บทที่ 3

ทฤษฎี

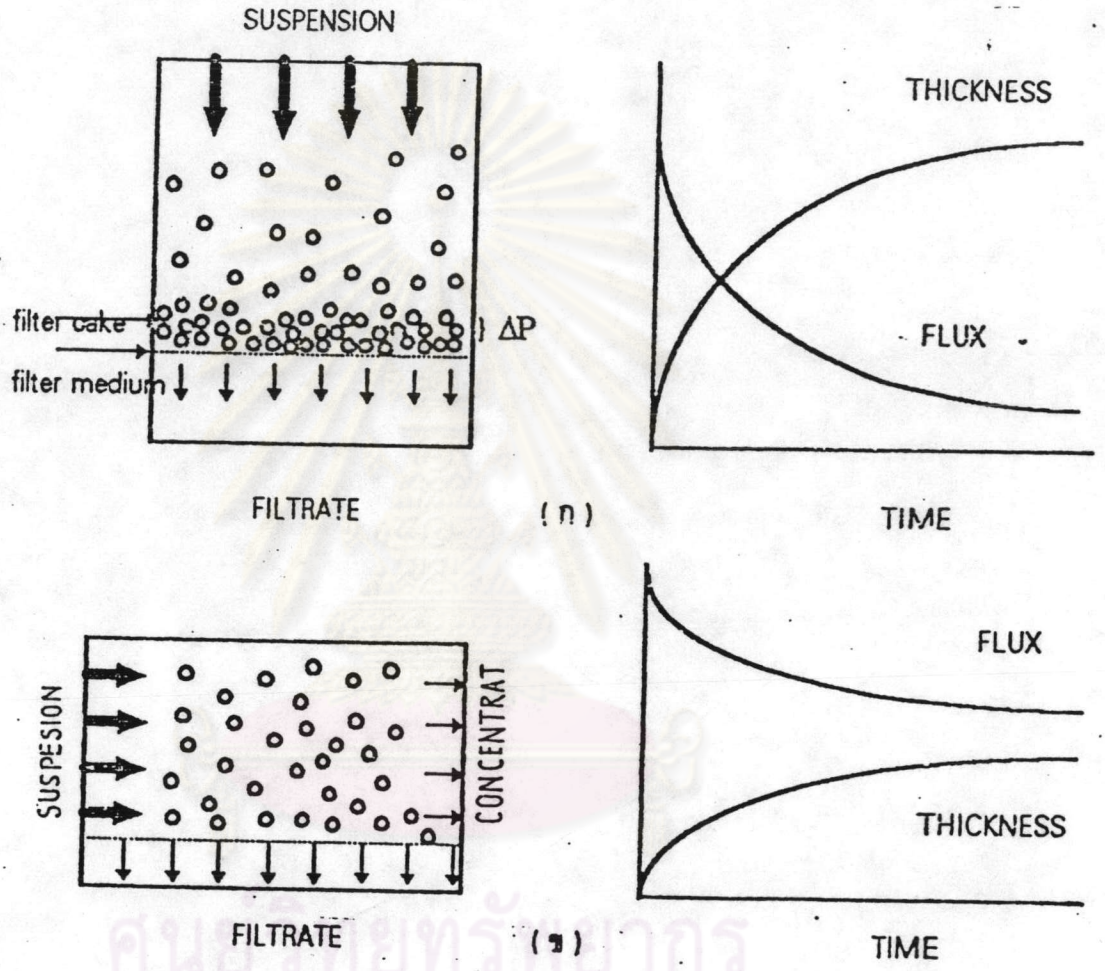
3.1 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

กระบวนการไมโครฟิลเตรชันเป็นการแยกโดยการซึมผ่านเยื่อแผ่นวิธีหนึ่งใช้ในการแยกอนุภาคที่เป็นของแข็งออกจากสารละลายแขวนลอยโดยให้สารละลายแขวนลอยไหลผ่านเยื่อแผ่นโดยใช้ความดันเป็นแรงขับมีความสามารถในการแยกสารที่มีขนาดอนุภาคตั้งแต่ 0.1 -10 ไมโครเมตร โดยใช้วิธีการแยกสารแบบคัดเลือกขนาดอนุภาค (SIEVING MECHANISM)

หลักการของกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน คือ เมื่อป้อนสารละลายแขวนลอยเข้าสู่ระบบการกรองของเยื่อแผ่นตัวทำละลายและสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะสามารถผ่านเยื่อแผ่นออกไปได้เรียกสารละลายส่วนนี้ว่า เพอมิเอท (PERMEATE) ส่วนสารละลายแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้ในระบบเรียกสารละลายส่วนนี้ว่า รีเทนเทต (RETENTATE) ในส่วนของรีเทนเทตจะมีความเข้มข้นสูงกว่าสารละลายแขวนลอยที่ป้อนเข้า ส่วนที่จะนำไปใช้ประโยชน์อาจจะเป็นส่วนของเพอมิเอทหรือรีเทนเทต หรือทั้งสองส่วน

ลักษณะการกรองของสารละลายแขวนลอยในระบบไมโครฟิลเตรชันโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะคือ การกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น (DEAD-END FILTRATION) และการกรองแบบไหลขนานเยื่อแผ่น (CROSS-FLOW FILTRATION) ดังแสดงในรูปที่ 3.1

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.1 ก. ลักษณะการกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักส์และความหนาของชั้นฟิลม์กับเวลา

ข. ลักษณะการกรองแบบไหลขนานเยื่อแผ่น และกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าเพอมิเอชันฟลักส์และความหนาของชั้นฟิลม์กับเวลา

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น จะใช้แรงดันป้อนสารให้ไหลผ่านไปในแนวตั้ง ฉากกับเยื่อแผ่น สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นจะถูกกักไว้ในระบบทำให้ภายในระบบมีความเข้นข้นสูงขึ้นจะทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคบริเวณผิวเยื่อแผ่นและเกิดการสะสมอย่างต่อเนื่อง ปริมาณเพอมิเอทที่ได้จะลดลงอย่างมาก ในทางปฏิบัติอาจต้องทำการถอดเยื่อแผ่นมาล้างบ่อยครั้งเพื่อที่จะทำการกรองต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การกรองแบบไหลขนานเยื่อแผ่น ใช้แรงดันป้อนสารให้ไหลผ่านไปในแนวขนานกับผิวเยื่อแผ่น ทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของเยื่อแผ่นกวาดอนุภาคที่เกาะอยู่ให้ กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันของเยื่อแผ่นได้ดี ปริมาณเพอมิเอทที่ได้จึงมีค่าสูงกว่าระบบการกรองแบบไหลผ่านเยื่อแผ่น อย่างไรก็ตามในกรณีการแยกสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับรูพรุนหรือในการแยกสารแขวนลอยที่แยกลำบาก เช่น สารละลายจากการหมัก การแยกเอมไซม์ออกจากเซลล์ ผลที่ได้ไม่เป็นที่น่าพอใจเนื่องจาก เกิดการอุดตันของเยื่อแผ่น ทำให้ปริมาณเพอมิเอทลดลงอย่างมาก

จากปัญหาที่เกิดกับการกรองแบบไหลขนานเยื่อแผ่น ข้างต้นจึงได้มีการพัฒนาระบบการ-กรองใหม่ขึ้นมาเพื่อที่จะช่วยในการลดปัญหาดังกล่าวเรียกการกรองระบบใหม่นี้ว่าการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้

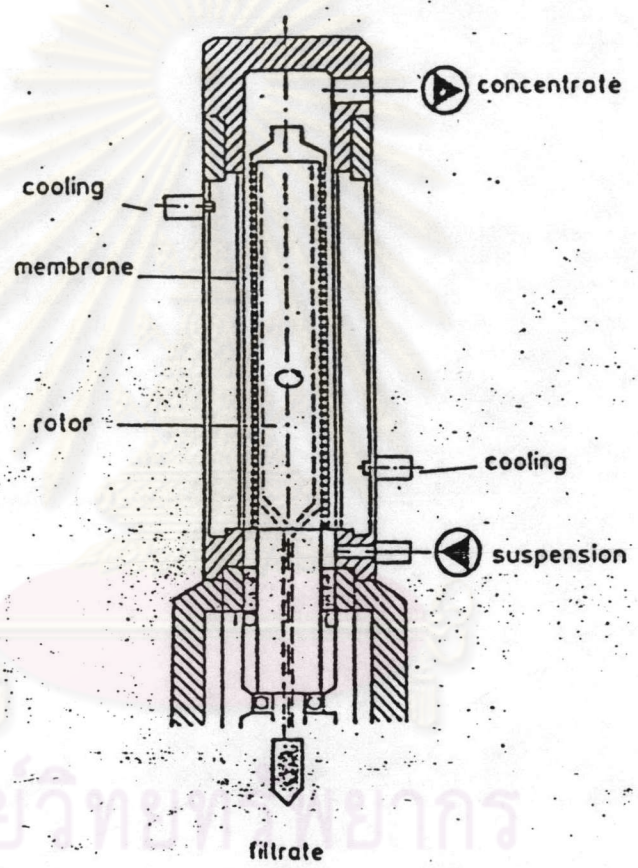
3.2 กระบวนการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันโดยใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้ (ROTATING MEMBRANE MICROFILTRATION)

เครื่องกรองที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้นี้สามารถนำมาใช้ในการกรองสารแขวนลอยที่แยกลำบาก และสามารถควบคุมการอุดตันที่ผิวเยื่อแผ่นได้ดี เนื่องจากเยื่อแผ่นที่ใช้ในการกรองสามารถหมุนได้ทำให้เกิดการหมุนวนของสารละลายและก่อให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าเยื่อแผ่น ผิวเยื่อแผ่นจึงถูกทำความสะอาดตลอดเวลา ทำให้สามารถควบคุมการสร้างแผ่นฟิลม์บนผิวเยื่อแผ่นได้ดี การถ่ายเทมวลตลอดการกรองสามารถทำได้ที่ความดันต่ำปริมาณเพอมิเอทที่ได้จึงมีค่าสูงและค่อนข้างคงที่เป็นเวลานานๆซึ่งเหมาะสมกับกระบวนการแยกแบบต่อเนื่อง

3.2.1 ลักษณะของเครื่องกรองที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้

เครื่องกรองชนิดหมุนได้จะประกอบด้วยส่วนที่ใช้ในการกรอง คือ แท่งเซรามิกอยู่ภายใน โดยมีท่อทรงกระบอกครอบอยู่ด้านนอก แท่งเซรามิกและท่อทรงกระบอกมีแนวศูนย์กลางเดียวกัน แท่งเซรามิกสามารถหมุนได้เนื่องจากแรงขับจากมอเตอร์ไฟฟ้า ส่วนท่อทรงกระบอกชั้นนอกจะถูกตรึงอยู่กับที่ระหว่างท่อทรงกระบอกชั้นในกับผนังด้านนอกของแท่งเซรามิกจะมีช่องว่าง(GAB) ซึ่งเป็นทางไหลของสารละลายแขวนลอย สารละลายแขวนลอยจะถูกป้อน

เข้าทางด้านล่างด้วยปั๊มตัวที่หนึ่ง สารละลายและสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเยื่อแผ่นเซรามิกจะสามารถผ่านออกทางแนวศูนย์กลางของแท่ง เซรามิกได้ สารแขวนลอยที่ไม่สามารถผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นเซรามิก ซึ่งมีความเข้มข้นสูงจะถูกดูดออกด้วยปั๊มตัวที่สองทางด้านบน ซึ่งอัตราส่วนของความเข้มข้นของสารละลายขาออกสามารถกำหนดได้ด้วยอัตราการป้อนและการดูดออกของปั๊ม

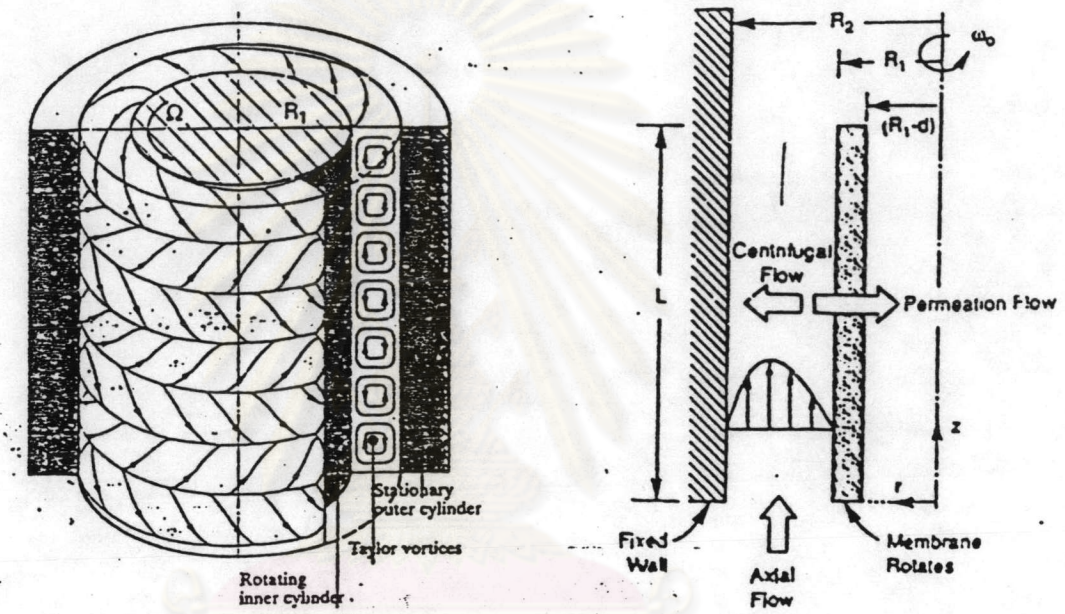


รูปที่ 3.2 แสดงภาพตัดขวางของเครื่องกรองที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้

3.2.2 กลไกการทำงานของเครื่องกรองที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้

จากลักษณะของเครื่องกรองที่ได้อธิบายมาก่อนแล้วนั้น เมื่อแท่งเซรามิกหมุน จะทำให้เกิดการหมุนวนของสารละลายที่เรียกว่า การหมุนวนของเทย์เลอร์ (TAYLOR

VORTICE) ก่อให้เกิดแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของเยื่อแผ่นเซรามิก กวาดอนุภาคที่เกาะอยู่บริเวณผิวหน้าให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันของเยื่อแผ่นได้ดี ซึ่งลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกและแท่งเซรามิก แสดงให้เห็นได้ในรูปที่ 3.3



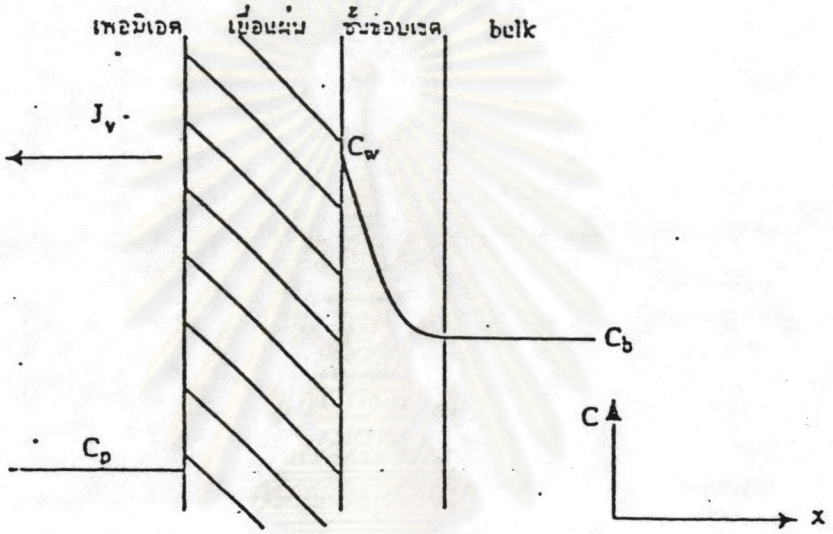
รูปที่ 3.3 ก. แสดงภาพตัดขวางลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์
ข. แสดงทิศทางการไหลของสารละลาย

3.3 ปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะ ของเครื่องกรองที่ใช้เยื่อแผ่น ชนิดหมุนได้

3.3.1 คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน(CONCENTRATION POLARIZATION)

ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เกิดขึ้นขณะที่มีการไหลผ่านเยื่อแผ่น สารละลายที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะถูกบังคับให้ซึมผ่านเยื่อแผ่นออกไปอีกด้านโมเลกุลของตัวถูกละลายที่มีขนาดใหญ่ที่ไม่สามารถผ่านเข้าไปในรูพรุนของเยื่อแผ่นก็จะถูกกักและสะสมอยู่ที่บริเวณพื้นผิวเยื่อแผ่นทำให้ความเข้มข้นของตัวถูกละลายนั้นที่บริเวณใกล้เยื่อแผ่น(Cw)สูงกว่า

บริเวณที่อยู่ห่างออกไปหรือใน บัลค์(Cb) ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ตัวถูกละลายที่อยู่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่นจึงเกิดการแพร่กลับไปยังบัลค์ เนื่องจากผลต่างของความเข้มข้น

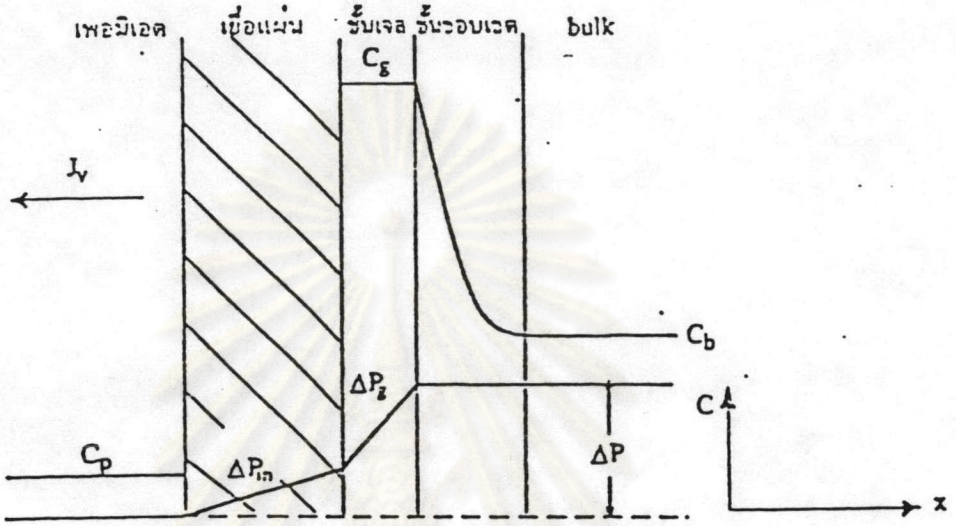


รูปที่ 3.4 แสดงภาพการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

3.3.2 เจลโพลาไรเซชัน (GEL POLARIZATION)

ปรากฏการณ์เจลโพลาไรเซชันจะเกิดขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงถึงขีดจำกัดการละลาย (Cg) ของสารนั้น ตัวถูกละลายอาจเกิดลักษณะคล้ายเจล ที่บริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่น ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ชั้นเจลจะเกิดขึ้นครอบคลุมผิวเยื่อแผ่นที่มีลักษณะคล้ายเยื่อแผ่นอีกแผ่นหนึ่งต่ออนุกรมอยู่กับเยื่อแผ่นเดิม ทำให้ความต้านทานการไหลของตัวทำละลายสูงขึ้น ค่าเพอมิเอชันฟลักส์ จึงมีค่าลดลง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 แผนภาพแสดงการเกิดเจลโพลาไรเซชัน

3.3.3 ความเร็วรอบการหมุนของแท่งเยื่อแผ่นเซรามิก

จากกลไกการทำงานของเครื่องกรองที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้ที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่า เมื่อแท่งเซรามิกหมุน จะทำให้เกิดการหมุนวนของสารละลาย ที่เรียกว่าการหมุนวนแบบเทย์เลอร์ ซึ่งการหมุนวนแบบนี้ จะเป็นการเพิ่มแรงเฉือนตลอดผิวหน้าของเยื่อแผ่น การหมุนวนแบบเทย์เลอร์นี้จะมีความรุนแรงมากขึ้นตามความเร็วรอบการหมุนของแท่งเซรามิกซึ่งจะเป็นการลดการอุดตันของอนุภาคบนผิวเยื่อแผ่นได้ ทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักส์ของสารละลายที่ได้มีค่าเพิ่มสูงขึ้น แต่ก็มีข้อยกเว้น คือ ถ้าปฏิบัติการที่ความเร็วรอบการหมุนของเยื่อแผ่นสูงๆ โดยไม่ได้ดูถึงความเหมาะสมของความดันที่ให้แก่ระบบแล้ว ที่ความเร็วรอบสูงๆ จะทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางมากขึ้น ถ้าแรงนี้มีค่ามากหรือใกล้เคียงกับแรงดัน ที่ให้กับระบบแล้ว ก็จะทำให้สารละลายแขวนลอยเกิดการย้อนกลับ ซึ่งอาจจะเป็นสาเหตุทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักส์ค่าลดลงได้

3.3.4 ความดัน

ความดันมีอิทธิพลโดยตรงต่อค่าเพอมิเอชันฟลักส์อย่างมากโดยที่ค่าความดันเพิ่มขึ้นก็ทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักส์เพิ่มขึ้นเช่นกัน แต่อย่างไรก็ตามความดันสูงก็สามารถสร้างผลเสียได้เช่นกัน ทั้งนี้เพราะว่าความดันทำให้โครงสร้างของเยื่อแผ่นและชั้นอนุภาคที่สะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่นเกิดการอัดตัวแน่น (COMPACTION) ทำให้เพอมิเอชันฟลักส์ลดลงเรื่อยๆ ระหว่างการใช้งาน

3.3.5 ความเข้มข้นของสารละลาย

การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย ทำให้มีอนุภาคของตัวถูกละลายผ่านเยื่อแผ่นมากขึ้นซึ่งก่อให้เกิดปัญหาการอุดตันของอนุภาคที่ผิวเยื่อแผ่นมากขึ้น เป็นสาเหตุทำให้ค่าเพอมิเอชันฟลักส์มีค่าลดลง

3.3.6 ระยะระหว่างผนังท่อด้านในกับผนังเยื่อแผ่น (GAB)

ระยะระหว่างผนังท่อด้านในกับผนังเยื่อแผ่นนั้น สามารถอธิบายได้ในรูปของการเกิดการหมุนวนแบบเทย์เลอร์และแรงเฉือน โดยถ้าระยะดังกล่าวมีค่าน้อย การหมุนแบบเทย์เลอร์จะมีขนาดที่เล็กและมีความเร็วสูงซึ่งทำให้แรงเฉือนตลอดผิวหน้าเยื่อแผ่นมีค่าสูงไปด้วย ทำให้ลดการอุดตันของอนุภาคที่ผิวเยื่อแผ่นได้ดี แต่ถ้าช่องว่างมีขนาดใหญ่ขึ้น ลักษณะการหมุนวนแบบเทย์เลอร์จะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นและความเร็วก็จะลดลง แรงเฉือนตลอดผิวหน้าเยื่อแผ่นก็จะลดลงไปด้วย ทำให้ลดการอุดตันของอนุภาคที่ผิวเยื่อแผ่นได้ไม่ดีเท่าที่ควร ค่าเพอมิเอชันฟลักส์ก็จะลดลงไปด้วย

3.3.7 ความหนืด

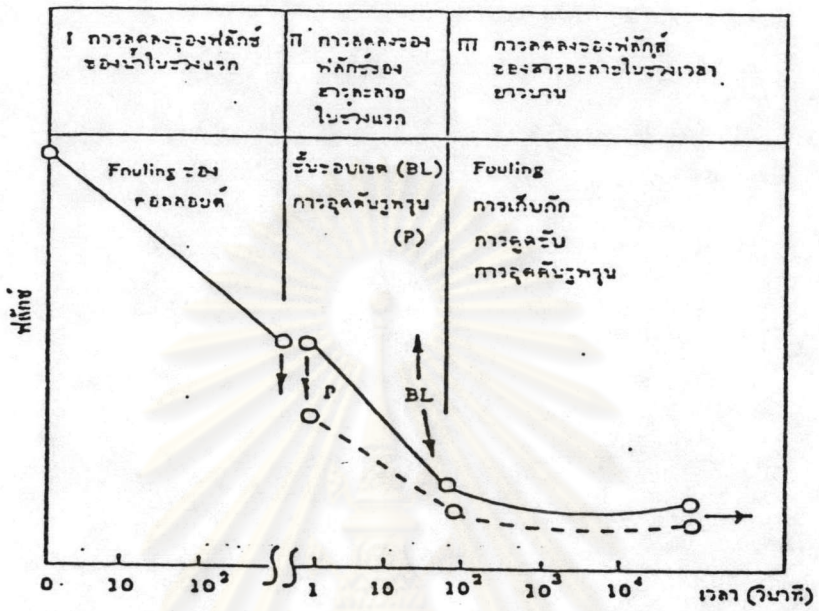
ถ้าความหนืดมีค่าสูง ก็จะทำให้เกิดลักษณะเจลโพลาไรเซชัน ซึ่งทำให้ความต้านทานที่ผิวเยื่อแผ่นมีค่าสูงขึ้น ค่าเพอมิเอชันฟลักส์ก็จะลดลง

3.4 ปรากฏการณ์การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์ (PERMIATION FLUX DECLINE)

การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์ มีหลายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นทั้งภายในรูพรุนบนผิวและบริเวณใกล้ผิวเยื่อแผ่นซึ่งอาจจะแยกการลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์เทียบกับเวลาได้เป็น 3 ขั้น คือ

1) การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์ของน้ำ
2) การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์ของสารละลายในช่วงแรกของการดำเนินการ
3) การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์ของสารละลายในช่วงเวลายาวนาน

ดังแสดงในรูปที่ 3.6 มีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.6 การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์เทียบกับเวลา

3.4.1 การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์ของน้ำ (WATER FLUX DECLINE)

เป็นที่ทราบกันดีว่าคอลลอยด์และแบคทีเรียจำนวนเล็กน้อยในน้ำกลั่นสามารถทำให้เพอมิเอชันฟลักส์ของเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงหรือทำให้ฟลักส์ของน้ำลดลงได้ ซึ่งเนื่องมาจากการที่คอลลอยด์และแบคทีเรียเหล่านั้นไปอุดตันรูพรุนของเยื่อแผ่น

3.4.2 การลดลงของเพอมิเอชันฟลักส์ในช่วงแรก (INITIAL FLUX DECLINE)

ในช่วงแรกของการดำเนินการเพอมิเอชันฟลักส์ของสารละลายจะลดลงอย่างรวดเร็ว และเพอมิเอชันฟลักส์จะมีค่าเปลี่ยนแปลงไม่มาก เมื่อใช้เวลาไม่นานนัก

การที่เพอมิเอชันฟลักส์ลดลงในช่วงนี้เป็นผลมาจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและเจลโพลาไรเซชันซึ่ง Howel และ Velican Gil ประมาณทางทฤษฎีว่า คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน จะเกิดอย่างสมบูรณ์ในเวลาที่ไม่นานนัก การเกิดคอนเซนเตรชัน และเจลโพราไรเซชัน อาจทำให้เพอมิเอชันฟลักส์ลดลงด้วยสาเหตุ 2 ประการ คือ

1) การลดลงของแรงขับดัน (ΔP)

2) การเพิ่มความต้านทานการไหลของตัวทำละลาย เนื่องมาจากการขวางกั้นของชั้นคอนเซนเตรชันและเจลโพลาไรเซชัน

3.4.3 การลดลงของเพอมิเอชั่นฟลักซ์ในช่วงเวลาที่ยาวนาน (LONG-TERM FLUX DECLINE)

หลังจากที่เพอมิเอชันฟลักส์ลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรกของการดำเนินการจนถึงสมดุลของการเกิด คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน แล้วเพอมิเอชันฟลักส์ก็ยังคงลดลงอย่างช้าๆ ตลอดเวลาของการดำเนินการเป็นชั่วโมง วัน ซึ่งเนื่องมาจากการเกิดฟาวลิ่ง (FOULING) ของเยื่อแผ่น ทำให้ความต้านทานการไหลของสารละลายเพิ่มขึ้น ความต้านทานเนื่องจากชั้นฟาวลิ่ง (Rf) จะเพิ่มขึ้นกับเวลาเพราะความหนาของชั้นฟาวลิ่งเพิ่มขึ้น

3.5 การคำนวน

3.5.1 เพอมิเอชันฟลักส์

ในกระบวนการกรองโดยใช้เครื่องกรองที่ใช้เยื่อแผ่นชนิดหมุนได้ เพอมิเอชันฟลักส์ จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบ โดยแสดงถึงปริมาตรของเพอมิเอทที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นต่อหน่วยพื้นที่ของเยื่อแผ่นและเวลา

กรณีที่ไม่มีตัวถูกละลาย ฟลักซ์ของน้ำที่ผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นสามารถแสดงในรูปของความต้านทานด้วยสมการ POISEUILLE สำหรับการไหลแบบราบเรียบผ่านท่อดังนี้

$$J_w = \frac{\Delta P}{\mu_w R_m} \qquad 3.1$$

เมื่อ J_w = ฟลักส์ของน้ำ

ΔP = ผลต่างความดันที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารละลายป้อนกับเพอมิเอท

μ_w = ความหนืดของน้ำ

R_w = ความต้านทานของเยื่อแผ่น ซึ่งขึ้นกับชนิดของเยื่อแผ่น ความหนาแน่นของรูพรุน (POROSITY) ขนาดรูพรุน และความหนาของเยื่อแผ่น

ในกรณีที่มีตัวถูกละลายหรืออนุภาคแขวนลอยความเข้มข้นของตัวถูกละลายหรืออนุภาคแขวนลอยที่ผิวเยื่อแผ่นด้านสารป้อน จะสูงกว่าด้านเพอมิเอท ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันระหว่างผิวเยื่อแผ่นทั้งสองด้าน ซึ่งจะไปลดแรงขับดันที่ทำให้น้ำผ่านรูพรุนของเยื่อแผ่นลดลงดังนั้นค่าฟลักซ์ในสมการที่ 3.1 จะเป็น

$$J_v = \frac{(\Delta P - \sigma\Delta\pi)}{\mu_p R_t} \qquad 3.2$$

โดยที่ J_v = เพอมิเอชั่นฟลักส์

α = REFLECTION COEFFICIENT

μ_p = ความหนืดของเพอมิเอท

$\Delta\pi$ = ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลายที่ผิวเยื่อแผ่นกับเพอมิเอท

R_t = ความต้านทานรวม

แต่สำหรับสารละลายที่มีอนุภาคโมเลกุลขนาดใหญ่จะมีค่าความดันออสโมติกต่ำมากเมื่อเทียบกับความดันกับที่ให้กับระบบ สมการที่ 3.2 จะลดรูปเป็น

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu_p R_t} \qquad 3.3$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.5.2 ความต้านทานรวมในการไหลผ่านเยื่อแผ่น

ความต้านทานรวมในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นผลมาจาก 3 ปัจจัยใหญ่ๆ คือ

1. ความต้านทานของเยื่อแผ่นเอง (R_m)

2. ความต้านทานเนื่องจากการเกิด โพลาไรเซชัน (R_p) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานเนื่องจากการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (R_{cp}) และ เจลโพลาไรเซชัน (R_g)

3. ความต้านทานเนื่องจากการเกิดฟาวลิ่ง ซึ่งได้แก่ ความต้านทานเนื่องจากการดูดซับ(Ra) และความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย (Rpp)

ดังนั้น สมการของความต้านทานรวมคือ

$$Rt = Rm + (Rcp + Rg) + (Ra + Rpp)$$

$$Rt = Rm + Rp + Rf \qquad 3.4$$

โพลาไรเซชันเป็นกระบวนการที่ผันกลับหรือสามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่น ส่วนฟาวลิ่ง เป็นกระบวนการที่ไม่ผันกลับหรือไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่นไม่ว่าจะใช้สภาวะใดๆ ซึ่งเมื่อใช้น้ำทำความสะอาดเยื่อแผ่นที่ผ่านกระบวนการกรองแล้วจะสามารถกำจัดเฉพาะชั้นโพลาไรเซชันออกไปเท่านั้น แต่ไม่อาจทำลายชั้นฟาวลิ่ง ได้ ดังนั้น ความต้านทานการไหลของน้ำสำหรับเยื่อแผ่นที่ใช้แล้วหลังจากล้างด้วยน้ำกลั่น คือ ความต้านทาน Rm และ Rf

$$J'_w = \frac{\Delta P}{\mu_w (R_m + R_f)}$$

หรือ

$$(R_m + R_f) = \frac{\Delta P}{\mu_w J'_w} \qquad 3.5$$

เมื่อ J_w คือฟลักส์ของน้ำหลังการล้างเยื่อแผ่นที่ใช้แล้วด้วยน้ำกลั่น
ความต้านทาน R_f สามารถคำนวน ได้จากสมการที่ 3.1 และ 3.5

$$R_f = (R_m + R_f) - R_m$$

$$R_f = \frac{\Delta P}{\mu_w J'_w} - \frac{\Delta P}{\mu_w J_w} \qquad 3.6$$

ส่วนความต้านทาน Rp สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3, 3.4 และ 3.5 คือ

$$R_p = R_t - (R_m + R_f)$$

$$R_p = \frac{\Delta P}{\mu_p J_v} - \frac{\Delta P}{\mu_w J'_w} \qquad 3.7$$

3.5.5 รีเจคชัน (R)

รีเจคชันเป็นค่าที่แสดงถึงคุณสมบัติการกักสารของเยื่อแผ่นซึ่งหมายถึงเปอร์เซนต์ของตัวถูกละลายที่ถูกเยื่อแผ่นกักไว้หรือไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นไปได้สัมพันธ์กับสัมประสิทธิรีเจคชัน (σ) คือ $R = 100\sigma$

การระบุถึงค่ารีเจคชันของเยื่อแผ่นโดยทั่วไปมักเป็นค่ารีเจคชันปรากฏ (OBSERVED REJECTION, Robs) สามารถคำนวนได้จากสมการ

$$R_{obs} = \left(1 - C_p/C_b\right) \times 100 \qquad 3.8$$

$$\sigma_{obs} = 1 - C_p/C_b \qquad 3.9$$

เมื่อ C_p และ C_b คือ ความเข้มข้นของสารละลายในเพอมิเอทและ บัลค์ตามลำดับ ซึ่งสามารถวัดได้โดยตรงจากการทดลอง

3.5.3 สมการฟลักส์เมื่อเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน

สมการสมดุลมวลของตัวถูกละลายที่ภาวะสมดุลย์ของการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน เขียนได้ดังนี้

[อัตราการพาสู่เยื่อแผ่นของตัวถูกละลาย] − [อัตราการแพร่กลับของตัวถูกละลาย] = [อัตราการผ่านเยื่อแผ่นของตัวถูกละลาย]

$$J_v C - \frac{D dC}{dx} = J_v C_p \qquad 3.10$$

สภาวะขอบเขตคือที่ $X = 0$, $C = C_b$ และที่ $X = \delta$, $C = C_w$ จะได้

$$J_v = \frac{D}{\delta} \ln \frac{C_w - C_p}{C_b - C_p}$$

หรือ

$$J_v = k \ln \frac{C_w - C_p}{C_b - C_p} \qquad 3.11$$

เมื่อ C, C_b, C_w, C_p = ความเข้มข้นของสารละลาย ในบัลค์ ที่ผิวเยื่อแผ่น เพอมิเอท ตามลำดับ

X = ระยะห่างจากชั้นขอบเขต

K = D/δ = สัมประสิทธิการถ่ายเทมวลของตัวถูกละลาย

D = สัมประสิทธิการแพร่

δ = ความหนาของชั้นขอบเขต

3.5.4 สมการฟลักส์เมื่อเกิดเจลโพลาไรเซชัน

คล้ายกับสมการฟลักส์ของคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน คือสมการ 3.11 เพียงแต่แทนค่า C_w เป็น C_g จะได้

$$J_v = k \ln \frac{C_g - C_p}{C_b - C_p} \qquad 3.12$$

กรณีที่ รีเจคชันมีค่าสูง C_p จะมีค่าน้อยมาก สมการ ที่ 3.12 จะลดรูปเป็น

$$J_v = k \ln C_g / C_b \qquad 3.13$$

หรือ

$$J_v = k \ln C_g - k \ln C_b \qquad 3.14$$

จากสมการที่ 3.14 สามารถหาค่า Cg ได้ โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างJv กับ ln C_b จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน = -k และจุดตัดบนแกนที่ Jv = 0 คือ kln Cg

3.5.6 เทย์เลอร์นัมเบอร์ (TAYLOR NUMBER)

การหมุนวนของเทย์เลอร์สามารถอธิบายได้ โดยสมการเทย์เลอร์นัมเบอร์ (1,2,3,8) ดังสมการที่ 3.15

$$T_a = \frac{\omega R_1 \Delta}{\upsilon}\left(\frac{2\Delta}{R_1 + R_2}\right)^{0.5} \qquad 3.15$$

โดยที่ ω = มุมของความเร็ว = $2\pi n$

R_1 = รัศมีภายนอกของแท่งเซรามิก

R_2 = รัศมีภายในของท่อทรงกระบอกที่อยู่กับที่

Δ = ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในกับแท่งเซรามิก = R_2-R_1

υ = ความหนืดคิเนมาติก = μ/ρ

μ = ค่าความหนืด

ρ = ค่าความหนาแน่น

n = จำนวนรอบของการหมุนของเยื่อแผ่น

ลักษณะการหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก จะมีความสัมพันธ์กับค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ โดยสามารถแบ่งลักษณะการไหลได้เป็น 5 ลักษณะคือ

- การไหลแบบราบเรียบ (LAMINAR FLOW) Ta < Ta critical
- การหมุนวนแบบราบเรียบ (LAMINAR VORTEX FLOW) Ta; critical <Ta<800
- ช่วงเปลี่ยนแปลงการไหล (TRANSITION FLOW) 800<Ta<2000
- การหมุนวนแบบปั่นป่วน (TURBULENT VORTEX FLOW) 2000<Ta<10000-15000
- การไหลแบบปั่นป่วน (TURBULENT FLOW) Ta >15000

โดยที่ $Ta, critical = 41.3+13.1 \Delta / R_1$ 3.16

3.5.7 แรงเฉือน (EFFECTIVE SHEAR RATE)

จากลักษณะการหมุนวนของเยื่อแผ่น ทำให้เกิดการหมุนวนของเทย์เลอร์ภายในช่องว่างระหว่างผนังท่อด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอกจะทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวของเยื่อแผ่นแสดงได้ดังสมการ

$$\tau = 0.23\sqrt{T_a}\frac{\omega R_1}{\Delta} \qquad 3.17$$

เมื่อ τ = แรงเฉือน (EFFECTIVE SHEAR RATE)

Ta = ค่าเทย์เลอร์นัมเบอร์ (TAYLOR NUMBER)

ω = ความเร็วเชิงมุม = $2\pi n$

R1 = รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น

Δ = ความกว้างของช่องว่างระหว่างผนังท่อทรงกระบอกด้านในกับผนังเยื่อแผ่นด้านนอก = R_2-R_1

n = จำนวนรอบการหมุนของเยื่อแผ่น

3.5.8 เรย์โนลด์ นัมเบอร์ (REYNOLD NUMBER)

มีสมการเรย์โนลด์นัมเบอร์ ที่เกี่ยวข้องกบการไหลของสารละลายอยู่ 2 ค่า คือ

- ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ความแนวแกน (AXIAL REYNOLD NUMBER) แสดงดังสมการที่ 3.18

$$Re_a = \frac{Vd_h}{\upsilon} \qquad 3.18$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

- ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์เนื่องจากการหมุนของเยื่อแผ่น (TANGENTIAL REYNOLD NUMBER) ดังแสดงในสมการที่ 3.19

$$Re_T = \frac{\omega R_1 d_h}{\upsilon} \qquad 3.19$$

โดยที่ ν = ความเร็วของสารละลายตามแนวแกน

ω = ความเร็วเชิงมุม $= 2\pi n$

d_h = เส้นผ่าศูนย์กลางไฮดรอริก $= 2d$

υ = ความหนืดคิเนมาติก $= \mu/\rho$

R_1 = รัศมีภายนอกของเยื่อแผ่น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย