บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2-1 บทนำ

ภาวะปัจจุบันที่มีการขยายตัวและเติบโตของกิจกรรมด้านอุตสาหกรรม เกษตรกรรม ซึ่งส่งผลต่อเนื่องให้มีการขยายตัวของชุมชนเพิ่มมากขึ้น ผลกระทบที่เกิดขึ้นตามมา คือปัญหาด้านมลพิษสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งการระบายและปล่อยทิ้งของเสีย น้ำเสียที่ไม่ผ่านการบำบัด และ/หรือน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากแหล่งชุมชน อุตสาหกรรมต่างๆ สู่แหล่งน้ำสายหลักก่อให้เกิดสภาวะความเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำจนไม่สามารถที่จะนำน้ำดิบจากแหล่งดังกล่าวไปใช้ประโยชน์โดยตรง เพื่อการอุปโภค-บริโภคหากไม่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน สำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อใช้ในกิจกรรมต่างๆ ในภาคชุมชนหรืออุตสาหกรรมนั้นประกอบไปด้วยหน่วยปฏิบัติการและขั้นตอนการปรับปรุงที่แตกต่างกันไปตามวัตถุประสงค์การใช้น้ำในกิจกรรมนั้นๆ เช่น ความเข้มข้น และประเภทของมลสารที่ปนเปื้อนในแหล่งน้ำดิบที่เข้าระบบ สำหรับในส่วนของการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้ตามมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งต้องอาศัยหน่วยปฏิบัติการและหน่วยกระบวนการทางชีวภาพแบบใช้และไม่ใช้อากาศที่มีจุลินทรีย์ชนิดแขวนลอยหรือตรึงอยู่กับที่ เช่น ระบบสลัดจ์ไวงานหรือเอเอส (Activated sludge system) ระบบบ่อ (Pond system) ระบบแผ่นหมุน (Rotating bioreactor system) และระบบโปรยกรอง (Trickling filter system) เป็นต้น

ระบบเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่น (Microfiltration and Ultrafiltration) เป็นกระบวนการซึ่งแพร่หลายและเป็นที่ยอมรับในประเทศแถบยุโรป อเมริกาเหนือ และ แคนาดา เพื่อใช้แยก-กำจัดสารแขวนลอยต่างๆ เชื้อโรค-ไข่พยาธิบางชนิดในน้ำดิบผิวดินที่ไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการกรองทราย และการฆ่าเชื้อโรคในขั้นตอนสุดท้ายด้วยก๊าซคลอรีนหรือประกอบคลอรีนในขั้นตอนสุดท้ายได้อย่างสมบูรณ์ก่อนส่งเข้าระบบจ่ายน้ำ **(Green et Tylla, 1998; Panlisch et al., 2000)** อีกทั้งสามารถประยุกต์ใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ร่วมกับกระบวนการสร้าง-รวมตะกอนหรือการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ กรณีพบการปนเปื้อนของมลสารพิษขนาดเล็ก (Micro pollutants) ในน้ำดิบ **(Schafer et al., 2001; Klijn et al., 2000; Glucina et al., 1998)** ซึ่งเป็นการประกันคุณภาพน้ำให้อยู่ในระดับสูงหรือใช้ร่วมกับระบบเยื่อกรองในระดับที่สูงขึ้น เช่น นาโนฟิลเตรชั่น (Nanofiltration) และรีเวิสออสโมซิส (Reverse Osmosis) เพื่อประกันคุณภาพน้ำให้ได้ตามวัตถุประสงค์ที่เฉพาะมากขึ้น **(Bian et al., 1999; Maartens et al., 1999; Jacangelo et al., 1997)**

กรณีศึกษาการเดินระบบเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่นของระบบผลิตน้ำขนาดใหญ่ (14 ล้านแกลลอนต่อวัน, Manitowoc Public Utilities, Great lakes in North America) ระหว่างปี 2000-2002 เปรียบเทียบกับระบบแบบดั้งเดิมที่จะถูกแทนที่ด้วยระบบเยื่อกรอง พบว่าระบบฯสามารถผลิตน้ำที่ค่าความขุ่นต่ำกว่า 0.1 NTU กำลังการผลิตน้ำไม่ได้รับผลกระทบจากความแปรปรวนของคุณภาพน้ำดิบ (ความขุ่นระหว่าง 1-100 NTU, TOC 0.6-1.8 mg/L) แม้ว่าค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและบำรุงรักษาในปี 2000 - 2001 จะสูงกว่าระบบแบบดั้งเดิมประมาณ 34-38% เนื่องจากเป็นช่วงเริ่มต้นที่ต้องลองปรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อสมรรถนะของการเดินระบบและประสิทธิภาพของระบบ เช่น ปริมาณสารเคมีในการล้างชุดเยื่อกรอง ค่าใช้จ่ายในการฝึกคนงาน และค่าติดตั้งระบบ อย่างไรก็ตามในปีที่ 3 ของการใช้งานระบบเยื่อกรองฯ ดังกล่าว พบว่าค่าใช้จ่ายในการเดินระบบและบำรุงรักษามีค่าใกล้เคียงและมีแนวโน้มจะต่ำกว่าระบบแบบดั้งเดิม 50% นอกจากนี้ผลการวิจัยอื่นๆสรุปตรงกันว่า การกรองด้วยระบบเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นโดยตรงสามารถกำจัดความขุ่นได้ 99-100% และปริมาณสารอินทรีย์ละลายน้ำอยู่ในระดับต่ำ (กำจัดได้ 10-30%) **(Kothari et Schideman, 2002)** ปัจจุบันนี้การใช้ระบบเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่น และอัลตราฟิลเตรชั่นร่วมกับระบบบำบัดน้ำเสียภายใต้กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพที่มีจุลลินทรีย์แขวนลอยทำหน้าที่ย่อยสลาย ดูดซับสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ได้รับการยอมรับเพื่อใช้งานระดับสเกลอุตสาหกรรม เพื่อประกันคุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัดให้ได้ตามมาตรฐานที่เข้มงวดมากขึ้น อีกทั้งสามารถลดและแก้ไขปัญหาประสิทธิภาพการบำบัดในระบบบำบัดน้ำเสียทางแบบดั้งเดิม (Conventional Wastewater Treatment) ได้แก่ ความแปรปรวนของน้ำเสียที่เข้าระบบ ปัญหาสลัดจ์ไม่จมตัวในถังตกตะกอนขั้นที่สอง ปัญหาการเดินระบบที่ซับซ้อน และข้อจำกัดเรื่องพื้นที่ติดตั้งระบบ **(Yamamoto et al., 1994., Muller et al., 1995; Beaubien et al., 1996; Stephenson et al., 2000)** ทั้งนี้ระบบเยื่อกรองระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นสามารถติดตั้งรวมกันหรือแยกส่วนกับถังปฏิกรณ์ที่มีมวลสลัดจ์ เรียกว่า ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง (Membrane Bioreactor, MBR) และใช้เป็นระบบเสริมระบบบำบัดน้ำเสียแบบปกติในขั้นตอนสุดท้ายเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งหลังบำบัดให้มีคุณภาพในระดับที่สามารถกลับมาหมุนเวียนใช้โดยตรงในบางกิจกรรม เช่น การใช้ล้างพื้นทั่วไปหรือใช้พาสิ่งสกปรกในระบบสุขภัณฑ์ หรือเพิ่มหน่วยบำบัดเพิ่มเติมกรณีที่ต้องการน้ำคุณภาพสูงสำหรับกิจกรรมต่างๆของภาคชุมชน อุตสาหกรรม และ เกษตรกรรม **(Yoffer et al., 2000; Xing et al., 2000; Gotor et al., 2001)**

ปัญหาหลักของการเดินระบบเยื่อกรองฯ คือ การเกิดฟาวลิ่ง (แบบฟื้นสภาพได้ด้วยหลักทางไฮโดรไดนามิกส์ และแบบที่ไม่สามารถฟื้นสภาพได้ ซึ่งต้องมีการใช้สารเคมีในการฟื้นสภาพของเยื่อกรองให้มีค่า Permeability ใกล้เคียงหรือเท่ากับค่าเริ่มต้น) ที่เกิดจากสารประกอบอนินทรีย์ หรือ/และสารประกอบอินทรีย์ซึ่งอยู่รูปสารแขวนลอยหรือ/และสารละลาย ที่ส่งผลให้การคาดการณ์หรือการทำนายความสามารถในการกรองเป็นเรื่องยาก และมักจะล้มเหลว เนื่องจากสมบัติ-ลักษณะขององค์ประกอบของสารปนเปื้อนต่างๆในน้ำ-น้ำเสียมักแปรปรวนไปตามปัจจัยสิ่งแวดล้อม เช่น ฤดูกาล มลสารพิษที่เข้าสู่แหล่งน้ำ กำลังการผลิตไม่

คงที่ของอุตสาหกรรม เป็นต้น ทำให้การประเมินการเกิดฟาวลิ่งด้วยการติดตามค่า Permeability ที่เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเกิดจากการสะสมตัวของสารประกอบต่างๆในน้ำบนผิวเยื่อกรองระหว่างการเดินระบบในสเกลอุตสาหกรรมเป็นเรื่องที่ยากที่จะคำนวณ-ประเมินหรือคาดเดาการเปลี่ยนแปลงได้

2-2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากรายงานวิจัยและสำรวจ พบว่า โรงงานผลิตน้ำประปาขนาดกำลังการผลิตขนาดกลางถึงขนาดสูงในหลายประเทศของยุโรป และอมริกาเหนือ มีจำนวนมากขึ้นที่ใช้รูปแบบผสมผสานการใช้เทคโนโลยีเยื่อกรองระดับต่างๆ โดยฉพาะอย่างยิ่งระดับไมโครฟิลเตรชั่นและอัลตราฟิลเตรชั่นที่ให้กำลังการผลิตที่สูงในขณะที่แนวโน้มค่าใช้จ่ายเริ่มต้นของการติดตั้งระบบ(ค่าชุดเยื่อกรองและอุปกรณ์ประกอบติดตั้ง พื้นที่) ลดลงประมาณ 30 เท่า ตั้งแต่ปี 1990 เป็นต้นมา เช่นเดียวกัน ค่าบำรุงรักษา (ค่าเปลี่ยนชุดเยื่อกรอง ค่าซ่อมแซมเยื่อกรอง) และ ค่าเดินระบบฯ (ค่าไฟฟ้า สารเคมี และแรงงาน) มีทิศทางที่ลดลงในระยะ 10 ปีที่ผ่านมา และสามารถแข่งขันได้กับค่าดำเนินการทั้งหมดของระบบผลิตน้ำแบบดั้งเดิม เนื่องจากระบบใช้สารเคมีต่ำ ต้องการแรงงานในการเดินระบบน้อย และค่าไฟฟ้าต่ำสำหรับการใช้ระบบเยื่อกรองแบบจมตัว ในขณะที่สามารถประกันความคงที่ของคุณภาพน้ำที่ผลิตได้แน่นอนกว่าระบบผลิตน้ำแบบดั้งเดิม **(Arnal et al., 2001; Yiantsios et Karabelas, 2001; Glucina et al., 2000; Klijn et al., 2000; Thorsen, 1999; Jacangelo et al., 1997)**

การสะสมตัวของสารชนิดต่างๆที่อยู่ในรูปละลายน้ำหรือแขวนลอยในรูปอนุภาคขนาดต่างๆบนผิวเยื่อกรองที่เป็นตัวกลางในการทำหน้าที่กักกันระหว่างการเดินระบบเยื่อกรอง และแรงกระทำระหว่างอนุภาคสารละลายกับวัสดุเยื่อกรองทำให้ค่าความต้านทานเชิงชลศาสต์ (Hydraulic resistance) ของของเหลวที่ผ่านเยื่อกรองเพิ่มขึ้น ดังนั้นความเร็วของค่าความต้านทานเชิงชลศาสตร์จะเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องระหว่างการเดินระบบฯ วิธีการควบคุมและการพัฒนาในระดับขั้นที่สูงขึ้นของการจำกัด-ควบคุมมักพบว่ามีข้อจำกัดของการพัฒนาเทคโนโลยีเยื่อกรอง การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าความต้านทานเชิงชลศาสตร์เป็นสิ่งแสดงถึงการเกิดฟาวลิ่ง (Fouling) ซึ่งส่งให้สมรรถนะของระบบเยื่อกรองเยื่อกรองลดลง ได้แก่ การลดลงของค่าฟลักซ์ (Flux) ระหว่างการกรองเมื่อเดินระบบที่ค่าความดันคงที่ (Pressure Constant) หรือ การเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องของค่าความดันผ่านเยื่อกรอง (Transmembrane pressure) เมื่อเดินระบบกรองที่ค่าฟลักซ์คงที่ (Flux constant)

ทั้งนี้อัตราเร็วของการเกิดฟาวลิ่งและการเกิดปรากฏการณ์ฟาวลิ่งอย่างต่อเนื่องขึ้นกับสภาวะต่างๆในการเดินระบบ เช่น ชนิด/ประเภทของสารละลาย อนุภาคในของเหลว ความเข้มข้นของสารแขวนลอยที่ต้องการปรับปรุงหรือบำบัด คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุเยื่อกรองและองค์ประกอบอื่นๆในสารละลาย เป็นต้น **(Wilkinson et al., 1999; Bodzek et Konieczny, 1998; Amy et Cho, 1999)**.

สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานเชิงชลศาสตร์ผ่านเยื่อกรองสรุปได้ดังนี้

- การเกิดขึ้นของชั้นความเข้มข้นของสารละลาย คอลลอยด์ อนุภาคต่างๆที่ถูกทำให้สะสมใกล้ผิวเยื่อกรองซึ่งส่งผลให้เกิดการสะสมตัวเป็นชั้นเค้กบนผิวเยื่อกรองในเวลาต่อมา ผลจากปรากฏการณ์นี้ทำให้ค่าความต้านทานเชิงชลศาสตร์ที่ผ่านเยื่อกรองมากขึ้นจากชั้นความหนา ที่เกิดจากการสะสมของคอลลอยด์ที่ขนาดเล็ก การเกิดชั้นสะสมดังกล่าวอาจจะคงตัวอยู่หรืออาจจะเป็นชั้นที่ฟื้นสภาพได้ด้วยเทคนิคทางไฮโดรริก

- การอุดตันหรือบล็อคเชิงกลที่รูกรองเยื่อกรองในระดับที่มากหรือน้อย ถือว่าเป็นรูปแบบที่ฟื้นสภาพได้ด้วยวิธีทางไฮโดรริก

- การเกิดแรงกระทำทางกายภาพ-เคมีของสารละลาย อนุภาคต่างๆที่เกิดขึ้นภายในรูเยื่อกรอง หรือเกิดขึ้นกับวัสดุเยื่อกรอง ซึ่งไม่สามารถฟื้นสภาพได้ด้วยวิธีทางไฮโดรริกและจำเป็นต้องทำการฟื้นสภาพของเยื่อกรองด้วยวิธีการใช้สารเคมี หรือความร้อนร่วมด้วย สำหรับระบบบำบัดน้ำ-ปรับปรุงคุณภาพน้ำเพื่อการอุปโภคและบริโภคด้วยระบบเยื่อกรองชนิดรูพรุน พบว่าผลการสะสมตัวของอนุภาคบนผิวเยื่อกรองเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ค่าความต้านทานเชิงชลศาสตร์ของเยื่อกรองเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง

การเกิดขึ้นของอนุภาคบนผิวเยื่อกรองเป็นชั้นเค้กในระหว่างการกรองเนื่องจากสาเหตุดังต่อไปนี้

- การเข้าไปแทนที่ของอนุภาคต่างๆที่มากับของเหลวซึ่งผ่านเยื่อกรองได้หรือการตกตะกอนของอนุภาคต่างๆบนผิวเยื่อกรอง **(Gésan-Guizion et al., 2002)**.
- การเกิดการรวมตัวเป็นอนุภาคขนาดที่ใหญ่ขึ้นของสารต่างๆในน้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสภาวะทางไฮโดรไดนามิกส์และสภาวะทางกายภาพ-เคมีในน้ำ **(Atteia et al., 2001; Vilgé-Ritter et al., 1999).**
- ลักษณะต่างๆของอนุภาค ได้แก่ ขนาดของอนุภาค รูปร่าง และสมบัติเฉพาะของผิวอนุภาค **(Waite, 1999).**
- การเกาะติดกันของอนุภาคเดิมกับอนุภาคใหม่หรืออนุภาคค้างที่อยู่บนผิวเยื่อกรองภายหลังจากการฟื้นสภาพแล้วมีอนุภาคใหม่ไปอุดตันที่ช่องว่างระหว่างสองอนุภาคที่ค้างบนผิวกรอง **(Panglisch, 2002)**.

อีกลักษณะของฟาวลิ่งคือการอุดตันภายในรูของเยื่อกรองที่สามารถพบได้ 2 ลักษณะ คือ (1) การที่อนุภาคหรือโมเลกุลของสารนั้นๆมีขนาดใกล้เคียงกับรูเยื่อกรองจึงสามารถปิดช่องรูกรองอย่างสมบูรณ์จนของเหลวไม่สามารถไหลผ่านได้และ (2) อนุภาคหรือโมเลกุลขนาดที่เล็กกว่ารูกรองจึงถูกสะสมเพิ่มขึ้นจนปิดรูกรองในที่สุด **(Huang et Morrissey, 1998)** รายงานการศึกษาภายใต้กล้องจุลทรรศน์และกล้อง

จุลทรรศน์อิเลคตรอน (Electron Microscope Scanning, EMS, **Lee et al., 2002**) พบการกระทำระหว่างขององค์ประกอบของสารต่างๆในของเหลวกับวัสดุเยื่อกรอง เช่น อนุภาคคอลลอยด์ที่ดูดติดกับเยื่อกรอง การเกิดชั้นบางๆบนผิวเยื่อกรองเป็นลักษณะของฟาวลิ่งเช่นกัน **(Bowen et al., 1999)** หรือโมเลกุลของสารอินทรีย์ธรรรชาติในน้ำผิวดิน น้ำทิ้ง (Natural Organic Matters, NOM) ที่ดูดซับบนผิวภายในรูเยื่อกรองซึ่งเป็นลักษณะของฟาวลิ่งที่ไม่สามารถฟื้นสภาพการกรองด้วยวิธีการทางไฮโดรไดนามิกส์ (Irreversible hydrodynamic fouling) **(Hesse et al., 1999; Schäfer et al., 2001; Aoustin et al., 2001)**. ดังนั้นการลดการเกิดฟาวลิ่งลักษณะดังที่กล่าวมานี้ทำได้ง่ายโดยการปรับปรุงคุณภาพน้ำผิวดิน น้ำทิ้งเบื้องต้นก่อนเข้าสู่ระบบเยื่อกรองที่ต้องมีการเลือกใช้ชนิดและระดับรูของเยื่อกรอง (Pore size) หน้าตัดพื้นที่ผิวมวลโมเลกุล (Molecular weight cut off) ของเยื่อกรอง และปรับแต่งสภาพสารแขวนลอย (Conditioning suspensions) **(Schäfer et al., 2001)**