

## บทที่ 2

### ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การทดลองในครั้งนี้ เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อฟลักซ์ของระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยการแปรผันค่าความดัน ค่าพีเอช และค่าอัตราแรงเฉือน การเตรียมการทดลองทำได้โดยนำน้ำเสียที่ผ่านกระบวนการบำบัดแบบสระเติมอากาศ และบ่อประดิษฐ์ (Aerated Lagoon and Constructed Wetland) จากบ่อเก็บกักน้ำสุดท้าย (Final Pond) ภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี มาทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำเบื้องต้น เพื่อให้ทราบคุณภาพของน้ำตัวอย่างที่จะใช้ในการดำเนินการทดลอง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างมากรองผ่านเครื่องกรองแบบไมโครฟิลเตรชันด้วยเยื่อกรองขนาด 10 ไมครอน เพื่อกำจัดของแข็งละลายน้ำและอนุภาคสารแขวนลอยขนาดใหญ่ และนำมาทดสอบกับกระบวนการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (UF) โดยมีวิธีการดำเนินระบบแบบการไหลตามแนวตั้ง (Dead-End Operation) แล้วนำน้ำที่ได้มาวิเคราะห์หาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลกระทบต่อผลการลดลงของฟลักซ์ของระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันแบบหมุน

ดังนั้นทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการทดลองในครั้งนี้จะกล่าวถึง ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับบ่อประดิษฐ์ เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน ลักษณะการกรอง กลไกการอุดตันของเมมเบรน ลักษณะการอุดตันบนผิวของเมมเบรน ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนเมมเบรน ความต้านทานแบบอนุกรมของการอุดตัน แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการฟาวลิง ข้อดีของกระบวนการกรองแบบเมมเบรน และข้อจำกัดของกระบวนการกรองแบบเมมเบรน ซึ่งรายละเอียดทั้งหมดจะได้อธิบายดังต่อไปนี้

#### 2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียภายในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี (พัทธาวดี สุภะนามัย รัตนวูธ แสงศรี และศักดิ์นัคร จันทร์ภักดี, 2545)

##### 2.1.1 ส่วนประกอบของระบบบำบัดน้ำเสีย

ระบบบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีใช้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบสระเติมอากาศและบ่อประดิษฐ์ (Aerated Lagoon and Constructed Wetland) โดยค่า BOD 90% จะถูกบำบัดโดยสระเติมอากาศ และบ่อดกตะกอน บ่อประดิษฐ์จะทำหน้าที่ปรับสภาพน้ำและเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดอีก ตามรายละเอียดดังนี้

2.1.1.1 ระบบบำบัดน้ำเสียเบื้องต้น (Preliminary Treatment) น้ำเสียจากส่วนต่างๆ ของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี จะต้องผ่านระบบบำบัดเบื้องต้นก่อนผ่านเข้าระบบบำบัดหลัก ระบบบำบัดเบื้องต้นจะใช้ขบวนการบำบัดทางฟิสิกส์เป็นหลัก และเพื่อให้ระบบบำบัดน้ำเสียมีการทำงานได้อย่างเต็มที่ ระบบบำบัดเบื้องต้นประกอบด้วย

(1) ตะแกรงดักเศษขยะ ตะแกรงดักเศษขยะเบื้องต้นเลือกใช้ตะแกรงแบบทำความสะอาดด้วยเครื่องกล (Mechanical Bar Screen) เนื่องจากสามารถเอาเศษขยะที่ติดอยู่กับตะแกรงออกได้ทันทีด้วยเครื่องกวาดโดยไม่เกิดปัญหาน้ำล้นและมีราคาที่ไม่แพงมากรวมทั้งดูแลรักษาง่าย

(2) สถานีสูบน้ำเสีย ทำหน้าที่สูบน้ำที่ระดับน้ำเสียจากท่อรวบรวมเข้าสู่สระเติมอากาศ (Pump) มีเวลากักเก็บประมาณ 15-30 นาที สำหรับอัตราการไหลสูงสุดของน้ำเสีย ทั้งนี้จะอาศัยความจุภายในท่อรวบรวมน้ำเสียช่วยรับน้ำเสียด้วย

(3) เครื่องวัดอัตราการไหล (Flow Measurement) น้ำเสียจากสถานีสูบน้ำเสียจะผ่านมายังเครื่องวัดอัตราการไหลแบบ Doppler Ultrasonic Flow Meter เพื่อตรวจวัดอัตราการไหลของน้ำเสียตลอดเวลาบำบัด ในทางปฏิบัติอัตราการไหลนี้มีความสำคัญมากเพราะจะเป็นเครื่องมือวัดประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย รวมทั้งกำหนดการเดินระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อรองรับปริมาณน้ำเสียที่เปลี่ยนแปลงไป

2.1.1.2 ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Wastewater Treatment) จะประกอบด้วยหน่วยบำบัดต่างๆ ดังนี้

(1) สระเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ทำหน้าที่เป็นหน่วยบำบัดหลัก สำหรับการบำบัดน้ำเสียของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีเนื่องจากสามารถบำบัด BOD ได้ถึง 90 % โดยการใช้เครื่องเติมอากาศแบบทุ่นลอยทำหน้าที่เติมอากาศและทวนน้ำในสระเติมอากาศเพื่อให้น้ำเสียผสมเป็นเนื้อเดียวกับจุลินทรีย์ โดยปกติเวลากักพักชลศาสตร์มีค่า 3-10 วัน เป็นการเติมอากาศแบบยาวนานทำให้ปริมาณของแข็งแขวนลอยในสระเติมอากาศมีค่าค่อนข้างต่ำแต่มีประสิทธิภาพในการบำบัด BOD สูง

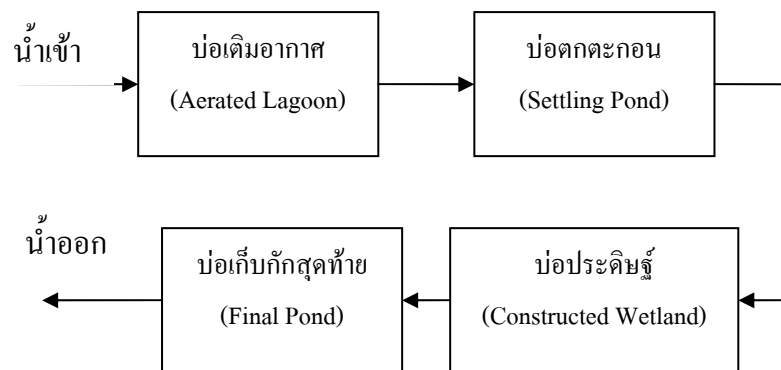
(2) บ่อดกตะกอน (Settling Pond) ทำหน้าที่เป็นบ่อกักพักเพื่อให้ตะกอนแขวนลอยที่มากับน้ำจากสระเติมอากาศตกตะกอนที่ก้นบ่อและแยกน้ำใสไปสู่หน่วยบำบัดอื่น โดยปกติมีเวลากักพักชลศาสตร์นาน 0.5-2 วัน เนื่องจากตะกอนแขวนลอยของระบบสระเติมอากาศมีลักษณะกระจายตัวและมีน้ำหนักเบาจึงต้องใช้เวลาในการทำให้ตะกอนแยกจากน้ำใส ตะกอนที่สะสมอยู่ก้นบ่อดกตะกอนสามารถที่จะย่อยสลายตัวเองได้ประมาณ 70 % ของน้ำหนักตะกอนภายในระยะเวลา 1 ปี แต่ตะกอนที่สะสมอยู่จะทำให้ปริมาตรของบ่อดกตะกอนลดลง ดังนั้นจึงควรลอกตะกอนออกทุกๆ 2 ปี หรือเมื่อมีกลิ่นเหม็นเกิดขึ้นในบ่อดกตะกอน

(3) บ่อประดิษฐ์ (Constructed Wetland) เป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีธรรมชาติ ซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเพื่อจำลองบึงธรรมชาติมีความลึกน้อยกว่า 0.6 เมตร โดยการปล่อยให้ น้ำเสียไหลลง บ่อประดิษฐ์ต่างๆ ผ่านต้นพืชและรากพืชต่างๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในการบำบัดน้ำเสียในระบบนี้ การเติมอากาศในบ่อประดิษฐ์จะมาจากพืช จากลมพัด และจากการสังเคราะห์แสง บ่อประดิษฐ์ควรมีค่าออกซิเจนละลายในน้ำอย่างน้อย 1 มก./ล. เพื่อให้ปลามีชีวิตอยู่ได้ โดยมีเวลากักพักชลศาสตร์ 4-15 วัน รับภาระ BOD ได้ไม่เกิน 6 กรัม BOD/ตรม.วัน และมีค่าภาระชลศาสตร์ 10-40 ล./ตรม.วัน ซึ่งบ่อประดิษฐ์ในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 5,798 ตรม. ดังนั้นจะรับภาระ BOD ได้ 34.80 กก.BOD/วัน จะเห็นได้ว่าบ่อประดิษฐ์ในมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีไม่ได้ออกแบบเพื่อเป็นระบบบำบัดน้ำเสียหลัก แต่ออกแบบเพื่อปรับสภาพของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบสระเติมอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสีย

(4) บ่อเก็บกักสุดท้าย (Final Pond) ทำหน้าที่เก็บกักน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบ สระเติมอากาศและบึงประดิษฐ์แล้วเพื่อระบายออกสู่แหล่งที่สาธารณะหรือสูบน้ำในบ่อเก็บกัก สุดท้ายเพื่อไปใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตรต่อไป น้ำในบ่อเก็บกักสุดท้ายมีค่า BOD ที่ได้มาตรฐานแต่เนื่องจากมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีไม่มีระบบฆ่าเชื้อโรค ดังนั้นก่อนการนำน้ำไปใช้ควรผ่านการฆ่าเชื้อโรคโดยการเติมคลอรีนก่อน

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดของระบบบำบัดน้ำเสีย (พัทธาวดี สุภะนามัย รัตนวูธ แสงศรี และศักดิ์-นกร จันทร์ภักดี, 2545)

| ลำดับ | หน่วยบำบัด        | จำนวนบ่อ | ขนาด (เมตร) |     |      |            | พื้นที่ผิว<br>ตร.ม. | ปริมาตร<br>ลบ.ม. |
|-------|-------------------|----------|-------------|-----|------|------------|---------------------|------------------|
|       |                   |          | กว้าง       | ยาว | ลึก  | free board |                     |                  |
| 1     | สระเติมอากาศ      | 2        | 45          | 65  | 3.71 | 0.99       | 2,505               | 6,756            |
| 2     | บ่อดกตะกอน        | 2        | 30          | 45  | 3.40 | 1.30       | 987                 | 2,072            |
| 3     | บ่อประดิษฐ์       | 1        | 55          | 115 | 0.60 | 0.79       | 5,798               | 3,362            |
| 4     | บ่อเก็บกักสุดท้าย | 1        | 135         | 60  | 1.80 | 1.20       | 3,482               | 5,558            |



รูปที่ 2.1 แผนผังการไหลของน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัด

(พัทธาวดี สุภะนามัย รัตนวรุณ แสงศรี และศักดิ์นกร จันทร์ภักดี, 2545)

## 2.2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับบ่อประดิษฐ์

บ่อประดิษฐ์ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียโดยวิธีธรรมชาติซึ่งประดิษฐ์ขึ้นเพื่อจำลองบึงธรรมชาติ โดยการปล่อยให้ น้ำเสียไหลลงบ่อประดิษฐ์ช้าๆ ผ่านต้นพืชและรากพืชต่างๆ ซึ่งเป็นขั้นตอนหลักในการบำบัดน้ำเสียของระบบนี้ การเติมอากาศในบ่อประดิษฐ์จะมาจากพืช จากลมพัด และจากการสังเคราะห์แสง

### 2.2.1 ระบบบำบัดน้ำเสียแบบบ่อประดิษฐ์ (Constructed Wetland)

#### 2.1.1.1 ข้อดีของบ่อประดิษฐ์

- (1) มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียอยู่ในเกณฑ์ดีมาก
- (2) โดยทั่วไประบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างต่ำ
- (3) โดยทั่วไประบบนี้จะมีค่าใช้จ่ายในการดำเนินการไม่สูงมาก
- (4) สามารถรองรับการเปลี่ยนแปลงของปริมาณและความสกปรกของน้ำเสียได้ดี

เนื่องจากระบบมีปริมาตรมาก

- (5) มีอุปกรณ์และเครื่องมือต่างๆ น้อยทำให้ค่าการบำรุงรักษาต่ำ

#### 2.1.1.2 ข้อเสียของบ่อประดิษฐ์

- (1) เป็นระบบที่ใช้พื้นที่มากพอสมควร
- (2) อาจเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ยุงและแมลงต่างๆ โดยเฉพาะในบ่อประดิษฐ์

## 2.3 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับลักษณะและคุณสมบัติของน้ำเสีย

น้ำเสีย คือ น้ำที่ผ่านการใช้ในกิจกรรมต่างๆ มาแล้ว เกิดมีสิ่งเจือปน (Impurity) อยู่ในน้ำทำให้น้ำสูญเสียคุณภาพเดิมไป โดยสิ่งเจือปนดังกล่าวอาจจะสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าหรืออาจจะไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ซึ่งอาจอยู่ในรูปของสารละลาย สิ่งเจือปนดังกล่าวนี้อาจเป็นสิ่งปฏิกูลที่อยู่ในรูปของของเหลวซึ่งจะต้องได้รับการบำบัดและกำจัดให้ถูกต้องต่อไป

ลักษณะและคุณสมบัติของน้ำเสีย (Wastewater Characteristics) น้ำเสียสามารถแบ่งตามคุณสมบัติของสิ่งที่เจือปนได้ 3 ลักษณะใหญ่ๆ ดังนี้

### 2.3.1 ลักษณะของน้ำเสียทางกายภาพ (Physical Characteristics)

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของน้ำเสีย ได้แก่ ของแข็งในน้ำ ซึ่งประกอบด้วยของแข็งลอยน้ำ ของแข็งที่ตกตะกอนได้ สารแขวนลอย และสารคอลลอยด์ ลักษณะทางกายภาพอื่นๆ ได้แก่ กลิ่น อุณหภูมิ ความหนาแน่น สี และความขุ่น

### 2.3.2 ลักษณะของน้ำเสียทางเคมี (Chemical Characteristics)

ลักษณะของน้ำเสียทางเคมีที่สำคัญของน้ำเสีย ได้แก่ สารอินทรีย์ (Organic Substance) สารอนินทรีย์ (Inorganic Substance) โปรตีน (Protein) คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) ไขมัน (Fat) ผงซักฟอก (Surfactant) และก๊าซ

### 2.3.3 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological Characteristics)

โดยทั่วไป จุลินทรีย์ที่เป็นเชื้อโรค (Pathogenic Organisms) ที่พบในน้ำเสียถูกขจัดถ่ายออกมาจากคนที่เป็นโรค หรือจากคนที่เป็นพาหะของโรค กลุ่มจุลินทรีย์หลักที่ก่อให้เกิดโรคมียี่ 4 กลุ่ม คือ แบคทีเรีย ไวรัส โปรโตซัว และฮิวมินท์

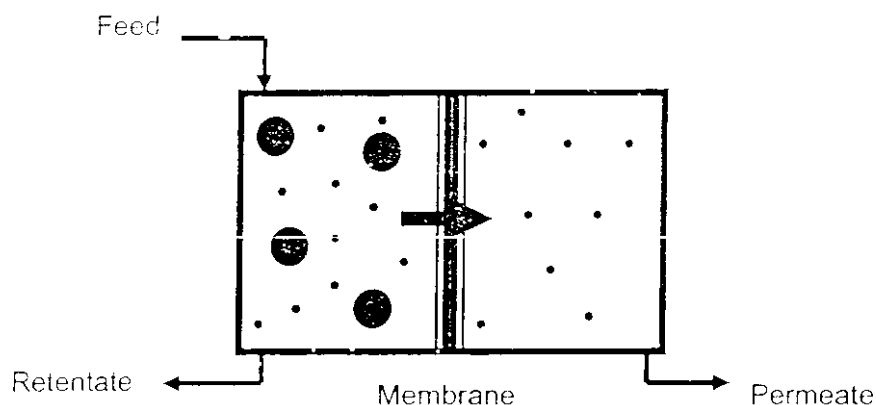
## 2.4 เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน (จันทอง สุนทรภา, 2545)

กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนมีจุดเด่นสำคัญในแง่ใช้พลังงานต่ำ เนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้น (ยกเว้นกระบวนการเพอร์เวปอเรชัน ซึ่งใช้วิธีการลดความดันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟส) จึงไม่ต้องการความร้อนเพื่อการเปลี่ยนแปลงเฟส นอกจากนั้นยังสามารถใช้ในการแยกผลิตภัณฑ์ที่สูญเสียสมบัติหรือสภาพได้เมื่อได้รับความร้อนเนื่องจากกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนส่วนใหญ่ดำเนินการที่สภาวะปกติ (อุณหภูมิห้องที่ความดัน 1 บรรยากาศ) เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนสามารถทำให้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นขึ้น (Concentrate) แยกลำดับส่วน (Fractionate) และทำให้บริสุทธิ์ (Purify) ได้พร้อมกัน

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ เป็นกระบวนการแยกอนุภาคในเฟสของเหลวด้วยความดัน แต่

มีความสามารถแยกขนาดของอนุภาคได้ต่างกัน ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะสมบัติของเมมเบรนที่ใช้ในแต่ละกระบวนการแตกต่างกัน โดยขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันเป็นแฟคเตอร์สำคัญในการเลือกใช้กระบวนการหรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือ กระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแต่ละประเภทมีกลไกการแยกแตกต่างกันตามขนาดรูพรุนในโครงสร้างของเมมเบรน

เมมเบรน เป็นตัวกลางขวางกั้นระหว่างเฟสของไหล 2 เฟส ที่มีสมบัติยอมให้สารบางชนิดผ่านได้โดยการถ่ายโอนมวลทั้งหมดเกิดขึ้นที่ด้านความหนาของเมมเบรนที่มีขนาด และมีมิติ (Dimension) น้อยกว่าด้านกว้าง-ด้านยาวมากๆ เทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรนมีหลักการดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยมีสารป้อน (Feed) เข้าทางด้านหนึ่งของเมมเบรน ส่วนที่ผ่านเมมเบรนไปได้ เรียกว่า รีเทนเตท (Retentate) แรงขับ (Driving force) ที่ทำให้เกิดการถ่ายโอนมวล ได้แก่ ความดัน ความเข้มข้น แรงเคลื่อนไฟฟ้า เป็นต้น ตามประเภทของกระบวนการ วัสดุที่นำมาทำเป็นเมมเบรนอาจเป็นพอลิเมอร์ เซรามิกส์ คาร์บอน ซีโอไลต์ ออกไซด์ต่างๆ (เช่น อลูมินา ไททาเนีย หรือเซอร์โคเนีย เป็นต้น) โลหะ (เช่น แพลลาเดียม หรือเงิน เป็นต้น) หรือของเหลว ข้อได้เปรียบ/เสียเปรียบของเมมเบรนอินทรีย์เทียบกับเมมเบรนอินทรีย์ได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.2 หลักการของเทคโนโลยีการแยกด้วยเมมเบรน (จันทอง สุนทรภา, 2545)

เมมเบรนที่มีสมรรถนะสูง คือ เมมเบรนที่มีสมบัติดังต่อไปนี้

1. มีฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านสูง (High flux and selectivity)
2. มีความแข็งแรงเชิงกล (Good mechanical)
3. ทนต่อสารเคมีและความร้อนภายใต้สภาวะการดำเนินการได้ (Chemical and thermal stability under operating conditions)

4. มีแนวโน้มจับสิ่งสกปรกไว้ที่ผิวได้ต่ำ (Low fouling tendency)
5. ราคาไม่แพง (Cost effective)

ตารางที่ 2.2 ข้อได้เปรียบ/เสียเปรียบของเมมเบรนอนินทรีย์เทียบกับเมมเบรนอินทรีย์ (ขั้นตอน สุรน-  
ตราภา, 2545)

| ข้อได้เปรียบ                       | ข้อเสียเปรียบ   |
|------------------------------------|---|
| มีเสถียรภาพที่อุณหภูมิสูง          | ราคาสูง   |
| มีความต้านทานต่อสภาวะที่รุนแรง     | เปราะ   |
| มีความต้านทานต่อความดันสูงๆ        | มีพื้นที่เมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรของโมดูลต่ำ                           |
| ไม่สามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์  | ยากที่จะได้ค่าการคัดเลือกสูงๆ ในเมมเบรนมีรูพรุนแบบ Microporous            |
| ทำความสะอาดง่ายเมื่อเกิดการอุดตัน  | มีค่าการซึมผ่าน (Permeability) ต่ำในเมมเบรนแบบเนื้อแน่นที่อุณหภูมิปานกลาง |
| กระตุ้นด้วยสารเร่งปฏิกิริยาได้ง่าย | การผนึกเมมเบรนให้แน่นติดกับโมดูลไม่ให้เกิดการรั่วที่อุณหภูมิสูงๆ ทำได้ยาก |

## 2.5 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน

ลักษณะของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนแต่ละประเภท แสดงในตารางที่ 2.3 โดยสารป้อนและเพอร์มิเอทในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับอยู่ในเฟสของเหลว ใช้ความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการถ่ายโอนมวลขึ้น ขณะที่สารป้อนในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันเป็นของเหลว และเพอร์มิเอทอยู่ในเฟสไอ มีความดันย่อยของสารเพอร์มิเอทเป็นแรงขับเคลื่อน สารป้อน และเพอร์มิเอทในกระบวนการเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนเป็นของเหลว หรืออยู่ในรูปของไฮโดรเนียมไอออน  $[H^+(H_2O)_n]$  ในกรณีการประยุกต์ใช้เป็นเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอนในเซลล์เชื้อเพลิง มีแรงขับเคลื่อนไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน และเพอร์มิเอทในกระบวนการแยกแก๊สด้วยเมมเบรนอยู่ในเฟสแก๊ส มีความดันย่อยของสารเพอร์มิเอทเป็นแรงขับเคลื่อน

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน ได้แก่ การผลิตน้ำดื่มทั้งจากน้ำจืดผิวดิน และน้ำเค็ม การแยกแก๊สเพื่อผลิตแก๊สใช้ในอุตสาหกรรมหรือแยกแก๊สออกซิเจนออกจากอากาศเพื่อใช้ในกระบวนการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ การกรองอนุภาคของแข็งจากสารแขวนลอย

การบำบัดแก๊สทิ้งในอุตสาหกรรม การดึงน้ำออกจากเอทานอลอะซีโอโทรบ (Dehydration of ethanol azeotropes) เพื่อผสมกับน้ำมันแก๊สโซลีนเป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ ไดเอลิซิซิสเพื่อใช้ในการฟอกเลือดและไต เป็นต้น

ตารางที่ 2.3 ประเภทของกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (ขันทอง สุนทรภา, 2545)

| กระบวนการ              | สารป้อน                 | เพอร์มิเอท                   | แรงขับ          |
|------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------|
| ไมโครฟิลเตรชัน         | ของเหลว                 | ของเหลว                      | ความดัน         |
| อัลตราฟิลเตรชัน        | ของเหลว                 | ของเหลว                      | ความดัน         |
| นาโนฟิลเตรชัน          | ของเหลว                 | ของเหลว                      | ความดัน         |
| ออสโมซิสผันกลับ        | ของเหลว                 | ของเหลว                      | ความดัน         |
| เพอร์เวปเพอเรชัน       | ของเหลว                 | ไอ                           | ความดันย่อย     |
| เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน | ของเหลว $[H^+(H_2O)_n]$ | ของเหลว หรือ $[H^+(H_2O)_n]$ | แรงเคลื่อนไฟฟ้า |
| แยกแก๊สด้วยเมมเบรน     | แก๊ส                    | แก๊ส                         | ความดันย่อย     |

ตารางที่ 2.4 ลักษณะของเมมเบรนและกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน (ขันทอง สุนทรภา, 2545)

| กระบวนการ          | ขนาดรูพรุน (อังสตรอม) | กลไกการแยก       |
|--------------------|-----------------------|------------------|
| ไมโครฟิลเตรชัน     | 500-20,000            | การคัดขนาด       |
| อัลตราฟิลเตรชัน    | 30-1,000              | การคัดขนาด       |
| นาโนฟิลเตรชัน      | 10-50                 | การคัดขนาด       |
| เพอร์เวปเพอเรชัน   | < 5                   | การละลาย-การแพร่ |
| แยกแก๊สด้วยเมมเบรน | < 5                   | การละลาย-การแพร่ |
| ออสโมซิสผันกลับ    | 5-20                  | การคัดขนาด       |
|                    | < 5                   | การละลาย-การแพร่ |

จากตารางที่ 2.4 ได้แสดงให้เห็นว่าเมมเบรนในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ตามลำดับ มีขนาดรูพรุนใหญ่ในช่วง 500-20,000 20-500 และ 10-50 อังสตรอม ซึ่งจัดเป็นรูพรุนระดับ Macropores (> 50 nm), Mesopores (2-50 nm) และ Micropores (< 2 nm) ตามการแบ่งประเภทของ IUPAC (The International Union of



Pure and Applied Chemistry) อนุภาคหรือโมเลกุลสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุด จะถูกกันออกไปทั้งหมด อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนที่มีขนาดใหญ่ที่สุดแต่ใหญ่กว่ารูพรุนที่มีขนาดเล็กที่สุด อนุภาคนี้สามารถผ่านออกไปเพียงบางส่วนตามการกระจายของขนาดรูพรุนบนเมมเบรน (Pore size distribution) ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูพรุนที่เล็กที่สุดจะสามารถผ่านเมมเบรนไปได้ ดังนั้นหลักการของการแยกสาร โดยใช้เมมเบรนมีรูพรุนจึงเป็นการคัดขนาดโมเลกุลที่ขนาดแตกต่างกัน

### 2.5.1 กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน

#### 1) หลักการพื้นฐาน

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเพื่อแยกอนุภาคคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยในช่วง 500-20,000 อังสตรอม ออกจากของเหลวหรือแก๊ส จากข้อมูลอัตราเร็วในการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกตามตารางที่ 2.5 จะเห็นว่าต้องใช้เวลานานหลายชั่วโมงจนถึงหลายวันจึงจะตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์ และของแข็งแขวนลอยในช่วงดังกล่าวข้างต้นออกมาได้ ดังนั้นเทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่ไม่น้อยกว่า 1 ไมครอนลงมา

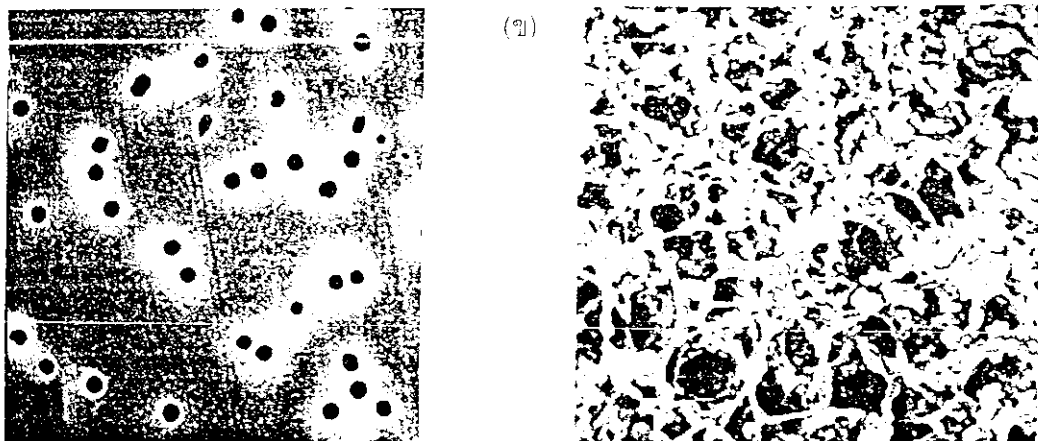
ตารางที่ 2.5 อัตราเร็วในการตกตะกอนกับขนาดอนุภาค (จันทอง สุนทรภา, 2545)

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

เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะ โครงสร้างของรูพรุน คือ Screen filter และ Depth filter โดย Screen filter มีโครงสร้างของรูพรุนเป็นทรงกระบอกตรง (Capillary-type pores) แต่ Depth filter มีโครงสร้างของรูพรุนบิดไปมา (Tortuous-type pores) โดย

วัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบบ Screen filter มักเป็นพอลิคาร์บอเนตหรือพอลิเอสเทอร์ ขณะที่วัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบบ Depth filter มักเป็นพอลิไวนิลคลอไรด์ (PVC) พอลิไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (Poly (vinylidene fluoride); PVDF) พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน (Polytetrafluoroethylene; PTFE) สารประกอบเซลลูโลส ไนลอน พอลิอีเทอร์ซัลโฟน (Polyether-sulfone) พอลิพรอพิลีน (Polypropylene; PP) เป็นต้น Screen filter สามารถเตรียมขึ้นได้ด้วยเทคนิค Tracketching ส่วน Depth filter ที่ทำจากพอลิเมอรัอินทรีย์สามารถเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคเฟสอินเวอร์ชัน ส่วนที่ทำจาก PTFE และ PP เตรียมขึ้นด้วยเทคนิคการยืดฟิล์ม (Stretching) ลักษณะผิวหน้าของเมมเบรนทั้งสองแบบที่ส่องดูด้วยกล้อง SEM แสดงในรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า Depth filter ปรากฏรูพรุนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนพิกัด (Rated pore size) มากมายแต่ด้วยความคดเคี้ยวของรูพรุนจึงสามารถกักขนาดอนุภาคตามพิกัดได้

ถึงแม้ว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนนิยมใช้เป็นเกณฑ์ในการแยกประเภท อย่างไรก็ตาม อาจแบ่งประเภทของเมมเบรนจากค่า Molecular weight cutoff ก็ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2.6 เมมเบรนต่างชนิดกันที่มี Molecular weight cutoff เท่ากัน อาจมีการกระจายขนาดรูพรุนแตกต่างกัน ค่า Molecular weight cutoff มีประโยชน์ในการใช้เป็นตัวพิจารณาเลือกเมมเบรนให้เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานต่างๆ



รูปที่ 2.3 SEM ผิวหน้าของ (ก) Screen filter (ข) Depth filter (ชั้นทอง สุนทรภา, 2545)

ตารางที่ 2.6 ระดับน้ำหนักรวมของอนุภาคที่ถูกกักไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรนประเภทต่างๆ (จันทอง สุทธธราภา, 2545)

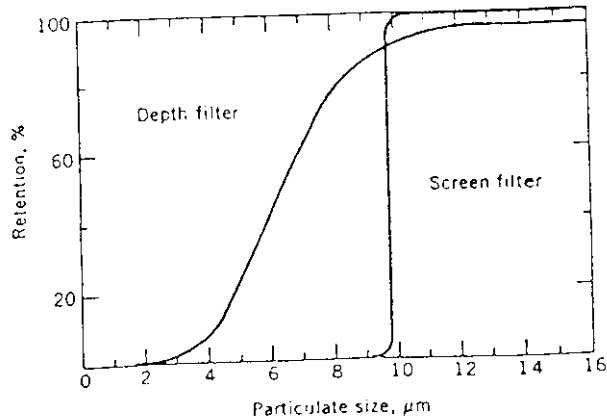
| ประเภทของเมมเบรน | ขนาดอนุภาค (ไมครอน) | น้ำหนักรวม (ดาดตัน) |
|------------------|---------------------|---------------------|
| ไมโครฟิลเตรชัน   | $\geq 0.1$          | $\geq 500,000$      |
| อัลตราฟิลเตรชัน  | 0.01-0.1            | 1,000-500,000       |
| นาโนฟิลเตรชัน    | 0.001-0.01          | 100-1,000           |
| ออสโมซิสผันกลับ  | $\leq 0.001$        | $\leq 100$          |

## 2) กลไกการกักอนุภาคของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

อนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของ Screen filter จะถูกกักไว้โดยตรงบนผิวหน้าของเมมเบรน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนสามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ถ้าไม่มีการอัดติดเนื่องจากความเฉื่อย (Internal impaction) และการซึมซาบ (Diffusion) ของอนุภาคบนผนังรูพรุน

สำหรับกลไกการกักอนุภาคของ Depth filter คือ การดูดซับ (Adsorption) และการดักติด (Entrapment) อนุภาคส่วนใหญ่ถูกจับไว้ภายในซอกของเมมเบรนยกเว้นอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากความสามารถในการกักอนุภาคของ Depth filter ขึ้นอยู่กับความคดเคี้ยวของเส้นทางการไหล เมมเบรนแบบนี้จึงสามารถกักอนุภาคที่มีขนาดน้อยกว่าขนาดรูพรุนพิสัยได้ด้วย ลักษณะเส้นโค้งการกักอนุภาคของเมมเบรนทั้งสองแบบแสดงในรูปที่ 2.4 นอกจากนี้ Depth filter ยังมีพื้นที่ผิวใช้ประโยชน์ได้ (Available surface area) มากกว่า Screen filter อย่างมาก ดังนั้น Depth filter จึงสามารถกักอนุภาคไว้เป็นปริมาณมากกว่า Screen filter และมีตำแหน่งให้โปรตีนและไวรัสยึดเหนี่ยวเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตาม ในแง่ของอัตราการไหลจากเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันทั้งสองแบบ มีค่าเท่ากันโดยประมาณ ถึงแม้ว่า Depth membrane จะมีรูพรุนเปิดมากกว่าแต่ Screen membrane มีความบางกว่า กล่าวคือ Screen membrane มีความหนา 10 ไมครอน ขณะที่ Depth membrane หนา 50-120 ไมครอน



รูปที่ 2.4 เส้นโค้งการกักของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสองแบบ (จันทอง สุนทรภา, 2545)

### 3) ลักษณะสมบัติของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

การระบุลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีรูพรุนทั้งเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน และเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน (Trans-membrane flux) ขนาดรูพรุน (Pore size) การกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution) ค่า Molecular weight cutoff สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน (Chemical and thermal stability) และการสามารถทำความสะอาดได้ (Cleanability)

ในการหาฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนตามสมการที่ (2.1) โดยปกติทดสอบที่ค่าความดันต่างๆ กับน้ำสะอาดเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการอุดตันของรูพรุน ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนมักลดลงตามระยะเวลาที่ดำเนินการทดสอบ เนื่องจากเกิดการอัดตัว (Compaction) ของโครงสร้างเมมเบรนภายใต้แรงดัน ซึ่งค่าการอัดตัว (Compaction factor) สามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างฟลักซ์ที่ความดันคงที่หนึ่งๆ กับเวลาบนสเกลกึ่งลอการิทึม (Semi-logarithm) หน่วยของฟลักซ์มีได้หลายแบบ เช่น ฟลักซ์เชิงปริมาตรมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงโมลมีหน่วยเป็นโมลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงมวลมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา เป็นต้น โดยพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ คือพื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับความหนาของเมมเบรน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือตั้งฉากกับทิศทางการไหล

$$J = \frac{V}{A\Delta t} \quad (2.1)$$

เมื่อ  $J =$  ฟลักซ์

$V =$  ปริมาตรเพอร์มิเอทที่ผ่านเมมเบรน

$A =$  พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล

$\Delta t =$  เวลาที่เก็บเพอร์มิเอท

Molecular weight cutoff คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารทดสอบที่ถูกเมมเบรนกักไม่ให้ผ่านได้ 90-95% โดยค่าการไม่ยอมรับ (Rejection) หาได้ตามสมการที่ (2.2) แต่ในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันใช้คำว่า “ค่าการคงอยู่ (Retention)” ซึ่งมีนิยามตามสมการที่ (2.3) เพื่อเน้นถึงองค์ประกอบมีคุณค่าที่ต้องการแยกออกจากสารละลาย โดยองค์ประกอบที่ต้องการในกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันคือ โมเลกุลขนาดใหญ่ที่ไม่ได้ผ่านเมมเบรนออกไปเพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ เช่น โมเลกุลของโปรตีน หรือของจุลินทรีย์ ขณะที่องค์ประกอบที่ต้องการในกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน หรือกระบวนการออสโมซิสผันกลับคือ โมเลกุลน้ำบริสุทธิ์ จึงต้องพิจารณาค่าการไม่ยอมรับตัวละลายผ่านเมมเบรน

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_f} \quad (2.2)$$

$$R_F = 1 - \frac{C_p}{C_r} \quad (2.3)$$

เมื่อ  $R =$  ค่าการไม่ยอมรับ (Rejection)

$R_F =$  ค่าการคงอยู่ (Retention)

$C_p =$  ความเข้มข้นของตัวละลายในเพอร์มิเอท

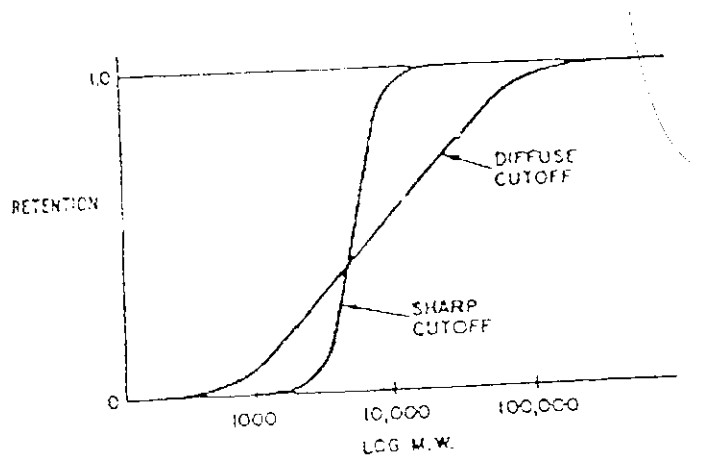
$C_f =$  ความเข้มข้นของตัวละลายในสารละลายป้อน

$C_r =$  ความเข้มข้นของตัวละลายในรีเทนเทท

ตัวละลาย (Solute) ที่ใช้ในการทดสอบหา Molecular weight cutoff มีรูปเป็นทรงกลม (Spherical) ได้แก่ โปรตีนต่างๆ เช่น อัลบูมิน (Albumin) พอลิเอทิลีนไกลคอล (Polyethylene-glycol; PEG) ออลิโกแซ็กคาไรด์ (Oligosaccharide) ต่างๆ เช่น เด็กซ์ทริน (Dextrin) เป็นต้น เมื่อพล็อตค่าการไม่ยอมรับกับน้ำหนักโมเลกุลจะมีลักษณะกราฟ Molecular weight cutoff ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถใช้อธิบายสมบัติการกักตัวละลายของเมมเบรนได้ โดยเมมเบรนที่มีลักษณะกราฟ Molecular weight cutoff แบบ Sharp cutoff บอกได้ว่าการกระจายขนาดรูพรุนแคบ และเมมเบรนที่มีลักษณะกราฟ Molecular weight cutoff แบบ Diffuse cutoff มีการกระจายขนาดรูพรุนกว้าง

#### 4) การประยุกต์ใช้งานไมโครฟิลเตรชัน

เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทโดยมีลักษณะการใช้งานในแต่ละอุตสาหกรรม ดังแสดงในตารางที่ 2.7 เนื่องจากมีขนาดรูพรุนใหญ่สุดในบรรดากระบวนการแยกด้วยเมมเบรน จึงมักใช้แยกโปรตีนขนาดใหญ่ แยกจุลินทรีย์ทั้งไวรัส แบคทีเรีย และประเภทอื่นๆ ในการผลิตโปรตีนสังเคราะห์ ใช้กรองเบียร์หรือไวน์ แยกของแข็งแขวนลอยที่เป็นสาเหตุของความขุ่นในน้ำ เป็นต้น



รูปที่ 2.5 ลักษณะ Molecular weight cutoff ของเมมเบรนสองแบบ (ขั้นตอน สุทธธราภา, 2545)

ตารางที่ 2.7 การประยุกต์ใช้งานเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน (ขั้นตอน สุทธธราภา, 2545)

| Industry          | Applications   |
|-------------------|--|
| Fermentation      | Sterilization and removal of micro-particles in liquid or gas  |
| Medical           | Transfusion filter sets; hemocyte/serum separation; purifications of surgical water  |
| Electronic        | Removal of micro-particles from ultrapure water; purifications of chemicals and solvents   |
| Food and beverage | Purification of edible oils, beverages, draft beer, and draft wine   |
| Others            | Removal of micro-particles from solvents and oils; water purifiers for home use; purification of condensed water at nuclear plants |

ตารางที่ 2.8 แสดงขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคหรือโมเลกุลบางชนิด จากเกณฑ์ในตารางที่ 2.6 เห็นได้ว่าเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสามารถกักคอลลอยด์ หรือแบคทีเรีย หรือยีสต์และราได้สมบูรณ์ แต่สามารถกักโปรตีนหรือพอลิแซ็กคาไรด์ได้บางชนิด

ตารางที่ 2.8 ขนาดและน้ำหนักโมเลกุลของโมเลกุลบางชนิด (ชั้นทอง สุนทรภาา, 2545)

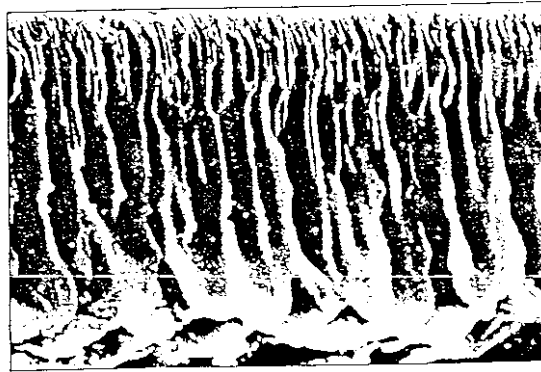
| ชนิดของโมเลกุล        | ขนาด (นาโนเมตร) | น้ำหนักโมเลกุล  |
|-----------------------|-----------------|-----------------|
| ยีสต์และรา            | 1,000-10,000    | -               |
| แบคทีเรีย             | 300-10,000      | -               |
| คอลลอยด์              | 100-1,000       | -               |
| โปรตีน/พอลิแซ็กคาไรด์ | 2-10            | $10^4$ - $10^6$ |
| เอ็นไซม์              | 2-5             | $10^4$ - $10^5$ |
| สารอินทรีย์           | 0.3-0.8         | 30-500          |
| ไอออนอนินทรีย์        | 0.2-0.4         | 10-100          |
| น้ำ                   | 0.2             | 18              |

## 2.5.2 กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน

### 1) หลักการพื้นฐาน

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกสาร โมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็นไซม์ และแป้ง ออกจากน้ำและสาร โมเลกุลเล็กอื่นๆ ตัวอย่างสารละลายที่อาจแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นได้ โดยกระบวนการนี้ได้แก่ น้านม น้ำผลไม้ สารละลายเอ็นไซม์ สารปฏิชีวนะและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นต้น กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นกระบวนการทางกายภาพ อาศัยแรงดันที่ต่ำเป็นแรงขับเคลื่อนให้ของเหลวผ่านช่องว่างของเมมเบรน ในการแยกอนุภาคแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่ รวมทั้งแบคทีเรียและจุลชีพอื่นๆ ออกจากของเหลว กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นกระบวนการที่สำคัญกระบวนการหนึ่ง เนื่องจากมีอัตราการผลิตน้ำสูงกว่ากระบวนการเมมเบรนแบบอื่นที่ความดันเดียวกัน น้ำที่ผ่านการกรองมีคุณภาพดีกว่าน้ำที่ได้จากกระบวนการแยกทั่วไป เช่น การตกตะกอน การเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง การกรองทราย เป็นต้น นอกจากนี้ สารมลพิษในน้ำส่วนใหญ่ จะมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.05 - 10 ไมโครเมตร ทำให้สามารถกำจัดได้โดยกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เนื่องจากขนาดอนุภาคดังกล่าวอยู่ในช่วงค่าที่กำหนดของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) พอดี

กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนของเมมเบรนในช่วง 30-1,000 อังสตรอม ส่วนใหญ่ประยุกต์ใช้เพื่อแยกอนุภาคหรือตัวละลายที่มีน้ำหนักโมเลกุลในช่วง 1,000-500,000 ดาลตัน ไม่ให้ผ่านเมมเบรนออกไป จึงไม่ค่อยมีความแตกต่างในความดันออสโมติกคร่อมเมมเบรน ดังนั้น จึงสามารถทำงานที่ความดันในช่วง 2-10 บาร์ (69-483 kPa หรือ 10-70 psi) เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันมักทำให้โครงสร้างเป็นแบบไม่สมมาตร โดยมีขนาดรูพรุน 30-400 อังสตรอม อยู่ที่ผิวหน้าเพียง 0.1-1.5 ไมครอน ส่วนขนาดของชั้นรองรับมีขนาดใหญ่กว่าชั้นผิวอย่างมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.6 อนุภาคที่สามารถผ่านรูพรุนขนาดเล็กที่ชั้นผิวไปได้ก็จะผ่านรูพรุนในชั้นรองรับไปได้โดยง่ายดาย



รูปที่ 2.6 ภาพตัดขวาง SEM ของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันแอนไอโซทรอปี (ขันทอง สุนทรภา, 2545)

การระบุลักษณะสมบัติของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันเป็นเช่นเดียวกับเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน คือ พลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน ขนาดรูพรุน ความพรุน (Porosity) ลักษณะโครงสร้างของเมมเบรน (Morphology) ค่าการคงอยู่ของตัวละลาย (Retention factor) ค่า Molecular weight cutoff สมบัติความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ ความแข็งแรงเชิงกล (Mechanical strength) เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน (Chemical and thermal stability) และการสามารถทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้ (Cleanability) พอลิเมอร์ที่ใช้เตรียมเป็นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่ พอลิซัลโฟน เซลลูโลสแอซิเตด พอลิพรอพิลีน ไนลอน 6 พอลิเตตระฟลูออโรเอทิลีน พอลิไวนิลคลอไรด์ เป็นต้น รูปแบบของอัลตราฟิลเตรชันโมดูลที่มีขายในท้องตลาดมีทุกลักษณะ ได้แก่ แบบแผ่นและกรอบ (Plate and frame) แบบท่อม้วน (Spiral wound) แบบท่อ (Tubular) และแบบเส้นใย (Hollow fiber) ไม่ว่าจะ เป็นโมดูลลักษณะใดก็ตามเพื่อให้มีการถ่ายโอนมวลมากที่สุด จำเป็นต้องให้มีความเร็วแนวสัมผัส (อัตราแรงเฉือน) บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนสูง วิธีการที่ง่ายที่สุดคือ ให้สาร



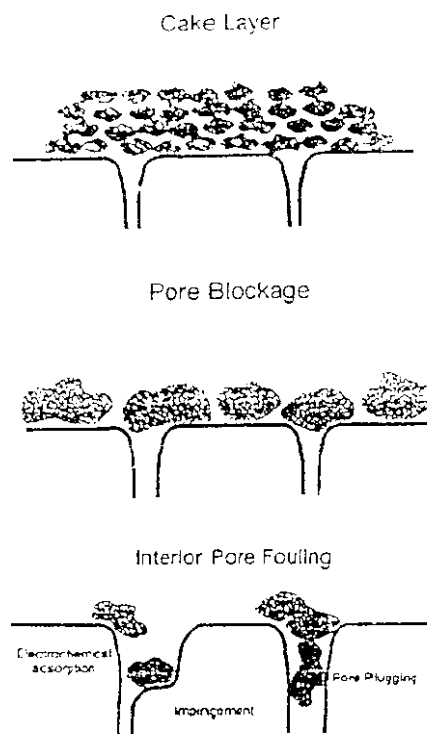
ป้อนไหลตามแนวขวาง (Cross flow) กล่าวคือ สารป้อนมีแนวทางการไหลขนานกับผิวหน้าของเมมเบรนและเพอร์มิเอทผ่านเมมเบรนในแนวตั้งฉากกับเมมเบรน ตารางที่ 2.9 แสดงตัวอย่างการเปรียบเทียบลักษณะเชิงกระบวนการของโมดูลแบบต่างๆ ของผู้ผลิตต่างๆ

ตารางที่ 2.9 การเปรียบเทียบลักษณะเชิงกระบวนการของโมดูลแบบต่างๆ (ชั้นทอง สุนทรภา, 2545)

| Characteristics                                   | Plate and frame             | Spiral wound                  | Tubular                   | Hollow fiber     |
|---|-----------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------|
| Packing density (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> ) | 200-400                     | 300-900                       | 150-300                   | 9,000-30,000     |
| Feed channel diameter (mm)                        | 5                           | 1.5                           | 13                        | 0.1              |
| Method of replacement                             | As sheets                   | As module assembly            | As tubes                  | As entire module |
| Replacement labor                                 | High                        | Medium                        | High                      | Medium           |
| Pressure drop                                     |                             |                               |                           |                  |
| 1. Product side                                   | Medium                      | Medium                        | Low                       | High             |
| 2. Feed side                                      | Medium                      | Medium                        | High                      | Low              |
| Concentration polarization                        | High                        | Medium                        | High                      | Low              |
| Suspended solids buildup                          | Low / medium                | Medium / high                 | Low                       | High             |
| Feed velocity (m/s)                               | 0.7-2.0                     | 0.2-1.0                       | 2.0-6.0                   | 0.5-3.5          |
| Reynolds number                                   | 100-6,000                   | 100-1,000                     | 10,000-30,000             | 10-1,000         |
| Typical suppliers                                 | DDS, Dorr-Oliver, Millipore | Fluids system, Koch, Osmonics | Alcoa, Koch, PCI, Wafilin | Amicon, Romicon  |

## 2) ฟาวลิงและโพลาริเซชันความเข้มข้น (Fouling and Concentration Polarization)

Concentration polarization เป็นปรากฏการณ์ปกติของกระบวนการที่ดำเนินการภายใต้แรงดัน คือ กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน และกระบวนการออสโมซิสผันกลับ เมื่อตัวละลายเกิดการสะสมกันอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้ความเข้มข้นของตัวละลายที่ไม่ผ่านเมมเบรนออกไปสูงกว่าความเข้มข้นในเนื้อสารละลาย ก่อให้เกิดชั้นขอบ (Boundary layer) ขึ้น เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ฟาวลิง (Fouling) ทำให้สมรรถนะของเมมเบรนค่าคือ ฟลักซ์ (Flux) และสมรรถนะการเลือก (Selectivity) ลดลง การเกิด Fouling หรือการตกสะสมของสารบนเมมเบรนมี 3 ลักษณะดังแสดงในรูปที่ 2.7 คือ บนผิวด้านนอกของเมมเบรนเป็นชั้นเค้ก (Cake layer) ที่ช่องเปิดของรูพรุน (Pore blocking) หรือภายในรูพรุนของเมมเบรน (Interior pore fouling) โดยเฉพาะการเกิด Fouling แบบ Interior pore fouling ทำให้ขนาดรูพรุนเล็กลง กีดขวางการไหล และล้างทำความสะอาดรูพรุนได้ยาก หากชั้นอนุภาคที่เกาะอยู่บนผิวของเมมเบรนเกิดโครงสร้างเป็นโครงข่ายสามมิติของตัวมาก เรียก Fouling layer นั้นว่า “ชั้นเจล (Gel layer)”



รูปที่ 2.7 ลักษณะการเกิด Fouling 3 แบบ (จันทอง สุนทรภา, 2545)

ในการอธิบายปรากฏการณ์ Concentration polarization ที่ง่ายที่สุด คือการใช้ทฤษฎี “ชั้นฟิล์ม (Film model)” กรณีที่ไม่มีการตกสะสมของตัวละลาย การอธิบายด้วย Film model สมมติว่ามีชั้นขอบแลมินาร์ (Laminar boundary layer) เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งมีเฉพาะการถ่ายโอนมวลในทิศทางตั้งฉากกับผิวหน้าของเมมเบรนเท่านั้น ที่ภาวะสถานะคงตัว (Steady state) การเคลื่อนที่แบบการพา (Convective transport) ของตัวละลายไปยังผิวหน้าของเมมเบรนเกิดการดุลถ่วง (Counterbalance) กับฟลักซ์แพร่ (Diffusive flux) ของสารที่ค้างอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน (Retained material) กลับเข้าไปในเนื้อสารละลาย จึงได้โพรไฟล์ความเข้มข้นของสารที่ค้างอยู่ในชั้น Laminar boundary layer ดังแสดงในรูปที่ 2.8

ดุลมวล (Material balance) ของตัวละลายในชั้น Laminar boundary layer สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.3) ฟลักซ์ตัวทำละลายผ่านเมมเบรนโดยการพา และฟลักซ์ตัวละลายจากเมมเบรนกลับเข้าไปในเนื้อสารละลายโดยการแพร่ มีค่าตามสมการที่ (2.4) และ (2.5) ตามลำดับ รวมสมการที่ (2.3) ถึง (2.5) และหาปริพันธ์ (Integrate) โดยใช้เงื่อนไขขอบ (Boundary condition) ตามสมการที่ (2.6) จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.7) และค่าการคงอยู่ (Retention factor) ตามสมการที่ (2.8) รวมสมการที่ (2.7) และ (2.8) ได้ความสัมพันธ์ของ Concentration polarization ตามสมการที่ (2.9) ซึ่งแสดงได้ด้วยอัตราส่วนของความเข้มข้นตัวละลายที่ผิวหน้าของเมมเบรน ( $C_s^w$ ) กับความเข้มข้นตัวละลายในเนื้อสารละลาย ( $C_s^b$ ) ในการอธิบายปรากฏการณ์ Concentration polarization ที่สถานะของสารป้อนต่างๆ กัน ต้องอธิบายด้วยสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวลของตัวละลาย (Solute mass transfer coefficient;  $k_s$ ) ดังสมการที่ (2.10) โดยสมมติว่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับอัตราการไหลของสารป้อนที่ขนานกับผิวหน้าของเมมเบรน

$$\text{Solute material balance:} \quad J_s = J_{s,conv} - J_{s,diff} \quad (2.3)$$

$$J_{s,conv} = J_v C_s \quad (2.4)$$

$$J_{s,diff} = -D_s \frac{dC_s}{dz} \quad (2.5)$$

$$\text{Boundary condition:} \quad C_s = C_s^w \text{ at } z = 0 \text{ and } C_s = C_s^b \text{ at } z = z_b \quad (2.6)$$

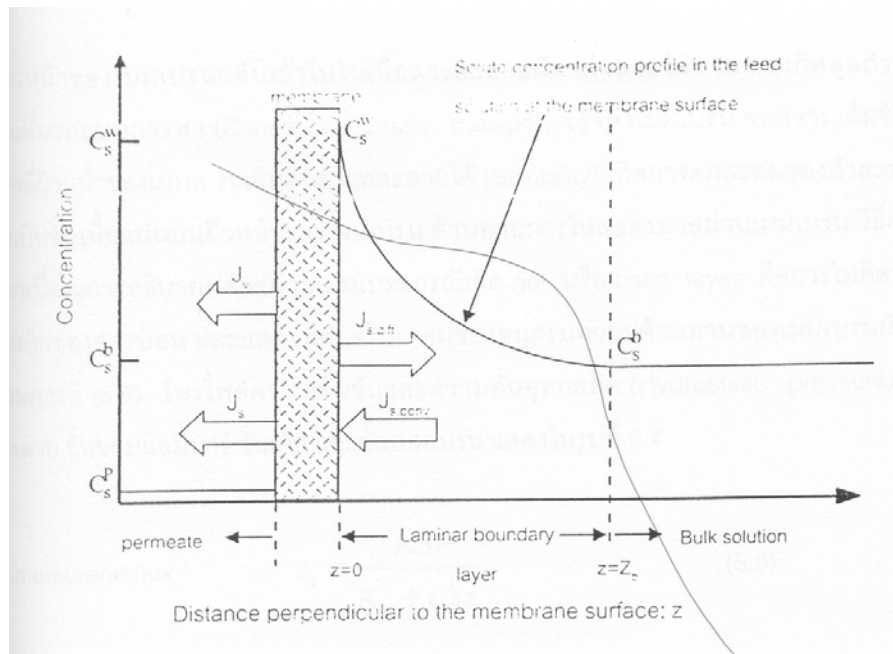
$$\frac{J_v z_b}{D_s} = \ln \frac{C_s^w - C_s^P}{C_s^b - C_s^P} \quad (2.7)$$

$$\text{Solute retention factor:} \quad R_F = 1 - \frac{C_s^P}{C_s^w} \quad (2.8)$$

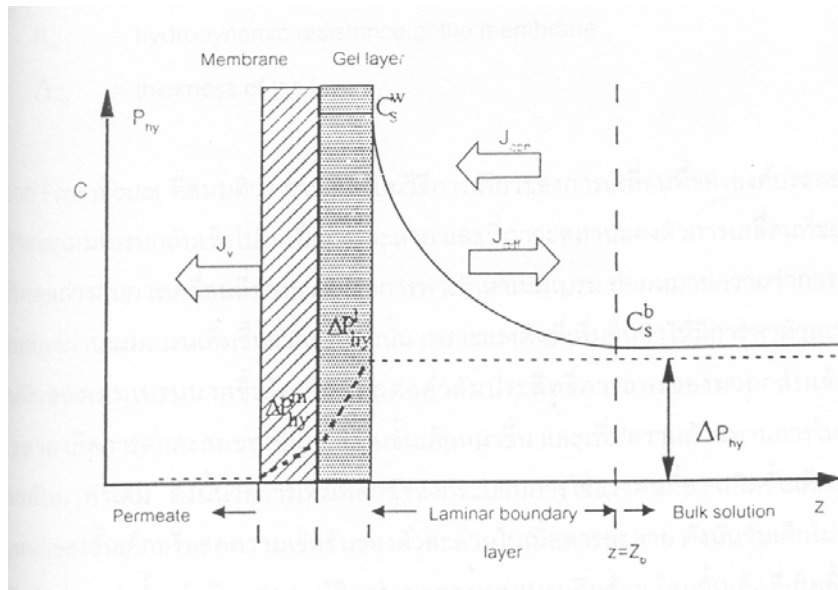
Concentration polarization: 
$$\frac{C_s^w}{C_s^b} = \frac{\exp\left(\frac{J_v Z_b}{D_s}\right)}{R_F - (1 - R_F)\exp\left(\frac{J_v Z_b}{D_s}\right)} \quad (2.9)$$

Mass transfer coefficient: 
$$k_s = \frac{D_s}{Z_b} \quad (2.10)$$

- เมื่อ
- $C_s$  = solute concentration
  - $C_s^P$  = permeate solute concentration
  - $D_s$  = diffusion coefficient of the solute in the boundary layer solution
  - $\frac{dC_s}{dz}$  = concentration gradient of the solute in the boundary layer
  - $J_s$  = solute flux through the membrane
  - $J_{s,conv}$  = solute flux toward the membrane by convection
  - $J_{s,diff}$  = solute flux from the membrane surface into the bulk solution by diffusion
  - $J_v$  = transmembrane volume flux



รูปที่ 2.8 โพรไฟล์ความเข้มข้นที่สถานะคงตัวกรณีไม่มีการตกสะสมของตัวละลาย (ขั้นตอน สุทธภา, 2545)



รูปที่ 2.9 โพรไฟล์ความเข้มข้นที่สภาวะสถานะคงตัวกรณีมีการตกสะสมของตัวละลาย  
(ชั้นทอง สุนทรภา, 2545)

ในกรณีการแยกสารละลายที่มีองค์ประกอบของแมโครโมเลกุล (Macromolecule) หรืออนุภาคแขวนลอย เช่น ในกรณีของการดำเนินระบบกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายที่ค่อนข้างต่ำของแมโครโมเลกุล การเคลื่อนที่มวลแบบแพร่ (Diffusive mass transport) จากผิวหน้าของเมมเบรนกลับเข้าไปในเนื้อสารละลายมีค่าต่ำและไม่สามารถเกิดคู่ถ่วงกับการเคลื่อนที่มวลแบบการพา (Convective mass transport) เข้าหาเมมเบรน จนความเข้มข้นของตัวละลายที่ผิวหน้าของเมมเบรนเกินค่าสภาพละลายได้ (Solubility) เกิดการตกสะสมของตัวละลาย และกลายเป็นชั้นเนื้อแน่นบนผิวหน้าของเมมเบรน ด้านทานการไหลของมวลผ่านเมมเบรน วิธีการง่ายๆ วิธีการหนึ่งในการอธิบายฟลักซ์ผ่านเมมเบรนกรณีเกิด Gel หรือ Cake layer คือ การไม่คิดความดันออสโมติกของสารป้อน และแสดงฟลักซ์ในเทอมของอนุกรมความต้านทานของเมมเบรนกับชั้นเค้กตามสมการที่ (2.11) โพรไฟล์ความเข้มข้นและความดันอุทกสถิต (Hydrostatic pressure) ในเนื้อสารละลาย ชั้นขอบแลมินาร์ ชั้นเค้ก และชั้นเมมเบรน แสดงในรูปที่ 2.9

$$\text{Transmembrane flux: } J_v = \frac{A\Delta P}{R_m + r_1\Delta z_1} \quad (2.11)$$

เมื่อ  $\Delta P$  = hydrostatic pressure driving force

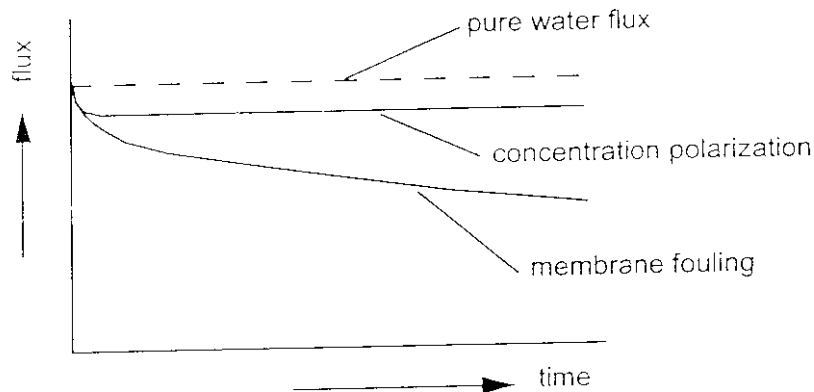
$r_1$  = specific resistance of the layer

$R_m$  = hydrodynamic resistance of the membrane

$\Delta z_1$  = thickness of the layer

จาก Film model ที่สมมติว่า การแพร่เป็นวิธีการเดียวของการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบออกจากผิวหน้าของเมมเบรนกลับเข้าไปในเนื้อสารละลาย และที่สภาวะสถานะคงตัวการเคลื่อนที่ของมวลแบบแพร่เกิดดุลถ่วงกับการเคลื่อนที่ของมวลแบบการพาเข้าหาเมมเบรน ย่อมหมายความว่า การเพิ่มแรงดันทำให้ฟลักซ์ผ่านเมมเบรนเพิ่มขึ้นชั่วคราวเท่านั้น เพราะแรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้มีการพาตัวละลายไปค้างอยู่บนผิวของเมมเบรนมากขึ้น โดยไม่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของมวลกลับเข้าไปในเนื้อสารละลาย เกิดการตกสะสมของอนุภาคเป็นชั้นแข็งหนาขึ้น และเพิ่มความต้านทานการไหลจนฟลักซ์ลดลงกลับมาค่าเดิม ดังนั้นวิธีการเพิ่มฟลักซ์ของกระบวนการใช้แรงดันที่อาจเกิดขึ้นได้ คือ การลดความหนาของชั้นแข็งหรือลดความเข้มข้นของตัวละลายในเนื้อสารละลาย ดังนั้นชั้นแข็งไม่เพียงแต่ทำให้ฟลักซ์ลดลงเท่านั้น ยังมีผลต่อสมบัติการแยกของเมมเบรนอีกด้วย โดยชั้นแข็งที่เกิดขึ้นทำหน้าที่เสมือนหนึ่งเป็นชั้นเมมเบรนทุติยภูมิซึ่งจะกักสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำไว้ด้วย ทำให้เป้าหมายการแยกองค์ประกอบที่มีน้ำหนักที่ต้องการผิดไป

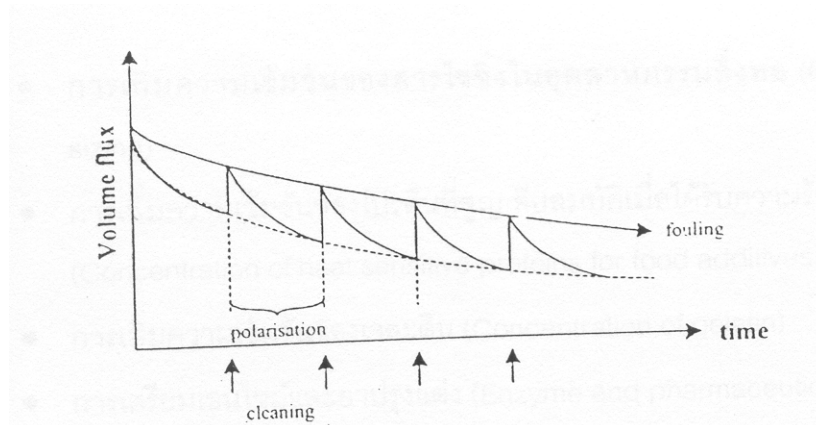
ความแตกต่างระหว่างปรากฏการณ์ Concentration polarization และ Membrane fouling หรือ Scaling แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 โดย Concentration polarization ถือเป็นกระบวนการผันกลับได้ (Reversible process) เกิดขึ้นในเวลาไม่กี่วินาที และสามารถควบคุมได้โดยการออกแบบให้เหมาะสมขณะที่ Fouling ถือเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้ (Irreversible process) เมื่อเกิดการลดลงของฟลักซ์ขึ้นแล้ว ฟลักซ์จะลดลงเรื่อยๆ การเกิด Fouling ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ องค์ประกอบและความเข้มข้นของสารละลายป้อน สมบัติของวัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรน และการออกแบบเชิงพลศาสตร์ของไหล (Fluid dynamic system design) สาเหตุการเกิด Fouling อาจเนื่องมาจากการตกสะสมของอนุภาคไม่ละลาย หรือการดูดซับแบบผันกลับได้หรือผันกลับไม่ได้ขององค์ประกอบที่ผิวหน้าหรือภายในรูพรุนของเมมเบรน



รูปที่ 2.10 ไดอะแกรมแสดงการลดลงของฟลักซ์เนื่องจาก Concentration polarization กับ Membrane fouling (ขันทอง สุนทรภา, 2545)

วิธีการหลักเพื่อไม่ให้เกิดหรือวิธีการควบคุมการเกิด Fouling ได้แก่

1. การบำบัดเบื้องต้น (Pretreatment) แก่สารละลายป้อน ด้วยการเติมสารตกตะกอน การกรองเบื้องต้น (Prefiltration) การปรับค่าพีเอช การเติมคลอรีน หรือการดูดซับด้วยคาร์บอน
2. การดัดแปลงผิวหน้าของเมมเบรน (Membrane surface modification) โดยการเติมหมู่ชอบน้ำ หรือหมู่ที่มีประจุที่ผิวหน้าของเมมเบรน
3. การออกแบบอุทกพลศาสตร์ของโมดูลให้เหมาะสม (Hydrodynamic optimization of the membrane module) โดยการออกแบบให้เกิดอัตราแรงเฉือนเนื่องจากการไหลของสารป้อนที่ผิวหน้าของเมมเบรนสูงๆ
4. การล้างเมมเบรน (Membrane cleaning) ด้วยสารเคมีที่เหมาะสม เมื่อฟลักซ์ลดลงจนถึงระดับหนึ่ง จำเป็นต้องล้างเมมเบรนเพื่อให้ได้ฟลักซ์กลับคืนมาบางส่วนหรือให้ได้เท่าเดิม สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด ได้แก่ กรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) โซเดียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{NaOH}$ ) สารเชิงซ้อน EDTA (Ethylene-diamine-tetra-acetic-acid) เอนไซม์ (Enzyme) สารซักฟอก (Detergent) และสารฆ่าเชื้อ (Disinfectant) เป็นต้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 ผลการกู้ฟลักซ์ด้วยการล้างเมมเบรน



รูปที่ 2.11 ไดอะแกรมแสดงการก่อกำเนิดฟลักซ์ด้วยการล้างเมมเบรน (จันทอง สุนทรภา, 2545)

### 3) กลไกการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF)

กลไกการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) จะแตกต่างจากกระบวนการกรองแบบธรรมดา (Conventional Filtration) คือ ในระบบการกรองแบบธรรมดา เมื่อปล่อยให้ น้ำไหลผ่านชั้นกรองอนุภาคแขวนลอยจะถูกกักจับ โดยจะติดค้างอยู่ที่ผิวของสารกรอง (Surface Filtration) หรือติดค้างในชั้นกรอง (In-Depth Filtration) ส่วนในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) อนุภาคแขวนลอยหรือสารอินทรีย์ จะถูกกักจับโดยจะติดค้างอยู่ในช่องว่างของเมมเบรน เรียกกลไกนี้ว่า “กลไกการแยกสารแบบคัดขนาดอนุภาค (Sieve Mechanism)” สำหรับสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน แบคทีเรีย อนุภาคแขวนลอย อาจถูกกักจับด้วยกลไกการดูดติดผิวหน้าของเมมเบรนหรือภายในโครงสร้าง ขึ้นอยู่กับวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน คือ วัสดุชนิด Hydrophobic จะมีสมบัติในการดูดติดสารอินทรีย์สูง และยอมให้น้ำไหลผ่านได้น้อยกว่าชนิด Hydrophilic (เทียบที่ MWCO เดียวกัน) แต่จะก่อให้เกิดการอุดตันเมมเบรน

### 4) ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF)

เนื่องจากกลไกการกักจับอนุภาคของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) เป็นการกรองแบบคัดขนาด ดังนั้นปัญหาที่มักเกิดขึ้นในการทำงาน คือ การอุดตันที่เกิดจากสิ่งสกปรกต่างๆ ที่อยู่ในน้ำ ทำให้อัตราการผลิตน้ำ (Permeate flux) และอายุการใช้งานของเมมเบรนลดลง ซึ่งปัจจัยต่างๆ มีดังนี้

#### (1) ลักษณะสมบัติของน้ำดิบ

ความเข้มข้นและชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ จะมีผลถึงลักษณะสมบัติของน้ำที่จะผ่านเมมเบรนโดยตรง โมเลกุลสารอินทรีย์ที่ติดค้างจะทำปฏิกิริยากับเมมเบรน เช่น ดูดติด เกิดเจล



ขึ้นที่บริเวณผิวของเมมเบรนกับความต้านทานการไหลที่ต่างๆ กันองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในน้ำจะแตกต่างกันในแต่ละแห่ง และเปลี่ยนแปลงเป็นบางครั้งในแหล่งเดียวกัน

### (2) วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดของรูพรุนของเมมเบรน และการกระจายขนาดของรูพรุนในเมมเบรน มีผลต่อลักษณะการอุดตันในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) วัสดุที่ใช้ทำเมมเบรนแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม คือ วัสดุที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และวัสดุที่ไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) โดยเมมเบรนชนิดที่ชอบน้ำจะดูดซับสารอินทรีย์น้อยกว่าเมมเบรนแบบไม่ชอบน้ำ ด้วยเหตุนี้จึงสามารถกล่าวได้ว่า การเกิดการอุดตันจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารอินทรีย์ในน้ำ และชนิดของวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน

### (3) การปรับสภาพน้ำเบื้องต้น

สารปนเปื้อนที่พบในแหล่งน้ำธรรมชาติ แบ่งเป็น 4 ประเภทคือ อนุภาคแขวนลอย (ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์ แต่จะรวมถึงสารอินทรีย์ด้วย) เกลืออนินทรีย์ละลาย สารอินทรีย์ ละลายจุลชีพ ซึ่งสารเหล่านี้จะทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนและอัตราการผลิตน้ำลดลง วิธีการป้องกันการอุดตันอาจทำได้โดยการปรับสภาพน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (UF) ได้แก่ การกำจัดอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ การเติมสารโคแอกกูแลนต์หรือผงถ่านกัมมันต์ การปรับ pH และอุณหภูมิ

### (4) ความดัน

การเพิ่มแรงดันมากขึ้นจะทำให้อัตราการผลิตน้ำและคุณภาพน้ำที่ได้ดีขึ้น แต่ถ้าแรงดันเพิ่มขึ้นจนเกินขีดจำกัด จะทำให้อนุภาคและโครงสร้างต่างๆ ที่สะสมบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนอัดตัวกันแน่น จนทำให้ค่าฟลักซ์ลดลง และอาจทำลายโครงสร้างภายในของเมมเบรนจนไม่อาจคืนสภาพการกรองน้ำได้ดังเดิม

### (5) ความเร็วของการไหลของของเหลว

การไหลของของเหลวด้วยความเร็วสูงผ่านเมมเบรนทำให้เกิดแรงเฉือน ซึ่งจะช่วยลดการอุดตันที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้อัตราการผลิตน้ำสูงขึ้น ในการประยุกต์ใช้อัตราการเกิดแรงเฉือนสามารถควบคุมโดยปั๊มและรูปร่างทางเรขาคณิตของเมมเบรนได้

ตารางที่ 2.10 เปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนชนิดต่างๆ (Zeman and Zydney, 1996)

| Process         | Materials remover   | Applications  | Trans-membrane Pressure kPa (psi) |
|-----------------|---|---|-----------------------------------|
| Microfiltration | ของแข็งละลายน้ำและ<br>สารแขวนลอยขนาดใหญ่  | กำจัดแบคทีเรีย สาร<br>แขวนลอย และของแข็ง<br>ละลายน้ำทั้งหมด                         | 69 – 173 (90-25)                  |
| Ultrafiltration | สารแขวนลอย โปรตีน<br>เชื้อจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อนใน<br>น้ำ และสารอินทรีย์<br>โมเลกุลขนาดใหญ่              | กำจัดไวรัส สาร<br>แขวนลอย และ โมเลกุล<br>สารอินทรีย์                                | 103 – 690 (15 – 100)              |
| Nanofiltration  | สารอินทรีย์ที่มีน้ำหนัก<br>โมเลกุลมากกว่า 200-400<br>ดาลตัน หรือปริมาณ<br>สารอินทรีย์คาร์บอน<br>ทั้งหมด | กำจัดสี ความกระด้าง<br>ลดปริมาณของแข็งไม่<br>ละลายน้ำทั้งหมด                        | 345 – 1550(50 – 225)              |
| Reverse osmosis | เกลือที่ไม่ละลายน้ำ<br>สารอินทรีย์และสารอนิน-<br>ทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาด<br>ใหญ่กว่า 100 ดาลตัน           | การกำจัดเกลือ การนำ<br>น้ำเสียกลับมาใช้ใหม่<br>กระบวนการผลิต<br>อาหารและเครื่องดื่ม | 1379 – 6895<br>(200 – 1000)       |

ประโยชน์ของกระบวนการเมมเบรนเมื่อเปรียบเทียบกับเทคโนโลยีการบำบัดน้ำแบบธรรมดา (Anselme และคณะ, 1993) มีดังนี้คือ

- เป็นการกรองซึ่งแยกออกอย่างสมบูรณ์ ตรงข้ามกับการกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง
- การแยกของแข็งออกจากของเหลวและการฆ่าเชื้อโรค โดยไม่มีการเติมสารเคมี
- ไม่พบสารโคแอกกูเลชัน และสารฆ่าเชื้อโรค เหลือตกค้างในน้ำออก
- ขนาดกะทัดรัด และช่วยลดต้นทุนการเดินระบบและบำรุงรักษา
- การใช้เครื่องจักรแทนการทำงานของมนุษย์

- คุณภาพของน้ำที่ผ่านการกรองคงที่และมีคุณภาพสูง แม้ว่าคุณภาพแหล่งน้ำเปลี่ยน

ปัจจุบันนี้ เริ่มมีการใช้กระบวนการเมมเบรนในการปรับปรุงคุณภาพน้ำแทนกระบวนการบำบัดแบบธรรมดา เนื่องจากเหตุผลดังที่ได้กล่าวไว้แล้วข้างต้น

### 5) แฟลคเตอร์ที่มีผลต่อสมรรถนะของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

แฟลคเตอร์สำคัญที่มีผลต่อสมรรถนะของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่

1. ความเร็วของสารป้อนที่ผิวหน้าของเมมเบรน เมื่อความเร็วเพิ่มขึ้น Permeate rate จะเพิ่มขึ้น ลดการเกิด Fouling ที่ผิวหน้าของเมมเบรน แต่ต้องสูญเสียพลังงานสูงขึ้นและต้องการปั๊มตัวใหญ่ขึ้น จึงต้องหาจุดที่เหมาะสมที่สุดของขนาดปั๊มและ Permeate rate

2. ความดันโดย Permeate rate เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความดันที่ให้แก่ระบบ อย่างไรก็ตาม การเพิ่มความดัน ทำให้การเกิด Fouling และการอัดตัวของเมมเบรน (Compaction) สูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีข้อจำกัดเรื่องความแข็งแรงของเมมเบรนในโมดูลบางแบบ เช่น Capillary type

3. อุณหภูมิโดย Permeate rate สูงขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น อย่างไรก็ตาม อุณหภูมิไม่ได้เป็นตัวแปรที่ถูกควบคุม แต่สิ่งที่สำคัญ คือผลของอุณหภูมิต่อฟลักซ์เพื่อให้สามารถวินิจฉัยได้ว่าการลดลงของฟลักซ์เนื่องมาจากผลของอุณหภูมิหรือผลของพารามิเตอร์อื่นๆ

### 6) การประยุกต์ใช้งานอัลตราฟิลเตรชัน

ตัวอย่างการประยุกต์ใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ได้แก่

1. การแยกน้ำมันออกจากน้ำเสียของอิมัลชันน้ำมัน (Oil emulsion waste treatment)  
2. การแยกหางนมออกจากนมเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของนมในอุตสาหกรรมทำนม (Milk concentration)

3. การเพิ่มความเข้มข้นของแมโครโมเลกุลชีวภาพ (Concentration of biological macromolecule)

4. การแยกโมเลกุลสีเพื่อนำกลับไปใช้ใหม่ (Electro coat paint recovery)

5. การเพิ่มความเข้มข้นของสารไซซิ่งในอุตสาหกรรมสิ่งทอ (Concentration of textile sizing)

6. การเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนที่สูญเสียสมบัติเมื่อได้รับความร้อนในสารเติมแต่งอาหาร (Concentration of heat sensitive proteins for food additives)

7. การเพิ่มความเข้มข้นของเจลาติน (Concentration of gelatin)

8. การเตรียมเอ็นไซม์และยาปรุงแต่ง (Enzyme and pharmaceutical preparations)

9. การบำบัดน้ำเสียจากโรงเยื่อกระดาษ (Pulp mill waste treatment)
10. การเตรียมน้ำบริสุทธิ์เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ (Production of ultrapure water for electronics industry)
11. การแยกแมคโครโมเลกุลแทนวิธีการแยกด้วยการเปลี่ยนเฟสแบบดั้งเดิม (Macromolecular separations replacing the conventional change of phase methods)
12. การแยกและเพิ่มความเข้มข้นขององค์ประกอบที่แอ็กทีฟต่อจุลินทรีย์ (Separation and concentration of biologically active components)
13. การแยกโปรตีนจากพืช สาหร่าย หรือแพลงก์ตอน (Protein harvesting, useful for grass Proteins, algal/plankton proteins)
14. การแยกสารประกอบพอลิเมอร์ (Rejection of highly polymerized compounds and organics)
15. การเพิ่มความเข้มข้นของเลือด (Blood concentration)

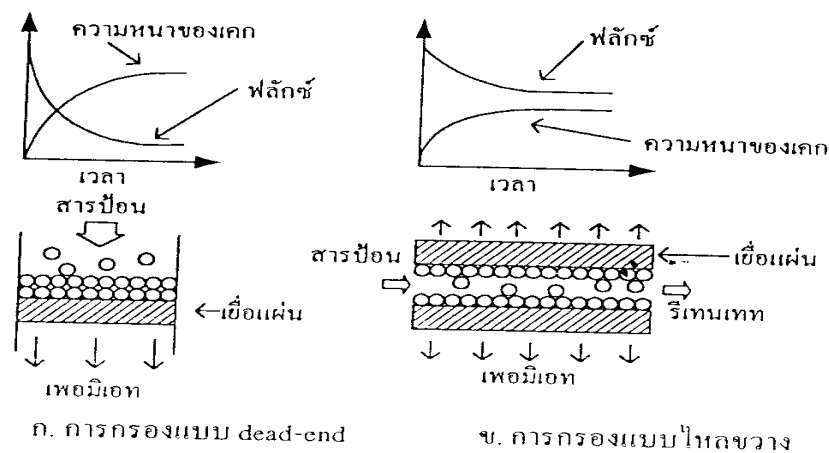
## 2.6 ลักษณะการกรอง

ลักษณะการกรองโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ

**2.6.1 การกรองแบบไหลตามแนวตั้ง (Dead-End)** เป็นการเพิ่มความดันป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน สารแขวนลอยที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของแผ่นเมมเบรนจะถูกกักไว้บนผิวหน้าของเมมเบรน หรืออยู่ในรูพรุนของเมมเบรน จะทำให้เกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวหน้าของเมมเบรนและการสะสมอย่างต่อเนื่องของอนุภาคบนผิวของเมมเบรน เรียกว่า เค้ก (Cake) ปริมาณ Permeate ที่ได้จะลดลงอย่างมาก ทำให้ฟลักซ์ลดลงต้องทำการกำจัดเค้กก่อนที่จะทำการกรองครั้งต่อไป ในทางปฏิบัติอาจต้องทำการล้างเมมเบรนบ่อยครั้งหรือเปลี่ยนเมมเบรนใหม่ก่อนทำการต่อไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ การกรองแบบไหลตามแนวตั้งเหมาะที่จะใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคนขนาดเล็ก ความเข้มข้นต่ำและการดำเนินระบบเป็นแบบกะ

**2.6.2 การกรองแบบไหลตามแนวขวาง (Cross-Flow)** เป็นการป้อนสารละลายขนานกับแผ่นเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางไหลของเพอร์มิเอต เรียกว่า Cross-Flow หรือ Tangential Flow จะใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับและกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน สารละลายแบบไหลตามแนวขวางจะมีแรงเฉือนเกิดขึ้น ทำให้อนุภาคที่อยู่บนผิวของเมมเบรนหลุดออกลดการเกิด Concentration Polarization (CP) และเค้กที่สะสมบนเมมเบรนมีปริมาณน้อย ฟลักซ์น้อยกว่าในการกรองแบบไหลตามแนวตั้งเหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง

สำหรับการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน เป็นการเพิ่มความดันป้อนสารละลายให้ไหลในแนวขนานกับแผ่นเมมเบรน หรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของ Permeate ดังแสดงในรูปที่ 2.12 ซึ่งทำให้เกิดแรงเฉือนบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนกวาดอนุภาคที่เกาะบริเวณนั้นให้กลับเข้าไปในสารละลายอย่างต่อเนื่อง ทำให้สามารถควบคุมการอุดตันของเมมเบรนได้ดี ปริมาณ Permeate ที่ได้จึงมีค่าสูงกว่าการกรองแบบแรก ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน จึงเป็นการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (UF) แบบไหลตามแนวขวางโดยส่วนใหญ่



รูปที่ 2.12 การเปรียบเทียบการกรองแบบการไหลตามแนวตั้งและการไหลตามแนวขวาง

(Ripperger และคณะ, 1989)

จากลักษณะของการกรองทั้ง 2 แบบ ทำให้เกิดการอุดตันของเมมเบรนและมีผลต่ออัตราการซึมผ่านเมมเบรน ซึ่งการอุดตันมีลักษณะดังจะกล่าวต่อไปนี้

### 2.6.3 ลักษณะการอุดตันบนเมมเบรน

การอุดตันบนเมมเบรน มีผลต่อการกรองเป็นอย่างมาก หากเกิดการอุดตันแล้วจะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการกรองบนแผ่นเมมเบรน จะทำให้ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนมีค่าลดลง (Flux decline) ซึ่งสิ่งที่เกิดขึ้นดังที่กล่าวต่อไปเป็นผลซึ่งนำไปสู่การอุดตันได้มีดังนี้

#### 2.6.3.1 ลักษณะการเกิดการอุดตันบนเมมเบรน

1) **ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (Concentration Polarization: CP)** เป็นปรากฏการณ์ที่พบโดยทั่วไปบนเมมเบรน คือ การสะสมอนุภาคหรือโมเลกุลของตัวถูกละลายที่บริเวณผิวของเมมเบรนภายในชั้น Boundary Layer ซึ่งเป็นชั้นที่ใกล้ผิวหน้าของเมมเบรน โดย CP จะเกิดในสารละลายไปสิ้นสุดที่ผิวหน้าเมมเบรน ซึ่งในชั้นนี้จะเป็นอิสระและขัดขวางการ

ไหลผ่านเมมเบรน ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรน ( $C_w$ ) นี้จะมีความเข้มข้นสูงกว่าบริเวณที่อยู่ห่างออกไป ( $C_b$ )

**2) การเกิดชั้นเจล (Gel Layer)** เป็นชั้นของโมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ที่สะสมอยู่ในบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน พบมากในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เมื่อความเข้มข้นของสารดังกล่าวที่ผิวหน้าเมมเบรนสูงขึ้นอาจถึงขีดจำกัดของการละลายที่สามารถละลายได้ ( $C_g = \text{Gel concentration}$ ) ของสารตัวนั้นๆ ซึ่งตัวถูกละลายอาจมีลักษณะคล้ายกับเจลที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าเมมเบรน ทำให้ความต้านทานการไหลนั้นสูงมากขึ้นกว่าเดิม อัตราการไหลของสารละลายจะมีค่าลดลงจากค่าเดิม และยังทำให้ค่า Recovery สารของเมมเบรนเปลี่ยนแปลงด้วยการเกิดชั้นเจลสามารถทำให้ค่าฟลักซ์เพิ่มขึ้นได้โดยการเปลี่ยนสภาวะการทำงานหรือการล้างน้ำ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้นั่นเอง

**3) การเกิดชั้นเค้ก (Cake Formation)** เป็นกลไกที่มีความใกล้เคียงกันในการเกิดของชั้นเจล แต่มีความแตกต่างกันระหว่างเค้กและเจลอยู่ที่เค้กเป็นการสะสมเป็นชั้นอนุภาคของสารหรือสารแขวนลอย แต่เจลเป็นการสะสมของสารโมเลกุลขนาดใหญ่ ถ้าในสารมีอนุภาคที่มีขนาดเล็กและใหญ่ปนกันอยู่ อนุภาคขนาดเล็กจะถูกสะสมในรูพรุนของเมมเบรนจนแน่น ต่อจากนั้นจะเกิดการสะสมของอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ตามมา แล้วเกิดเป็นเค้กที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งเมื่อวัดความหนาแล้วเจลจะมีความหนาในระดับไมครอน แต่เค้กจะมีความหนาเป็นมิลลิเมตร

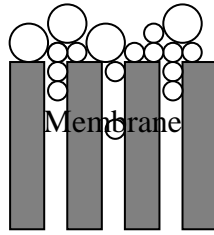
**4) การอุดตันรูพรุน (Pore Blockage)** คือ การอุดตันรูพรุนของแผ่นเมมเบรน ซึ่งลักษณะการเกิดการอุดตันของแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่างๆ เมื่อเทียบกับตัวถูกละลาย

1. ถ้าเมมเบรนมีขนาดของรูพรุนที่แน่น และมีขนาดเล็กกว่าตัวถูกละลายเล็กน้อย จะทำให้เกิดการอุดตันที่ผิวของเมมเบรน

2. ถ้าเมมเบรนมีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายเล็กน้อย ทำให้เกิดการอุดตันในรูพรุนก่อน ต่อจากนั้นจะเริ่มสะสมที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ส่วนมากจะมีการอุดตันบนผิวหน้าของเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่

3. ถ้าเมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายมากๆ จะทำให้เกิดการอุดตันภายในรูพรุนก่อนแล้วต่อจากนั้นจะเกิดการสะสมบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

4.1) Complete Pore Blocking เป็นการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากมีอนุภาคตกตะกอนและค้างบนผิวของเมมเบรนเกิดการปิดทับรูพรุนของเมมเบรน ทำให้จำนวนรูพรุนของเมมเบรน ลดลงแสดงในรูปที่ 2.13 และสามารถคำนวณค่าการอุดตัน ดังสมการที่ (2.12)



รูปที่ 2.13 ลักษณะการอุดตันแบบ Complete Pore Blocking

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_A(J_v) \quad 2.12$$

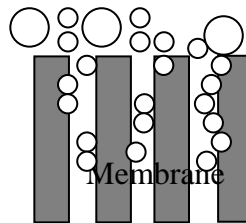
โดยที่

$\frac{dJ_v}{dt}$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน

$J_v$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็น  $\text{Lm}^{-2}\text{hr}^{-1}\text{kPa}^{-1}$

$k_A$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการซึมผ่านแบบ Complete Pore Blocking ( $\text{hr}^{-1}$ )

4.2) Pore Constriction or Standard Blocking เป็นการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากเกิดการอุดตันบนผิวของเมมเบรนและรูพรุนของเมมเบรนมีขนาดลดลง แสดงในรูปที่ 2.14 และสามารถคำนวณค่าการอุดตัน ดังสมการที่ (2.13)



รูปที่ 2.14 ลักษณะการอุดตันแบบ Pore Constriction or Standard Blocking

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{0.5}(J_v) \quad (2.13)$$

โดยที่

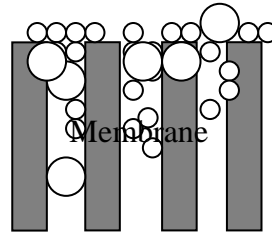
$\frac{dJ_v}{dt}$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน

$J_v$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็น  $\text{Lm}^{-2}\text{hr}^{-1}\text{kPa}^{-1}$

$k_B$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการซึมผ่านแบบ Pore Constriction or Standard Blocking

4.3) Intermediate Blocking เป็นการลดลงของฟลักซ์ เนื่องจากเกิดการอุดตันของอนุภาคบนผิวหน้าของเมมเบรนในช่วงระยะเวลาสั้น หรืออนุภาคอาจปิดบางส่วนของผิวหน้าเมม

เบรนทำให้ชั้นความหนาของการกรองเพิ่มมากขึ้น แสดงในรูปที่ 2.15 และสามารถคำนวณค่าการ  
 อดตัน ดังสมการที่ (2.14)



รูปที่ 2.15 ลักษณะการอดตันแบบ Intermediate Blocking

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v (J_v) \quad (2.14)$$

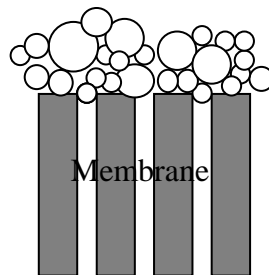
โดยที่

$\frac{dJ_v}{dt}$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน

$J_v$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็น  $\text{Lm}^{-2}\text{hr}^{-1}\text{kPa}^{-1}$

$k_C$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการซึมผ่านแบบ Intermediate Blocking

4.4) Cake Formation Model เป็นการเกิดก้อนแข็งบนผิวของเมมเบรนเนื่องจาก  
 ความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีค่ามากขึ้นซึ่งมีผลทำให้ฟลักซ์ลดลง แสดงในรูปที่ 2.16 และสามารถ  
 คำนวณค่าการอดตัน ดังสมการที่ (2.15)



รูปที่ 2.16 ลักษณะการอดตันแบบ Cake Formation Model

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^2 (J_v) \quad (2.15)$$

โดยที่

$\frac{dJ_v}{dt}$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน

$J_v$  คือ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็น  $\text{Lm}^{-2}\text{hr}^{-1}\text{kPa}^{-1}$

$k_D$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการซึมผ่านแบบ Cake Formation Model



### 2.6.3.2 ปัจจัยที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนเมมเบรน

สิ่งที่มีผลที่ก่อให้เกิดการอุดตันบนเมมเบรน และทำให้ค่าฟลักซ์ลดลงนั้นมีหลายปัจจัยด้วยกัน ซึ่งปัจจัยเริ่มต้นมาจากคุณภาพของน้ำที่นำมาผ่านเมมเบรน คุณลักษณะของเมมเบรน ความดัน ความเข้มข้นของสารละลาย ความแรงประจุ (Ionic Strength) ค่าพีเอชและอุณหภูมิของสารละลาย ขนาดน้ำหนักโมเลกุลของสาร ลักษณะการกรองผ่านเมมเบรน เป็นต้น

1) **รูพรุน** ขนาดของรูพรุน หมายถึง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหรือขนาดความกว้างของรูพรุน ดังนั้น เมมเบรนแบบไมโครฟิลเตรชันจัดว่ามีรูพรุนขนาดใหญ่ และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเป็นขนาดกลาง ถ้าขนาดของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร นิยมเรียกว่า เมมเบรนแบบแน่นมากกว่าที่เรียกว่ามีรูพรุนขนาดเล็ก

2) **ประจุหรือความมีขั้วของเมมเบรน** จากการที่อัตราการไหลและค่า Recovery ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างเมมเบรนและตัวถูกละลาย ทำให้ผู้ใช้ต้องมีความเข้าใจและสามารถที่จะเลือกเมมเบรนให้เหมาะสมกับตัวถูกละลายที่ต้องการจะทำการแยก เช่น เซลลูโลสอะซิเตตและโพลีเอไมด์จะแสดงความเป็นขั้วเล็กน้อย ในขณะที่โพลีเมอร์อื่นๆ อาจจะมีคุณสมบัติที่เป็นกลาง

3) **ความดัน** สารละลายที่ประกอบด้วยสาร โมเลกุลขนาดใหญ่ที่สามารถเกิดเจลได้ ที่ความเข้มข้นสูง จะมีผลต่อความดันของฟลักซ์คือ ฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นกับความดันในช่วงแรกหรือก่อนการเกิดเจล และในช่วงเกิดเจล แรงดันที่เพิ่มขึ้นทำให้ชั้นเจลอัดแน่น ฟลักซ์จึงไม่เพิ่มขึ้นแต่มีแนวโน้มคงที่ ส่วนของการกักสารจะขึ้นอยู่กับลักษณะของชั้นเจล ส่วนระบบที่ความเข้มข้นต่ำและตัวถูกละลายไม่สามารถเกิดเจลได้ การเพิ่มความดันทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่อัตราการเพิ่มมักจะช้าลงในช่วงความดันสูงขึ้น เนื่องจากผลของ CP

4) **ความชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ (Hydrophilicity and Hydrophobicity)** เมมเบรนที่มีคุณสมบัติชอบน้ำจะให้มุมสัมผัส (Contact angle) ที่เกิดขึ้นระหว่างผิวหน้าของเมมเบรนกับเส้นสัมผัสหยดน้ำมีค่าอยู่ระหว่าง 0-90 องศา โดยค่ามุมสัมผัสที่ต่ำกว่า แสดงว่าสามารถทำให้เมมเบรนเปียกน้ำได้มากขึ้น เมมเบรนที่ชอบน้ำมากๆ ทำให้โมเลกุลน้ำมารวมกันเกิดเป็นชั้นน้ำบริสุทธิ์ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ขณะเดียวกันจะผลักโมเลกุลของสารอื่นให้ห่างออกไปจากผิวหน้าของเมมเบรนจึงเกิดการถ่ายโอนเฉพาะ โมเลกุลน้ำผ่านเมมเบรนออกไปทางรูพรุน หรือในกรณีของเมมเบรนแบบเนื้อแน่นจะเกิดการดูดซับ โมเลกุลน้ำเข้าไปในเนื้อเมมเบรนและแพร่ผ่านเมมเบรนออกไปอีกด้านหนึ่ง ส่วนอนุภาคที่แขวนลอยในน้ำ มักมีสมบัติไม่ชอบน้ำมีแนวโน้มชอบจับตัวกันเป็นอนุภาคคอลลอยด์ (Colloidal particle) และชอบที่จะเข้าจับติดกับผิวของเมมเบรน ส่งผลให้สมบัติความชอบน้ำของเมมเบรนเสียไปทำให้เกิดการอุดตันของรูพรุนบนเมมเบรน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า “ความสกปรกของผิว (Fouling)” (ขันทอง สุนทรภา, 2545)

5) ความเข้มข้นของสารละลาย ความเข้มข้นมีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน จากการเกิด Concentration polarization ชั้นของสารที่สัมผัสผิวหน้าของเมมเบรนคือ ชั้น Boundary Layer หากสารละลายมีความเข้มข้นมากการสะสมตัวของสารละลาย เช่น สารอินทรีย์จะไปตกอยู่ในชั้นนี้ ทำให้ผิวหน้าของเมมเบรนมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงกว่าบริเวณที่ห่างจากผิวหน้าของเมมเบรนออกไป หากไม่มีความปั่นป่วนเกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน จะทำให้เกิด Concentration polarization ได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งส่งผลต่อการอุดตันตามมาต่อไป

6) พีเอชและอุณหภูมิของสารละลาย การเพิ่มอุณหภูมิของน้ำแต่ละองศาในช่วง 15-30 องศาเซลเซียส ช่วยให้อัตราการซึมผ่านเมมเบรนมีค่ามากขึ้นตามไปด้วยประมาณ 3-5 เปอร์เซ็นต์ เพราะอุณหภูมิมิผลต่อความหนืดของน้ำ ค่าพีเอชของสารอินทรีย์ธรรมชาติมีผลต่อค่าฟลักซ์ที่ลดลง ซึ่งจากการศึกษาของ Kilduff (2004) ทำการทดลองที่ค่าพีเอช 4 7 และ 10 พบว่าค่าความดันออสโมติกที่ค่าพีเอช 4 มีค่าต่ำกว่าที่พีเอช 7 และ 10 จึงทำให้น้ำสามารถซึมผ่านได้ด้วยอัตราที่สูงกว่า

7) ค่าน้ำหนักโมเลกุล (Molecular weight cutoff) Molecular weight cutoff คือ ค่าน้ำหนักโมเลกุลของสารที่ถูกทดสอบที่ถูกเมมเบรนกักไม่ให้ผ่าน 90-95% ซึ่งขนาดน้ำหนักโมเลกุลเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะใช้ทำการศึกษถึงการอุดตันของเมมเบรน โดยจะสังเกตการณ์ลดลงของค่าฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรน หากสารที่นำมากรองผ่านเมมเบรนมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนมากๆ ทำให้เกิดการอุดตันได้ ซึ่งจากการกรองผ่านเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันด้วยสารอินทรีย์ทางธรรมชาติที่มีน้ำหนักโมเลกุลช่วง 6.5-22.6 kDa พบว่าทำให้เกิดการอุดตันอย่างรุนแรง (Lin et al, 2000)

### 2.6.3.3 อัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย

อัตราส่วนระหว่างการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของสารละลาย ( $J/k$ ) นั้น มีความสัมพันธ์กับการอุดตันบนเมมเบรน คือ ถ้าค่า ( $J/k$ ) มีค่ามากก็จะทำให้อัตราการเคลื่อนที่กลับของสารละลายมีน้อย ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการอุดตันได้สูง ส่วน ( $J/k$ ) มีค่าน้อยก็จะทำให้อัตราการเคลื่อนที่กลับของสารละลายมีมาก ทำให้มีโอกาสที่จะเกิดการอุดตันได้ต่ำ เมื่อ  $J$  คือ ค่าฟลักซ์ของน้ำผ่านเมมเบรนต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โดยสามารถที่จะหาได้ด้วย Darcy's Law ในสมการที่ 2.16

$$J = \frac{\Delta P}{\mu Rm} \quad (2.16)$$

โดยที่

$\Delta P$  คือ ค่าของความดันที่ลดลง

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของน้ำ

$Rm$  คือ ค่าความต้านทานของเมมเบรนแผ่นใหม่

#### 2.6.3.4 ความต้านทานแบบอนุกรมของการอุดตัน (Resistance-in-series)

จากสมการของ Darcy's Law ที่ได้แสดงไว้ในสมการที่ 2.16 ในส่วนของค่าความต้านทานของเมมเบรนนั้น เมื่อมีการใช้งานจนเกิดการอุดตันที่ผิวของเมมเบรน ค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจะไม่ได้มีเฉพาะความต้านทานของเมมเบรนเท่านั้น แต่จะมีความต้านทานอันเกิดจากการอุดตันเพิ่มขึ้นไปด้วย ซึ่งค่าความต้านทานที่มีนั้นจะเปลี่ยนเป็นค่าความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นจากการอุดตันบริเวณผิวของเมมเบรน จากการศึกษาของ Cho et al. (2000) พบว่าอัตราการไหลที่ลดลงและการคุดชั้นบนผิวของเมมเบรนซึ่งค่าความต้านทานรวมที่เกิดขึ้นนั้นมีลำดับขั้นตอนการเกิดขึ้นดังนี้

- (1) ใช้น้ำ DI เติมนระบบจนมีอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่คงตัว
- (2) เปลี่ยนมาใช้น้ำตัวอย่างที่มีสารอินทรีย์ธรรมชาติและทำการวัดอัตราการไหลของน้ำสะอาดที่ผลิตได้จนครบเวลา
- (3) หลังจากที่ค่าอัตราการไหลของน้ำที่ผลิตได้ลดลงคงที่อันเนื่องมาจากการอุดตันที่เกิดขึ้น จึงใช้น้ำกลั่นเข้าไปได้ จะทำให้ส่วนของชั้นสารละลายที่มีความเข้มข้นที่สูงออกมา
- (4) ทำการล้างด้วยน้ำกลั่นเป็นรอบที่สองซึ่งจะใช้อัตราการไหลที่สูงกว่าในการทดลองจะเป็นผลทำให้ชั้นของเจลที่เกิดขึ้นหลุดออกมาด้วย
- (5) ทำการล้างด้วยสารละลายเบส (NaOH) ที่ความเข้มข้น 0.001 โมลต่อลิตร สารละลายล้างออกมาได้จะเป็นส่วนของสารที่เกิดการคุดชั้นที่บริเวณผิวของเมมเบรน ซึ่งสามารถหลุดออกมาได้

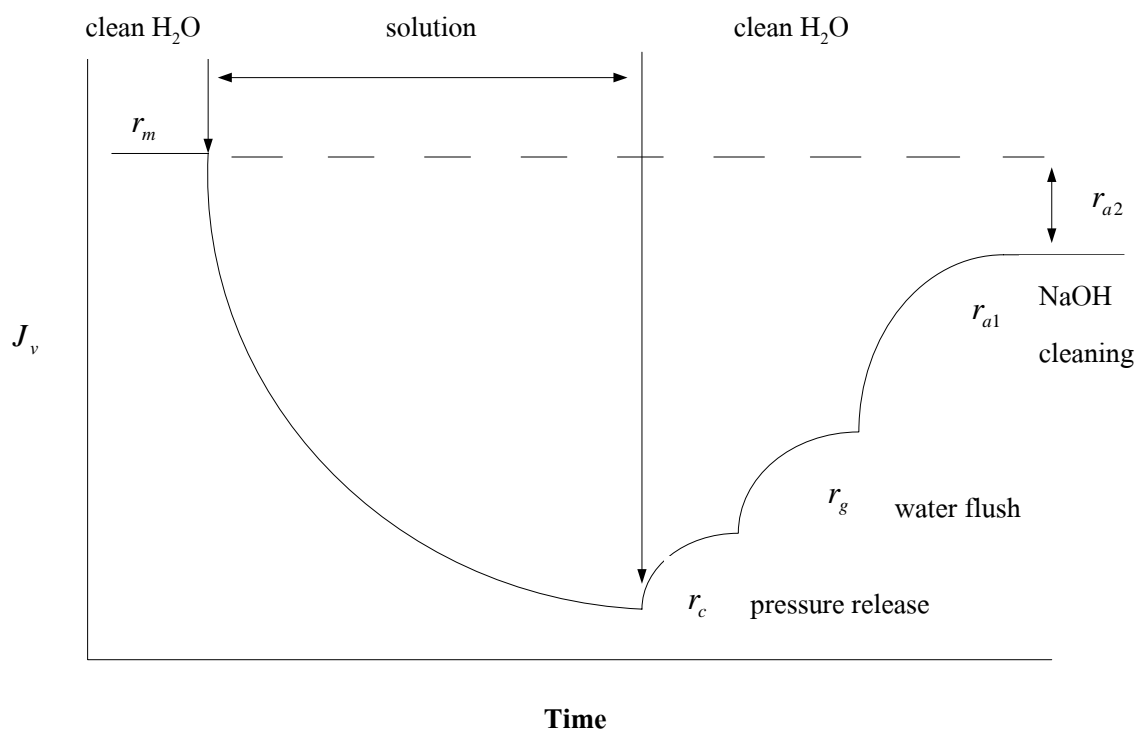
จากขั้นตอนที่กล่าวมาจะทำให้ทราบว่าเกิดค่าความต้านทานประเภทใดขึ้นมาบ้างดังต่อไปนี้

- (1) ค่าความต้านทานที่เกิดจากตัวเมมเบรน ( $r_m$ ) เกิดขึ้นจากเมมเบรนแต่ละชนิด มีขนาดรูพรุนที่ใช้ในการคัดแยกสารที่แตกต่างกัน ซึ่งขนาดของรูพรุนที่ได้กล่าวถึงจะเป็นตัวทำให้เกิดความต้านทานขึ้นมา
- (2) ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของ Concentration Polarization ( $r_c$ ) เกิดขึ้นจากสารอินทรีย์ธรรมชาติ เมื่อทำการทดลองความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนมีความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการกำจัดสารอินทรีย์ธรรมชาติออกจากน้ำ
- (3) ค่าความต้านทานเกิดจากชั้นเจล ( $r_g$ ) เกิดขึ้นจากเมื่อบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนมีความเข้มข้นที่สูงขึ้น จนเกินขีดจำกัดของการละลายสารที่มีอยู่ในน้ำ จะมีลักษณะคล้ายเจลเกิดขึ้นที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรน

(4) ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างอ่อน ( $r_{a1}$ ) เกิดจากการดูดซับเกิดขึ้นบนผิวหน้าของเมมเบรน ซึ่งการดูดซับนี้สามารถล้างออกได้โดยใช้สารเคมี

(5) ค่าความต้านทานที่เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร ( $r_{a2}$ ) เกิดจากการดูดซับอย่างถาวร ซึ่งจะติดแน่นอยู่กับเมมเบรนซึ่งจะไม่สามารถทำความสะอาดด้วยสารเคมีได้

จากขั้นตอนดังกล่าวมาเมื่อนำมาเขียนเป็นกราฟจะได้ดังรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แผนภาพแสดงค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากการอุดตัน (Cho et al, 2000)

พบว่าค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากชั้นของสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ชั้นของเจล และชั้นที่เกิดจากการดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของเมมเบรนนั้น เมื่อได้มีการทำความสะอาดแล้วพบว่าสามารถทำความสะอาดได้ แต่ไม่เท่าระดับเดิม เนื่องจากมีสารที่อุดตันอยู่อย่างถาวร ซึ่งไม่สามารถทำความสะอาดได้อยู่บนเมมเบรน ซึ่งจากกราฟที่ได้นั้นสามารถเขียนสมการได้ดังสมการที่ 2.17

$$J_v = \frac{\Delta P}{\mu (r_m + r_c + r_g + r_{a1} + r_{a2})} \quad (2.17)$$

โดยที่

$J_v$  คือ ค่าอัตราการไหล (ฟลักซ์) ( $L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1} \cdot kPa^{-1}$ )

$\Delta P$  คือ ค่าความดันที่ลดลง (kPa)

$\mu$  คือ ค่าความหนืดของน้ำ (kPa.s)

$r_m$  คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากเมมเบรน ( $m^{-1}$ )

$r_c$  คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของสารละลายที่มีความเข้มข้น ( $m^{-1}$ )

$r_g$  คือ ค่าความต้านทานที่เกิดจากชั้นของเจล ( $m^{-1}$ )

$r_{a1}$  คือ ค่าความต้านทานที่การดูดซับที่สามารถล้างออกได้ ( $m^{-1}$ )

$r_{a2}$  คือ ค่าความต้านทานที่ไม่สามารถล้างออกได้ (Cho, 2000) ( $m^{-1}$ )

### 2.6.3.5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการฟาวลิง

#### 1) Complete blocking model

สำหรับระบบการกรองแบบการไหลตามแนวขวาง (cross-flow) จะมีเทอม  $J^*$  เพิ่มเข้ามา เมื่อ  $J^*$  เป็นเทอมรวมอยู่ในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของการฟาวลิง (mathematical fouling model) แสดงโดย Field et al. (1995) ในแบบจำลองของ complete blocking (pore blockage) model อัตราของการเปลี่ยนแปลงในจำนวนของรูพรุนของเมมเบรน จะสมมติให้เป็นสัดส่วนกับอัตราของการพอกอนุภาคมาค้างบนผิวของเมมเบรน ดังสมการที่ (2.18) (Zeman และ Zydney, 1996)

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha_{block} A_m C_{reten} (J_v - J^*) \quad (2.18)$$

เมื่อ  $\alpha_{block}$  คือ ประสิทธิภาพการซึมผ่านเมมเบรน ในแบบจำลองนี้ จะสมมติให้  $R_f$  มีค่าเล็กน้อย และสามารถใช้สมการที่ (2.19) และ (2.20) ซึ่งแสดงให้เห็นแบบจำลองของ pore blockage model

$$\frac{dJ_v}{J_0 dt} = \frac{dN}{N dt} \quad (2.19)$$

$$\frac{dJ_v}{dt} = -\frac{\alpha_{block} A_m C_{reten} J_0}{n_0} (J_v - J^*) = -k_A (J_v - J^*) \quad (2.20)$$

เมื่อ  $k_A$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการซึมผ่านแบบ pore blockage model ( $min^{-1}$ ) และ  $n_0$  คือ จำนวนของรูพรุนเมมเบรน

## 2) Standard blocking model

ในแบบจำลอง standard blocking (pore constriction) model จะสมมติให้อัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของรูพรุนเมมเบรนสัมพันธ์กับอัตราของการพาดูภาคมาค้ำบนผิวของเมมเบรน ดังสมการที่ (2.21)

$$\frac{d}{dt}(\pi r_p^2 \delta_m) = -\alpha_{pore} A_m C_{reten} (J_v - J^*) \quad (2.21)$$

เมื่อ  $\alpha_{pore}$  คือ ประสิทธิภาพมาตรฐานของการกักกันรูพรุน ในแบบจำลองนี้ จะสมมติให้  $R_f$  มีค่าเล็กน้อย และสามารถใช้สมการที่ (2.22) และ (2.23) ซึ่งแสดงให้เห็นแบบจำลองของ pore constriction model

$$\frac{dJ_v}{J_v^{0.5} J_0^{0.5} dt} = 2 \cdot \frac{d(r_p^2)}{r_0^2 dt} \quad (2.22)$$

$$\frac{dJ_v}{dt} = -\frac{(2 \cdot \alpha_{pore} A_m C_{reten} J_0^{0.5})}{\pi r_0^2 \delta_m} J_v^{0.5} (J_v - J^*) = -k_B J_v^{0.5} (J_v - J^*) \quad (2.23)$$

เมื่อ  $k_B$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการซึมผ่านสำหรับ pore constriction model [LMH<sup>-0.5</sup> .min<sup>-1</sup> or m<sup>-0.5</sup> .min<sup>-0.5</sup>]

$r_0$  คือ รัศมีของรูพรุนเมมเบรนตอนเริ่มต้น [m]

$r_p$  คือ รัศมีของรูพรุนเมมเบรนหลังจากผ่านการกรองแล้ว [m]

## 3) Intermediate blocking model

ในแบบจำลอง intermediate blocking model จะสมมติให้อัตราการเปลี่ยนแปลงความหนาของชั้นเค้ก (ที่อยู่บนผิวของแผ่นเมมเบรน) สัมพันธ์กับอัตราของการพาดูภาคมาค้ำบนผิวของเมมเบรน ดังสมการที่ (2.24) ในแบบจำลองนี้ ค่า  $R_f$  จะเป็นสัดส่วนกับความลึกของรูปแบบชั้นเค้กในระหว่างการกรอง ดังสมการที่ (2.25) อธิบายค่าความต้านทานไฮดรอลิกของอนุภาคการเกิดเค้ก

$$\frac{d\delta_c}{dt} = \alpha_{cake} A_m C_{reten} (J_v - J^*) \quad (2.24)$$

$$R_f = \hat{R}_c \delta_c = \frac{180(1 - \varepsilon_c)^2}{d_p^2 \varepsilon_c^3} \delta_c \quad (2.25)$$

- เมื่อ  $\delta_c$  คือ ความลึกของอนุภาคเค้ก [m]  
 $\hat{R}_c [= \rho\alpha_{cake}]$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของเค้ก [ $m^{-2}$ ] ยึดสมการ Carman-Kozeny  
 $\rho$  คือ ความหนาแน่นของอนุภาคเค้ก [ $mg\ m^{-3}$ ]  
 $\alpha_{cake}$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของเค้ก [ $m\ mg^{-1}$ ]  
 $\varepsilon_c$  คือ ขนาดรูพรุนของเค้ก  
 $d_p$  คือ เส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคเค้ก [m]

และสามารถใช้สมการที่ (2.26), (2.27) และ (2.28) ซึ่งแสดงให้เห็นแบบจำลองของ intermediate blocking model

$$J_v = \frac{J_0 R_m}{(R_m + R_f)} \quad (2.26)$$

$$\frac{dJ_v}{dt} = -\frac{\alpha_{cake} J_0 R_m \hat{R}_c}{(R_m + R_f)^2} \frac{d\delta_c}{dt} = -\frac{\alpha_{cake} \hat{R}_c A_m C_{reten}}{(R_m + R_f)} J_v (J_v - J^*) \quad (2.27)$$

$$\frac{dJ_v}{dt} = -k_c J_v (J_v - J^*) \quad (2.28)$$

เมื่อ  $k_c$  คือ ค่าคงที่ของอัตราการซึมผ่านแบบ intermediate blocking model [ $LMH^{-1} \cdot min^{-1}$  or  $m^{-1}$ ] และ ค่า  $R_f$  จะมีค่าน้อยกว่าค่า  $R_m$

#### 4) Cake formation model

ในแบบจำลอง cake formation model จะสมมติให้ค่าความต้านทานไฮดรอลิกเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดอนุภาคของเค้ก เป็นสัดส่วนกับมวลของเค้ก  $m_{cake}$  จะอธิบายในสมการที่ (2.29) และสมการที่ (2.30) จะแสดงให้เห็นอัตราการตกตะกอนของอนุภาคจะแปรผันตรงกับอัตราการพาอนุภาคมาค้างบนผิวของเมมเบรน

$$R_c = \left( \frac{\alpha_{cake}}{A_m} \right) \cdot m_{cake} \quad (2.29)$$

$$\frac{dm_{cake}}{dt} = A_m C_{reten} (J_v - J^*) \quad (2.30)$$

เมื่อ  $\alpha_{cake}$  คือ ค่าความต้านทานจำเพาะของเค้ก [ $m \cdot mg^{-1}$ ] และ  $m_{cake}$  คือ มวลของเค้ก [mg] สมการที่ (2.26) สามารถเปลี่ยนรูปได้ อธิบายได้ดังสมการที่ (2.31) สมการที่ (2.29),

(2.30) และ (2.31) สามารถใช้สมการที่ (2.32) และ (2.33) ซึ่งแสดงให้เห็นแบบจำลองของ cake formation model

$$\frac{1}{J_v} - \frac{1}{J_0} = \frac{R_c}{J_0 R_m} = \frac{\alpha_{cake} C_{reten}}{J_0 R_m} \int_0^t (J_v - J^*) dt \quad (2.31)$$

$$-\frac{dJ_v}{J_v^2} = \frac{\alpha_{cake} C_{reten}}{J_0 R_m} (J_v - J^*) dt \quad (2.32)$$

$$\frac{dJ_v}{dt} = -\frac{\alpha_{cake} C_{reten}}{J_0 R_m} J_v^2 (J_v - J^*) = -k_D J_v^2 (J_v - J^*) \quad (2.33)$$

เมื่อ  $k_D$  คือ ค่าคงที่ของแบบจำลองอัตราการเกิดรูปแบบเค้ก [ $LHM^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$  or  $\text{min m}^{-2}$ ]

สมการที่ (2.20), (2.23), (2.28) และ (2.33) เป็นสมการพื้นฐานในทางคณิตศาสตร์ที่อธิบายแบบจำลองกลไกการเกิดการฟาวลิงสำหรับ Complete blocking (pore blockage) model, standard blocking (pore constriction) model, intermediate blocking model และ cake formation model ตามลำดับ ตารางที่ 2.11 สรุปอัตราการเกิดฟาวลิงและแบบจำลองกลไกการเกิดการฟาวลิงสำหรับการดำเนินระบบการกรองแบบการไหลตามแนวขวาง

ตารางที่ 2.11 Membrane fouling models for cross-flow operation (Zeman และ Zydney, 1996)

| Model          | Rate  | Equation                                       |
|----------------|---|--|
| Complete       | $\frac{dN}{dt} = -\alpha_{block} A_m C_{reten} (J_v - J^*)$   | $\frac{dJ_v}{dt} = -k_A (J_v - J^*)$           |
| Standard       | $\frac{d}{dt} (\pi r_p^2 \delta m) = -\alpha_{pore} A_m C_{reten} (J_v - J^*)$                                    | $\frac{dJ_v}{dt} = -k_B J_v^{0.5} (J_v - J^*)$ |
| Intermediate   | $\frac{d\delta_c}{dt} = \alpha_{cake} A_m C_{reten} (J_v - J^*)$  | $\frac{dJ_v}{dt} = -k_C J_v (J_v - J^*)$       |
| Cake formation | $R_c = \left( \frac{\alpha_{cake}}{A_m} \right) \cdot m_{cake}; \frac{dm_{cake}}{dt} = A_m C_{reten} (J_v - J^*)$ | $\frac{dJ_v}{dt} = -k_D J_v^2 (J_v - J^*)$     |

หมายเหตุ  $k_A, k_B, k_C, k_D$  จะขึ้นอยู่กับกลไกการเกิดฟาวลิง

### 2.6.3.6 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการกรองของเมมเบรน

ปลั๊กซ์ของเมมเบรน โดยสารอินทรีย์ธรรมชาติซึ่งใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอัตราการซึมผ่านเมมเบรนดังสมการที่ (2.34)

$$J_v = L_p (\Delta P - \sigma \Delta \pi) = \frac{Q_p}{A_m} \quad (2.34)$$



โดยที่  $J_v$  เท่ากับ อัตราการซึมผ่านเมมเบรน มีหน่วยเป็น  $L/m^2/hr/kPa$

$L_p$  เท่ากับ สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของเมมเบรน มีหน่วยเป็น  $L/m^2/hr/kPa$

$\Delta P$  เท่ากับ ความดันเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ  $\left[ \frac{(P_f + P_r)}{2} - P_p \right]$  มีหน่วยเป็น  $kPa$

$\sigma$  เท่ากับ osmotic reflection coefficient มีค่าประมาณเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ผิวของเมมเบรน

$\Delta\pi$  เท่ากับ ค่าความแตกต่างของแรงดันออสโมติก ระหว่างผิวของเมมเบรนและส่วนของเพอร์มิเอท (osmotic pressure  $\pi_m - \pi_p$ ) มีหน่วยเป็น  $kPa$

$A_m$  เท่ากับ พื้นที่หน้าตัดของเมมเบรน มีหน่วยเป็น  $m^2$

จะเห็นได้ว่าหากใช้สารละลายเป็นสารอินทรีย์ธรรมชาติแล้ว สิ่งที่ได้จากการผ่านเมมเบรนนั้นจะประกอบด้วยน้ำและบางส่วนของเกลือแร่เรียกว่า ฟลักซ์สารละลาย (Solute flux) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลคูณของอัตราการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำหรือสารละลาย ( $J_v$ ) กับความเข้มข้นของสารละลายที่ซึมผ่านเมมเบรนมาแล้ว (Permeate,  $C_p$ ) ดังแสดงในสมการที่ (2.35)

$$J_s = \frac{Q_p C_p}{A_m} = J_v C_p \quad (2.35)$$

สำหรับการกำจัดสารละลายออกจากน้ำ (Rejection) โดยการกรองผ่านเมมเบรนจะสกัดเอาสารละลายต่างๆ ออกจากน้ำ ซึ่งประสิทธิภาพในการกำจัดสารละลายสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.36), (2.37) หรือ (2.38) ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ดังนี้

$$R_f = \left(1 - \frac{C_p}{C_f}\right) \times 100 \quad (2.36)$$

$$R_r = \left(1 - \frac{C_p}{C_r}\right) \times 100 \quad (2.37)$$

$$R_m = \left(1 - \frac{C_p}{C_m}\right) \times 100 \quad (2.38)$$

|       |       |         |   |
|-------|-------|---------|---|
| เมื่อ | $R_f$ | เท่ากับ | ค่าการกำจัดสารละลายออกจากน้ำของสารป้อน      |
|       | $R_r$ | เท่ากับ | ค่าการกำจัดสารละลายออกจากน้ำของรีเทนเทท     |
|       | $R_m$ | เท่ากับ | ค่าการกำจัดสารละลายออกจากน้ำบนผิวของเมมเบรน |
|       | $C_m$ | เท่ากับ | ความเข้มข้นที่ผิวของเมมเบรน                 |

## 2.7 ข้อดีของกระบวนการเมมเบรน

2.7.1 เป็นการแยกตามขนาดโมเลกุล (หรือรูปร่าง หรือชนิดของประจุ) ซึ่งทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติ (ยกเว้นการกลั่นผ่านเมมเบรน) จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้

2.7.2 ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนเฟส ตัวอย่างเช่น กระบวนการแยกเกลือจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล ถ้าใช้วิธีการออสโมซิสผันกลับหรืออิเล็กโตรโอสโมซิส มีข้อได้เปรียบทางด้านพลังงานมากกว่าการกลั่นหรือการต้มระเหย

2.7.3 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้งจากระบบ ทำให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอร์มิเอท (ส่วนที่ผ่านเมมเบรน) และรีเทนเทท (ส่วนที่ไม่ผ่านเมมเบรน) เช่น การผลิตน้ำสะอาดจากน้ำทะเลได้เพอร์มิเอท คือน้ำจืด ส่วนสารละลายเกลือเข้มข้นสามารถนำไปต้มระเหย ตกผลึกเพื่อผลิตเกลือ ในการบำบัดน้ำทิ้งบางชนิดที่ได้น้ำสะอาดกลับไปใช้ในกระบวนการและได้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นซึ่งใช้ประโยชน์ต่อไปได้

2.7.4 สามารถดำเนินการแบบกะ (Batch) หรือแบบต่อเนื่อง (Continuous) ตลอดจนติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ไม่ยาก

2.7.5 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบ ให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยาก เนื่องจากชุดเมมเบรนมีลักษณะเป็นชุด (Modular) หรือหน่วยงานที่เรียกว่าโมดูล คือการบรรจุหรือประกอบเมมเบรนให้มีพื้นที่เมมเบรนตามต้องการ และสามารถนำหน่วยย่อยๆ มาต่อกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยก

2.7.6 มีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองพื้นที่ ชุดอุปกรณ์เมมเบรนมีการออกแบบให้พื้นที่ในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์มีค่าสูง (รัตนา, 2543)

## 2.8 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรน

แม้ว่ากระบวนการเมมเบรนจะมีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้แต่มีข้อจำกัด หรือข้อเสีย เช่นเดียวกับกระบวนการอื่น

2.8.1 คอนเซนเตรชันโพลาไรซ์เซชัน (Concentration polarization, CP) หมายถึง การสะสมของโมเลกุล/อนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าของเมมเบรนสูงกว่าในบริเวณที่อยู่ห่างออกไปและจะลดสมรรถนะของการแยกทั้งในแง่ของฟลักซ์และการกักอนุภาค เพราะส่งผลให้เกิดการอุดตัน (Fouling)

2.8.2 การอุดตัน (Fouling) การเกิดการอุดตันของเมมเบรน หมายถึง การสะสม/อุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าของเมมเบรนและภายในรูพรุน ซึ่งทำให้ฟลักซ์ลดลงและการกักโมเลกุลเปลี่ยนแปลง (อาจลดลงหรือเพิ่มขึ้น) ฟาวลิงเกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเมมเบรนและสารละลาย สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ ต้องล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม

2.8.3 ความคงตัวของเมมเบรน เนื่องจากเมมเบรนที่ใช้ส่วนใหญ่ผลิตจากพอลิเมอร์จึงมีความคงตัวจำกัด เช่น เมมเบรนจำพวกเซลลูโลส (Cellulose) คงตัวช่วงพีเอช 4-8 ส่วนโพลิสัลโฟน (Polysulfone) สามารถใช้งานในช่วงกว้างกว่า คือ พีเอช 1-13 อุณหภูมิมีผลต่อเมมเบรน เมมเบรนบางชนิดไม่ทนต่อคลอรีน หรือตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนเมมเบรนเซรามิกส์มีความคงตัวต่ออุณหภูมิและสารเคมีดีมาก สามารถฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำได้ ทนต่อจุลินทรีย์ แต่ความสามารถในการแยกข้นน้อยกว่าเมมเบรนพอลิเมอร์ (รัตนา, 2543)

## 2.9 บทสรุป

จากการทบทวนทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบการกรองอัลตราฟิลเตรชันที่ผ่านมา ทั้งในแง่ของการอุดตัน การเสื่อมสภาพ ซึ่งผลที่เกิดขึ้นนี้ ส่วนหนึ่งมาจากคุณสมบัติและปัจจัยต่างๆ ของเมมเบรน ดังนั้นจำเป็นต้องศึกษาหาปัจจัยในการลดการเกิดปัญหาดังกล่าวนี้ วิธีการดำเนินระบบเป็นแบบการไหลตามแนวตั้ง (Dead-End Operation) เป็นวิธีการที่ได้มีการศึกษามาก่อนของการศึกษาระบบเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน การเลือกใช้สภาพการทำงานของระบบ คือ ความดัน พีเอช และอัตราแรงเฉือน ซึ่งมีความสำคัญต่อการศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน และใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการพัฒนาระบบการกรองแบบอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนในอนาคต