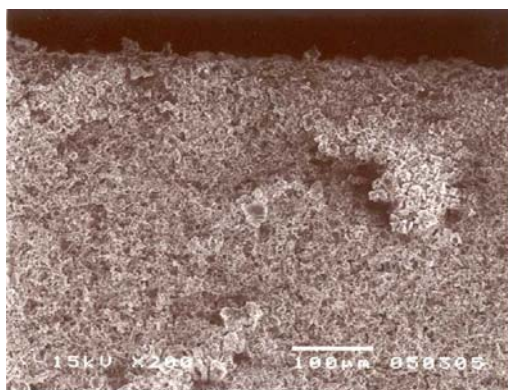
(d)



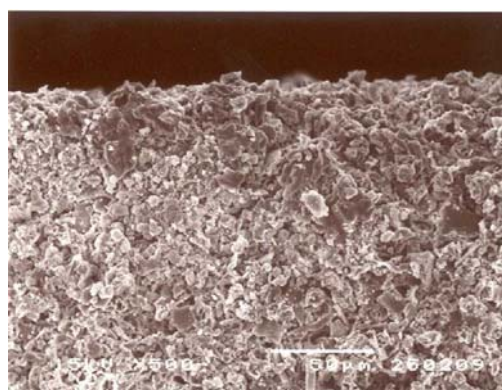
(e)

รูปที่ 5.10 แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 2 นาที (a) ภาพตัดขวาง ขยาย 200 เท่า (b) ภาพตัดขวาง ขยาย 500 เท่า (c) ภาพตัดขวาง ขยาย 1000 เท่า (d) ภาพตัดขวาง ภายในไส้กรอง ขยาย 1000 เท่า (e) ภาพถ่ายผิวหน้าของไส้กรอง ขยาย 3500 เท่า

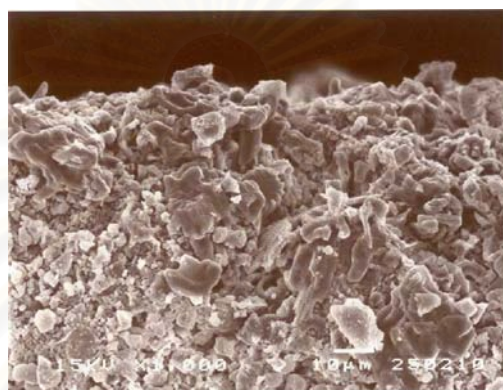




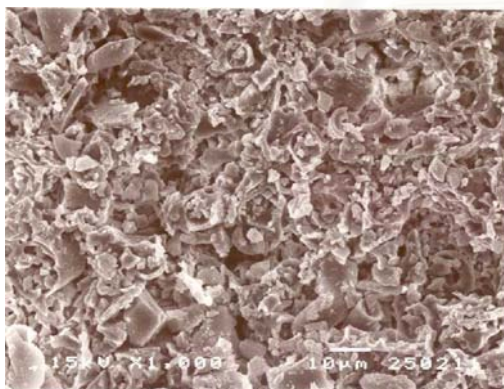
(a)



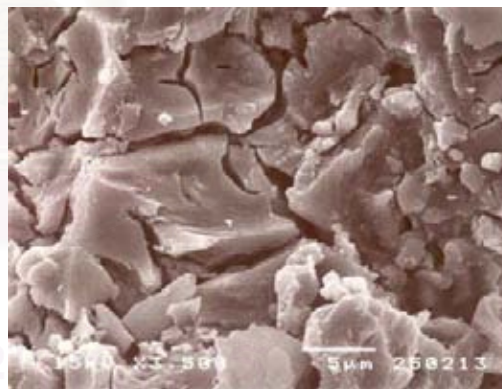
(b)



(c)



(d)

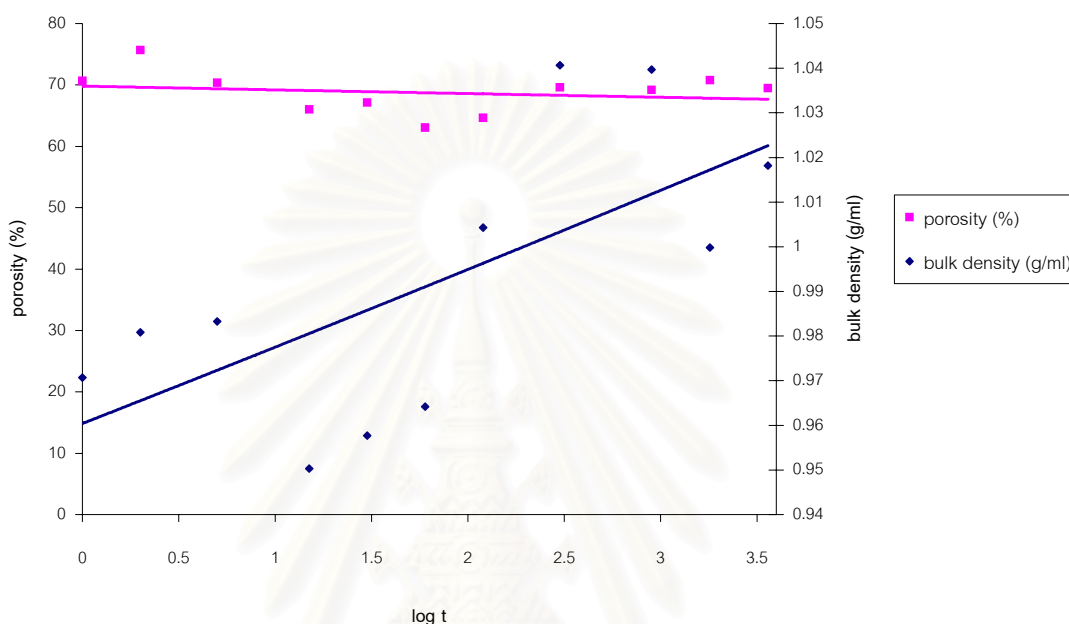


(e)

รูปที่ 5.11 แสดงภาพจาก SEM ที่ได้จากการเคลือบไส้กรองที่เวลา 5 นาที (a) ภาพตัดขวาง ขยาย 200 เท่า (b) ภาพตัดขวาง ขยาย 500 เท่า (c) ภาพตัดขวาง ขยาย 1000 เท่า (d) ภาพตัดขวาง ภายในไส้กรอง ขยาย 1000 เท่า (e) ภาพถ่ายผิวหน้าของไส้กรอง ขยาย 3500 เท่า

เมื่อเปรียบเทียบภาพถ่ายที่บริเวณผิวหน้าของไส้กรองที่ได้จากการเคลือบที่เวลาต่างๆกัน พบว่าเมื่อเวลาที่ใช้เคลือบเพิ่มขึ้น รูพรุนที่บริเวณผิวหน้าของไส้กรองมีขนาดเล็กลง และมีจำนวนน้อยลง เนื่องจากอนุภาคซิลิกาไปอุดรูและปิดผิวหน้าบางส่วนไว้

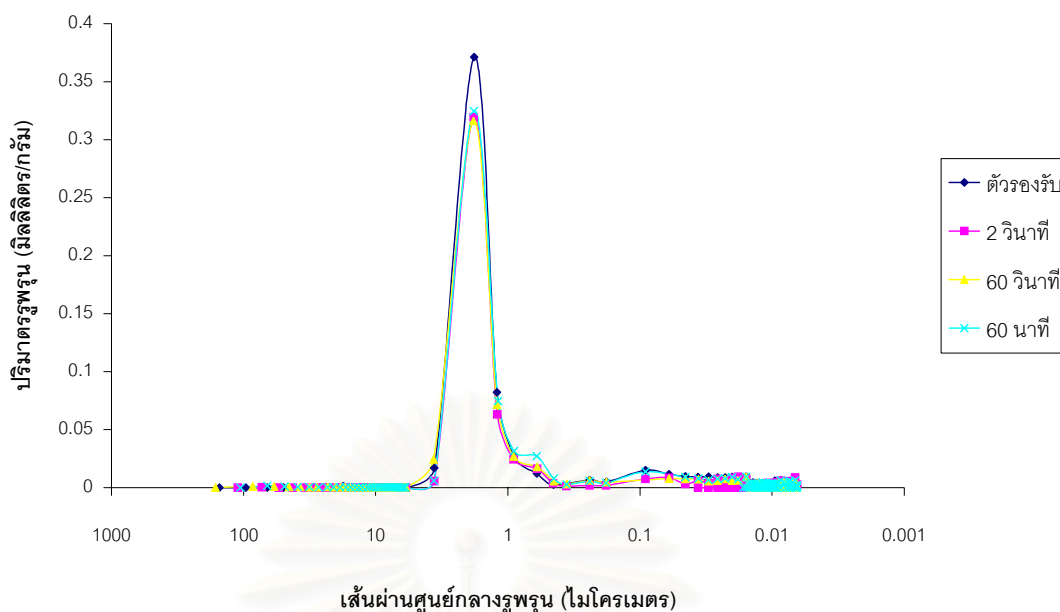
เหตุผลที่สนับสนุนการเกิดขึ้นเยื่อแผ่น โดยอนุภาคซิลิกาจะเข้าไปในรูพรุนของตัวรองรับคือ ค่าความพรุนตัวและค่าความหนาแน่นของไส้กรอง



รูปที่ 5.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับความพรุนตัวและความหนาแน่นของไส้กรอง

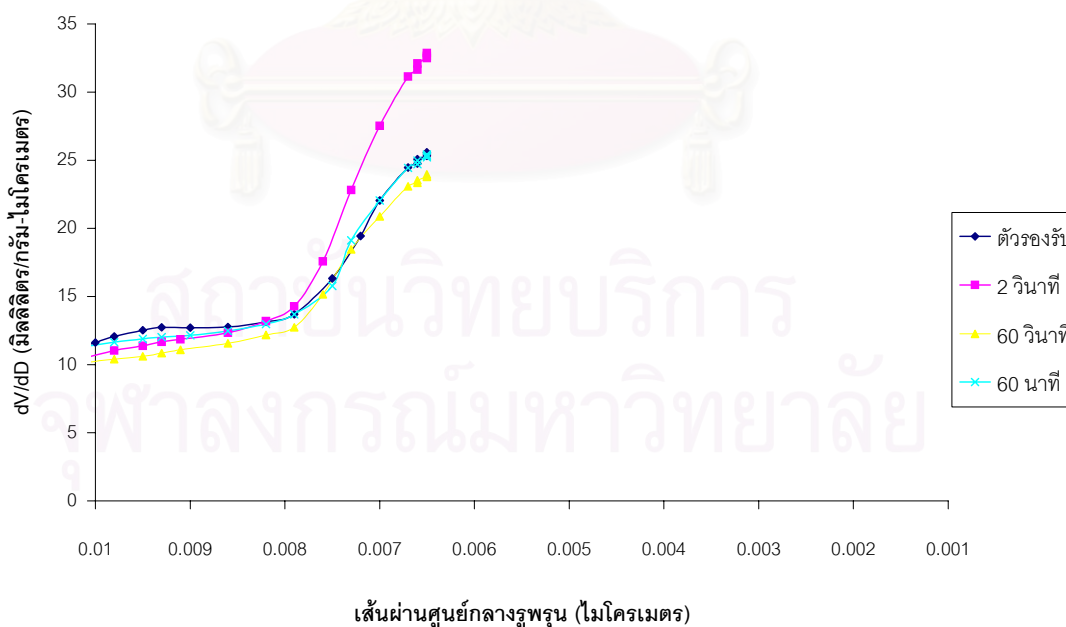
จากรูปที่ 5.12 แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับความพรุนตัวและความหนาแน่นของไส้กรอง พบว่าเมื่อใช้เวลาในการเคลือบมากขึ้นจะทำให้ความพรุนตัวมีค่าลดลงและความหนาแน่นของไส้กรองมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อนำไส้กรองมาเคลือบ อนุภาคของซิลิกาจะเข้าไปอุดรูพรุนที่ผิวของไส้กรองทำให้ปริมาตรของรูพรุนลดลง ส่งผลให้ค่าความพรุนตัวมีค่าลดลง และจะทำให้ค่าความหนาแน่นของไส้กรองมีค่าเพิ่มขึ้น โดยสรุปจะเห็นว่าไส้กรองที่ผ่านการเคลือบตามเวลาต่างๆ ยังคงมีค่าความพรุนตัวสูง (67 %)

เมื่อนำไส้กรองที่ผ่านการเคลือบที่เวลาต่างๆกัน มาวิเคราะห์ปริมาตรรูพรุน โดยเปรียบเทียบกับไส้กรองที่ไม่ได้เคลือบพบว่า



รูปที่ 5.13 แสดงการเปรียบเทียบปริมาณอนุภาคตามขนาดอนุภาคของไส้กรองที่ภาวะต่างๆ

ไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบจะมีอนุภาคส่วนใหญ่อยู่ในช่วงประมาณ 2 ไมโครเมตร และเมื่อนำไส้กรองนี้ไปทำการเคลือบ พบว่าอนุภาคส่วนใหญ่มีขนาดประมาณ 2 ไมโครเมตรเช่นเดิม แต่มีปริมาณลดลงเล็กน้อย ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กมีการเปลี่ยนแปลงตามเวลาของการเคลือบ

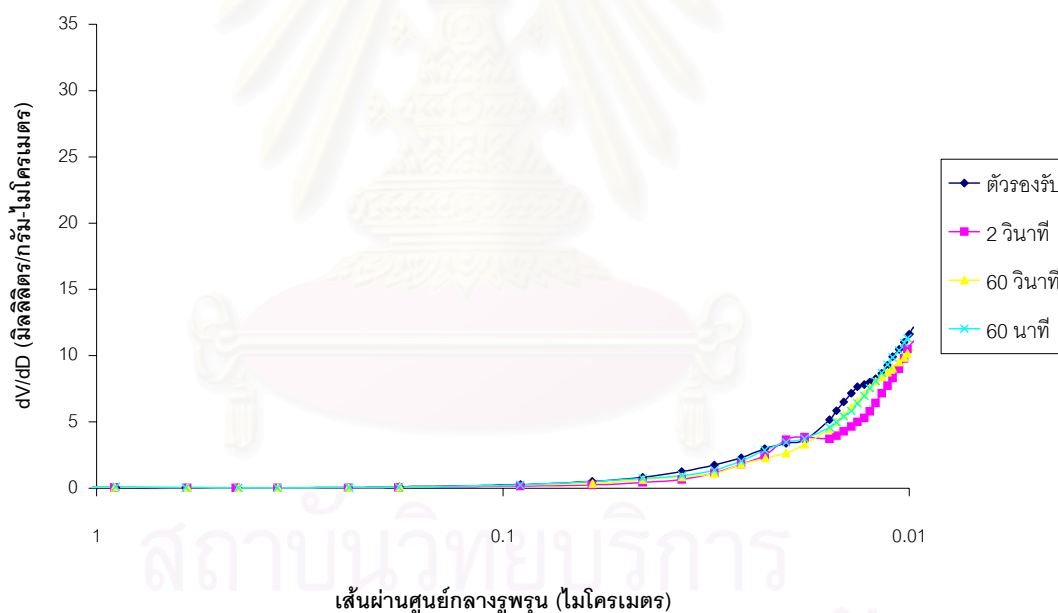


ดังแสดงในรูป 5.14

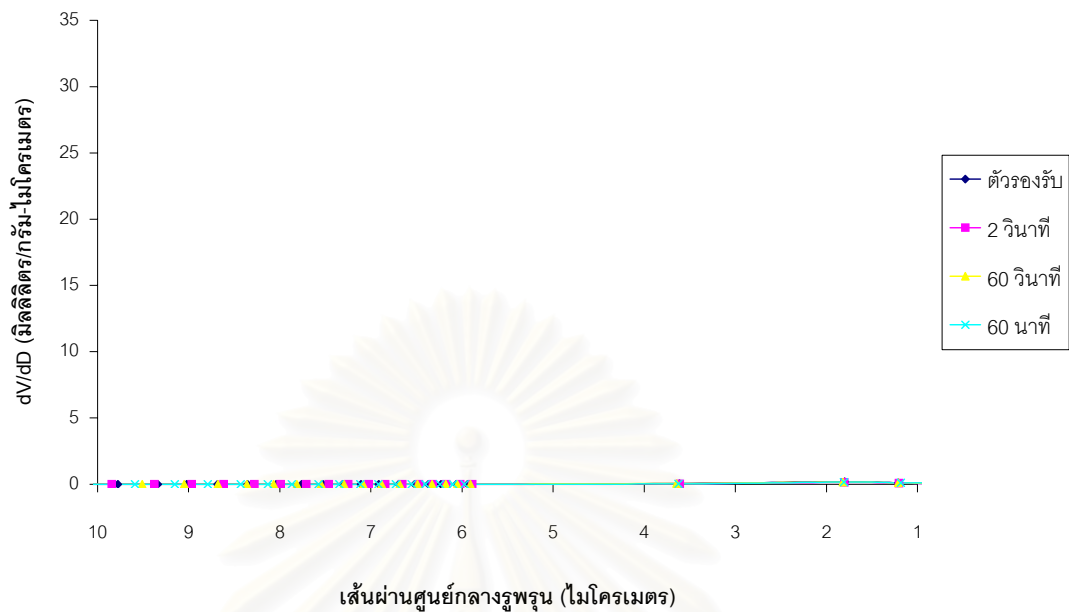
รูปที่ 5.14 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาณอนุภาคในช่วงที่อนุภาคมีขนาด 0.0065 ถึง 0.01 ไมโครเมตร

จากรูป 5.14 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.0065 ถึง 0.01 ไมโครเมตร โดย  $dV/dD$  คืออัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนต่อขนาดรูพรุน จากกราฟพบว่าที่เวลาในการเคลือบเท่ากับ 2 วินาทีจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรูพรุนสูงที่สุด แสดงให้เห็นว่ามีรูพรุนขนาดเล็กเพิ่มขึ้น และถ้าพิจารณาจากรูปที่ 5.15 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงขนาดรูพรุนเท่ากับ 0.01 ถึง 1 ไมโครเมตร พบว่าจะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนน้อยมาก และจากรูปที่ 5.16 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงขนาดรูพรุนเท่ากับ 1 ถึง 10 ไมโครเมตร พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนน้อยมากเช่นกัน

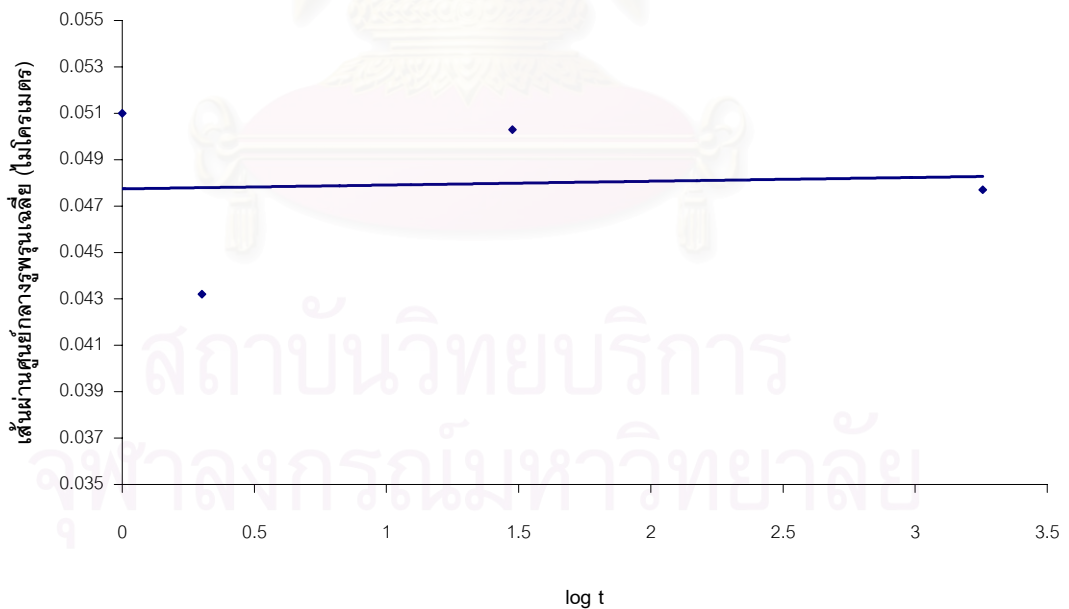
ดังนั้นเมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนเฉลี่ยของไส้กรองตามเวลาในการเคลือบ (รูป 5.17) พบว่ามีค่าใกล้เคียงกันกับไส้กรองที่ไม่ได้เคลือบ เนื่องจากเมื่อทำการเคลือบ รูพรุนที่บริเวณผิวของไส้กรอง จะถูกอุดตันด้วยอนุภาคซิล ทำให้อัตราการเกิดชั้นเยื่อแผ่นบนตัวรองรับ รูพรุนขนาดใหญ่ส่วนมากยังคงกระจายอยู่ที่ตัวรองรับเช่นเดิม



รูปที่ 5.15 แสดงการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงที่รูพรุนอยู่ในช่วง 0.01 ถึง 1 ไมโครเมตร



รูปที่ 5.16 แสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของปริมาตรรูพรุนในช่วงขนาดรูพรุนเท่ากับ 1 ถึง 10 ไมโครเมตร



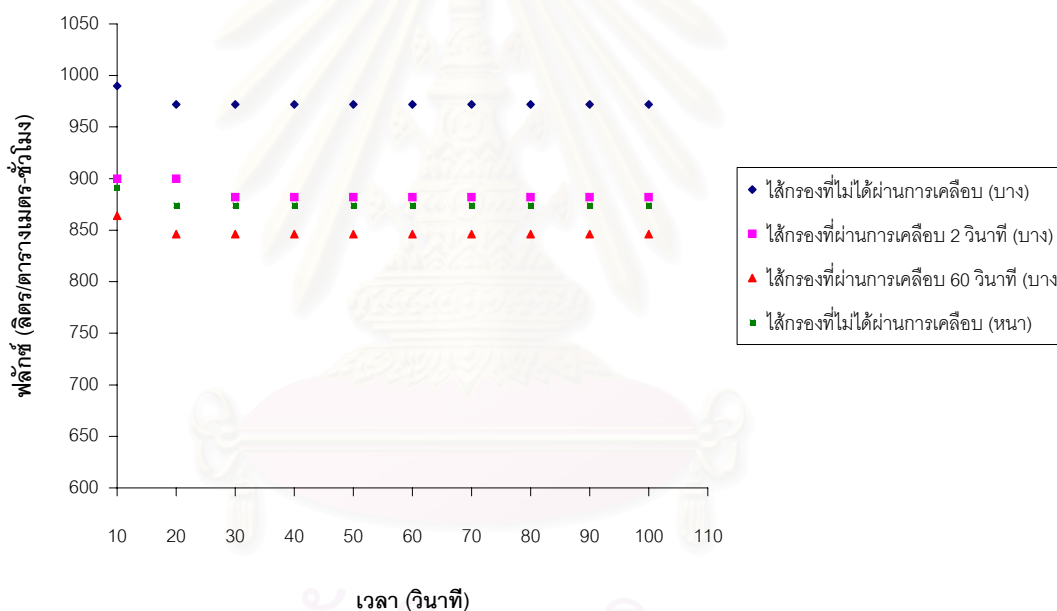
รูปที่ 5.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเวลาในการเคลือบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่เวลาในการเคลือบ 0 วินาที 2 วินาที 60 วินาที และ 60 นาที

## 5.6 สมบัติการกรองของไส้กรองชนิดต่างๆกัน

### 5.6.1 ค่าฟลักซ์

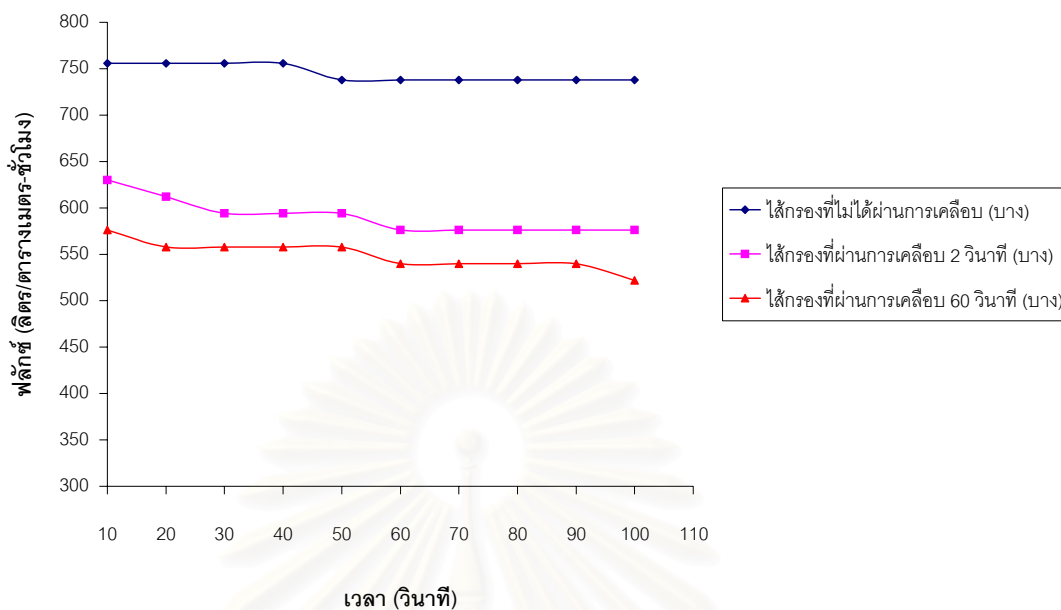
นำไส้กรอง 4 ชนิดคือไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบชนิดหนา ไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบชนิดบาง ไส้กรองชนิดบางที่เคลือบที่เวลา 2 วินาที ไส้กรองชนิดบางที่เคลือบที่เวลา 60 วินาที มาทำการกรองด้วยน้ำกลั่นเพื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์ของไส้กรองแต่ละชนิด (รูปที่ 5.18) พบว่าไส้กรองบางที่ผ่านการเคลือบ 2 วินาที ให้ค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกับไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบชนิดหนา (แบบที่ใช้ในปัจจุบัน) ค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นของไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาทีที่ค่าเท่ากับ 882 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง

เมื่อนำไส้กรองทั้ง 4 ชนิด มาทำการกรองสารที่มีขนาดอนุภาคต่างๆกันประกอบด้วยน้ำบาดาล (ขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-0.5 ไมโครเมตร) ยีสต์ (ขนาดอนุภาคประมาณ 5 ไมโครเมตร) และเชื้อ



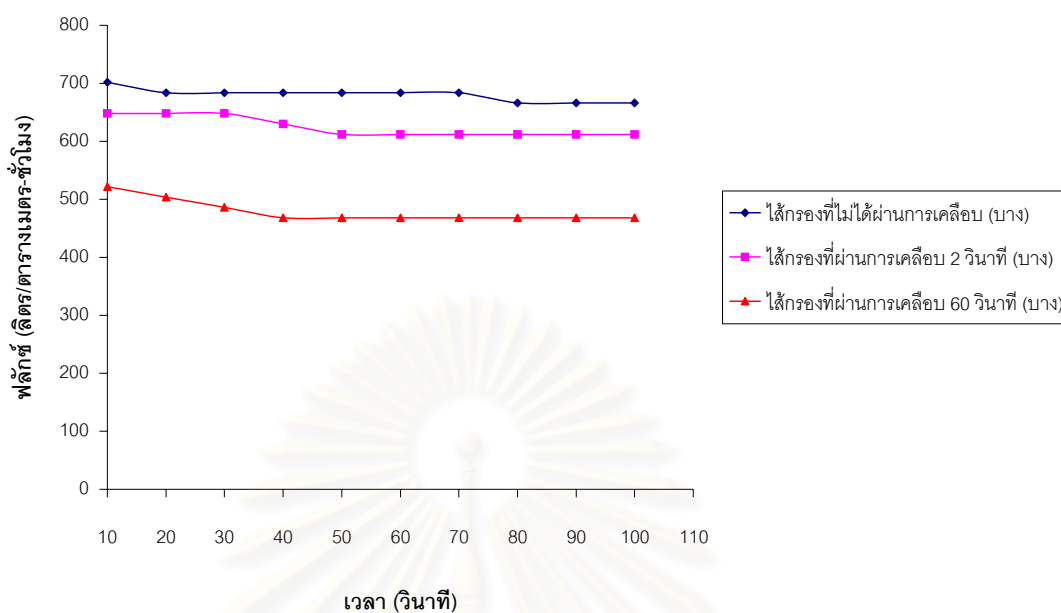
*Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599 (ขนาดอนุภาคประมาณ 2 ไมโครเมตร) แล้ววัดค่าฟลักซ์

รูปที่ 5.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของน้ำกลั่นกับเวลาโดยใช้ไส้กรองชนิดต่างๆ

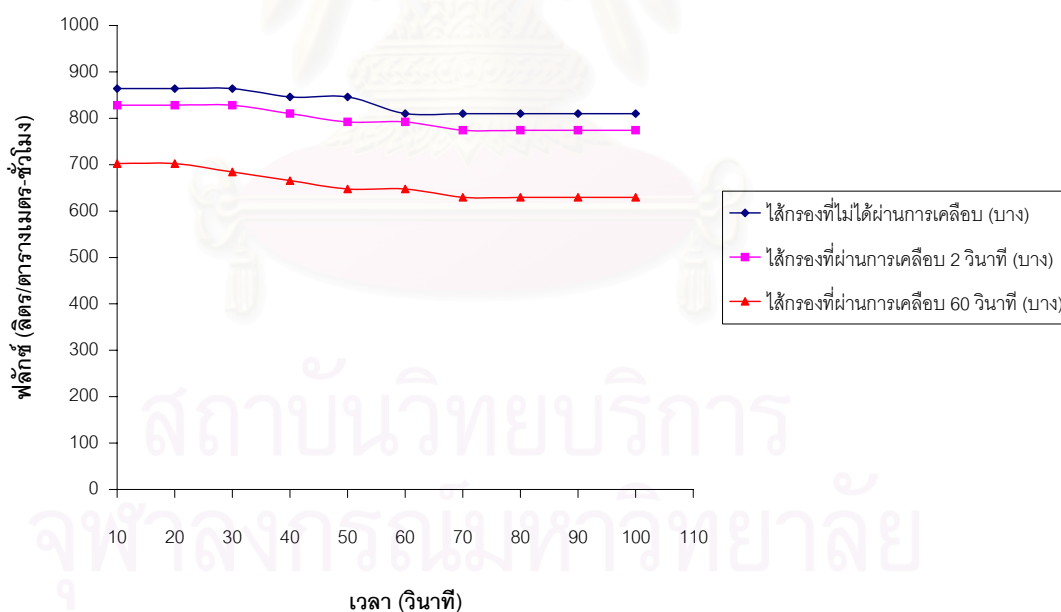


รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพีเอชของน้ำบาดาลกับเวลาโดยใช้ไส้กรองชนิดต่างๆ

จากรูปที่ 5.19 ถึง 5.22 แสดงให้เห็นว่าค่าพีเอชของน้ำบาดาล เชื้อแบคทีเรีย *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599 และยีสต์มีค่าลดลงตามเวลา โดยที่ค่าพีเอชจากการกรองยีสต์มีค่าสูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดต่างๆของไส้กรองที่ภาวะการกรองต่างๆกัน พบว่าถ้าใช้เวลาในการเคลือบมากขึ้น ค่าพีเอชจะมีค่าลดลงเพราะเมื่อใช้เวลาในการเคลือบมากขึ้นจะทำให้รูพรุนมีขนาดเล็กลงและความพรุนตัวน้อยลง อนุภาคและจุลินทรีย์จึงติดอยู่ที่ผิวเกิดเป็นเค้กขึ้น ค่าพีเอชจึงมีค่าลดลง

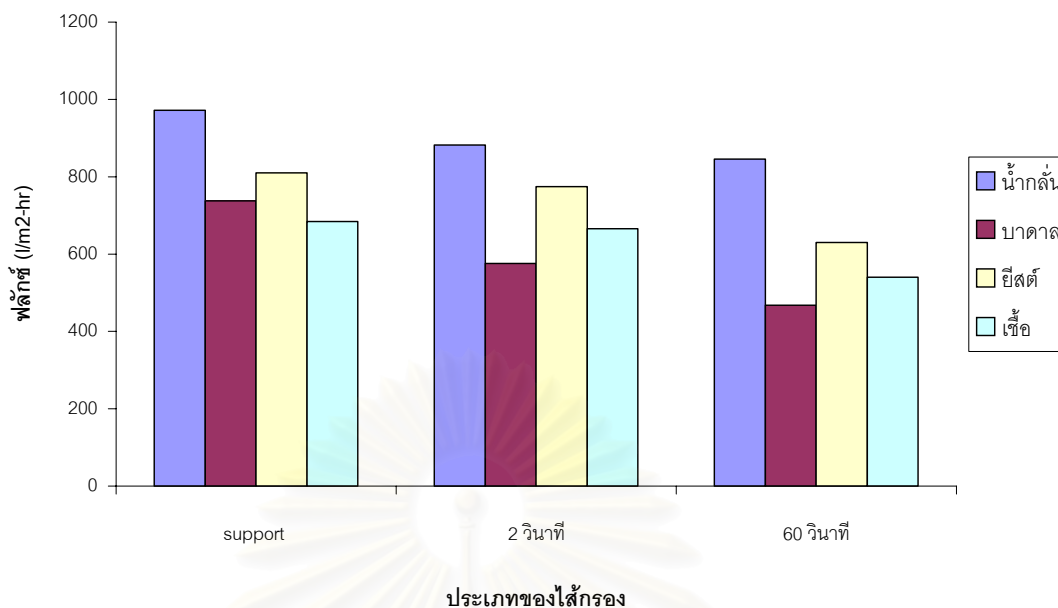


รูปที่ 5.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของเชื้อ *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599 กับเวลาโดยใช้ไส้กรองชนิดต่างๆ



รูปที่ 5.21 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าฟลักซ์ของยีสต์กับเวลาโดยใช้ไส้กรองชนิดต่างๆ





รูปที่ 5.22 แผนภูมิแสดงการเปรียบเทียบค่าฟลักซ์การกรองของสารต่างชนิดกันโดยใช้ไส้กรองชนิดต่างๆ

#### 5.6.2 ค่าการกักเก็บ

การหาค่าการกักเก็บทำโดยการนำสารในสายป้อนและในสายเพอร์มิเอทมานับจำนวนอนุภาคแล้วคำนวณเป็นค่าการกักเก็บได้ตามตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าการกักเก็บอนุภาค ยีสต์และเชื้อแบคทีเรียเมื่อใช้ไส้กรองต่างชนิดกัน

ค่าการกักเก็บของไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบแบบหนา

ชนิดของน้ำที่ใช้	ความเข้มข้นของอนุภาคเริ่มต้น (เซลล์/มิลลิลิตร)		ค่าการกักเก็บ (%)
	สารแขวนลอยเริ่มต้น	น้ำที่กรองได้	
บาดาล	$1.288 \cdot 10^8$	$8 \cdot 10^6$	93.79
ยีสต์	$2.648 \cdot 10^{11}$	$6.4 \cdot 10^9$	97.58
แบคทีเรีย	$1.38 \cdot 10^{10}$	$7.2 \cdot 10^8$	94.77

ค่าการกักเก็บของไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบแบบบาง

ชนิดของน้ำที่ใช้	ความเข้มข้นของอนุภาคเริ่มต้น (เซลล์/มิลลิลิตร)		ค่าการกักเก็บ (%)
	สารแขวนลอยเริ่มต้น	น้ำที่กรองได้	
บาดาล	$1.16 \cdot 10^8$	$8.8 \cdot 10^6$	92.41
ยีสต์	$2.6 \cdot 10^{11}$	$9.6 \cdot 10^9$	96.31
แบคทีเรีย	$1.408 \cdot 10^{10}$	$8.8 \cdot 10^8$	93.75

ค่าการกักเก็บของไส้กรองบางที่ผ่านการเคลือบ 2 วินาที

ชนิดของน้ำที่ใช้	ความเข้มข้นของอนุภาคเริ่มต้น (เซลล์/มิลลิลิตร)		ค่าการกักเก็บ (%)
	สารแขวนลอยเริ่มต้น	น้ำที่กรองได้	
บาดาล	$1.26 \cdot 10^8$	$5.6 \cdot 10^6$	94.93
ยีสต์	$2.504 \cdot 10^{11}$	0	100
แบคทีเรีย	$1.55 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^8$	97.42

ค่าการกักเก็บของไส้กรองบางที่ผ่านการเคลือบ 60 วินาที

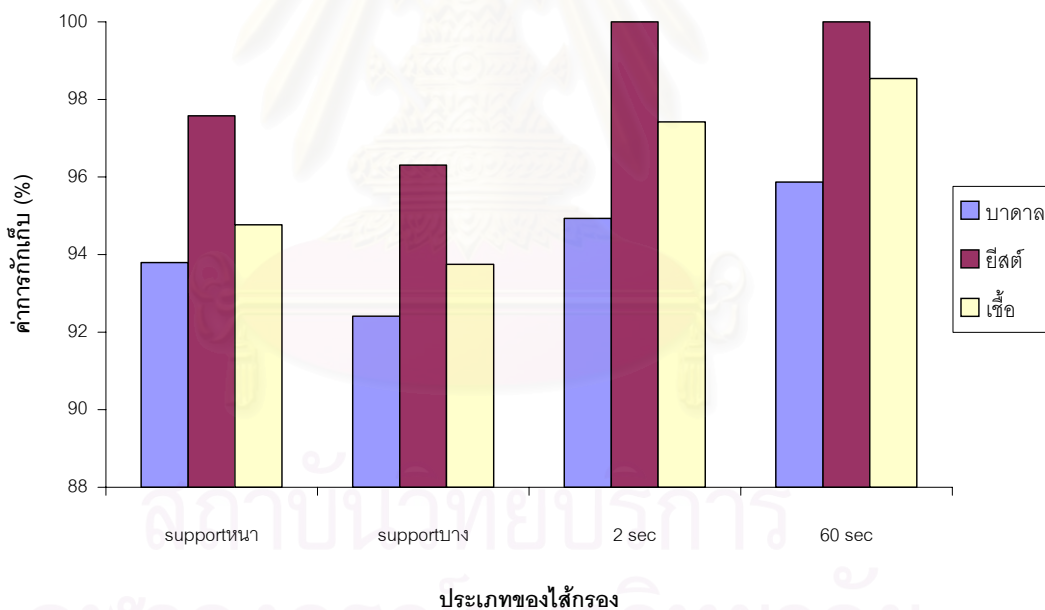
ชนิดของน้ำที่ใช้	ความเข้มข้นของอนุภาคเริ่มต้น (เซลล์/มิลลิลิตร)		ค่าการกักเก็บ (%)
	สารแขวนลอยเริ่มต้น	น้ำที่กรองได้	
บาดาล	$9.68 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^6$	95.87
ยีสต์	$2.456 \cdot 10^{11}$	0	100
แบคทีเรีย	$1.65 \cdot 10^{10}$	$2.4 \cdot 10^8$	98.54

จากตารางที่ 5.4 และรูปที่ 5.23 พบว่าไส้กรองที่ผ่านการเคลือบมีค่าการกักเก็บอนุภาคมากกว่าไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบ และพบว่าไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาทีและ 60 วินาทีสามารถกักเก็บยีสต์ได้ 100 % ในขณะที่น้ำบาดาลและเชื้อแบคทีเรีย ไส้กรองที่เคลือบ 60 วินาทีให้ค่าการกักเก็บสูงกว่าไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาที เนื่องจากเมื่อเพิ่มเวลาในการเคลือบ อนุภาคของผิวไส้กรองมีขนาดเล็กลง (ดูผลข้อ 5.5)

เมื่อเปรียบเทียบค่าการกักเก็บอนุภาคและจุลินทรีย์ของไส้กรองที่ไม่ได้เคลือบชนิดหนา (ที่ใช้ในปัจจุบัน) และที่ไม่ได้เคลือบชนิดบาง พบว่าไส้กรองชนิดหนามีค่าการกักเก็บมากกว่าชนิดบาง เนื่องจากอนุภาคและจุลินทรีย์ติดในรูพรุนของไส้กรองได้มากกว่า

ดังนั้นโดยสรุปแล้ว ไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาที มีความเหมาะสมต่อการกรองน้ำบาดาล ยีสต์และเชื้อแบคทีเรีย เนื่องจากให้ค่าฟลักซ์สูงใกล้เคียงกับไส้กรองปัจจุบัน แต่ให้ค่าการกักเก็บสูงกว่า

เนื่องจากอนุภาคในน้ำบาดาล ขนาดของยีสต์และขนาดของเชื้อแบคทีเรียมีขนาดต่างกัน ดังนั้น ลักษณะการกักเก็บของสารทั้ง 3 ชนิดของไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาที จึงขึ้นกับขนาดรูพรุนของไส้กรอง การกักเก็บยีสต์และเชื้อแบคทีเรียซึ่งมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุน มีลักษณะเป็นแบบการกรองที่ผิว (Surface Filtration) ในขณะที่อนุภาคในน้ำบาดาลซึ่งมีขนาดเล็กกว่าจะมีลักษณะการกักเก็บแบบกักในรูพรุนของไส้กรอง (Bed Filtration) (ดูภาคผนวก ง.)



รูปที่ 5.23 แผนภูมิแสดงค่าการกักเก็บไส้กรองชนิดต่างๆ

## สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาไส้กรองเซรามิกที่มีใช้อยู่ในปัจจุบันให้มีประสิทธิภาพในการกรองดีขึ้นคือมีความหนาลดลงเพื่อประหยัดสารทำไส้กรองและเคลือบด้วยเยื่อแผ่น ซิลิกาบนผิวหน้าของไส้กรองทำให้ไส้กรองมีรูพรุนที่ผิวหน้าเล็กลงสามารถกักเก็บอนุภาคได้มากขึ้น สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

การเตรียมสารละลายโซลเพื่อเคลือบเยื่อแผ่นจะเตรียมจากการนำสาร 3 ชนิดมาผสมกันคือสารละลายโซเดียมซิลิเกต น้ำและกรดซัลฟิวริก สารละลายโซเดียมซิลิเกตนั้น สามารถที่จะเตรียมได้จากซีเมนต์แก้วที่มีอยู่มากในประเทศไทย เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลขององค์ประกอบของสารทั้ง 3 ชนิด โดยแปรเปลี่ยนปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.015-0.055 % โดยโมลต่อปริมาตร และแปรเปลี่ยนอัตราส่วนระหว่างโมลของกรดซัลฟิวริกกับสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 0.6-7 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของกรดซัลฟิวริกทำให้เวลาในการเกิดเจลลดลงและเมื่อเพิ่มปริมาณของสารละลายโซเดียมซิลิเกตทำให้เวลาในการเกิดเจลลดลงเช่นกัน องค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการเกิดเจลอยู่ที่ปริมาณความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมซิลิเกต 0.025% โดยโมลต่อปริมาตรและสัดส่วนโดยโมลของกรดซัลฟิวริกต่อสารละลายโซเดียมซิลิเกตเท่ากับ 7

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของความหนิตามเวลาในการเกิดเจล โดยวัดค่าความหนิตามเวลา พบว่าจะมีการเปลี่ยนแปลงความหนิต่ออย่างรวดเร็วในช่วงที่เริ่มมีการเกิดเจล ดังนั้นเราต้องทำการชลอปฏิกิริยาโดยการเติมน้ำลงไปเพื่อที่จะสามารถนำไส้กรองลงไปเคลือบได้ เลือกความหนิตที่ 300, 600 และ 1000 เซนติพอยด์ มาทำการชลอปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเติมน้ำที่ปริมาณ 50 % ของปริมาณตั้งต้น จะทำให้ความหนิตมีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของความหนิตตามเวลา มีผลทำให้อนุภาคของโซลเปลี่ยนแปลงไปเช่นกัน โดยเมื่อความหนิตมีค่ามากขึ้น อนุภาคของโซลจะมีขนาดใหญ่ขึ้นตามเวลา โดยที่ความหนิต 300 เซนติพอยด์มีขนาดอนุภาคประมาณ 1 ไมโครเมตร ยาวประมาณ 3 ไมโครเมตร

เมื่อพิจารณาถึงเวลาในการเคลือบ โดยทำการเคลือบที่เวลา 2- 60 วินาที และ 2-60 นาที พบว่าเมื่อเพิ่มเวลาการเคลือบ อนุภาคของโซลจะติดบนบริเวณผิวไส้กรองได้มากทำให้ขนาดรูพรุนที่บริเวณของไส้กรองมีขนาดเล็กลง การเคลือบที่ 2 วินาที จะมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรรูพรุนขนาดเล็กมากกว่าการเคลือบที่เวลา 60 วินาที ไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาทีและ 60 วินาที มีลักษณะเป็นเยื่อแผ่นอยู่บนตัวรองรับ รูพรุนขนาดใหญ่ (2 ไมโครเมตร) ส่วนมากยังคงกระจายอยู่ที่ตัวรองรับเช่นเดิม

เมื่อนำไส้กรองที่ผ่านการเคลือบที่เวลา 2 วินาที และ 60 วินาทีมาทำการกรองเพื่อเปรียบเทียบค่าฟลักซ์และค่าการกักเก็บกับไส้กรองที่ยังไม่ได้ผ่านการเคลือบชนิดหนาและชนิดบาง พบว่า ค่าฟลักซ์ของไส้กรองที่ผ่านการเคลือบ 2 วินาทีมีค่าใกล้เคียงกับไส้กรองที่ใช้ในปัจจุบัน

เมื่อพิจารณาค่าการกักเก็บพบว่าไส้กรองที่ผ่านการเคลือบทั้ง 2 วินาทีและ 60 วินาที มีค่าการกักเก็บอนุภาคสูงกว่าไส้กรองที่ใช้ในปัจจุบัน ดังแสดงในตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 แสดงค่าการกักเก็บของสารที่ภาวะต่างๆของไส้กรอง

เวลาในการเคลือบ (วินาที)	บาดาล	yeast	เชื้อ
ไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบชนิดหนา	93.79	97.58	94.77
ไส้กรองที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบชนิดบาง	92.41	96.31	93.75
ไส้กรองบางที่ผ่านการเคลือบที่ 2 วินาที	94.93	100	97.42
ไส้กรองบางที่ผ่านการเคลือบที่ 60 วินาที	95.87	100	98.54

นอกจากนี้ยังพบว่า ลักษณะการกักเก็บขึ้นกับขนาดของอนุภาคและขนาดของรูพรุน เมื่อนำไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาทีมากรองยีสต์และแบคทีเรีย ลักษณะการกรองเป็นแบบการกรองที่ผิว (Surface filtration) ในขณะที่การกรองอนุภาคจากน้ำบาดาลมีลักษณะเป็นแบบกักในรูพรุนของไส้กรอง (Bed filtration)

## รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

การผลิตแก้วซีลิกาความบริสุทธิ์สูงโดยเทคนิคไฮโดรเจล. ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ

สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ.

การผลิตซีลิกาเจลดูดความชื้นจากซี้แก้วแอลบ. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย. 2540.

การเตรียมแผ่นกรองซีลิกาจากซี้แก้วแอลบ. สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ. 2542.

รัตนา จิระรัตนานนท์. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์. พิมพ์ครั้งที่ 2. กทม.

โรงพิมพ์ไทยเส็ง.

วีรวรรณ วัจนพรศาล. เยื่อแผ่นชนิดซิล-เจลด้วยอะลูมินาเพื่อการแยกเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส.

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2539

สิทธิพันธ์ ท่อแก้ว. ตัวกรองเซรามิกส์ชนิดไฮอะลูมินาสำหรับการแยกทางชีวภาพ. ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย. 2539

ภาษาอังกฤษ

Balagopal N.Nair. Structure-Property Relationships in Silica Gels and Molecular-Sieving

Membrane. Degree of doctor of Engineering at the University of Tokyo, 1998

Chung-Yi Tsai, Siu-Yue Tam, Yinfeng Lu, and C.Jeffrey Brinker. Dual-layer asymmetric

microporous silica membranes. Journal of Membrane Science. Vol. 169 (2000):

255-268.

Caro J., Noack M., and Kolsch P. Chemically modified ceramic membrane. Microporous

and Mesoporous Materials. Vol. 22 (1998): 321-332.

Godoi R.H.M., Fernandes L., Jafellicci Jr. M., Marques R.C., Varanda L.C., and

DaVolos M.R. Investigation of the systems silica and silica containing chromium

in alcohol medium. Journal of non-crystalline solids Vol. 247(1999): 141-145.

Geddes C.D., and Birch D.J.S. Nanometer resolution of silica hydrogel formation using

time-resolved fluorescence anisotropy. Journal of non-crystalline solids Vol. 270

(2000): 191-204.

- Gunter Schulz-Ekloff, Jiri Rathousky, and Amost Zukal. Controlling of morphology and characterization of pore structure of ordered mesoporous silicas. Microporous and Mesoporous Materials. Vol. 27 (1998): 273-285
- Hsien-Kuang Liu, and Azer Parvizi-Majidi. Effect of Particle Addition on Drying Stresses and the Green Density of Sol-Gel Processed Three-Dimensional Ceramic-Matrix Composites. J.Am. Ceram. Soc. Vol. 81 (1998): 1824-1828.
- Koichi Kajihara, Kazuki Nakanishi, Katsuhisa Tanaka, Kazuyuki Hirao, and Naohiro Soga. Preparation of Macroporous Titania Films by a Sol-Gel Dip-Coating Method from the System Containing Poly(ethylene glycol). J.Am. Ceram. Soc. Vol. 81 (1998): 2670-2676.
- Ljubica Nikolic, Ljiljana Radonjic. Alumina strengthening by silica sol-gel coating. Thin Solid Films Vol. 295 (1997): 101-103.
- M. Naito, K. Nakahira, H. Mori, and J. Tsubaki. Process condition on the preparation of supported microporous SiO<sub>2</sub> membranes by sol-gel modification techniques. Journal of Membrane Science. Vol. 129 (1997): 263-269.
- Mari-Ann Einarsrud, Ellin Nilsen. Strengthening of water glass and colloidal sol based silica gels by aging in TEOS. Journal of non-crystalline solids. Vol. 226 (1998): 122-128.
- Marx J., Lischewski R., Schnabel R., Apsel F., and Bottcher H. Rheological and Coating Properties of Modified Silica Sold. Journal of Sol-Gel Science and Technology. Vol. 13 (1998): 89-94.
- Renate M. de Vos, Wilhelm F. Maier, and Henk Verweij. Hydrophobic silica membrane gas separation. Journal of Membrane Science. Vol. 158 (1999): 277-288.
- Renate M. de Vos, and Henk Verweij. Improved performance of silica membranes for gas separation. Journal of Membrane Science. Vol. 143 (1998): 37-51.
- Soichi Kumon, Kazuki Nakanishi, and Kazuyuki Hirao. Macroporous Silicate Films by Dip-Coating. Journal of Sol-Gel Science and Technology. Vol. 19 (2000): 553-557.
- Venkateswara Rao A., Wagh P.B., Pajonk G.M., and Haranath D. Effect of precursor, solvent, and water molar ratios on surface area and porosity of tetraethoxysilane silica aerogels. Materials Science and Technology. Vol. 14 (1998): 236-240.

Yoshiro MORIYA, Hidenori SHIMODA, and Ryoji HINO. Control of Pore Diameter of Porous Silica by Sol-Gel Coating. Journal of the Ceramic Society of Japan Vol. 11 (1995): 1201-1204.



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ก

ตัวอย่างการคำนวณ

1. %SiO<sub>2</sub> (mol/v) ในสารละลายสารตั้งต้นมี %SiO<sub>2</sub> (g/v) = 7% (g/v)ดังนั้นในสารละลาย 100 ml มี SiO<sub>2</sub> 7 g

$$\text{ในสารละลาย 10 ml มี SiO}_2 \frac{(7 \times 10)}{(100 \times 122)} = 5.73 \times 10^{-3}$$

ดังนั้นในสารละลายทั้งหมด 40 ml จะมี %SiO<sub>2</sub> (mol/v)

$$= \frac{(7 \times 10 \times 100)}{(100 \times 122 \times 40)} = 0.0143 \% \text{ (mol/v)}$$

2. %H<sub>2</sub>O (mol/v) ในสารละลาย

$$2.1 \text{ H}_2\text{O} \text{ ที่ใส่เพิ่มลงไป 10 ml} = \frac{10}{18}$$

$$2.2 \text{ H}_2\text{O} \text{ ที่อยู่ใน Na}_2\text{SiO}_3 = 10 - \frac{(7 \times 10)}{(100 \times 1.7)} \text{ ml โดยความหนาแน่นของ Na}_2\text{SiO}_3 = 1.7 \text{ g/cm}^3$$

2.3 H<sub>2</sub>O ในกรด H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> คิดว่าเท่ากันหมดทุกครั้งเพราะเราใส่ปริมาตรคงที่ ทำให้ไม่มีผลต่อR<sub>w</sub> และ R<sub>A</sub>

$$\text{ดังนั้น รวม H}_2\text{O} \text{ ที่ใช้} = \left\{ \left( 10 - \frac{(7 \times 10)}{(100 \times 1.7)} \right) + 10 + 20 \right\} \times \frac{100}{(18 \times 40)} = 5.509 \% \text{ (mol/v)}$$

3. %H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (mol/v) ในสารละลาย

ใช้กรด 1.875 mol/l นั่นคือ

ในสารละลาย 1000 ml มีเนื้อกรด 1.875 mol

$$\text{ในสารละลาย 20 ml มีเนื้อกรด} = \frac{(1.875 \times 20)}{1000} \text{ mol}$$

$$\text{ดังนั้นในสารละลายทั้งหมดมีเนื้อกรด} = \frac{(1.875 \times 2 \times 10)}{(1000 \times 40)} = 0.09375 \% \text{ (mol/v)}$$

4. ค่า R<sub>w</sub> และ R<sub>A</sub>

$$\text{ค่า } R_w = \frac{\text{mol of H}_2\text{O}}{\text{mol of Na}_2\text{SiO}_3}$$

$$\text{ค่า } R_A = \frac{\text{mol of H}_2\text{SO}_4}{\text{mol of Na}_2\text{SiO}_3}$$

## ภาคผนวก ข

ตารางแสดงอิทธิพลขององค์ประกอบในสารละลายต่างเวลาในการเกิดเจล

SiO <sub>2</sub>	R <sub>a</sub> =0.6			R <sub>a</sub> =1			R <sub>a</sub> =2		
%โดยโมลต่อปริมาตร	Tg	pH	Rw	Tg	pH	Rw	Tg	pH	Rw
0.015		10.98	369.33		10.52	369.33		2.55	369.33
0.016		-6.54	346.25		10.3	346.25		2.64	346.25
0.017		11.48	325.88		7.17	325.88		0.49	325.88
0.018		11.27	307.22		8.81	307.22		2	307.22
0.019		11.96	291.05		6.26	291.05		2.14	291.05
0.02		5.57	276.5	42	7.88	276.5	140	-1.2	276.5
0.021		11.3	262.86		10.7	262.86	121	2.21	262.86
0.022		11.84	250.91		10.84	250.91	121	2.39	250.91
0.023		6.2	240		7.11	240	ทันที		240
0.024		11.28	230		10.8	230	164	2.12	230
0.025		11.84	220.4		10.71	220.4	214	1.61	220.4
0.035		11.84	156.29		11.1	156.29	97.15	1.58	156.29
0.045		11.84	120.22		10.84	120.22	55	1.68	120.22
0.055			97.09			97.09			97.09

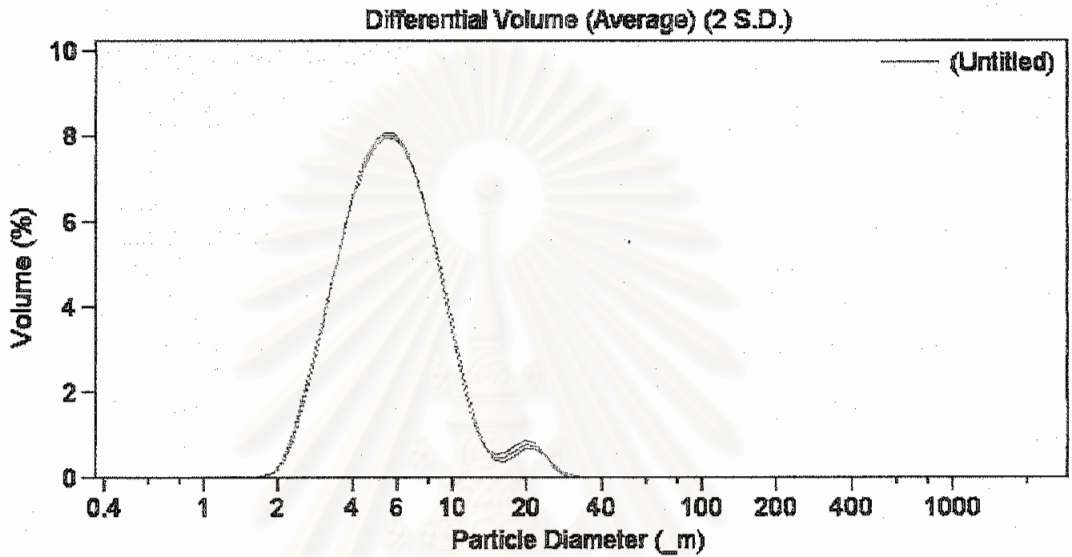
SiO <sub>2</sub>	R <sub>a</sub> =3			R <sub>a</sub> =4			R <sub>a</sub> =5		
%โดยโมลต่อปริมาตร	Tg	pH	Rw	Tg	pH	Rw	Tg	pH	Rw
0.015		1.08	369.33		1.08	369.33		1.08	369.33
0.016		1.28	346.25		1.21	346.25		0.98	346.25
0.017		1.8	325.88		0.56	325.88	168	-4.65	325.88
0.018		1.21	307.22		0.96	307.22	130	0.86	307.22
0.019		1.24	291.05		0.96	291.05	132	0.86	291.05
0.02		0.7	276.5	192	0.97	276.5	114	0.17	276.5
0.021		1.14	262.86	191	0.98	262.86	115	0.59	262.86
0.022		1.26	250.91	192	0.96	250.91	74	0.8	250.91
0.023		1.07	240	145	0.78	240	73	0.39	240
0.024	162	0.94	230	92	0.58	230	46	0.43	230
0.025	162	0.8	220.4	70.3	0.6	220.4	43	0.43	220.4
0.035	48.45	0.75	156.29	23.15	0.25	156.29	21.3	0.08	156.29
0.045			120.22			120.22			120.22
0.055			97.09			97.09			97.09

SiO <sub>2</sub>	R <sub>a</sub> =6			R <sub>a</sub> =7		
	Tg	pH	Rw	Tg	pH	Rw
%โดยโมลต่อปริมาตร						
0.015	163	0.94	369.33		0.83	369.33
0.016	148	1.01	346.3	97	0.93	346.25
0.017	143	0.84	325.88	98.45	0.81	325.882
0.018	63	0.86	307.22	63	0.36	307.222
0.019	61	0.81	291.05	42.35	0.65	291.05
0.02	66	0.75	276.5	65	0.69	276.5
0.021	70	0.61	262.86	48	0.83	262.86
0.022	71.3	0.69	250.91	30.4	-1.86	250.91
0.023	29.4	0.18	240	20.1	0.15	240
0.024	29.3	0.38	230	16.45	0.23	230
0.025	24.3	0.3	220.4	16.3	0.12	220.4
0.035			156.29			156.29
0.045			120.22			120.22
0.055			97.09			97.09

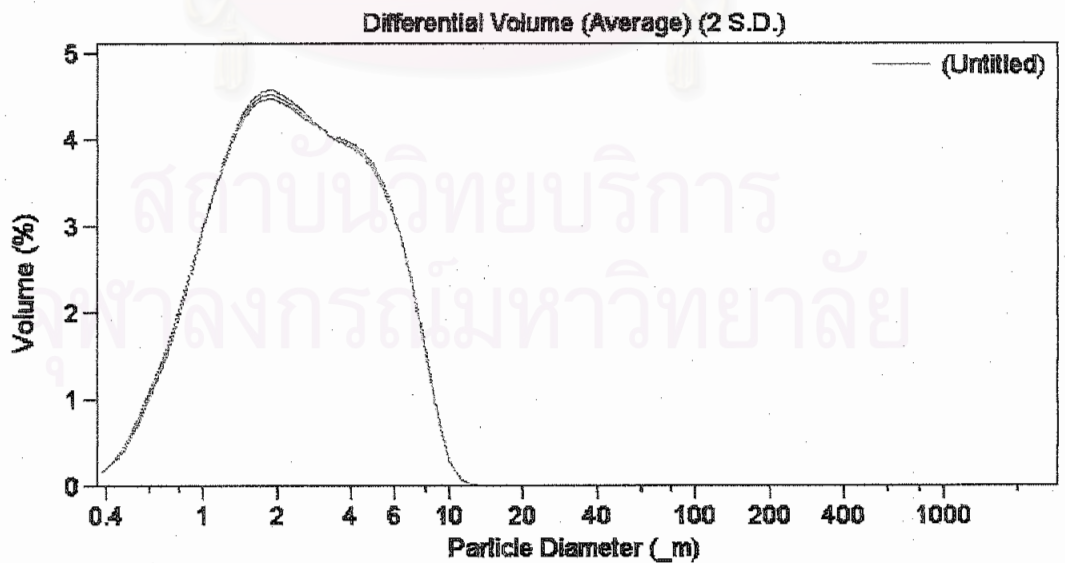
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ภาคผนวก ค

กราฟแสดงขนาดอนุภาคของยีสต์และเชื้อ *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599



กราฟแสดงขนาดอนุภาคของยีสต์



กราฟแสดงขนาดอนุภาคของเชื้อ *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599

## ภาคผนวก ง

วิธีการหาจำนวนอนุภาคที่ติดอยู่ที่ผิวของไส้กรอง

1. นำไส้กรองที่เคลือบ 2 วินาที มาทำการกรองด้วยสารที่มีอนุภาคต่างกันคือน้ำบาดาล ยีสต์และเชื้อ *Alcaligenes eutrophus* NCIMB 11599
2. ทำการล้างอนุภาคที่ติดที่ผิวของไส้กรองด้วยน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร
3. นำน้ำที่ได้จากการล้างมานับจำนวนอนุภาคและบันทึกค่า จะได้ผลตามตารางดังนี้

ชนิดของน้ำที่ใช้	original cell density (cells/ml)		
	สารแขวนลอยเริ่มต้น	น้ำที่กรองได้	อนุภาคที่ติดที่ผิวของไส้กรอง
บาดาล	$1.26 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^7$	$6.4 \cdot 10^7$
ยีสต์	$2.51 \cdot 10^{11}$	0	$2.51 \cdot 10^{11}$
แบคทีเรีย	$1.21 \cdot 10^{10}$	$1.6 \cdot 10^8$	$1.19 \cdot 10^{10}$

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายดอท บุญญานุรักษ์ เกิดวันที่ 5 พฤศจิกายน พ.ศ. 2519 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ สำเร็จ การศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต จากภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร ปี พ.ศ. 2540 จากนั้นได้เข้าศึกษา ต่อหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ. 2541



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย