

## บทที่ 1

### บทนำ

#### บทนำต้นเรื่อง

ระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งเป็นระบบที่ใช้มากในอุตสาหกรรมเพราะเป็นระบบที่มีประสิทธิภาพสูงซึ่งเป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน โดยอาศัยสิ่งมีชีวิตพวกจุลินทรีย์ทั้งหลายในการย่อยสลาย คูดจับหรือเปลี่ยนรูปของมลสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีค่าความสกปรกน้อยลง ระบบนี้ประกอบด้วยสองขั้นตอนหลักคือการลดค่าความสกปรกในถังเติมอากาศ และการแยกตะกอนในถังตกตะกอนแสดงดังภาพประกอบ 1 น้ำเสียจะถูกส่งเข้าถังเติมอากาศซึ่งมีสลัดจ์อยู่เป็นจำนวนมาก ภายในถังจะมีสภาวะแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบใช้ออกซิเจน เช่น มีออกซิเจนละลาย ปริมาณสารอินทรีย์ และพีเอชที่เหมาะสม จุลินทรีย์จะทำการลดค่าสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปต่างๆ ด้วยการย่อยสลายให้อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำดังแสดงในสมการ 1



สำหรับขั้นตอนการแยกตะกอนเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะส่งผลต่อปริมาณจุลินทรีย์ในถังเติมอากาศและส่งผลต่อประสิทธิภาพรวมของระบบ การควบคุมการตกตะกอนในถังตกตะกอนทำได้ยากและไม่แน่นอน การนำเมมเบรนมาใช้แทนถังตกตะกอนช่วยทำให้ควบคุมแยกตะกอนออกจากน้ำได้ดีขึ้น เนื่องจากตะกอนจุลินทรีย์สำหรับน้ำเสียของบ่อเติมอากาศของระบบตะกอนเร่งนั้นมีลักษณะเป็นฟล็อกที่มีขนาดใหญ่ กระบวนการที่เหมาะสมคือกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน ซึ่งข้อดีของการใช้ระบบดังกล่าวคือ สามารถแยกของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์และน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วก็นำหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ ซึ่งรูปแบบการกรองด้วยเมมเบรนก็จะแตกต่างกัน โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อค่าฟลักซ์และประสิทธิภาพในการกรองแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำเสียบ่อเติมอากาศของระบบตะกอนเร่งโดยใช้เซลล์ูโลสในเตรทกรองในระบบไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนแบบการไหลขวาง และศึกษาถึงรูปแบบการอุดตันของเมมเบรนเพื่อกำหนดวิธีการล้างที่เหมาะสมในการยืดอายุการใช้งานของเมมเบรน

การบำบัดน้ำเสีย หมายถึง การกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ปนมากับน้ำเสียให้หมดไป หรือให้เหลือน้อยที่สุดเท่าที่เทคโนโลยีจะอำนวย เนื่องจากน้ำเสียจากแหล่งต่างกันคุณสมบัติไม่เหมือนกันดังนั้นกระบวนการบำบัดน้ำเสียจึงมีต่างกันออกไปมากมายหลายวิธี

ระบบน้ำเสียโดยทั่วไปมีอยู่ 3 วิธี ([www.thaienvironment.net](http://www.thaienvironment.net)) คือ

1. กระบวนการทางกายภาพ (Physical process) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีความต้องการเพียงแยกเอาวัตถุซึ่งเป็นของแข็งที่ปนมากับน้ำเสียออก วัตถุนี้อาจเป็นสารแขวนลอยที่สามารถตกตะกอนเองได้ หรือลอยแยกออกจากน้ำได้ เช่น กรวดทราย ถุงพลาสติก เศษอาหาร ไขมัน กรรมวิธีง่ายๆ ที่ใช้แยกวัตถุเหล่านี้ออก ได้แก่ การตกตะกอน การกรอง การดักไขมัน เป็นต้น
2. กระบวนการทางเคมี (Chemical process) เป็นการกำจัดสารแขวนลอยที่มีขนาดเล็กที่ไม่สามารถตกตะกอนเองได้ และใช้ขจัดสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียให้อยู่ในรูปที่เป็นเกลือ ตกตะกอนออกมาด้วยการเติมสารเคมีที่เหมาะสมลงไป เพื่อให้สารคอลลอยด์ที่ไม่ตกจมเกิดการรวมตัวและตกจม
3. กระบวนการทางชีวภาพ (Biological process) เป็นการกำจัดเอาสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสียออก เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับออกซิเจนที่ละลายในน้ำให้มีปริมาณน้อยลงจนการดำรงชีวิตของพืชและสัตว์ขนาดเล็กเกิดอันตราย การบำบัดวิธีนี้อาศัยการทำงานของจุลินทรีย์ได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์ ราและสาหร่าย ที่เติมลงไปจนถึงบำบัดมากพอที่จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ปนมาให้น้อยลงจนได้มาตรฐานน้ำทิ้ง

กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (Biological treatment process) เป็นกระบวนการที่นิยมใช้กันมากที่สุดในงานบำบัดน้ำเสีย เพราะเป็นวิธีที่สามารถกำจัดหรือลดสารอินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาน้ำเน่าเสีย โดยอาศัยหลักการที่ใช้จุลินทรีย์ต่างๆ มาทำการย่อยสลายแปรเปลี่ยนสภาพของสารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ในระบบเติมอากาศหรือไปเป็นก๊าซมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ในระบบไม่เติมอากาศ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2543)

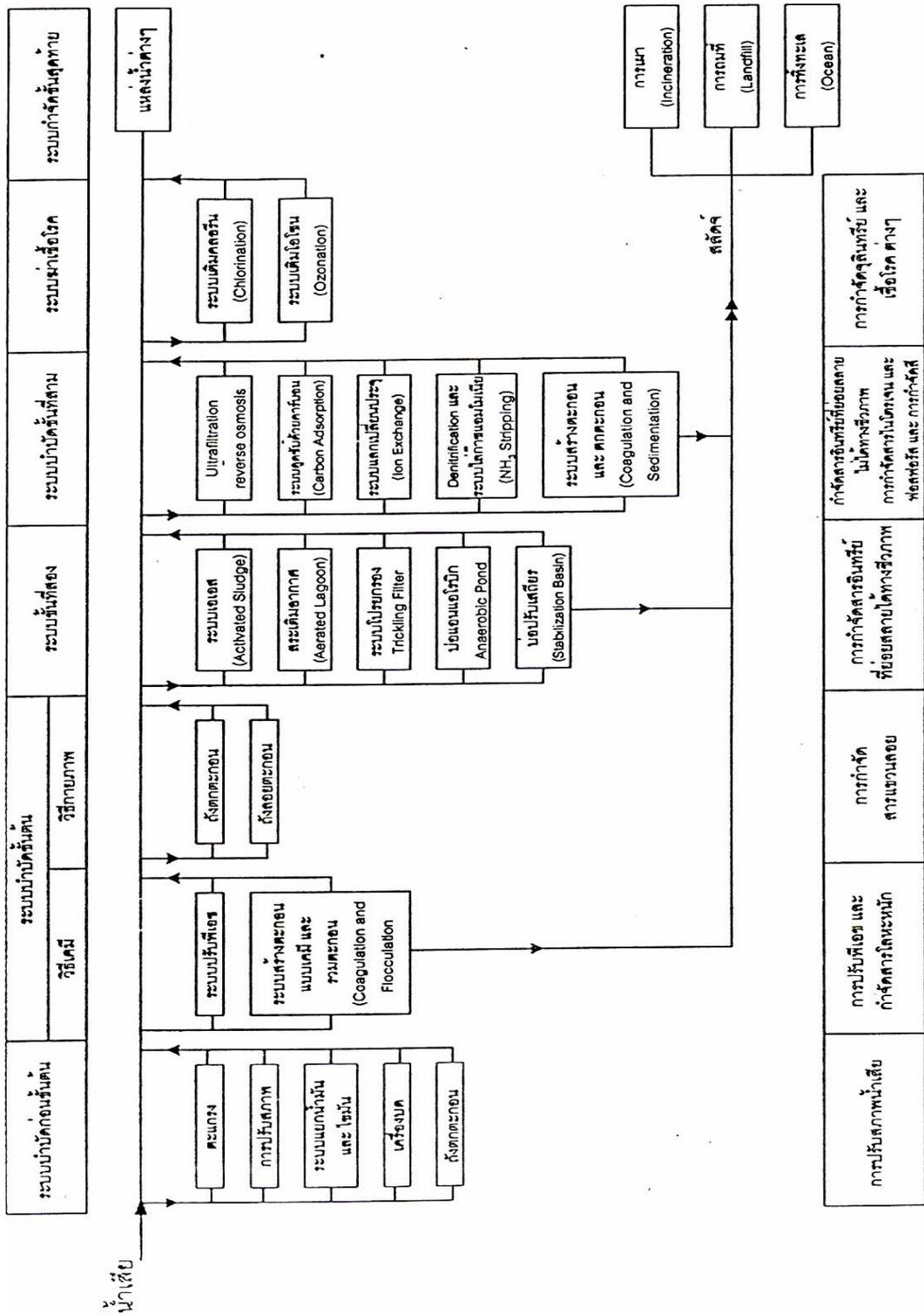
กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ สามารถแบ่งการบำบัดได้ 2 แบบคือ

1. กระบวนการบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic processes) เป็นระบบที่เติมออกซิเจนลงในน้ำเสีย เพื่อให้จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียลดลง (เมธี วงศ์ผาสุกโชติ, 2546) ระบบนี้มี 2 แบบคือ แบบแรกแบคทีเรียอยู่ในลักษณะแขวนลอย (Suspension) ได้แก่ระบบ Oxidation pond ระบบบ่อเติมอากาศ (Aerated lagoon system) ระบบตะกอนเร่ง (Activated sludge system) และอีกแบบแบคทีเรียยึดเกาะตัวกลาง ซึ่งอาจอยู่กับที่ ได้แก่ระบบโปรยกรอง (Trickling filter) หรือเคลื่อนที่ ได้แก่ ระบบแผ่นหมุนชีวภาพ (Rotating biological disc) ([www.thaienvironment.net](http://www.thaienvironment.net))

2. กระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic processes) เป็นการกำจัดน้ำเสียที่อาศัยแบคทีเรียแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic bacteria) โดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียจนถึงขั้นสุดท้าย คือ การเกิดก๊าซมีเทน เช่นระบบ Anaerobic contact process (AC), Anaerobic filter process (AF), Anaerobic rotating biological contactor process (ARBC), Anaerobic fluidized ([www.thaienvironment.net](http://www.thaienvironment.net))

ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย การบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งออกตามขั้นตอนได้ดังนี้

1. ระบบบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) เป็นการใช้กระบวนการทางกายภาพในการแยกสารต่างๆ ออกจากน้ำเสีย เช่น การดักด้วยตะแกรง การตกตะกอน การทำให้ลอย
2. ระบบบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment) เป็นการกำจัดสารอินทรีย์และสารแขวนลอยออกจากน้ำเสียโดยกระบวนการทางชีวภาพและกระบวนการทางเคมี
3. ระบบบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) เป็นการกำจัดสารแขวนลอยและสิ่งเจือปนอื่นๆ ที่หลงเหลือจากการบำบัดขั้นที่สอง เช่น กำจัดสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสีย โดยมักจะมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ น้ำที่ได้รับ การบำบัดแล้วสามารถนำกลับมาใช้ได้



ภาพประกอบ 3 กระบวนการบำบัดน้ำเสียและหน้าที่หลักของแต่ละระบบ  
ที่มา : เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2539:2

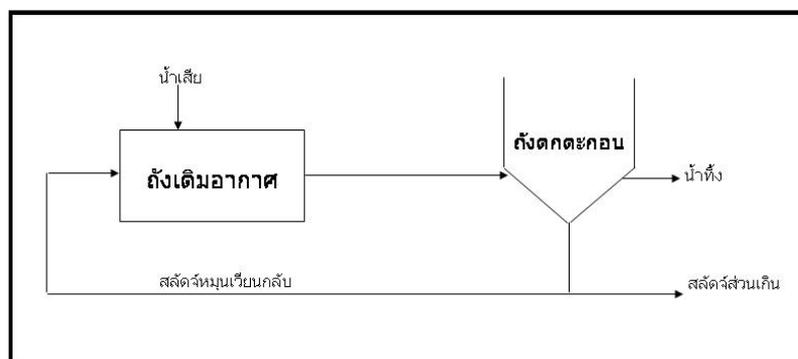
### ระบบบำบัดแบบตะกอนเร่ง (Activated sludge system)

การเกิดสลัดจ์สำหรับการบำบัดแบบตะกอนเร่ง เกิดขึ้นต่อเนื่องกัน 3 ขั้นตอนในถังเติมอากาศ คือ

1. ขั้นส่งถ่าย (Transfer step) สารอินทรีย์ในน้ำเสียจะถูกจุลินทรีย์ดูดมาติดที่ผนังเซลล์และส่งเอนไซม์ออกมาย่อยสลายสารอินทรีย์ให้เปลี่ยนไปอยู่ในรูปของโมเลกุลที่เล็กพอที่จะซึมผ่านเข้าไปในเซลล์เพื่อใช้เป็นสารอาหารได้
2. ขั้นเปลี่ยนรูป (Conversion step) จุลินทรีย์จะทำการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กโดยกระบวนการสังเคราะห์ ซึ่งหมายถึงการสร้างเซลล์ใหม่และกระบวนการออกซิเดชัน ผลผลิตที่ได้คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำและพลังงาน
3. ขั้นรวมตะกอน (Flocculation step) จุลินทรีย์จะถูกกวนผสมกันอยู่ในถังเติมอากาศ เมื่อชนกันก็จะจับรวมตัวกันเป็นก้อนที่ใหญ่ขึ้นเรียกว่า ฟล็อกหรือสลัดจ์ ซึ่งตกตะกอนได้ดีและสามารถแยกออกจากน้ำที่บำบัดแล้วได้ง่าย นอกจากนี้เมื่อสลัดจ์ไปสัมผัสกับมลสารในน้ำเสียจะจับมลสารเหล่านี้ไว้ภายในและทำการย่อยสลายเป็นอาหารต่อไป

น้ำเสียที่บำบัดแล้วจะไหลต่อไปยังถังตกตะกอน เพื่อแยกจุลินทรีย์ออกจากน้ำใส สลัดจ์ที่แยกตัวอยู่ที่ก้นถังตกตะกอนส่วนหนึ่งจะถูกสูบกลับไปยังถังเติมอากาศ เพื่อลดมลสารที่เข้ามาใหม่ อีกส่วนหนึ่งจะเป็นสลัดจ์ส่วนเกิน ที่เป็นผลจากการเจริญเติบโตซึ่งจะต้องนำไปทิ้ง สำหรับน้ำใสส่วนบนจะเป็นน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วทิ้งจากระบบ

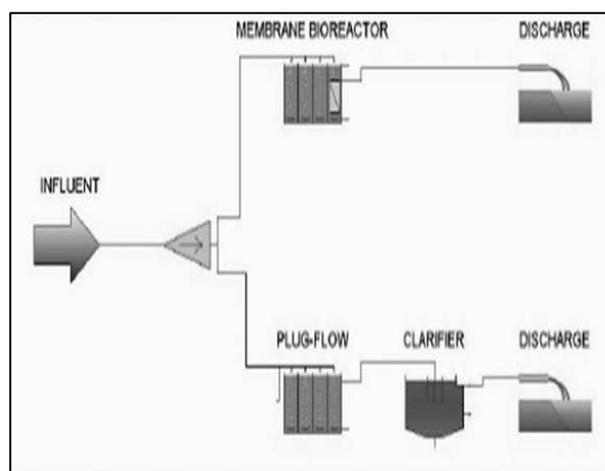
การนำจุลินทรีย์ส่วนเกินไปทิ้งเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องกระทำอย่างสม่ำเสมอ เพื่อรักษาปริมาณจุลินทรีย์ในระบบให้มีค่าเหมาะสม ซึ่งเป็นหลักสำคัญในการควบคุมการทำงานของกระบวนการตะกอนเร่งให้มีอัตราส่วนของอาหารต่อจุลินทรีย์ที่สมดุลกัน ซึ่งจะส่งผลให้อาหารหรือมลสารที่มีอยู่ในน้ำเสียสามารถถูกกำจัดให้หมดไปหรือมีค่าเหลืออยู่น้อย



ภาพประกอบ 1 ส่วนประกอบและการทำงานของระบบตะกอนเร่ง

ที่มา : สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, 2545

ระบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge Process) มีความยุ่งยากในการดำเนินการ และ ปัญหาที่พบบ่อยในระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งนั้นก็คือ ปัญหาในการแยกตะกอนเร่งเช่น ปัญหาการเกิดตะกอนลอยตัว ซึ่งอาจจะเกิดจากฟล็อกเข็มหมุดหรือการเกิดบัลกิง วิธีการแก้ทำได้ยากมาก โดยเฉพาะบัลกิงแบบเส้นใยอาจต้องทำการทดสอบอย่างยืดเยื้อเพื่อหาสาเหตุ ซึ่งปัญหา ตะกอนลอยตัวเป็นปัญหาใหญ่ในระบบเนื่องจากระบบตะกอนเร่งมีความต้องการตะกอนจุลินทรีย์ เพื่อใช้ในการเวียนกลับเข้าสู่ระบบ เพื่อรักษาปริมาณของจุลินทรีย์ต่อสารอาหารให้มีความสมดุล ดังนั้นเมมเบรนจะถูกเลือกนำมาใช้ในการแยกตะกอนออกจากน้ำทิ้ง โดยทำหน้าที่แทนถังตกตะกอน ข้อดีของการนำเอาเมมเบรนมาใช้คือ สามารถกำจัดของแข็งแขวนลอยในน้ำเสียได้อย่างสมบูรณ์ และอาจนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ ประสิทธิภาพการแยกไม่ขึ้นอยู่กับ สภาพการตกตะกอนของสลัดจ์ นอกจากนี้ ระบบที่ใช้เมมเบรนยังสามารถแยกตะกอนโดยปราศจาก ข้อจำกัดในเรื่องความเข้มข้นของสลัดจ์ จึงทำให้สามารถลดปริมาณการทิ้งสลัดจ์ส่วนเกินออกจาก ระบบได้ ซึ่งปริมาณความเข้มข้นของสลัดจ์ที่ค่อนข้างสูง จะให้สัดส่วนของน้ำเสียต่อจุลินทรีย์ (Food to Microorganism, F/M Ratio) ในระบบต่ำและส่งผลให้ประสิทธิภาพการบำบัดของระบบ สูงขึ้น สำหรับน้ำเสียของบ่อเติมอากาศของระบบตะกอนเร่งนั้น สามารถประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยี เมมเบรนสำหรับการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน เป็นการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพซึ่งเป็น กระบวนการแยกสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ หรือสารแขวนลอย วิธีการดังกล่าว เรียกว่า Membrane bioreactor โดยเป็นกระบวนการที่ใช้เมมเบรนในการแยกตะกอนในบ่อเติม อากาศแทนการใช้ถังตกตะกอนดังภาพประกอบ 2



ภาพประกอบ 2 ระบบของกระบวนการบำบัดน้ำเสียเปรียบเทียบระหว่างระบบ

Membrane bioreactor และระบบ Activated sludge.

ที่มา : [www.ultra-flo.com.sg/mbr.htm](http://www.ultra-flo.com.sg/mbr.htm) (12 กรกฎาคม 2548)

## ตรวจเอกสาร

ปัจจุบันการประยุกต์ใช้กระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน (Membrane separation process) ได้เข้ามามีบทบาทในกระบวนการแยก โดยจะนำมาใช้แทนเทคนิคการแยกที่ต้องใช้เวลานาน เช่น การกลั่น (Distillation) และการสกัด (Extraction) เป็นต้น กระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรนจะใช้พลังงานน้อยเนื่องจากการไม่มีการเปลี่ยนสถานะและอุณหภูมิ และไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีตัวใดช่วยในการทำงานเพราะไม่มีปฏิกิริยาเข้ามาเกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงได้มีการประยุกต์ใช้ในงานหลายๆ ด้าน เช่น ใช้ในการทำไตเทียม ในกระบวนการแยกไนโตรเจนออกจากอากาศ การ Recovery  $H_2$  ที่มีอยู่ในก๊าซไฮโดรคาร์บอน การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้น หรือใช้ในการกำจัดแบคทีเรียในน้ำดื่มแทนเครื่องกรองน้ำทั่วไป ซึ่งมีประสิทธิภาพในการกรองที่สูงกว่า

หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน คือ จะต้องมีความเข้มข้นที่ทำให้สารละลายไหลผ่านเมมเบรนและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้นหรือผลต่างของความดันเมมเบรนคือตัวกลางซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆ หรือหยดขนาดเล็กมากๆ ที่ทำหน้าที่กั้นระหว่าง 2 เฟส โดยทั่วไปเมมเบรนเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็งและอาจเป็นของเหลว ลักษณะที่สำคัญที่สุดของเมมเบรน คือมีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น (Semi-permeable / Permselective membrane) การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมี affinity ของเมมเบรนต่อสารนั้นๆ หรือจากขนาดของรูพรุน หรือจากการมีประจุของเมมเบรนเป็นต้น

เมมเบรนเป็นวัสดุกันขวางบางๆ ซึ่งยอมให้เกิดการถ่ายโอนมวลผ่านอย่างเลือกสรร กล่าวคือในขณะที่เมมเบรนยอมให้ สารชนิดหนึ่งผ่านไปได้ง่ายๆ แต่อาจไม่ยอมให้สารอีกชนิดผ่านไปได้เลยหรือผ่านไปได้น้อยมาก ดังนั้นเมมเบรนจึงมีคุณสมบัติของการผ่านได้อย่างเลือกสรร (Permselectivity) เมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรมส่วนมากทำจากวัสดุสังเคราะห์ และสามารถจำแนกออกตามชนิดของวัสดุที่ใช้ทำ แบ่งได้เป็นสองกลุ่มใหญ่ๆ กล่าวคือ เมมเบรนอินทรีย์ (Organic membranes) และเมมเบรนอนินทรีย์ (Inorganic membranes) เมมเบรนอินทรีย์ทำจากวัสดุโพลิเมอร์สังเคราะห์มีโพลิเมอร์มากกว่า 25 ชนิด ถูกนำมาผลิตเป็นเมมเบรนเพื่อใช้งานในแบบต่างๆ อย่างกว้างขวาง ส่วนเมมเบรนอนินทรีย์ทำจากสารอนินทรีย์ และมักเรียกว่า เมมเบรน เซรามิกส์ (Ceramic membranes) มีองค์ประกอบของ Alumina, Titania และ Silica เป็นต้น เมมเบรนชนิดนี้จะมีความแข็งแรง ทนทานต่อการสึกกร่อนและทนอุณหภูมิได้สูงจึงมีราคาแพงกว่าเมมเบรนชนิดอื่นๆ แต่ยังไม่สามารถผลิตให้มีรูพรุนเล็กมากถึงระดับการใช้งานคูดซึมย้อนกลับ (Reverse osmosis)

การพัฒนาเมมเบรนเริ่มก้าวหน้ามาตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 เป็นต้นมา นักฟิสิกส์และนักเคมีกายภาพมีส่วนร่วมศึกษา ปรัชญาการถ่ายโอนของโมเลกุล นักเคมีโพลิเมอร์ศึกษาการตั้งโครงสร้างของโครงสร้างพื้นผิวของเมมเบรนโพลิเมอร์ วิศวกรเคมีศึกษาการไหลและการถ่ายโอนมวลของเมมเบรน

### ชนิดของโครงสร้างของเมมเบรน

สามารถจำแนกออกได้เป็น 2 โครงสร้างหลัก คือ

เมมเบรนแบบทึบ (Dense หรือ Nonporous membrane) และเมมเบรนแบบรูพรุน (Microporous membranes) เมมเบรนแบบทึบมีลักษณะผิวทึบและบาง สิ่งที่ผ่านมาได้จะละลายในเนื้อเมมเบรนแล้วผ่านไปโดยการแพร่ (Diffusion) ผ่านผิวทึบนั้นเนื่องจากมีแรงขับเคลื่อน (Driving force) เป็นความดัน ความเข้มข้น หรือความต่างศักย์ไฟฟ้า การแยก (Separation) ขององค์ประกอบต่างๆ ในสารป้อนซึ่งเป็นของผสมเกิดจากการที่แต่ละองค์ประกอบมีอัตราการละลาย และการแพร่แตกต่างกัน เมมเบรนทึบจะให้การแยกหรือการเลือกผ่าน (Selectivity) ที่ดีแต่ให้อัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ (Flux) ต่ำ

เมมเบรนแบบรูพรุน มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่ทั่วเนื้อเมมเบรนและรูมีการต่อถึงกัน รูอาจมีขนาดระหว่าง 0.01-10 ไมครอน อนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่ารูจึงจะผ่านเมมเบรนไปได้ ดังนั้นการแยกของตัวถูกละลายในเมมเบรนชนิดนี้จึงเป็นการแยกโดยขนาด และโดยการกระจายของขนาดของรู โดยทั่วไปเมมเบรนชนิดนี้จึงให้อัตราการผ่านสูงแต่ให้การเลือกผ่านต่ำ

ชนิดของเมมเบรนยังสามารถแบ่งย่อยตามโครงสร้างได้อีกเป็น 3 ชนิดย่อยคือ Symmetric หรือ Isotropic membrane, Asymmetric หรือ Anisotropic membrane และ Composite membrane

1. Symmetric membrane คือเมมเบรนซึ่งพื้นผิวใน (Morphology) ทุกระนาบมีลักษณะผิวเหมือนกัน ทุกระนาบ เช่น ทึบเหมือนกันทุกระนาบตลอดแนวตั้งหรือพาดด้วยขนาดรูพรุนเท่าๆ กันทุกระนาบตลอดแนวตั้ง

2. Asymmetric membrane คือเมมเบรนซึ่งพื้นผิวในทุกระนาบมีลักษณะผิวไม่เหมือนกันตลอดแนวตั้ง

3. Composite membrane คือเมมเบรนซึ่งมีชั้นระนาบของพื้นผิวแตกต่างกันทางโครงสร้างของลักษณะผิวหรือแตกต่างกันทางเคมีหรือชนิดของวัสดุโพลิเมอร์

ชนิดของเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรมต้องการคุณสมบัติการเลือกผ่านที่ดี และอัตราการไหลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่สูง ดังนั้นจึงเลือกเมมเบรนชนิด Asymmetric และชนิด

Composite เป็นส่วนใหญ่ โดยเลือกให้โครงสร้างมีผิวหน้าเป็นแบบที่บางเพื่อเพิ่มการเลือกผ่าน และให้ส่วนล่างเป็นแบบที่บวมและหนาเพื่อเพิ่มอัตราการผ่านและทำหน้าที่เป็นส่วนรองรับ (Support) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงให้กับเมมเบรน กลไกของไหลผ่านเมมเบรนแบบที่บวมเป็นแบบ Solution-diffusion mechanism ส่วนกลไกการไหลผ่านเมมเบรนแบบรูพรุนเป็นการแพร่แบบ Knudsen

### การกรอง (Filtration)

การกรองเป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากสารละลายขุ่น โดยอาศัยความแตกต่างของแรงดันในการกรองมีตัวกลางกรอง (Filter media) ซึ่งทำหน้าที่กักสารที่มีขนาดโตกว่ารูที่ผิวหน้าตัวกลางกรองไม่ให้ผ่านออกไปผสมกับสารละลายหรือของเหลว ตัวกลางกรองอาจทำได้ด้วยผ้า หรือกระดาษ หรือชั้นของกรวดทราย หรือสารสังเคราะห์ เช่น เยื่อเมมเบรน (Membrane) ในล่อน เป็นต้น

วิธีการกรอง แบ่งได้เป็น 2 แบบคือ

#### 1. การกรองแบบความดันคงที่ (Constant-pressure filtration)

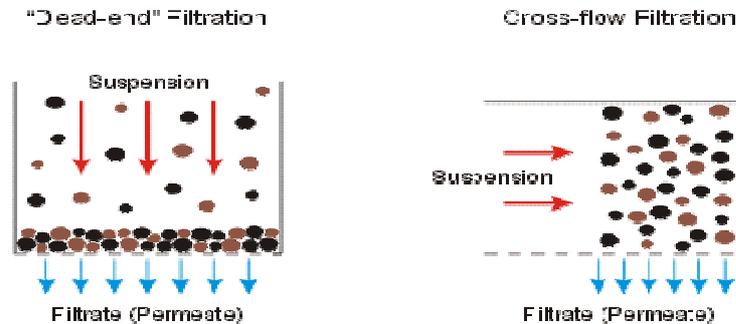
การกรองแบบนี้ใช้วิธีการปรับความดันไหลเข้า (Inlet-pressure) เพื่อให้ความดันรวม (ความดันลด) คงที่ตลอดเวลาการกรอง ดังนั้นในการกรองด้วยวิธีการกรองแบบความดันคงที่ จะได้อัตราการไหลของสารละลายสูงสุดเมื่อเริ่มกรองใหม่ๆ และเมื่อเวลาผ่านไปอัตราการไหลของสารละลายจะค่อยๆ ลดลงตามลำดับ

#### 2. การกรองแบบอัตราการกรองคงที่ (Constant-rate filtration)

เป็นการกรองที่ได้อัตราการไหลของสารละลายมีค่าคงที่ โดยใช้วิธีการปรับเพิ่มความดันที่ไหลเข้า (Inlet pressure) ให้มีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ ดังนั้นความดันลดรวมจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามเวลา เมื่อเริ่มกรองด้วยวิธีนี้ความดันรวมจะมีค่าน้อยที่สุด และจะค่อยๆ มีความดันรวมเพิ่มขึ้นและจะมีค่าความดันสูงสุดเมื่อหยุดกรอง

แต่เดิมการกรองที่ใช้กันอยู่นั้นเป็นแบบ Conventional filtration หรือการไหลแบบปิดตาย (Dead end) ซึ่งจะให้ของไหล ไหลผ่านในลักษณะตั้งฉากกับตัวกลางกรอง ส่วนที่ไม่ผ่านการกรองจะสะสมอยู่บนผิวหน้าของตัวกลางกรองเรียกว่า เค้กกรอง (Filter cake) ซึ่งมีข้อเสียคือเมื่อกรองไปนานๆ จะเกิดการก่อดั้วของเค้กมากขึ้นทำให้เกิดขวางการไหลของกระแสของเหลว จึงได้มีการพัฒนาเทคโนโลยีเกี่ยวกับการกรองที่รู้จักกันทั่วไปคือ Crossflow หรือ Tangential flow จะเป็นการกรองแบบต่อเนื่องของกระแสของเหลวและไหลผ่านในลักษณะขนานกับตัวกลางกรอง โดยใช้ความดันเป็นแรงผลักดันให้น้ำไหลผ่านตัวกรอง การไหลจะเป็นแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ซึ่งจะ

ทำให้มีการสะสมของอนุภาคจำนวนน้อยบนผิวตัวกลางกรอง ลักษณะการไหลแบบการกรองแบบปิดตาย (Dead-end) และการกรองแบบการไหลขวาง (Crossflow) ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ลักษณะการไหลสำหรับการกรองแบบปิดตาย (Dead-end) และแบบไหลขวาง (Crossflow)

ที่มา : [www.inkos.cz/eng/mikrofiltration.html](http://www.inkos.cz/eng/mikrofiltration.html) (9 มิถุนายน 2548)

### บทบาทของเมมเบรน

เมมเบรนมีบทบาทสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ โดยเมมเบรนจะมีลักษณะเป็นเยื่อบางๆ ที่ทำหน้าที่เลือกให้อนุภาคใดๆ ผ่านเข้าหรือออกจากเซลล์ ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวได้นำไปสู่การผลิตเมมเบรนสังเคราะห์เพื่อใช้ในการแยกตัวถูกละลายออกจากตัวทำละลาย โดยจะได้ตัวถูกละลายที่มีความบริสุทธิ์สูง ปัจจุบันกระบวนการกรองโดยใช้เมมเบรนมีการประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้านเช่น ใช้ในการทำไตเทียม การแยกเกลือออกจากน้ำทะเล (Desalination) ผลิตผลไม้เข้มข้น กำจัดแบคทีเรียในน้ำดื่มและใช้ในการบำบัดน้ำเสีย เป็นต้น

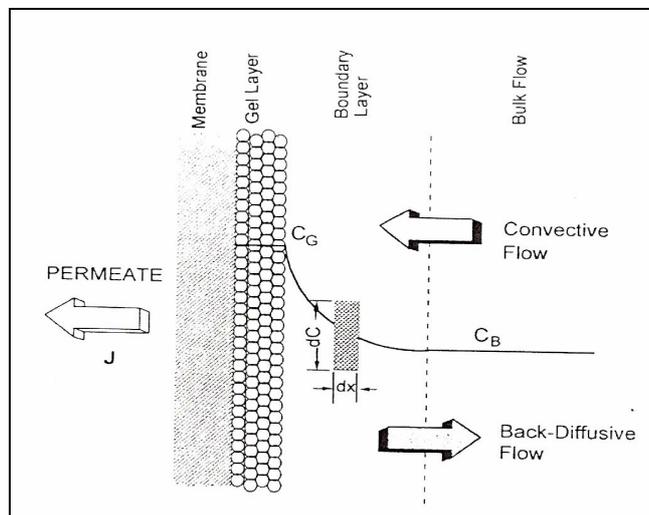
#### 1. ข้อดีของการกรองด้วยเมมเบรนคือ

- 1.1 เป็นการแยกตามขนาดของโมเลกุลหรืออนุภาค ทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิต่ำ จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้
- 1.2 ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงเฟส
- 1.3 ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้งเพราะกระบวนการเมมเบรน ทำให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้ สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้ง เอมิวชันและรีเทนแทนท์
- 1.4 สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย
- 1.5 สามารถดำเนินการแบบกะหรือแบบต่อเนื่องและสามารถติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ง่าย
- 1.6 มีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองพื้นที่เพราะชุดอุปกรณ์เมมเบรนมีการออกแบบให้มีศักยภาพในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง
- 1.7 ไม่มีปฏิกิริยาเคมีมาเกี่ยวข้อง สามารถแยกได้โดยไม่เปลี่ยนแปลงสถานะและไม่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการแยก
- 1.8 สามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่ไม่ต้องการได้หมด

## 2. ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรน

ถึงแม้ว่ากระบวนการเมมเบรนจะมีประสิทธิภาพ หรือศักยภาพในการประยุกต์ใช้ แต่ก็มีข้อจำกัดเช่นเดียวกับกระบวนการอื่นๆ เช่น

2.1 Concentration Polarization (CP) การสะสมของโมเลกุลหรืออนุภาคของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเมมเบรนได้ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเมมเบรนสูงกว่าใน Bulk solution ซึ่งจะลดสมรรถนะของการแยกทั้งในแง่ของฟลักซ์และการกักกันดังภาพประกอบ 5 ซึ่งแสดงโปรไฟล์ความเข้มข้น CP การเกิด CP อย่างต่อเนื่องส่งผลทำให้เกิดฟาวลิง การลด CP ในระดับหนึ่งทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้มีการป้อนสารผ่านเมมเบรนแบบไหลขวาง และที่ความเร็วสูงซึ่งจะช่วยให้ตัวถูกละลายที่สะสมเกิดการแพร่กลับไป Bulk solution



ภาพประกอบ 5 การเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันและเจลโพลาไรเซชัน  
ที่มา : Cheryan (1998)

2.2 ฟาวลิง การสะสมหรืออุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าเมมเบรนและภายในรูพรุน ซึ่งทำให้ฟลักซ์ลดลงและการกักกันโมเลกุลเปลี่ยนแปลง ฟาวลิง เกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของเมมเบรนและสารละลาย สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ต้องล้างออกด้วยสารเคมีที่เหมาะสม การเกิดฟาวลิง มีผลกระทบต่อสมรรถนะของกระบวนการเมมเบรน

2.3 ความคงตัวของเมมเบรน เมมเบรนที่ใช้ส่วนใหญ่ผลิตจากโพลีเมอร์จึงมีความคงตัวจำกัด เช่น เยื่อแผ่นจำพวกเซลลูโลส จะมีความคงตัวในช่วงของ pH ที่ 4-8 อุณหภูมิก็เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีผลต่อเมมเบรน

### การกรองด้วยเมมเบรนสังเคราะห์

ปัจจุบันกระบวนการกรองโดยใช้เมมเบรนถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น การแยกเกลือออกจากน้ำทะเล การบำบัดน้ำเสีย การกำจัดแบคทีเรียในน้ำดื่ม การผลิตน้ำผลไม้เข้มข้นและทำน้ำผลไม้ให้ใส เป็นต้น ข้อดีของการกรองด้วยเมมเบรนคือ ใช้พลังงานน้อยสามารถแยกสารละลายได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีช่วยในการทำงาน ไม่มีปฏิกิริยาทางเคมีมาเกี่ยวข้องสามารถกำจัดสิ่งปนเปื้อนได้หมด และค่าบำรุงรักษาต่ำ เมมเบรนที่ใช้เป็นเมมเบรนที่สังเคราะห์ขึ้นมาได้มีการพัฒนาและดัดแปลงเมมเบรนโดยใช้สารโพลิเมอร์ต่างๆ เช่น เซลลูโลสไนเตรท โพลีซัลโฟน โพลีอะไมด์ โพลีพรพิลีน เป็นต้น เมมเบรนมีคุณสมบัติในการต้านทานความดัน อุณหภูมิและความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่างๆ

เมมเบรนสังเคราะห์ที่นำมาใช้กันนั้น คิดค้นขึ้นมาโดย Sourirajan โดยผลิตมาจากสารเซลลูโลสอะซิเตท (Cellulose acetate) ซึ่งในตอนแรกนั้นใช้สำหรับผลิตน้ำเกลือเข้มข้นที่มีความเข้มข้นได้ถึง 99.5% โดยกระบวนการ Desalination เมมเบรนที่ใช้ครั้งแรกนั้นจะทำงานได้ที่ pH 3 เท่านั้นและมีอุณหภูมิในการทำงานไม่เกิน 30°C แต่ต่อมาได้มีการพัฒนาและดัดแปลงเมมเบรนโดยใช้สารโพลิเมอร์อื่นๆ อีกหลายชนิด เช่น เซลลูโลสไนเตรท โพลีเอไมด์ โพลีไวนิลคลอไรด์ ไนลอน และ โพลียูเรีย เป็นต้น เมมเบรนที่พัฒนาขึ้นมาสามารถทำงานได้ที่ช่วงอุณหภูมิและ pH ที่กว้างขึ้นนอกจากนี้ยังมีความทนทานต่อสารเคมีมากขึ้นด้วย

กรรมวิธีและขั้นตอนการผลิตเมมเบรนนั้น จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะรูปแบบของเมมเบรนที่ต้องการนำไปใช้ แต่กรรมวิธีหลักที่ใช้กันมากคือ วิธี Phase inversion ซึ่งทำโดยการเตรียมสารละลายของสารโพลิเมอร์ที่ต้องการในขั้นแรก จากนั้นนำมารีดเป็นแผ่นแล้วทำการระเหยน้ำหรือตัวทำละลายบางส่วนออกไป แล้วนำไปทำให้แข็งตัวในน้ำโดยกระบวนการ Coagulation โดยวิธีนี้จะทำให้ได้เมมเบรนที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกัน 2 ส่วนคือ ชั้นผิว (Skins) และชั้นล่างที่เรียกว่า Microporous substrate

1. หลักการของกระบวนการเมมเบรนสังเคราะห์ คือ สารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลเล็กจะผ่านเมมเบรนสังเคราะห์ โดยอาศัยแรงขับเคลื่อนเนื่องจากผลต่างความดันระหว่างเมมเบรน ดังภาพประกอบ 6 สารละลายที่มีตัวถูกละลายที่มีโมเลกุลใหญ่จะถูกเมมเบรนสังเคราะห์กักไว้เรียกว่า รีเทนเทท (Retentate) หรือสารละลายเข้มข้น (Concentrate) ส่วนสารละลายที่ประกอบด้วยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ไหลผ่านเมมเบรนสังเคราะห์ไปได้ เรียกว่า เพอมีเอท (Permeate) ซึ่งส่วนที่นำไปใช้ประโยชน์เป็น เพอมีเอทหรือรีเทนเททหรือทั้งสองส่วน ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวเมมเบรนทางด้านสารป้อนสูงกว่าด้านเพอมีเอท ทำให้เกิดความแตกต่างของความดันออสโมติก ระหว่าง

ผิวหน้าเมมเบรนทั้งสองด้าน การกรองโดยใช้เมมเบรนมีหลายระดับ ได้แก่ ระดับไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration) อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration) และออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis)

2. คุณสมบัติของเมมเบรนสังเคราะห์ เมมเบรนที่ผลิตขึ้นส่วนมากทำจากสารโพลิเมอร์ หรือพลาสติกซึ่งจะเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติตามสภาพแวดล้อมได้ ดังนั้นการเลือกใช้เมมเบรนจึงต้องคำนึงถึงปัจจัยหลายอย่างเช่น

2.1 ความต้านทานต่อความดัน เนื่องจากเมมเบรนที่ใช้ในระบบต่างๆ ที่เกี่ยวกับการกรองโดยเฉพาะ รีเวอร์สออสโมซิส เมมเบรนจะมีรูพรุนเล็กมากต้องใช้ความดันในการทำให้เกิดการซึมผ่าน เมมเบรนจึงต้องสามารถทนต่อความดันได้

2.2 ความต้านทานต่ออุณหภูมิ อุณหภูมิการทำงานของแต่ละกระบวนการจะเป็นปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่เราต้องการ บางครั้งการใช้อุณหภูมิสูงก็จำเป็นเพื่อให้กระบวนการผลิตดำเนินได้ดีขึ้น ดังนั้นวัสดุที่นำมาทำเมมเบรนจึงต้องสามารถทนต่อความร้อนได้พอสมควร ทั่วไปเมมเบรนจะถูกใช้งานที่อุณหภูมิประมาณ  $0-82^{\circ}\text{C}$

2.3 ความต้านทานต่อกรด-ด่าง (pH) ความเป็นกรดหรือด่างของสารละลายจะมีผลต่ออายุการใช้งานของเมมเบรน โดยเฉพาะเมมเบรนที่ทำมาจากเซลลูโลสอะซิเตทจะมีปัญหาการไฮโดรไลซิสมาก พบว่าอัตราการไฮโดรไลซิสจะเพิ่มเป็นฟังก์ชัน เอกซ์โปเนนเชียล กับการเพิ่ม pH ดังนั้นในการดำเนินการ ของระบบนี้จึงมักควบคุมให้อยู่ในช่วง pH 2-8 แต่อย่างไรก็ตาม จากข้อจำกัดของ pH ต่อการใช้งานของเมมเบรนนี้เองจึงเป็นจุดที่ทำให้เกิดการพัฒนาและผลักดันให้เกิดการผลิตเมมเบรนพวก Noncellulosic membrane

### คุณสมบัติของโพลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเมมเบรน

โพลิเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตเมมเบรนมีมากกว่า 130 ชนิด แต่มีเพียง 2-3 ชนิดเท่านั้นที่ถูกนำมาใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ทำเมมเบรนในเชิงพาณิชย์ดังตาราง 1

Cellulose acetate	สามารถใช้กับสารละลายส่วนใหญ่ได้ ยกเว้น aliphatic hydrocarbon และกรดแก่-ด่างแก่
Polyvinyl chloride	ไม่ทนต่อ ketone และ dioxane
Nylon	ไม่ทนต่อกรด
Acrylic	ไม่ทนต่อกรดและ ketone

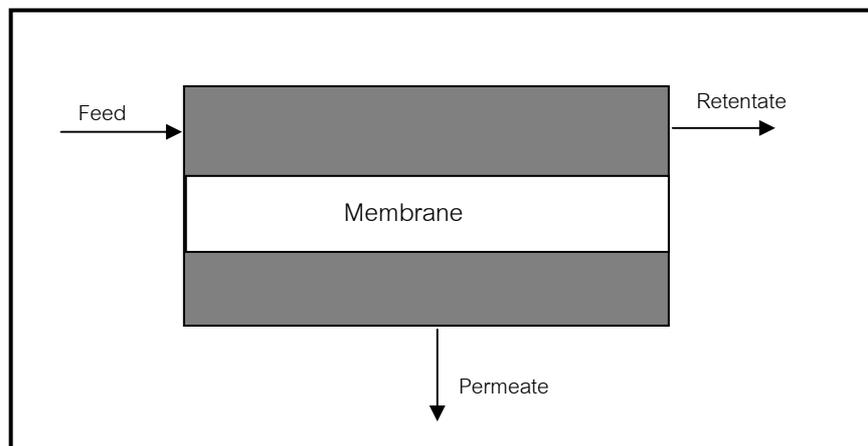
ตาราง 1 โพลีเมอร์ที่นิยมใช้ในการผลิตเมมเบรนสำหรับกระบวนการไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

	Application	
	MF	UF
Cellulose diacetate and triacetate (CA, CTA)	X	X
Cellulose nitrate (CN)	X	
CA/CN blends	X	
Cellulose	X	X
Polyacrylonitrile (PAN)		X
Polyamide (aromatic and aliphatic)		X
Polysulfone (PS)	X	X
Polyether sulfone (PES)	X	X
Polycarbonate (track-etched)	X	X
Polyethylene terephthalate (PET) (track-etched)	X	X
Polyamide		X
Polyethylene (PE)	X	
Polypropylene (PP)	X	
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	X	
Polyvinylidene fluoride (PVDF)	X	X
Polyvinylchloride (PVC)	X	X

ที่มา : Cheryan (1998)

### เมมเบรนโมดูลแบบต่างๆ (Membrane module types)

การศึกษาและวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรม ได้นำมาซึ่งการแบ่งประเภทของกระบวนการทางเมมเบรน แต่หลักพื้นฐานในการแยกจะเหมือนกันดังแสดงไว้ในภาพประกอบ 6 โดยสารป้อน (Feed) จะถูกป้อนและถูกแยกออกเป็นสองส่วนโดยเมมเบรน โดยส่วนที่ผ่านเมมเบรนจะเรียกว่า เพอมีเอท (Permeate) และส่วนที่ไม่ผ่านการแยกจะเรียกว่า รีเทนเตท (Retentate) ส่วนรูปแบบการแยกที่มีโครงสร้างและลักษณะการไหลที่ซับซ้อนกว่านี้อาจเป็นเยื่อแผ่นเรียบ หรือเป็นท่อในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบเมมเบรน เป็นในหน่วยอุปกรณ์ให้มีพื้นที่เมมเบรนตามต้องการเรียกว่า โมดูล ซึ่งได้มีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกันโดยสามารถแบ่งออกเป็น แบบหลักในการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งาน คือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าเมมเบรน กะทัดรัด คือ มีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง เป็นต้น



ภาพประกอบ 6 หลักการของกระบวนการเมมเบรนสังเคราะห์

ที่มา : Baker (2000)

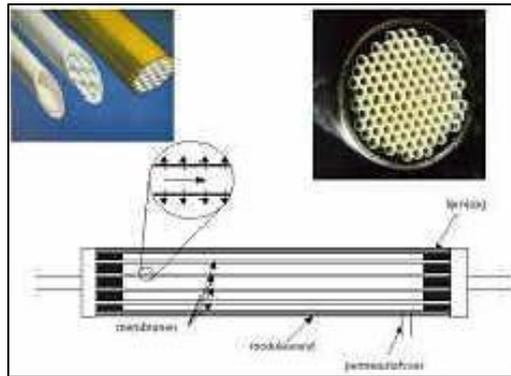
#### 1. เมมเบรนแบบแผ่น (Flat plate membrane)

มีลักษณะเป็นแผ่นแบนๆ เล็กๆ เมื่อใช้แล้วจะทิ้งไป

#### 2. เมมเบรนโมดูลแบบท่อ (Tubular module)

มีลักษณะเป็นท่อทรงกระบอกมีเส้นผ่านศูนย์กลาง  $>10$  mm. โดยสารละลายจะไหลผ่านภายในท่อ ผนังภายในท่อจะเป็นเยื่อ ของเหลวจะซึมผ่านออกมาได้และถูกเก็บไว้บริเวณรอบๆ ท่อ ดังนั้นตัวท่อเองจะต้องแข็งแรงพอ หรืออาจจะต้องใช้วัสดุจากภายนอกมาเสริมเพิ่มความแข็งแรงด้วย

ข้อดีของเมมเบรนแบบท่อคือ สามารถทำให้สารละลายเข้มข้นขึ้นหรือเพิ่มความหนืดมากขึ้นได้โดยไม่ทำให้เมมเบรนสกปรก และสามารถทำความสะอาดได้ง่ายเนื่องจากการไหลภายในช่องกลม ทั้งยังสามารถตรวจสอบและดูแลได้ง่ายด้วย แต่มีข้อเสียตรงที่มีพื้นที่ส่วนของที่กรองน้อยเกินไปเมื่อเทียบกับพื้นที่ทั้งหมด และอาจต้องเสียค่าใช้จ่ายมากขึ้นในส่วนของวัสดุที่นำมาเสริมเพิ่มความแข็งแรงให้เมมเบรน



ภาพประกอบ 7 เมมเบรนแบบท่อ

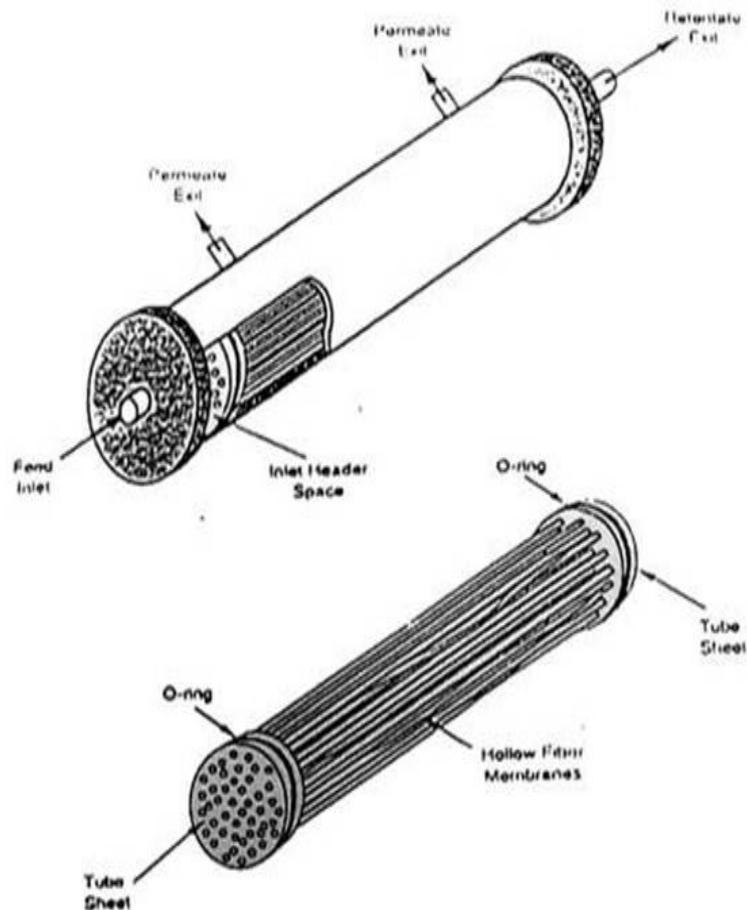
ที่มา: [www.tifac.org.in/news/mem1.gif](http://www.tifac.org.in/news/mem1.gif) (06 กุมภาพันธ์ 2549)

### 3. เมมเบรน โมดูลแบบเส้นใยกลวง (Hollow fiber หรือ Capillary-fiber module)

เป็นแบบที่มีความแข็งแรงและทนต่อแรงดันได้ดีพอสมควร ลักษณะเป็นท่อขนาดเล็ก ภายในมีไฟเบอร์จำนวนมากเรียงตัวขนานกันอยู่ เส้นใยจะมีรูกลวงมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพียง 0.1-0.5 mm และความหนาของเส้นใยอยู่ระหว่าง 1-2 mm. และบรรจุอยู่ในเรซิน (Resin) อุปกรณ์นี้มีพื้นที่เมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรสูง อาจสูงถึง 30,000  $\text{m}^2/\text{m}^3$  ถ้าใช้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นคือมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5-10 mm. จะเรียกว่าแบบ คาปิลารี มีการป้อนสารละลายเข้าทางส่วนล่างและสารที่ซึมผ่านออกด้านหนึ่ง ส่วนสารละลายเข้มข้นออกทางด้านตรงข้าม ในระบบไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชัน สารละลายจะไหลภายใต้ความดันไปในช่องที่เจาะไว้ ส่วนที่ซึมผ่านได้จะถูกแยกออกมาข้างนอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของแต่ละท่อจะมีขนาดเพียงประมาณ 0.02-0.043 นิ้วเท่านั้น ส่วนในระบบ รีเวอร์สออสโมซิสนั้น ไฟเบอร์จะมีขนาดเล็กมากจนอาจเรียกว่า Hollow fine fiber (HFF) ซึ่งจะมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในเพียงประมาณ 42 ไมครอน และมีการไหลตรงข้ามกับระบบ อัลตราฟิลเตรชัน คือ ให้สารละลายไหลผ่านรอบด้านนอกของไฟเบอร์ ส่วนสารละลายที่ซึมผ่านจะไหลเข้าไปอยู่ภายในช่องกลางแทน

การนำเมมเบรนแบบนี้ไปใช้อาจต้องมีการปรับสภาพของสารละลาย ก่อนนำเข้าไปกรองโดยเมมเบรนแบบนี้ เนื่องจากเมมเบรนแบบนี้ไวต่อการอุดตันมาก ข้อดีของเมมเบรน

ลักษณะนี้คือ สามารถทำความสะอาดได้โดยการผ่านน้ำเข้าไป เพราะภายในมีไฟเบอร์ที่เป็นเนื้อเดียวกันหมด หรือโดยการผลักดันให้สารละลายเข้าไปช่วยจับสิ่งสกปรกต่างๆ ที่ติดอยู่บนไฟเบอร์ของเมมเบรนออกไป แต่มีข้อเสียตรงที่ไฟเบอร์มักจะแตกง่ายเนื่องจากแรงเฉือนของความดันลด (Pressure drop) ที่มาจากความสกปรกที่เกิดขึ้น



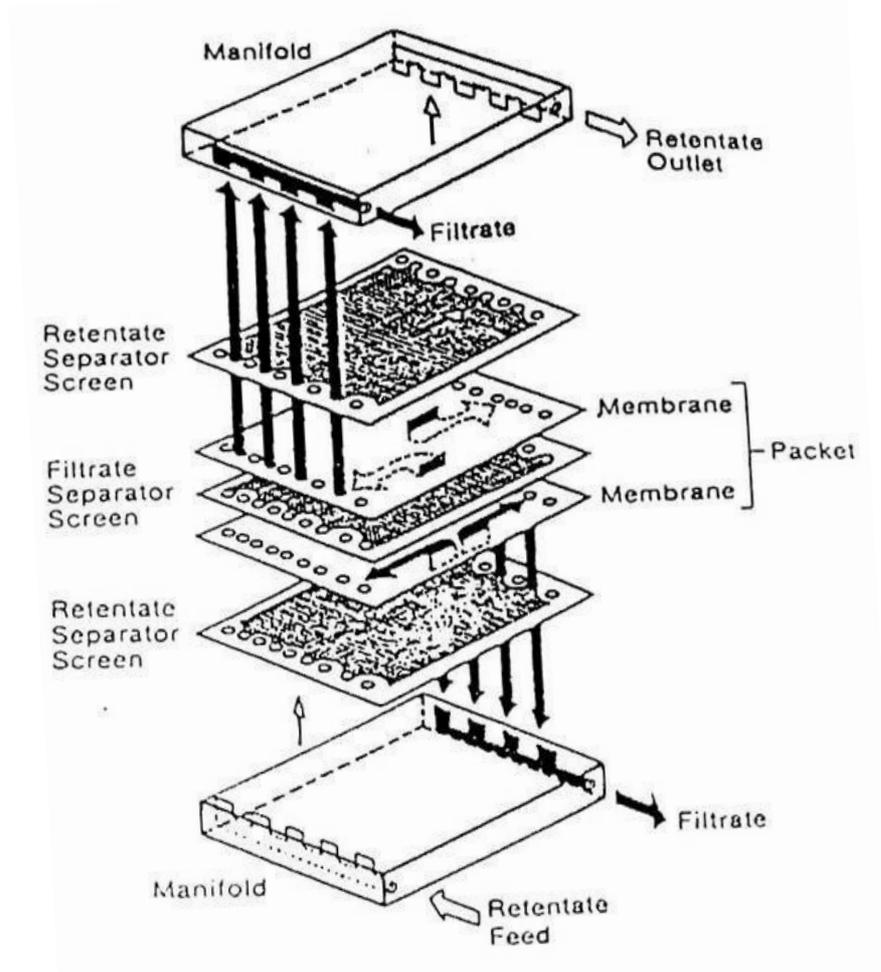
ภาพประกอบ 8 เมมเบรนแบบเส้นใยกลวง(Hollow fiber)

ที่มา : Zydney (1996)

#### 4. เมมเบรน โมดูลแบบแผ่น/มีกรอบ (Plate and frame module)

มีลักษณะเป็นเมมเบรนสองแผ่นประกบกันเป็นคู่ สารละลายป้อนไหลผ่านระหว่างคู่ของเมมเบรนแต่ละชุดอุปกรณ์ จึงประกอบด้วยคู่เมมเบรนวางซ้อนกันหรือเรียงกันเป็นชั้นๆ โดยเมมเบรนที่เป็นแผ่นแบนจะวางอยู่ระหว่างแผ่นโครงที่ใช้เป็นช่องให้สารละลายผ่าน ช่องนี้มีความสูงประมาณ 0.019-0.039 นิ้ว เมมเบรนและวัสดุที่ให้ความแข็งแรง (Support plate) จะ

ประกบติดกัน แบบที่ใช้ในระบบรีเวอร์สออสโมซิสนั้น จำเป็นต้องใช้วัสดุเพิ่มความแข็งแรงมากกว่าเนื่องจากในกระบวนการทำงานต้องใช้ความดันที่สูงกว่า และความสูงของช่องว่างก็จะแคบกว่าคือ จะสูงประมาณ 0.012-0.023 นิ้ว ระบบเมมเบรนแบบนี้มีข้อดีคือ สามารถเปลี่ยนเมมเบรนได้ง่าย แต่มีข้อเสียตรงที่ต้องใช้แรงงานมากในการทำความสะอาดและการเคลื่อนย้าย



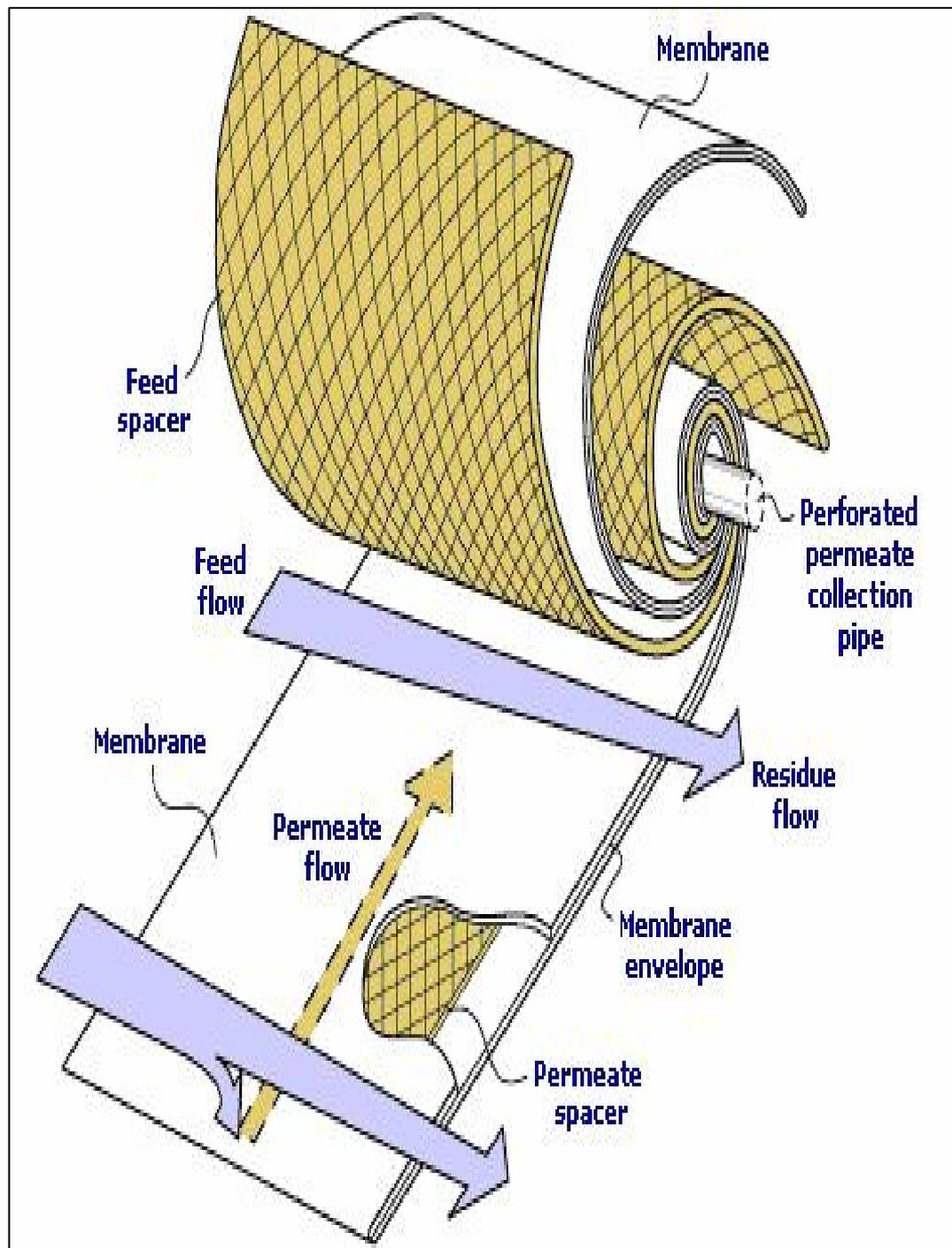
ภาพประกอบ 9 เมมเบรนแบบแผ่น/มีกรอบ (Plate and frame module)

ที่มา : Zydny (1996)

##### 5. เมมเบรนโมดูลแบบท่อม้วน (Spiral wound module)

มีลักษณะคล้ายท่อ โดยมีเมมเบรนม้วนไปรอบๆ ท่อที่คูดซึมตรงกลางแบบที่ใช้ในระบบอัลตราฟิลเตรชัน นั้นเมมเบรนจะมีความหนาประมาณ 0.025-0.6 นิ้วเมมเบรนแบบนี้มีความแข็งแรงสามารถใช้ในกระบวนการที่ต้องการความดันสูงๆ ได้และง่ายต่อการเปลี่ยนแผ่นเมมเบรน

แต่ระบบเมมเบรนแบบนี้มีข้อเสียถ้าใช้กับสารละลายที่มีอนุภาคแขวนลอยมากๆ เนื่องจากอนุภาคของแข็งนั้นจะไปอุดตันทำให้การไหลเกิดขึ้นได้ยาก



ภาพประกอบ 10 เมมเบรนแบบทอี่ม้วน (Spiral wound module)

ที่มา : Zydney (1996)

ระบบเมมเบรนแบบต่างๆ ดังกล่าวนั้นมีทั้งข้อดีและข้อเสียดังแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของระบบเมมเบรนแบบต่างๆ

ชนิด	ข้อดี	ข้อเสีย	commercial status
tubular	1. ทำความสะอาดง่าย, เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร 2. เป็นที่รู้จักดี, มีการทดสอบและใช้งานมาอย่างดีแล้ว 3. สามารถเปลี่ยนเฉพาะท่อเมมเบรนได้	1. ปริมาณของเหลวในยูนิต (hold up) สูง 2. ราคาแพง 3. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งค่อนข้างมาก	commercial available
plate and flame	1. ปริมาณ hold up ต่ำ 2. เป็นที่รู้จัก ใช้งานกันเป็นอย่างดีแล้ว 3. ใช้พื้นที่ในการติดตั้งไม่มาก	1. อาจเกิดการอุดตันของเมมเบรนตามจุดที่สารละลายหยุดนิ่งหรือไหลช้า 2. ทำความสะอาดยากไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร 3. ราคาแพง 4. การเปลี่ยนแผ่นเมมเบรนทำได้ไม่สะดวก ต้องใช้เวลา	commercial available
spiral wound	1. ราคาถูก 2. ขนาดกะทัดรัด 3. เป็นที่รู้จัก, ใช้งานมานาน	1. เกิดการอุดตันได้ง่าย, สกปรกง่าย 2. ทำความสะอาดยากไม่เหมาะกับผลิตภัณฑ์อาหาร	commercial available
hollow fiber	1. ราคาถูก 2. ขนาดกะทัดรัด	1. สกปรกหรืออุดตันง่าย 2. ทำความสะอาดยากมาก	commercial for RO

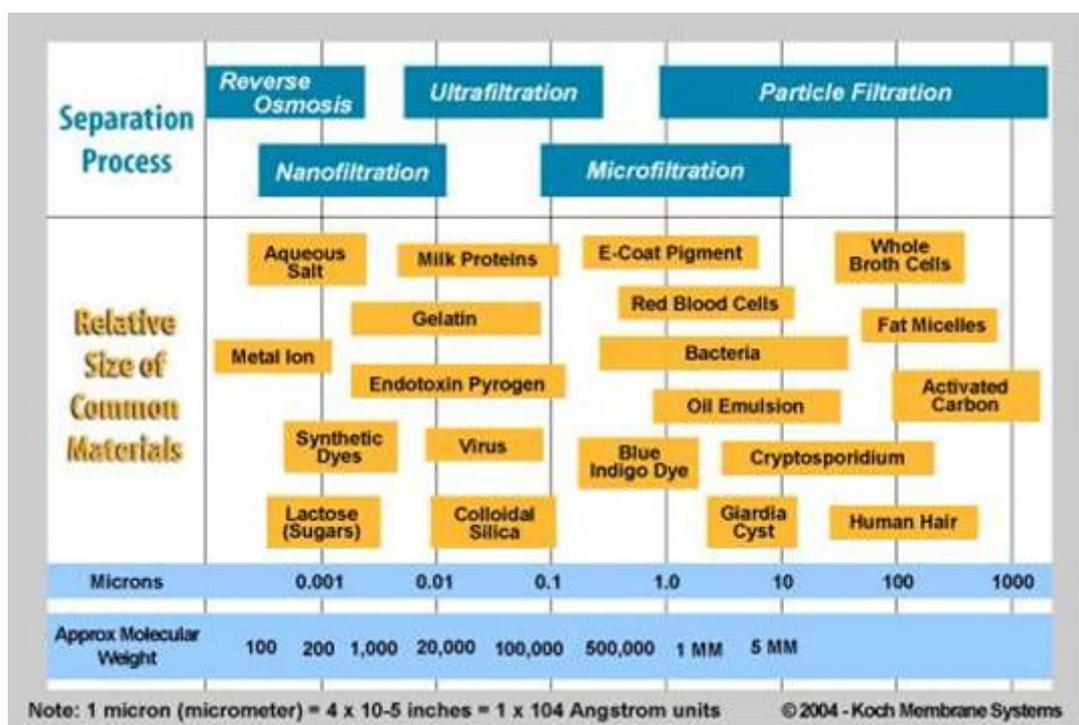
ที่มา: จินดา แซ่กัน, 2540

### กระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน (Membrane separation process)

การกรองโดยใช้เมมเบรน ได้มีการพัฒนานำไปใช้ในระบบการแยกในระดับอุตสาหกรรม โดยจำแนกตามหลักการของแรงขับเคลื่อน (เช่น ความเข้มข้น, ความดัน, ความต่างศักย์)

ของสารที่ผ่านหรือถูกกักกันโดยเมมเบรน ตัวแปรสำคัญที่แสดงความสามารถในการแยกคือ อัตราการไหลผ่านเมมเบรนหรือฟลักซ์ของเพอมีเอท

การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดโมเลกุล/อนุภาค สามารถจำแนกได้ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดโมเลกุลของสารละลายต่างๆ

ที่มา : [www.kochmembrane.com/ps\\_exmem.html](http://www.kochmembrane.com/ps_exmem.html) (8 กรกฎาคม 2548)

### ไมโครฟิลเตรชัน

เป็นกระบวนการแยกสารละลายที่มีอนุภาคขนาดเล็ก คอลลอยด์ อิมัลชันหรือสารแขวนลอย มีหลักการเช่นเดียวกับ อัลตราฟิลเตรชันแต่ขนาดรู (Pore size) ของเมมเบรนที่ใช้ในการออกแบบ ไมโครฟิลเตรชันจะมีขนาดใหญ่กว่า โดยพวก Macrosolution สามารถผ่านได้ แต่พวกคอลลอยด์ที่มีขนาดใหญ่ และอนุภาคที่มีขนาด ไมครอน เช่น เซลล์ จะไม่สามารถผ่านได้ การถ่ายโอนของสารละลาย และ ตัวถูกละลายผ่านเมมเบรน จะเกิดขึ้นโดยการไหลผ่าน Micropores ซึ่งการถ่ายโอนผ่านเมมเบรนนี้จะใช้แรงดันเป็นแรงขับ (Pressure-driven) โดยทั่วไปใช้กรองแยกสารที่มีขนาด 0.02-2.0 ไมครอน ซึ่งมีประสิทธิภาพมาก ความดันที่ใช้สำหรับดำเนินการประมาณ 3-50 psi

เมมเบรนที่ใช้ในระบบไมโครฟิลเตรชันส่วนใหญ่จะเป็นแบบ Isotropic และ thermalphase inversion casting และ solvent casting ในการผลิตเมมเบรนต้องผ่านขั้นตอนการทำให้

เป็นรูพรุน บางระบบใช้การแผ่รังสีแล้วตามด้วยกรดเพื่อทำให้เมมพิมพ์สร้างรูพรุนขึ้นมา เมมเบรนนี้สามารถทำจากสารโพลีเมอร์หลายชนิดหรือจากสารที่เชื่อมต่อกับปฏิกิริยาเคมี

### 1. หลักการพื้นฐาน

กระบวนการไมโครฟิลเตรชัน เป็นกระบวนการแยกด้วยเมมเบรนเพื่อแยกอนุภาคคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยในช่วง 500-20,000 อังสตรอม ออกจากของเหลวหรือแก๊ส จากข้อมูลอัตราเร็วในการตกตะกอนด้วยแรงโน้มถ่วงของโลกตามตาราง 3 จะเห็นว่าต้องใช้เวลาานหลายชั่วโมงจนถึงหลายวัน จึงจะตกตะกอนอนุภาคคอลลอยด์และของแข็งแขวนลอยในช่วงดังกล่าวข้างต้นออกมาได้ ดังนั้นเทคโนโลยีเมมเบรนจึงเป็นทางออกที่เหมาะสมสำหรับการแยกอนุภาคที่มีขนาดตั้งแต่น้อยกว่า 1 ไมครอนลงมา

ตาราง 3 อัตราเร็วในการตกตะกอนกับขนาดอนุภาค

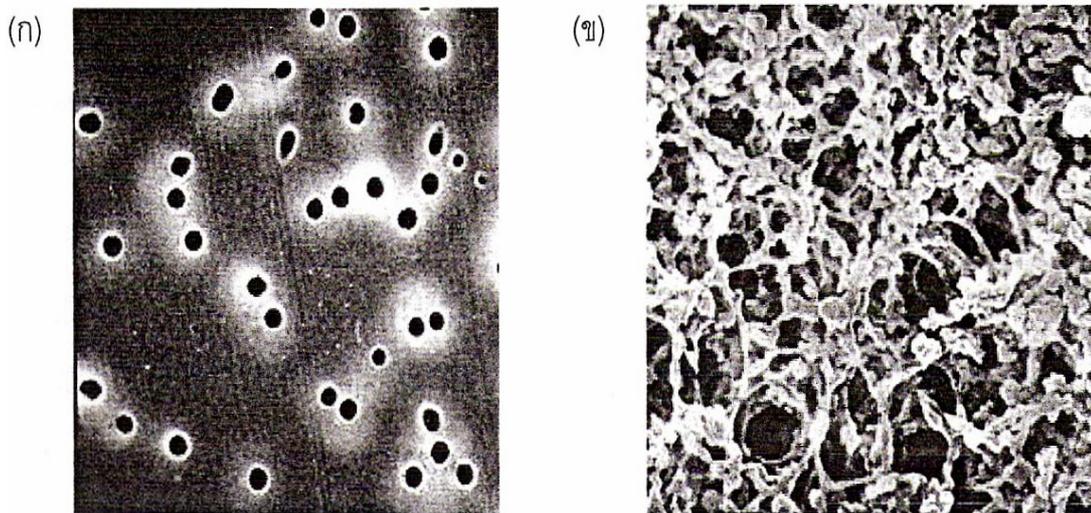
ขนาดรัศมีของอนุภาค	ชนิดของอนุภาค	อัตราเร็วในการตกตะกอน
10 มิลลิเมตร	กรวด	0.3 วินาที
1 มิลลิเมตร	ทรายหยาบ	3 วินาที
100 ไมครอน	ทรายละเอียด	38 วินาที
10 ไมครอน	ทรายแป้ง	33 นาที
1 ไมครอน	แบคทีเรีย	55 ชั่วโมง
100 นาโนเมตร	คอลลอยด์	230 ชั่วโมง
10 นาโนเมตร	คอลลอยด์	6.3 ปี
1 นาโนเมตร	คอลลอยด์	63 ปี

ที่มา : ชันทอง สุนทรภา, 2547

เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบ่งออกเป็น 2 แบบ ตามลักษณะโครงสร้างของรู คือ Screen filter มีโครงสร้างของรูเป็นทรงกระบอกตรง (Capillary-type pores) แต่ Depth filter มีโครงสร้างของรูบิดไปบิดมา (Tortuous-type pores) โดยวัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบบ Screen filter มักเป็นโพลีคาร์บอนเนตหรือโพลีเอสเตอร์ ขณะที่วัสดุที่ใช้เตรียมเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันแบบ Depth filter มักเป็นโพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC) โพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ (PVDF) โพลีเตตระฟลูออโรเอทิลีน (PTFE) สารประกอบเซลลูโลส ไนลอน โพลีโพรพิลีน (PP) เป็นต้น Screen filter สามารถเตรียมขึ้นได้ด้วยเทคนิค Track-etching ส่วน Depth filter ที่ทำจากโพลีเมอร์อินทรีย์สามารถเตรียมขึ้นด้วยเทคนิคเฟสอินเวอร์ชัน ส่วนที่ทำจาก PTFE และ PP เตรียม

ด้วยเทคนิคการยืดฟิล์ม (Stretching) ลักษณะของผิวหน้าเมมเบรนทั้งสองแบบที่ส่องดูด้วยกล้อง SEM แสดงในภาพประกอบ 12 จะเห็นว่า Depth filter ปรากฏรูซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพิกัด (Rated pore size) มากมายแต่ด้วยความคดเคี้ยวของรูจึงสามารถกักขนาดอนุภาคตามพิกัดได้

ถึงแม้ว่าขนาดรูของเมมเบรนที่นิยมใช้เป็นเกณฑ์ในการแยกประเภท อย่างไรก็ตาม อาจแบ่งประเภทของเมมเบรนจากค่า Molecular weight cutoff ก็ได้ ดังแสดงในตาราง 4 เมมเบรนต่างชนิดกันที่มี Molecular weight cutoff เท่ากัน อาจมีการกระจายขนาดรูแตกต่างกัน ค่า Molecular weight cutoff มีประโยชน์ใช้เป็นตัวพิจารณาเลือกเมมเบรนให้เหมาะกับการประยุกต์ใช้งานหนึ่งๆ



ภาพประกอบ 12 SEM ผิวหน้าของ (ก) Screen filter (ข) Depth filter  
ที่มา : ชันทอง สุนทรภา, 2547

ตาราง 4 ระดับน้ำหนักโมเลกุลของอนุภาคที่ถูกกักไว้ไม่ให้ผ่านเมมเบรนประเภทต่างๆ

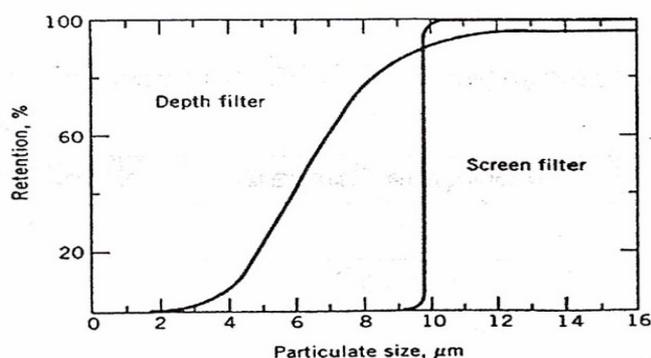
ประเภทของเมมเบรน	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)	น้ำหนักโมเลกุล (ดัลตัน)
ไมโครฟิลเตรชัน	$\geq 0.1$	$\geq 500,000$
อัลตราฟิลเตรชัน	0.01-0.1	1,000-500,000
นาโนฟิลเตรชัน	0.001-0.01	100-1,000
ออสโมซิสผันกลับ	$\leq 0.001$	$\leq 100$

ที่มา : ชันทอง สุนทรภา, 2547

## 2. กลไกการกักอนุภาคของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

อนุภาคที่มีขนาดเท่ากับหรือใหญ่กว่าขนาดรูของ Screen filter จะถูกกักไว้โดยตรงบนผิวหน้าของเมมเบรน ส่วนอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูของเมมเบรน สามารถผ่านเมมเบรนออกไปได้ถ้าไม่มีการอัดติดเนื่องจากความเฉื่อย (Inertial impaction) และการซึมซาบ (Diffusion) ของอนุภาคบนผนังรู สำหรับกลไกการกักอนุภาคของ Depth filter คือการดูดซับ (Adsorption) และการดักติด (Entrapment) อนุภาคส่วนใหญ่ถูกจับไว้ภายในช่องของเมมเบรน ยกเว้นอนุภาคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากความสามารถในการกักอนุภาคของ Depth filter ขึ้นอยู่กับความคดเคี้ยวของเส้นทางการไหล เมมเบรนแบบนี้จึงสามารถกักอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพิกัดได้ด้วยลักษณะเส้นโค้งการกักอนุภาคของเมมเบรนทั้งสองแบบแสดงในภาพประกอบ 13 นอกจากนี้ Depth filter ยังมีพื้นที่ผิวใช้ประโยชน์ได้ (Available surface area) มากกว่า Screen filter อย่างมาก ดังนั้น Depth filter จึงสามารถกักอนุภาคไว้เป็นปริมาณมากกว่า Screen filter และมีตำแหน่งให้โปรตีนและไวรัสยึดเหนี่ยวเป็นจำนวนมาก

อย่างไรก็ตามในแง่ของอัตราการไหลจากเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันทั้งสองแบบมีค่าเท่ากันโดยประมาณ ถึงแม้ว่า Depth membrane จะมีรูเปิดมากกว่าแต่ Screen membrane มีความบางกว่า กล่าวคือ Screen membrane มีความหนา 10 ไมครอน ขณะที่ Depth membrane หนา 50-120 ไมครอน



ภาพประกอบ 13 เส้นโค้งการกักของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันสองแบบ  
ที่มา : ชันทอง สุนทรภา, 2547

## 3. ลักษณะสมบัติของเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน

การระบุลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีรูพรุน ทั้งเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรน ได้แก่ เพอมิอเทฟลักซ์ ขนาดรู การกระจายขนาดรู ค่า Molecular

weight cutoff สมบัติความชอบ/ไม่ชอบ น้ำ ความแข็งแรงเชิงกล เสถียรภาพต่อสารเคมีและความร้อน และการสามารถทำความสะอาดได้

ในการหาฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนตามสมการ (2) โดยปกติทดสอบที่ความดันต่างๆ กับน้ำสะอาดเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาการอุดตันของรู ฟลักซ์ที่ผ่านเมมเบรนมักลดลงตามระยะเวลาที่ดำเนินการทดสอบ เนื่องจากเกิดการอัดตัวของโครงสร้างเมมเบรนภายใต้แรงดัน ซึ่งค่าการอัดตัวสามารถหาได้จากค่าความชันของกราฟที่พล็อตระหว่างฟลักซ์ที่ความดันคงที่หนึ่งๆ กับเวลาบนสเกลกึ่งลอการิทึม หน่วยของเพอมีเอทฟลักซ์มีได้หลายแบบ เช่น ฟลักซ์เชิงปริมาตรมีหน่วยเป็นปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงโมลมีหน่วยเป็นโมลต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา ฟลักซ์เชิงมวลมีหน่วยเป็นน้ำหนักต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่และหนึ่งหน่วยเวลา เป็นต้น โดยพื้นที่ที่ใช้ในการคำนวณ คือพื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับความหนาของเมมเบรน หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งคือตั้งฉากกับทิศทางการไหล

$$J = \frac{Q}{A\Delta t} \quad (2)$$

เมื่อ  $J$  = เพอมีเอทฟลักซ์,  $L/m^2 \cdot hr$

$Q$  = ปริมาตรเพอมีเอทที่ผ่านเมมเบรน,  $L$

$A$  = พื้นที่ผิวของเมมเบรนที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหล,  $m^2$

$\Delta t$  = เวลาที่เก็บเพอมีเอท,  $hr$

#### 4. การกรองไมโครฟิลเตรชันแบบปิดตายและแบบไหลขวาง

ลักษณะการกรองในกระบวนการไมโครฟิลเตรชัน แบ่งออกเป็น 2 แบบคือ

การกรองแบบปิดตาย (Dead-end Filtration) เป็นการป้อนสารละลายในทิศทางที่ตั้งฉากกับเมมเบรน ทำให้เกิดการสะสมของอนุภาคบนผิวเมมเบรนที่เรียกว่า เค้ก (Cake) การสะสมของเค้กทำให้ความต้านทานการไหลเพิ่มขึ้นและทำให้ฟลักซ์ลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้ต้องหยุดการกรองเพื่อกำจัดชั้นเค้กที่เกิดขึ้น ดังนั้นการกรองแบบปิดตายจึงควรใช้เมื่อสารละลายประกอบด้วยอนุภาคขนาดเล็กและมีความเข้มข้นต่ำและดำเนินงานแบบกะ

การกรองแบบไหลขวาง (Crossflow Filtration) เป็นการป้อนสารละลายขนานกับเมมเบรนหรือตั้งฉากกับทิศทางการไหลของเพอมีเอท ซึ่งเรียกว่า Crossflow หรือ Tangential flow ซึ่งเป็นแบบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน การป้อนสารละลายแบบไหลขวางมีผลของแรงเฉือน ทำให้สารละลายกวาดอนุภาคออกจากผิวหน้าเมมเบรน

ดังนั้นจึงลดการเกิด Concentration polarization จึงมีการสะสมของเค้กเพียงบางๆ เท่านั้น การลดลงของฟลักซ์ไม่มากเท่าในการกรองแบบปิดตาย จึงเหมาะสมสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง ดังนั้นการประยุกต์ใช้ในปัจจุบัน จึงเป็นไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวางเป็นส่วนใหญ่

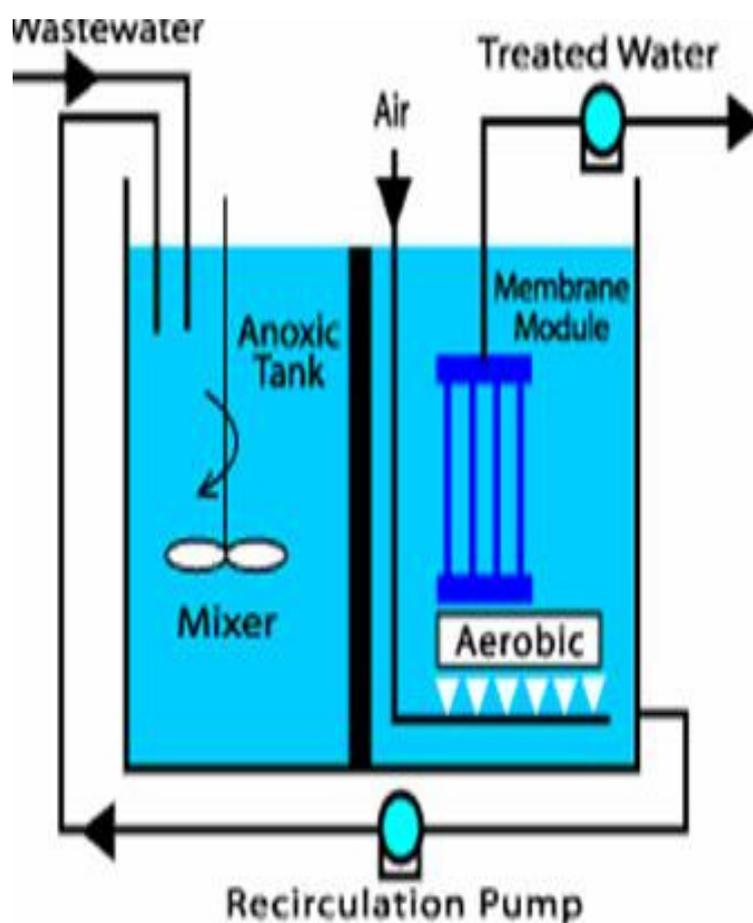
## 5. การประยุกต์ใช้

เนื่องจากการกรองไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง (Crossflow microfiltration, CFMF) ใช้แยกคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยที่มีขนาด 0.1-1 ไมครอน ดังนั้นจึงสามารถเปรียบเทียบได้กับการแยกเหวี่ยง (Centrifugation) หรือการกรองที่ใช้ Diatomaceous earth เป็นสารเคลือบแผ่นกรอง (Precoat) CFMF มีข้อได้เปรียบตรงที่เป็นระบบปิด มีเมมเบรนให้เลือกหลายชนิด ได้เพอมีอทที่ใส แต่มีราคาค่าเงินการต่ำ และดูแลรักษาง่าย แต่มีข้อเสียตรงที่ราคาลงทุนสูง ต้องทำความสะอาดเมมเบรนเป็นระยะๆ ในขณะที่การแยกเหวี่ยง และการกรองธรรมดาเป็นเทคโนโลยีที่ยอมรับและใช้มานานกว่า ถึงแม้ว่าจะมีข้อเสียอยู่หลายอย่าง เช่น การบำรุงรักษา การแยกไม่สมบูรณ์ และความจุของระบบขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคและความหนาแน่น เป็นต้น อย่างไรก็ตามแนวโน้มการใช้ CFMF ในอุตสาหกรรมต่างๆ เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน และมีขอบเขตการประยุกต์ใช้ใกล้เคียงกับอัลตราฟิลเตรชัน

อุตสาหกรรมน้ำผลไม้และเครื่องดื่ม การใช้ CFMF เพื่อการทำให้ใสเป็นอีกทางเลือกหนึ่งแทนการใช้อัลตราฟิลเตรชันในการทำให้ใส เพราะเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันมีราคาถูกกว่าและให้ค่าฟลักซ์สูงกว่า

อุตสาหกรรมนมและอาหาร ใช้เพื่อแยกฟอสโฟคาเซอินเนทออกจากนม แยกแบคทีเรียจากนํ้านม เพื่อยืดอายุการเก็บรักษา มีการใช้เพื่อแยกตะกอนโปรตีนจากนมถั่วเหลือง

การบำบัดน้ำและการบำบัดน้ำทิ้ง น้ำจากกระบวนการผลิตอาหารที่ไม่สกปรกแต่มีสิ่งเจือปน น้ำจากอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สามารถใช้ CFMF เพื่อบำบัดและนำกลับไปใช้ กรณีที่เป็นน้ำเสียสามารถใช้เมมเบรนไมโครฟิลเตรชันร่วมกับ การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digester) ซึ่งสามารถลดซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ได้สูงกว่า 80%



ภาพประกอบ 14 กระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้เมมเบรน

ที่มา : [www.tufco.sdu.dk/Html/FELFO%203.jpg](http://www.tufco.sdu.dk/Html/FELFO%203.jpg) (06 กุมภาพันธ์ 2549)

เทคโนโลยีชีวภาพ มีการใช้งานในสาขาเทคโนโลยีชีวภาพและวิศวกรรมชีวเคมี โดยสามารถแยกออกเป็น 2 แนวทางคือ ใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์ในการผลิตหรือแยกผลิตภัณฑ์จากการหมัก หรือ ใช้เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเซลล์ (Cell harvesting)

ตาราง 5 ชนิดและลักษณะของอนุภาคที่ใช้กระบวนการแยกโดยใช้เมมเบรน

กระบวนการแยก	กลไกการแยก	กระแสน้ำ	Driving force	Material retained	ตัวอย่างกระบวนการทางอุตสาหกรรม
ไมโครฟิลเตรชัน (MF)	sieving	ก๊าซหรือของเหลว	$\Delta P$ pressure difference 100-500 kPa	solvent (น้ำ) และ dissolved solutes	บำบัดน้ำเสีย, การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย emulsions, การลดแบคทีเรียหรืออนุภาคที่ทำให้เกิดความขุ่น
อัลตราฟิลเตรชัน (UF)	sieving	ของเหลว	$\Delta P$ 100-800 kPa	solvent (น้ำ) และ low molecular weight solutes (<1,000)	auto-pant recovery microemulsion oil removal การแยก biomolecule และไวรัสออกจากน้ำ
อิเล็กโตรไดอะไลซิส (ED)	sieving และ sorption diffusion	ของเหลว	$\Delta V$ voltage difference 1-2 V/ cell pair	solute, ions (solvent passage small)	Hemodialysis primarily
รีเวอร์สออสโมซิส (RO)	sorption diffusion	ของเหลว	$\Delta P$ 1-10 MPa	solvent (น้ำ)	บำบัดน้ำเสีย, การแยกเกลือออกจากน้ำทะเล (water desalination)
เพอเมปโพลชัน (PV)	sorption diffusion	ของเหลว	$\Delta$ (fugacity of i) ขึ้นอยู่กับ feed โมล แฟร็กชันและ permeate vacuum	permeable volatile organics	dehydration of organic, streams และแยกสารละลาย organic ออกจากสารละลายน้ำ

ที่มา: จินดา แซ่กัน, 2540

### ฟาวลิงในระบบไมโครฟิลเตรชัน

การเกิดฟาวลิง ในระบบไมโครฟิลเตรชัน มีลักษณะคล้ายกับระบบอัลตราฟิลเตรชัน โดยการกรองด้วยอัลตราฟิลเตรชันเมมเบรนใดที่เกิดฟาวลิงก็มีแนวโน้มที่จะเกิดในไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนมาก อย่างไรก็ตาม เนื่องจากไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนมีพื้นที่ผิวของผิวมากกว่า ดังนั้น Polarization เฉพาะที่จะมีค่าน้อย และการที่ขนาดรู มีขนาดใหญ่ ก็หมายความว่า ตัวถูกละลายและของแข็งจะสามารถเข้าไปในเมมเบรนได้ ซึ่งก็เป็นสาเหตุเริ่มต้นของการเกิด ฟาวลิง

### การศึกษาการเกิดฟาวลิง

วิธีการศึกษาการเกิดฟาวลิงที่ง่ายที่สุดคือ การศึกษาเกี่ยวกับการลดของฟลักซ์ของ ส่วนที่ผ่านการกรองว่ามีผลอย่างไรต่อการเกิดฟาวลิงรูปแบบของ Concentration polarization สามารถใช้ในการคำนวณหาความเข้มข้นของตัวถูกละลาย (Solute) ที่ผิวเมมเบรนคำนวณหา ลักษณะการเกิดฟาวลิงสามารถคำนวณหาจาก ค่าความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่ผ่านการกรองต่อเวลา

ตาราง 6 Foulant และการควบคุม Foulant

Process	Foulant	Control
RO	General inorganics (CaSO <sub>4</sub> , CaCO <sub>3</sub> , silica)	Hydrodynamics/shear Avoid solubility, water pretreatment , pH4-6, avoid high (>90%) recovery, additives (Polyphosphates)
	Organics	Biological treatment, activated carbon, ozone
	Colloid (<0.5µm)	Biological treatment, activated carbon, ozone
	Biological solid	ozone
	General	Chlorination/Dechlorination, filtration
UF/MF	Hydrocarbon surfactants protein	Hydrodynamics/shear (i.e., crossflow, backflushing) Limit concentration in feed adjust pH and salt, hydrophilic and highly porous surface
	Biological solid	Hydrophilicity, porosity control

วิธีการวัดการเกิดฟาวลิง อีกวิธีหนึ่งคือ สังเกตการณ์เปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ และการเกาะติดของสารละลายโปรตีนบนผิวเมมเบรน โดยสังเกตจากความดัน การศึกษาการเกิดฟาวลิงบนผิวเมมเบรนยังศึกษาได้จากแนวทางอื่นๆ ได้อีกหลายแนวทาง เช่น ศึกษาการลดลงของ เพอมีเอทฟลักซ์หรือฟลักซ์ของน้ำบริสุทธิ์จากเมมเบรนที่อุดตัน และการหาปริมาณของสารที่ถูกดูดซับนี้สามารถหาได้หลายวิธี เช่น การไตเตรท การวัดโดยใช้ Spectrophotometrically และการโครมาโตกราฟี โดยปกติแล้วเราศึกษาดังแต่เริ่มกรองจนเกิดฟาวลิงโดยไม่ใช้ความดันและที่ความดันค่าต่างๆ ในกรณีที่ไม่ใช้ความดัน โมเลกุลจะใช้วิธีการแพร่ผ่านเมมเบรน ส่วนในกรณีที่ใช้ความดันจะมี Driving force คือ  $\Delta P$  ช่วยในการเคลื่อนที่ผ่านของโมเลกุล

การใช้ Scanning Electroscopy Microscopy (SEM) หรือ Transmission Electron Microscopy (TEM) เป็นไปได้ที่จะเห็นชั้นของการเกิดฟาวลิง (Fouling layer) ได้แต่ อุปกรณ์สำคัญของการใช้ทฤษฎีทาง Microscopic คือ ระหว่างการเตรียมตัวอย่างโครงสร้างของโมเลกุลและการรวมตัวกันของโมเลกุลอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงทำให้เราไม่เห็นโครงสร้างที่แท้จริง

ทฤษฎีทาง Microscopic ที่แสดงการเกิดฟาวลิง จากการทดลองโดยใช้สารละลาย Bovine Serum Albumin (BSA) กรองผ่าน Polysulfone membrane จะเริ่มจากการรวมตัวของอนุภาคที่ทางเข้าของรูเมมเบรน เมื่อเวลาผ่านไปการรวมตัวกันจะมากขึ้น และสุดท้ายพบว่ามันปกคลุมไปทั่วผิวของเมมเบรน จากตัวอย่างนี้สามารถศึกษาถึงชั้นของการดูดซับ และผลของการก่อดั้วของชั้นที่เป็นไปได้ ระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชัน เป็นตัวอย่างที่ดีในการศึกษา เนื่องจากรูของเมมเบรนใหญ่เพียงพอ ถ้าศึกษาถึงรูปร่างแบบต่างๆ ของอนุภาคในการเกิดฟาวลิงจะสามารถสังเกตได้เมื่ออนุภาคเหล่านี้ถูกดูดซับ

### การคำนวณการเกิดฟาวลิง

ภายใต้สภาวะที่ให้ความดันผ่านเมมเบรน (Transmembrane pressure) และความเร็วในการไหลผ่านแบบการไหลขวางมีค่าคงที่ ฟลักซ์ของการกรอง (Filtrate flux) ที่ไหลผ่านจะมีค่าลดลงและจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ซึ่งค่าฟลักซ์นี้จะมีค่าน้อยกว่าค่า 2 ค่า คือ ค่าฟลักซ์เริ่มต้น และค่าฟลักซ์ที่กรองโดยใช้น้ำบริสุทธิ์ ปัญหาหลักของการลดลงของฟลักซ์คือ ลักษณะการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนของอนุภาค ซึ่งทฤษฎีพื้นฐานที่อธิบายการเกิดฟลักซ์คือ

$$J = \frac{\Delta P - \Delta \pi}{\mu(\Sigma R)} \quad (3)$$

โดย

$$J = \text{ฟลักซ์ (อัตราการไหลของ filtrate ต่อหน่วยพื้นที่เมมเบรน), L/m}^2 \cdot \text{hr}$$

$$\Delta P = \text{ความดันผ่านเมมเบรน, Pa}$$

$$\Delta \pi = \text{แรงดันออสโมติก, Pa}$$

$$\mu = \text{ความหนืดของ filtrate, Pa.S}$$

$$\sum R = R_m + R_f + R_g, \text{ m}^{-1}$$

$$R_m = \text{ความต้านทานของเมมเบรน (membrane resistance), m}^{-1}$$

$$R_f = \text{ความต้านทานของ fouling (fouling resistance), m}^{-1}$$

$$R_g = \text{ความต้านทานของ Gel (gel resistance), m}^{-1}$$

ค่าแรงดันออสโมติกที่ต่างกันนี้สามารถหาได้จากคุณสมบัติของสารละลายและผลต่างของความเข้มข้นผ่านเมมเบรน ซึ่งสามารถจะประมาณได้จากสมการอย่างง่ายของ Van't Hoff's คือ

$$\pi = C_i RT \quad (4)$$

โดย

$$C_i = \text{ความเข้มข้นเชิงโมลของสาร } i$$

$$R = \text{ค่าคงที่ของแก๊ส}$$

$$T = \text{อุณหภูมิ}$$

ผลของ Concentration polarization จะทำให้ความเข้มข้นที่ผิวเมมเบรนมีค่าสูงขึ้น ดังนั้น  $\Delta \pi \rightarrow (M\pi_b - \pi_p)$  เมื่อ M คือ polarization modulus ( $C_w/C_p$ ) เมื่อ  $M > 1$  จะพบว่าค่า  $\Delta \pi$  จะมีค่าเพิ่มขึ้นและค่าฟลักซ์จะมีค่าลดลง

ในระบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันเทอมแรงดันออสโมติก โดยปกติจะไม่นำมาคำนวณ จากสมการจะอธิบายการลดลงของฟลักซ์ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานการไหล ความต้านทานของเมมเบรน( $R_m$ ) หาได้จากฟลักซ์ของน้ำกลั่นจะได้

$$J_w = \frac{P_T}{R_M} \quad (5)$$

โดย

$$J_w = \text{ฟลักซ์ของน้ำกลั่น, L/m}^2 \cdot \text{hr}$$

$$P_T = \text{ความดันที่ให้กับสารละลาย, Pa}$$

$R_m$  = ความต้านทานเมมเบรน,  $m^{-1}$

เมื่อทำการกรองสารละลายจะเกิดการลดลงของฟลักซ์เนื่องจากการอุดตัน ความต้านทานของเมมเบรนในสมการ (5) จะเปลี่ยนไปโดยจะรวมความต้านทานเนื่องจากการฟาวลิง ( $R_p$ ) จากสมการ (3) จะเห็นได้ว่า การกรองโดยใช้ระบบอัลตราฟิลเตรชัน และไม่โครฟิลเตรชันแสดงสาเหตุของการลดลงของฟลักซ์ เนื่องมาจากสาเหตุ 2 ประเด็นคือ การเกิดขึ้นของเค้ก และการเกิดฟาวลิงของเมมเบรน (ค่า  $R_m$  เพิ่มขึ้น) ซึ่งสาเหตุหลังนี้เกิดเนื่องจากการกีดขวางการไหลของน้ำเนื่องจากการเกาะติดและดูดซับขององค์ประกอบของสารแขวนลอย (ทั้งอนุภาคและสารละลาย) ที่บริเวณผิวหน้าเมมเบรนและผนังของรูเมมเบรน

ปัจจุบันนี้มีโมเดลน้อยมากที่สามารถอธิบายถึงลักษณะของการเกิดฟาวลิงเนื่องจากการวิจัยไม่สามารถอธิบายถึงผลกระทบของฟลักซ์ต่อการเกิดฟาวลิงจากสาเหตุสำคัญ 3 ประการต่อไปนี้คือ

1. การทดลองเกี่ยวกับการดูดซับหรือการเกาะติดของอนุภาค หรือโมเลกุลบนเมมเบรนสังเคราะห์ (Synthetic membrane) เป็นเรื่องที่กระทำได้ยาก ที่ใช้กันอยู่ทั่วไปจะเป็นการนำข้อมูลจากแหล่งอื่นมาใช้
2. ถึงแม้ว่าโมเดลที่น่าเชื่อถือจะมีใช้กันอยู่ แต่การตีความโมเดลเหล่านี้เป็นเรื่องยากในการอธิบายลักษณะการเกาะติดของอนุภาคและโมเลกุลขนาดใหญ่ (Macromolecules) บนผิวของเมมเบรน
3. ระหว่างการกรองหากมีการเกิดเค้กและฟาวลิงขึ้น จะไม่มีโมเดลอย่างง่ายมาอธิบายกลไกการแยกที่เกิดขึ้นขณะทดลองได้

ดังนั้นการอธิบายถึงโมเดลของการเกิดฟาวลิงขึ้นจึงได้มาจากการประยุกต์ทางด้าน Blocking model Deposition model และ Filtration model ซึ่งมีงานวิจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเช่น

Cakl และ Mikulasek (1995) ได้ทำการทดลองโดยการกรองในลักษณะแบบไหลขวาง ของคอลลอยด์ผ่านไมโครฟิลเตรชันเมมเบรน โดยให้ความดันคงที่และได้ประยุกต์ใช้สมการของ Hermia (1992) ให้ใช้กับกรณีที่มีการกวนได้ดังสมการในตาราง 7 ดังต่อไปนี้

ตาราง 7 โมเดลของ Cake และ Blocking filtration ของการกรองแบบไหลขวาง

โมเดล	สมการ	ความสัมพันธ์ของกราฟ เส้นตรง	สมการที่
Complete blocking	$J = J_0 - K_b V$	พล็อตกราฟระหว่าง J กับ V	(6)
Intermediate	$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} + K_i t$	พล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{J}$ กับ t	(7)
Standard blocking	$\sqrt{\frac{J}{J_0}} = 1 - \frac{K_s V}{2}$	พล็อตกราฟระหว่าง $\sqrt{\frac{J}{J_0}}$ กับ V	(8)
Cake filtration	$\frac{1}{J} = \frac{1}{J_0} + K_c V$	พล็อตกราฟระหว่าง $\frac{1}{J}$ กับ V	(9)

โดย

$J$  = permeate flux,  $L/m^2 \cdot hr$

$J_0$  = ฟลักซ์ตอนเริ่มต้น (กรองโดยใช้น้ำบริสุทธิ์),  $L/m^2 \cdot hr$

$V$  = ปริมาตรรวมของ permeate ที่วัดได้ในเวลา t, L

$K_c$  = constant value for cake filtration model,  $m^2 \cdot hr/L^2$

$K_b$  = constant value for complete blocking model,  $1/m^2 \cdot hr$

$K_i$  = constant value for intermediate blocking model,  $m^2/L$

$K_s$  = constant value for standard blocking model,  $1/L$

Complete blocking filtration model (CBM) มีสมมติฐานว่าโมเลกุล หรืออนุภาคที่มาถึงเยื่อแผ่นจะเข้าไปอุดตันรูพรุนโดยทุกๆ โมเลกุลหรือ อนุภาคมีส่วนในการอุดตันรูพรุนโดยไม่ซ้อนทับกัน

Intermediate blocking filtration model (IBM) จะมีความคล้ายคลึงกับ complete blocking filtration model โดยแบบจำลองนี้จะกล่าวว่า ในการเกิดการอุดตัน โมเลกุลหรืออนุภาคหนึ่งจะสามารถซ้อนทับอยู่บนอีกโมเลกุลหรืออนุภาคอื่นได้

Standard blocking filtration (SBM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายในการกรองสารละลายขนาดเล็กกว่ารูพรุนของเมมเบรนมาก โดยอนุภาคสามารถผ่านรูพรุนไปได้และมีอนุภาค

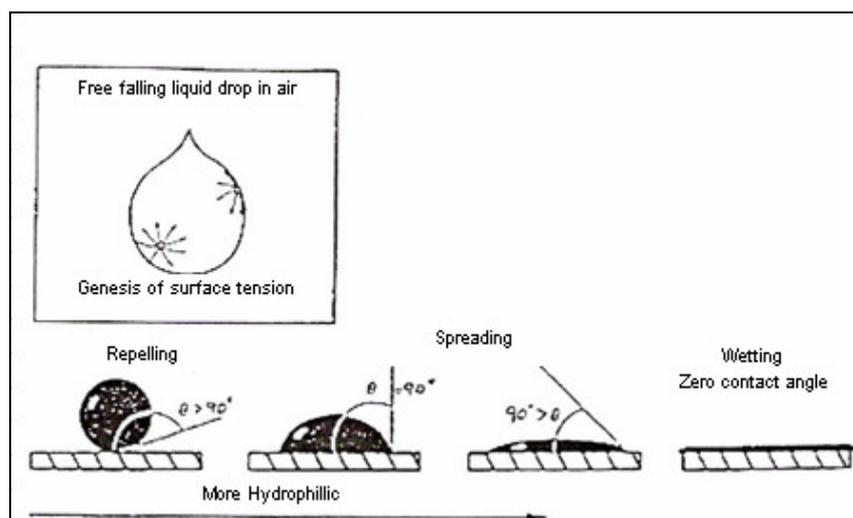
บางส่วนถูกดูดซับอยู่ในรูพรุน ทำให้เกิดการอุดตันภายในโครงสร้างของเมมเบรนเท่านั้น และไม่เกิดชั้นสะสมบนผิวหน้าของเมมเบรน

Cake filtration model (CFM) เป็นแบบจำลองที่อธิบายการกรองอนุภาคที่มีขนาดต่างๆ กันคือ ถ้าอนุภาคใหญ่กว่ารูพรุน อนุภาคจะถูกสะสมและเกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรน ถ้าอนุภาคมีขนาดเล็กและใหญ่ผสมกัน อนุภาคนขนาดเล็กจะถูกสะสมอยู่ในรูพรุนและต่อมาจะเกิดการสะสมของอนุภาคนขนาดใหญ่ เกิดเป็นเค้กที่ผิวหน้าเมมเบรนจนในที่สุดเมมเบรนสามารถกักโมเลกุลหรืออนุภาคนขนาดเล็กไว้เกิดเป็นชั้นบางบนเมมเบรน (กรณีถ้าเป็น โมเลกุลเรียก เจล และถ้าเป็นอนุภาคเรียก เค้ก

## ปัจจัยต่อการเกิดฟาวลิง

### 1. คุณสมบัติของเมมเบรน

1.1 คุณสมบัติความชอบน้ำ (Hydrophilicity) เมมเบรนในอุดมคติจะมีคุณสมบัติความชอบน้ำ เมมเบรนที่ผลิตจากวัสดุที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) สามารถดูดซับองค์ประกอบที่ไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้เกิดการอุดตันสูงกว่าเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำ คุณสมบัติความชอบน้ำของผิวเมมเบรนทั่วไปจะสามารถบอกด้วยค่ามุมสัมผัสของน้ำ (Water contact angle,  $\theta$ ) โดยผิวเมมเบรนที่มีมุมเข้าใกล้  $0^\circ$  ( $\cos \theta = 1$ ) จะมีคุณสมบัติความชอบน้ำและผิวเมมเบรนที่มีมุมมากกว่า  $90^\circ$  ( $\cos \theta \leq 0$ ) มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำดังภาพประกอบ 15



ภาพประกอบ 15 มุมสัมผัสของน้ำที่เกาะบนผิวหน้าเมมเบรน

ที่มา: Jorgen (2001)

นอกจากค่า  $\theta$  จะขึ้นกับชนิดของเมมเบรนแล้วยังขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวเมมเบรน ได้แก่ การปนเปื้อนบนผิวหน้าเมมเบรน ความขรุขระ ความหนาแน่นของรูพรุน เป็นต้น ผิวหน้าของเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำจะมีมุมที่ชอบน้ำ ได้แก่ หมูไฮดรอกซิล อีเทอร์ คาร์บอกซิล ซัลโฟเนต และอะไมด์ ผิวหน้าของเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำจะมีมุม อะลิฟาติก และอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน เป็นต้น มุมของน้ำที่เกาะบนผิวหน้าเมมเบรนชนิดต่างๆ ดังตาราง 8 ตัวอย่างเมมเบรนที่ผลิตจากเซลลูโลสจะเกิดการอุดตันน้อยกว่าวัสดุอื่นๆ โดยเฉพาะวัสดุที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ตัวอย่างเช่น โพรตีนจะมีส่วนที่ไม่ชอบน้ำในโครงสร้างซึ่งจะมีการกระทำต่อกันอย่างมากกับเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ

ตาราง 8 มุมของน้ำที่เกาะบนผิวหน้าเมมเบรนชนิดต่างๆ

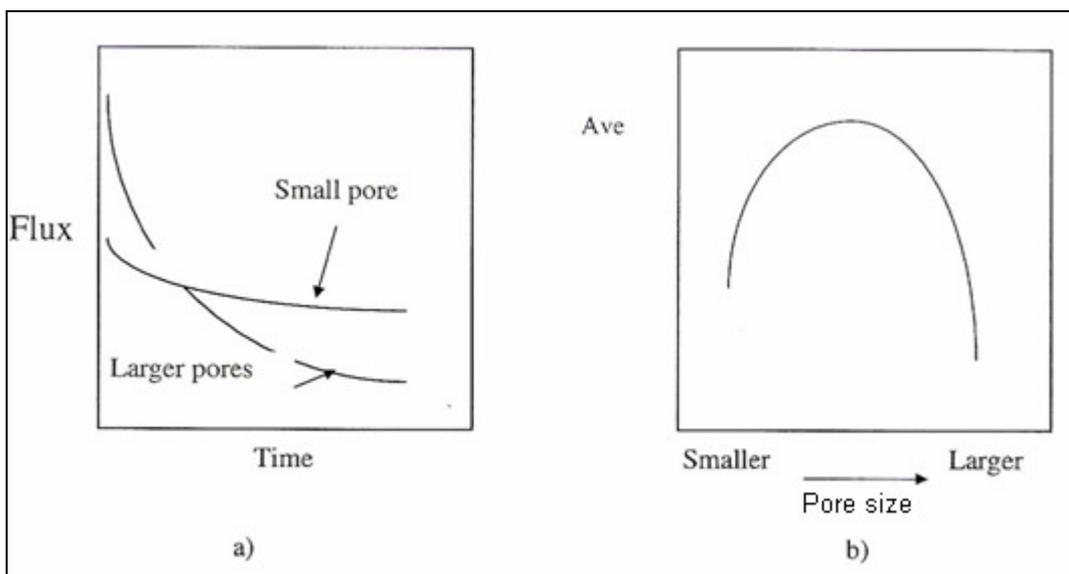
Membrane	Contact Angle (°)
- Cellulosic (unidentified)	24
Nova C-series	12-15
Desal CA-UF	45
Ceramic	30
Polyacrylonitrile (unidentified)	46
Membrex Ultrafilic	4
Poly(acrylonitrile-co-vinyl chloride)	
XM 50, Amicon	40
XM100A, Amicon	60
Polyethersulfone (unidentified)	65
IR&S UF3028	52
Nova FNS series	72-81
Hydrophilized	44
Desal E-100	56
Polypropylene	108
Polysulfone	
PM10, Amicon	38
PM30, Amicon	40
PM30, Amicon	42
PM30, Amicon	43
IRIS UF 3026	54
DOS-GR61	44
DOS-GR81	45
PTFE (unidentified)	112
PVDF (unidentified)	66
Regenerate cellulose	
YM1, Amicon	96
YM5, Amicon	48
YM10, Amicon	6

ที่มา: Cheryan (1998)

1.2 ลักษณะของผิวหนังเมมเบรน ชนิดเซลลูโลซิก เกิดการอุดตันน้อยกว่าเมมเบรนที่ผลิตจากโพลีเมอร์ชนิดอื่นๆ เนื่องจากความขรุขระของผิวหนังเมมเบรนนั่นเอง ผิวหนังเมมเบรนชนิดเซลลูโลสอะซิเตทจะมีความเรียบและมีความสม่ำเสมอส่วนเมมเบรนชนิดโพลีเอไมด์มีความขรุขระมากกว่าทำให้เกิดการอุดตันได้ง่ายกว่าเมมเบรนชนิด เซลลูโลสอะซิเตท โดยเฉพาะการอุดตันเนื่องจากจุลินทรีย์

1.3 ประจุของเมมเบรน เมมเบรนส่วนใหญ่จะมีค่าประจุลบ ประจุบนผิวเมมเบรน มีความสำคัญต่อการกรองสารละลายที่มีขี้ ตัวอย่างเช่น ค่าฟลักซ์ของสีกีเลือบที่มีความเป็นประจุบวก จะมีความมากขึ้นเมื่อเราใช้เมมเบรนที่มีความเป็นประจุบวก ทั้งนี้เนื่องจากเกิดแรงผลักกันของอนุภาค และเมมเบรนที่มีขี้หรือประจุชนิดเดียวกัน

1.4 ขนาดรูพรุน ขนาดรูพรุนของเมมเบรนและขนาดอนุภาคในสารละลายป้อนมีความสำคัญมาก มีงานวิจัยต่างๆ มากมายที่ได้ศึกษาเรื่องนี้ ภาพประกอบ 16 พบว่าในช่วงแรกของการดำเนินการเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่จะให้ฟลักซ์สูงกว่า เมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนเล็ก แต่เมื่อเวลาผ่านไปเมมเบรนที่มีขนาดเล็กกว่าจะให้ปริมาณฟลักซ์สูงกว่า ปรากฏการณ์ดังกล่าวเกิดเนื่องจากเมมเบรนมีขนาดรูพรุนขนาดใหญ่ แต่อนุภาคของสารละลายมีขนาดเล็กกว่าขนาดรูพรุนของเมมเบรนทำให้เกิดการเกาะติดภายในรูพรุน ดังนั้นปริมาณฟลักซ์จึงลดลงอย่างรวดเร็วภายใน 2-3 นาทีแรกของการดำเนินการ นอกจากนี้การดำเนินการภายใต้ความดันสูงจะทำให้การอัดแน่นของเค้กมากขึ้น ส่งผลให้ทำความสะอาดยากขึ้นด้วย ในทางกลับกันถ้าขนาดของรูพรุนของเมมเบรนเล็กกว่าอนุภาคของสารละลายป้อน อนุภาคจะไม่เข้าไปเกาะติดภายในรูพรุนแต่จะเกาะติดบนผิวหนังเมมเบรน ดังนั้นถ้าเราดำเนินการแบบการกรองแบบไหลขวาง จะมีแรงเฉือนทำให้การสะสมโมเลกุลของสารละลายบนผิวเมมเบรนน้อยดังนั้นจึงไม่มีผลกระทบต่อค่าฟลักซ์ การเลือกขนาดรูพรุนที่เหมาะสมมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่ง ถ้าขนาดของรูพรุนเมมเบรนใกล้เคียงหรือเล็กกว่าขนาดของอนุภาคเล็กน้อย ปริมาณฟลักซ์ที่ลดลงในช่วงแรกจะเกิดช้าลง กฎการเลือกขนาดรูพรุนต่อขนาดอนุภาคโดยเฉลี่ยจะเลือกในอัตราส่วน 1:10 การเลือกขนาดรูพรุนที่เล็กเกินไปหรือใหญ่เกินไป ปริมาณฟลักซ์ที่ได้จะน้อย ยกตัวอย่างเช่น การแยกหางนมโดยใช้เมมเบรนชนิดนิวเคลิพอร์ (Nuclepore membrane) ขนาดรูพรุน 0.08 ไมโครเมตร จะให้ปริมาณฟลักซ์มากกว่าการแยกด้วยขนาดรูพรุนเล็กกว่านี้ (0.01 0.03 และ 0.05 ไมโครเมตร) หรือขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 0.1 ไมโครเมตร (อ้างอิงโดย Cheryan (1998))



ภาพประกอบ 16 ความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุนของเมมเบรนกับฟลักซ์

- ฟลักซ์ต่อเวลา ทุกสภาวะการดำเนินการมีค่าคงที่
- ฟลักซ์เฉลี่ย โดยการดำเนินการที่มีการหมุนเวียน (เช่น ทำความสะอาด) กับขนาดรูพรุนเมื่อ ปัจจัยอื่นๆ มีค่าสมมูล

ที่มา: Cheryan (1998)

1.5 การปรับสภาพผิวหน้าเมมเบรน เป็นการปรับสภาพผิวหน้าเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำให้มีคุณสมบัติความชอบน้ำเพื่อลดการอุดตัน โดยเพิ่มหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำที่ผิวหน้าเมมเบรน เช่น หมู่ไฮดรอกซิล ( $\text{OH}$ ) ด้วยวิธีการเคลือบลงผิวหน้า โดยกระบวนการดูดซับ วิธีการตัดแปลงด้วยรังสี การใช้ไมโครเวฟเป็นต้น ตัวอย่างเช่น วิธีการตัดแปลงนำไกลซีนลงบนผิวหน้าของเมมเบรนชนิดโพลีไวนิลิดีนฟลูออไรด์ เป็นต้น

## 2. คุณสมบัติของสารละลาย

2.1 โปรตีน มีหมู่ฟังก์ชันที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ดังนั้นโปรตีนจึงเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดการอุดตันในเมมเบรน โครงสร้างที่ซับซ้อนของโปรตีนเกิดการจับตัวกันกลายเป็นเจลเสมือนเมมเบรนชั้นที่ 2 และ 3 ถัดจากผิวหน้าเมมเบรน ทำให้ปริมาณฟลักซ์ลดลงเมื่อเวลาผ่านไป

2.2 เกลือ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฟาวลิงของเมมเบรนโดยเกลือแร่จะตกตะกอนบนผิวหน้าเมมเบรนเนื่องจากความสามารถในการละลายไม่ดี หรือการเกิดแรงกระทำระหว่างขั้วประจุต่างกันของเมมเบรนและเกลือแร่ส่งผลให้ฟลักซ์ลดลง ตัวอย่าง เกลือแร่ เช่น เกลือแคลเซียมในนม เกลือโซเดียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น

2.3 ความเป็นกรด-ด่าง ปริมาณฟลักซ์ของโปรตีนจะต่ำสุดที่จุดไอโซอิเล็กทริกของโปรตีนและได้ปริมาณฟลักซ์สูงเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง สูงกว่าจุดไอโซอิเล็กทริก

2.4 ไขมันและน้ำมัน ในการแยกสารละลายไขมันในน้ำ ถ้าเมมเบรนที่ใช้มี คุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ น้ำมันอิสระจะเคลือบบนผิวหน้าเมมเบรนส่งผลให้ได้ปริมาณฟลักซ์น้อยมาก น้ำมันจะมีโครงสร้างคล้ายคลึงกับหมู่ฟังก์ชันของเมมเบรน เช่น โพลินิลิดีนฟลูออไรด์ และโพลีซิลิโคน ดังนั้นจึงเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดการอุดตันในเมมเบรน เมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำจะไม่เกิดพฤติกรรมดังกล่าวข้างต้น นั่นคือจะได้ปริมาณฟลักซ์สูงนั่นเอง

2.5 สารป้องกันการเกิดฟอง เพื่อป้องกันการเกิดฟองในเครื่องระเหยน้ำและถังหมัก สารป้องกันการเกิดฟองเชิงพาณิชย์โดยทั่วไป เช่น โพลีออกซีเอทิลีน โพรพิลีน เอเลอิล อีเทอร์ โฟโกลคอลล และน้ำมันซิลิโคนเป็นต้น จะเกิดการอุดตันได้ง่ายในเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำ ส่วนเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความชอบน้ำจะเกิดการอุดตันเนื่องจากสารป้องกันการเกิดฟองน้อยมาก

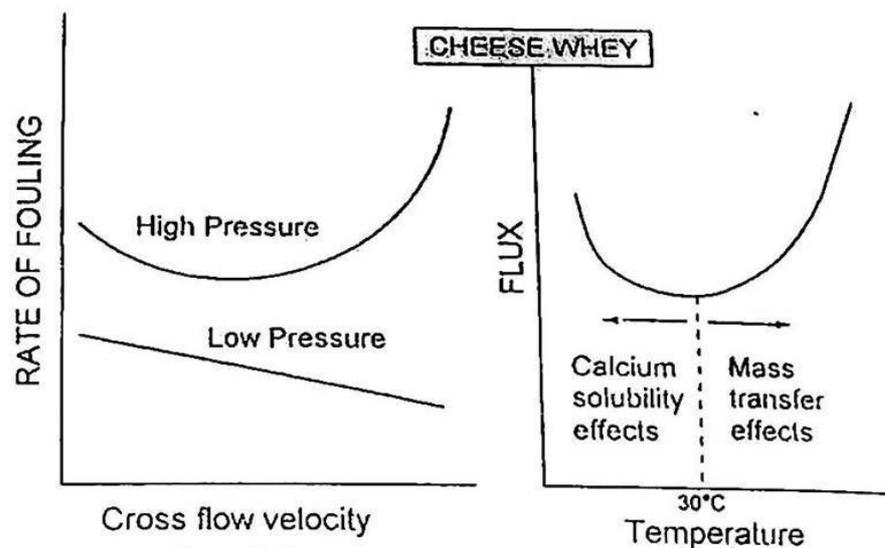
2.6 สารประกอบที่มีอยู่ในดิน (Humic substance) มีความเป็นสารละลายอิเล็กโตรไลต์ที่กรดอ่อนๆ ประกอบด้วยหมู่คาร์บอกซิลและฟีนอลิก มีปริมาณร้อยละ 80 ของสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมดในน้ำธรรมชาติ เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลงจะมีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำมากขึ้น ดังนั้นจะเกิดการอุดตันในเมมเบรนที่มีคุณสมบัติความไม่ชอบน้ำที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำๆ

### 3. กระบวนการทางวิศวกรรม

การออกแบบกระบวนการ เราต้องคำนึงถึงความซับซ้อนของปฏิกิริยาทางเคมี ฟิสิกส์ของส่วนประกอบของสารละลายป้อน พารามิเตอร์ของกระบวนการ ได้แก่ อุณหภูมิ อัตราการไหลสารป้อน ความดันและความเข้มข้นของสารละลายป้อน เนื่องจากเป็นปัจจัยหลักที่จะส่งผลต่อการอุดตันของเมมเบรน

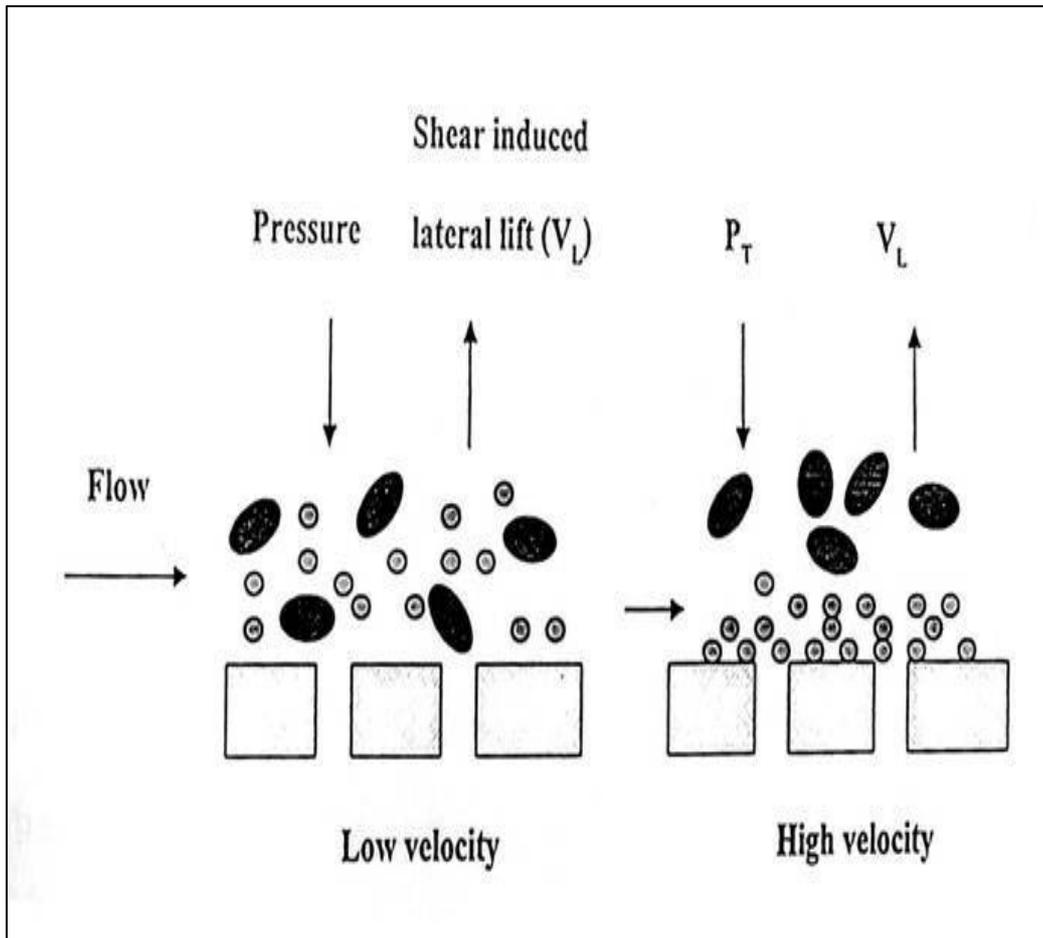
3.1 อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิต่อการเกิดฟาวลิงไม่แน่ชัดจาก สมการของ Hagen-Poiseuille แสดงถึงการไหลที่เกิดขึ้นภายในรูพรุน การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ปริมาณฟลักซ์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามมีรายงานพบว่า การแยกหางนมที่อุณหภูมิที่ต่ำกว่า 30 องศาเซลเซียส ปริมาณฟลักซ์จะลดลงเพราะความสามารถในการละลายของแคลเซียมและฟอสเฟตต่ำลง แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิเพิ่มขึ้นเกิน 30 องศาเซลเซียส ปริมาณฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องจาก ปัจจัยเสริม เช่น ความหนืดต่ำ และความสามารถในการเลือกผ่านสูงกว่า แต่ถ้าอุณหภูมิสูงเกินไป โปรตีนนมจะเกิดการเสียสภาพทำให้เกิดการอุดตันบนเมมเบรน ดังนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการกรองอยู่ ในช่วง 30-60 องศาเซลเซียส

3.2 อัตราการไหลและความปั่นป่วน การเกิดแรงเฉือนสูงบนผิวหน้าเมมเบรนจะทำให้สารละลายไม่สามารถเกาะติดบนผิวหน้าเมมเบรนได้ ดังนั้น จึงลดความต้านทานเชิงกลของชั้นฟาวลิงปรากฏการณ์ดังกล่าวข้างต้น จะไม่เกิดขึ้นถ้าดำเนินการโดยใช้ความดันสูงร่วมกับความเร็วสูง ดังภาพประกอบ 17 สารละลายที่มีขนาดเล็กจะมีลักษณะการแพร่แบบ บราวเนียนเมื่อดำเนินการโดยใช้แรงเฉือนต่ำ และการแพร่ผ่านแบบนี้ไม่ขึ้นอยู่กับแรงเฉือน แต่แปรผกผันกับขนาดรูพรุนของอนุภาค การแพร่แบบแรงเฉือนเหนี่ยวนำจะเกิดขึ้นกับสารละลายซึ่งมีอนุภาคแขวนลอยขนาดใหญ่ ความเร็วยกตัวเนื่องจากแรงเฉือนเหนี่ยวนำ (Lift velocity;  $V_L$ ) เป็นสัดส่วนกับ  $\gamma d_p^n$  เมื่อ  $n = 1.3-4$  โดย  $\gamma$  คือแรงเฉือน และ  $d$  คือเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาค เมื่อเพิ่มความเร็วของสารป้อน อนุภาคขนาดใหญ่ของสารละลายจะถูกแรงเนื่องจากความเร็วทำให้ลอยตัวขึ้นจากผิวหน้าเมมเบรน ในขณะที่อนุภาคขนาดเล็กจะยังเกาะอยู่ที่ผิวหน้าของเมมเบรน ทำให้เกิดการแบ่งเป็นชั้นของอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ออกจากกันทำให้ การอุดตันของเมมเบรนมีมากขึ้น โดยเป็นการอุดตันที่เกิดภายในรูพรุนดังภาพประกอบ 18 จากการศึกษาการแยกหางนมพบว่า เมื่อดำเนินการที่ความดันต่ำและการเพิ่มความเร็ว สารละลายป้อนจะเกิดแรงเฉือนขึ้นทำให้เกิดการสะสมบนผิวหน้าเมมเบรนน้อยที่สุด แต่เมื่อดำเนินการที่ความดันสูงจะทำให้อนุภาคของสารละลายเกาะติดผิวหน้าเมมเบรน ด้วยอัตราเร็วกว่าการที่อนุภาคของสารละลายที่หลุดออกเนื่องจากแรงเฉือนจากอัตราไหลที่สูงขึ้น ทำให้เกิดการอุดตันมากยิ่งขึ้น ชั้นของสารที่อุดตันเพิ่มขึ้นเนื่องจากความดันและความเร็วที่ใช้ส่งผลให้เกิดการอุดตันมากขึ้นเมื่ออัตราการไหลสูงขึ้น



ภาพประกอบ 17 การเกิดฟาวลิง(Fouling) ของการกรองหางนมด้วยเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชัน

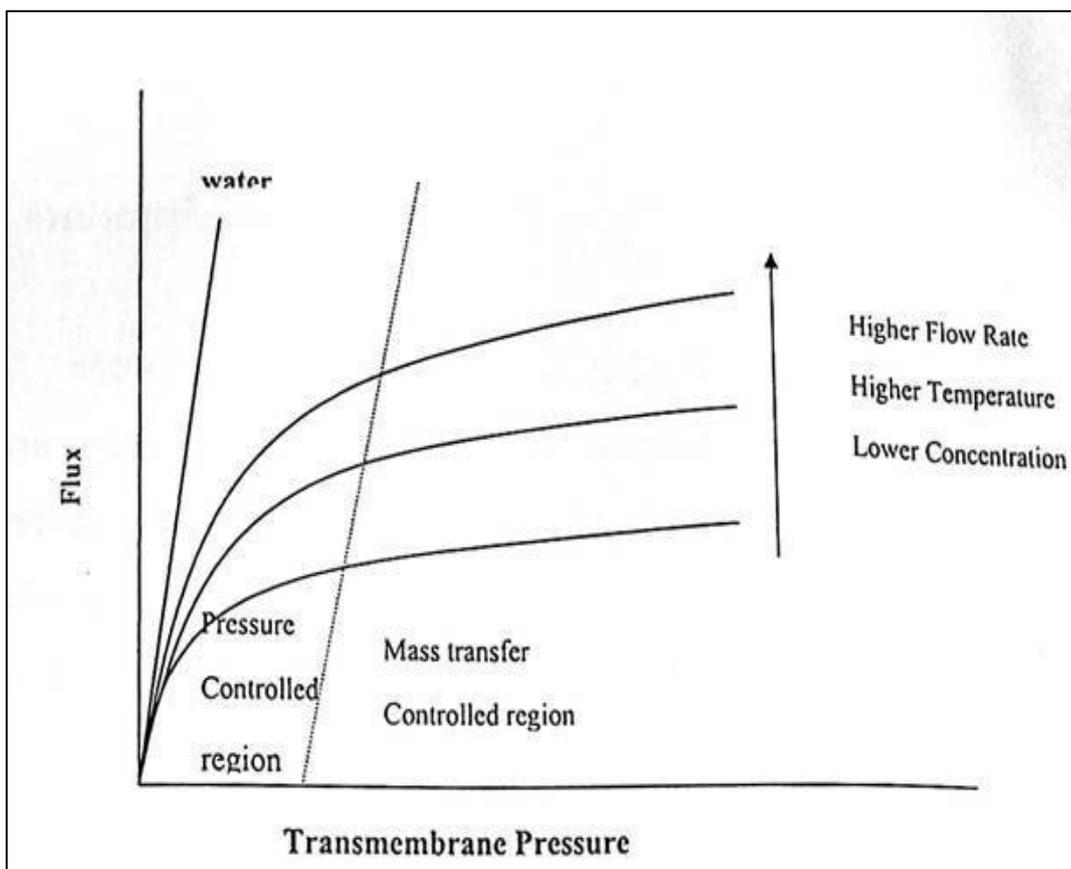
ที่มา: Cheryan (1998)



ภาพประกอบ 18 การเกิด ฟาวลิง (Fouling) โดยอนุภาคขนาดต่างๆ

ที่มา: Cheryan (1998)

3.3 ความดัน ผลของความดันในช่วงเริ่มต้นของการเกิดชั้นเจลบนผิวเมมเบรนจะเกิดเนื่องจากแรงขับเคลื่อน เมื่อเพิ่มความดันปริมาณฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่ไม่แปรผันตรงสำหรับสารละลายโมเลกุลใหญ่เมื่อเพิ่มความดันสูงขึ้น ชั้นคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันเพิ่มขึ้น จนกระทั่งถึงขีดจำกัดความเข้มข้น ปริมาณฟลักซ์จะไม่ขึ้นกับความดันแต่ขึ้นอยู่กับการถ่ายเทมวล การเพิ่มความดันให้สูงขึ้นปริมาณฟลักซ์จะเพิ่มขึ้นในช่วงเวลาสั้นๆ แต่เมื่อถึงจุดสมดุลปริมาณฟลักซ์จะไม่เปลี่ยนแปลง ชั้นเจลที่เกิดขึ้นจะถูกอัดแน่นเนื่องจากความดันที่สูงขึ้นนั้นเมื่อเพิ่มความดันจนถึงจุดวิกฤตจะส่งผลให้ปริมาณฟลักซ์ต่ำ จากภาพประกอบ 19 เมื่อดำเนินการด้วยความดันต่ำ ความเข้มข้นสารป้อนต่ำและความเร็วสารป้อนสูง ผลของคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันจะน้อยมาก ปริมาณฟลักซ์ขึ้นกับความดันที่ให้กับระบบ แต่เมื่อดำเนินการที่ความดันสูง ปริมาณฟลักซ์จะไม่ขึ้นกับความดันที่ให้กับระบบแต่จะขึ้นกับการถ่ายมวล



ภาพประกอบ19 ความสัมพันธ์ระหว่างพารามิเตอร์สภาวะการดำเนินการกับฟลักซ์

ที่มา: Cheryan (1998)

### การประยุกต์ใช้เมมเบรนในอุตสาหกรรม

จากการเผยแพร่ในวารสาร Membrane technology เกี่ยวกับความต้องการใช้เมมเบรนในประเทศสหรัฐอเมริกา เดบโตร้อยละ 7.4 ต่อปีโดยมีมูลค่าทั้งสิ้นในปี ค.ศ.2006 เท่ากับ 2.1 พันล้านเหรียญ คิดเป็นความต้องการพื้นที่เมมเบรนเท่ากับ 121 ล้านตารางเมตร หรือ 1.3 ล้านตารางฟุต โดยในปี ค.ศ.2001 กระบวนการไมโครฟิลเตรชันมีการครองตลาดมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 50 ของความต้องการของเมมเบรนทั้งหมด แต่กระบวนการออสโมซิสผันกลับมีความต้องการสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว เนื่องจากความสามารถของระบบในการผลิตน้ำมีความบริสุทธิ์สูงเพื่อใช้ในระบบทำน้ำดื่มตามบ้านเรือน ใช้ในอุตสาหกรรมทำเครื่องดื่ม หรือใช้ในระบบบำบัดน้ำเสีย ดังแสดงในตาราง 9 ตลาดความต้องการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนในการทำน้ำดื่มและบำบัดน้ำเสียคิดเป็นร้อยละ 55 ของความต้องการเมมเบรนทั้งหมด ในปีค.ศ.2001 ตลาดความต้องการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนที่น่าจับตามองอีกตลาดหนึ่ง คือ อุตสาหกรรมยา ซึ่งมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มสูงขึ้นทุกปี

### ตาราง 9 ความต้องการใช้เทคโนโลยีเมมเบรนตามลักษณะใช้งาน

หน่วย : million US\$

Item	1992	1996	2001	2006	2011
Gross domestic product (bil.US\$)	6,319	7,813	10,208	13,100	16,800
US\$ membrane/mil.US\$ GDP	109	122	145	161	175
Membrane demand	690	950	1,480	2,110	2,940
Water and waste water treatment	397	535	820	1,165	1,605
Food and beverage processing	144	200	325	470	665
Pharmaceuticals and medical uses	51	79	130	200	305
Chemical production	27	41	70	105	150
Industrial gases	31	40	50	60	65
Other markets	40	55	85	110	150
US\$/sq.ft	1.30	1.45	1.55	1.65	1.75
Membrane demand (mil.sq.ft)	526	661	948	1,270	1,660

ที่มา : ชันทอง สุนทรภา, 2547

### งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Harit, *et al.* 2000. ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของสารป้อน การกระจายของขนาดอนุภาค ในการกรองแบบการไหลขวางสำหรับอนุภาคของ Lactalbumin โดยทำการทดลองที่ความดันคงที่และทดลองโดยใช้ Tubular ceramic membrane modules พบว่าความดัน 100 KPa ได้เพอเมอเทฟลักซ์สูงที่สุด และจากการทดลองพบว่าความเร็วในการไหลขวาง สำหรับการอุดตันภายใน ในช่วงแรกจะมีค่าลดลง และการอุดตันภายใน จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเร็วในการไหลขวางมีค่าสูงกว่า 1.5 เมตรต่อวินาที

Katayon, *et al.* 2000. ได้ทำการศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นของ MLSS ต่อประสิทธิภาพของ Membrane bioreactor สำหรับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาหาร โดยทำการทดลอง ที่ความเข้มข้นของ MLSS ต่ำและสูง พบว่าความเข้มข้นของ MLSS ต่ำสามารถกำจัดสารแขวนลอยและความขุ่นได้มากโดยสามารถกำจัดสารแขวนลอย ได้ถึง 99.2% และกำจัดความขุ่นออกไปได้ถึง 99.73% และเพอเมอเทฟลักซ์ในกระบวนการที่ความเข้มข้น MLSS ต่ำมีค่าเท่ากับ 5.03 L/m<sup>2</sup>.hr ซึ่งสูงกว่าการทดลองที่ความเข้มข้นของ MLSS สูงโดยได้เพอเมอเทฟลักซ์ที่ 2.27 L/m<sup>2</sup>.hr และได้ศึกษาเพิ่มเติมอีกว่า Membrane Module มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบโดยพบว่าการใช้ Horizontal Membrane Module สามารถกำจัดความขุ่นและความเข้มข้นของสารแขวนลอย และให้ค่าเพอเมอเทฟลักซ์สูงกว่า เมื่อเทียบกับแบบ Vertically Membrane Module

Renbi, *et al.* 2002. ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปร ในระบบไมโครฟิลเตรชันที่ใช้ในระบบตะกอนเร่ง โดยไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนเป็นส่วนที่ช่วยเพิ่มคุณภาพของน้ำที่ผ่านการ

บ้ำบัด แต่ปัญหาหลักของกระบวนการนี้ก็คือ การเกิดฟาวลิงซึ่งในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษา ระบบบ้ำบัดแบบตะกอนเร่งและการกรองด้วยไมโครฟิลเตรชันเมมเบรนแบบการไหลขวาง พบว่า อัตราการเติมของอากาศในบ่อเติมอากาศ การกวนเชิงกลของ bioreactor และการไหลวนของน้ำ เสียสำหรับการกรองไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวาง มีผลต่อการกระจายตัวของขนาดอนุภาค ของน้ำเสียต่อการกรอง ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพของระบบ ได้มีการทดลองการแตกต่างของการ กระจายตัวของอนุภาคว่ามีผลต่อการฟาวลิงของเมมเบรนหรือไม่ ซึ่งผลที่ได้ก็คืออนุภาคที่มีขนาด เล็กจะมีผลกระทบมากต่อการฟาวลิงในเมมเบรน

Rui, *et al.* 2003. ได้ทำการทดลองและศึกษาพฤติกรรมทางไฮโดรไดนามิกในการ เกิดฟาวลิง โดยออกแบบการทดลอง 10 การทดลองที่ความเข้มข้นสารแขวนลอย 2-20 g/L ฟลักซ์ที่ 4.5-27 L/m<sup>2</sup>.hr และ aeration intensities ที่ 10-100 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.hr ซึ่งในการทดลองได้ทำการวัดและ ควบคุมค่าความเร็วในการไหลขวาง และความต้านทานจากการอุดตันจากการทดลองนำผลดังกล่าว มาประยุกต์เป็นโมเดลที่ใช้ในการคำนวณความเร็วในการไหลขวาง และพบว่า การเพิ่มขึ้นของ ความต้านทานการกรองเป็น power function กับ ความเร็วในการไหลขวาง ฟลักซ์และความเข้มข้น ของสารแขวนลอย

Sengkwon, *et al.* 1997. ได้ทำการทดลอง และศึกษาพฤติกรรมทางไฮโดรไดนามิก ของเพอมีเอทฟลักซ์ในการกรองแบบการไหลขวางของสารแขวนลอยเปรียบเทียบกับ Happel's cell model ซึ่งการทดลองพบว่า เพอมีเอทฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารป้อนและ ความดัน เพอมีเอทฟลักซ์จะลดต่ำลงเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลง จากการทดลองพบว่า ความเร็วในการไหล ขวาง ไม่มีผลใดๆ เลยต่อ เพอมีเอทฟลักซ์สำหรับการกรองแบบการไหลขวางที่ transient stage.

Liyuang, *et al.* 1999. ได้ทำการศึกษาการอุดตัน สำหรับการกรองไมโครฟิลเตรชัน กับอัลตราฟิลเตรชัน โดยใช้สารแขวนลอยที่เป็น Silica Colloid ขนาด 0.12 ไมครอน จากการทดลองนี้ สามารถอธิบายได้ว่า การอุดตันสำหรับการกรองแบบการไหลขวางจะเป็นกระบวนการแบบไดนามิก โดยจะอุดตันจาก non equilibrium เป็น equilibrium ซึ่งจะทำให้สภาวะฟลักซ์คงที่จะถูกจำกัด ค่า ความเข้มข้นของเค้กจะหาได้จาก การทดลอง ส่วนค่าของ specific cake จะหาได้จากสมการของ Carmen-kozeney และพบว่าเวลาของการเกิดสภาวะฟลักซ์คงที่สามารถหาได้จาก การทำนายของ ทฤษฎี fouling dynamics.

Ingmar, *et al.* 1998. การคำนวณค่าฟลักซ์สำหรับการกรองไมโครฟิลเตรชันแบบ การไหลขวางสำหรับการกรองอนุภาคของสารแขวนลอย จะถูกคำนวณมาจากสมการ convective diffusion ซึ่งจะถูกสมมติว่าชั้นของเค้กจะถูกฟอร์มบนผิวของเมมเบรน และอนุภาคของสารจะถูก ถ่ายโอนโดยการพา และเคลื่อนย้ายออกจากเมมเบรนโดยการแพร่แบบบราวเนียนหรือแบบ shear

induced diffusion หรือเป็นการแพร่แบบเชื่อมกันทั้งสองแบบ ผลเชิงตัวเลขจากการแพร่แบบบราวเนียนและแบบ shear-induced diffusion จะถูกสรุปรวมจากสมการที่ได้จากการประมาณจากผลการทดลอง ซึ่งสมการจะสามารถทำนายค่าฟลักซ์ได้จาก wall shear stress bulk concentration และ membrane length จากสมการและค่าของฟลักซ์ที่ได้จากการคำนวณจะมีค่าใกล้เคียงกับ การวัดค่าฟลักซ์จากการทดลองสำหรับการกรองไมโครฟิลเตรชันแบบการไหลขวางสำหรับอนุภาคที่เป็น non-interacting spherical silica จากทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าการแพร่แบบปั่นป่วนจะเกิดการถ่ายโอนในชั้นของ concentration polarization การหาค่าฟลักซ์ของไมโครฟิลเตรชันจะได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขซึ่งจะไม่คิดถึงการแพร่แบบปั่นป่วน

Chapman, *et al.* 2002. ในกรณีศึกษา<sup>นี้</sup> จะทำการออกแบบ floating medium flocculator เพื่อให้สามารถกำจัดพวกสารแขวนลอย สารอินทรีย์และ ฟอสฟอรัส ซึ่งตัว floating medium flocculator จะสร้างฟลอคที่มีขนาดเดียวกัน ซึ่งมันสามารถถูกกำจัดออกได้ง่ายด้วยไมโครฟิลเตรชัน ฟลอคที่ถูกฟอร์มตัวจะส่งผลต่อค่าฟลักซ์ในการกรองไมโครฟิลเตรชัน สำหรับ floating medium flocculator สามารถกำจัดสารแขวนลอยออกได้ถึง 45% โดยสารแขวนลอยจะลดเหลือเพียง 1.3 mg/l กำจัดความขุ่นได้ถึง 83% โดยค่าความขุ่นมีค่าลดลงต่ำกว่า 1 NTU กำจัดฟอสฟอรัสได้ถึง 97% ซึ่งสามารถลดค่าออร์โทฟอสเฟตให้เหลือเพียง 0.07 mg/l และกำจัดสารอินทรีย์ได้ 45% โดยลดค่าของ TOC ให้เหลือเพียง 1.02 mg/l ได้ทำการรวมการกรองน้ำเสียโดยใช้ทั้ง floating medium flocculator และไมโครฟิลเตรชันจะเพิ่มความสามารถในการกำจัดสารแขวนลอยและสารอินทรีย์ โดยทำการทดลองด้วยการกรอง Kaolin clay ที่ความเข้มข้นของสารแขวนลอย 10-100 mg/l ด้วยเมมเบรนขนาด 0.2 ไมครอนจากการทำการบำบัดเบื้องต้นของฟลอคจะทำให้สารอินทรีย์ลดลงได้ 50% ในขณะที่ทำให้ฟลอคมีขนาดใกล้เคียงกันที่ 13-16 ไมครอน ซึ่งทำให้ค่าฟลักซ์วิกฤตเพิ่มมากขึ้น 70% และสารอินทรีย์จะถูกกำจัดมากขึ้น 30-70% ในกระบวนการกรองไมโครฟิลเตรชัน

### วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. ศึกษาผลของตัวแปรต่างๆ ในการเดินระบบการกรองแบบไมโครฟิลเตรชันชนิดไหลขวางต่อค่า Flux และ Rejection และเขียนความสัมพันธ์ออกมาในรูปของสมการ
2. ศึกษารูปแบบของการอุดตันในกระบวนการกรองของตะกอนจุลินทรีย์ ในระบบการกรองแบบไหลขวาง
3. ศึกษาค่า  $R_m$  (Membrane resistance) และ  $R_f$  (Fouling resistance) เพื่อใช้ในการทำนายค่า Flux ที่ Transmembrane pressure ใดๆ ของระบบที่ศึกษา

### ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1. ได้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อกระบวนการกรองแบบการไหลขวาง เช่น
  - ความเข้มข้นของสารป้อน
  - อัตราการป้อน
  - Transmembrane Pressure
  - ขนาดของเมมเบรน
2. ได้ทราบถึงลักษณะของการอุดตันเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการเลือกวิธีล้างเมมเบรน
3. ได้ทราบถึงข้อมูลและเทคโนโลยีที่เหมาะสมเกี่ยวกับการบำบัดน้ำเสียรวมถึงกลไกการทำงานของเมมเบรนในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย