

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน



นายทรงภพ บวรณะศิลป์
นางสาวหัตถทอง ไทยเหนือ
นายสรารวุฒิ ทองใส

พ.ศ. ๒๕๕๓
๕๕๑๓

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน..... 42388
วัน, เดือน, ปี..... 20 พ.ค. 2545

b.....
i.....

ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

๒๕๕๓/๒๐๕๑๓๒

Coalescence of Oil Emulsion Using Microfiltration Membrane



A Report Submitted in Partical Fulfillment of the Requirements

For the Degree of Bachelor of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang


2000

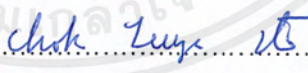
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้


ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน
โดย นายทรงภพ บุรณะศิลป์
นางสาวทัดทอง ไทยเหนือ
นายสรารวุฒิ ทองใส
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบปริญญาานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์)


..... กรรมการ
(ดร. โจโกะ เทเรซ่า อิติโต)


..... กรรมการ
(อาจารย์รินฤดี เบญจางคประเสริฐ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์เรื่อง การรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน
โดย นายทรงภพ บุรณะศิลป์
นางสาวทัตทอง ไทยเหนือ
นายสรารุณี ทองใส
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์
ปริญญาานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี
ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE ใช้สารละลายป้อนเป็นน้ำมันในรูปอิมัลชันในน้ำเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร โดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE ขนาดรูพรุน 5 ไมโครเมตร ทำการทดลองที่ความดัน 0.15 0.25 และ 0.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยให้สารละลายผ่านเยื่อแผ่น 4 รอบ ในแต่ละความดัน

จากผลการทดลองพบว่าเยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE สามารถทำให้น้ำมันในรูปอิมัลชันรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น แล้วแยกตัวออกจากน้ำด้วยความแตกต่างของความหนาแน่นเกิดเป็นฟิล์มของน้ำมันปกคลุมอยู่เหนือผิวน้ำ

Report Title Coalescence of Oil Emulsion Using Microfiltration Membrane
By Mr Songphop Buranasilp
Miss Tadthong Thainuea
Mr Sarawut Thongsai
Advisor Kriangsak Kraiwattanawong
Report for Bachelor Degree in Chemical Engineering
Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

The coalescence of oil emulsion by PTFE membrane was studied. Solution containing 1% by volume lubricant oil was used. The PTFE membrane had pore size of $5\ \mu\text{m}$. The experiments were carried out at pressure of 0.15, 0.25 and $0.50\ \text{kg/cm}^2$. In each pressure the solution was passed through PTFE membrane for 4 times.

It was observed from the experimental results that the PTFE membrane could be used for coalescence of oil emulsion to increase droplet size. Then the large droplets were separated from water by the difference of density. The oil film was occurred above the water surface.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากคณาจารย์ และ บุคคลากรหลายฝ่าย คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณ

อาจารย์เกรียงศักดิ์ ไกรวัฒนวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาานิพนธ์ ที่ให้ความรู้ คำ แนะนำและตรวจแก้ไขโครงงาน ทำให้โครงงานนี้มีความสมบูรณ์

อาจารย์รัตน์ เบญจางคประเสริฐ และ อาจารย์โจโกะ เทเรซ่า อีโต ภาควิชาวิศวกรรม-เคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้คำแนะนำ ตรวจแก้ไขโครง-งาน ทำให้โครงงานนี้มีความสมบูรณ์

ผศ.ดร ไพศาล นาคพิพัฒน์ หัวหน้าภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอม-เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการสั่งซื้อเยื่อแผ่นสังเคราะห์

ผศ.ดร สมศักดิ์ วรมงคลชัย ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม-เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาคและอุปกรณ์ ต่าง ๆ

รศ. อรุณี คงศักดิ์ไพศาล ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอม-เกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความเอื้อเฟื้อในการวิเคราะห์ข้อมูลจากเครื่องวัดขนาดอนุภาค

คุณพิสันต์ ผลโพธิ์ เจ้าหน้าที่วิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ-ทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการติดตั้ง ซ่อมแซมอุปกรณ์ต่าง ๆ ตลอดจนช่วยอำนวยความสะดวก ในการทำโครงงานนี้มาตลอด

คุณสุรินทร์ เหล่าพระจันทร์ และ คุณสุภัทร บานเย็น เจ้าหน้าที่วิทยาศาสตร์เคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้อุปกรณ์ ต่างๆ ในการทดลอง ตลอดจนคำแนะนำในการใช้เครื่องมือวัดขนาดอนุภาคและการซ่อมแซม

สุดท้ายนี้คณะผู้จัดทำขอขอบคุณบุคลากร และผู้เกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความสนใจมาโดย ตลอด ถ้ามีสิ่งผิดพลาดประการใด คณะผู้จัดทำขออภัย และขออภัยมา ณ ที่นี้ด้วย

คณะผู้จัดทำ

30 มีนาคม 2544

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญภาพ	ณ
สารบัญตาราง	ญ
สัญลักษณ์และคำย่อ	ฐ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและแนวคิดของโครงการพิเศษ	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการพิเศษ	2
บทที่ 2 ปัญหาของการแยกน้ำมันออกจากน้ำ และกระบวนการที่ใช้	3
2.1 ปัญหาทั่วไปของการแยกน้ำมันกับน้ำ	3
2.2 บทสรุป	5
บทที่ 3 กระบวนการแยกเยื่อแผ่นสังเคราะห์	6
3.1 บทนำ	6
3.2 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน	10
3.3 ทฤษฎีไมโครฟิลเตรชันแบบปลายปิด	12
3.4 ทฤษฎีไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง	13
3.5 การอุดตัน	20
3.6 เยื่อแผ่นไดนามิกที่เกิดขึ้นได้ด้วยตนเอง	22
3.7 คุณสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิก	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4 การรวมตัวภายในรูปพรุนของเยื่อแผ่นสังเคราะห์	27
4.1 รูปแบบของการเกิดการรวมตัวกัน	27
4.2 ทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเกิดการรวมตัวของอนุภาค	30
4.3 การพัฒนาการรวมตัวกันของอนุภาค โดยอาศัยเยื่อแผ่นสังเคราะห์	32
4.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออกจากน้ำ	34
บทที่ 5 การออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลอง	36
5.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลองเพื่อการศึกษา	36
5.2 การทำงานของชุดอุปกรณ์การทดลอง	37
บทที่ 6 การทดลอง	39
6.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	39
6.2 ขั้นตอนการทดลอง	40
บทที่ 7 ผลการทดลอง	41
บทที่ 8 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	51
8.1 สรุปผลการทดลอง	51
8.2 วิจารณ์ผลการทดลอง	51
8.3 ข้อเสนอแนะ	52
เอกสารอ้างอิง	53
ภาคผนวก ก	55
ภาคผนวก ข	58

สารบัญภาพ

	หน้า	
รูปที่ 3.1	หลักการของกระบวนการแยกโดยเยื่อแผ่นสังเคราะห์	8
รูปที่ 3.2	การเปรียบเทียบการกรองแบบปลายปิด และแบบไหลขวาง	12
รูปที่ 3.3	การเกิด Concentration Polarization	16
รูปที่ 3.4	ตำแหน่งของความต้านทานในการไหล	20
รูปที่ 3.5	การจำลองภาพการอุดตันที่เสนอโดยแบบจำลองต่าง ๆ	20
รูปที่ 3.6	ลักษณะการเกิด Fouling ของเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนต่าง ๆ กัน เทียบกับขนาดของตัวถูกละลาย	23
รูปที่ 3.7	ส่วนประกอบของ Self-Forming Dynamic Membrane	24
รูปที่ 3.8	ความเปียกของพื้นผิวของของแข็งต่าง ๆ	25
รูปที่ 3.9	วัสดุเยื่อแผ่นสังเคราะห์บางชนิดที่เป็นโพลีเมอร์	26
รูปที่ 3.10	ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์	27
รูปที่ 4.1	การรวมตัวกันของวัสดุ 2 ชนิด แบบไม่มีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง	28
รูปที่ 4.2	การปะทะกันของอนุภาค 2 อนุภาคแบบสุ่ม	28
รูปที่ 4.3	การรวมตัวกันของอนุภาคของแข็ง	29
รูปที่ 4.4	การรวมตัวกันของอนุภาคอิมัลชันที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลของ อนุภาค	30
รูปที่ 4.5	สถานะของพลังงานทั้งของอนุภาคเดี่ยว และ หลังเกิดการรวมตัวกันขึ้น	31
รูปที่ 7.1	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน	42

รูปที่ 7.2	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 1	42
รูปที่ 7.3	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 2	43
รูปที่ 7.4	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 3	43
รูปที่ 7.5	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 4	44
รูปที่ 7.6	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายป้อน	44
รูปที่ 7.7	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 1	45
รูปที่ 7.8	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 2	45
รูปที่ 7.9	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 3	46
รูปที่ 7.10	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 4	46
รูปที่ 7.11	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายป้อน	47
รูปที่ 7.12	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 1	47
รูปที่ 7.13	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 2	48
รูปที่ 7.14	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 3	48
รูปที่ 7.15	กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์รอบที่ 4	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 7.16 สารละลายที่ใสขึ้นตามจำนวนรอบที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์	49
รูปที่ 17.17 การเกิดฟิล์มที่ผิวของสารละลาย เมื่อสารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์	50



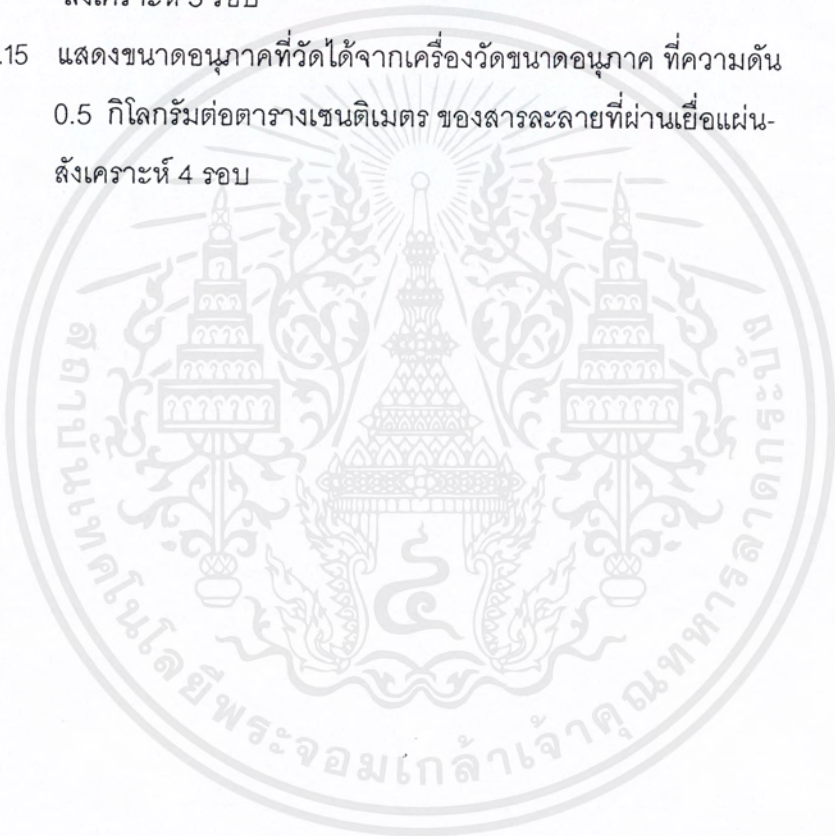
สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงกฎของการแยก	3
ตารางที่ 7.1 แสดงค่าเพอมีเอทฟลักซ์ของสารละลายน้ำมันในรูปอิมัลชัน เมื่อผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์เคราะห์แบบ PTFE ที่ความดัน 0.15 0.25 และ 0.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	41
ตารางที่ ก.1 มวลของเพอมีเอทของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ ที่ เวลาต่าง ๆ สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลาย- ป้อนร้อยละ 1 โดยปริมาตรความดันก่อนเข้าเยื่อแผ่น 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	55
ตารางที่ ก.2 มวลของเพอมีเอทของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ ที่ เวลาต่าง ๆ สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลาย- ป้อนร้อยละ 1 โดยปริมาตรความดันก่อนเข้าเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	56
ตารางที่ ก.3 มวลของเพอมีเอทของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ ที่ เวลาต่าง ๆ สภาวะการทดลอง ความเข้มข้นของสารละลาย- ป้อนร้อยละ 1 โดยปริมาตรความดันก่อนเข้าเยื่อแผ่น 0.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร	57
ตารางที่ ข.1 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน	58
ตารางที่ ข.2 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 1 รอบ	58

ตารางที่ ข.3	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 2 รอบ	59
ตารางที่ ข.4	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 3 รอบ	59
ตารางที่ ข.5	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 4 รอบ	60
ตารางที่ ข.6	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน	60
ตารางที่ ข.7	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 1 รอบ	61
ตารางที่ ข.8	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 2 รอบ	61
ตารางที่ ข.9	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 3 รอบ	62
ตารางที่ ข.10	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 4 รอบ	62
ตารางที่ ข.11	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน	63
ตารางที่ ข.12	แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่น-สังเคราะห์ 1 รอบ	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- | | | |
|---------------|---|----|
| ตารางที่ ข.13 | แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 2 รอบ | 64 |
| ตารางที่ ข.14 | แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 3 รอบ | 64 |
| ตารางที่ ข.15 | แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 4 รอบ | 65 |



สัญลักษณ์และอักษรย่อ

RO	=	รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)
UF	=	อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration)
MF	=	ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)
DM	=	เยื่อแผ่นไดนามิก (Dynamic Membrane)
j_v	=	ฟลักซ์ของเพอมีเอท ($\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$)
A_m	=	พื้นที่เยื่อแผ่น (m^2)
V	=	ปริมาตรของเพอมีเอท (m^3)
t	=	เวลา (h)
ΔP	=	ผลต่างความดันระหว่างชั้นแค้กับผิวเยื่อแผ่น (Pa)
μ_v	=	ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)
R_m	=	ความต้านทานของเยื่อแผ่น (m^{-1})
R_c	=	ความต้านทานของแค้ (m^{-1})
δ_c	=	ความหนาของแค้ (m)
r_c	=	ความต้านทานจำเพาะของแค้ (m^{-2})
ε	=	สัดส่วนช่องว่างของแค้ (void fraction)
d_s	=	เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค
α_0	=	ค่าคงที่ขึ้นอยู่กัขนาดและรูปร่างของแค้
CFMF	=	ไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง (Crossflow Microfiltration)
CP	=	คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization)
GP	=	เจลโพลาไรเซชัน (Gel Polarization)
D_p	=	สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/s)
T	=	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)
r	=	รัศมีของอนุภาค (cm)
k	=	ค่าคงที่ Boltzmann ($1.38 \times 10^{-16} \text{ g.cm}^2/\text{s}^2.\text{K}$)
Q	=	อัตราการไหลของเพอมีเอทที่เวลาใด ๆ (m^3/h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- K_b = ค่าคงที่ของการกรอง CBM (h^{-1})
- Q_0 = อัตราการไหลของเพอมีเอทเริ่มต้น (m^3/h)
- CFM = แบบจำลองการกรองเค้ก (Cake Filtration Model)
- SBM = แบบจำลองกีดขวางการกรองมาตรฐาน (Standard Blocking Filtration Model)
- IBM = แบบจำลองกีดขวางการกรองปานกลาง (Intermediate Blocking Model)
- CBM = แบบจำลองกีดขวางการกรองสมบูรณ์ (Complete Blocking Filtration Model)



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและแนวคิดของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันนี้ ปัญหาเรื่องสิ่งแวดล้อมกำลังได้รับความสนใจเป็นพิเศษ โดยเฉพาะมลพิษเนื่องมาจากน้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม ปัญหาน้ำมันในน้ำเสียก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้แหล่งน้ำเกิดความเน่าเสีย เพราะน้ำมันจะปกคลุมผิวน้ำ และมีน้ำมันบางส่วนละลายได้ในรูปอิมัลชัน เป็นผลให้ปริมาณออกซิเจนลดลง ปริมาณออกซิเจนจึงไม่เพียงพอต่อการดำรงชีวิตของสิ่งมีชีวิตในน้ำ และเกิดปัญหาน้ำเสียในที่สุด ดังนั้น เพื่อที่จะได้แก้ไขปัญหานี้ จึงได้มีการศึกษาถึงวิธีการที่จะกำจัดน้ำมัน หรือ แยกน้ำมันจากน้ำทั้งด้วยวิธีการต่างๆ มากมาย ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งเป็น 3 วิธีหลักดังนี้คือ

- 1) วิธีทางชีวภาพ เป็นวิธีขจัดน้ำมันโดยใช้จุลินทรีย์ตามธรรมชาติมาย่อยสลายน้ำมัน แต่อย่างไรก็ตาม การกำจัดน้ำมันด้วยวิธีนี้จะไม่สามารถย่อยสลายน้ำมันในรูปอิมัลชัน
- 2) วิธีทางกายภาพ โดยที่น้ำมันมีความหนาแน่นน้อยกว่าน้ำ ดังนั้นน้ำมันจะลอยขึ้นมาอยู่บนผิวน้ำ แล้วจึงทำการแยกน้ำที่ลอยอยู่บนผิวน้ำออกไป ซึ่งวิธีการนี้มีข้อจำกัดคือ ไม่สามารถแยกน้ำมันที่ลอยบนผิวน้ำในรูปอิมัลชันได้
- 3) วิธีการทางเคมี โดยใช้สารเคมีช่วยในการกำจัดและแยกน้ำมันออกจากน้ำทิ้ง ถึงแม้ว่าจะกำจัดคราบน้ำมันได้ดี แต่ต้องระมัดระวังการสะสมของสารเคมีเพราะความเข้มข้นของสารเคมีจะทำให้เกิดอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

เราจะเห็นว่า น้ำมันที่ละลายได้ในน้ำ หรือน้ำมันที่อยู่ในรูปอิมัลชันนั้นยังเป็นปัญหาสำคัญ

ที่จะทำการแยกน้ำมันจากน้ำทั้งอยู่ ในทางอุตสาหกรรม การแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออก ทำได้ โดยทำให้อิมัลชันของน้ำมันรวมตัวกัน โดยใช้เครื่องทำให้รวมตัวแบบเบดเส้นใย (Fibrous Bed Coalescer) แล้วนำไปตกตะกอนหรือกรองด้วยแรงโน้มถ่วง จากงานวิจัยของ U. Daiminger และคณะ ได้ทดลองนำหลักการของเครื่องทำให้รวมตัวแบบเบดเส้นใย (Fibrous Bed Coalescer) มาประยุกต์ใช้กับกระบวนการเยื่อแผ่นสังเคราะห์พบว่าสามารถทำให้เกิดการรวมตัว (Coalescence) ของเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันชนิดไฮโดรโฟบิก (hydrophobic)

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

เพื่อศึกษาผลของความดันและจำนวนรอบของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ต่อการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันชนิด PTFE

1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาปัญหาของการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออกจากน้ำเสีย
2. ออกแบบกระบวนการที่จะใช้ในการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชัน พร้อมทั้งเลือกชนิดของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่จะใช้ในการทำโครงการพิเศษ
3. ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เทคนิคการรวมตัวโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Membrane Coalescence) ในการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออกจากน้ำเสีย

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการพิเศษ

1. ทราบความเป็นไปได้ที่จะประยุกต์เทคนิคการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชัน โดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน ในการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออกจากน้ำเสีย
2. เป็นหนทางหนึ่งในการรักษาสิ่งแวดล้อมโดยการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันในน้ำเสียที่ปล่อยออกจากโรงงานอุตสาหกรรม และยังสามารถนำน้ำมันที่แยกออกได้กลับมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการได้อีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ปัญหาของการแยกน้ำมันออกจากน้ำ และกระบวนการที่ใช้

2.1 ปัญหาทั่วไปของการแยกน้ำมันกับน้ำ

การเกิดการแพร่กระจายของของเหลว 2 ชนิดที่ไม่รวมเป็นเนื้อเดียวกันจะไม่เสถียรทางอุณหพลศาสตร์ พลังงานอิสระของระบบมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากการลดแรงตึงผิวระหว่าง 2 วัฏภาค มีข้อจำกัดในขั้นของการเพิ่มขนาดของอนุภาค

สำหรับการรวมตัวกันของอนุภาคภายในเบตหนึ่ง การแยกจะเกิดเนื่องมาจากแรงโน้มถ่วงโดยของผลสมของทั้งสองจะถูกบดเข้าสูเบตหนึ่งและจึงมีเพียงวัฏภาคเดียวเท่านั้นที่เกิดแรงพันธะกับเม็ดเบตภายใน การรวมตัวจะเกิดขึ้นเมื่ออนุภาคต่อไปเข้ามาพร้อมกับอนุภาคแรกที่เกาะอยู่บนผิวของเม็ดเบตทำให้อนุภาคมีขนาดและน้ำหนักเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเกิดต่อเนื่องกันไปจนกระทั่งน้ำหนักที่เกิดจากแรงโน้มถ่วงมีค่ามากกว่าแรงพันธะยึดเหนี่ยว ทำให้อนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตกลงสู่ก้นเบตแล้วรวมกับอนุภาคอื่นจนเกิดการแยกชั้นเนื่องมาจากความแตกต่างของความหนาแน่น

2.1.1 การเคลื่อนที่ของอนุภาค (Droplet Migration)

อัตราการกระจายของอนุภาคต่างๆโดยอนุภาคน้ำมันจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปยังน้ำ มีกฎของการแยกต่าง ๆ ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงกฎของการแยก

Reynolds number	Law	Expression
0 - 2	Stokes'	$u = (D_s - D)d^2 g / 18\eta$
2 - 500	Intermediate	$u = 0.153g^{0.71}(D_s - D)^{0.71} d^{1.14} / D^{0.29}\eta^{0.43}$
500 - 200000	Newton's	$u = 1.74(g(D_s - D)d / D)^{1/2}$

where g = gravitational acceleration , u = terminal velocity , d = diameter of droplet, η = absolute viscosity of water , D = density of water , D_s = density of oil droplet.

จากตารางนี้สามารถหาความเร็วสุดท้าย (Terminal Velocity) ของอนุภาคได้ ซึ่งความเร็วสุดท้ายจะมีความสัมพันธ์กับเวลาดังสมการ

$$t = h / U_T \quad (2.1)$$

โดย h = ความสูงของเครื่องแยก

U_T = ความเร็วสุดท้าย

t = เวลาที่ใช้ในการแยก

อัตราการเคลื่อนที่ในการแยกด้วยแรงโน้มถ่วงจะแปรผกผันกับความหนืดของน้ำ กล่าวคืออัตราการเคลื่อนที่ที่จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น (ความหนืดลดลง) ซึ่งทำให้สามารถใช้ประโยชน์บนชิพบอร์ด (Ship Board) ที่จะลดขนาดตามความต้องการและได้รับความร้อนจากขดลวดต่างๆได้

การอัดอากาศเข้าไปในระบบจะทำให้อนุภาคของน้ำมันเกิดการกระจายตัวมากขึ้น เป็นเหตุให้อนุภาคมีพลังงานเพิ่มขึ้นโดยธรรมชาติ เมื่ออนุภาคเกิดการปะทะกัน พลังงานของตัวอนุภาคจะมีค่าเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลเพื่อลดพลังงานในตัวอนุภาคทั้งสองลง ในขั้นของการถ่ายเทมวลนี้ถือว่าการรวมตัวเข้าด้วยกันของอนุภาคทั้งสองทำให้พื้นที่ผิวของอนุภาคลดลง (ประมาณ 41%) และพลังงานของอนุภาคจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเกิดการชนกันในช่วงแรก

2.1.2 การรวมตัวกันเป็นหยด (Coalescence)

การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมัน ไม่เพียงแต่จะเกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นข้างต้นเท่านั้น ในการพิจารณาการรวมตัวของอนุภาค อนุภาคจะถูกยับยั้งโดยฟิล์มของน้ำที่เข้าล้อมรอบอนุภาคของน้ำมันทำให้อนุภาคไม่สามารถเกิดการถ่ายเทมวลเมื่อเกิดการชนกันได้ การกำจัดฟิล์มของน้ำนี้ทำได้โดยปล่อยของผสมออกไปประมาณ 1 – 2 วินาที เพื่อให้เกิดการรบกวนระบบของการเคลื่อนที่ภายใน การเปลี่ยนแปลงระบบของการเคลื่อนที่นี้จะเข้าไปทำลายฟิล์มของน้ำได้ หลังจากนั้น ภูมิภาคของน้ำมันจะสามารถรวมตัวกันได้ในช่วงเวลาไม่กี่วินาที การเพิ่มอุณหภูมิช่วงหนึ่งให้กับระบบจะทำให้อนุภาคมีพลังงานเพิ่มมากขึ้น อนุภาคจะสามารถเอาชนะแรงต้านทานจากฟิล์มของน้ำเข้ามารวมตัวกันเป็นอนุภาคที่ใหญ่ขึ้นได้

เวลาที่ใช้ทิ้งของผสมเป็นฟังก์ชันกับความหนืดและความหนาแน่นสัมพัทธ์ของน้ำกับน้ำมัน

2.1.3 การกระจายชั้นปฐมภูมิ (Primary dispersions)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำให้เกิดการกระจายมากขึ้นจะช่วยลดระยะเวลาของการแยกได้ โดยขนาดของอนุภาคจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วก่อนที่จะถึงบริเวณที่มีความหนาแน่นสูง นั้นหมายความว่าระยะที่เราจะใช้ในการแยกก็จะลดลงหรือเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการแยก

2.1.4 การกระจายชั้นทุติยภูมิ (Secondary Dispersions)

โดยปัญหาในขั้นนี้เกิดจากความแตกต่างของขั้นตอนการรวมตัวกันได้ อธิบายในข้างต้นโดยใช้ การเกิดการรวมตัวกันเป็นหยดบนแผ่นแบน

ในเบดนิ่ง (Packed Bed) หยดของน้ำมันจะผ่านไปยังตัวเบด และติดอยู่บนพื้นผิวของเบดโดยเกิดพันธะที่มีค่าความแรงมากกว่าแรงแทรก (drag force) ที่กระทำบนหยดเหล่านั้น และทำให้เกิดการแยกออกจากกัน การรวมตัวกันจะเกิดขึ้นเมื่อหยดที่สองมาปะทะกับหยดแรกที่เกาะอยู่ก่อนแล้วและจะค่อยโตขึ้นเรื่อยๆ จากการปะทะของหยดต่อไป ในที่สุดแรงแทรก (drag force) จะสามารถเอาชนะแรงพันธะที่ยึดเกาะได้และอนุภาคจะตกลงสู่ด้านล่างของเบดเนื่องจากแรงโน้มถ่วง ดังนั้นจะแตกต่างจากการกระจายชั้นปฐมภูมิ ค่าความเปียกของน้ำมันไม่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการกระจายชั้นทุติยภูมิ ความเปียกจากวัฏภาคของตัวกระจาย (น้ำมัน) สามารถทำให้เกิดความเสียหายได้ เช่น ทำให้เกิดการท่วมหรือบดบังเม็ดเบด ยังผลให้อนุภาคอื่น ๆ ไม่สามารถเข้ามารวมตัวกันได้

2.2 บทสรุป

ระบบการแยกน้ำมันจากน้ำ ตัวแปรที่สำคัญ คือ ขนาดอนุภาคของน้ำมัน จะเป็นฟังก์ชันกับพลังงานที่ใส่เข้าไปในระบบ ถ้าพลังงานสูงเพียงพอและหยดมีขนาดเล็ก จะไม่สามารถใช้ การแยกโดยแรงโน้มถ่วง แต่จะต้องการพื้นผิวของการเกิดหยดและอาจเป็นไปได้ที่น้ำมันจะถูกกักไว้ในเครื่องกรอง ประสิทธิภาพของเครื่องแยกน้ำมันจากน้ำ สามารถวัดได้โดยปริมาณน้ำมันของน้ำเสียที่เหลือออกจากโรงงานต่อปริมาณน้ำมันในน้ำเสียภายในโรงงาน

บทที่ 3

กระบวนการแยกเยื่อแผ่นสังเคราะห์

3.1 บทนำ

การแยกโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์มักจะนำไปใช้ในการทำให้สารมีความบริสุทธิ์มากขึ้นหรือทำให้สารนั้นมีความเข้มข้นมากขึ้น เยื่อแผ่นจะมีคุณสมบัติการเลือกผ่านสาร โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนจากภายนอกในการแยก เช่น ความเข้มข้น ความดัน และ ความต่างศักย์ เป็นต้น

กระบวนการแยกที่ใช้ความต่างศักย์เรียกว่า กระบวนการ Electrodialysis และถ้าใช้ความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อนเรียก กระบวนการ Dialysis และถ้าใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนก็จะแบ่งเป็นกระบวนการต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis, RO) เป็นกระบวนการที่แยกโมเลกุลขนาดเล็กที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 500 และมีขนาดระหว่าง 0.0001-0.001 ไมโครเมตร โดยใช้ความดันในการแยก 150 - 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว โดยความดันที่ใช้จะต้องสูงกว่าความดันออสโมติกของสารละลายจึงเกิดการแยกได้

2. กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นการแยกสารโมเลกุลใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลระหว่าง 500-300,000 หรือมีขนาดระหว่าง 0.001-0.05 ไมโครเมตร เช่น การแยกโปรตีนออกจากสารละลาย เป็นต้น โดยใช้ความดันในการแยกระหว่าง 1-10 บาร์ ในการบอกลักษณะของเยื่อแผ่นสังเคราะห์จะบอกเป็นค่า Molecular weight cut-off (MW cut - off)

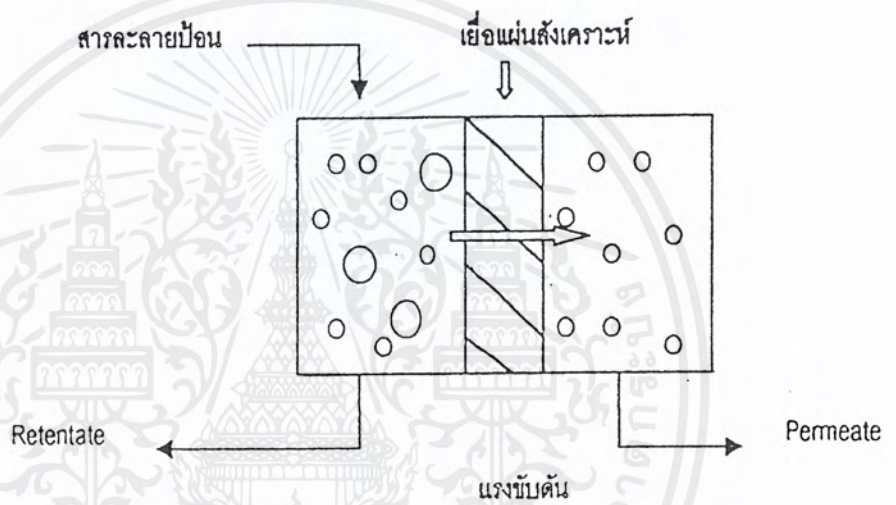
3. กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF) เป็นกระบวนการแยกอนุภาคขนาดเล็กหรือคอลลอยด์โดยเยื่อแผ่นสามารถกักกันสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 300,000 หรือมีขนาดรูพรุน 0.05-10 ไมโครเมตร โดยใช้ความดันไม่เกิน 5 บาร์

ในการประยุกต์ใช้งาน RO มักใช้ในอุตสาหกรรมผลิตน้ำดื่ม UF ใช้ในการแยกโมเลกุลของโปรตีนหรือพอลิเมอร์ต่าง ๆ ออกจากสารละลายรวมถึงการเพิ่มความเข้มข้น ส่วน MF จะใช้ในการเพิ่มความเข้มข้นหรือแยกสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ เช่น คอลลอยด์ นอกจากนี้ยังมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้ .

กระบวนการทางเยื่อแผ่นสังเคราะห์อื่น ๆ ที่สำคัญได้แก่ กระบวนการเพอร์แอมพอเรชัน (Pervaporation) และ ก๊าซเพอร์มิเอชัน (Gas permeation) เป็นต้น

หลักการทั่วไป ในการแยกสารโดยใช้เยื่อแผ่นก็คือ ตัวถูกละลายที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าเยื่อแผ่นจะถูกเยื่อแผ่นกักกันและเรียกสารที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้อาสาเรียกกัน (Retentate) ส่วนตัวทำละลายและสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กกว่าเยื่อแผ่น จะสามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้เรียกว่าสารซึมผ่าน (Permeate) แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 หลักการของกระบวนการแยกโดยเยื่อแผ่นสังเคราะห์

3.1.1 การแบ่งชนิดของเยื่อแผ่น

ถ้าแบ่งตามโครงสร้างของเยื่อแผ่น สามารถแบ่งเยื่อแผ่นสังเคราะห์ออกเป็น 4 ชนิด ดังนี้

1. เยื่อแผ่นแบบแน่น (Dense Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีปริมาตรช่องว่างต่ำมาก และมีความหนาประมาณ 10 อังสตรอม การเตรียมเยื่อแผ่นชนิดนี้จะเตรียมจากสารละลายโพลิเมอร์หรือจากโพลิเมอร์หลอมเหลว แล้วทำปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) เยื่อแผ่นประเภทนี้สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

ก เยื่อแผ่นแบบบางมาก (Ultrathin Membrane) เยื่อแผ่นชนิดนี้จะเตรียมจากสาร-

ละลายโพลีเมอร์ ที่เจือจาง โดยวิธีการเตรียมหลายวิธี เช่น จุ่มแผ่นแก้วที่สะอาดลงในสารละลาย นั้น ๆ แล้วดึงขึ้นมา ให้ตัวทำละลายระเหยออกไป แล้วจุ่มลงในน้ำเย็น ตัวอย่าง เช่น เยื่อแผ่นที่ เตรียมจากสารละลายเซลลูโลสอะซีเตต 1% ในไซโคลเฮกเซน

ข เยื่อแผ่นประกอบ (Composite Membrane) เยื่อแผ่นชนิดนี้ประกอบด้วยเยื่อ-แผ่นที่ผลิตจากวัสดุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป มีหลายชั้น โดยทั่วไปจะประกอบด้วยเยื่อแผ่นแบบแน่น (หรือชั้นผิวที่บางมาก) บนเยื่อแผ่นเสริม เช่น เยื่อแบบแน่นของโพลีอีทิลีน ทำการ Cast บนตัว-รองรับ ซึ่งใช้ Poly(ethylene terephthalate)

2. เยื่อแผ่นรูพรุน (Porous Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีปริมาตรของช่องว่างสูง (มากกว่า 60 %) ซึ่งเยื่อแผ่นชนิดนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก เยื่อแผ่นรูพรุนโพลีเมอร์ (Polymeric Porous Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่ผลิตจาก โพลีเมอร์ต่าง ๆ เช่น การผลิตเยื่อแผ่นโพลีเมอร์ จากเซลลูโลสอะซีเตต ผสมกับตัวทำละลาย และ สารเติมแต่ง (Additive) อื่น ๆ โดยวิธี Phase Inversion

ข เยื่อแผ่นรูพรุนที่ไม่ใช่โพลีเมอร์ (Non-Polymeric Porous Membrane) เป็นเยื่อ-แผ่นที่ผลิตจากสารที่ไม่ใช่โพลีเมอร์ เช่น เยื่อแผ่นเซรามิก ที่ทำจากอะลูมินาและซิลิกา เป็นต้น

3. เยื่อแผ่นที่เตรียมขึ้นขณะใช้งาน (In-situ Formation Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่ เตรียมขึ้นแล้วนำมาใช้งานได้ทันที สามารถแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

ก เยื่อแผ่นไดนามิก (Dynamic Membrane, DM) เป็นเยื่อแผ่นที่เกิดจากอนุภาค ของสารละลายคอลลอยด์ หรือสารประกอบโมเลกุลใหญ่มาจับกัน หรือถูกดูดซับอยู่บนตัวรองรับ ที่มีรูพรุน โดยทำการกรองสารที่ต้องการเตรียมเป็นเยื่อแผ่นไดนามิก ผ่านตัวรองรับภายใต้ความ-ดัน ซึ่งอนุภาคจะถูกดูดซับนั้นจะเปรียบเสมือนเยื่อแผ่นอีกชั้นหนึ่ง ทำให้คุณสมบัติในการกักกัน สารของตัวรองรับเปลี่ยนแปลงไป คือ สามารถกักกันได้ดีขึ้น ซึ่งคุณสมบัติของเยื่อแผ่นไดนามิก จะแตกต่างกัน ชนิดและขนาดรูพรุนของตัวรองรับเนื่องจากเป็นเยื่อที่เตรียมขึ้นมาขณะการใช้งาน โดยการกรองสารที่จะให้สร้างเยื่อแผ่นผ่านตัวรองรับเยื่อแผ่นชนิดนี้จึงได้ชื่อว่า"เยื่อแผ่นสังเคราะห์-ไดนามิก"(Dynamically Formed Membrane)และเนื่องจากเยื่อแผ่นไดนามิกนี้เปรียบเสมือนเยื่อ-แผ่นอีกชั้นหนึ่ง บางครั้งจึงถูกเรียกว่า"เยื่อแผ่นสังเคราะห์ทุติยภูมิ"(Secondary Membrane) หรือ "เยื่อแผ่นสังเคราะห์วิภภาค"(Fromed-In-Phase (FIP) Membrane)

คำว่าเยื่อแผ่นไดนามิก(Dynamic Membrane)นี้ถูกใช้ครั้งแรกโดย Marcinkowsky ในปี ค.ศ 1966 วัสดุที่ใช้คือ ออกไซด์ของ Zr และ Fe สร้างเยื่อไดนามิกบนตัวรองรับเซรามิก และ การ-หลอมสแตนเลสด้วยความร้อน (Sintered Stainless) เยื่อแผ่นที่สร้างขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเยื่อ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นรีเวอร์สออสโมซิส (RO) ที่เตรียมจากเซลลูโลสอะซิเตต เพื่อใช้ในกระบวนการแยกน้ำบริสุทธิ์จากน้ำกร่อย พบว่า

1. เยื่อแผ่นไดนามิกให้ค่าฟลักซ์ของน้ำสูงกว่า
2. การล้างและสร้างเยื่อแผ่นไดนามิกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ทำได้ง่ายกว่า
3. สามารถเลือกวัสดุในการสร้างเยื่อแผ่นได้มากกว่า

ในช่วงแรกของงานวิจัยเยื่อแผ่นไดนามิก มุ่งเน้นในด้านการสร้างเยื่อแผ่นเพื่อกำจัดเกลือออกจากน้ำทะเล น้ำกร่อย แต่หลังจากนั้นมีการวิจัยด้านอื่น ๆ เช่น ใช้ในการแยกน้ำตาล แยกกรด แยกโปรตีน หรือใช้ในการเพิ่มความเข้มข้น ในการทำให้เครื่องต้มใส อีกทั้งยังมีงานวิจัยเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสีย เพื่อเป็นการลดค่า BOD และ COD รวมถึงงานวิจัยเพื่อเพิ่มมูลค่าของเหลือทิ้ง เช่น กระบวนการแยกน้ำตาลออกจากน้ำของเปลือกสับประรด หรือ การแยกสีออกจากโรงงานย้อมสีเพื่อนำสีกลับมาใช้ใหม่ เป็นต้น

เยื่อแผ่นไดนามิกสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ดังนี้

1. Precoated Dynamic Membrane เป็นเยื่อแผ่นไดนามิกที่เตรียมขึ้นจากสารต่างชนิดกันกับสารที่ต้องการแยก เช่น เยื่อแผ่นไดนามิกที่เตรียมขึ้นจาก Zr(IV)-PAA บนตัวรองรับเซรามิก เพื่อใช้ในการแยกน้ำกร่อยหรือการเตรียมเยื่อแผ่นจากสารประเภท Metal Alloid เช่น Fe, Al, Cd บนตัวรองรับเซรามิกชนิดท่อ เพื่อใช้แยกโปรตีน เป็นต้น
2. เยื่อแผ่นไดนามิกที่เกิดขึ้นด้วยตัวเอง (Self – Forming Dynamic – Membrane) เป็นเยื่อแผ่นไดนามิกที่เตรียมขึ้นจากสารชนิดเดียวกันกับสารที่ต้องการแยก โดยที่เป็นการมองภาพของการเกิดเจลโพลาริเซชัน และการเกิดการอุดตัน (Fouling) ในแง่บวกเนื่องจากการเกิดเจลโพลาริเซชันและการเกิดการอุดตัน จะเปรียบเสมือนเป็นเยื่อแผ่นอีกชั้นหนึ่งมาประกอบติดกับเยื่อแผ่น จึงทำให้ค่ารีเจคชันสูงขึ้น ตัวอย่างการใช้เยื่อแผ่นไดนามิกชนิดนี้ เช่น การกรองสารละลายโอวอลบูมิน (Ovalbumin) ผ่านตัวรองรับที่เป็นเซรามิก จนเกิดขึ้นเยื่อแผ่นไดนามิกที่มีลักษณะคล้ายเจลของโอวอลบูมิน เพื่อใช้ในการกรองสารละลายโอวอลบูมิน เป็นต้น
- ก เยื่อแผ่นของเหลว (Liquid Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีลักษณะคล้ายกับเยื่อแผ่นไดนามิก โดยจะมีส่วนประกอบของเยื่อแผ่นอยู่ในสารละลายป้อนอาจจะเป็นฟิล์มบาง ๆ เคลือบอยู่บนชั้นตัวรองรับ (Support) หรืออยู่ในรูปของอิมัลชัน (Emulsion) ซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ เยื่อแผ่นของเหลวชนิดน้ำ (Water Type Liquid Membrane) และ เยื่อแผ่นของเหลวชนิดน้ำมัน (Oil Type Liquid Membrane) โดยต้องคำนึงถึงการเติมสารลดแรงตึงผิว (Surfactant) และสารเติมแต่ง (Additive) ในสัดส่วนที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange Membrane) เป็นเยื่อแผ่นที่มีประจุอยู่ในโมเลกุลของส่วนประกอบเยื่อแผ่น โดยเยื่อแผ่นประกอบด้วยประจุเคลื่อนที่ (Mobile Charge) และประจุอยู่กับที่ (Fixed Charge) เยื่อแผ่นที่มีประจุบวกอยู่กับที่จะสามารถแลกเปลี่ยนประจุลบกับสารละลายภายนอกและปล่อยออกอีกด้านหนึ่งเรียก เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนประจุลบ (Anion Exchange Membrane) ส่วนเยื่อแผ่นที่มีประจุลบอยู่กับที่ จะสามารถแลกเปลี่ยนประจุบวกกับสารละลายภายนอกอีกทั้งปล่อยออกอีกด้านหนึ่งเรียก เยื่อแผ่นแลกเปลี่ยนประจุบวก (Cation Exchange Membrane)

3.1.2 วัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่น

วัสดุที่ใช้ทำเยื่อแผ่นแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ สารโพลิเมอร์และสารอนินทรีย์

3.1.2.1 สารโพลิเมอร์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

ก. สารอินทรีย์โพลิเมอร์ (Organic polymer) เช่น เซลลูโลส เป็นต้น

ข. สารอนินทรีย์โพลิเมอร์ (Inorganic polymer) เช่น Polyphosphagene เป็นต้น เยื่อแผ่นที่ทำจากสารโพลิเมอร์มีอายุการใช้งานประมาณ 1-4 ปี และมีราคาถูก

2.1.2.2 สารอนินทรีย์ เช่น โลหะ แก้ว และเซรามิก เยื่อแผ่นประเภทนี้จะสามารถทนทานต่อสารเคมี ทนต่ออุณหภูมิสูง และทนความดันได้สูง มีอายุการใช้งานประมาณ 10 ปี แต่มีราคาแพง

3.2 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)

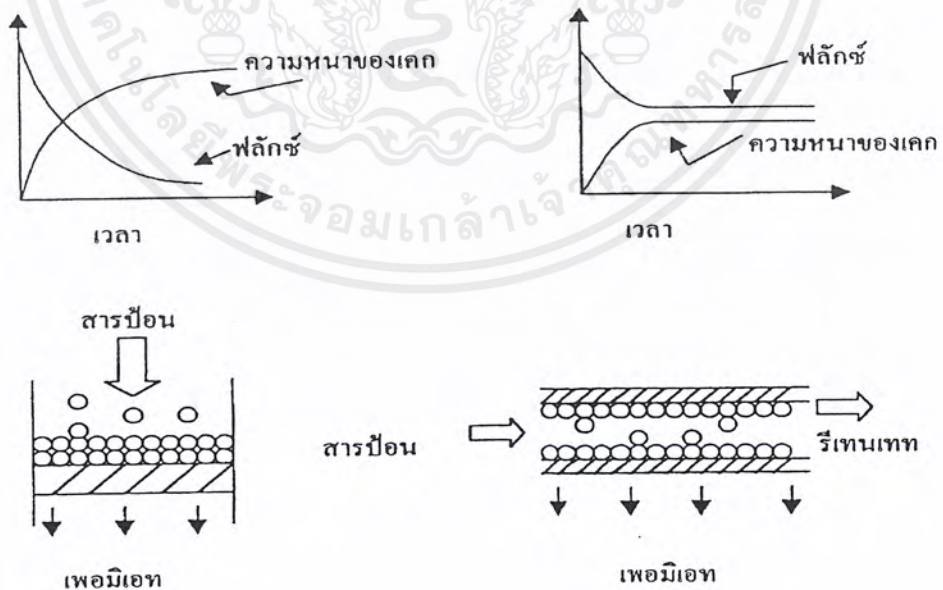
ไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการที่ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ ในการแยกสารละลายที่มีตัวถูกละลายเป็นอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชัน หรือสารแขวนลอย โดยความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลาย อยู่ระหว่าง 1-5 บรรยากาศ เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน มีขนาดรูพรุน 0.1-10 ไมโครเมตร ดังนั้นตัวถูกละลายที่แยกโดยเยื่อแผ่นชนิดนี้ จึงมีขนาดที่เทียบเป็นน้ำหนักโมเลกุลตั้งแต่ 30,000 ขึ้นไป ตัวอย่างการใช้งานของไมโครฟิลเตรชัน เช่น ใช้ในการบำบัดน้ำทิ้งใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องดื่ม เช่น ไวน์ น้ำผลไม้ เพื่อการทำให้ใส (clarification) อุตสาหกรรมเทคโนโลยีชีวภาพ

ไมโครฟิลเตรชันแบบปลายปิดและแบบไหลขวาง(Deadend and crossflow microfiltration)

ลักษณะการกรองในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

1. การกรองแบบปลายปิด (Dead-end) เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น ที่เรียกว่า เค้ก (cake) การสะสมของเค้ก ทำให้ความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้น และทำให้ฟลักซ์ลดลง อย่างรวดเร็วทำให้ต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดชั้นเค้กที่เกิดขึ้นดังนั้นการกรองแบบปลายปิด จึงควรใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็ก และมีความเข้มข้นต่ำ และดำเนินงานแบบพัช(Batch)

2. การกรองแบบไหลขวาง (Crossflow Microfiltration) เป็นการป้อนสารละลายขนานกับเยื่อแผ่นหรือตั้งฉากกับทิศทางของเพอมีเอท ซึ่งเรียกว่า crossflow หรือ tangential flow ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน การป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีผลของแรงเฉือน ทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าเยื่อแผ่น ดังนั้นจึงลดการเกิด concentration polarization (CP) จึงมีการสะสมของเค้กเพียงบาง ๆ เท่านั้น การลดลงของฟลักซ์ไม่มากเท่าในการกรองแบบปลายปิดจึงเหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบันจึงเป็นไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่



รูปที่ 3.2 การเปรียบเทียบการกรองแบบปลายปิด และแบบไหลขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ทฤษฎีของไมโครฟิลเตรชันแบบปลายปิด

เป็นที่ยอมรับกันทั่วไปว่ากลไกการกักกันอนุภาคหรือคอลลอยด์ ในไมโครฟิลเตรชันเป็นการคัดขนาด โดยอาศัยความต้านทานต่อการไหลเกิดจากตัวเยื่อแผ่นเองและชั้นเค้กสามารถคำนวณค่าฟลักซ์ได้จาก Darcy's law

$$j_v = (1/A_m)(dv/dt) = \Delta P / (\mu_v(R_m + R_c)) \quad (3.1)$$

เมื่อ

j_v = ฟลักซ์ของเพอมีเอท ($m^3/m^2 \cdot h$)

A_m = พื้นที่เยื่อแผ่น (m^2)

V = ปริมาตรของเพอมีเอท (m^3)

T = เวลา (h)

ΔP = ผลต่างความดันระหว่างชั้นเค้กกับผิวเยื่อแผ่น (Pa)

μ_v = ความหนืดของสารละลาย (Pa.s)

R_m, R_c = ความต้านทานของเยื่อแผ่นและเค้ก (m^{-1})

โดย R_m สามารถเปลี่ยนแปลงได้เพราะถูกสารโมเลกุลเล็ก ๆ เข้าไปสะสมภายในรูพรุน (เทียบได้กับการเกิดการอุดตัน) R_c ก็เช่นเดียวกันมีค่าเพิ่มขึ้นกับเวลาเพราะการสะสมของเค้กหนาขึ้น และมีการอัดตัวแน่นภายใต้ความดัน ทั้ง R_m และ R_c สามารถหาได้จากการทดลอง

ความต้านทานของเค้ก ขึ้นอยู่กับชนิดของอนุภาคหรือสารแขวนลอยในสารละลายนั้น ๆ

และ

$$R_c = \delta_c r_c \quad (3.2)$$

เมื่อ

δ_c = ความหนาของเค้ก (m)

r_c = ความต้านทานจำเพาะของเค้ก (m^{-2})

กรณีที่เป็นเค้กแบบไม่ยุบตัว (incompressible cake) สามารถประมาณค่าได้โดยสมการของ Carman - Kozeny คือ

$$r_c = \frac{180(1-\varepsilon)^2}{d_s^2 \varepsilon^3} \quad (3.3)$$

เมื่อ

ε = สัดส่วนช่องว่างของเค้ก (void fraction)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

d_s = เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค

สำหรับอนุภาคหรือสารแขวนลอยบางชนิด เช่น เบ็นโตไนท์ (bentonite) คอลลอยด์ของซิลิกา เซลล์ของจุลินทรีย์ จะสะสมเป็นเค้กแบบยุบตัว (compressible cake) ซึ่งหมายถึงปริมาตรของช่องว่างลดลงเมื่อเพิ่มความดันขึ้น ดังนั้นความต้านทานจำเพาะของเค้กที่ยุบตัวจะขึ้นกับความดันดังนี้

$$r_c = \alpha_0 (\Delta P)^p \quad (3.4)$$

โดย α_0 เป็นค่าคงที่ที่ขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของอนุภาคในเค้ก ส่วน n มีค่าตั้งแต่ 0 ขึ้นไปสำหรับเค้กที่ไม่ยุบตัว และมีค่าเข้าใกล้ 1.0 สำหรับเค้กที่ยุบตัวได้ง่าย ทั้ง α_0 และ n สามารถที่จะหาได้จากการทดลอง

การกรองแบบปลายปิด เป็นกระบวนการเก่าแก่เช่น การกรองอนุภาคด้วยเครื่องกรองแผ่นและกรอบ (plate and frame filter press) จึงมีการศึกษาในเชิงทฤษฎีอย่างละเอียดโดยแยกเป็นการกรองแบบฟลักซ์คงที่ และแบบใช้ความดันคงที่

เมื่อมีการพัฒนาเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน (จากโพลีเมอร์ต่าง ๆ ตลอดจนวัสดุเซรามิกส์) เพื่อใช้ในการแยกสารโมเลกุลใหญ่ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 300,000 เยื่อแผ่นที่ใช้มีลักษณะที่ต่างไปจากแผ่นกรองที่ใช้อยู่เดิมทั้งในส่วนของวัสดุที่ใช้วิธีการผลิตโครงสร้างเยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันมีลักษณะไม่สมมาตรเช่นเดียวกับเยื่อแผ่นที่ใช้ในออสโมซิสผันกลับ และอัลตราฟิลเตรชัน

3.4 ทฤษฎีของไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง (Crossflow Microfiltration, CFMF)

ถึงแม้ว่าไมโครฟิลเตรชันมีความคล้ายคลึงกับอัลตราฟิลเตรชัน แต่นักวิจัยส่วนใหญ่พบว่าการอธิบายการลดลงของฟลักซ์มีความซับซ้อนมากกว่า จึงมีความพยายามในการพัฒนาแบบจำลองต่าง ๆ เป็นจำนวนมาก Gekas และ Hallstrom ได้รวบรวมไว้และสรุปว่าเป็นการยากที่จะพัฒนาแบบจำลองที่เหมาะสมในทางปฏิบัติ และแบบจำลองส่วนใหญ่ไม่สามารถอธิบายการเกิดการอุดตัน (fouling) และการอุดตันได้เมื่อสารละลายมีหลายองค์ประกอบ เช่น มีทั้งอนุภาคและสารโมเลกุลใหญ่ ในที่นี้ได้กล่าวถึงแบบจำลองที่ไม่ซับซ้อนเกินไปและยกตัวอย่างของการนำไปใช้

3.4.1 แบบจำลองคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, (CP)) กลไกของ CFMF จากหลังการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เพราะเห็นว่า CFMF และ อัลตราฟิลเตรชันมีความคล้ายคลึงกัน และพบว่าการคำนวณค่าฟลักซ์โดยใช้แบบจำลองคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันได้ค่าฟลักซ์ต่ำกว่าผลการทดลอง 1-2 เท่าที่เป็นเช่นนั้น เพราะจะต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์

การแพร่ของอนุภาคในสารละลาย (ใช้ในการคำนวณสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวล) ซึ่งเรียกว่า Brownian diffusivity ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการของ Stokes – Einstein ดังนี้

$$D_p = kT / 6\pi\mu_v r \quad (3.5)$$

เมื่อ D_p = สัมประสิทธิ์การแพร่ (cm^2/s)

T = อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

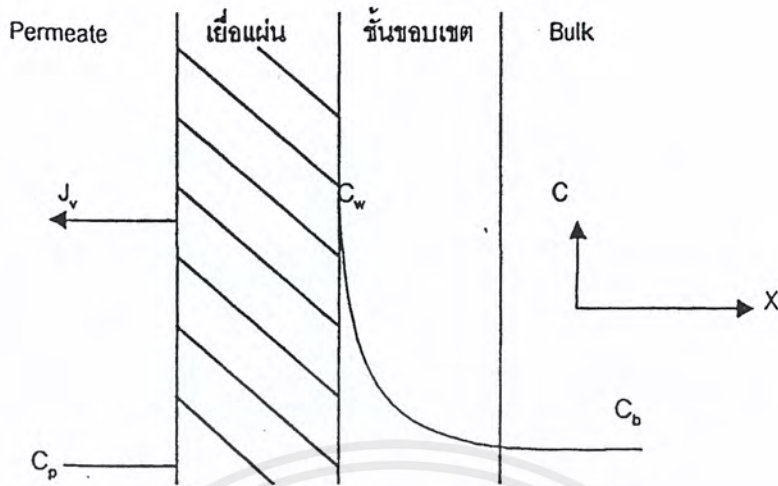
μ_v = ความหนืดของสารละลาย ($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$)

r = รัศมีของอนุภาค (cm)

k = ค่าคงที่ Boltzmann ($1.38 \times 10^{-16} \text{ g}\cdot\text{cm}^2/\text{s}^2\cdot\text{K}$)

ค่า D_p ของอนุภาคที่มีขนาดอนุภาคในระดับไมครอน มีค่าต่ำกว่าของสารโมเลกุลใหญ่กว่า ทำให้ค่าฟลักซ์ตามแบบจำลองคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ซึ่งขึ้นอยู่กับ การแพร่กลับ (back diffusion) มีค่าต่ำ ทั้งๆที่เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชันมีค่าความต้านทานต่อการไหลต่ำ ความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง และค่าที่ได้จากการคำนวณจากสมการเรียกว่าฟลักซ์ พาราดอกซ์ (flux paradox) นักวิจัยหลายคน ได้อธิบายว่ามีปรากฏการณ์ที่เสริมกับการแพร่กลับของอนุภาคเรียกว่า แลททิรัล ไมเกรชัน (lateral migration) ซึ่งเกิดจากอินเนอเซีย ลิฟท์ (inertial lift) โดยทำให้อนุภาคเคลื่อนที่จากผิวเยื่อแผ่นไปยังส่วน bulk ของสารละลาย (เคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับการแพร่) ทำให้ฟลักซ์สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม การเคลื่อนที่แบบ แลททิรัล ไมเกรชัน (lateral migration) ใน CFMF จริง ๆ ที่มีค่าน้อยมาก จึงไม่ควรให้ผลให้ฟลักซ์จริงสูงกว่าค่าจากการคำนวณ

Zydney และ Colton เสนอว่าถ้าจะคำนวณค่าฟลักซ์โดยใช้แบบจำลอง ต้องใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายใต้แรงเฉือน (Shear induced diffusivity, D_s) แทนสัมประสิทธิ์การแพร่ Brownian (D_b) โดย D_s ขึ้นอยู่กับรัศมีของอนุภาคยกกำลังสองคูณด้วยอัตราเฉือน (shear rate) ดังนั้นสำหรับอนุภาคขนาดเท่ากัน D_s มากกว่า D_b อยู่ประมาณ 4 เท่า ซึ่งผลปรากฏว่าแนวคิดนี้ใช้อธิบายผลการทดลองได้อย่างเหมาะสมเฉพาะกรณีที่ชั้นเค้กบาง มีความต้านทานสูงและอนุภาคในเค้กเปลี่ยนรูปร่างได้ (เช่นเซลล์เม็ดเลือดแดง) และไม่สามารถอธิบายผลของการทดลองได้ดีถ้าอนุภาคในชั้นเค้กมีขนาดอนุภาคเล็กและความคงตัว (หรือไม่ยุบ) และเค้กมีความต้านทานต่อการไหลต่ำ แนวคิดของ Zydney และ Colton มีข้อสมมติว่าความต้านทานของเยื่อแผ่นมีค่าน้อยมากหรือความต้านทานเนื่องจากเค้กเป็นตัวที่มีผลต่อค่าฟลักซ์มาก



รูปที่ 3.3 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

3.4.2 แบบจำลองอินทิกรัล (Integral) และ ทฤษฎี อินเนอเซีย ลีฟท์ (Inertial Lift) นอกเหนือจากแบบจำลองคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ซึ่งเสนอให้มีการใช้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายใต้แรงเฉือนในการทำนายค่าฟลักซ์ ก็ยังมีการพัฒนาแบบจำลองอื่นๆ เช่น 1) แบบจำลองอินทิกรัล (Integral) ที่ทำนายค่าฟลักซ์ที่สภาวะคงตัว โดยพิจารณาทั้งจากความต้านทานของเยื่อแผ่นและความต้านทานจากเค้ก และ 2) ทฤษฎีอินเนอเซีย ลีฟท์ (Inertial Lift) ซึ่งอธิบายปรากฏการณ์ฟลักซ์ พาราโดค อย่างไรก็ตามทฤษฎี หรือ แบบจำลองเหล่านี้ค่อนข้างซับซ้อน ทั้งในส่วนของสมการที่เกี่ยวข้อง ข้อสมมติต่าง ๆ และสามารถทำนายค่าฟลักซ์ได้เป็นบางกรณีเท่านั้น ทั้งนี้เพราะกลไกของไมโครฟิลเตรชันซับซ้อนและอาจมีหลายปรากฏการณ์ที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ ดังนั้นแบบจำลองที่กล่าวถึงในข้างต้น จึงไม่มีการนำไปใช้เท่าที่ควร

3.4.3 แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน แบบจำลองที่กล่าวมาเป็นแบบจำลองที่ทำนายฟลักซ์ที่สภาวะคงตัว ในทางปฏิบัติสามารถแบ่งการลดลงของฟลักซ์ออกเป็น 2 ช่วง คือ ในช่วงต้นซึ่งฟลักซ์จะลดลงเพราะการสะสมของเค้ก และในช่วงยาวนานเพราะการเกิดการอุดตัน (fouling) (ซึ่งอาจนานหลายชั่วโมงหรือหลายวัน กว่าที่จะเข้าสู่สภาวะคงตัว) ในทั้ง 2 ช่วงสามารถหาค่าฟลักซ์จากสมการของ Darcy โดยทั้ง R_m และ R_c ขึ้นกับเวลา แบบจำลองอนุกรมความต้านทานมีที่มาจากสมการของ Darcy แต่มีการจำแนกความต้านทานย่อยกว่าเพื่อที่จะโยงค่าที่ได้กับการลดลงของฟลักซ์ดังสมการที่ 6 เมื่อ

$$J_v = \Delta P / (\mu_v R_t) \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $R_t = R_m + R_r + R_p$

Qusman และ Bennasar ใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทานอธิบายผลการทดลองแยกสารแขวนลอย ซึ่งเป็นเม็ดแป้งและพบว่าความต้านทานเนื่องจากการสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นเป็นความต้านทานหลักของการเกิดการอุดตันและถ้าใช้เยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ขึ้น ความต้านทานดังกล่าวจะลดลง แต่ความต้านทานเนื่องจากการอุดตันภายในรูพรุนเพิ่มขึ้น Jiratananon และคณะศึกษาระบบไมโครฟิลเตรชันที่ประกอบด้วยคอลลอยด์ของโปรตีนโตไนท์กับสารโมเลกุลใหญ่ เช่น BSA (bovine serum albumin) เด็กเทรน (dextran) และ PEG (polyethylene glycol) และวิเคราะห์ค่าความต้านทานต่าง ๆ โดยพบว่า สารโมเลกุลใหญ่ เช่น BSA ที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนโดย R_f มีค่าสูงถึง 79% ของความต้านทานรวม ในขณะที่สารคอลลอยด์จะมี $R_p > R_f$ เมื่อผสมสารโมเลกุลใหญ่กับสารคอลลอยด์พบว่าคอลลอยด์ช่วยให้เยื่อแผ่นสามารถกักกันสารโมเลกุลใหญ่ให้ดีขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็ทำให้ R_f เพิ่มขึ้น การอุดตันภายในรูพรุนจึงมีผลต่อการลดลงของฟลักซ์มากกว่าการสะสมของเค้กหรือการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน การอธิบายการลดลงของฟลักซ์โดยใช้แบบจำลองอนุกรมความต้านทานเป็นวิธีที่ไม่ยุ่งยากแต่สามารถช่วยให้เข้าใจคุณสมบัติขององค์ประกอบต่าง ๆ ในสารละลายตลอดจน อันตรกิริยา(Interaction) ระหว่างองค์ประกอบและเยื่อแผ่นได้เป็นอย่างดี

3.4.4. แบบจำลองการกรองภายใต้ความดันคงที่ (Constant Pressure Filtration Model) Hemia ได้เสนอแบบจำลองการกรองสำหรับสารละลายที่ไม่ใช่ของไหลนิวโตเนียน (non-Newtonian) เมื่อความดันคงที่ ซึ่งแต่ละแบบจำลองมีแนวคิดในเรื่องการอุดตันต่างกัน

3.4.4.1 แบบจำลองกีดขวางการกรองสมบูรณ์ (Complete Blocking Filtration Model) (CBM) มีสมมติฐานว่าโมเลกุล หรือ อนุภาคที่มาถึงเยื่อแผ่นจะเข้าไปอุดตันรูพรุนโดยทั่วๆ โมเลกุลหรืออนุภาคมีส่วนในการอุดตันรูพรุนไม่ซ้อนทับกัน สมการอัตราการไหลของเพอมีเอทที่เสนอในแบบจำลองนี้คือ

$$Q = Q_0 - K_b V \quad (3.7)$$

โดยที่ Q = อัตราการไหลของเพอมีเอทที่เวลาใด ๆ (m^3/h)
 K_b = ค่าคงที่ของการกรอง CBM (h^{-1})
 V = ปริมาตรของเพอมีเอท (m^3)
 Q_0 = อัตราการไหลของเพอมีเอทเริ่มต้น (m^3/h)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 3.6 เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง Q และ V จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ $-K_b$ และจุดตัดแกนคือ Q_0 ซึ่งนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอมีเอทกับเวลา คือ

$$V = Q_0 / K_b(1 - \exp(-K_b t)) \quad (3.8)$$

โดยที่ $t =$ เวลา (h)

ดังนั้นถ้าการกรองมีการอุดตันตามที่เสนอใน CBM ปริมาตรของเพอมีเอทควรขึ้นกับเวลาตามสมการที่ 3.7 ทำให้สามารถทดสอบผลการทดลองได้ว่าเป็นไปตามแบบจำลอง CBM หรือไม่

3.4.4.2 แบบจำลองกีดขวางการกรองปานกลาง (Intermediate Blocking Model, (IBM)) IBM จะมีความคล้ายคลึงกับ CBMF โดยแบบจำลอง IBM กล่าวว่าการเกิด การอุดตันไมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งจะสามารถข้อนทับอยู่บนอีกไมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งได้ สมการ อัตราการไหลของเพอมีเอทที่เสนอในแบบจำลองนี้คือ

$$1/Q = K_i t + 1/Q_0 \quad (3.9)$$

โดยที่ $K_i =$ ค่าคงที่การกรองของ IBM (m^{-3})

จากสมการที่ 9 เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง $1/Q$ กับ t จะได้กราฟเส้นตรง มีความชันเท่ากับ K_i และจุดตัดแกนคือ $1/Q_0$ ซึ่งนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอมีเอทกับเวลาคือ

$$V = \ln(1 + K_i Q_0 t) / K_i \quad (3.10)$$

3.4.4.3 แบบจำลองกีดขวางการกรองมาตรฐาน (Standard Blocking Filtration Model, (SBM)) เป็นแบบจำลองที่อธิบายในการกรองสารละลายขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นมากโดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุนไปได้และมีอนุภาคบางส่วนถูกดูดซับอยู่ภายในรูพรุน ทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเยื่อแผ่นเท่านั้น และไม่เกิดขึ้นสะสมบนผิวหน้าของเยื่อแผ่น ดังนั้นรูพรุนของเยื่อแผ่นมีปริมาตรลดลงเป็นสัดส่วนกับปริมาตรของเพอมีเอท สมการอัตราการไหลของเพอมีเอทที่เสนอในแบบจำลองนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Q^{0.5} = Q_0^{0.5} - (K_s Q_0^{0.5} V / 2) \quad (3.11)$$

โดย K_s = ค่าคงที่การกรองของ SBM (h^{-1})

เมื่อเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่าง $Q^{0.5}$ กับ V จะได้กราฟเป็นเส้นตรงมีความชันเท่ากับ $-K_s Q_0^{0.5} / 2$ และ จุดตัดแกนคือ $Q_0^{0.5}$ ซึ่งนำไปหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอมีเอทกับเวลาคือ

$$V = Q_0 t / (1 + K_s Q_0 t / 2) \quad (3.12)$$

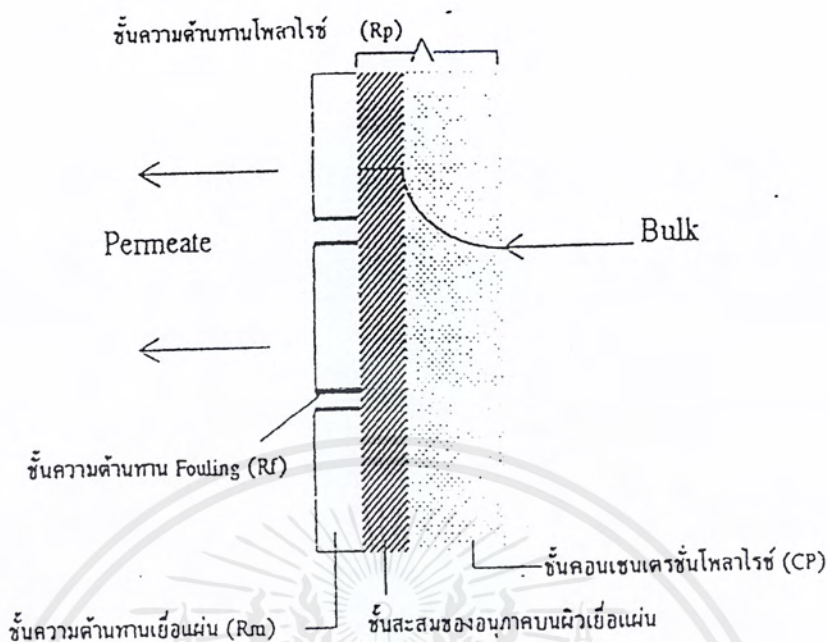
3.4.4.4 แบบจำลองการกรองเค้ก (Cake Filtration Model , (CFM)) เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองอนุภาคที่มีขนาดต่าง ๆ กันคือ 1) ถ้าอนุภาคมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนอนุภาคจะถูกสะสม และเกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น 2) ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกันอนุภาคเล็กจะถูกสะสมอยู่ภายในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคใหญ่ เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น จนในที่สุดเยื่อแผ่นสามารถกักโมเลกุลหรืออนุภาคที่มีขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นบางบนเยื่อแผ่น (กรณีถ้าเป็นโมเลกุลเรียกเจล และถ้าเป็นอนุภาคเรียกเค้ก) สมการอัตราการไหลของเพอมีเอทเป็นดังนี้

$$1/Q = 1/Q_0 + K_c V \quad (3.13)$$

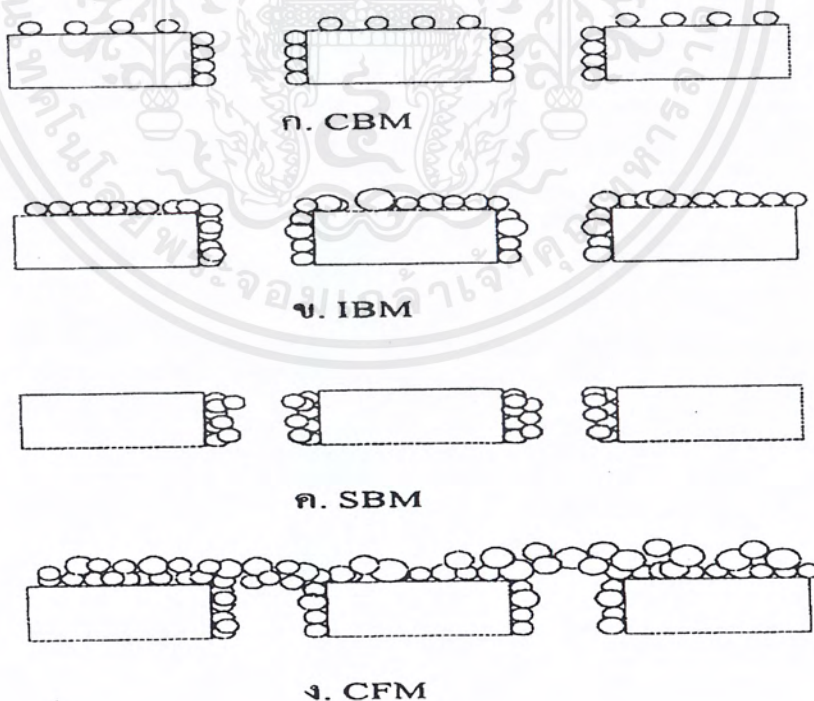
โดยที่ K_c = ค่าคงที่การกรองของ CFM (h/m^2)

เมื่อนำมาเขียนกราฟตามความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของเพอมีเอทกับเวลา คือ

$$V = \left((-1/Q_0) + (1/Q_0^{1/2} + 2K_c t)^{1/2} \right) / K_c \quad (3.14)$$



รูปที่ 3.4 ตำแหน่งของความต้านทานในการไหล



รูปที่ 3.5 การจำลองภาพการอุดตันที่เสนอโดยแบบจำลองต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การอุดตัน (Fouling)

เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดเสมอเมื่อมีการกรองสารผ่านเยื่อแผ่น คำว่า การอุดตัน (Fouling) อาจกล่าวให้เข้าใจง่าย ๆ ได้ว่า คือการอุดตันของเยื่อแผ่น ซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์ และค่ารีเจคชัน เปลี่ยนไป อย่างไรก็ตาม ผู้ที่ทำงานเกี่ยวข้องกับเยื่อแผ่นมักจะประสบปัญหาเมื่อจำเป็นต้องให้นิยามโดยแน่ชัดของคำว่า การอุดตัน เนื่องจากขอบเขตของคำว่า การอุดตันอาจรวมถึงการดูดซับของตัวทำละลายภายในรูพรุน การสะสมของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่น (ไม่จำเป็นต้องเกิดเจล) การเกิดขึ้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization, (CP)) การเกิดขึ้นเจลโพลาไรเซชัน (Gel Polarization, (GP)) หรือมีความหมายครอบคลุมเฉพาะส่วนใดส่วนหนึ่งก็ได้ ขึ้นกับผู้ให้นิยาม แต่อย่างไรก็ดีคำว่า การอุดตัน จะแตกต่างกับเจลโพลาไรเซชัน ในแง่ที่ว่าชั้นเจลโพลาไรเซชันเกิดจากการที่ตัวถูกละลายที่ความเข้มข้นสูงถึงขีดจำกัดของการละลายของตัวถูกละลายนั้น ๆ ส่วนการอุดตันเกิดขึ้นด้วยกลไกอื่นและอาจเกิดพันธะอย่างใกล้ชิดยึดติดแน่นกับเยื่อแผ่น เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้น พิจารณาตำแหน่งการเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ โดยเริ่มต้นจากสารละลายใน Bulk สู่เยื่อแผ่น คือการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และการเกิดการอุดตัน ตามลำดับ จะแยกได้ว่า คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเจลโพลาไรเซชัน จะเกิดที่บริเวณผิวเยื่อแผ่น ส่วนชั้นการอุดตัน จะเกิดจากการเก็บกักหรือดูดซับของตัวถูกละลายภายในรูพรุนและบนผิวเยื่อแผ่นโดยตรง

ลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของการอุดตัน คือไม่สามารถใช้วิธีการเปลี่ยนสภาวะการทำงาน (เช่น การเปลี่ยนแปลงความดันหรือการเปลี่ยนแปลงอัตราการใช้) หรือวิธีการแบบง่าย ๆ เช่น การล้างด้วยน้ำ เป็นต้น ซึ่งตรงข้ามกับคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และ เจลโพลาไรเซชัน กล่าวคือ ฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และเจลโพลาไรเซชัน สามารถทำให้ฟลักซ์กลับคืนโดยการเปลี่ยนแปลงสภาวะการทำงานหรือการล้างด้วยน้ำ อาจกล่าวได้ว่าคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน และ เจลโพลาไรเซชัน เป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ ส่วนการอุดตัน เป็นกระบวนการที่ผันกลับไม่ได้

อย่างไรก็ตามคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เจลโพลาไรเซชัน และ การอุดตัน ก็ไม่สามารถแยกกันได้อย่างแท้จริง ด้วยลักษณะที่ผันกลับได้ ซึ่งโดยทั่วไปเยื่อแผ่นไม่สามารถกักเก็บตัวถูกละลายได้ 100% ซึ่งส่วนนี้อาจแปลความหมายได้ว่า ในระหว่างการดำเนินงานของกระบวนการ จะมีตัวถูกละลายหลุดออกจากการอุดตันสู่เพอมีเอทอย่างช้า ๆ ซึ่ง Michales ประมาณว่า 10 % ของการอุดตันสามารถผันกลับได้ ในทำนองเดียวกัน อาจมีเจลบางส่วนที่ผันกลับไม่ได้ โดยเฉพาะ

สำหรับตัวถูกละลายบางชนิด เช่น แป้ง น้ำตาล เพคติน เจลาติน และโปรตีนบางชนิด ซึ่งอาจมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปลี่ยนสภาพ (Denature) ที่ผิวเยื่อแผ่นกลายเป็นเจลจริง (True gel) แต่การที่ตัวถูกละลายจะเปลี่ยนสภาพนั้นย่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ เช่น อุณหภูมิต้องสูงพอ เป็นต้น

บางครั้งก็มีการอธิบายว่าการอุดตัน เป็นกระบวนการที่เกิดอย่างต่อเนื่องจากการเกิดชั้นโพลารไรซ์โดยตัวถูกละลายที่เกิดเป็นคอนเซนเตรชันโพลารไรซ์ และเจลโพลารไรซ์ นั้นเองที่จะเกิดเป็นการอุดตันต่อไป ถ้าหากสรุปแนวความคิดและผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าการอุดตัน อาจเกิดจากปรากฏการณ์ต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

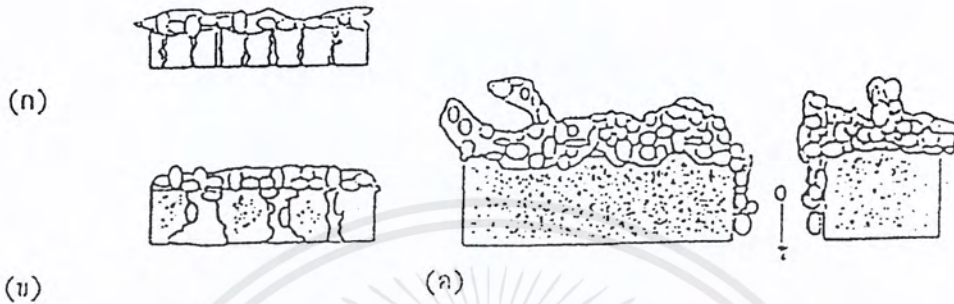
1. การดูดซับ (Adsorption)
2. การกักเก็บพร้อมการหลุดออก (Deposition with Elimination)
2. การกักเก็บโดยไม่หลุดออก (Deposition without Elimination)
3. การอุดตันของรูพรุน และการปิดกั้นรูพรุนของตัวถูกละลาย

นอกจากนี้ ยังมีการเสนอแบบแผนการเกิดการอุดตัน ที่สัมพันธ์กับค่ารีเจคชันเมื่อเริ่มต้นดำเนินงาน ตัวถูกละลายจำนวนแรกที่เคลื่อนที่ถึงเยื่อแผ่นจะเกิดการดูดซับด้วยแรงกระทำต่าง ๆ บนผิวหน้าหรือภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นโดยไม่ผ่านสู่เพอมีเอท รีเจคชันในช่วงนี้จะมีค่าสูงมาก การดูดซับนี้จะดำเนินต่อไปจนเต็มพื้นที่ของเยื่อแผ่น หลังจากนั้นตัวถูกละลายจะผ่านรูพรุนออกสู่เพอมีเอท เนื่องจากชั้นดูดซับนี้จะไม่มีส่วนในการกักเก็บตัวถูกละลายมากนัก ค่ารีเจคชันจะมีค่าลดลงจนกระทั่งมีการสร้างชั้นของตัวถูกละลายเนื่องจากการกักเก็บ ซึ่งจะกักตัวถูกละลายได้มาก ทำให้ค่ารีเจคชันสูงขึ้นอีก

จากการศึกษาคุณสมบัติการกักกันสาร และขนาดรูพรุนของเยื่อแผ่น Meireles ได้พยายามเสนอแบบแผนการเกิดการอุดตัน ดังรูปที่ 2.6 การเกิดการอุดตันของเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนต่าง ๆ เทียบกับขนาดของตัวถูกละลาย สำหรับเยื่อแผ่นที่มีรูพรุนแบบแน่น และมีขนาดเล็กกว่าตัวถูกละลายดังรูปที่ 3.6ก การเกิดการอุดตันจะเกิดบนผิวเยื่อแผ่นเท่านั้น ทำให้ทั้งขนาดรูพรุนและคุณสมบัติในการกักกันสารของเยื่อแผ่นจึงไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ค่ารีเจคชันของตัวถูกละลายจะถูกควบคุมโดยรูพรุนของตัวถูกละลายฟลักซ์จึงลดลง ในกรณีที่เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายบนผิวเยื่อแผ่นเป็นส่วนใหญ่ ทำให้ค่ารีเจคชันของตัวละลายเปลี่ยนแปลงไป ส่วนเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนห่างและมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าขนาดของตัวถูกละลายมาก ดังรูปที่ 3.6ค การเกิดการอุดตัน จะเกิดมากทั้งภายในรูพรุนและบนผิวเยื่อแผ่น ทำให้คุณสมบัติการกักกันสารเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าแบบอื่น ซึ่งสรุปได้ว่า กลไกการเกิดการอุดตันมี 2 ขั้นตอน คือ การเกิดการอุดตันภายในรูพรุน และการสร้างชั้นของตัวถูกละลายบนผิวเยื่อแผ่น ซึ่งขึ้นกับทั้งขนาดรูพรุนและ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดของตัวถูกละลาย แต่การดูดตันจะมีผลกระทบกับเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลาย



รูปที่ 3.6 ลักษณะการเกิดการดูดตัน ของเยื่อแผ่นที่มีขนาดรูพรุนต่าง ๆ กัน เทียบกับขนาดของตัวถูกละลาย

- ก. เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนเล็กกว่าตัวถูกละลาย
- ข. เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลาย
- ค. เยื่อแผ่นมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายมาก

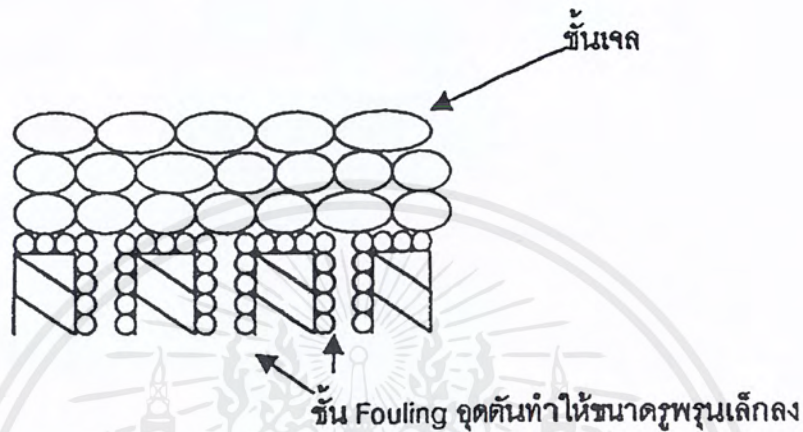
3.6 เยื่อแผ่นไดนามิกที่เกิดขึ้นด้วยตนเอง (Self – Forming Dynamic Membrane)

เยื่อแผ่นไดนามิกที่เกิดขึ้นด้วยตนเอง เป็นเยื่อแผ่นที่เกิดขึ้นขณะการกรองสารคอลลอยด์หรืออนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งเยื่อแผ่นชนิดนี้เกิดจากชั้นของเจลและชั้นของการดูดตัน นั่นเอง โดยมองผลของการดูดตัน และเจลโพลาริเซชันในทางแง่ดี ว่าสามารถเพิ่มขีดความสามารถในการกักกันสารได้สูงขึ้น ในกระบวนการ CFMF ผลของการดูดตันที่ดูดตันภายในรูพรุน ทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลงเป็นส่วนประกอบหลักที่ช่วยทำให้กักกันสารได้ดี มากกว่าชั้นของเจล อีกทั้งการดูดตันยังเป็นส่วนที่ผันกลับไม่ได้ จึงยึดติดเยื่อแผ่นได้ดีกว่าชั้นเจลเมื่อมีการเปลี่ยนสถานะ

ดังนั้นเยื่อแผ่นไดนามิกที่เกิดขึ้นด้วยตนเอง จึงมีความหมายถึงการดูดตัน และชั้นเจลที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกักกันสาร ตำแหน่งของเยื่อแผ่นไดนามิกไม่ได้อยู่แต่ผิวหน้าของเยื่อแผ่น แต่รวมเอาการดูดตันภายในรูพรุนไว้ด้วย ในการอธิบายเยื่อแผ่นไดนามิกต้องอธิบายผลของทั้งชั้นเจลและของการดูดตันแต่ดังที่กล่าวมาแล้วว่าในระบบ CFMF เยื่อแผ่นจะมีรูพรุนขนาดใหญ่ผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของการอุดตัน จึงมีอิทธิพลต่อเยื่อแผ่นไดนามิกมากกว่าชั้นเจล ดังนั้นการอุดตัน จึงช่วยในการกักกันสารได้ดีกว่าชั้นเจล ดังนั้นนักวิจัยส่วนใหญ่จึงอธิบายผลการทดลองในแง่ของการเกิดการอุดตันมากกว่าการเกิดเยื่อแผ่นไดนามิก



รูปที่ 3.7 ส่วนประกอบของ Self – Forming Dynamic Membrane

3.7 คุณสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิก(Hydrophilicity and Hydrophobicity)

ไฮโดรฟิลิกซิติตี้(Hydrophilicity)

ไฮโดรฟิลิกเป็นคุณสมบัติของวัสดุต่าง ๆ ที่แสดงความชอบของน้ำ หรือจะหมายความสั้น ๆ ว่า คือ วัสดุที่ดูดซับน้ำได้อย่างรวดเร็ว พื้นผิวของวัสดุต่าง ๆ จะถูกทำให้เปียกในรูปของฟิล์มของน้ำ วัสดุที่ใช้สำหรับไฮโดรฟิลิก จะใช้กับกระบวนการที่มีปริมาณแรงตึงผิวสูงและมีความสามารถในรูปของการสร้างพันธะไฮโดรเจน

ไฮโดรโฟบิกซิติตี้(Hydrophobicity)

ไฮโดรโฟบิกเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อพื้นผิวของน้ำตรงกันข้ามกับวัสดุต่างๆ ที่ชอบน้ำ หรือจะเรียกว่าวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ หรือ ไม่ดูดซับน้ำและพื้นผิว วัสดุที่ไม่ชอบน้ำนี้มักจะใช้กับกระบวนการที่มีปริมาณแรงตึงผิวต่ำและไม่มีความว่องไวต่อการเจริญเติบโตทางเคมีสำหรับการเกิดพันธะไฮโดรเจนด้วยน้ำ

เวททบิลิตี(Wettability)

คุณสมบัติพื้นผิวสำหรับทุกๆ วัสดุที่ยอมให้ปริมาณที่เหลือของแต่ละองค์ประกอบ พื้นผิวสามารถใช้หาความสามารถของความเปียกของวัสดุโดยลักษณะเฉพาะของของเหลวต่าง ๆ การวัดของพื้นผิวสัมผัส และขนาดหยดของของเหลวบนพื้นผิว แรงตึงผิวสำหรับวัสดุที่เป็นของแข็งที่สามารถคำนวณได้

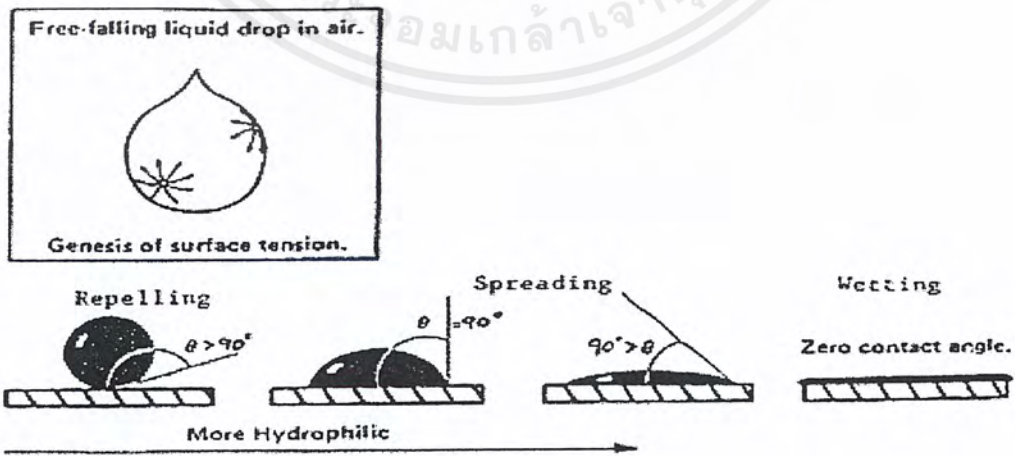
แรงตึงผิว(Surface Tension)

คือ แรงภายใน ขณะที่เกิดความไม่สมดุลในแรงโมเลกุลต่าง ๆ ที่เกิดขึ้น เมื่อวัสดุทั้งสองมีความแตกต่างกัน นำไปสู่การสัมผัสด้วยรูปแบบของพื้นผิว หรือ ขอบเขตอื่น เป็นแรงขณะที่พื้นผิวในการตอบสนองของลดลงต่อความไม่สมดุลของแรงโมเลกุลที่เกิดขึ้นที่จุดต่าง ๆ ของการสัมผัสผลของแรงนี้จะแปรผันกับความแตกต่างของระบบของของเหลวและของแข็งซึ่งควบคุมความสามารถของการเปียก และขนาดหยดและพื้นผิว

มุมสัมผัส(Contact Angle)

สำหรับหยดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของแข็ง การวัดมุมสัมผัสของมุมระหว่างเส้นสัมผัสของของแข็งต่อรัศมีของหยดจากจุดของการสัมผัสด้วยของแข็ง มุมสัมผัสจะสัมพันธ์ต่อสมการพื้นผิวซึ่งสามารถคำนวณได้ จากพฤติกรรมของลักษณะเฉพาะของเหลวกับของแข็งมีปฏิกิริยาซึ่งกันและกัน

สำหรับพื้นผิวที่เปียกจะมีมุมการสัมผัสมีค่าเท่ากับศูนย์ ขณะที่เกิดการขยายตัวของหยดมุมจะอยู่ระหว่าง 0 และ 90 องศา ถ้ามุมมากกว่า 90 องศา แสดงให้เห็นถึงของเหลวต่อหยดเกิดขึ้น หรือ หดตัวจากพื้นผิวของแข็ง



รูปที่ 3.8 ความเปียกของพื้นผิวของของแข็งต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

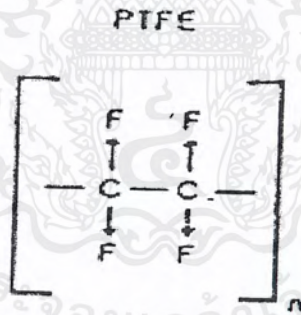
อิทธิพลของความเป็นไฮโดรโฟบิกและไฮโดรฟิลิกต่อการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Membrane separation and performance : influence of hydrophilicity and hydrophobicity ผลกระทบของความเป็นไฮโดรฟิลิก และไฮโดรโฟบิก ต่อกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

- ◆ ความสามารถในการเปียกและการปรับความดันตามที่ต้องการสำหรับของเหลว (น้ำ) ไหลผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์
- ◆ คุณสมบัติของการติดของสิ่งสกปรกต่อวัสดุเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่จะเพิ่มเข้าไปในความสามารถของการเก็บกัก

กลุ่มวัสดุต่างๆ ที่มีความว่องไวบนพื้นผิวเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่เป็นโพลิเมอร์ (Active groups on polymer Membrane surface)

กลุ่มวัสดุต่างๆ ที่มีความว่องไวจะถูกคำนวณความสามารถของวัสดุในรูปของพันธะไฮโดรเจน มักใช้สำหรับวัสดุที่เกี่ยวข้องกับน้ำที่มีคุณสมบัติชอบน้ำมาก

พันธะไฮโดรเจนระหว่างไฮโดรเจนที่ถูกกระตุ้นบนโพลิเมอร์และออกซิเจนของน้ำจะมีเสถียรภาพสูงกว่า ออกซิเจนที่ถูกกระตุ้นบนโพลิเมอร์และไฮโดรเจนของน้ำ



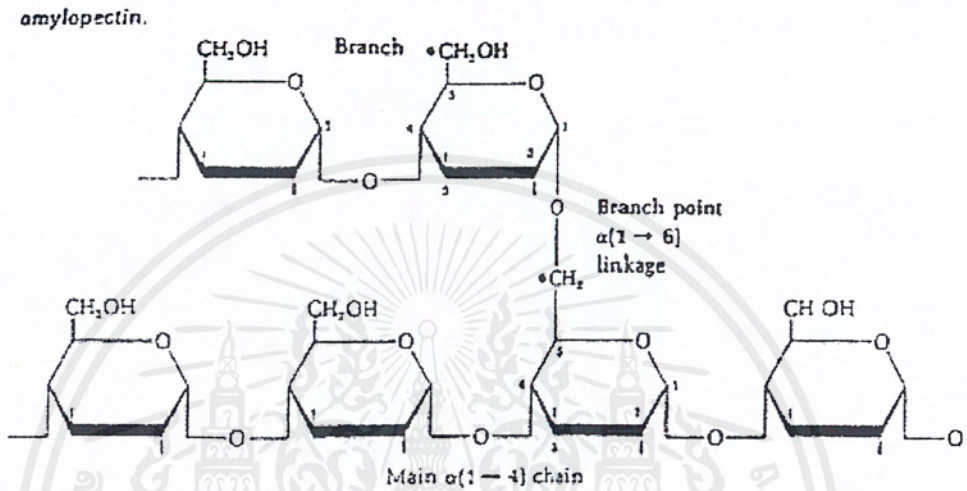
รูปที่ 3.9 วัสดุเยื่อแผ่นสังเคราะห์บางชนิดที่เป็นโพลิเมอร์

การอุดตัน : ไฮโดรฟิลิก และ ไฮโดรโฟบิก (In aqueous environment)

- ◆ โดยธรรมชาติของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จะมีประจุลบ หรือโดยรวมแล้วมีประจุลบเป็นบางส่วน ในขณะที่เกิดโครงสร้างแบบไดโพล หรือ มัลติเปิลโพล
- ◆ อนุภาคต่าง ๆ ที่อุดตันในสารละลายที่เป็น ไฮโดรโฟบิก
 - เช่น - คอลลอยด์ ได้แก่ แป้ง โลหะคอลลอยด์
 - โปรตีน ซึ่งมีโอกาสเกิดทั้งประจุบวกและประจุลบ
 - ดิน ได้แก่ ซิลิเกต อะลูมินา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อนุภาคของความเป็นออยล์ ได้แก่ พาราฟิน น้ำมันต่าง ๆ สารลดแรงตึงผิว-
อนุภาคต่าง ๆ ของส่วนที่ไม่ชอบน้ำจะอยู่กันเป็นกระจุกหรือรวมกันเป็นกลุ่ม ซึ่งจะทำให้มีพื้นที่ผิว
ต่ำกว่าพวกที่ชอบน้ำ



รูปที่ 3.10 ตัวอย่างของผลิตภัณฑ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

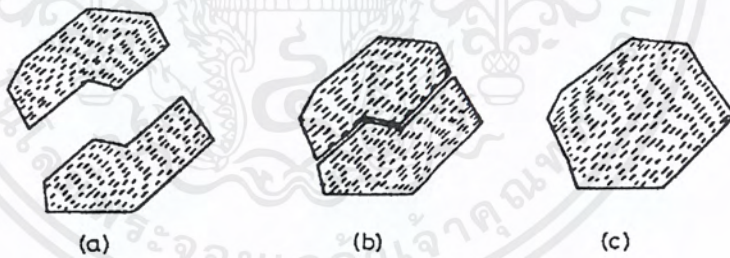
บทที่ 4

การรวมตัวกันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (Membrane Coalescence)

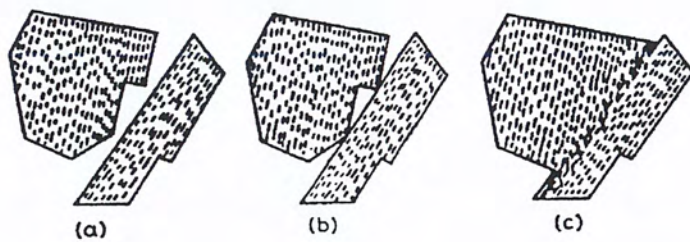
4.1 รูปแบบของการเกิดการรวมตัวกัน (Coalescence)

4.1.1 การหลอมรวม หรือ การรวมตัวของวัสดุเล็กๆ (Sintering or Particle Coalescence)

ในการจะพิจารณาลงถึงระดับของภูมิภาคคอลลอยด์ซึ่งมีมิติที่ถูกสร้างขึ้น โดยทำการกระจายและลดขนาดลง ในการทำการรวมตัวกันของของแข็ง โดยวัสดุ 2 ชิ้นนี้จะมารวมเข้าด้วยกันซึ่งสามารถรวมกันได้อย่างพอดี และ ไม่มีพลังงานใด ๆ เกิดขึ้นเลยแล้วทำให้วัสดุที่รวมตัวกันมีขนาดใหญ่ขึ้น

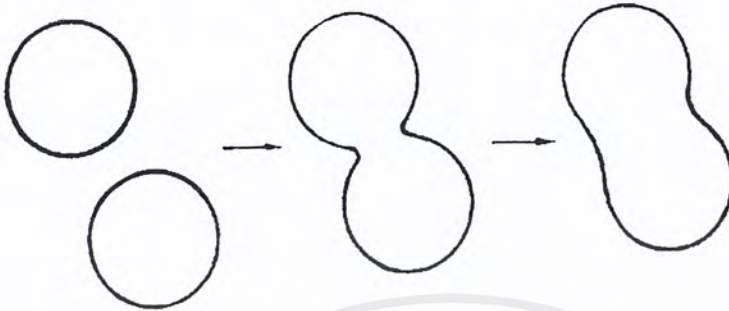


รูปที่ 4.1 การรวมตัวกันของวัสดุ 2 ชนิดแบบไม่มีพลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง



รูปที่ 4.2 แสดงการปะทะกันของอนุภาค 2 อนุภาคแบบสุ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การรวมตัวของอนุภาคของแข็ง

ในการพิจารณา กลไกอื่นของการรวมตัวของอนุภาคที่มีความสัมพันธ์กันเป็นแบบสุ่ม แล้วการเกิดรวมตัวของอนุภาคทั้งสองทำให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อลดพื้นที่ผิวของโมเลกุลและยังสามารถเปลี่ยนแปลงลักษณะได้เอง เพื่อให้เกิดชนิดที่เหมาะสมระหว่างผลึกของทั้ง 2 อนุภาค พลังงานที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแทนที่ของอะตอมจากตำแหน่งภายในของอนุภาคมีมากและจะสามารถทำได้เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหลอมเหลวของของแข็งโดยทั่วไปมักจะพบอยู่ในช่วงประมาณ $2/3$ เท่าของจุดหลอมเหลวเรียกอุณหภูมินี้ว่า "Tamman Temperature" อะตอมจะมีการเคลื่อนที่มากขึ้นและอนุภาคจะมีกระจายเนื่องจากการหลอมรวมที่เกิดขึ้น พลังงานที่เกิดขึ้นแท้จริงแล้วเกิดขึ้นสำหรับการแพร่ของอะตอมในโครงสร้างของของแข็งที่อยู่ใกล้กับพื้นผิว กลไกที่แน่นอนของการหลอมขึ้นอยู่กับระบบที่เกี่ยวข้อง การหลอมรวมของอนุภาคของแข็ง โดยทั่วไปดำเนินการโดยการรวมตัวของ "necks" ที่เกิดระหว่างบริเวณสัมผัสของอนุภาคดังรูป 4.3 ในกรณีนี้ของแข็งมีความดันไอที่สามารถวัดได้ การหลอมรวมจะถูกกระตุ้นจากการเคลื่อนที่ของวัภาคไอ วิธีการนี้มีความสำคัญอย่างมากในเทคโนโลยีอนุภาค (Powder Technology) แม้ว่าขนาดอนุภาคส่วนใหญ่ที่เกิดด้วยวิธีนี้จะมีขนาดใหญ่กว่า (30 ไมโครเมตร) ในช่วงของสถานะคอลลอยด์

4.1.2 การขยายขนาดของอนุภาคด้วยการระเหยของอนุภาคขนาดเล็กเข้ารวมตัวกับอนุภาคขนาดใหญ่ (Particle Growth By Ripening) ถ้าอนุภาคของของแข็งเป็นตัวถูกละลายเพียงเล็กน้อยในตัวกลางของการกระจาย (เช่น ตัวกลางคือ ก๊าซ ของแข็งจะเป็นอนุภาคที่สามารถระเหยได้ง่าย) ดังนั้นกลไกที่เกิดขึ้นได้ง่ายในการลดพื้นที่ผิวของอนุภาคเอง โดยไม่สามารถรักษาสถานะคอลลอยด์เพราะปรากฏการณ์ของการละลายตัวของอนุภาคขนาดเล็กดีกว่าอนุภาคขนาดใหญ่

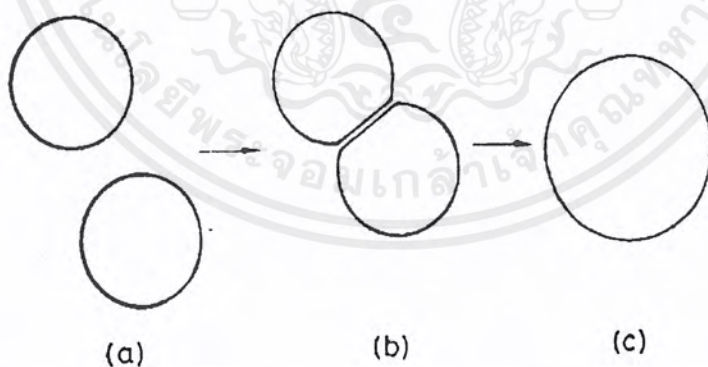
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่ อย่างไรก็ตามอนุภาคขนาดต่าง ๆ ที่แสดงก็มีแนวโน้มของจำนวนโมเลกุลลดลง (ระเหย) จากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า และเข้าทำการฝังตัวในอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่า อนุภาคที่มีขนาดเล็กจะมีการลดปริมาณลงเรื่อย ๆ และขนาดเฉลี่ยของอนุภาคทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มขึ้น อัตราการเกิดนี้ เรียกว่า “Ostwald” มีค่าลดลงในขณะที่ขนาดของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น

นอกจากนี้ระยะทางระหว่างโมเลกุลจะต้องมีการแพร่ที่มากขึ้นเช่นเดียวกับจำนวนของอนุภาคที่มีปริมาตรลดลง ในกรณีที่การกระจายของขนาดอนุภาคมีน้อยการขยายขนาดของอนุภาคก็จะลดลง ตัวชี้วัดวางแผนพลังงานกระตุ้นที่จะช่วยให้เกิดการขยายขนาดของอนุภาคขึ้น คือพลังงานของสารละลายหรือการระเหย ในกรณีที่อัตราการขยายขนาดเพิ่มขึ้น จะมีการควบคุมในขั้นตอนของอนุภาคที่เคลื่อนที่ผ่านไปยังตัวกลางจะมีค่าการละลายสูงขึ้น (น้อยกว่าพลังงานของสารละลาย) หรือ ความดันไอ (ที่มีค่าน้อยกว่าพลังงานของการระเหย) จะทำให้เกิดการขยายขนาดขึ้นอย่างรวดเร็วด้วยเหตุนี้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วนี้จะไม่สามารถรักษาสถานะของคอลลอยด์ได้

4.1.3 การรวมตัวกันของอนุภาค (Droplet Coalescence)

ในกรณีที่กระบวนการการรวมตัวของอนุภาคในภาวะอิมัลชันแสดงโดยลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการหลอมรวมตัวของของแข็ง (sintering) แม้ว่ากลไกการเกิดบางขั้นตอนจะต่างกันซึ่งแสดงขั้นตอนการเกิดในรูปที่ 4.4

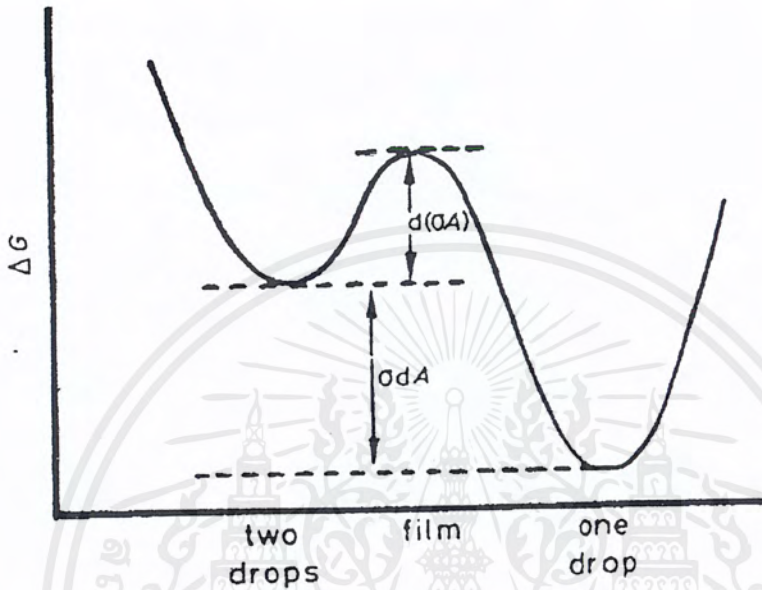


รูปที่ 4.4 การรวมตัวกันของอนุภาคอิมัลชันที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทมวลของอนุภาค

โดยมีหยดน้ำมัน 2 หยด เคลื่อนที่มาปะทะและสัมผัสกันจนเกิดเป็นแผ่นฟิล์มขึ้นระหว่างหยดน้ำมันทั้งสอง ทำให้เกิดการถ่ายเทมวลของหยดน้ำมันภายในจากหยดทั้งสองจนรวมตัวเป็นหยดเดียวกัน การที่อนุภาคเกิดการรวมตัวกันนั้นเนื่องจากสภาวะอุณหพลศาสตร์ของของ-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โพลีโนมิออลของตัวกระจายต้องการลดพลังงานพื้นผิวโดยการถ่ายเทมวลดังรูปที่ 4.5 แสดงสถานะของพลังงานทั้งของอนุภาคเดี่ยวและหลังเกิดการรวมตัวกันขึ้น



รูปที่ 4.5 สถานะของพลังงานทั้งของอนุภาคเดี่ยวและหลังเกิดการรวมตัวกันขึ้น

จะเห็นว่าในช่วงที่มีการเกิดขึ้นฟิล์มนั้นสถานะของพลังงานพื้นผิวมีค่ามากกว่าค่าพลังงานของพื้นผิวหลังเกิดการรวมตัวกันขึ้น

4.2 ทฤษฎีที่ใช้อธิบายการเกิดการรวมตัวของอนุภาค

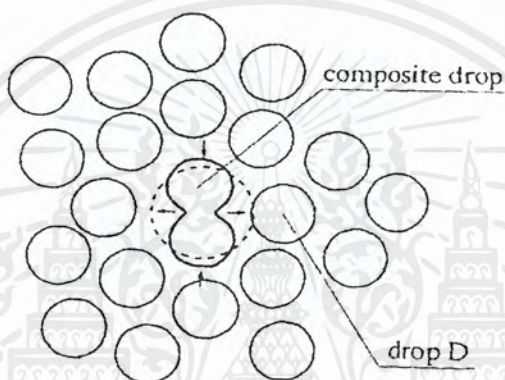
ระบบที่เกิดจากการรวมตัวของอนุภาคขนาดเล็กที่ฝังตัวอยู่ในของเหลวในภาวะที่ไม่เสถียร จะมีแนวโน้มในการลดพลังงานพื้นผิวหลังเกิดการรวมตัว ในขณะที่อนุภาคเคลื่อนที่ปะทะกันแบบบราวน์เนียนส่งผลให้รัศมีเฉลี่ยของอนุภาคมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีแบบจำลองที่สอดคล้องกับกระบวนการที่ขึ้นของการแพร่เป็นตัวกำหนดความเร็วของการเกิด เพราะเป็นเวลาทีอนุภาคทั้งสองเกิดการรวมตัวกัน

โดยแบบจำลองแรกเกิดขึ้นจาก Smoluchows Ki ที่อธิบายการเกาะตัวของอนุภาคคอลลอยด์ โดยถ้าลักษณะเฉพาะตัวของอนุภาคในที่นี้คือรัศมีซึ่งมีแนวโน้มของการเพิ่มขนาดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ t คือ เวลา

ในการเปรียบเทียบแบบจำลองนี้ ชั้นแรกทุกอนุภาคของวัฏภาคกระจาย(น้ำมัน) จะมีความดันลดต่ำกว่าความดันภายในของของเหลว ดังนั้นจึงไม่ก่อให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกัน ทุกหยดจะมีความเฉื่อยเฉพาะตัวของมันเองยกเว้นอนุภาคสองอนุภาคที่เข้ารวมตัวกัน ระยะทางเฉลี่ยระหว่างอนุภาคถ้าน้อยกว่าค่าการจำกัดของการเกิดการรวมตัว (Threshold value) ตัวอนุภาคที่เริ่มเกิดการรวมตัวกันจะเริ่มสัมผัสกับอนุภาคที่อยู่รอบข้างดังรูปที่ 4.6 (หยด D)



รูปที่ 4.6 ลักษณะของหยดที่เกิดในภาวะไฮโดรไดนามิก

โดยค่าการจำกัดของการเกิดการรวมตัว (Threshold value) จะขึ้นอยู่กับลักษณะภายนอกของหยด เมื่ออนุภาคฝังตัวลงในของเหลวหนึ่ง แบบแผนของการเกิดจะเปลี่ยนแปลงเนื่องมาจากเกิดอันตรกิริยากับอุณหพลศาสตร์และสามารถคำนวณจากค่าทางเรขาคณิต เมื่ออนุภาคเริ่มเกิดการรวมตัวกันจะถูกโน้มนำด้วยการไหลดังรูปที่ 4.6 ข้างต้น เมื่อลักษณะการไหลผลักดันให้หยด D เคลื่อนที่และจะทำให้เกิดการรวมตัวกันต่อไป การรวมตัวแบบไฮโดรไดนามิกนี้มีข้อจำกัดน้อยกว่าการรวมตัวกันแบบความดันลดการรวมตัวที่เกิดต่อกันมาทีหลังจะทำให้ค่าเฉลี่ยรัศมีของอนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น เหมือนกับการเกิดเป็นกระบวนการลูกโซ่อย่างต่อเนื่อง ถ้ารูปแบบทางกายภาพของทุกอนุภาคเหมือนกันทุกประการ มีการแสดงกฎของการขยายขนาดเป็นแบบเส้นตรง

$$R \propto t \quad (4.2)$$

โดยจะมีความเร็วในการเกิดมากกว่า(15) สำหรับกลไกของปรากฏการณ์บราวน์เนียน เรียกแบบจำลองนี้ว่าเป็นการขยายขนาดที่ถูกจำกัดโดยกระบวนการไฮโดรไดนามิก เพราะอัตราของการ-

การเกิดการรวมตัวของอนุภาคที่หาจากกระบวนการไฮโดรไดนามิกฟิสิกส์ให้เห็นว่าการรวมตัวกันจะไปเหนี่ยวนำให้เกิดการรวมตัวกันของครั้งต่อไป

แรงลึบบริเคชัน (lubrication force) จะทำหน้าที่ป้องกันมิให้พื้นผิวของอนุภาคทั้งสองเข้ามาสัมผัสกัน แรงนี้จะมีค่ามากขึ้นเมื่ออนุภาคกำลังเกิดการรวมตัวกันอยู่ โดยอนุภาค D จะไม่สามารถเข้ารวมตัวด้วยได้ถ้าไม่เกิดผลกระทบกับหยดที่ล้อมรอบอยู่ก่อน

อุปสรรคของการเคลื่อนที่ของอนุภาคนี้เกิดเนื่องจากแรงลึบบริเคชัน (lubrication force) เป็นสัดส่วนสัมพันธ์กับความเร็วของอนุภาคที่อยู่ห่างจากอนุภาคที่กำลังเกิดการรวมตัวกันอยู่และยังทำให้มีการเปลี่ยนทิศทางของแรงแเหียนท์ของของไหล

4.3 การพัฒนาการรวมตัวกันของอนุภาคโดยอาศัยเยื่อแผ่นสังเคราะห์

มีการพัฒนาการรวมตัวกันของอนุภาคเพื่อใช้ในการแยกของเหลว 2 ชนิดออกจากกันในอุตสาหกรรมบำบัดน้ำเสีย (การแยกน้ำมันออกจากน้ำ) การกำจัดน้ำออกจากน้ำมันซึ่งจะเข้าไปทำให้เกิดการกัดกร่อนภายในอุปกรณ์ได้ มีการประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์มาช่วยในการทำให้เกิดการรวมตัวกันขึ้นโดยเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่จะนำมาใช้จะต้องคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางเคมี โดยลักษณะทางกายภาพที่สำคัญคือ ขนาดของรูพรุน ความหนาของแผ่น และพื้นที่ผิวที่ทำให้เกิดการรวมตัวภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ ลักษณะทางเคมีได้แก่ แรงยึดเหนี่ยวภายในระหว่างมวลของสารที่ต้องการจะแยกโดยจะมี 2 แบบด้วยกันคือ แบบไฮโดรโฟบิก และ ไฮโดรฟิลิก ดังที่ได้อธิบายพอสังเขปมาแล้วจากข้างต้น

การประยุกต์ใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ในการทำให้เกิดการรวมตัว (Membrane coalescence) นั้น U, Daiminger[1] และคณะได้ทำการทดลองโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE (Polytetrafluoroethylene) ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด hydrophobic โดยมีขนาดของรูพรุน 5 ไมโครเมตรในการทำให้เกิดการรวมตัวของ isododecitrin ที่มีความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร ได้มีข้อสรุปดังนี้

1. จะไม่เกิดการรวมตัวในเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่มีขนาดรูพรุนเล็กกว่าขนาดของอนุภาคมาก (เยื่อแผ่นอัลตราฟิลเตรชันที่มีขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 0.1 ไมโครเมตรจะไม่เกิดการรวมตัวภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นสังเคราะห์)

2. จะไม่เกิดการเกิดการรวมตัวกันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ถ้าใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิดไฮโดรฟิลิก

Ageeth Lefferts [5] ได้ทำการศึกษาถึงขั้นตอนและกลไกในการเกิดการรวมตัวกันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ สรุปขั้นตอนและกลไกในการเกิดการรวมตัวกันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ดังนี้

1. การแพร่ของอนุภาคน้ำมันจาก bulk ไปยังพื้นผิวของเยื่อแผ่นสังเคราะห์
2. การแพร่ของน้ำมันในรูปอิมัลชันผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์โดยภายในเยื่อแผ่นสังเคราะห์จะเกิดการรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมัน
3. การเคลื่อนที่ของอนุภาคน้ำมันออกจากเยื่อแผ่นสังเคราะห์

โดยจากการทดลองพบว่าขั้นตอนที่ควบคุมกระบวนการคือ ขั้นที่เกิดการรวมตัวกันภายในเยื่อแผ่นสังเคราะห์โดย เนื่องจากความเป็นไฮโดรโฟบิก เยื่อแผ่นจะจับอนุภาคน้ำมันเอาไว้ อนุภาคอื่น ๆ จะเข้ามาจับกับอนุภาคที่ถูกจับไว้ก่อนแล้วในเยื่อแผ่นสังเคราะห์ จะทำให้อนุภาคของน้ำมันขนาดใหญ่ขึ้นจนกระทั่งอนุภาคของน้ำมันถูกแรงดันอัดออกจากเยื่อแผ่นสังเคราะห์เป็นเฟอมีอเททที่ขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้น ถ้านำเฟอมีอเททกลับไปทำการบ้อนอีกจะได้เฟอมีอเททที่มีขนาดอนุภาคของน้ำมันใหญ่ขึ้น ดังรูปที่ 4.7 กลไกการรวมตัวของน้ำมันขณะอยู่ในรูพรุน



รูปที่ 4.7 การรวมตัวกันของอนุภาคน้ำมันภายในเยื่อแผ่นสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออกจากน้ำ

4.4.1 แรงตึงผิว (Interfacial tension)

ในการพิจารณาการแยกต้องพิจารณาถึงแรงตึงผิวของทั้ง 2 วัฏภาคที่เพิ่มขึ้นโดยแรงตึงผิวระหว่างของเหลว 2 ชนิด วัดจากแรงตึงผิวของอีกวัฏภาคหนึ่งกับอีกวัฏภาคหนึ่ง หน่วยของแรงตึงผิวเป็น ดายน์/เซนติเมตร แรงตึงผิวเป็นตัวแปรที่สำคัญของการแยกของเหลวจากของเหลว โดยทำการทำให้เกิดการรวมตัวกัน เพราะมีความเป็นไปได้สูงที่ขนาดของอนุภาคที่เสถียรจะเข้ามารวมตัวกันและจะถูกควบคุมด้วยแรงตึงผิว ระบบที่แรงตึงผิวสูง (มากกว่า 20 ดายน์/เซนติเมตร) สามารถทำให้เกิดอิมัลชันที่เสถียรมากได้ และง่ายต่อการแยก ระบบที่มีแรงตึงผิวต่ำเช่น น้ำในน้ำมันเชื่อมเพลิงกับสารเติมแต่ง (น้อยกว่า 20 ดายน์/เซนติเมตร) ขนาดของหยดเล็กกว่าการปนเปื้อนจึงต้องการประสิทธิภาพในการแยกสูง ขนาดของหยดขึ้นอยู่กับระบบทางพลวัต รวมถึงความเร็วสัมผัส ความหนาแน่นสัมผัส และความหนืดสัมผัส

วิธีหนึ่งสำหรับการหาความสัมพันธ์ของขนาดของอนุภาคที่พัฒนาจาก HU และ Kintner คือ สัมประสิทธิ์แดรกของสารอินทรีย์กับน้ำ โดยใช้คุณสมบัติทางกายภาพ (P) และเวเบอร์นัมเบอร์ (We) บนช่วงของเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Re) ซึ่งจะได้กราฟที่มีลักษณะเฉพาะของอนุภาคแต่ละชนิด เรายินยอมให้เกิดการรวมตัวกัน โดยใช้ของผสมที่มีแรงตึงผิวน้อยกว่า 20 ดายน์ต่อเซนติเมตร

4.4.2 ความหนืด (Viscosity)

ความหนืดมีอิทธิพลต่อการเกิดอนุภาค โดยในขั้นแรกอนุภาคน้ำมัน 2 อนุภาคแรกวิ่งมาปะทะกันในของเหลวและขั้นต่อไปจะเกิดการรวมตัวกัน(fusion)ของทั้ง 2 อนุภาค ซึ่งต้องอาศัยการแตกตัวของพื้นผิวของเหลวกับของเหลว ระหว่างอนุภาค ถ้าความหนืดสูงเราจะใช้เวลาในการรวมตัวกันของของเหลวมากกว่าที่ความหนืดต่ำ ๆ เราสามารถแก้ไขความหนืดสูงได้โดยการลดอัตราการไหล หรือ เพิ่มพื้นที่การเกิดอนุภาคให้มากขึ้น เพื่อที่จะทำให้เกิดการรวมตัวได้ดีขึ้น ดังสมการต่อไปนี้

$$\Delta P = K\mu Q \quad (4.3)$$

เมื่อ

Q = อัตราการไหล

μ = ความหนืด

K = ค่าคงที่ของตัวกลางของเครื่องที่ทำให้เกิดการรวมตัวกันของอนุภาค

4.4.3 ความหนาแน่นสัมพัทธ์ (Relative density)

ความหนาแน่นสัมพัทธ์(ความแตกต่างของความหนาแน่นระหว่าง 2 วัสดุภาคที่จะทำการแยก) เป็นส่วนสำคัญที่มีผลกระทบต่อเกิดการรวมตัวกัน ดังเช่นเดียวกับความหนาแน่นของอนุภาคของเหลวที่รวมตัวกันเพื่อที่จะแยกของเหลวทั้งสองออกจากกัน

4.4.4 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิของของผสมมีส่วนสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแยกเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น จะทำให้แรงตึงผิวลดลงและขนาดของอนุภาคเล็กลง



บทที่ 5

การออกแบบชุดอุปกรณ์การทดลอง

5.1 การออกแบบอุปกรณ์การทดลองเพื่อการศึกษาการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน

ชุดอุปกรณ์การทดลองการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน ผู้ทำโครงการพิเศษได้ออกแบบให้มีส่วนประกอบ ดังนี้

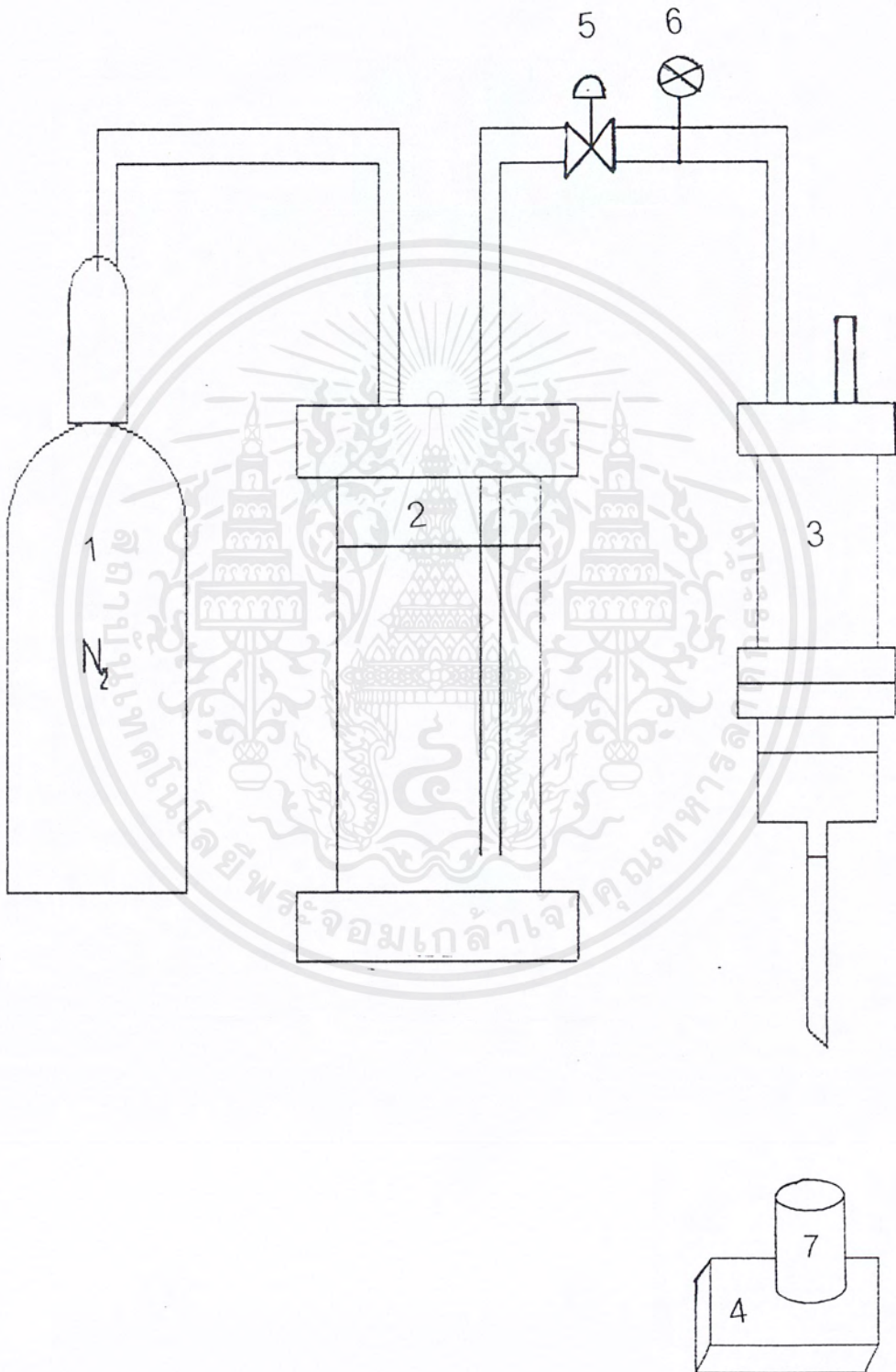
1. ถังอากาศ เพื่อใช้เพิ่มความดันให้กับสารละลายป้อนในการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่น
2. ถังป้อนสารละลายทำด้วยอะคริลิก (Acrylic) ใช้บรรจุสารละลายได้ประมาณ 1.5 ลิตร โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และมีความสูง 20 เซนติเมตร
3. เมมเบรนโมดูล (Membrane module) ทำด้วยอะคริลิก (Acrylic) เป็นแบบโมดูลปลายปิด (Dead-end module) โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 5 เซนติเมตร ระยะระหว่างฝาปิดด้านบนถึงบริเวณที่วางเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 14 เซนติเมตร
4. เครื่องชั่ง ใช้สำหรับหาค่าเพอมีเอทพลักซ์
5. วาล์ว
6. เกจวัดความดันขนาด 3 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
7. ปีกเกอร์สำหรับเก็บเพอมีเอท ใช้สำหรับเก็บเพอมีเอทเพื่อนำไปวิเคราะห์ต่อไป

5.2 การทำงานของชุดอุปกรณ์การทดลอง

เริ่มต้นจากอากาศผ่านเข้าไปในถังป้อนสารละลาย ทำให้ภายในถังมีความดันสูงขึ้นพอความดันสูงในระดับหนึ่งสารละลายป้อนจะถูกดันออกมาผ่านทางท่อทองแดงที่ต่อเข้ากับเมมเบรนโมดูล สารละลายจะไหลเข้าสู่เมมเบรนโมดูล และผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไปเป็นเพอมีเอท เพอมีเอทจะไหลออกจากโมดูลลงบีกเกอร์สำหรับเก็บเพอมีเอทที่ตั้งอยู่บนเครื่องชั่ง เป็นการทำงานครบ 1 รอบ โดยจะให้สารละลายผ่านเมมเบรนโมดูลทั้งหมด 4 รอบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.1 ชุดการทดลองการรวมตัวของน้ำในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นไมโครฟิลเตรชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ใต้เห็นไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

การทดลอง

การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออกจากน้ำเสีย โดยใช้เทคนิคการรวมตัวของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE ซึ่งสารละลายป้อนเป็นสารละลายน้ำมันในรูปอิมัลชันเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร

6.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- 6.1.1 ชุดทดลองการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชัน โดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ดังรูปที่ 5.1
- 6.1.2 บีกเกอร์ขนาด 50 มิลลิลิตร 50 มิลลิลิตร และ 100 มิลลิลิตร
- 6.1.3 กรวยแยกขนาด 500 มิลลิลิตร
- 6.1.4 ปิเปตขนาด 5 มิลลิลิตร 10 มิลลิลิตร และ 50 มิลลิลิตร
- 6.1.5 หลอดหยด
- 6.1.6 เครื่องชั่งดิจิตอล รุ่น Precisa 3,100
- 6.1.7 เครื่องปั่น รุ่น Philips Twister
- 6.1.8 เครื่องวัดขนาดอนุภาค รุ่น Mastersizer X
- 6.1.9 กรวยกรอง
- 6.1.10 นาฬิกาจับเวลา
- 6.1.11 น้ำกลั่น
- 6.1.12 น้ำมันหล่อลื่นยี่ห้อซิงเกอร์
- 6.1.13 ถังอากาศ
- 6.1.14 เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิดโพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) ขนาดรูปทรงแปดเหลี่ยม 0.5 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 ขั้นตอนการทดลอง

6.2.1 การเตรียมสารละลายป้อนน้ำมันในรูปอิมัลชันในน้ำเข้มข้น ร้อยละ 1 โดยปริมาตร

- 1) บีบน้ำมันหล่อลื่น จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร
- 2) เติมน้ำจนถึงขีดบอกปริมาตร 1000 มิลลิลิตร
- 3) นำสารละลายที่ได้เทลงในเครื่องปั่น แล้วปิดฝา
- 4) เปิดเครื่องปั่นให้ปั่นสารละลายนาน 2 นาที 30 วินาที แล้ว พักเครื่อง 1 นาที จากนั้นปั่นต่ออีก 2 นาที 30 วินาที เพื่อทำให้น้ำมันอยู่ในรูปอิมัลชัน
- 5) เทสารละลายที่ได้ (สารละลายจะอยู่ในรูปอิมัลชันของน้ำมัน) ลงในบีกเกอร์ขนาด 1000 มิลลิลิตร เพื่อเตรียมไว้สำหรับทำการทดลองต่อไป

6.2.2 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความดันที่มีต่อค่าเพอมีเอทพลั๊กซ์ และการกระจายของขนาดอนุภาค

- 1) นำสารละลายอิมัลชันของน้ำมันที่ได้จากข้อ 6.2.1 มาใส่ในถังใส่สารละลายป้อนของชุดทดลองของการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์แล้วปิดฝา
- 2) เปิดวาล์วของถังอากาศปรับจนความดันของสารละลายเป็น 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เมื่อความดันคงที่ วัดน้ำหนักของเพอมีเอททุก 30 วินาที
- 3) เมื่อสารละลายหมดจากถังเก็บสารละลายป้อน แล้วเก็บตัวอย่างเพอมีเอท 100 มิลลิลิตร ไปวัดการกระจายของขนาดอนุภาค ด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค
- 4) นำสารละลาย (เพอมีเอท) ใส่ลงในถังเก็บสารละลายป้อนของชุดทดลองการรวมตัวของน้ำมันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์อีกครั้ง ทำการทดลองซ้ำในข้อ 2) และ 3) อีก 3 ครั้ง
- 5) ทำการเตรียมสารละลายดังข้อ 6.2.1 แล้วทำการทดลองซ้ำข้อ 1 ถึงข้อ 4 โดยเปลี่ยนความดันเป็น 0.25 และ 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

บทที่ 7

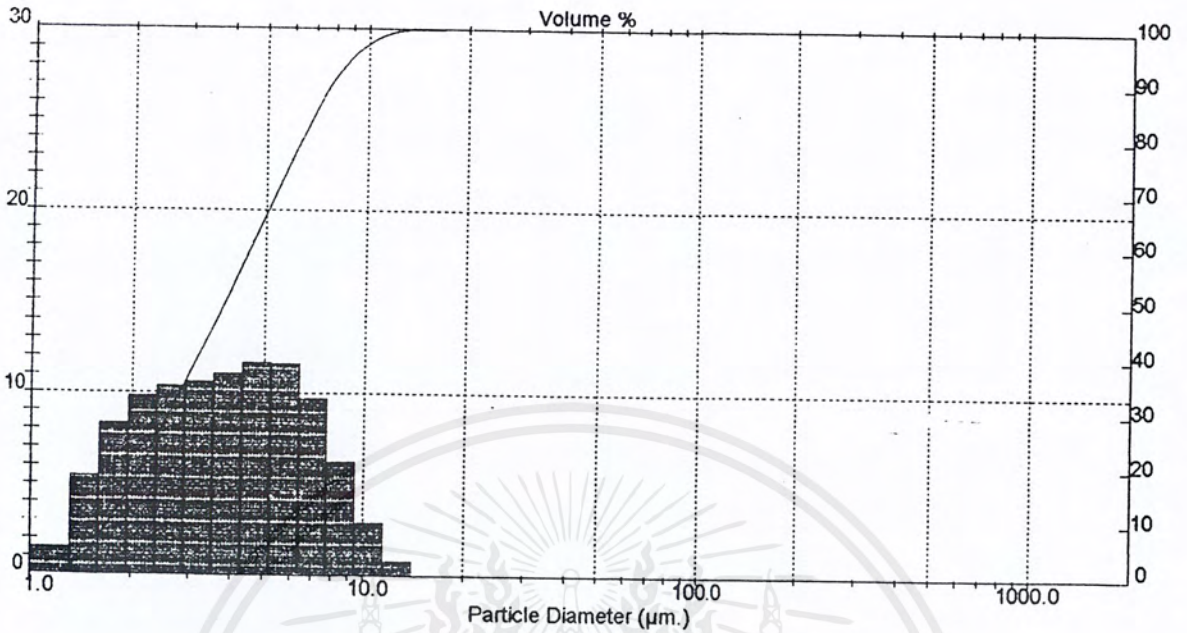
ผลการทดลอง

จากการทดลองศึกษาความเป็นไปได้ในการแยกน้ำมันออกจากน้ำเสีย โดยใช้เทคนิคการรวมตัวโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE ขนาดของรูพรุน 0.5 ไมโครเมตร ที่มีต่อการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์โดยทำการวัดค่าเพอมีเอทฟลักซ์และการกระจายของขนาดอนุภาคได้ผลการทดลองดังนี้

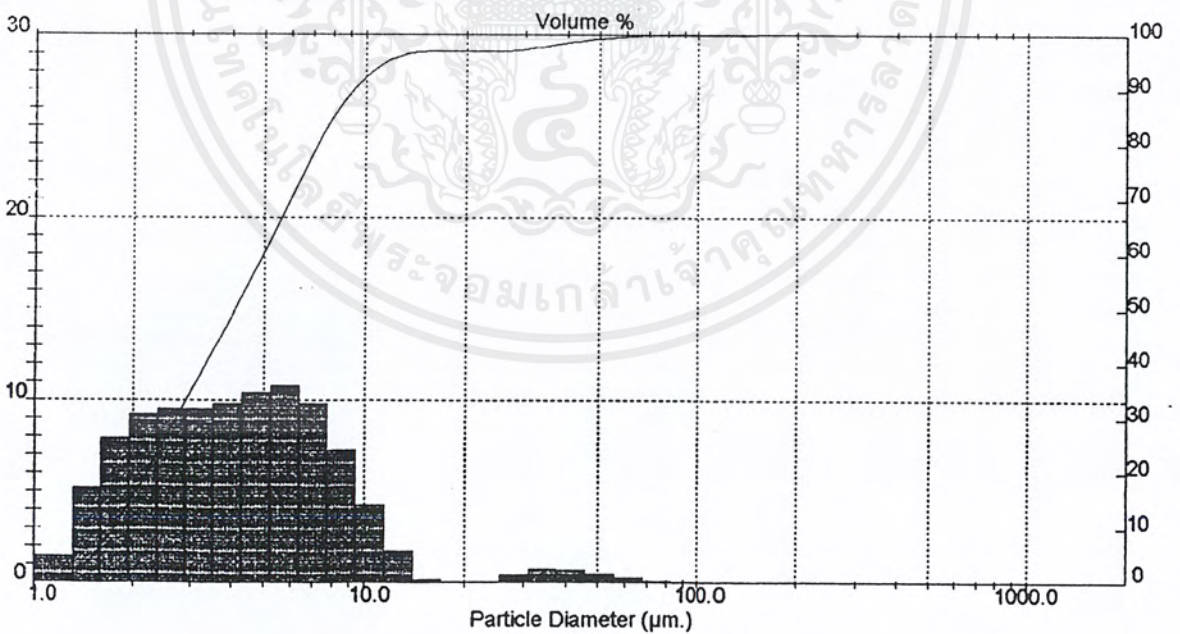
ตารางที่ 7.1 ค่าเพอมีเอทฟลักซ์ของสารละลายน้ำมันในรูปอิมัลชันเมื่อผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์แบบ PTFE ที่ความดัน 0.15 0.25 และ 0.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

ความดัน (กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร)	เพอมีเอทฟลักซ์ (กรัม/(นาที่.ตารางเซนติเมตร))			
	จำนวนรอบที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์			
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
0.15	104	80	76	60
0.25	203	175	163	118
0.50	574	552	501	454

นอกจากจะทำการวัดค่าเพอมีเอทฟลักซ์แล้วยังทำการวัดขนาดของอนุภาค โดยใช้เครื่องวัดขนาดอนุภาค Mastersizer X ปรากฏผลดังรูป 7.1 ถึง 7.15

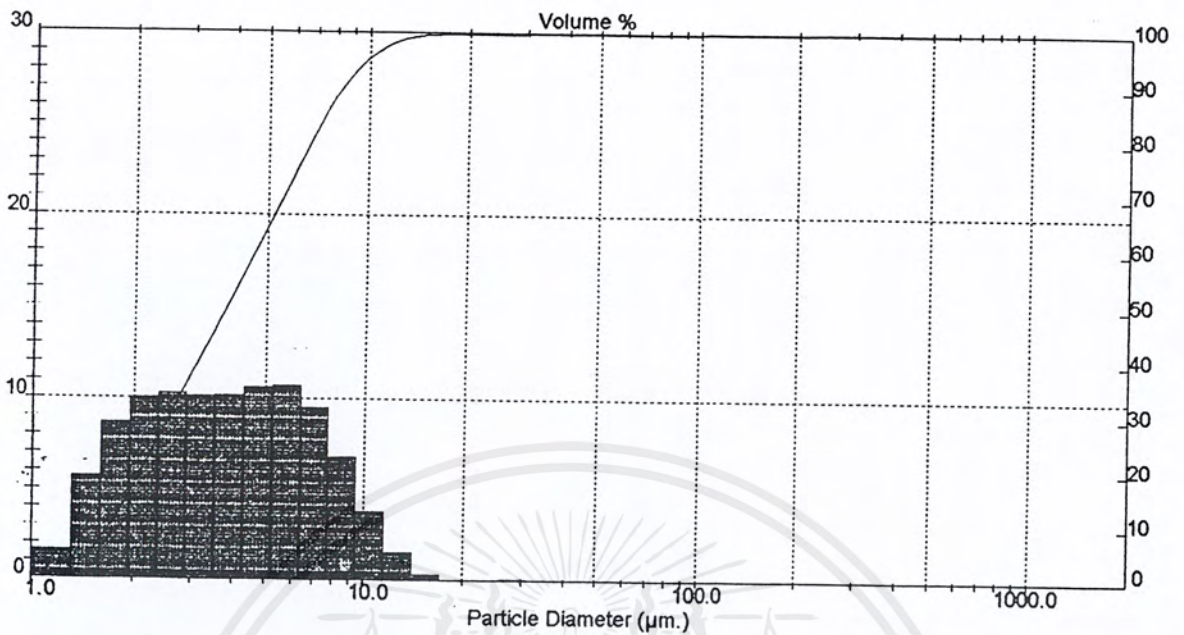


รูปที่ 7.1 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายป้อน

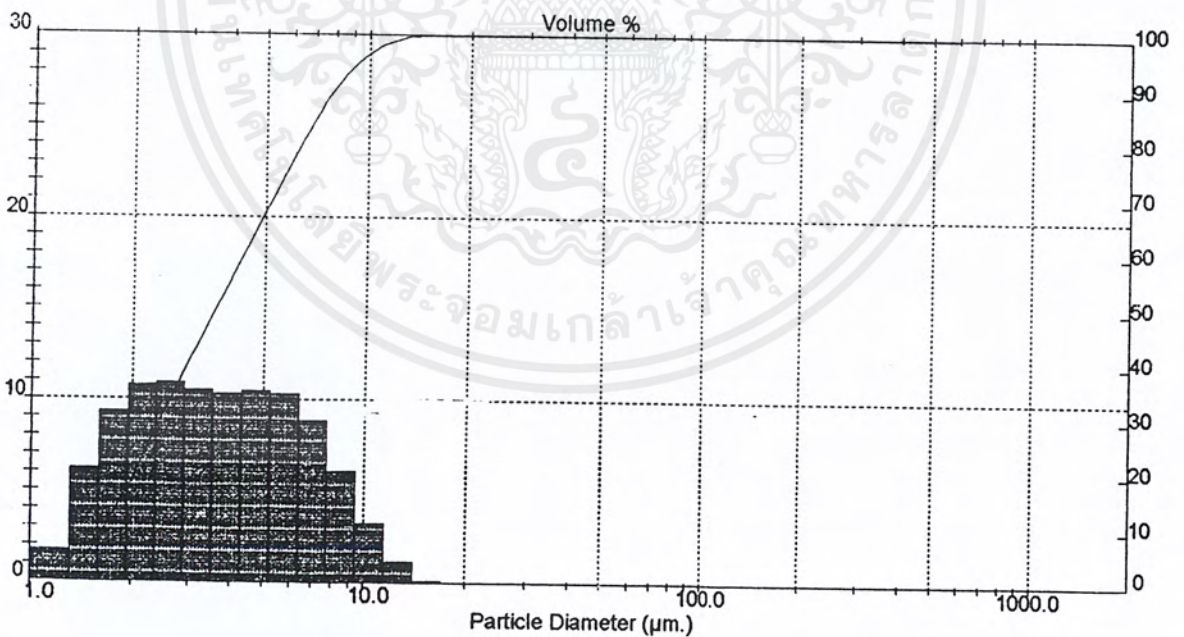


รูปที่ 7.2 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

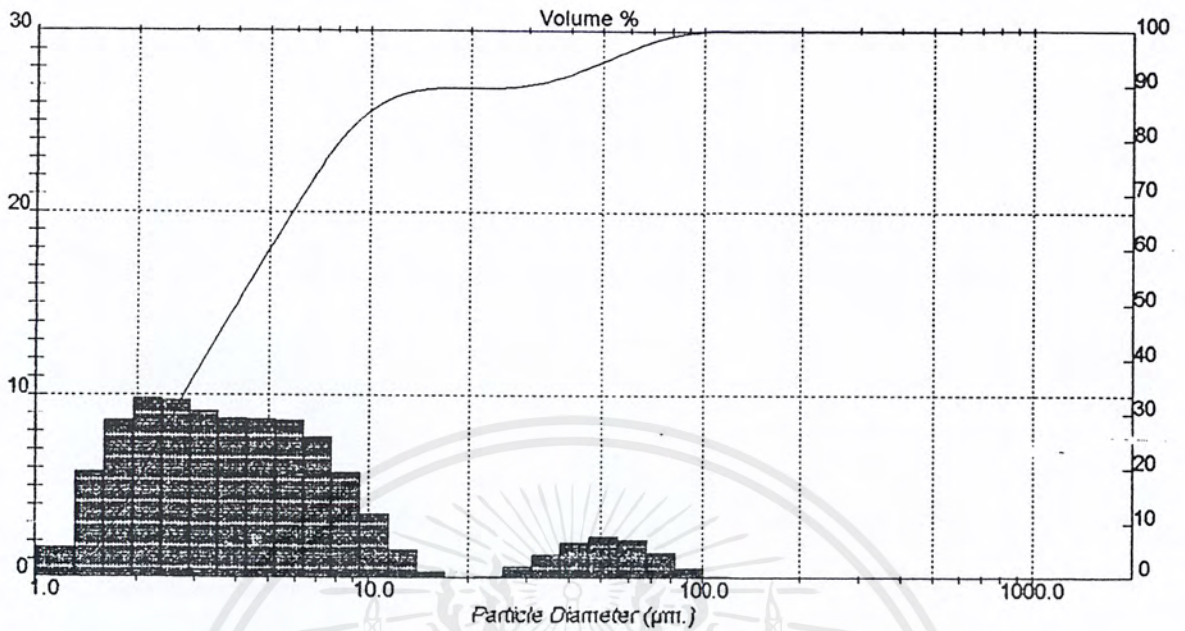


รูปที่ 7.3 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 2

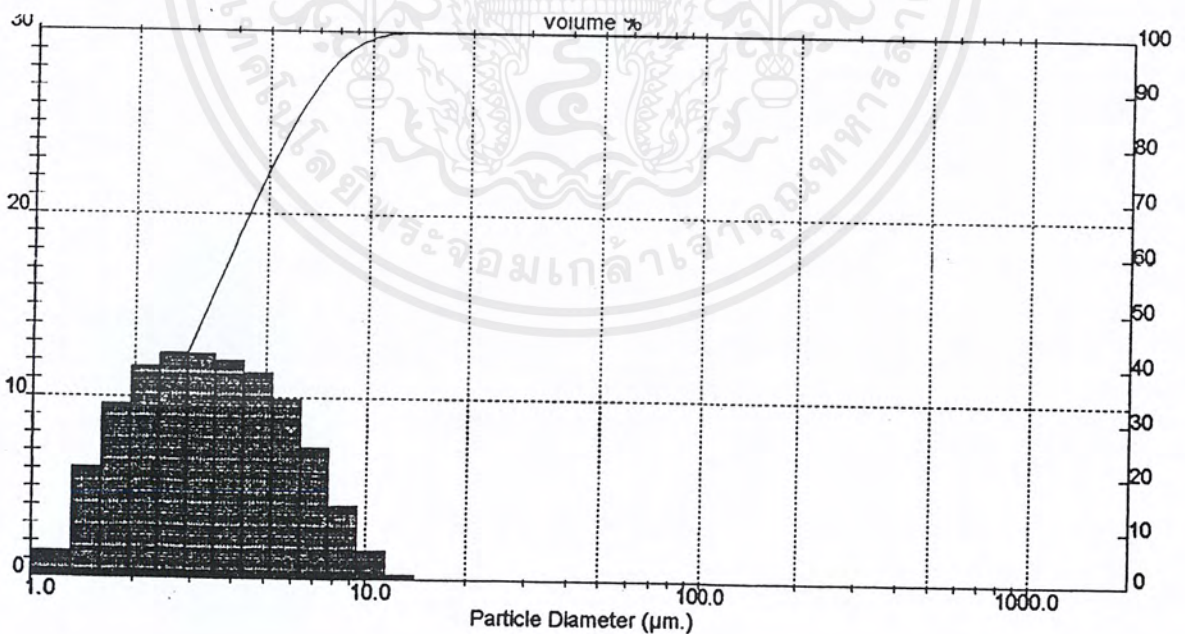


รูปที่ 7.4 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

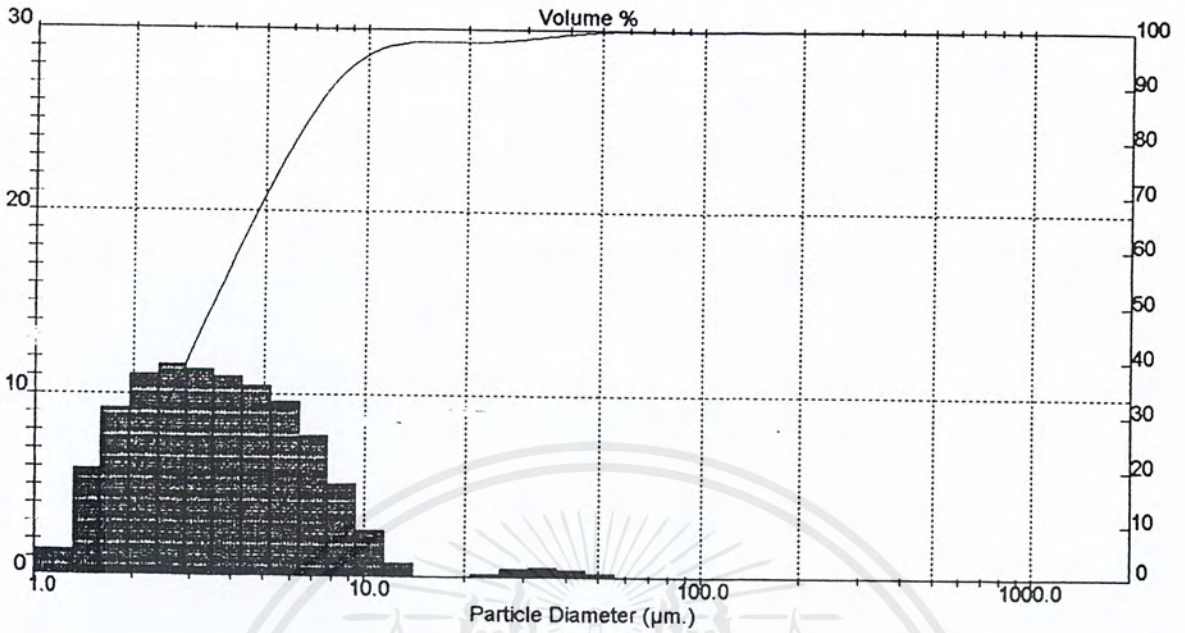


รูปที่ 7.5 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 4

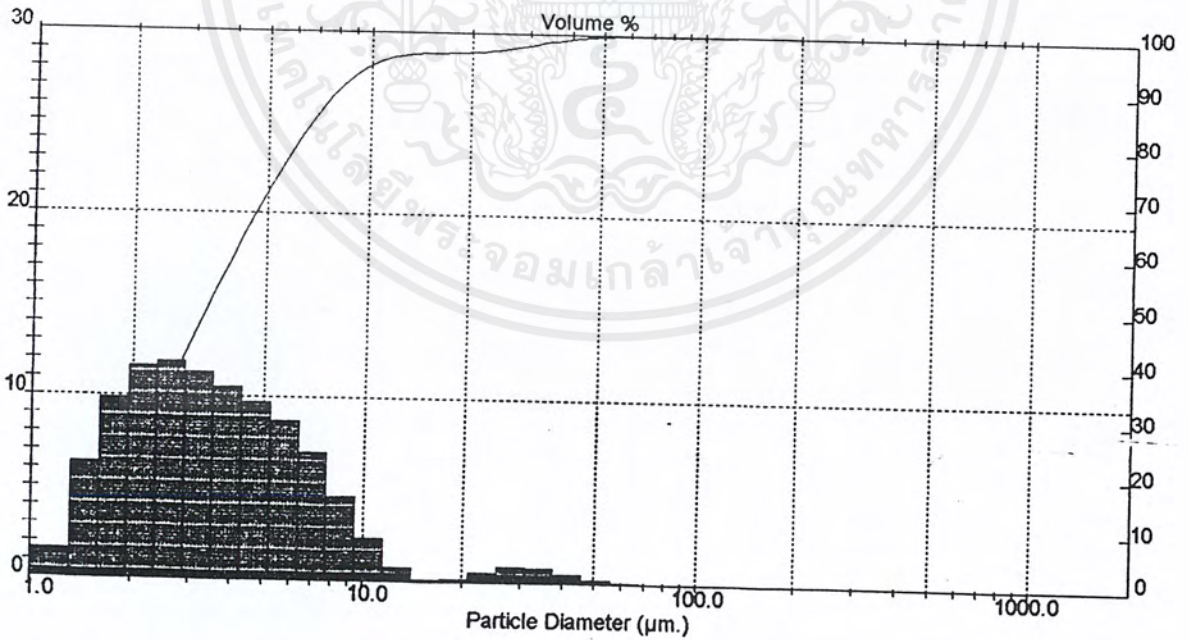


รูปที่ 7.6 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

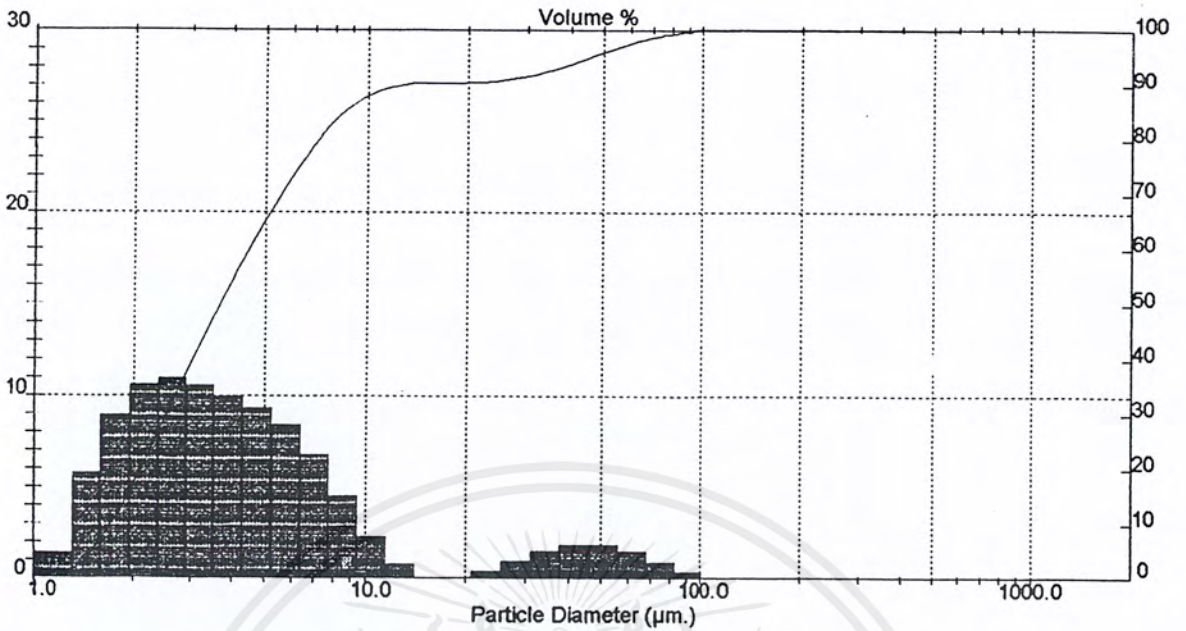


รูปที่ 7.7 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 1

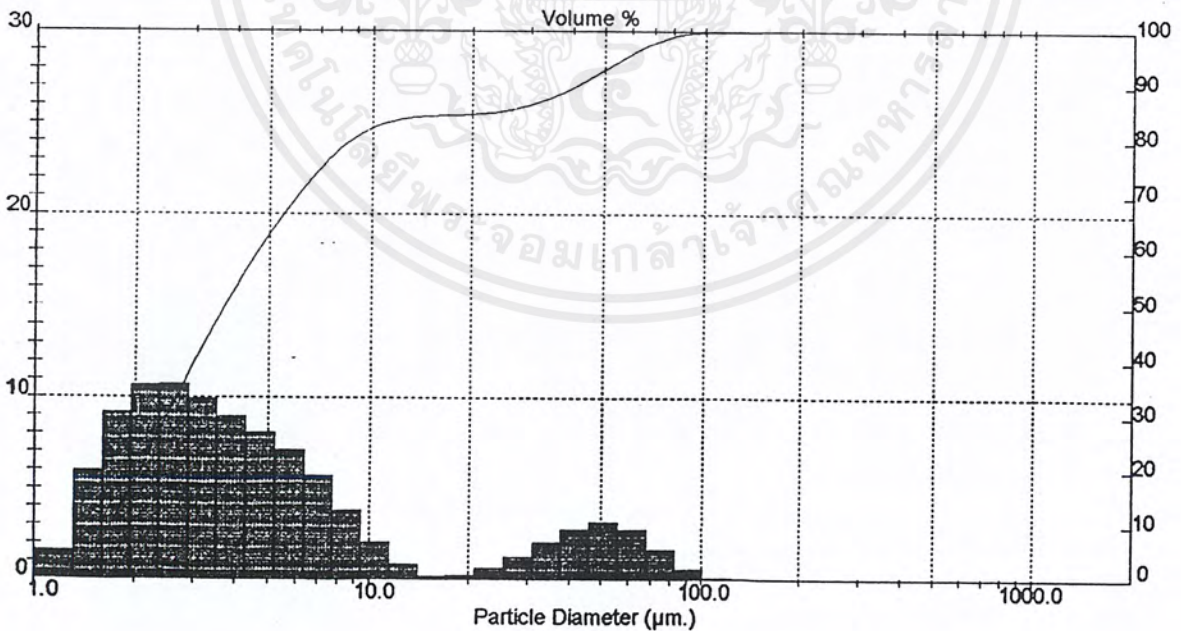


รูปที่ 7.8 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

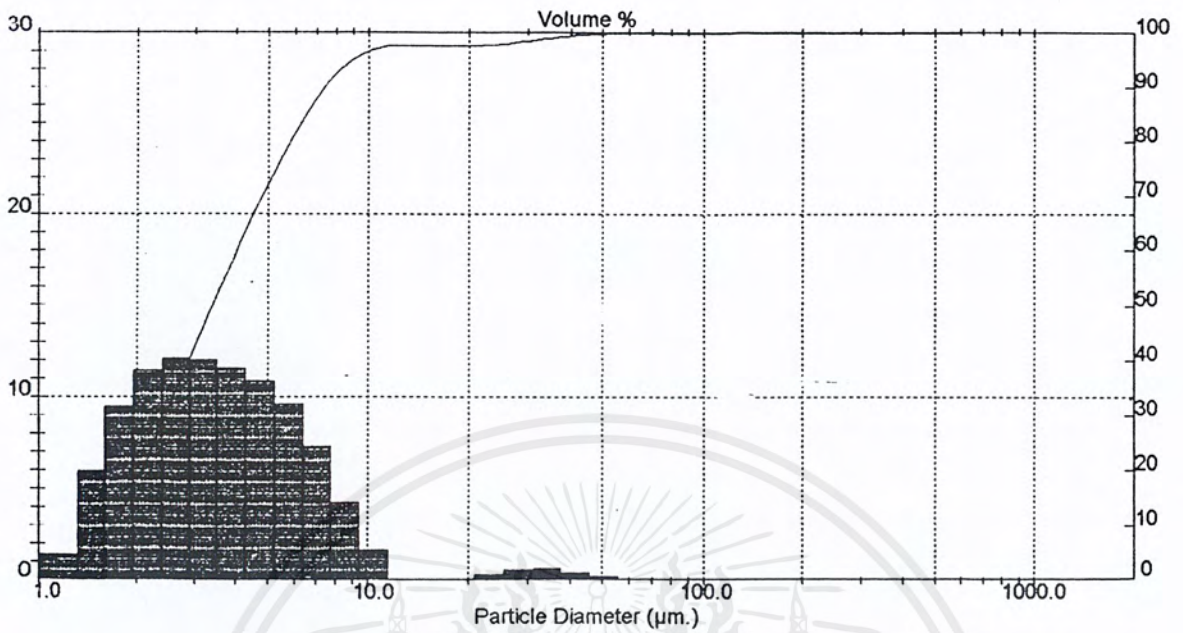


รูปที่ 7.9 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 3

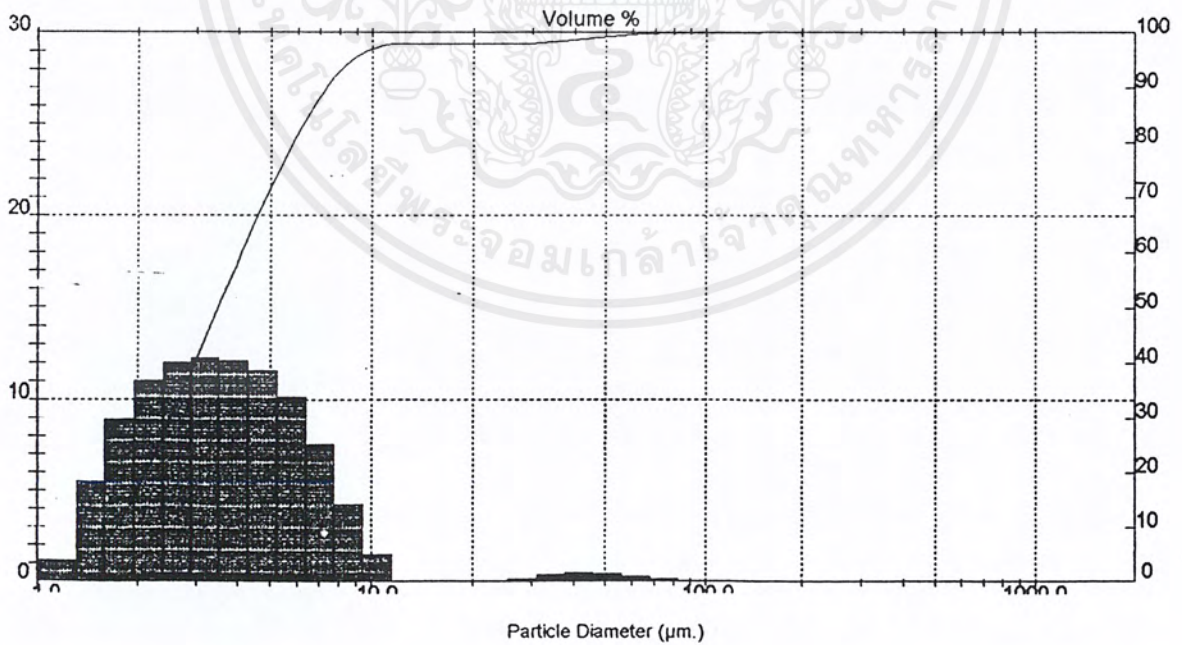


รูปที่ 7.10 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

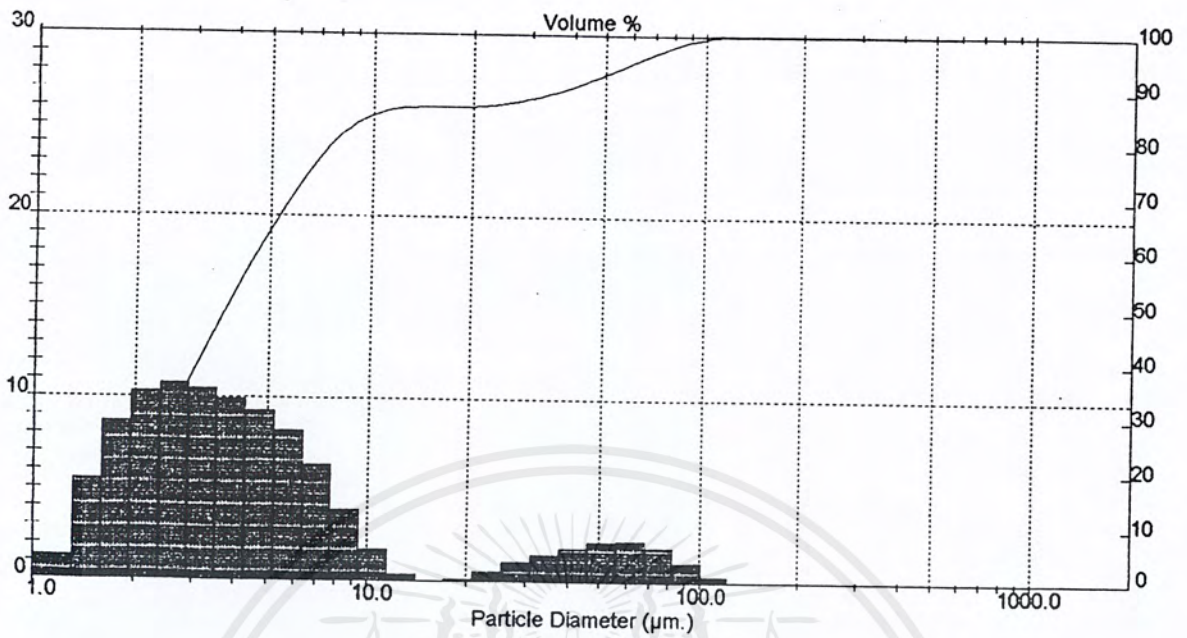


รูปที่ 7.11 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายป้อน

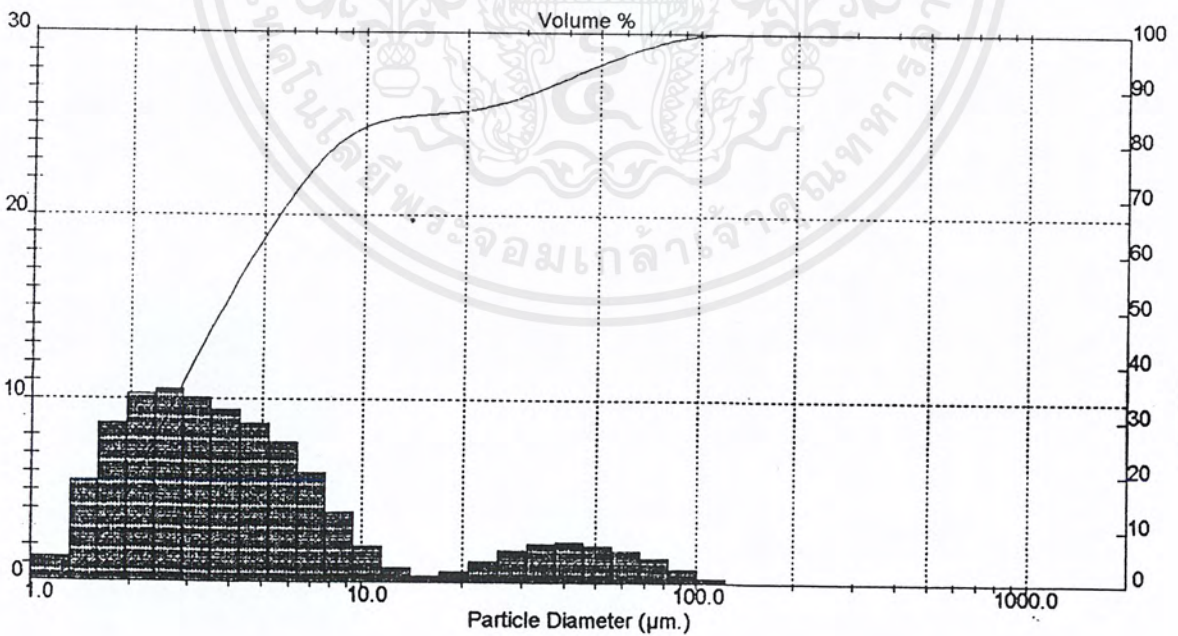


รูปที่ 7.12 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่าน
เยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

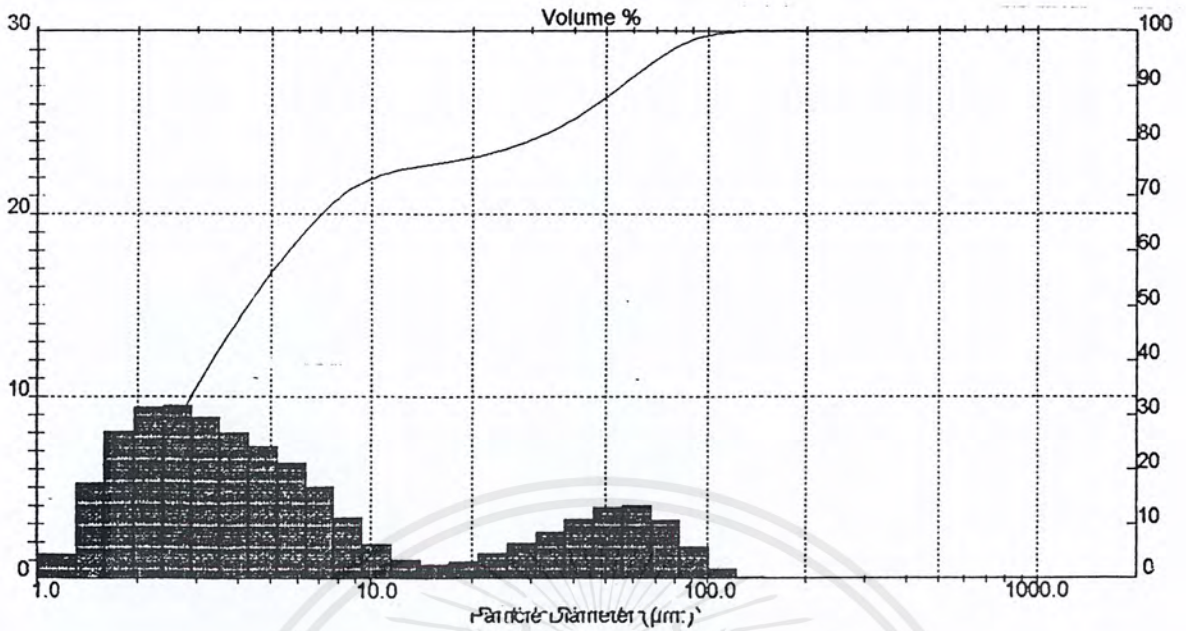


รูปที่ 7.13 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 2



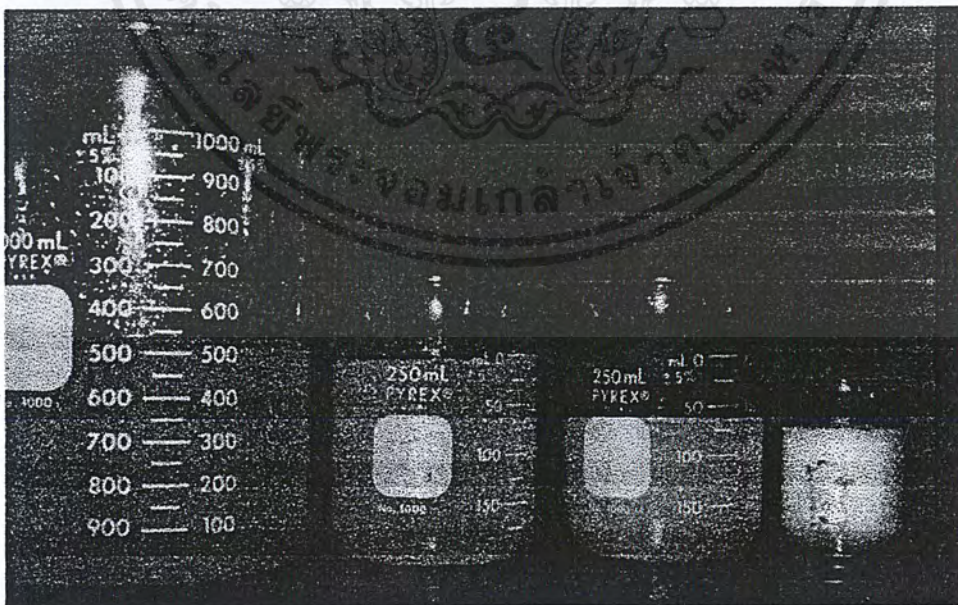
รูปที่ 7.14 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.15 กราฟขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ รอบที่ 4

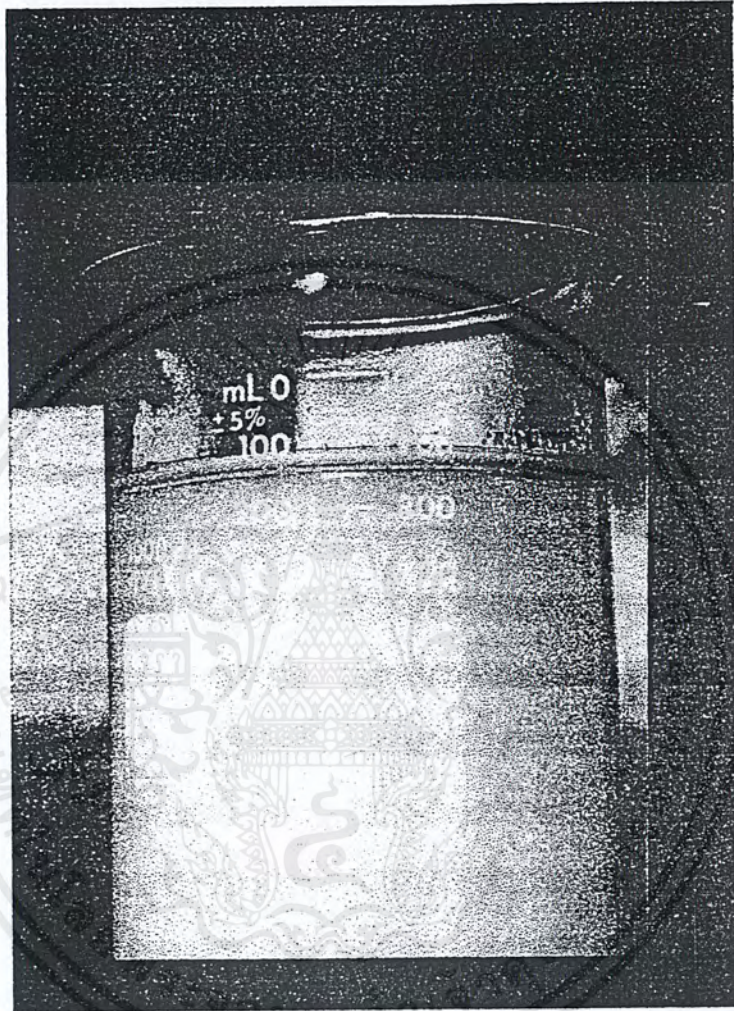
จากการทดลองพบว่า เมื่อนำสารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์มากรอบขึ้นสารละลายจะใสขึ้นตามจำนวนรอบที่ผ่านดังรูปที่ 7.16



รูปที่ 7.16 สารละลายที่ใสขึ้นตามจำนวนรอบที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อสารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์แล้วพบว่าเกิดฟิล์มปกคลุมอยู่บริเวณผิวของสารละลาย ดังรูปที่ 17.17



รูปที่ 17.17 การเกิดฟิล์มที่ผิวของสารละลายเมื่อสารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

8.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE ขนาดของรูพรุน 5 ไมโครเมตร ได้ข้อสรุปดังนี้

เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE สามารถทำให้น้ำมันในรูปอิมัลชันรวมตัวกัน จนทำให้อนุภาคของน้ำมันมีขนาดใหญ่ขึ้นได้ และเมื่ออนุภาคมีขนาดใหญ่ขึ้น ก็จะสามารถแยกออกจากน้ำได้โดยความแตกต่างของความหนาแน่นโดยลอยขึ้นไปเกิดเป็นฟิล์ม (Free Oil) ลอยอยู่เหนือผิวน้ำ

8.2 วิจารณ์ผลการทดลอง

- 1) การทดลองไม่สามารถวัดขนาดของอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร ได้เนื่องจากเครื่องวัดขนาดอนุภาค Mastersizer X วัดขนาดอนุภาคเฉพาะอนุภาคที่มีขนาดมากกว่า 1 ไมโครเมตร เท่านั้น พิจารณาจากรูปที่ 7.6 - 7.15 การทดลองที่ความดัน 0.25 และ 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร จะพบว่าไม่มีพีค (Peak) เกิดขึ้น 2 พีค ในพีคแรกกราฟมีแนวโน้มเบาอาจเพราะมีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตรที่เครื่องไม่สามารถวัดได้จึงไม่อาจหาแนวโน้มของการรวมตัวของอนุภาคที่ขนาดเล็กกว่า 1 ไมโครเมตร นั่นคือ ไม่สามารถวิเคราะห์แนวโน้มของขนาดอนุภาคในพีคแรกซึ่งวัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค เมื่อพิจารณาแนวโน้มในพีคที่ 2 ซึ่งเป็นพีคที่แสดงขนาดอนุภาคขนาดใหญ่จะเห็นว่าพีคที่ 2 มีขนาดใหญ่ขึ้นตามจำนวนรอบที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ น่าจะมาจากการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันภายในรูพรุนของเยื่อแผ่นสังเคราะห์
- 2) จากรูปที่ 7.16 การทดลองนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ ในการแยกน้ำมันในรูปอิมัลชันออกจากน้ำเสีย โดยใช้เทคนิคการรวมตัวโดยใช้เยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE โดยใช้สารละลายยาป้อนเป็นสารละลายน้ำมันในรูปอิมัลชันเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 3) จากตารางที่ 7.1 สังเกตที่ความดันเดียวกันเมื่อให้สารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ชนิด PTFE รอบที่ 1 2 3 และ 4 เมื่อจำนวนรอบเพิ่มขึ้นค่าเพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงเนื่องมาจากในรอบแรก ๆ น้ำมันที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไปจับบริเวณรูพรุนและบริเวณพื้นผิวเยื่อแผ่นสังเคราะห์เนื่องจากเยื่อแผ่นสังเคราะห์ PTFE เป็นแบบไฮโดรโฟบิก ซึ่งสามารถจับน้ำมันได้ทำให้รอบต่อ ๆ ไป สารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ได้ยากขึ้น ทำให้เพอมีเอทฟลักซ์ลดลง
- 4) จากตาราง 7.1 เมื่อเพิ่มความดันให้สารละลายทำให้ค่าเพอมีเอทฟลักซ์เพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันเป็นแรงขับเคลื่อน (driving force) ให้สารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไปได้
- 5) จากรูปที่ 7.1-7.5 ที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตรเมื่อจำนวนรอบของสารละลายเพิ่มขึ้นจะเห็นว่าแนวโน้มของขนาดอนุภาคไม่เพิ่มขึ้นเหมือนความดันอื่นๆ อาจเป็นเพราะ
 - เกิดการอุดตันในรูพรุนและบริเวณพื้นผิวของเยื่อแผ่นสังเคราะห์เป็นอุปสรรคต่อการรวมตัวของน้ำมัน
 - ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร อาจน้อยเกินไปสำหรับการเกิดการรวมตัวของน้ำมันในรูปอิมัลชันเพราะเมื่อความดันน้อย แรงขับเคลื่อนให้สารละลายผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ก็จะมีค่าน้อยไปด้วย ทำให้น้ำมันไปอุดตันในรูพรุนหรือบนผิวของเยื่อแผ่นสังเคราะห์ไม่ถูกดันออกมา

8.3 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการศึกษาถึงวิธีการทำความสะอาดเยื่อแผ่นสังเคราะห์ เพื่อลดปัญหาที่อาจเกิดจากการมีน้ำมันหรือสารปนเปื้อนเข้าไปอุดตันบริเวณรูพรุน
- 2) พยายามควบคุมความดันให้คงที่ตลอดการทดลอง
- 3) ควรทำการศึกษถึงผลของความเข้มข้นของสารละลายที่มีต่อเพอมีเอทฟลักซ์และขนาดของอนุภาค
- 4) การศึกษาผลของ Free Oil ที่มีอยู่ในสารละลายอิมัลชันของน้ำมันเพราะอาจมีผลต่อค่าเพอมีเอทฟลักซ์ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] U.Daiminger , W.Nitsch* , P.Plucinski and S.Hoffman . *Novel techniques for oil/water Separation*. J. Membr. Sci. 99 (1995). pp .197 – 203.
- [2] A.L.Schafer^a,U.Schwicker^a,M.M.Fischer^a,A.G.Fane^{a*} and T.D.Waite^b .*Microfiltration of colloids and natural organic matter*. J .Membr .Sci. 171 (2000). pp .151 – 172.
- [3] J.Kong,K.Li.*. *Oil removal from oil – in water emulsions using PVDF Membranes*. Separation and Purification Tech.16 (1999). pp .83 – 93.
- [4] Vadim S. Nikolayev^aand Daniel A. Beysens.*Coalescence limited by hydrodynamics*. Phys.Fluids 9 (11),November 1997. pp. 3227 – 3234.
- [5] Unno H. *Oil separation from oil – water mixtur by a porous poly(Tetrafluoroethylene) (PTFE) Membrane*.J.Chem.Eng.Japan 19 (4)1996 .pp .281 – 287.
- [6] รัตนา จิระรัตนานนท์ , 2541 , *กระบวนการแยกแผ่นเยื่อสังเคราะห์* , ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, พิมพ์ครั้งที่ 1, หน้า179 – 190.
- [7] Everett,D.H. *Basic Principle of Colliod Science* .Royal School of Chemistry.1994. pp. 140 – 201.
- [8] Cormark ,D. *Response of oil and Chemical marine pollution* .London Apply Science .1983 . pp . 379 – 405.
- [9] Wiley J.*An introduction to mass and heat transfer* .Stanley Middleeman University of California . pp .109 –183.

Web Sites

- [1] [http:// www. osmonics.com](http://www.osmonics.com)
- [2] [http:// www. pall.com](http://www.pall.com)
- [3] [http:// www. ct.utwente.nl](http://www.ct.utwente.nl)
- [4] [http:// www. chemweb.com](http://www.chemweb.com)
- [5] [http:// www. bib.wau.nl](http://www.bib.wau.nl)
- [6] [http:// www. millpore.com](http://www.millpore.com)
- [7] [http:// www. efiltration.com](http://www.efiltration.com)
- [8] [http:// www. desalination.com](http://www.desalination.com)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.

ข้อมูลการทดลองหาค่าพหุคูณที่เวลาต่าง ๆ

ตารางที่ ก.1 มวลของพหุคูณของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่เวลาต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง

ความเข้มข้นของสารละลายป้อนร้อยละ 1 โดยปริมาตร

ความดันก่อนเข้าเยื่อแผ่น 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (วินาที)	มวลของพหุคูณผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (กรัม)			
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
0	36	35.5	17	13
15	226	139	142	89
30	361	240	258	158
45	472	337	378	229
60	582	427	499	295
75	690	502	443	375
90	799	584		
105	857	667		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.2 มวลของเพอมีเอทของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่เวลาต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง

ความเข้มข้นของสารละลายป้อนร้อยละ 1 โดยปริมาตร

ความดันก่อนเข้าเยื่อแผ่น 0.25 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (วินาที)	มวลของเพอมีเอทผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (กรัม)			
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
0	56	56	64	55
20	350	369	379	383
40	680	677	555.26	412
60	832	726		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ก.3 มวลของเพอมีเอทของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ที่เวลาต่าง ๆ

สภาวะการทดลอง

ความเข้มข้นของสารละลายป้อนร้อยละ 1 โดยปริมาตร

ความดันก่อนเข้าเยื่อแผ่น 0.50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เวลา (วินาที)	มวลของเพอมีเอทผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ (กรัม)			
	รอบที่ 1	รอบที่ 2	รอบที่ 3	รอบที่ 4
0	249.47	174	198	136
10	757.02	596.42	581.96	483



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข.

ข้อมูลจากการวัดขนาดอนุภาคด้วยเครื่องวัดขนาดอนุภาค

ตารางที่ ข.1 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาคที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อ

ตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.51	1.32	1.51	25.46	0.00	31.01	100.00
1.32	5.45	1.60	6.96	31.01	0.00	37.79	100.00
1.60	8.30	1.95	15.26	37.79	0.00	46.03	100.00
1.95	9.80	2.38	25.06	46.03	0.00	56.09	100.00
2.38	10.33	2.90	35.39	56.09	0.00	68.33	100.00
2.90	10.57	3.53	45.96	68.33	0.00	83.26	100.00
3.53	11.03	4.30	56.94	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	11.63	5.24	68.62	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	11.57	6.39	80.18	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	9.69	7.78	89.88	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	6.27	9.48	96.15	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	2.99	11.55	99.14	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.86	14.08	100.00	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.00	17.15	100.00	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	100.00	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.00	25.46	100.00	492.47	0.00	600.00	100.00

ตารางที่ ข.2 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.15 กิโลกรัม

ต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นตั้งเคราะห์ 1 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.48	1.32	1.48	25.46	0.45	31.01	97.52
1.32	5.23	1.60	6.71	31.01	0.75	37.79	98.27
1.60	7.88	1.95	14.59	37.79	0.74	46.03	99.01
1.95	9.17	2.38	23.76	46.03	0.54	56.09	99.55
2.38	9.48	2.90	33.24	56.09	0.30	68.33	99.85
2.90	9.51	3.53	42.74	68.33	0.12	83.26	99.97
3.53	9.80	4.30	52.55	83.26	0.03	101.44	100.00
4.30	10.41	5.24	62.96	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	10.77	6.39	73.73	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	9.79	7.78	83.53	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	7.26	9.48	90.79	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	4.27	11.55	95.06	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	1.75	14.08	96.81	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.25	17.15	97.06	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	97.06	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.01	25.46	97.07	492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.3 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 2 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.64	1.32	1.64	25.46	0.11	31.01	99.86
1.32	5.73	1.60	7.36	31.01	0.09	37.79	99.95
1.60	8.61	1.95	15.97	37.79	0.04	46.03	99.99
1.95	9.99	2.38	25.96	46.03	0.01	56.09	100.00
2.38	10.22	2.90	38.18	56.09	0.00	68.33	100.00
2.90	10.07	3.53	46.25	68.33	0.00	83.26	100.00
3.53	10.16	4.30	56.41	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	10.57	5.24	66.98	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	10.70	6.39	77.68	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	9.49	7.78	87.17	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	6.80	9.48	93.97	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	3.83	11.55	97.80	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	1.54	14.08	99.34	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.35	17.15	99.70	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.01	20.90	99.71	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.05	25.46	99.75	492.47	0.00	600.00	100.00

ตารางที่ ข.4 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 3 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.78	1.32	1.78	25.46	0.00	31.01	100.00
1.32	6.20	1.60	7.98	31.01	0.00	37.79	100.00
1.60	9.31	1.95	17.28	37.79	0.00	46.03	100.00
1.95	10.74	2.38	28.02	46.03	0.00	56.09	100.00
2.38	10.87	2.90	38.89	56.09	0.00	68.33	100.00
2.90	10.50	3.53	49.39	68.33	0.00	83.26	100.00
3.53	10.31	4.30	59.70	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	10.42	5.24	70.12	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	10.27	6.39	80.39	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	8.85	7.78	89.24	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	6.12	9.48	95.36	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	3.27	11.55	98.63	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	1.19	14.08	99.82	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.18	17.15	100.00	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	100.00	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.00	25.46	100.00	492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.5 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.15 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 4 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.69	1.32	1.69	25.46	0.66	31.01	90.22
1.32	5.78	1.60	7.47	31.01	1.34	37.79	91.55
1.60	8.60	1.95	16.07	37.79	1.95	46.03	93.51
1.95	9.78	2.38	25.85	46.03	2.30	56.09	95.81
2.38	9.68	2.90	35.53	56.09	2.13	68.33	97.94
2.90	9.09	3.53	44.63	68.33	1.39	83.26	99.33
3.53	8.68	4.30	53.31	83.26	0.55	101.44	99.89
4.30	8.64	5.24	61.95	101.44	0.11	123.59	99.99
5.24	8.59	6.39	70.54	123.59	0.01	150.57	100.00
6.39	7.70	7.78	78.24	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	5.76	9.48	84.00	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	3.51	11.55	87.51	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	1.57	14.08	89.08	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.36	17.15	89.44	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	89.44	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.12	25.46	89.56	492.47	0.00	600.00	100.00

ตารางที่ ข.6 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.47	1.32	1.47	25.46	0.00	31.01	100.00
1.32	6.09	1.60	7.56	31.01	0.00	37.79	100.00
1.60	9.60	1.95	17.16	37.79	0.00	46.03	100.00
1.95	11.64	2.38	28.80	46.03	0.00	56.09	100.00
2.38	12.37	2.90	41.17	56.09	0.00	68.33	100.00
2.90	12.34	3.53	53.51	68.33	0.00	83.26	100.00
3.53	12.00	4.30	65.51	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	11.34	5.24	76.85	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	9.91	6.39	86.76	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	7.25	7.78	94.01	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	4.06	9.48	98.07	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	1.61	11.55	99.68	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.32	14.08	100.00	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.00	17.15	100.00	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	100.00	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.00	25.46	100.00	492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.7 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 1 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.45	1.32	1.45	25.46	0.54	31.01	98.51
1.32	5.89	1.60	7.34	31.01	0.62	37.79	99.13
1.60	9.21	1.95	16.55	37.79	0.48	46.03	99.61
1.95	11.04	2.38	27.58	46.03	0.27	56.09	99.88
2.38	11.56	2.90	39.14	56.09	0.10	68.33	99.98
2.90	11.36	3.53	50.50	68.33	0.02	83.26	100.00
3.53	10.94	4.30	61.44	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	10.45	5.24	71.89	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	9.58	6.39	81.47	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	7.73	7.78	89.19	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	5.09	9.48	94.29	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	2.59	11.55	96.87	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.82	14.08	97.69	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.02	17.15	97.72	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	97.72	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.25	25.46	97.97	492.47	0.00	600.00	100.00

ตารางที่ ข.8 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 2 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.63	1.32	1.63	25.46	0.91	31.01	98.13
1.32	6.36	1.60	7.99	31.01	0.87	37.79	98.99
1.60	9.82	1.95	17.80	37.79	0.58	46.03	99.57
1.95	11.58	2.38	29.38	46.03	0.29	56.09	99.86
2.38	11.85	2.90	41.23	56.09	0.11	68.33	99.97
2.90	11.28	3.53	52.51	68.33	0.03	83.26	100.00
3.53	10.48	4.30	62.99	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	9.71	5.24	72.70	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	8.72	6.39	81.42	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	6.98	7.78	88.40	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	4.61	9.48	93.01	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	2.37	11.55	95.37	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.81	14.08	96.18	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.17	17.15	96.35	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.24	20.90	96.59	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.63	25.46	97.22	492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.9 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อ

ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 3 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.45	1.32	1.45	25.46	0.98	31.01	91.81
1.32	5.76	1.60	7.21	31.01	1.52	37.79	93.32
1.60	8.93	1.95	16.14	37.79	1.86	46.03	95.18
1.95	10.60	2.38	26.73	46.03	1.88	56.09	97.06
2.38	10.93	2.90	37.67	56.09	1.54	68.33	98.59
2.90	10.53	3.53	48.20	68.33	0.94	83.26	99.53
3.53	9.92	4.30	58.11	83.26	0.38	101.44	99.91
4.30	9.29	5.24	67.41	101.44	0.08	123.59	99.99
5.24	8.41	6.39	75.82	123.59	0.01	150.57	100.00
6.39	6.76	7.78	82.58	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	4.50	9.48	87.08	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	2.34	11.55	89.42	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.81	14.08	90.23	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.10	17.15	90.33	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.07	20.90	90.40	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.43	25.46	90.83	492.47	0.00	600.00	100.00

ตารางที่ ข.10 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.25 กิโลกรัมต่อ

ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 4 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.58	1.32	1.58	25.46	1.28	31.01	86.83
1.32	5.97	1.60	7.55	31.01	2.05	37.79	88.88
1.60	9.13	1.95	16.67	37.79	2.79	46.03	91.67
1.95	10.63	2.38	27.30	46.03	3.16	56.09	94.83
2.38	10.67	2.90	37.96	56.09	2.77	68.33	97.60
2.90	9.90	3.53	47.86	68.33	1.68	83.26	99.28
3.53	8.94	4.30	56.80	83.26	0.61	101.44	99.89
4.30	8.07	5.24	64.87	101.44	0.11	123.59	99.99
5.24	7.13	6.39	72.00	123.59	0.01	150.57	100.00
6.39	5.68	7.78	77.68	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	3.80	9.48	81.48	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	2.06	11.55	83.54	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.85	14.08	84.39	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.23	17.15	84.62	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.28	20.90	84.90	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.66	25.46	85.56	492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.11 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายป้อน

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.20	1.32	1.20	25.46	0.15	31.01	98.04
1.32	5.50	1.60	6.71	31.01	0.41	37.79	98.45
1.60	8.87	1.95	15.58	37.79	0.51	46.03	98.96
1.95	11.00	2.38	26.57	46.03	0.49	56.09	99.45
2.38	11.97	2.90	38.55	56.09	0.34	68.33	99.79
2.90	12.23	3.53	50.78	68.33	0.16	83.26	99.95
3.53	12.08	4.30	62.86	83.26	0.04	101.44	99.99
4.30	11.53	5.24	74.39	101.44	0.01	123.59	100.00
5.24	10.16	6.39	84.55	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	7.53	7.78	92.08	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	4.27	9.48	96.35	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	1.54	11.55	97.88	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.00	14.08	97.89	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.00	17.15	97.89	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	97.89	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.00	25.46	97.89	492.47	0.00	600.00	100.00

ตารางที่ ข.12 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 1 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.41	1.32	1.41	25.46	0.64	31.01	98.58
1.32	5.97	1.60	7.38	31.01	0.66	37.79	99.24
1.60	9.43	1.95	16.82	37.79	0.45	46.03	99.69
1.95	11.43	2.38	28.25	46.03	0.22	56.09	99.90
2.38	12.10	2.90	40.35	56.09	0.08	68.33	99.98
2.90	11.99	3.53	52.34	68.33	0.02	83.26	100.00
3.53	11.53	4.30	63.87	83.26	0.00	101.44	100.00
4.30	10.85	5.24	74.72	101.44	0.00	123.59	100.00
5.24	9.60	6.39	84.32	123.59	0.00	150.57	100.00
6.39	7.27	7.78	91.59	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	4.28	9.48	95.87	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	1.67	11.55	97.54	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.08	14.08	97.62	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.00	17.15	97.62	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.00	20.90	97.62	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.32	25.46	97.94	492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.13 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 2 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.35	1.32	1.35	25.46	1.11	31.01	88.65
1.32	5.51	1.60	6.87	31.01	1.53	37.79	90.18
1.60	8.62	1.95	15.49	37.79	1.88	46.03	92.06
1.95	10.30	2.38	25.79	46.03	2.20	56.09	94.26
2.38	10.73	2.90	36.52	56.09	2.29	68.33	96.55
2.90	10.44	3.53	46.96	68.33	1.92	83.26	98.47
3.53	9.89	4.30	56.85	83.26	1.10	101.44	99.57
4.30	9.23	5.24	66.07	101.44	0.37	123.59	99.94
5.24	8.20	6.39	74.27	123.59	0.06	150.57	100.00
6.39	6.34	7.78	80.61	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	3.92	9.48	84.53	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	1.77	11.55	86.31	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.42	14.08	86.73	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.01	17.15	86.73	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.18	20.90	86.92	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	0.62	25.46	87.54	492.47	0.00	600.00	100.00

ตารางที่ ข.14 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อ ตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 3 รอบ

Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %	Size (Lo) µm	Result In %	Size (Hi) µm	Result Below %
0.50	1.41	1.32	1.41	25.46	1.82	31.01	89.03
1.32	5.57	1.60	6.98	31.01	2.18	37.79	91.21
1.60	8.63	1.95	15.61	37.79	2.28	46.03	93.49
1.95	10.22	2.38	25.83	46.03	2.09	56.09	95.58
2.38	10.51	2.90	36.34	56.09	1.83	68.33	97.41
2.90	10.06	3.53	46.40	68.33	1.40	83.26	98.81
3.53	9.37	4.30	55.77	83.26	0.82	101.44	99.63
4.30	8.65	5.24	64.42	101.44	0.31	123.59	99.93
5.24	7.68	6.39	72.10	123.59	0.06	150.57	100.00
6.39	6.01	7.78	78.11	150.57	0.00	183.44	100.00
7.78	3.88	9.48	81.99	183.44	0.00	223.51	100.00
9.48	2.01	11.55	84.00	223.51	0.00	272.31	100.00
11.55	0.86	14.08	84.86	272.31	0.00	331.77	100.00
14.08	0.42	17.15	85.29	331.77	0.00	404.21	100.00
17.15	0.70	20.90	85.98	404.21	0.00	492.47	100.00
20.90	1.22	25.46	87.21	492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.15 แสดงขนาดอนุภาคที่วัดได้จากเครื่องวัดขนาดอนุภาค ที่ความดัน 0.5 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ของสารละลายที่ผ่านเยื่อแผ่นสังเคราะห์ 4 รอบ

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
0.50	1.38	1.32	1.38
1.32	5.25	1.60	6.63
1.60	8.05	1.95	14.67
1.95	9.40	2.38	24.07
2.38	9.47	2.90	33.54
2.90	8.83	3.53	42.37
3.53	8.01	4.30	50.38
4.30	7.24	5.24	57.62
5.24	6.37	6.39	63.99
6.39	5.04	7.78	69.03
7.78	3.38	9.48	72.41
9.48	1.94	11.55	74.36
11.55	1.06	14.08	75.42
14.08	0.80	17.15	76.22
17.15	0.99	20.90	77.22
20.90	1.42	25.46	78.63

Size (Lo) μm	Result In %	Size (Hi) μm	Result Below %
25.46	1.95	31.01	80.58
31.01	2.56	37.79	83.14
37.79	3.27	46.03	86.41
46.03	3.89	56.09	90.30
56.09	4.01	68.33	94.31
68.33	3.21	83.26	97.52
83.26	1.78	101.44	99.30
101.44	0.60	123.59	99.89
123.59	0.10	150.57	99.99
150.57	0.01	183.44	100.00
183.44	0.00	223.51	100.00
223.51	0.00	272.31	100.00
272.31	0.00	331.77	100.00
331.77	0.00	404.21	100.00
404.21	0.00	492.47	100.00
492.47	0.00	600.00	100.00

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้