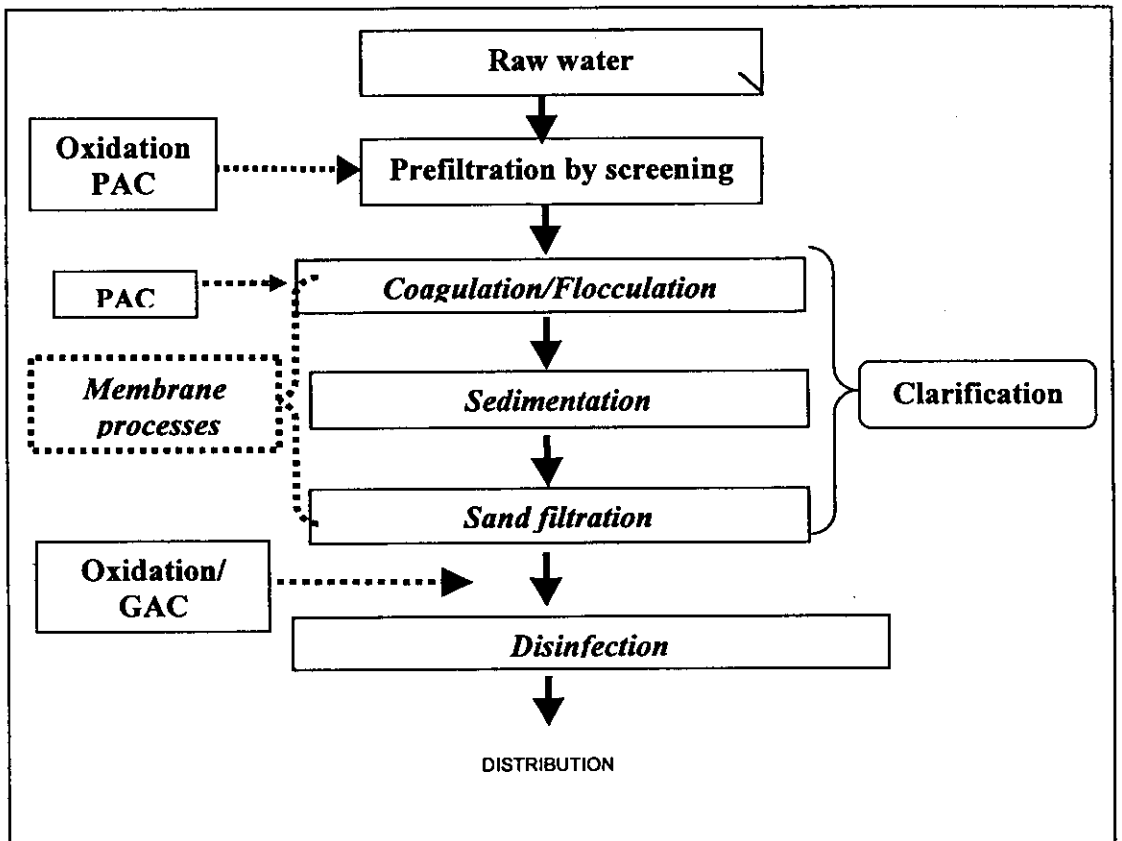


## 2-ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature review)

### 2-1 การบำบัดน้ำ-ปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผลิตน้ำประปาแบบดั้งเดิม (Water treatment for consumption)

ระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ ระบบบำบัดน้ำเพื่อผลิตน้ำประปาเป็นน้ำใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของภาคชุมชน และอุตสาหกรรมมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อกำจัดอนุภาคสารแขวนลอย ความขุ่นในน้ำดิบ กลิ่น สี จุลินทรีย์ และเชื้อก่อโรค เพื่อให้ได้คุณภาพน้ำตามมาตรฐาน สำหรับการอุปโภคและบริโภค ซึ่งรูปแบบมาตรฐานทั่วไปของระบบปรับปรุงคุณภาพน้ำ จะประกอบไปด้วยหน่วยปฏิบัติการ หน่วยกระบวนการต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2-1

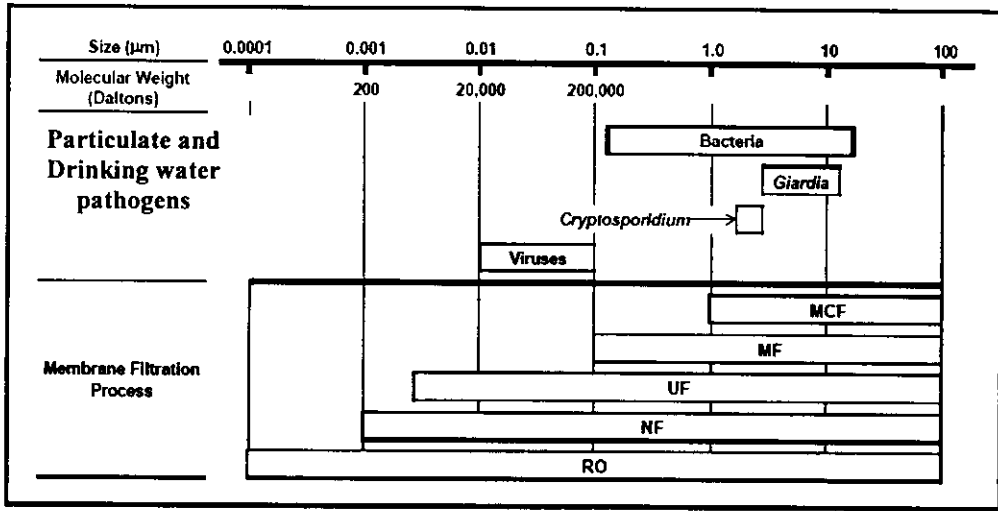


รูปที่ 2- 1: แสดงลำดับขั้นของกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการผลิตน้ำประปา

จากความสัมพันธ์ของการทำงานร่วมกันของหน่วยปฏิบัติการ หน่วยกระบวนการต่างๆ ที่มีความซับซ้อนและมีความอ่อนไหวต่อคุณภาพน้ำดิบที่มีคุณลักษณะเปลี่ยนแปลงไปตามฤดูกาล และมีการปนเปื้อนของมลสารพิษ ที่เข้าระบบทำให้ต้องมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขการทำงานของแต่ละชุดปฏิบัติการ หรือ กระบวนการต่างๆ ในระบบให้สอดคล้องกับลักษณะของน้ำดิบป้อนเข้าระบบฯ ได้แก่ ปริมาณการเติมสารสร้างตะกอน การทำงานของถังตกตะกอนและถังกรองทรายที่ไม่สามารถแยกตะกอนและลดความขุ่นให้มีค่าได้ตามที่ออกแบบไว้ และ/หรือ การที่ชั้นทรายกรองไม่สามารถกักกันเชื้อโรค ไซ้พยาธิบางชนิดได้ หรือ ความสามารถในการต้านทานต่อการฆ่าเชื้อโรคของเชื้อก่อโรคบางชนิดในขั้นตอนการเติมคลอรีนเพื่อฆ่าเชื้อโรคหรือบางกรณีที่ต้องมีการเพิ่มขั้นตอนการออกซิเดชัน และการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์สำหรับน้ำดิบที่มีสารประกอบอินทรีย์ สารพิษ ยาปราบศัตรูพืชปนเปื้อน หรือกรณีที่น้ำมีความกระด้างต้องใช้กระบวนการแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกรณีที่ต้องการผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูงเพื่อใช้ในอุตสาหกรรม ผลิตน้ำดื่มคุณภาพสูงให้ได้ตามมาตรฐานที่เข้มงวดมากขึ้น (Le Chevallier et al., 1991; Nieminski et Ongerth., 1995; Gale et al., 1997; Fewtrell et al., 2000; Ribas et al., 2000) (Lin et al., 1999; Wilkinson et al., 1999; Lin et al., 2001; Aoustin et al., 2001; Imai et al., 2002).

## 2-2 การทำน้ำให้ใสด้วยระบบเยื่อกรองลักษณะพรุน (Water clarification by porous membrane system)

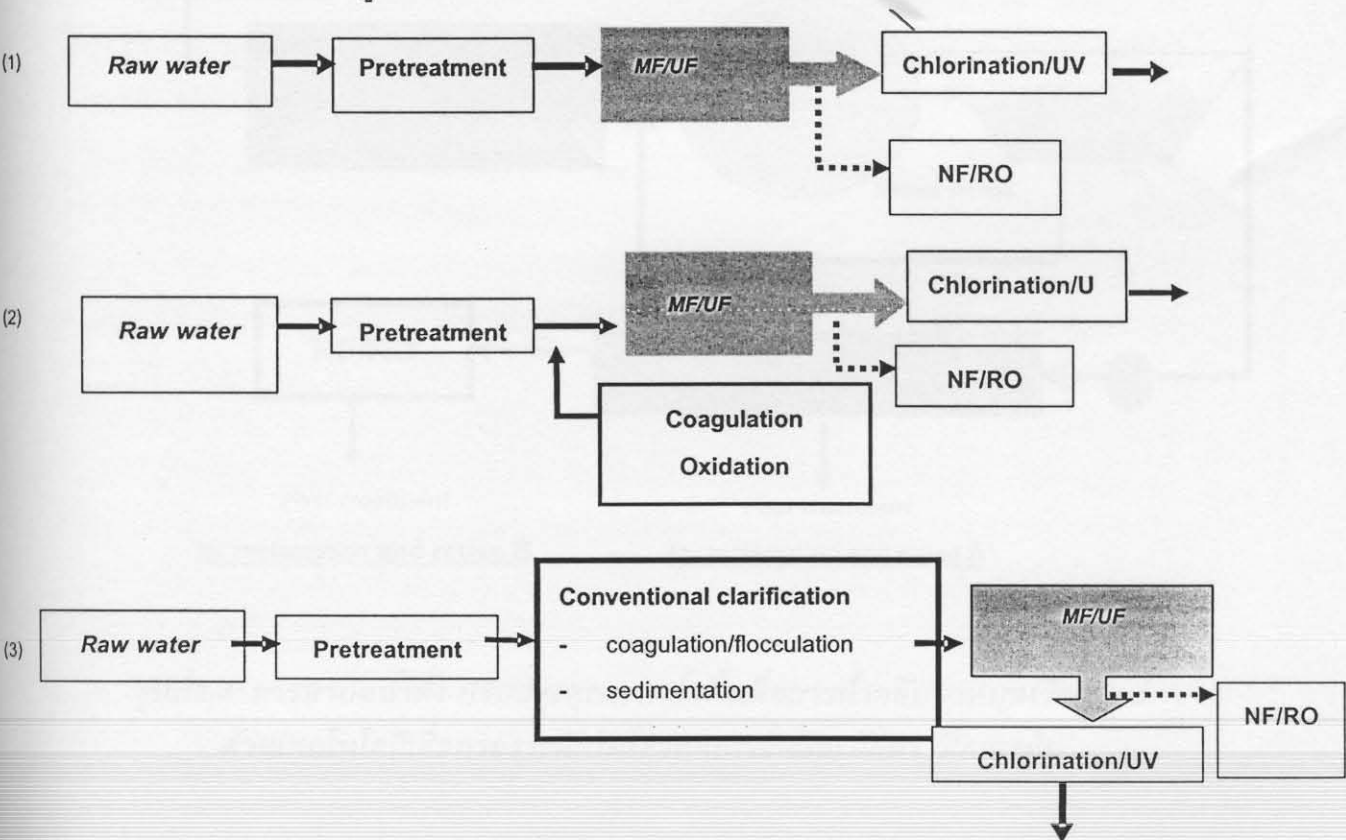
ระบบเยื่อกรองเข้ามามีบทบาทสำคัญในการผลิตน้ำคุณภาพสูงที่มีความปลอดภัยจากเชื้อจุลินทรีย์ มลสารพิษต่างๆ ที่ปนเปื้อนในน้ำดิบสำหรับภาคชุมชนและอุตสาหกรรม ระบบกรองผ่านเยื่อกรองมีหลายระดับตามความสามารถของรูเปิดของเยื่อกรองในการกักกันและแยกอนุภาค สารแขวนลอย สารละลายต่างๆที่อยู่ในของเหลวไม่ให้ออกไปกับของเหลวอื่นๆ แสดงดังรูปที่ 2-2 ตั้งแต่ปี 1990 เป็นต้นมา ระบบการบำบัดน้ำ-ปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผลิตน้ำประปาได้มีการปรับเปลี่ยนรูปแบบของเทคโนโลยีแบบดั้งเดิมโดยการนำเทคโนโลยีเยื่อกรองระดับไมโครและอัลตราฟิลเตรชันเข้ามาแทนที่ทั้งหมดหรือบางส่วนในขั้นตอนการทำน้ำใส (Lainé et al., 2000)



รูปที่ 2-2: แสดงระดับของระบบเยื่อกรอง

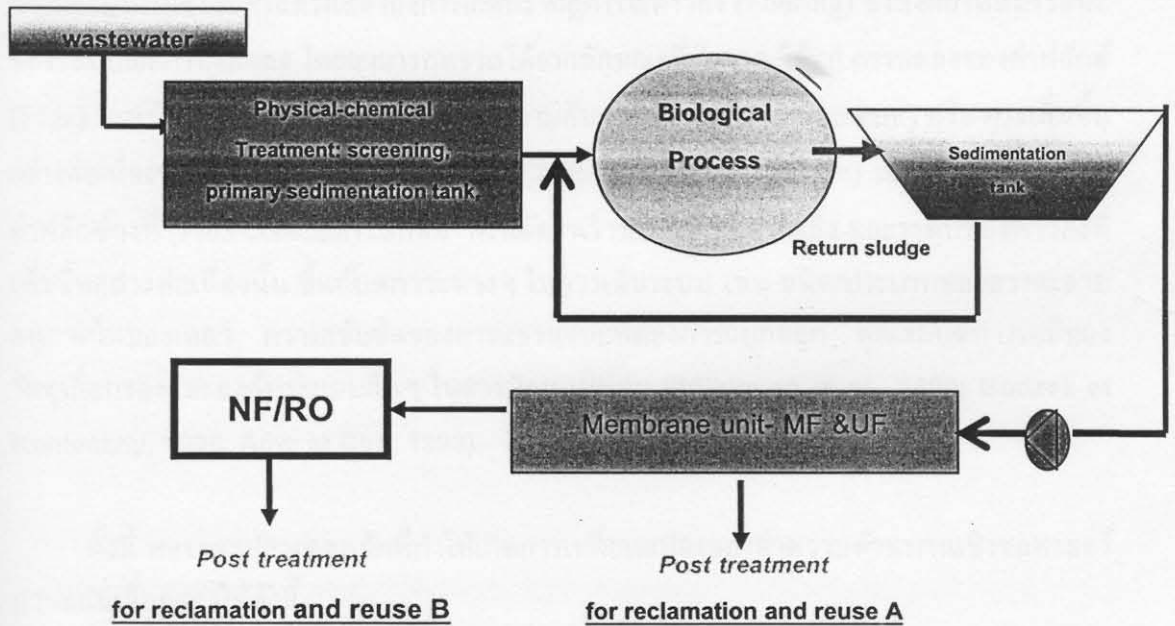
ระบบดังกล่าวสามารถใช้กรองน้ำโดยตรงในกรณีที่คุณภาพน้ำดิบเริ่มต้นอยู่ในเกณฑ์ดี-ดีมาก คือ มีค่าความขุ่นต่ำและไม่มีการปนเปื้อนของสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ อีกทั้งสามารถใช้ร่วมกับกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดผงหากพบว่าน้ำดิบเข้าระบบมีความเข้มข้นอนุภาคสารแขวนลอยสูง (มีความขุ่นมากกว่า 10 NTU) และ/หรือมีการปนเปื้อนของมลสารพิษต่างๆ จากรายงานวิจัยและสำรวจ พบว่า โรงงานผลิตน้ำประปาขนาดกำลังการผลิตขนาดกลางถึงกำลังการผลิตขนาดสูงในหลายประเทศของยุโรป และอเมริกาเหนือจำนวนมากที่มีรูปแบบผสมผสานการใช้เทคโนโลยีเยื่อกรองระดับต่างๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันที่ช่วยลดการเกิดน้ำที่สูง โดยมีการใช้งานร่วมกับหรือแทนที่ระบบแบบดั้งเดิม ส่วนแนวโน้มค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของการติดตั้งระบบ (ค่าชุดเยื่อกรอง อุปกรณ์ประกอบติดตั้ง และพื้นที่) พบว่า ตั้งแต่ปี 1990 จนถึงปัจจุบันค่าติดตั้งระบบลดลงกว่า 30 เท่าของราคาในอดีต โดยเฉพาะอย่างยิ่งการพัฒนาที่ก้าวหน้าไปมากของระบบเยื่อกรองที่มีแผ่นเยื่อกรองแบบจุ่มตัว (Submerged system or immersed membrane system) ซึ่งเป็นที่ยอมรับกันในการใช้งานจริงและนักวิจัยแล้วว่ามีสมรรถนะและประสิทธิภาพที่มีความคุ้มค่าสำหรับการใช้งานระดับสเกลอุตสาหกรรม เนื่องจากส่วนค่าบำรุงรักษา (ค่าเปลี่ยนชุดเยื่อกรอง ค่าซ่อมแซมแผ่นเยื่อกรอง) และค่าเดินระบบฯ (ค่าไฟฟ้า สารเคมี แรงงาน) ก็มีทิศทางที่ลดลงเช่นเดียวกันในระยะ 10 ปีที่ผ่านมาจนสามารถแข่งขันได้กับค่าดำเนินการทั้งหมดของระบบผลิตน้ำแบบดั้งเดิม อีกทั้งสามารถประกันความคงที่ของคุณภาพน้ำที่ผลิตได้แน่นอน มากกว่าระบบผลิตน้ำแบบดั้งเดิม (Arnal et al., 2001; Yiantsios et Karabelas, 2001; Glucina et al., 2000; Klijin et al., 2000; Thorsen, 1999; Jacangelo et al., 1997)

ระบบเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชัน และอัลตราฟิลเตรชันสามารถกำจัดเชื้อโรคสำคัญ เช่น ไวรัส กลุ่มโปรโตซัว และ แบคทีเรียได้ในระดับ 99.99% (Green et Tylla, 1998; Panlisch et al., 2000) อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพร่วมกับกระบวนการสร้าง-รวมตะกอน หรือ การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ในกรณีพบการปนเปื้อนของมลสารพิษ (Micro pollutants) ในน้ำดิบ (Schafer et al., 2001; Klijn et al., 2000; Glucina et al., 1998) ซึ่งเป็นการช่วยลดการใช้สารเคมีและประกันคุณภาพน้ำให้อยู่ในระดับสูง หรือ ใช้ร่วมกับชุดเยื่อกรองในระดับที่สูงขึ้น เช่น นาโนฟิลเตรชัน (Nanofiltration) และ รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เพื่อประกันคุณภาพน้ำให้ได้ตามวัตถุประสงค์เฉพาะของการใช้นั้นๆ (Bian et al., 1999; Maartens et al., 1999; Jacangelo et al., 1997) นอกจากนี้เทคโนโลยีเยื่อกรองในระดับที่สูงขึ้น เช่น นาโนฟิลเตรชันและรีเวอร์สออสโมซิสก็เป็นอีกรูปแบบหนึ่งของระบบที่ใช้เพื่อการผลิตน้ำที่มีคุณภาพสูงเพื่อกำจัด-แยกอนุภาค สารละลายระดับอออนออกจากน้ำ เช่น การผลิตน้ำจืดจากน้ำเค็มสำหรับพื้นที่มีปัญหาขาดแคลนแหล่งน้ำจืด เป็นต้น หรือ เพื่อกิจกรรมที่ใช้น้ำคุณภาพสูงในภาคชุมชนและอุตสาหกรรม ทั้งนี้สามารถแสดงรูปแบบการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเยื่อกรองได้ดังรูปที่ 2-3



รูปที่ 2-3: แสดงรูปแบบของระบบบำบัด-ปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อผลิตน้ำใช้และน้ำคุณภาพสูงด้วยเทคโนโลยีเยื่อกรอง

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเยื่อกรองระดับต่างๆ ในงานบำบัดน้ำเสีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในวัตถุประสงค์เพื่อนำน้ำทิ้งภายหลังการบำบัดขั้นที่สองกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ในกิจกรรมต่างๆ ตามระดับคุณภาพโดยน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัด ด้วยการใช้ระบบเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชันที่สามารถกำจัดเชื้อโรคที่มากับน้ำทิ้งได้ หรือ การใช้เทคโนโลยีเยื่อกรองในระดับที่สูงขึ้นที่ให้คุณภาพน้ำระดับดีมากเพื่อกิจกรรมต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ดังรูปที่ 2-4 เช่น ใช้น้ำขับเคลื่อนในสุขภัณฑ์ที่ติดตั้งในอาคาร ใช้เพื่อกิจกรรมด้านชลประทาน-เกษตรกรรมเนื่องจากธาตุอาหารเสริมสร้างที่คงเหลืออยู่ในน้ำทิ้ง (Irrigation agriculture and landscape) ใช้เติมกลับในแหล่งน้ำดิบเพื่อการผลิตน้ำประปา ใช้เติมกลับลงไปในแหล่งน้ำ เช่น ทะเลสาบ บ่อน้ำ ใช้ในกิจกรรมทั่วไปของอุตสาหกรรม และเป็นน้ำเติมในแหล่งน้ำ เพื่อการพักผ่อนหย่อนใจสำหรับน้ำที่ผ่านตามขั้นตอน A และ B (ดังรูปที่ 2-4) (Tchobanoglous, 2003; Fane and Fane, 2002)



รูปที่ 2-4: การบำบัดน้ำทิ้ง-ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อการนำกลับมาหมุนเวียนใหม่ด้วยเทคโนโลยีเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน

## 2-3 ฟาวลิงและการสะสมตัวของอนุภาคในระบบเยื่อกรองลักษณะพรุน (Fouling and particle deposition in porous membrane system)

การสะสมตัวของสารชนิดต่างๆ ที่อยู่ในรูปละลายน้ำ หรือ แว่นลอยในรูปอนุภาคขนาดต่างๆ บนผิวของเยื่อกรองซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการกักกันสารปนเปื้อนต่างๆ ในน้ำป้อนระหว่างการเดินระบบเยื่อกรอง และ/หรือเกิดจากแรงกระทำระหว่างอนุภาค สารละลายกับวัสดุของแผ่นเยื่อกรอง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวส่งผลให้ค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ (Hydraulic resistance) ของของเหลวที่ผ่านผิวเยื่อกรองเพิ่มขึ้น และอัตราเร็วของค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ดังกล่าวจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องระหว่างการเดินระบบฯ สำหรับวิธีการควบคุม และการพัฒนาในระดับขั้นที่สูงขึ้นของการป้องกันเพื่อจำกัด-ควบคุม ปัญหาดังกล่าว พบว่าเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของเทคโนโลยีนี้ ที่ต้องการงานวิจัยและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์แสดงถึงการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิง (Fouling) ซึ่งส่งผลให้สมรรถนะของระบบเยื่อกรองลดลง โดยสามารถทราบได้จากลักษณะที่ปรากฏ ได้แก่ การลดลงของค่าฟลักซ์ (Flux) ระหว่างการกรองเมื่อเดินระบบที่ค่าความดันคงที่ (Pressure Constant) หรือ การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าความดันส่งผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane pressure) เมื่อเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์คงที่ (Flux constant) เป็นต้น ทั้งนี้อัตราเร็วของการเกิดฟาวลิง และระดับของฟาวลิงที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องนั้น ขึ้นกับสถานะต่างๆ ในการเดินระบบ เช่น ชนิด/ประเภทของสารละลายอนุภาคในของเหลว ความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่ต้องการแยกออก คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุเยื่อกรองและองค์ประกอบอื่นๆ ในสารป้อน เป็นต้น (Wilkinson et al., 1999; Bodzek et Konieczny, 1998; Amy et Cho, 1999).

ทั้งนี้ พวจะสรุปสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ผ่านแผ่นเยื่อกรองได้ดังนี้

- การเกิดขึ้นของชั้นความเข้มข้นของสารละลาย คอลลอยด์ อนุภาคต่างๆ ที่ทำให้เกิดลักษณะของการสะสมใกล้ผิวเยื่อกรอง และส่งผลให้เกิดการสะสมตัวเป็นชั้นเค้บนผิวเยื่อกรองในเวลาต่อมา ผลจากปรากฏการณ์นี้ ทำให้ค่าความต้านทานเชิงกลศาสตร์ที่ผ่านเยื่อกรองมากขึ้น และมีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างและองค์ประกอบของชั้นสะสม เช่น หากชั้นความหนาที่เกิดจากการสะสมของคอลลอยด์ ที่มีขนาดเล็ก จะคงอยู่และติดแน่น หรือ อาจจะกลายเป็นชั้นที่พื้นสภาพได้ยากด้วยเทคนิคทางศาสตร์ทั่วไป

- การอุดตันหรือบล็อกเชิงกลที่รูของเยื่อกรองในระดับที่มากหรือน้อย ซึ่งจัดว่าเป็นลักษณะของฟาวลิงในรูปแบบที่พื้นสภาพได้ด้วยวิธีทางศาสตร์ เช่น การล้างย้อนด้วยน้ำ หรือ สารเคมี

- การเกิดแรงกระทำทางกายภาพ-เคมีของสารละลาย อนุภาคต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในรูกรองของเยื่อกรอง ซึ่งถือว่าเป็นรูปแบบที่ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยวิธีทางศาสตร์และจำเป็นต้องทำการฟื้นฟูสภาพเยื่อกรองด้วยวิธีการใช้สารเคมีหรือความร้อนร่วมด้วยแล้วแต่กรณี ซึ่งมีความเฉพาะสำหรับแต่ละชนิดเยื่อกรองซึ่งผู้ผลิตจะมีคำแนะนำให้

ดังนั้น ในการที่จะรักษาระดับค่าการให้น้ำซึมผ่านเยื่อกรองเมมเบรน (Membrane permeability) ให้คงที่อยู่ในระดับที่กำหนดไว้เพื่อให้ได้กำลังผลิตน้ำที่สูงอย่างต่อเนื่องเป็นสิ่งที่จำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องมีกลยุทธ์ทั้งเชิงป้องกันและฟื้นฟูสภาพขณะเดินระบบหรือหลังเดินระบบกรองได้แก่ ทำการฟื้นฟูสภาพเยื่อกรองเป็นระยะๆ หรือ บ่อยครั้งเพื่อคงไว้ซึ่งค่าความต้านทานเชิงศาสตร์ในระดับที่เหมาะสมสอดคล้องกับค่าใช้จ่ายและสัมพันธ์กับรูปแบบการเดินระบบนั้นๆ การล้างฟื้นฟูสภาพแผ่นเยื่อกรองเบรบบ่อยครั้ง และ/ หรือ ใช้หลายขั้นตอนในการฟื้นฟูสภาพจะส่งผลโดยตรงต่ออายุการใช้งานของเยื่อกรองที่จะสั้นลง (Maartens et al., 1999). สำหรับระบบบำบัดน้ำ-ปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคด้วยระบบเยื่อกรองลักษณะพุนพบว่า การสะสมตัวของอนุภาคบนผิวเยื่อกรองเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความต้านทานเชิงศาสตร์ของแผ่นเยื่อกรองเพิ่มขึ้นอย่างทันที หรือ ค่อยๆ เพิ่มขึ้นขณะเดินระบบฯ จากรายงานวิจัยต่างๆ ได้อธิบายและสรุปกลไกการเกิดขึ้นของอนุภาคบนผิวเยื่อกรองจนเป็นขั้นแรกในระหว่างการกรอง ดังต่อไปนี้

- การเข้าไปแทนที่ของอนุภาคต่างๆ ที่มากับของของเหลวซึ่งผ่านเยื่อกรองได้ หรือการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆ บนผิวเยื่อกรอง (Gésan-Guizion et al., 2002).
- การเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ขึ้นของสารต่างๆ ในน้ำ เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะทางไฮโดรไดนามิกส์และสภาวะทางกายภาพ-เคมีในน้ำ (Atteia et al., 2001; Vilg -Ritter et al., 1999).
- ลักษณะต่างๆ ของอนุภาค ได้แก่ ขนาดของอนุภาค รูปร่าง และสมบัติเฉพาะของผิวอนุภาค (Waite, 1999).
- การเกาะติดกันของอนุภาคเดิมกับอนุภาคใหม่ หรือ อนุภาคที่ค้างอยู่บนผิวเยื่อกรองภายหลังจากการฟื้นฟูสภาพแล้วมีอนุภาคใหม่ไปอุดตันที่ช่องว่างระหว่างสองอนุภาคที่ค้างบนผิวกรอง (Panglisch, 2002).

นอกจากนี้ พบว่า มีรายงานการศึกษาและผลการสังเกตปรากฏการณ์เริ่มต้นของการเกิดการสะสมของอนุภาคสารแขวนลอยชนิดเดี่ยว สารแขวนลอยผสม และสารแขวนลอยที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อน เช่น สารแขวนลอยของแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ระบบบำบัดน้ำเสีย (Chen et al., 1997; Tardieu et al., 1998; Mores et Davis., 2001) โดยกล่าวว่า มีความสัมพันธ์และเป็นผลของ ค่าฟลักซ์วิกฤต(Critical flux) ที่มีความสอดคล้องกับระดับของการสะสมอนุภาคบนผิวเยื่อกรอง (Field et al.,1995; Howell, 1995). ทั้งนี้ค่าฟลักซ์วิกฤตขึ้นกับสภาวะต่างๆทางไฮโดรไดนามิกส์ที่มีผลทำให้เกิดแรงเฉือนบนผิวหน้าของเยื่อกรองระหว่างการเดินระบบเยื่อกรอง และคุณลักษณะของสารแขวนลอยนั้นๆ ที่กรอง รวมถึงการออกแบบ และจัดรูปแบบต่างๆของกระบวนการย่อยต่างๆ ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในระบบเยื่อกรอง จึงกล่าวว่าปัจจัยร่วมดังกล่าวรวมเรียกว่าเป็น สภาวะวิกฤต (Critical conditions) ที่ควบคุมได้ยากในการเดินระบบเยื่อกรองระดับสเกลอุตสาหกรรม ตารางที่ 2-1 แสดงค่าฟลักซ์วิกฤตของรูปแบบการเดินระบบเยื่อกรองแบบต่างๆ



ตารางที่ 2-1 : สรุปค่าฟลักซ์วิกฤตในระบบเยื่อกรองที่สภาวะต่าง ๆ ของการเดินระบบฯ

อ้างอิง	สภาวะต่าง ๆ ในการเดินระบบเยื่อกรอง					ค่าฟลักซ์ วิกฤต (L/h/m <sup>2</sup> )
	รูปแบบ เยื่อกรอง	หน้าตัดมวล โมเลกุล/ ขนาดรูเยื่อกรอง	สารแขวนลอย/ ขนาดอนุภาค	สภาวะไฮโดร ไดนามิกส์	วิธีการศึกษา และวัดค่า ฟลักซ์วิกฤต	
<i>Li et al., 1998</i>	P (Cer)	0.02 µm	latex (0.5 g/L) 11.9 µm	0.375 m/s Re 1125	DOTM	45
			Yeast (0.5 g/L) 5 µm	0.74 m/s Re 2220		20
<i>Wu et al., 1999</i>	P (PES)	50 KDa	BSA*	Re 248	Critical flux	32
	P (PES)	100 KDa	0.15% (69 kDa)			21
	P (PES)	50 KDa	Silica (0.5%)	Re 580		70
	P (PES)	100 KDa	0.22 µm			52
	P (PS)	0.2 µm				50
	P (PES)	50 KDa	BSA** 0.15% (69 kDa)	Re 284, 414, 580		30, 45, 55
			Silica (0.5%) 0.22 µm et 89 µm	Re 373	40 et 40	
<i>Huisman et al., 1999</i>	Tur	0.2 µm	Silica (0.53 µm) 1.6 g/L pH = 3, 10	5 m/s τ <sub>w</sub> : 73 Pa	Critical flux	30 à 32.5
<i>Kwon et al., 2000</i>	P (PVDF)	0.2 µm	latex (0.816 µm) 0.03, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4 g/L	0.5 m/s	Critical flux	275, 160, 140, 125, 120
		0.2 µm	latex (0.2 g/L) 0.1, 0.3, 0.46, 0.816, 1.07, 3.2,			86.5, 52, 72, 104, 116, 164
<i>Madec et al., 2000</i>	HF	200 KDa	bentonite 4 g/L (3 µm)	air 0.6 Nm <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup>	Critical flux	51.5
<i>Metsamuuronen et al., 2002</i>	P (UF) PS	50 KDa	myoglobin 0.1 g/L pH 7 et 8	0.19 m/s Re 373	Critical flux	50 et 60
	P (GC)	30 KDa	myoglobin 0.1, 0.2, 0.3 g/L pH 8			105, 85, 65
			myoglobin 0.1 g/L pH 6, 7, 8			70, 60, 105 (GC, pH 6,7,8)
<i>Gesan-Guizion et al., 2002</i>	Tur	15 et 30 kg/mol	latex 1.8 g/L	100 kPa, 0.5 m/s τ <sub>w</sub> : 1.2 Pa	pressure	50

ตารางที่1(ต่อ)			latex 4.9 g/L (0.19 $\mu$ m)	100 – 160 kPa 0.5 – 1.5 m/s $\tau_w$ : 1.2 – 6.5 Pa Re 3780 - 11350		30 - 120
Espinasse et al., 2002	Tur	15 KDa	PVC latex (-)	0.29-0.98 m/s, Re 1952 <sup>(1)</sup> , 4000 <sup>(2)</sup> 6506 <sup>(3)</sup>	pressure	(1): 22 (2): 40 (3): 54
Li et al., 2003	P	(-)	Aerobic bacteria (0.8 $\mu$ m)	20 kPa: 0.24 m/s, Re 910 <sup>(1)</sup> 0.53 m/s, Re 2000 <sup>(2)</sup>	DOTM	(1): <135 (2): 120 - <270

Module: HF = Hollow fiber, P = plane, Tur = Turbular ceramic

Type: PS = polysulfone, GC = regenerated cellulose, PVDF = polyvinyl diflouride, Cer = ceramic,  
PES = polyethersulfone

Values: (-) = not exactly values, \* = Bovine Serum Albumin, \*\* = Bovine Serum Albumin fragments

DOTM: Direct observation by microscope through microscope

Re = Reynolds number

อีกลักษณะหนึ่งของปรากฏการณ์ฟาวลิง คือ การอุดตันภายในรูของเยื่อกรองที่สามารถพบได้ 2 ลักษณะ คือ (1) การที่อนุภาคหรือโมเลกุลของสารนั้นๆมีขนาดใกล้เคียงกับรูเยื่อกรองจึงปิดช่องรูกรองอย่างสมบูรณ์จนของเหลวไม่สามารถไหลผ่านได้ และ (2) อนุภาคหรือโมเลกุลขนาดเล็กกว่ารูกรองเข้าไปสะสมเพิ่มขึ้นจนปิดรูกรองในที่สุด (Huang et Morrissey, 1998) รายงานการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Electron Microscope Scanning, EMS, Lee et al., 2002) พบการกระทำระหว่างขององค์ประกอบของสารต่างๆในของเหลวกับวัสดุเยื่อกรอง เช่น อนุภาคคอลลอยด์ที่ติดติดกับเยื่อกรอง การเกิดชั้นบางๆบนผิวเยื่อกรองก็เป็นลักษณะฟลาวริงที่พบเช่นกัน (Bowen et al., 1999) หรือ โมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรมชาติ (Natural Organic Matters, NOM) ในน้ำผิวดินหรือน้ำทิ้ง ที่ถูกดูดซับบนผิวภายในรูเยื่อกรองซึ่งเป็นลักษณะของฟลาวริงแบบที่ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพของเยื่อกรองได้ด้วยวิธีการทางไฮโดรไดนามิกส์ (Irreversible hydrodynamic fouling) (Hesse et al., 1999; Schäfer et al., 2001; Aoustin et al., 2001). อย่างไรก็ตามการป้องกัน และลดการเกิดฟาวลิงลักษณะดังที่กล่าวมาทำได้ง่ายโดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดินหรือน้ำทิ้งเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรอง เลือกใช้ชนิดและระดับรูของเยื่อกรอง (Pore size) หน้าตัดมวลโมเลกุล (Molecular weight cut off) ของเยื่อกรอง และปรับแต่งสภาพสารแขวนลอย (Conditioning suspensions) ก่อนเข้าสู่ระบบ (Schäfer et al., 2001) กลยุทธ์ต่างๆ ที่ใช้ในการจำกัดและควบคุมฟลาวริง มีความจำเป็นต้องปรับให้เหมาะสมกับระบบเยื่อกรองประเภทต่างๆ เพื่อให้ได้

กำลังการผลิตคุ้มทุนกับค่าลงทุน และค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ กลยุทธ์ดังกล่าวสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประการหลักๆ คือ กลยุทธ์เชิงป้องกัน และกลยุทธ์ฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง (Sheikholeslami, 1999; Wakeman et Williams, 2002) แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) วิธีป้องกัน (Prevention methods) แบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง คือ

**แนวทางที่ 1:** การล้างชุดเยื่อกรองด้วยเทคนิคไฮโดรไดนามิกส์กรณีถ้าโครงสร้างของการสะสมของอนุภาคต่างๆ ไม่อัดตัวกันแน่นกับวัสดุเยื่อกรอง ซึ่งฟาวลิงชนิดนี้สามารถควบคุมได้ง่ายด้วยวิธีการดังต่อไปนี้

- การล้างย้อน (back washing) ซึ่งมักจะล้างย้อนเป็นช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อให้ค่าอัตราการกรองผ่านเยื่อกรองได้เท่ากับค่าเริ่มต้นก่อนการใช้งาน การล้างย้อนต้องให้มีความเหมาะสม ความถี่ในการล้างย้อน และอัตราการใช้น้ำล้างย้อน/ความดันที่ใช้ ทั้งนี้จะต้องไม่ทำให้เยื่อกรองเสียหาย หรือ ฉีกขาด ขั้นตอนการล้างย้อนประกอบด้วย 1) การหยุดกรอง การหมุนเวียนล้างด้วยสารละลายที่กรอง (Hillis et al., 1998; Serra et al., 1999) และ 2) ตามด้วยการหมุนเวียนล้างด้วยน้ำสะอาดหรือน้ำสะอาดที่เติมสารเคมีเพื่อช่วยลดฟาวลิง (Weber et Knauf, 1998; Decarolis et al., 2001) วิธีการนี้จะมีปริมาณน้ำสูญเสียที่ใช้ อยู่ระหว่าง 17-26 % ของปริมาณน้ำที่ผลิตได้ แต่สามารถลดความถี่ของการล้างย้อน หรือลดอัตราการไหลเข้าของน้ำที่ใช้ล้างย้อน เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำที่ผลิตได้สุทธิเพิ่มขึ้น (Héran, 2000; Guigui, 2000).
- การทำให้เกิดความปั่นป่วนบริเวณผิวเยื่อกรองระหว่างการกรอง (Turbulence generated close to membrane surface) ความปั่นป่วนดังกล่าวทำให้เกิดแรงเฉือนชั้นอนุภาคสะสมที่ผิวเยื่อกรองให้ลดลง หรือป้องกันการสะสมชั้นอนุภาคระหว่างการกรอง (อ. อ. จ. ไข เทคนิคนี้ร่วมกับการเดินระบบด้วยค่าฟลักซ์วิกฤต จะให้ประสิทธิภาพในการควบคุมฯ ดีขึ้น)

วิธีการล้างย้อนเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันทั่วไปในการป้องกันการเกิดฟาวลิง และลดการเกิดฟาวลิงขณะทำการกรองแบบปิดตาย กึ่งปิดตาย (dead end and pseudo dead end) (Guigui et al., 1998) และการกรองแบบไหลขวาง (cross flow) ที่เสียน้ำที่กรองได้ไปเพื่อใช้ล้างย้อนชุดเยื่อกรอง ดังนั้นในทุกกรณีของการใช้ระบบเยื่อกรองร่วมกับการใช้เทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์อย่างเหมาะสม สามารถช่วยลดความถี่ของการล้างด้วยสารเคมี และปริมาณน้ำกรองที่ต้องใช้สำหรับล้างย้อน (Héran et Elmaleh, 2001; Bourgeois et al., 2001; Decarolis et al., 2001) ประกอบกับการเลือกใช้นวัตกรรมวัสดุที่ขึ้นรูปเป็นเยื่อกรอง ขนาดรูกรอง และความพรุนของเยื่อกรองที่เหมาะสมกับชนิดสารแขวนลอยหรือสารละลายที่ต้องการแยก เป็นต้น

**แนวทางที่ 2:** การปรับแต่งสภาพสารแขวนลอย สารละลายก่อนเข้าสู่กระบวนการกรอง ซึ่งเป็น การบำบัดเบื้องต้น เช่น การกรอง-แยกด้วยตะแกรงหรือวัสดุกรองชนิดหยาบเพื่อลดการทำงานของระบบเยื่อกรองและยืดอายุการใช้งานของเยื่อกรองให้นานขึ้น (Durham et al., 2001; Gotor et al., 2001; Brehant et al., 2002) การใช้กระบวนการสร้าง-รวมตะกอนของอนุภาคระดับ คอลลอยด์ที่ทำให้เกิดฟาวลิงแบบที่ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์ ( การดูดซับ-ดูดติดกับวัสดุของเยื่อกรอง และอุดตันภายในรูกรอง เป็นต้น) (Bian et al., 1999; Park et al., 2000, Tsujimoto et al., 1998; Maartens et al., 1999; Soffer et al., 2000; Carroll et al., 2000; Bob et Walker, 2001) หรือ บางวิธีการที่เฉพาะสำหรับสารแขวนลอย สารละลายบางชนิด เช่น การเพิ่มอุณหภูมิ การปรับค่ากรด-ด่างให้อยู่ที่จุดที่มีประจุไฟฟ้า เท่ากันในสารละลาย (Ohmori et Glatz, 1999; Jones et al., 2000; Jones et O'Melia, 2001) การเคลือบผิวเยื่อกรองด้วยวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกรองที่ไม่ยึดติดแน่นกับผิวเยื่อกรอง เช่น ดินไดอะตอม (Galjaard et al., 2001) และการใช้สารป้องกันการตกตะกอนผลึก หรือ การใช้ สารป้องกันการเกิดฟาวลิง เช่น ฟอสเฟต หรือ โพลีเมอร์ประจุบวกที่ป้องกันการตกตะกอน ผลึกของเกลือแคลเซียม เป็นต้น

## 2) วิธีการฟื้นฟูสภาพเยื่อกรอง (Curative methods)

ขณะที่เมื่อเกิดฟาวลิงอยู่ในขั้นวิกฤต และการล้างด้วยเทคนิคทางไฮโดรไดนามิกส์อย่าง ง่าย ๆ ไม่สามารถฟื้นฟูสภาพหรือทำให้เยื่อกรองมีค่าความสามารถให้น้ำซึมผ่านได้เท่ากับค่า เริ่มต้นก่อนการใช้งาน (Initial permeability) แสดงว่าเป็นฟาวลิงแบบไม่สามารถฟื้นฟูสภาพได้ (Non reversible fouling) และในทางปฏิบัติจำเป็นต้องฟื้นฟูสภาพด้วยสารเคมีซึ่งทั่วไปแล้วนิยมใช้ สารเคมีดังต่อไปนี้

- สารเคมีที่มีสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์และเป็นสารฆ่าเชื้อโรค เช่น  $H_2O_2$ ,  $Cl_2$ ,  $NaOCl$
- กรดแก่และกรดอ่อน เช่น  $H_3PO_4$ ,  $C_6H_8O_7$  (citric acid)
- ด่าง เช่น  $NaOH$ ,  $NH_4OH$
- สารเคมีทำความสะอาด และ อนุพันธ์ของด่าง
- เอ็มไซม์เฉพาะ เช่น EDTA, etc....

การเลือกใช้สารเคมีชนิดต่างๆ มีความสัมพันธ์กับชนิดของฟาวลิงที่เกิดขึ้น และวัสดุที่ใช้ทำ เยื่อกรอง โดยความเข้มข้นของสารเคมีที่ใช้ล้างเยื่อกรองต้องเป็นไปตามวิธีการกำหนดของ แต่ละชนิดเยื่อกรองที่สามารถทนต่อสารเคมี ความเข้มข้นที่ใช้ได้ไม่เท่ากันของแต่ละ บริษัทผู้ผลิตเยื่อกรองนั้นๆ โดยทั่วไปพบว่า การล้างด้วยสารเคมีประเภทด่างมักจะทำได้ อนุณหภูมิสูงเพื่อกำจัดเอาพวกสารอินทรีย์ต่างๆ ให้หลุดออกได้ดี (Maartens et al., 1999) ส่วน

สารเคมีประเภทกรดมักจะกำจัดสารอินทรีย์ และสารอินทรีย์บางกลุ่มที่ผิวเยื่อกรองโดยการล้าง มักเป็นแบบที่เยื่อกรองจุ่มแช่ในสารเคมีหรือสารเคมีเคลื่อนตัวผ่านเยื่อกรองก็ได้ (Lee et al., 2001)

## 2-4 ประโยชน์ของการเติมอากาศเพื่อเป็นตัวก่อให้เกิดความปั่นป่วน (Interest of aeration as turbulence generator)

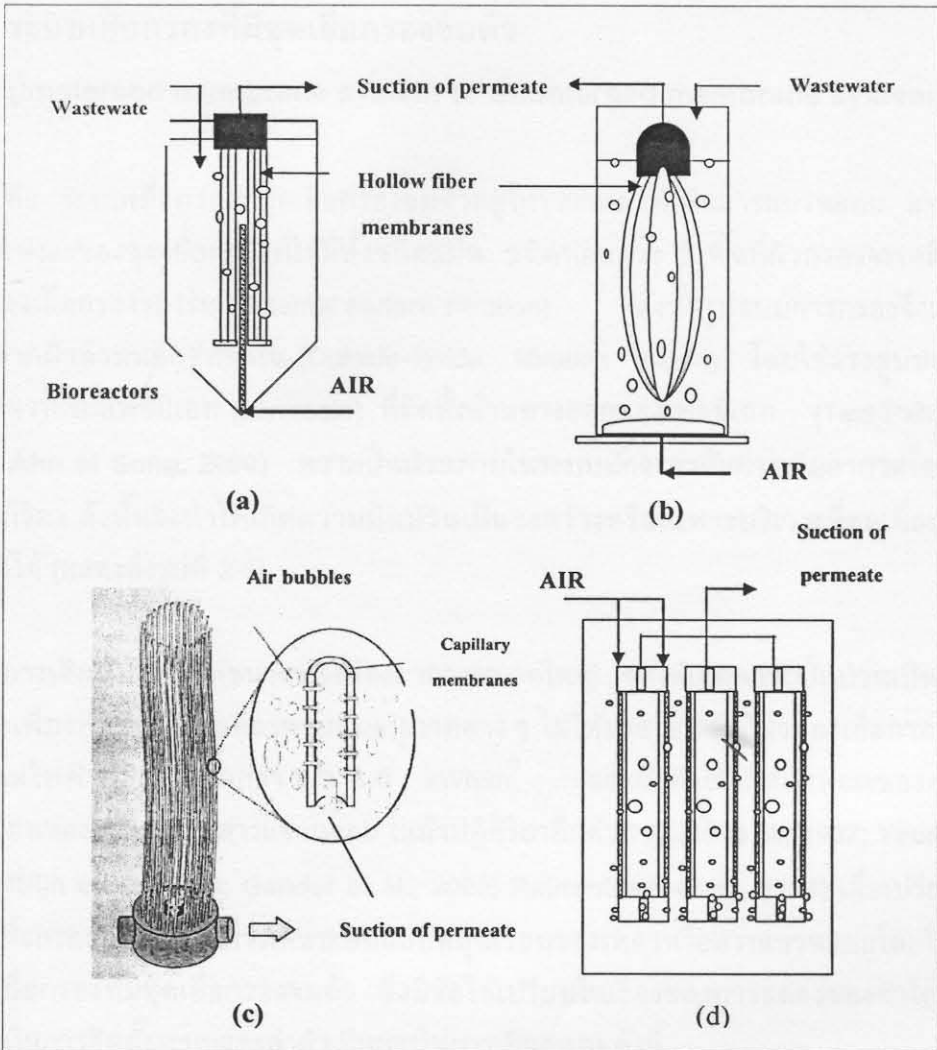
ระบบเยื่อกรองที่ใช้งานกันสามารถแบ่งรูปแบบของการเดินระบบได้ ดังนี้

**ระบบเยื่อกรองรุ่น 1:** ระบบเยื่อกรองแบบชุดเยื่อกรองแยกส่วนออกจากสารแขวนลอย หรือ สารละลาย (External loop) เพื่อให้ปรับปรุงคุณภาพน้ำ-บำบัดน้ำภายใต้ลักษณะการเดินระบบ 2 แบบ คือ

- การกรองแบบปิดตาย (dead end filtration) ที่มีการล้างเยื่อกรองแบบเป็นช่วงๆ ซึ่งเหมาะสำหรับใช้กรองสารแขวนลอยที่ความเข้มข้นต่ำ

- การกรองแบบไหลขวาง (cross flow filtration) ซึ่งเหมาะสำหรับกรองสารแขวนลอยที่เข้มข้น พร้อมระบบหมุนเวียนสารแขวนลอยเพื่อลดการสะสมของอนุภาคที่ผิวหน้าเยื่อกรองด้วยแรงเฉือนของของเหลวที่หมุนเวียนในระบบ

**ระบบเยื่อกรองรุ่น 2:** ระบบเยื่อกรองที่มีการพ่นอากาศซึ่งเป็นตัวก่อให้เกิดความปั่นป่วน หรือ ขั้นตอนการล้างระบบกรองในชั้นทราย-วัสดุแบบดั้งเดิมที่มีการเติมอากาศผสมกับน้ำเพื่อให้เกิดความปั่นป่วนมาก ๆ ในขณะที่พลังงานที่ใช้ต่ำ สำหรับระบบเยื่อกรองที่พัฒนาขึ้นโดยการเติมอากาศโดยตรงที่ชุดเยื่อกรอง ซึ่งจมตัวอยู่ในสารแขวนลอยหรือสารละลายเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดพลังงานในการเดินระบบขณะกรอง ควบคุมและลดการเกิดฟาวลิงจากอนุภาคสะสมบนผิวเยื่อกรอง รูปที่ 2-5 แสดงตัวอย่างของรูปแบบระบบชุดเยื่อกรองจมตัว



รูปที่ 2-5: ระบบเยื่อกรองที่มีแผ่นเยื่อกรองจมตัว และ รูปแบบการติดตั้งระบบเติมอากาศแบบต่าง ๆ: ประยุกต์ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำใช้และบำบัดน้ำเสีย: (a) การเติมอากาศที่ตรงกลางชุดเยื่อกรอง, (b) การเติมอากาศใต้ชุดเยื่อกรอง (Bouhabila et al., 1998), (c) การเติมอากาศภายในตรงกลางชุดเยื่อกรองที่มีการเคลื่อนไหวของเยื่อกรองชนิดท่อกลวงเส้นใย (Voßenkaul et Schäfer, 2002), (d) การเติมอากาศที่ตรงกลางและด้านล่างของชุดเยื่อกรอง (Guibert et al., 2002)

## 2-5 ระบบเยื่อกรองที่มีชุดเยื่อกรองจมตัว

(Immersed membrane system or Submerged membrane system)

คือ ระบบเยื่อกรองที่ชุดเยื่อกรองจมตัวอยู่ในของเหลวที่เป็นสารแขวนลอย สารละลาย โดยลักษณะของชุดเยื่อกรองที่ใช้มีทั้งชนิดแผ่น ชนิดท่อกลวง ซึ่งพื้นที่ผิวกรองจะเคลือบด้านนอกของเยื่อกรองรองรับ (External surface filtration) ดังนั้นรูปแบบการกรองจึงเป็นแบบกรองจากผิวด้านนอกสู่ด้านใน (Outside-Inside filtration mode) โดยใช้แรงสูบของปั๊มดึงของเหลวที่เป็นเพอเมอเทต (permeate) ที่ติดตั้งด้านทางออกของเพอเมอเทต (Tazi-Pain et al., 2002; Ahn et Song, 2000) ความดันป้อนภายในระบบมักจะทำหน้าที่การเติมอากาศโดยตรงในถังปฏิกรณ์ ดังนั้นจึงทำให้เกิดความดันป้อนเป็นวงกว้างหรือเฉพาะบริเวณที่ชุดเยื่อกรองติดตั้งอยู่ก็ได้ (แสดงดังรูปที่ 2-5)

การเติมอากาศที่ให้ออกซิเจนของฟองอากาศขนาดใหญ่ ทำให้เกิดความดันป้อนเป็นวงกว้างซึ่งมากเพียงพอที่จะจำกัดและควบคุมอนุภาคต่างๆ ไม่ให้มาสะสมอยู่ที่ผิวของเยื่อกรอง โดยพลังงานไฟฟ้าที่ใช้มีค่าต่ำกว่า 0.3 -1.0 kWh/m<sup>3</sup> และยังทำให้เกิดลักษณะของการผสมหมุนเวียนของของเหลว สารแขวนลอย ในถังปฏิกรณ์อีกด้วย (Côté et al., 1997; Yeom et al., 1999; Klijn et al., 2000; Gander et al., 2000; Rautenbach et al., 1996) เมื่อเปรียบเทียบระบบเยื่อกรองที่มีรูปแบบการเดินระบบแบบหมุนเวียนของเหลวหรือสารแขวนลอยโดยใช้ปั๊มกับระบบเยื่อกรองที่มีชุดเยื่อกรองจมตัว ซึ่งมีข้อได้เปรียบในเรื่องของการลดลงของค่าโครงสร้างพื้นฐานในการติดตั้งระบบและค่าดำเนินการในการเดินระบบ ดังนี้

- ไม่ต้องติดตั้งชุดระบบหมุนเวียนด้วยปั๊ม เพื่อให้ของเหลวหมุนเวียนผ่านชุดเยื่อกรอง
- อุปกรณ์ที่ใช้เพื่อติดตั้งระบบไม่ยุ่งยากหรือซับซ้อน คือ ไม่ต้องการตัวกระบอก-อุปกรณ์สำหรับใส่ชุดเยื่อกรอง (Housing for module) เพื่อติดตั้งระบบรวมถึงระบบท่อและข้อต่อต่างๆ

นอกจากนี้ พบว่า ข้อมูลรายงานวิจัยต่างๆ สรุป และเห็นตรงกันในเรื่องความสามารถในการใช้งานร่วมกันได้ดีกรณีต้องมีการเพิ่มเติมกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำวิธีการอื่นๆ เสริมเข้าไป และใช้ร่วมกับระบบเยื่อกรองที่มีชุดเยื่อกรองจมตัวได้อย่างลงตัว ไม่ยุ่งยาก ขณะที่มีความยืดหยุ่นของระบบสูง เช่น การเติมสารสร้างตะกอน การเติมสารดูดซับ เช่น ถ่านกัมมันต์ชนิดผง โดยตรงในถังปฏิกรณ์ เป็นต้น (Choksuchart et al., 2002a et b; Waite, 1999) นอกจากนี้ยังพบว่าระบบดังกล่าวสามารถเดินระบบภายใต้ความดันที่ต่ำกว่า 0.7 bar ในขณะที่ระบบเยื่อกรองแบบแยกส่วนที่เดินระบบแบบหมุนเวียนของเหลว ต้องใช้ความดันในการเดินระบบที่สูงกว่าเพื่อให้ได้อัตราการกรองที่เท่ากันและต้องการพื้นที่ผิวกรองมากกว่า โดยรายงานวิจัย พบว่า

พารามิเตอร์หลายตัวมีอิทธิพลต่อสมรรถนะของการเดินระบบเยื่อกรองที่มีชุดเยื่อกรองจมตัว  
สรุปได้ดังนี้ และ แสดงค่าพารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ในระบบฯ ดังตารางที่ 2-2

- ลักษณะทางไฮโดรไดนามิกส์ภายในถังปฏิกริยา ที่มีการหมุนเวียนของสารแขวนลอย
  - ชนิดของรูปแบบการเติมอากาศที่ใช้ (ขนาดของฟองอากาศ และปริมาตรของอากาศที่ใช้)
  - รูปแบบของการขึ้นรูปเยื่อกรองเป็นชุดเยื่อกรอง เยื่อกรองชนิดแผ่น เยื่อกรองชนิดท่อ
- กลวง ความหนาแน่นของ พื้นที่ผิวกรองต่อปริมาตรชุดเยื่อกรอง ขนาดของชุดเยื่อกรอง
- ตำแหน่งของการติดตั้งชุดเยื่อกรองในถังปฏิกริยา และขนาดของถังปฏิกริยาที่ใช้

## 2-6 ตัวอย่างของการประยุกต์ใช้และสมรรถนะของระบบเยื่อกรองในการ ปรับปรุงคุณภาพน้ำใช้ (Example of the performances of membrane system applied for potable water treatment)

กระบวนการผลิตน้ำอุปโภค-บริโภคมีการใช้ระบบเยื่อกรองที่ให้ประสิทธิภาพและให้  
คุณภาพของน้ำที่ปลอดภัย ซึ่งมีการใช้งานระบบฯ ทั้งการเดินระบบเยื่อกรองแบบปิดตาย หรือ  
การเดินระบบเยื่อกรองแบบไหลขวาง แสดงดังตารางที่ 2-3 ในทุกกรณีตัวอย่างสามารถสรุป  
ได้ว่าคุณภาพน้ำที่ออกจากระบบเยื่อกรองมีคุณภาพสูงเมื่อเปรียบเทียบกับคุณภาพน้ำดิบที่เข้า  
ระบบ มีค่าความขุ่นต่ำมาก แต่ความสามารถในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปละลายน้ำของน้ำดิบ  
ที่ผ่านระบบเยื่อกรองโดยตรงมีค่าต่ำ (ระหว่าง 10-30 % เทียบกับผลการทดลองที่พบในระบบ  
ปรับปรุงคุณภาพน้ำแบบดั้งเดิม) อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการกำจัดสูงขึ้นเมื่อมีการใช้ขั้นตอน  
การสร้าง-รวมตะกอนและการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ร่วมด้วย จากข้อมูลในแง่ของค่าฟลักซ์ที่ได้  
อยู่ในช่วงที่กว้างระหว่าง 30-100 L/h/m<sup>2</sup> และเช่นเดียวกันที่พบว่าความต้องการน้ำล้างชุดเยื่อ  
กรองทำให้สูญเสียน้ำที่กรองได้ระหว่าง 10-25 %



ตารางที่ 2-3: เปรียบเทียบสมรรถนะของการปรับปรุงคุณภาพน้ำใช้ด้วยระบบเยื่อกรอง ด้วยการกรองแบบปิดตาย

References	Frequency of back washing	Raw water	Module Configuration	Flux (L/h/m <sup>2</sup> ) or PTM	Treated water (% removal)	Problem of operations and advantages
<b><u>Frontal filtration or Dead end filtration</u></b>						
<i>Glucina et al., 1998(UF)</i>	20 sec no chemical cleaning	- surface water -tur 1.2-32 NTU -TOC 1.2-4.7 mg-C/L	HF (hollow fiber) (int-ext)	60, 80, 100  TMP = (-)	tur 100% TOC 13% UV <sub>254</sub> 2.5%	- water lose = 25-10% - energy consumption = 0.18-0.22 (kWh/m <sup>3</sup> ) - 4-6 times of chemical cleaning/year
<i>Bian et al., 1999(UF)</i>	30 sec under 200 kPa	- DOC 1-6 mg/L	HF (ext-int)	42 TMP = (-)	UV <sub>254</sub> 30% (df) DOC 20- 15%(df) UV <sub>254</sub> 80% (cf) DOC 60% (cf)	(-)
<i>Glucina et al., 2000(UF)</i>	5 mg/L of free Cl <sub>2</sub> (every 30- 45 min)	- surface water - tur 2-176 NTU - TOC 2.2 mg-C/L - algae fraction	HF (int-ext)	70-90  TMP = 250 kPa	- excellence quality (tur < 0.5 NTU) - pretreatment system for RO	- pretreatment is neccessary – fouling in 62, 72 et 76 days - chemical cleaning (immersed module in chemical agents)

HF = Hollow fiber

BW = Backwashing with clean water, BW-Ch = Backwashing with chemical

df = direct filtration, cf = conditioning filtration

(-) = not exactly values

ตารางที่ 2-3: (ต่อ)

**Filtration frontal or Dead end filtration of immersed membrane systems (Hollow fiber modules)**

References	Raw water	Operating conditions			Performances	
		Flux (L/h/m <sup>2</sup> )	TMP (kPa)	Mode of filtration or associated processes	Net flux (L/h/m <sup>2</sup> )	Water treated (% removal)
Cote et al., 1998 (MF)	ground water	40 - 70	10 - 50	- Frontal or dead end filtration	36-67	Mn < 0.019 mg/L
	lake water (DOC 1.6-130 mg-C/L, tur ≈ 5-50 NTU)	40 - 70	10 - 50	- BW - Fe, Mn oxidation	36-67 (50)	Turbidity < 0.1 Particle 1-2/ml
Lebeau et al., 1998 (UF)	surface water	80 - 90	8 - 30	- Aeration (0.7-0.5 Nm <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> ) - Coagulation and adsorption on PAC - BW-Ch	50-78	Turbidity < 0.1 (99%) NOM 50% Altrazine 95%
Cote et al., 2001 (UF)	canal water brackish water sea water	25 - 40	25	- Aeration (not exactly values)	24-38	no turbidity SDI 1.4 - 2.9 (10-30%)
Manchenbach et al., 2002 (UF)	synthetic NOM	60 - 75	(-)	- Aeration (5.1 Nm <sup>3</sup> /h/m <sup>2</sup> ) - Coagulation (chitosan and PACI) - BW	(-)	Color 95.6% UV 84.9 DOC 66.1%

ตารางที่ 2-4: การเปรียบเทียบสมรรถนะของการปรับปรุงคุณภาพน้ำใช้ ด้วยระบบเยื่อกรองที่มีรูปแบบการกรองแบบไหลขวาง

References	Direct filtration or associated processes	Function of operates		Module configu.	Flux (L/h/m <sup>2</sup> )	Treated water (% removal)	Problem of operations and advantages
		Velocity (m/s)	TMP (kPa)				
<i>Glucina et al., 1998(UF)</i>	surface water - direct filtration	0.9	(-)	HF (int-ext)	60, 80, 100	turbidity 100% TOC 13% UV <sub>254</sub> 3.5%	-water lose = 23-11% -energy consumed = 0.72-0.54 (kWh/m <sup>3</sup> ) - 4-6 times of chemical cleaning/year
<i>Green et Tylla, 1998(UF)</i>	surface water (4 sources) and direct filtration	(-)	(-)	HF (int-ext)	126	turbidity 100% particule/100 ml = 0.9	- water quality is independent from raw water initial - 1 times of chemical cleaning/month - 20-167 days of operation
<i>Bodzek et Konieczny, 1998 (MF, UF)</i>	ground water	1.5	100	P(UF)	79-115	-E.Coli 100% -mesophilic bacteria 92-99% - turbidity 94-99%	- bacteria removal depend on module configuration and type of membranes
		4	200	Tur (cer) (MF)	122	- E.Coli et mésophile bac. 75-97.5 % - turbidity 92-99%	
		0.28	100	Cap (MF)	169-198	- mesophilic bacteria 100% E.Coli 99.8-100% - turbidity 99%	

ตารางที่ 2-4 (ต่อ) <i>Bian et al., 1999(UF)</i>	surface water - direct filtration - coagulation with alum	0.5	100	FC (int-ext)	(-)	UV <sub>254</sub> 30%(df) DOC 20-15%(df) UV <sub>254</sub> 80% (cf) DOC 60% (cf)	- BW under 200 kPa (30 sec) - cake formation
<i>Park et al., 2000(UF)</i>	surface water coagulation with alum	0.1	100	P (UF)	(-)	99% et 36% turbidity removal et DOC	- flux increase according to the flocs size
<i>Doyen, 2000 (UF)</i>	-surface water (direct filtration) - surface water coagulation with FeCl <sub>3</sub>	0.2	20	HF <sup>1</sup> (int-ext)	25 (df) 42.5 (cf)	- 100% retention of SS - 0-10% COD and UV removal	- HF <sup>2</sup> show slightly an interaction with raw water
				HF <sup>2</sup> (int-ext)	35 (df) 63 (cf)		
				HF <sup>3</sup> (int-ext)	35 (df) 95 (cf)		

HF (int-ext) = Hollow fiber modules (filtration internal-external), P = plane module, Tur (cer) = tubular ceramic module, Cap = capillary module

BW (...) = Backwashing cycle (filtration time, cleaning time)

(-) = not exactly values

df = direct filtration, cf = conditioning filtration

HF<sup>1</sup> = Hollow fiber polysulfone (Koch membrane système), HF<sup>2</sup> = Hollow fiber polyethersulfone/polyvinylpyridonr (X-flow/Norit),

HF<sup>3</sup> = Hollow fiber polyethersulfone/polyvinylpyridonr (Akzo Nobel)