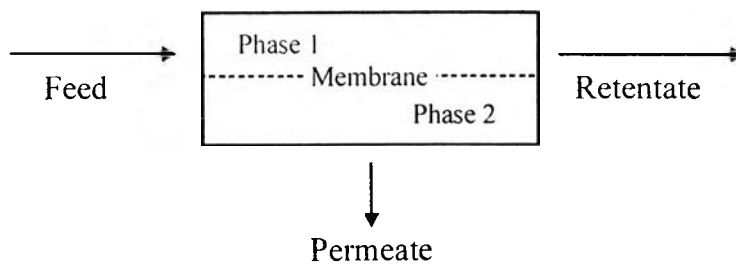


## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสาร

#### 2.1 กระบวนการเมมเบรน (Membrane Process)

กระบวนการเมมเบรน หมายถึง กระบวนการต่างๆ ที่อาศัยเยื่อเมมเบรน (semi permeable membrane) ในการแยกสารละลายเมมเบรนออกจากน้ำ หรือของเหลวอื่นๆ หลักการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.1 ความสามารถในการแยกขึ้นอยู่กับขนาดช่องว่าง (pore size) หรือ Molecular Weight Cut-off (MWCO) ของเมมเบรน โดยอาศัยกลไก 2 ชนิด คือ การกรองติดค้าง (Sieve Effect) และการแพร่ผ่าน (Diffusion Effect) ซึ่งสามารถนำมาใช้เพิ่มความเข้มข้นหรือทำให้สารบริสุทธิ์ขึ้น หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรนก็คือ จะต้องมีความเข้มข้นที่ทำให้สารละลายไหลผ่านและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น ผลต่างของความดัน เยื่อเมมเบรนที่ใช้งานในปัจจุบันจะสังเคราะห์ขึ้นจากสารโพลีเมอร์และสารประกอบอื่น ๆ เช่น เซลลูโลสอะซิเตต เซลลูโลสไนเตรท โพลีเอไมด์ เป็นต้น และในปัจจุบันได้มีการนำกระบวนการเมมเบรนเข้ามาใช้ในงานอุตสาหกรรมมากมาย รวมทั้งในการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอย่างมีประสิทธิภาพอีกด้วย



รูปที่ 2.1 หลักการทำงานของกระบวนการเมมเบรน

#### 2.1.1 ประเภทของเมมเบรน

ปัจจุบันได้มีการผลิตเมมเบรนขึ้นมาหลายชนิดเพื่อให้เหมาะกับลักษณะการนำไปใช้งานประเภทต่าง ๆ โดยเราสามารถแบ่งประเภทของเมมเบรนได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่

### 2.1.1.1 Isotropic Membranes

เป็นเมมเบรนที่มีส่วนประกอบโครงสร้างสม่ำเสมอ สามารถแบ่งได้อีก 3 ประเภทได้แก่

- 1) Microporous Membranes เมมเบรนประเภทนี้จะมีรูพรุนกระจายสม่ำเสมอทั่วทั้งแผ่น แยกสารโดยอาศัยการกรองติดค้างเช่นเดียวกับการกรองด้วยทราย แต่รูพรุนมีขนาดเล็กกว่าถึงกรวยทรายมากคือจะอยู่ที่ 0.01 - 10 ไมครอน กลไกหลักในการทำงานคือการกรองดักสารที่มีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของตัวเมมเบรน เมมเบรนชนิดนี้ได้แก่ ไมโครฟิลเตรชัน อัลตราฟิลเตรชัน และนาโนฟิลเตรชัน
- 2) Nonporous Dense Membranes เป็นเมมเบรนที่เนื้อแน่นไม่มีรูพรุน แยกสารด้วยการแพร่ผ่าน กลไกหลักคือ จะอาศัยความสามารถในการแพร่ผ่านเมมเบรนของสารละลาย 2 ชนิด ที่อยู่แต่ละด้านของเมมเบรน เมมเบรนประเภทนี้จะมีความแน่นสูง ได้แก่ กระบวนการออสโมซิสผันกลับ เมมเบรนสำหรับแยกก๊าซ และ pervaporation membrane
- 3) Electrically Charge Membranes เมมเบรนประเภทนี้อาจจะมีรูพรุนหรือไม่มีรูพรุนก็ได้ แต่โดยทั่วไปจะมีรูพรุนขนาดเล็กมากโดยที่ผนังของรูพรุนจะมีอิออนที่มีประจุลบหรือบวกติดแน่นอยู่ เมมเบรนที่มีประจุบวกติดอยู่เรียกว่า Anion Exchange Membranes เพราะว่าอิออนลบในน้ำจะเข้ามาจับ ส่วนเมมเบรนที่มีประจุลบเรียกว่า Cation Exchange Membrane การแยกสารจะต้องอาศัยความต่างศักย์ทางไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน ซึ่งจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดประจุของอิออนที่อยู่ในน้ำเป็นหลัก โดยจะใช้ในการกำจัดอิออนเป็นหลัก เมมเบรนประเภทนี้ได้แก่ อีเล็กโตรไดอะไลซิส

### 2.1.1.2 Anisotropic Membranes

อัตราการถ่ายเทมวลสารต่าง ๆ ผ่านเมมเบรนนั้น จะแปรผกผันกับความหนาแน่นของเยื่อแผ่นเมมเบรน สำหรับการกรองน้ำเพื่อให้ได้น้ำที่ผลิตมีปริมาณมากพอสมควรนั้น ความหนาของชั้นเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพไม่ควรเกิน 20 ไมครอน การพัฒนาระบบผลิต การประกอบเมมเบรนชั้นต่าง ๆ เข้าด้วยกันช่วยให้สามารถบรรลุเป้าหมายในการนำมาใช้งานจริงได้มากขึ้น โดยใช้เทคนิคของโครงสร้าง

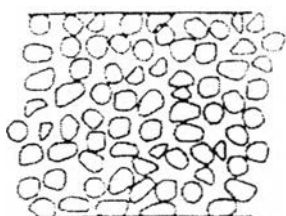
แบบ Anisotropic ซึ่งวางแผ่นฟิล์มเมมเบรนขนาดที่บางมากบนแผ่นฟิล์มรองรับ ซึ่งมีรูพรุนและมีความหนาแน่นกว่า ซึ่งเรียกว่า TFC (Thin Film Composite) Membrane ซึ่งแผ่นฟิล์มทั้งสองชั้นทำมาจากวัสดุโพลีเมอร์คนละชนิดกัน โพลีเมอร์แต่ละชนิดที่ใช้ผลิตเมมเบรนแสดงดังตารางที่ 2.1 ประโยชน์ที่ได้จากเมมเบรนประเภทนี้ คือ ได้อัตราการกรองน้ำที่สูงขึ้น ซึ่งในเชิงธุรกิจมักจะผลิตเมมเบรนประเภทนี้

### 2.1.1.3 Ceramic Metal and Liquid Membranes

โดยปกติแล้ววัสดุที่ใช้ผลิตเมมเบรนส่วนใหญ่จะเป็นโพลีเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ แต่เร็ว ๆ นี้ได้มีการผลิตเมมเบรนที่ใช้วัสดุอย่างอื่น เช่น เซรามิก โดยใช้เมมเบรนที่มีรูพรุน เช่น ไมโครฟิลเตรชันและอัลตราฟิลเตรชัน เพื่อให้ทนทานต่อสารตัวทำละลายและมีความเสถียรต่อความร้อน โลหะ เช่น พัลลาเดียม สามารถที่จะใช้ผลิตเมมเบรนเนื้อแน่นสำหรับแยกก๊าซไฮโดรเจนเพื่อทำให้บริสุทธิ์ได้ ฟิล์มชั้นของเหลวก็สามารถที่จะนำมาผลิตเป็น Liquid Membrane ได้เช่นกัน

## Isotropic membranes

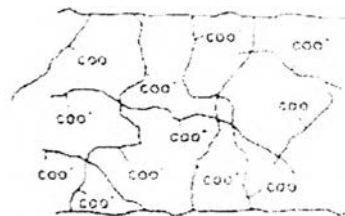
Isotropic microporous membrane



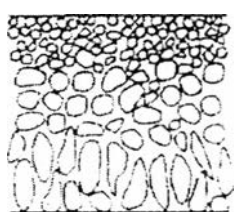
Nonporous dense membrane



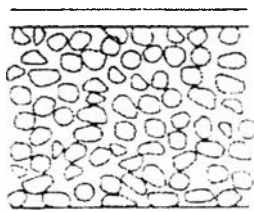
Electrically charged membrane



## Anisotropic membranes

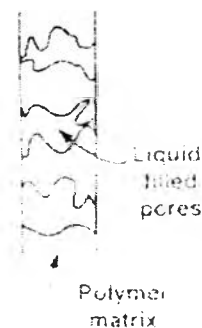


Loeb-Sourirajan anisotropic membranes



Thin-film composite anisotropic membranes

Supported liquid membrane



รูปที่ 2.2 การแบ่งประเภทของเมมเบรนตามโครงสร้างของเมมเบรน

ที่มา : ความรู้และการใช้ประโยชน์จากเมมเบรน, ขวลิต รัตนธรรมสกุล (2544)

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของโพลีเมอร์ที่ใช้ทำเมมเบรน

คุณสมบัติ	โพลีเมอร์			
	Celulose Acetate	PolySulfone	Aromatic Polyamides	Polyacrylonitrile
MWCO	1,000 - 50,000	5,000 - 50,000	1,000 - 50,000	30,000 - 100,000
pH	3.5 - 7	0 - 14	2 - 12	2 - 12
อุณหภูมิ (°C)	35	100	80	50
ความทนทานต่อคลอรีน	ดี	ดี	ด้อย	ปานกลาง
ความทนทานต่อสารละลาย	ด้อย	ปานกลาง	ปานกลาง	ปานกลาง
รูปแบบของเมมเบรน	แผ่น, ท่อ	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี	แผ่น, ท่อ, แคปิลลารี

ที่มา : สุวิทย์ กิตติภูมิชัย (2543)

### 2.1.2 การใช้งานของเมมเบรนแต่ละชนิด

เนื่องจากปัจจุบันได้มีการพัฒนาสังเคราะห์และสร้างเมมเบรนขึ้นมาหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็มีความเหมาะสมกับการใช้งานที่ต่าง ๆ กันไป เมมเบรนที่มีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายได้แก่

#### 2.1.2.1 Microfiltration (MF)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อแยกอนุภาคขนาดไมครอนหรือเล็กกว่าไมครอน เมมเบรนแบบ MF สามารถกักอนุภาคแขวนลอยและจุลชีพได้ แต่ยอมให้สารละลายและน้ำที่ผ่านกระบวนการตกตะกอนผ่านได้ มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.03 - 10 ไมครอน ค่า MWCO มากกว่า 100,000 ดาลตัน ใช้ความดันต่ำประมาณ 100 - 400 kPa (15 - 60 psi)

#### 2.1.2.2 Ultrafiltration (UF)

เป็นกระบวนการที่อาศัยแรงขับเคลื่อน เพื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายที่ประกอบด้วย คอลลอยด์ และสารน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยทั่วไปสารที่ไม่มีประจุจะถูกกั้นเอาไว้ และไอออนจะสามารถ

ผ่านเมมเบรนไปได้โดยค่า MWCO อยู่ที่ 10,000 - 100,000 ดาลตัน การทำงานของ UF ใช้แผ่นเยื่อที่มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.002 ถึง 0.1 ไมครอน ใช้ความดันประมาณ 200 - 700 kPa (30 - 100 psi) มักนิยมใช้ในการแยกสารแขวนลอย แยกโปรตีนและใช้ในการผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูงโดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger เป็นต้น

#### 2.1.2.3 Nanofiltration (NF)

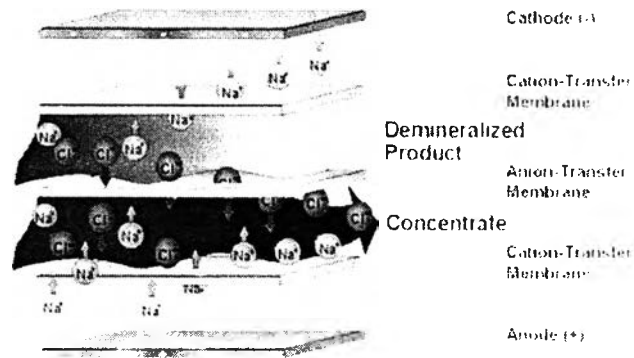
เป็นกระบวนการซึ่งใช้ความดันต่ำมาก โดยจะยอมให้ผ่านได้เฉพาะอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่า 1 นาโนเมตรเท่านั้น มีขนาดช่องว่าง (pore size) ประมาณ 0.001 ไมครอน ค่า MWCO อยู่ที่ 1,000 - 100,000 ดาลตัน ในการใช้งานต้องการความดันสูงกว่าแบบ MF และ UF คือประมาณ 600 kPa (90 psi) และอาจจะสูงได้ถึง 1,000 kPa (150 psi) มีลักษณะการทำงานของทั้ง UF และ RO รวมอยู่ในตัว โดยทั่วไปเมมเบรนแบบ NF จะกำจัดไอออนชนิดวาเลนซ์คู่ในอัตราสูงกว่าไอออนวาเลนซ์เดี่ยว ทำให้มีความสามารถในการลดความกระด้าง บางทีจึงเรียกเมมเบรนชนิดนี้ว่า softening membrane

#### 2.1.2.4 Reverse Osmosis (RO) หรือ Hyperfiltration

ทำงานโดยอาศัยการไล่ความดันเข้าไปในสารละลายเข้มข้น ความดันที่ใส่เข้าไปต้องมากกว่าความดันออสโมซิสของสารละลายจากผลของความดันนี้ ทำให้น้ำบริสุทธิ์ถูกบังคับให้ไหลผ่านเมมเบรนชนิดที่ยอมให้โมเลกุลขนาดเล็กผ่านได้ โดยจะทิ้งเกลือและสิ่งปนเปื้อนเอาไว้ หลักการทำงานของ RO จะตรงกันข้ามกับกระบวนการออสโมซิส โดยใช้ความดันสูงถึง 200-1,000 psig (1,380-6,890 kPa) สารต่างๆ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100 จะถูกกรองไว้บนแผ่นเมมเบรน การกรองแบบ RO สามารถประยุกต์ใช้ในงานการผลิตน้ำบริสุทธิ์สูง โดยใช้ควบคู่กับ ion exchanger ใช้ในงานแยกโลหะ การทำให้น้ำตาลเข้มข้นสูงขึ้น การทำให้สีย้อมมีความบริสุทธิ์สูงขึ้น เป็นต้น

#### 2.1.2.5 Electrodialysis (ED)

เป็นกระบวนการกำจัดเกลือใช้ความต่างศักย์ไฟฟ้าเป็นแรงขับเคลื่อน โดยที่ไอออนจะถูกกำจัดโดยผ่านกระแสไฟฟ้าตรงเข้าไปสู่เมมเบรนซึ่งมี 2 ชนิด คือ แผ่นบวกและแผ่นลบ ซึ่งจะยอมให้เฉพาะไอออนที่มีประจุไฟฟ้าเหมือนกันไหลผ่านน้ำจะไหลผ่านเมมเบรนเพียงแค่นั้น ซึ่งจะตรงกันข้ามกับไอออนที่จะเคลื่อนที่ต่างจากกับเมมเบรน ลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 2.3



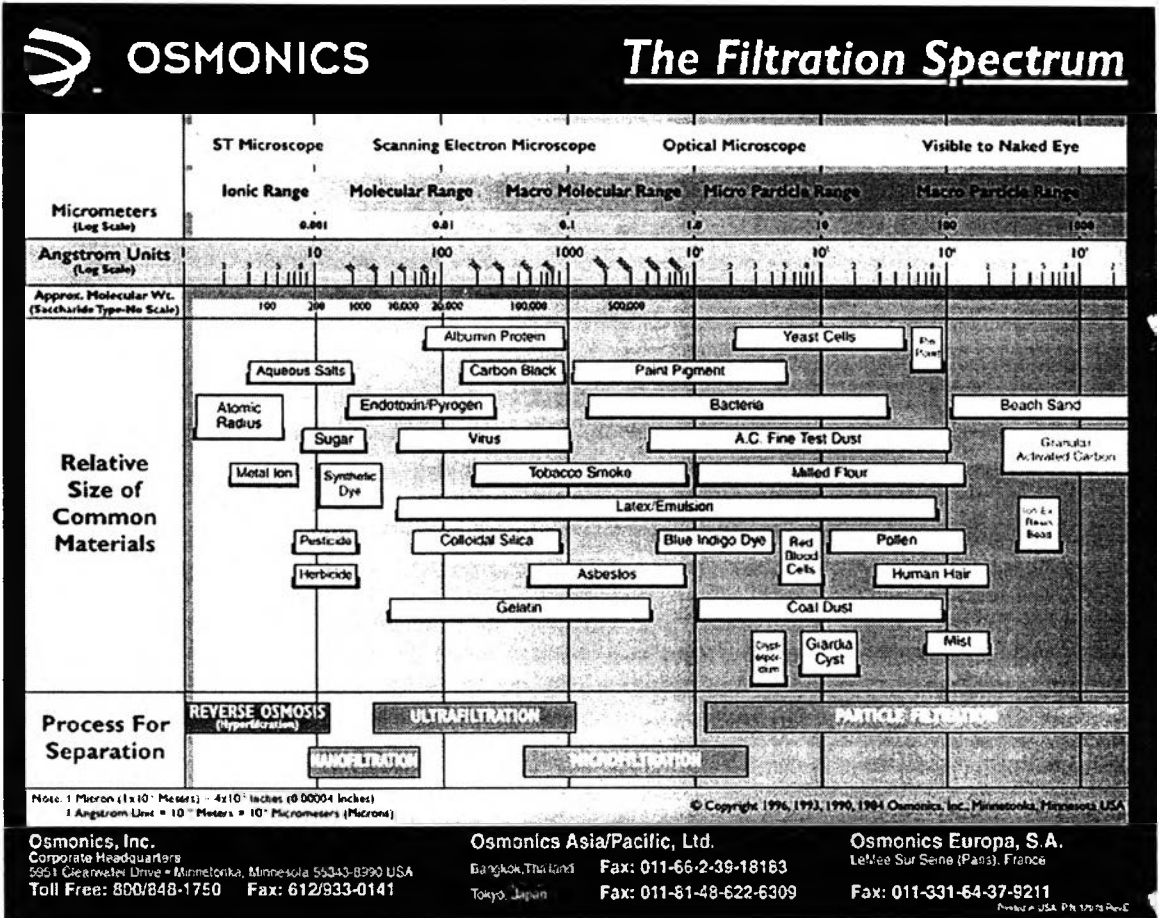
รูปที่ 2.3 ลักษณะการทำงานของเมมเบรนแบบอีเล็กโตรไดอะไลซิส

### 2.1.3 โมดูลชนิดต่าง ๆ ของเมมเบรน

ในการนำเมมเบรนไปใช้งานจริง จำเป็นจะต้องมีการบรรจุแผ่นเมมเบรนลงในวัสดุรองรับที่เรียกว่าโมดูลเพื่อให้สะดวกในการนำไปใช้งาน ซึ่งโมดูลที่ใช้กันในปัจจุบันพบอยู่ 4 ลักษณะ ได้แก่

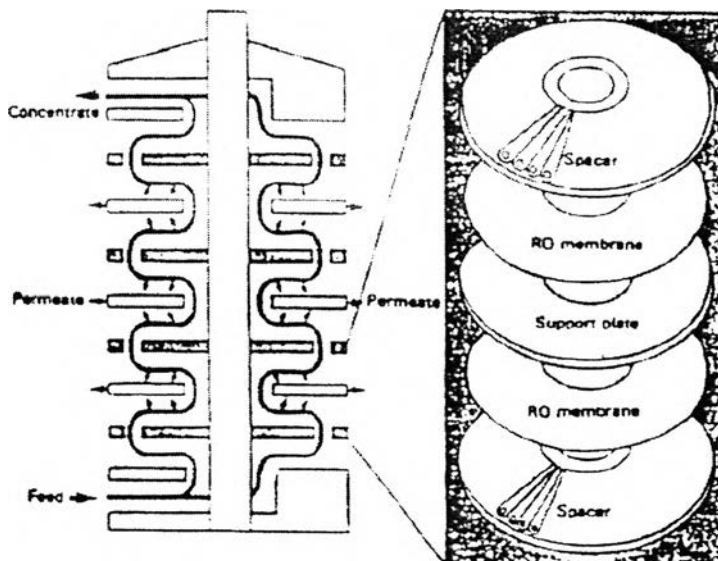
#### 2.1.3.1 แบบแผ่น (Plate And Frame Module)

เทคนิคนี้เป็นการจัดแผ่นเมมเบรนที่ง่ายที่สุดโมดูลที่ใช้จะมีลักษณะทำงานคล้าย filter press ดังรูปที่ 2.5 แผ่นเมมเบรนวางอยู่บนแผ่นรองรับซึ่งมีรูพรุน (Porous Plate) หรือแผ่นรองรับที่มีร่องให้น้ำไหลออกได้ เมมเบรนและแผ่นรองรับจะวางซ้อนกัน และสลับกัน น้ำถูกบังคับให้ซึมผ่านเมมเบรนและแผ่นรองรับแล้วจึงไหลออกจากโมดูล



ที่มา : <http://www.osmonics.com>

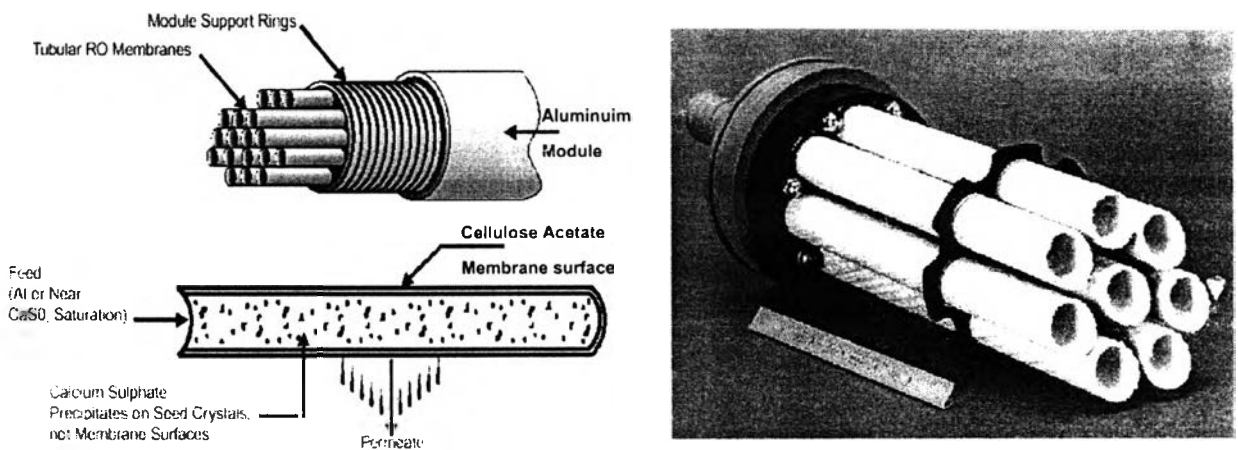
รูปที่ 2.4 ความสามารถในการกำจัดสารขนาดต่าง ๆ ของเมมเบรนแต่ละชนิด



รูปที่ 2.5 Plate and Frame Module

### 2.1.3.2 แบบท่อ (Tubular Module)

วิธีนี้เป็นการม้วนแผ่นเมมเบรนให้เป็นหลอดหรือท่อขนาดเล็กและยึดติดไว้ภายในท่ออีกอันหนึ่งที่ทำด้วยสแตนเลส หรือไฟเบอร์กลาส ดังรูปที่ 2.6 และทำหน้าที่เป็นโครงสร้างรองรับแผ่นเมมเบรนมิให้ฉีกขาดในระหว่างการใช้งาน และใช้เป็นทางออกของน้ำสะอาดอีกด้วย น้ำดิบจะถูกสูบผ่านเข้าไปในท่อด้วยความดันแรงดันของน้ำทำให้โมเลกุลของน้ำสามารถซึมผ่านเมมเบรนและท่อรองรับออกไปสู่ภายนอก เนื่องจากเทคนิคนี้สามารถทำความสะอาดได้ง่าย จึงนิยมใช้ในกรณีที่มีการอุดตันเกิดขึ้นเร็ว (Applegate, 1984)



รูปที่ 2.6 Tubular Module

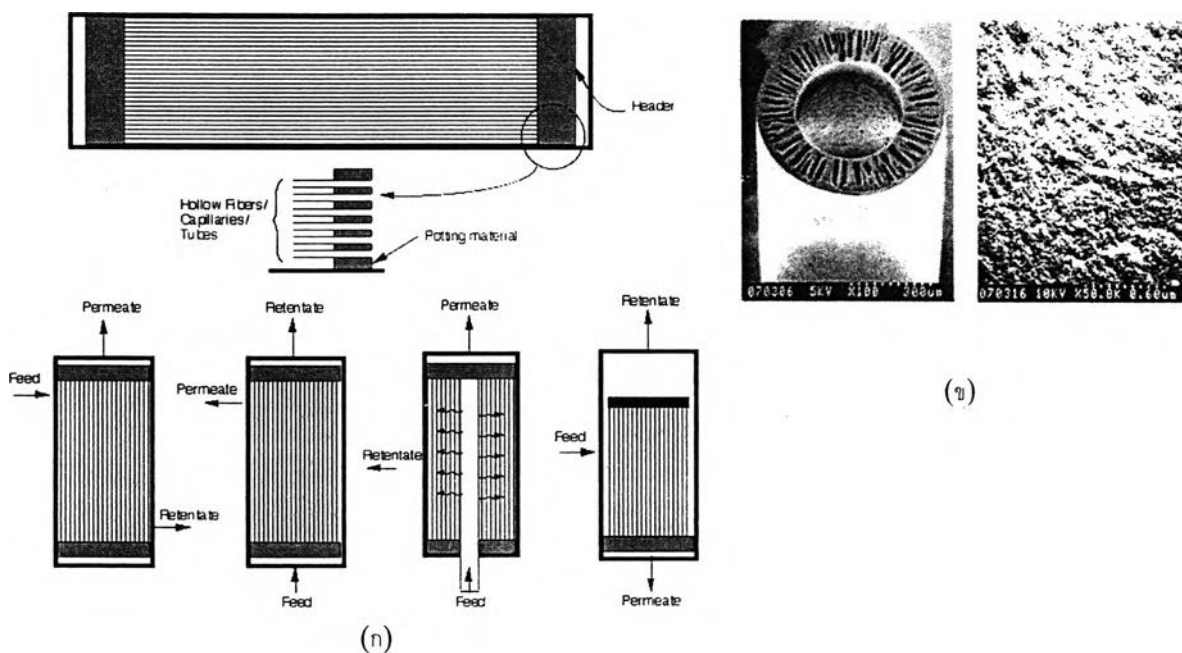
### 2.1.3.3 แบบเส้นใยกลวง (Hollow Fiber Module)

เมมเบรนแบบเส้นใยกลวงจะมีผิวที่คล้ายฟองน้ำล้อมรอบผิวชั้นใน (ซึ่งมีความหนาเพียง 0.1 ไมครอน) ทำโดยการนำเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงมามัดรวมกันเป็นมัด ๆ และงอพับเป็นรูปเกือกม้าหรือตัวยู ปลายทั้งสองข้างของเส้นใยทั้งมัดถูกตรึงติดอยู่กับด้านใดด้านหนึ่ง เมมเบรนชนิดนี้เหมาะกับน้ำดิบที่มีความสกปรกหรือของแข็งเจือปนสูงเพราะว่ามีช่องว่างขนาดใหญ่ทำให้มีโอกาสอุดตันได้น้อยและยังสามารถจัดรูปแบบการวางในโมดูลได้หลายลักษณะและป้อนน้ำเข้าได้หลายลักษณะ ดังรูปที่ 2.7



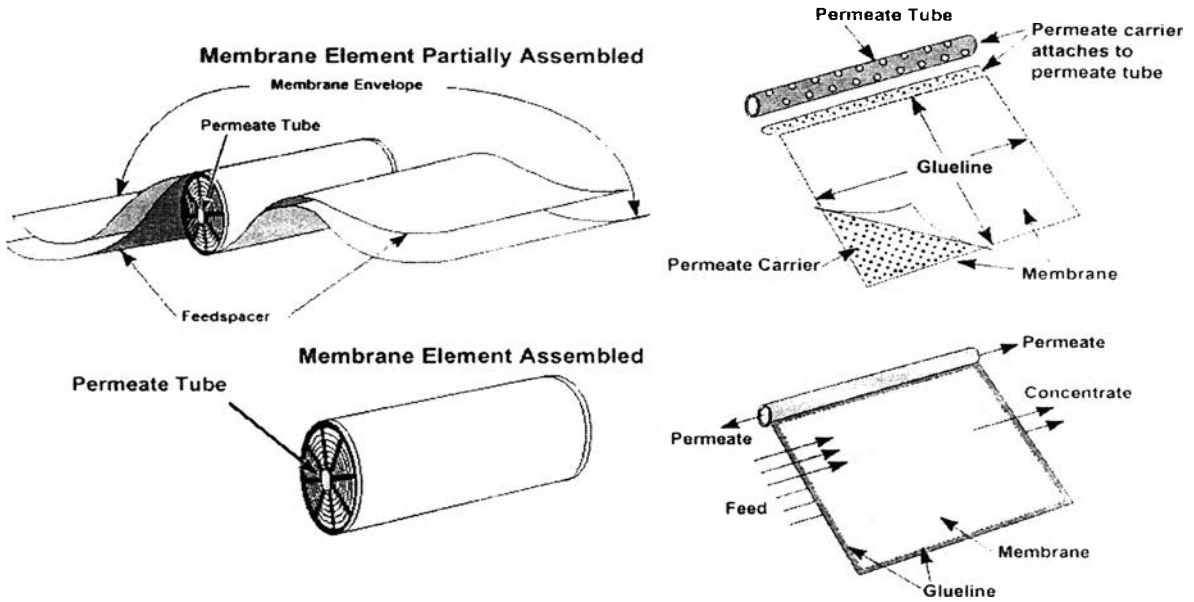
### 2.1.3.4 แบบม้วน (Spiral Wound Module)

โมดูลแบบนี้ประกอบด้วยเมมเบรนสองแผ่นประกบกัน โดยมีแผ่นวัสดุเนื้อพรุนสอดอยู่ตรงกลางระหว่างเมมเบรนทั้งคู่ จากนั้นม้วนแผ่นแบนและแผ่นวัสดุพรุนทั้งสามรอบท่อเจาะรูตั้งรูปที่ 2.8 โดยมีแผ่นตะแกรงทำด้วย Polypropylene คลุมปิดด้านนอก ขอบของแผ่นเมมเบรนทั้งสามด้านถูกยึดไว้ด้วยกาวพิเศษ



รูปที่ 2.7 (ก) Hollow Fiber Module (ข) Hollow Fiber Membrane

ขอบที่เหลือปล่อยให้เปิดตามปกติและจึงติดกับท่อเจาะรู ลักษณะเช่นนี้ ทำให้น้ำถูกบังคับให้ไหลไปยังท่อเจาะรูเสมอ การม้วนเมมเบรน แผ่นรองรับ และตะแกรงพลาสติก ทำให้ได้โมดูลรูปทรงกระบอกที่สามารถบรรจุลงในท่อทรงกระบอกธรรมดาได้ โมดูลแบบนี้อาจมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 5, 10, 20 หรือ 30 เซนติเมตร และมีความยาวต่าง ๆ กัน แต่มักไม่เกิน 1 เมตร น้ำดิบจะถูกบังคับให้ไหลในแนวแกนของโมดูล เข้าไปตามแผ่นตะแกรง และจะถูกแรงดันอัดให้น้ำซึมผ่านเมมเบรนตามแนวรัศมีลงไปยังแผ่นรองรับ ซึ่งจะส่งน้ำบริสุทธิ์ไปยังท่อเจาะรูเพื่อนำน้ำออกจากโมดูลต่อไป



รูปที่ 2.8 Spiral Wound Module

2.1.4 หลักการของออสโมซิสผันกลับ

ออสโมซิสผันกลับมีที่มาจากออสโมซิส รูปที่ 2.9 แสดงหลักการของออสโมซิสเทียบกับออสโมซิสผันกลับ จะเห็นว่าในออสโมซิสสารละลายเข้มข้นและเจือจาง (ซึ่งอาจเป็นน้ำเพียงอย่างเดียว) บรรจุอยู่ในเซลล์ที่มีเยื่อแผ่นที่เลือกผ่านน้ำ เนื่องจากน้ำในด้านสารละลายเจือจางมีศักย์ภาพเคมี (Chemical Potential) สูงกว่า น้ำในด้านสารละลายเจือจางจึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นไปยังด้านสารละลายเข้มข้น เมื่อถึงสมดุลย์ ศักย์ภาพเคมีของน้ำทั้งสองด้านของสารละลายเท่ากัน ผลต่างของความดันของสารละลายทั้งสองด้าน  $\Delta\pi$  ก็คือผลต่างของความดันออสโมติก (Osmotic Pressure) ถ้ามีการให้ความดันทางด้านสารละลายเข้มข้น P โดย  $P \gg \Delta\pi$  ก็จะทำให้น้ำทางด้านสารละลายเข้มข้นแพร่ผ่านเยื่อแผ่นไปยังด้านสารละลายเจือจาง จะเห็นว่าเป็นการแพร่กลับทิศทาง (เมื่อเทียบกับออสโมซิส) ซึ่งก็คือการเกิดออสโมซิสผันกลับซึ่งจะส่งผลให้สารละลายด้านเข้มข้นยิ่งเข้มข้นขึ้น ดังนั้นในออสโมซิสผันกลับจึงต้องมีการป้อนสารละลายผ่านเยื่อแผ่นที่มีความดันสูงกว่าความดันออสโมติกมากเพื่อเป็นแรงขับเคลื่อนให้ฟลักซ์ของน้ำผ่านเยื่อแผ่นมีค่าสูง ความดันออสโมติกของสารละลายสามารถคำนวณจากสมการของ Van't Hoff

$$\pi = C_pRT/M_1 \tag{2.1}$$

- เมื่อ  $\pi$  = ความดันออสโมติก (psi หรือ kPa)
- $C_i$  = ความเข้มข้นมวลของสารละลาย ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
- $R$  = ค่าคงที่ก๊าซ
- $T$  = อุณหภูมิสัมบูรณ์
- $M_i$  = น้ำหนักโมเลกุลของสาร  $i$

สมการ (2.1) ใช้สำหรับสารละลายเจือจางหรือสารละลายอุดมคติ (Ideal Solution) เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น ค่าจะเบี่ยงเบนไปจากที่คำนวณได้จากสมการที่ (2.1) และควรคำนวณจากสมการในรูปของ Virial Expansion ดังนี้

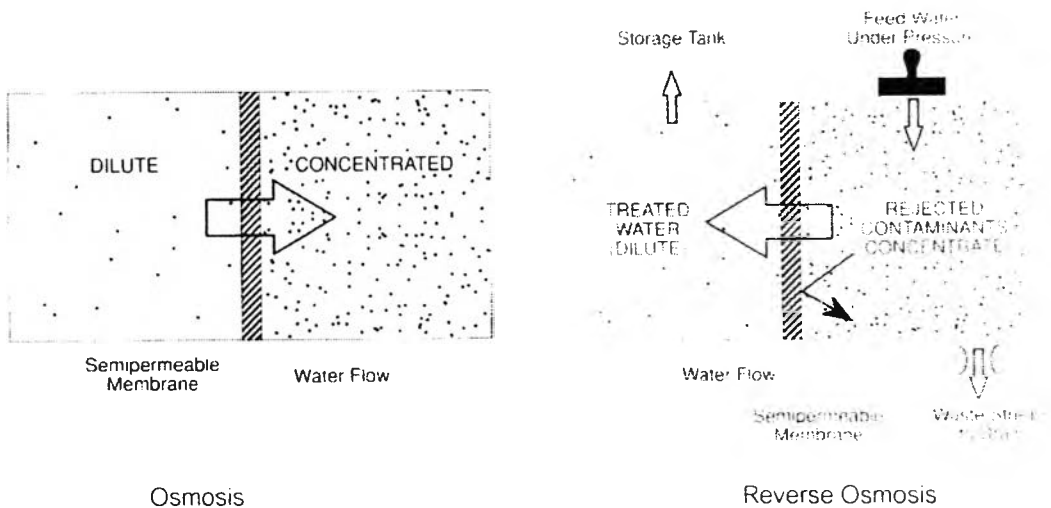
$$\pi = \frac{RT}{M_i} C_i + BC_i^2 + \dots \quad (2.2)$$

- เมื่อ  $B$  = ค่าคงที่

และสำหรับสารโมเลกุลใหญ่ ค่า  $\pi$  ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นเป็นฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล

$$\pi = aC_i^n \quad (2.3)$$

- เมื่อ  $a$  = ค่าคงที่,  $n > 1$



รูปที่ 2.9 กระบวนการ Osmosis และ Reverse Osmosis

ตารางที่ 2.2 แสดงค่าความดันของออสโมติกของสารละลายต่างๆ ซึ่งจะเห็นว่าความดันออสโมติกของสารโมเลกุลใหญ่มีค่าต่ำกว่าของสารโมเลกุลเล็ก น้ำทะเลที่มีความเข้มข้นของเกลือ (เทียบเป็น NaCl) 3.5% หรือ 35,000 ppm มีค่า  $\pi = 356$  psi ในการผลิตน้ำจืดจากน้ำทะเลจึงต้องใช้ความดันสูง 80 - 100 บรรยากาศ สำหรับสารละลายของตัวถูกละลายโมเลกุลเล็กอื่น ๆ ก็จะทำให้เห็นว่ายิ่งความเข้มข้นสูงก็ยิ่งต้องใช้ความดันสูงเพื่อเอาชนะความดันออสโมติก ซึ่งเป็นข้อจำกัดของกระบวนการออสโมซิสผันกลับ

ตารางที่ 2.2 ความดันออสโมติก ( $\pi$ ) ของสารละลายต่าง ๆ

สารละลาย	ความเข้มข้น	$\pi$ , psi/kPa
โซเดียมคลอไรด์	0.1% (โดยน้ำหนัก)	12/82.7
โซเดียมคลอไรด์	0.1%	113/778
โซเดียมคลอไรด์	3.5%	398/2742
น้ำกร่อย	1,500 ppm	15/104
น้ำทะเล	3.5% (~ 35,000 ppm)	256/2453
แมกนีเซียมซัลเฟต	1.0%	36/245
เอทานอล	1.0%	78/537
เอทานอล	5.0%	395/2722
เอทานอล	10.0%	845/5823
เอทิลีนไกลคอล	1.0%	56/386
เอทิลีนไกลคอล	10.0%	640/4410
ซูโครส	1.0%	11/76
ซูโครส	10.0%	119/820
ซูโครส	20.0%	278/1915
โปรตีน (BSA, pH 5.4)	400 kg/m <sup>3</sup>	19/130
โปรตีน	400 kg/m <sup>3</sup>	94/650

ที่มา : รัตนา (2541)

## 2.2 กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

กระบวนการนาโนฟิลเตรชัน ได้รับการพัฒนาปรับปรุงขึ้นมาใหม่ให้ใช้ค่าแรงดันระหว่างกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและกระบวนการออสโมซิสผันกลับ โดยกลไกในการทำงานจะมีทั้งกลไกของการกรองติดค้าง (Seiving) เช่นเดียวกับการทำงานของเมมเบรนแบบอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน และกลไกของการแพร่ (Diffusion) เช่นเดียวกับกระบวนการออสโมซิสผันกลับ โดยที่กระบวนการนาโนฟิลเตรชันสามารถกำจัดแบคทีเรีย ไวรัส สารอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่ อีออนที่มีหลายวาเลนซ์ โลหะหนัก สี รวมทั้งสามารถกำจัดสภาพต่าง และความกระด้างในน้ำได้ บางทีจึงเรียกเมมเบรนแบบนี้ว่า softening membranes ทำให้กระบวนการนาโนฟิลเตรชันนี้สามารถนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ

### 2.2.1 ประวัติความเป็นมาของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน (ปฏิรูป ผลจันทร์, 2544)

ในปี ค.ศ. 1970 บริษัท Israel Desalination Engineering ได้ใช้คำว่า "Hybrid Filtration" สำหรับกระบวนการซึ่งดำเนินระบบอยู่ระหว่างช่วงความดันที่ใช้กับกระบวนการออสโมซิสผันกลับ และอัลตราฟิลเตรชัน กระบวนการนี้สามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ในช่วง 50 - 70% และกำจัดสารอินทรีย์ได้ประมาณ 90% ข้อดีอยู่ที่สำคัญของชื่อ Hybrid Filtration คือ มันไม่สามารถอธิบายได้อย่างกระจ่างชัดถึงประเภทของการกรองที่ใช้ ซึ่งอาจจะเป็นอย่างใดอย่างหนึ่งระหว่าง Media Filtration และ Cartridge Filtration

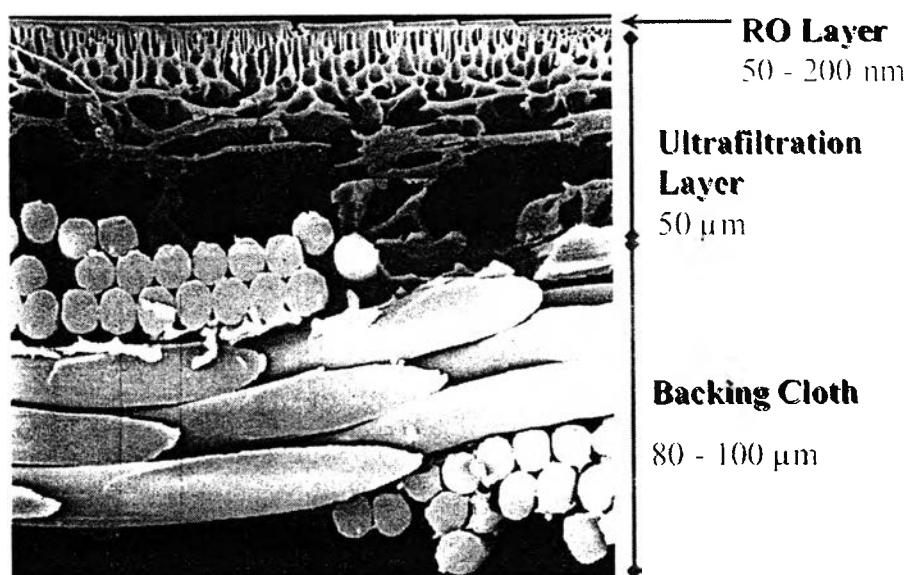
ในช่วงต้นปี 1980 บริษัท Film Tech ได้ทำการพัฒนาเมมเบรนประเภทใหม่ขึ้น ซึ่งให้ค่าอัตราการผลิตน้ำสะอาด ประมาณ  $34 \text{ L/m}^2\text{-hr}$  โดยเมมเบรนนี้กำจัดสารละลายเข้มข้นของโซเดียมคลอไรด์ได้น้อย คือ ประมาณ 10% และกำจัดสารละลายซูโครสได้ประมาณ 90% ด้วยเหตุที่เมมเบรนนี้กำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้น้อยจึงไม่ถูกต้องนักที่จะเรียกว่าเป็น RO เมมเบรน และก็ไม่สามารถเรียกว่าเป็น UF เมมเบรนได้ เนื่องจากเมมเบรนชนิดนี้สามารถกำจัดซูโครสได้เกือบทั้งหมด

เป็นที่ยอมรับกันอย่างแพร่หลายว่าตัวทำละลาย และตัวถูกละลายเคลื่อนที่ผ่าน RO เมมเบรนโดยการแพร่ (Diffusion) และเคลื่อนที่ผ่าน UF เมมเบรนโดยการไหลผ่านรูของเมมเบรน ดังนั้นเมมเบรนชนิดใหม่นี้ น่าจะเป็น RO เมมเบรน แต่เพื่อสามารถแยกแยะมันออกจาก RO เมมเบรน ซึ่งสามารถกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้ในปริมาณสูง บริษัท Film Tech จึงได้กำหนดชื่อ นาโนฟิลเตรชันหรือ NF เมมเบรนขึ้น ชื่อ NF กำหนดขึ้นในทำนองเดียวกับไมโครฟิลเตรชัน (MF) คือเมื่อสารละลายมากกว่า

95% ที่มีขนาดเล็กที่สุดเท่ากับ 1 ไมครอน สามารถถูกกำจัดโดยเมมเบรนจึงเรียกเมมเบรนนั้นว่า NF เมมเบรน (Erikson, 1988) และ NF เมมเบรนจึงถูกผลิตเพื่อใช้ทางการค้าตั้งแต่ปี 1986 เป็นต้นมา (Cluff, 1992)

## 2.2.2 คุณสมบัติของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน

วัสดุที่ใช้ในการทำ NF เมมเบรนจะเป็นสารโพลีเมอร์อินทรีย์ ในอดีต NF เมมเบรนมักทำจากเซลลูโลส และโพลีเอไมด์ โดยจะมีรูปแบบเป็น Asymmetric เมมเบรน ซึ่งเมื่อมีการพัฒนาการผลิต เมมเบรนต่อมาพบว่าเมมเบรนที่มีลักษณะเป็น Multiple Layer Thin Film Composite นั้นสามารถให้ค่าฟลักซ์ ร้อยละของการกำจัด ตลอดจนความทนทานต่อแรงอัด และสารเคมีต่าง ๆ ได้ดีกว่า (Petersen และ Cadotte, 1990) โดยลักษณะของเมมเบรนจะประกอบด้วยชั้นบาง ๆ ของเมมเบรนที่เรียกว่า Active Membrane Layer วางตัวอยู่บนชั้นรองรับที่มีรูพรุนขนาดเล็ก โดยทั่วไป Active Membrane Layer จะประกอบด้วยหมู่สารเคมีที่เป็นประจุลบ และเชื่อว่าเมมเบรนมีรูพรุนซึ่งมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2 nm (Raman และคณะ, 1994)



รูปที่ 2.10 รูปขยายของ Thin Film Composite Membrane

เนื่องจากขนาดรูพรุนของ NF เมมเบรนมีขนาดเล็กมาก ในบางครั้งจึงกำหนดคุณสมบัติของเมมเบรนโดยใช้ค่า Molecular Weight Cut Off (MWCO) ซึ่งก็คือขนาดของโมเลกุลที่เล็กที่สุดที่จะถูกกำจัดโดยเมมเบรน สำหรับ NF มีค่าอยู่ในช่วง 100 - 200 (Raman และคณะ, 1994)

## 2.2.3 กลไกการทำงานของนาโนฟิลเตรชันเมมเบรน

ในส่วนนี้จะกล่าวถึงโมเดลที่อธิบายถึงการเคลื่อนที่ของน้ำและสารละลายผ่าน NF เมมเบรน ซึ่งสามารถอธิบายด้วยโมเดลต่าง ๆ ดังนี้

### 2.2.3.1 Pore Model

โมเดลนี้สามารถใช้ได้ทั้งกับ UF และ NF เมมเบรนซึ่งเป็นเมมเบรนที่มีรูพรุนมากกว่าที่จะใช้กับ RO เมมเบรน เนื่องจากผลของความสามารถในการซึมผ่านได้ที่สูงของเมมเบรน สมมุติฐานที่ว่าไม่มีการไหล Coupling เป็นลักษณะของการไหลแบบหนืด (Viscous Flow) สมมุติให้รูของเมมเบรนเป็นรูปทรงกระบอกกลมที่มีรัศมีคงที่ตลอดเมมเบรน และโมเลกุลของตัวถูกละลายถูกแยกออกจากน้ำเนื่องจากมันมีขนาดใหญ่กว่ารูของเมมเบรน หรือเนื่องจากแรงเสียดทานภายในรูของเมมเบรน (Kootatep, 1979)

ค่าฟลักซ์ (Volumetric Water flux) สำหรับ Pore Model สามารถอธิบายโดย Poiseuille's Law โดยสมมุติให้อยู่ในรูปของวัฏจักรของพาราโบลาที่รอบเส้นศูนย์กลาง ค่าความเร็วเฉลี่ยแสดงได้โดย

$$u = \frac{r^2}{8V} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $u$  = ความเร็วเฉลี่ยของของเหลวในรูเมมเบรน

$r$  = ค่ารัศมีเทียบเท่าของรูเมมเบรน (Equivalent Cylindrical Pore

Radius)

$v$  = ค่า Kinetic Viscosity ของของเหลว

$\frac{dP}{dx}$  = ค่า Gradient ของความดัน

$$Q_f = Q_p + Q_c \quad (2.5)$$

เมื่อ	$Q_i$	=	อัตราการไหลของน้ำ Influent
	$Q_p$	=	อัตราการไหลของน้ำ Permeate
	$Q_c$	=	อัตราการไหลของน้ำ Concentrate

$$Q_i C_i = Q_p C_p + Q_c C_c \quad (2.6)$$

เมื่อ	$C_i$	=	ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ Influent
	$C_p$	=	ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ Permeate
	$C_c$	=	ความเข้มข้นของสารละลายในน้ำ Concentrate

$$R = \frac{Q_p}{Q_i} \quad (2.7)$$

เมื่อ	$R$	=	Recovery
-------	-----	---	----------

$$F_w = K_w [\Delta P - \Delta \pi] \quad (2.8)$$

$$= \frac{Q_p}{A} \quad (2.9)$$

เมื่อ	$F_w$	=	ค่า Flux ของน้ำ
	$K_w$	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ
	$\Delta P$	=	ความแตกต่างระหว่างแรงดันของน้ำที่อยู่คนละด้านของเมมเบรน
	$\Delta \pi$	=	ความแตกต่างระหว่างแรงดันออสโมติกที่แต่ละด้านของเมมเบรน

$$F_s = K_s [C_m - C_p] \quad (2.10)$$

$$F_s = K_s \left[ \left( \frac{C_i - C_c}{2} \right) - C_p \right]$$

$$F_s = \frac{Q_p \cdot C_p}{A} \quad (2.11)$$

เมื่อ	$F_s$	=	ค่า Flux ของน้ำทั้ง
	$K_s$	=	สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของสารละลาย



$C_m$  = ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวของเมมเบรน  
 $A$  = พื้นที่ผิวของเมมเบรน

$$K_w = \frac{Q_f}{A \cdot \Delta P} \quad (2.12)$$

$$K_s = \frac{Q_p \cdot C_p}{A \cdot \Delta P} \quad (2.13)$$

$$\Delta C = [C_m - C_p] \quad (2.14)$$

$$= \left[ \left( \frac{C_i - C_o}{2} \right) - C_p \right]$$

$$C_p = \frac{K_s \cdot C_i}{K_w (\Delta P - \Delta \pi) \left[ \frac{(2 - 2R)}{(2 - R)} \right] + K_s} \quad (2.15)$$

### 2.2.3.2 Donnan Exclusion Model

เนื่องจาก NF เมมเบรนส่วนใหญ่มีประจุลบ เมื่อใช้เมมเบรนที่มีประจุ (Charged Membrane) กับสารละลายเกลือจะเกิดสภาวะ Dynamic Equilibrium ขึ้น อีออนที่มีประจุตรงข้ามกับประจุของเมมเบรน (Counter ion) จะมีความเข้มข้นสูงบริเวณผิวหน้าของเมมเบรน ในขณะที่อีออนที่มีประจุนิดเดียวกับประจุของเมมเบรน (Co-ion) จะมีความเข้มข้นต่ำเมื่อเทียบกับสารละลายบริเวณนอก Membrane Phase (Bulk Solution) ทำให้เกิด "Donnan Potential" ปรากฏการณ์นี้จะทำให้ไม่เกิดการแพร่ (Diffusion) ของ Counter ion จาก Membrane Phase ไปยัง Bulk Solution และเช่นเดียวกันคือ ทำให้ไม่เกิดการแพร่ของ Co-ion จาก Bulk Solution ไปยัง Membrane Phase ซึ่ง Donnan Potential จะยังเกิดขึ้นเมื่อมีการใช้แรงดันในการขับเคลื่อนน้ำผ่านเมมเบรน ผลของ Donnan Potential จะทำให้เกิดการผลักออกของ Co-ion จากเมมเบรน และเนื่องจากความต้องการความเป็นกลางทางไฟฟ้า (Electroneutrality) จึงทำให้ Counter ion ถูกกำจัดออกไปด้วย

สำหรับเกลือ  $M_{z_v} Y_{z_m}$  ซึ่งแตกตัวเป็นไอออน  $M^{z_m^+}$  และ  $Y^{z_v^-}$  ที่สภาวะสมดุลย์ค่า Salt Distribution Coefficient ( $K^*$ ) แสดงได้ดังนี้

$$K^* = \left[ \frac{C_{y(m)}}{C_y} \right] = \left[ Z_v^{z_v} \left( \frac{C_v}{C_v^*} \right)^{z_v} \left( \frac{\gamma}{\gamma_m} \right)^{z_v+z_m} \right]^{\frac{1}{z_m}} \quad (2.15)$$

เมื่อ	$Z_i$	=	ประจุของไอออน i
	$C_y$	=	ความเข้มข้นของ Co-ion y ใน Bulk Solution
	$C_{y(m)}$	=	ความเข้มข้นของ Co-ion y ใน Membrane Phase
	$\gamma, \gamma_m$	=	คือ Activity Coefficient
	$C_m^*$	=	Charge Capacity ของเมมเบรน

Rejection สามารถประมาณได้เป็น  $R = 1 - K^*$

โมเดลนี้ทำนาย Rejection ในรูปฟังก์ชันของ Membrane Charge Capacity, ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ และประจุของไอออน ซึ่งอธิบายถึงการกำจัดสารละลาย แต่ไม่พิจารณาถึงผลของ Diffusive และ Convective Flux ซึ่งมีความสำคัญเช่นเดียวกันสำหรับเมมเบรนที่มีประจุอย่างเช่น NF เมมเบรน (Bhattacharyya และ Williams, 1992b)

### 2.2.3.3 Extended Nernst - Planck Model

โมเดลนี้ให้ค่าฟลักซ์ของไอออนผ่านเมมเบรนที่มีประจุโดยสมการ

$$J_j = J_{wc} + Z_j C_{j(m)} \frac{FE}{R T} - D_{j(m)} \frac{dC_{j(m)}}{dx} - C_{j(m)} D_{j(m)} d \left( \frac{\ln \gamma_{j(m)}}{dx} \right) \quad (2.16)$$

โดยที่  $J_j, C_{j(m)}, D_{j(m)}, Z_j, \gamma_{j(m)}$  คือฟลักซ์, ความเข้มข้น, Diffusivity, ประจุ และ Activity Coefficient ของไอออน j ตามลำดับ m แสดงถึง Membrane Phase E คือ Donnan Potential และ F คือ Faraday's Constant

จากสมการเทอมแรกแสดง Solute Flux เนื่องจาก Convection เทอมที่สองแสดงถึงค่าฟลักซ์เนื่องจาก Donnan Potential และสองเทอมสุดท้ายอธิบายถึง Salt Flux เนื่องจาก Diffusion โมเดลนี้ใช้ทำนายการกำจัดตัวถูกละลาย ในรูปฟังก์ชันของความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ และประจุของไอออน เหมือนกับ Donnan Equilibrium Model แต่สมการของ Nernst - Planck รวมผลของ Convective และ Diffusion Fluxs ซึ่งมีความสำคัญสำหรับ NF เมมเบรนด้วย (Bhattacharyya และ Williams, 1992b)

## 2.2.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของกระบวนการนาโนฟิลเตรชัน

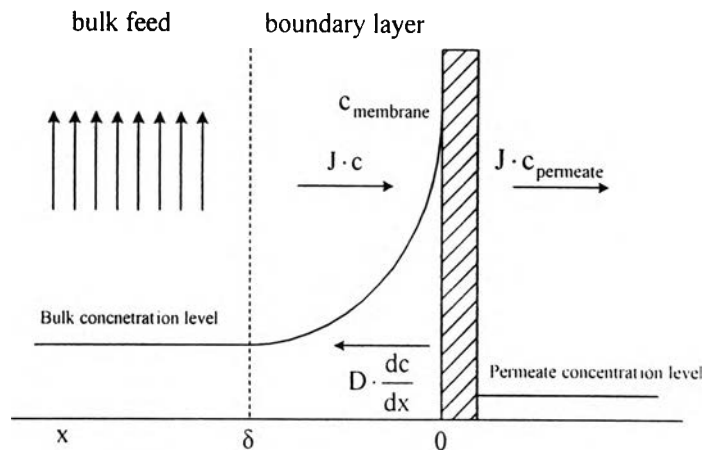
ปัจจัยที่มีผลต่อค่าฟลักซ์ และประสิทธิภาพของกระบวนการนาโนฟิลเตรชันมีหลายปัจจัย ได้แก่ ปรากฏการณ์ Concentration Polarization การเกิด Fouling ลักษณะสมบัติของเมมเบรน ความดันที่ใช้ ความเข้มข้นและชนิดของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ อุณหภูมิของน้ำ ค่าพีเอช สารอื่น ๆ ในน้ำ สารแขวนลอย ระยะเวลาในการเดินระบบ Crossflow Velocity และ % Recovery เป็นต้น

### 2.2.4.1 การเกิดปรากฏการณ์ Concentration Polarization

เป็นปรากฏการณ์ที่อนุภาคสิ่งสกปรกหรือโมเลกุลเคลื่อนที่มาสะสมใกล้ผิวเมมเบรน จนกระทั่งมีความเข้มข้นสูงกว่าค่าเฉลี่ยของน้ำดิบหลายเท่าลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า การเกิด concentration polarization (CP) CP เป็นปรากฏการณ์ที่พบอยู่ทั่วไปในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ อัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน รวมทั้งกระบวนการนาโนฟิลเตรชันด้วยเช่นกัน เมื่อป้อนสารภายใต้ความดันผ่านเยื่อแผ่น ตัวถูกละลายซึ่งไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้จะสะสมอยู่ที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น ทำให้ความเข้มข้นบริเวณนั้นสูงกว่าในสารป้อนหรือใน bulk ซึ่งก็คือการเกิด CP ในชั้นขอบเขตที่มีความหนาที่สภาวะคงตัว การเกิด CP แสดงได้ดังรูปที่ 2.11 จากรูปเมื่อทำ mass balance ของฟลักซ์ ก็จะได้ดังสมการที่ 2.17

$$J_v \cdot C - D \cdot \frac{dC}{dx} = J_v \cdot C_{\text{permeate}} \quad (2.17)$$

เมื่อ  $D$  = diffusion coefficient ของสารละลาย  
 $C$  = ความเข้มข้นของสารละลายใน boundary layer.



รูปที่ 2.11 Concentration Polarization บนผิวเมมเบรน

ทำการแก้สมการ differential equation ด้วยค่า limits:

$$x = 0 \Rightarrow C = C_{\text{membrane}}, \quad x = \delta \Rightarrow C = C_{\text{bulk}}$$

จะได้ว่า:

$$\frac{C_{\text{membrane}} - C_{\text{permeate}}}{C_{\text{bulk}} - C_{\text{permeate}}} = \exp\left(\frac{J \cdot \delta}{D}\right) \quad (2.18)$$

ในกรณีที่สารละลายทั้งหมดถูกกักไว้สมการที่ 2.18 จะลดรูปเหลือ:

$$\frac{C_{\text{membrane}}}{C_{\text{bulk}}} = \exp\left(\frac{J \cdot \delta}{D}\right) \quad \text{หรือ}$$

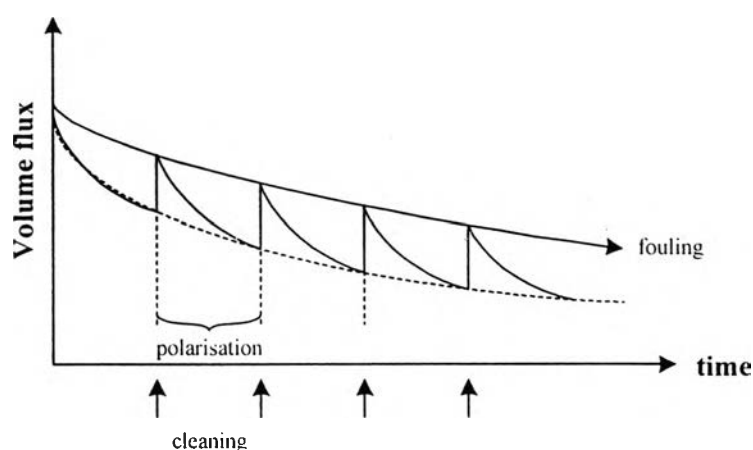
$$\frac{C_{\text{membrane}}}{C_{\text{bulk}}} = \exp\left(\frac{J}{k}\right), \quad k = \frac{D}{\delta} \quad (2.19)$$

ดังนั้นการเกิด CP ทำให้ฟลักซ์ลดลง แต่ถ้า  $k$  มีค่าสูง (ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับลักษณะที่เกี่ยวข้องกับการไหลหรือ hydrodynamics ของระบบ) ก็จะช่วยให้อัตราฟลักซ์สูงขึ้น หรือ CP ลดลงในส่วนของการกักกัน จะเห็นได้ว่าการกักกันปรากฏสูงกว่าการกักกันจริง เมื่อตัวถูกละลายเป็นสารโมเลกุลเล็ก (เช่น เกลือ, น้ำตาล) อย่างไรก็ตามในกรณีของออสโมซิสผันกลับการที่  $C_{\text{membrane}}$  มีค่าสูงอาจทำให้เกิดเกลือบางชนิดที่มีการละลาย (solubility) จำกัด ตกตะกอนหรือเป็นตะกอนอยู่บนผิวเยื่อแผ่น ซึ่งก็คือการเกิด fouling

อย่างไรก็ตาม flux ที่ลดลงเนื่องจากการเกิด CP ยังสามารถแก้ไขให้มีสภาพดั้งเดิมได้ โดยให้การล้างย้อน (backflushing) และการกระแทกเป็นช่วงๆ (pulsing) ของน้ำ (AWWA, 1992)

#### 2.2.4.2 การเกิด Fouling

Membrane fouling จะใช้สำหรับอธิบายการสูญเสียสภาพการกรองแบบ Irreversible ซึ่งไม่สามารถแก้ไขสภาพให้เหมือนเดิมได้โดยใช้แรงดันของน้ำหรือสารเคมี ซึ่งจะแตกต่างจากการเกิด Concentration Polarization ที่สามารถแก้ไขได้ด้วยการล้างย้อนหรือการทำความสะอาด ดังรูปที่ 2.12 ฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจาก เกิด Concentration Polarization จะเกิดขึ้นค่อนข้างเร็วและเมื่อทำการล้างย้อนหรือทำความสะอาดเมมเบรนแล้ว ฟลักซ์ก็จะเพิ่มกลับมาได้อีก แต่เมื่อเวลาผ่านไปนานขึ้นฟลักซ์ที่กลับคืนมาได้จะมีแนวโน้มลดลงเรื่อยๆ จึงทำให้ค่าฟลักซ์โดยรวมมีค่าลดลง



รูปที่ 2.12 ความสัมพันธ์ของฟลักซ์กับระยะเวลาเดินระบบ

Fouling ที่เกิดบนเมมเบรนส่วนใหญ่ เป็นผลมาจากการอุดตันของสารอินทรีย์ในรูพรุนของเมมเบรน ทำให้ลดอัตราการไหลของน้ำผ่านเมมเบรน และไม่สามารถทำให้กลับมาใช้งานได้เหมือนเดิม ซึ่งอาจจะเกิดได้จากการอุดตันของทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ และแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ ได้แก่ (Maynarovich และคณะ, 1999)

- 1) การอุดตันบนด้านนอก (External Surface Fouling) ซึ่งจะเกิดจากการก่อตัวของชั้น cake หรือ gel บนผิวหน้าเมมเบรนด้านน้ำดิบ ซึ่งการอุดตันในลักษณะนี้ก็คือการเกิด Concentration Polarization ดังที่กล่าวรายละเอียดในหัวข้อที่ 2.2.4.1

2) การอุดตันภายในรูพรุนของเมมเบรน (Pore Blocking Fouling) เป็นการอุดตันที่เกิดจากอนุภาคเข้าไปอุดตันภายในรูพรุนของตัวเมมเบรน ซึ่งการอุดตันแบบนี้ยังสามารถแบ่งได้อีก 3 กรณี คือ

- การอุดตันอย่างสมบูรณ์ (Complete Pore Blocking) เกิดจากอนุภาคขนาดเท่า ๆ กับรูพรุนลงไปอุดตัน และไม่สามารถหลุดออกมาได้อีก และน้ำผ่านได้น้อยมาก
- การอุดตันแบบไม่สมบูรณ์ (Intermediate Pore Blocking) อนุภาคที่อุดตันมีขนาดใกล้เคียงกับรูพรุน แต่น้ำยังสามารถผ่านไปได้อย่างสมควร
- การอุดตันแบบธรรมดา (Standard Pore Blocking) จะเกิดได้จากอนุภาคขนาดเล็กกว่ารูพรุนเข้าไปติดค้างอัดตัวอยู่ในรูพรุนของเมมเบรน

การอุดตันในแบบ Pore Blocking แต่ละชนิดนั้นจะไม่สามารถแก้ไขได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงลักษณะการไหลของของเหลวเช่นการล้างย้อน หรือการทำความสะอาด และการอุดตันลักษณะนี้จะทำให้ฟลักซ์ลดลงตั้งแต่ 5-20% จนกระทั่ง 80-95% หรือมากกว่า ขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนของเมมเบรนและชนิดของสารละลาย โมเดลของการเกิด Fouling นั้นไม่สามารถหาได้ง่ายนัก ซึ่งสามารถแสดงได้ด้วยสมการแบบ empirical โมเดลหนึ่งที่ใช้แสดงการเกิด Fouling ได้แก่ (Maynarovich และคณะ, 1999)

$$J_p(t) = J_{ss} + a \cdot e^{-b \cdot t} \quad (2.20)$$

สมการที่ 2.20 เป็นสมการของฟลักซ์ที่ Steady State ได้จากค่าของ Concentration Polarization รวมกับการลดลงในแบบ Exponential ซึ่งค่าคงที่ a และ b สามารถหาได้จากการทดลองการแยกสารละลายของเมมเบรนที่สภาวะต่าง ๆ กัน สมการทำนายการเกิด Fouling ถือว่ามีความสำคัญมากในการออกแบบระบบเมมเบรนอย่างมากเพื่อที่จะให้เกิด Fouling กับระบบน้อยที่สุดและยืดอายุการใช้งานของระบบเมมเบรนอีกด้วย

### 2.2.4.3 ลักษณะสมบัติของเมมเบรน

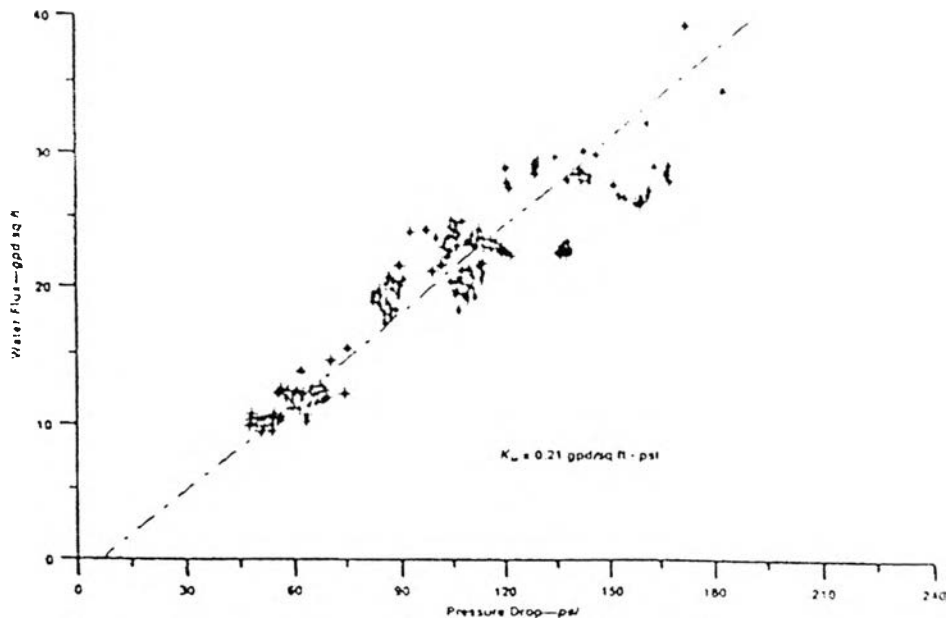
ลักษณะสมบัติของเมมเบรนมีบทบาทสำคัญต่อค่าร้อยละของการกำจัด และฟลักซ์ โดยลักษณะสมบัติของเมมเบรนประกอบไปด้วยวัสดุที่ใช้ทำเมมเบรน ขนาดของรูเมมเบรนซึ่งวัดได้โดยค่า MWCO สภาพะในการดำเนินระบบ เช่นความดันสูงสุดที่ใช้ ช่วงของพีเอช และอุณหภูมิ ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามแต่ละบริษัทผู้ผลิตเมมเบรน

NF เมมเบรนจะยอมให้น้ำ และไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีวาเลนซ์เดียว (Monovalent Inorganic Ions) ไหลผ่านได้ แต่ไม่ยอมให้สารอนินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ และไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีหลายวาเลนซ์ เดียว (Multivalent Inorganic Ions) ไหลผ่าน ร้อยละของการกำจัดไฮเดียมคลอไรด์ โดยทั่วไปประมาณ 0 - 20 % สามารถกำจัดครดอินทรีย์ได้ 80 - 100 % ซึ่งเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักไอออนของสารอนินทรีย์ที่มีสองวาเลนซ์จะถูกกำจัดในช่วง 30 - 90 % (Dyke และ Bartels, 1990)

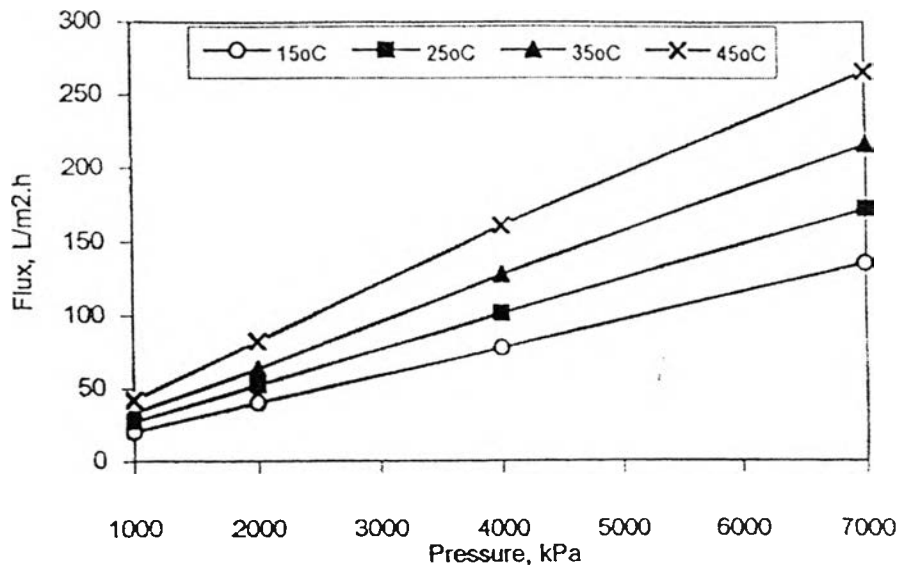
สำหรับเมมเบรนที่มีความสามารถในการซึมผ่านได้ที่สูงและมีประจุ เช่น เมมเบรนสำหรับการกำจัดสารอินทรีย์ สำหรับการกำจัดสารอินทรีย์จะมีค่าสูงหรือไม่ขึ้นอยู่กับประจุไฟฟ้าของสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ที่มีประจุจะถูกกำจัดได้มากกว่าสารอินทรีย์ที่ไม่มีประจุ ดังนั้นค่า MWCO จึงไม่ใช่ค่าที่ดีในการบอกว่าสารอินทรีย์ขนาดเท่าใดที่จะถูกกำจัดโดยเมมเบรน ด้วยเหตุนี้บริษัทผู้ผลิตจึงไม่ให้ค่า MWCO สำหรับเมมเบรนที่ใช้กำจัดสารอินทรีย์ (Fu และคณะ, 1994)

### 2.2.4.4 ความดันที่ใช้

ความดันที่ใช้ในการเดินระบบจะมีผลกระทบกับค่าฟลักซ์ และร้อยละของการกำจัดอย่างมาก สำหรับ NF เมมเบรน จากสมการของ Solution-Diffusion Model และ Pore Model Duranceau และคณะ (1992) ได้รายงานผลการทดลองโดยใช้ NF เมมเบรนชนิด NF70 ในการกำจัดสารอินทรีย์สังเคราะห์ (Synthetic Organic Compound, SOC) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าค่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของความดันที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.13 สมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ( $K_w$ ) คือความชันของกราฟระหว่างค่าฟลักซ์กับความดันลด ซึ่งพบว่ามีค่าประมาณ 0.21 gpd/sq.ft.-psi Schirg และ Widmer (1992) ก็ได้รายงานผลการทดลองในทำนองเดียวกัน ซึ่งทำการทดลองโดยใช้เมมเบรนชนิด DDS และได้แสดงให้เห็นว่าที่ความดันสูงการเพิ่มขึ้นของค่าฟลักซ์จะมีค่ามากกว่าที่ความดันต่ำ ดังแสดงในรูปที่ 2.14



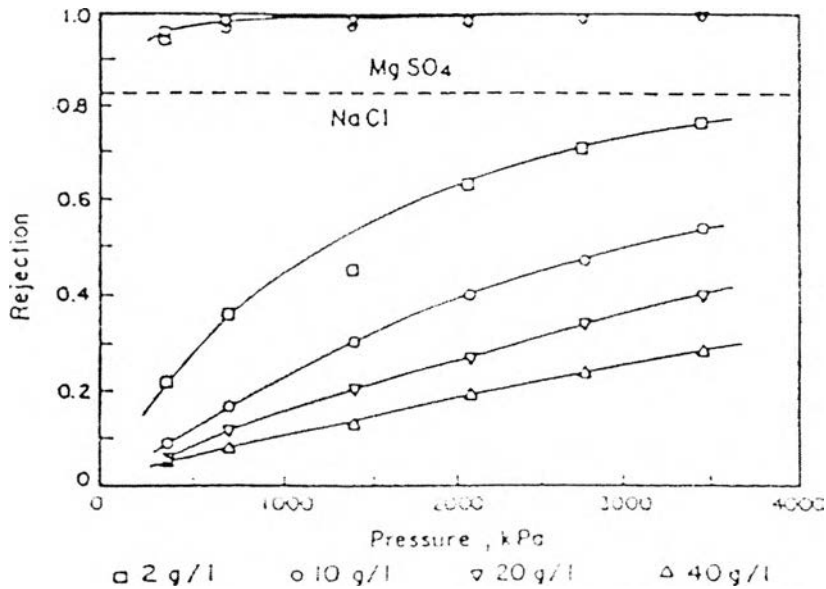
รูปที่ 2.13 พล็อตกับแรงดันที่ใช้สำหรับ NF เมมเบรน (NF70) (Duranceau และคณะ, 1992)



รูปที่ 2.14 ผลของแรงดันต่อค่าพล็อตสำหรับเมมเบรน (Schirgh และ Widmer, 1992)



ร้อยละของการกำจัดโดย NF เมมเบรน มีค่าเพิ่มขึ้นตามความดันที่ใช้ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ซึ่งก็สอดคล้องกับสมการที่ 2.14 ที่แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้ความดันสูงก็จะสามารถผลิตน้ำ Permeate ที่มีความเข้มข้นต่ำหรือมีค่าร้อยละของการกำจัดสูง หรือสามารถอธิบายได้ว่าเมื่อใช้ความดันสูง ก็จะทำให้ได้อัตราการไหลของน้ำ Permeate สูง ในขณะที่สารละลายไม่สามารถไหลผ่านเมมเบรนด้วยอัตราที่สูงเท่ากับ ความเข้มข้นของน้ำ Permeate จึงมีค่าต่ำลง ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Dilution Effect (Waypa และคณะ, 1997)



รูปที่ 2.15 ผลของแรงดันที่ใช้และความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ กับเปอร์เซ็นต์การ NF เมมเบรน (Eriksson, 1988)

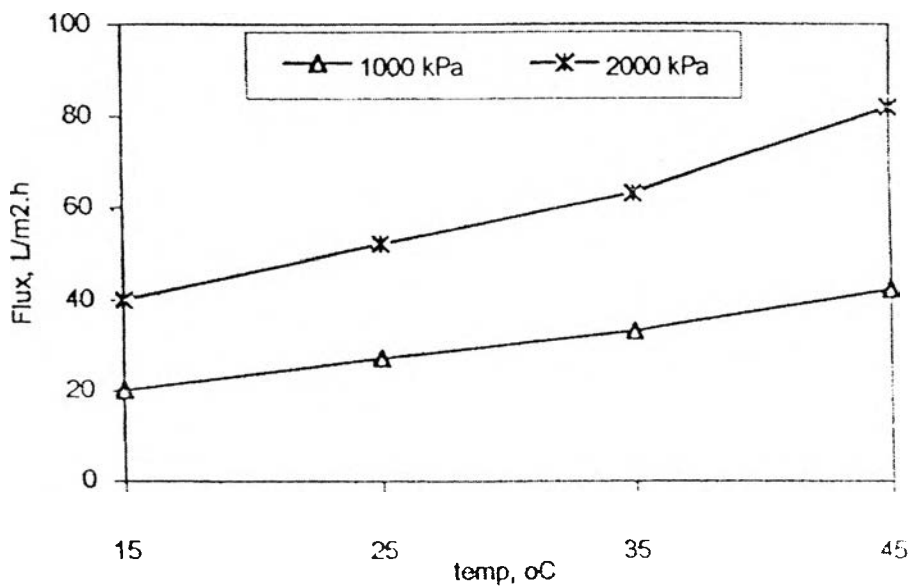
#### 2.2.4.5 ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ

ความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ ก็มีผลกับฟลักซ์ของสารละลาย และร้อยละของการกำจัด Duranceau และคณะ (1992) รายงานผลการทดลองโดยใช้ NF เมมเบรนชนิด NF70 ในการกำจัด Dibromochloropropane (DBCP) และได้ผลว่าค่าฟลักซ์ของสารละลายเพิ่มขึ้นตาม Concentration Gradient เช่นเดียวกับ Eriksson (1988a) ที่ได้รายงานผลการทดลองซึ่งแสดงให้เห็นว่าการกำจัดไฮเดียมคลอไรด์มีค่าลดลงตามการเพิ่มของความเข้มข้นของสารละลายที่เข้าสู่ระบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่าที่แรงดัน 2,000 kPa ร้อยละของการกำจัดไฮเดียมคลอไรด์ลดลงจาก 60 % เป็น 20% เมื่อความเข้มข้นของไฮเดียมคลอไรด์เพิ่มขึ้นจาก 2 g/L เป็น 40 g/L ปัจจัยที่มีผลเล็กน้อยกับ

การลดลงของร้อยละของการกำจัด คือ การลดลงของค่าฟลักซ์ แต่ปัจจัยที่มีผลมากเกิดขึ้นเนื่องจากความสามารถที่มากขึ้นของสารละลาย

#### 2.2.4.6 อุณหภูมิ

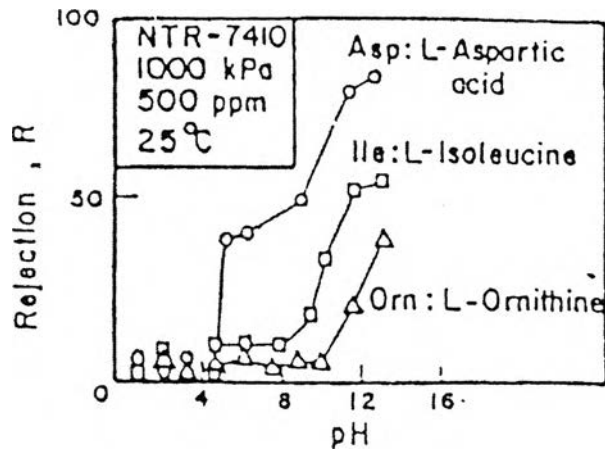
การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิของสารละลายที่เข้าสู่ระบบจะเพิ่มความสามารถในการซึมผ่านเมมเบรนของน้ำมาก ในขณะที่ร้อยละของการกำจัด มีค่าคงที่หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (Loconti และคณะ, 1972) Schirgh และ Widmer (1992) ทำการทดลองโดยใช้เมมเบรนชนิด DDS และได้ผลว่าฟลักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเหตุผลที่เป็นไปได้สำหรับกรณีนี้ก็คือที่อุณหภูมิสูงความหนืดของน้ำจะมีค่าลดลง ทำให้มันสามารถซึมผ่านเมมเบรนได้ง่ายขึ้น รูปที่ 2.16 แสดงผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์



รูปที่ 2.16 ผลของอุณหภูมิต่อค่าฟลักซ์ (Schirgh และ Widmer, 1992)

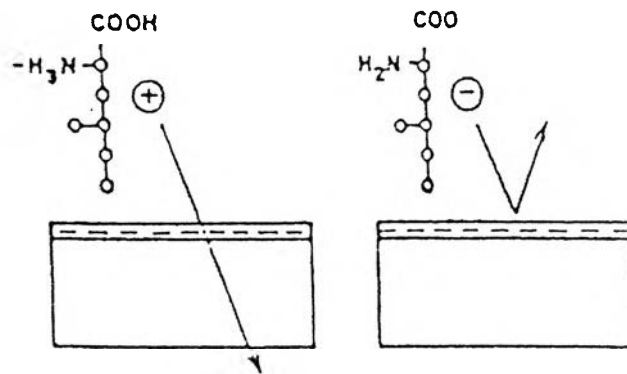
#### 2.2.4.7 พีเอช

พีเอชของสารละลายก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลกระทบอย่างมากต่อการทำงานของ NF เมมเบรน (รูปที่ 2.17)



รูปที่ 2.17 ผลของพีเอชกับร้อยละของการกำจัดของกรดอะมิโน โดย NF เมมเบรน (Rautenbach และ Groschl, 1990)

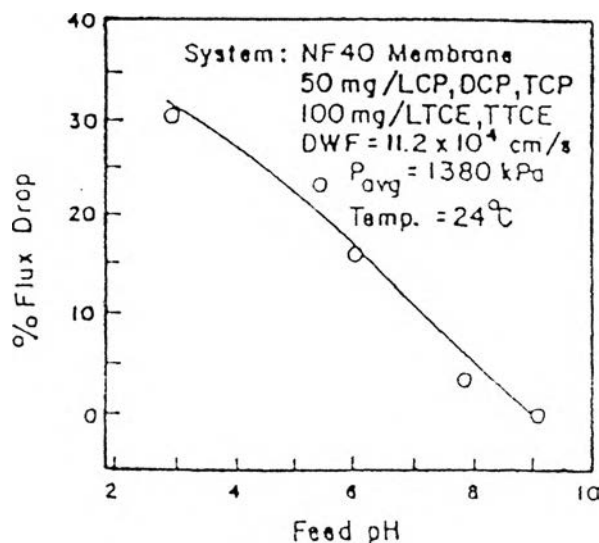
ที่ค่าพีเอชต่ำ ๆ ร้อยละของการกำจัดจะมีค่าต่ำ และที่ค่าพีเอชสูง ๆ ร้อยละของการกำจัดจะมีค่าสูง ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ค่าพีเอชที่ต่ำกว่า Isoelectric Point (คือค่าที่ประจุทั้งหมดเปลี่ยนจากบวกเป็นลบ หรือเปลี่ยนจากลบเป็นบวก) กรดอะมิโนจะเปลี่ยนเป็นประจุบวกและสามารถผ่านเมมเบรนได้ง่าย ทำให้ร้อยละของการกำจัดมีค่าต่ำ ในขณะที่เมื่อค่าพีเอชสูงกว่า Isoelectric Point กรดอะมิโนจะเปลี่ยนเป็นประจุลบ และจะถูกขับออกโดยประจุบนพื้นผิวหน้าของเมมเบรน (รูปที่ 2.18)



รูปที่ 2.18 พฤติกรรมของกรดอะมิโนที่จุดต่ำหรือสูงกว่า Isoelectric Point (Rautenbach และ Groschl, 1990)

และจากการทดลองบำบัดสารละลายที่เป็นส่วนผสมของสารอินทรีย์ โดยใช้กระบวนการ NF ได้ผลว่าค่าเปอร์เซ็นต์ของการลดลงของค่าฟลักซ์ (Flux Drop) มีค่าลดลงเมื่อพีเอชของ

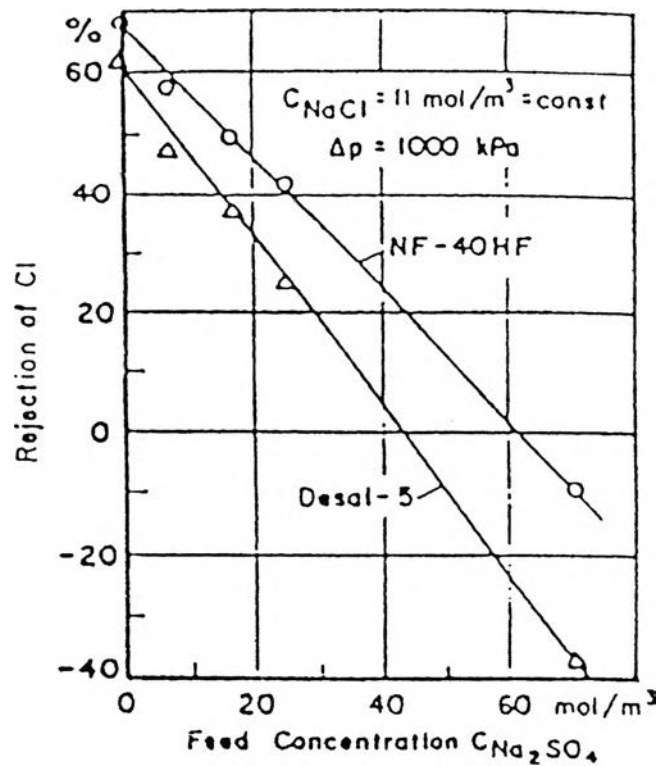
สารละลายเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.19) ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ที่ค่าพีเอชสูง ๆ สารอินทรีย์จะอยู่ในรูปไอออน และมีประจุลบ ดังนั้นจึงไม่ทำปฏิกิริยากับเมมเบรนมากนัก ทำให้ค่าการลดลงของฟลักซ์มีค่าน้อยลง



รูปที่ 2.19 ผลของพีเอชต่อการลดของฟลักซ์ สำหรับเมมเบรนชนิด NF 40 ในการบำบัด ส่วนผสมของสารอินทรีย์อันตราย (Bhattacharyya และ Williams, 1992a)

#### 2.2.4.8 สารอื่น ๆ ในน้ำ

ร้อยละของการกำจัดโดย NF เมมเบรน จะมีค่าลดลงถ้ามีสารอื่น ๆ อยู่ในน้ำ จากรูปที่ 2.20 จะเห็นได้ว่า ร้อยละของการกำจัดของไอออนคลอไรด์ มีค่าลดลงตามการเพิ่มของความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตในสารละลาย เนื่องจากซัลเฟตมีประจุมากกว่าคลอไรด์ เมมเบรนจึงสามารถกำจัดซัลเฟตได้ดีกว่าคลอไรด์ ส่วนโซเดียมมีประจุบวกทำให้สามารถผ่านเมมเบรนได้ง่าย ดังนั้นจึงเกิดความไม่สมดุลย์ทางไฟฟ้าขึ้นทั้งสองด้านของเมมเบรน และเพื่อรักษาความเป็นกลางทางไฟฟ้า คลอไรด์ จะไหลผ่านเมมเบรนด้วย ยิ่งความเข้มข้นของโซเดียมซัลเฟตมากก็ยิ่งทำให้เกิดความไม่สมดุลย์ทางไฟฟ้ามากขึ้น ทำให้มีปริมาณคลอไรด์ในน้ำ Permeate มากขึ้น ซึ่งปรากฏการณ์นี้เรียกว่า "Donnan Effect" ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.2.3.2

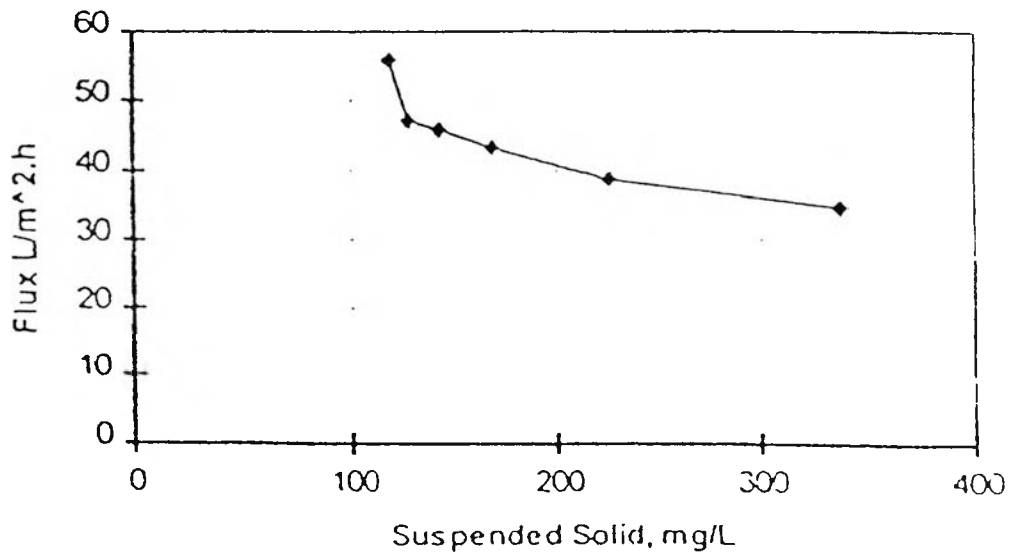


รูปที่ 2.20 ผลของสารอื่น ๆ ในน้ำต่อร้อยละของการกำจัด โดย NF เมมเบรน (Rautenbach และ Groschl, 1990)

#### 2.2.4.9 สารแขวนลอย

ขนาดอนุภาคของสารแขวนลอยมีบทบาทต่อการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรน เนื่องจากขนาดของมันเป็นตัวตัดสินว่า สารแขวนลอยนั้นจะผ่านเข้าสู่รูเมมเบรน หรือจะติดขวางอยู่ที่ทางเข้าของรูเมมเบรน ซึ่งในกรณีหลังจะมีผลกระทบต่ออัตราการอุดตันของเมมเบรน เช่นเดียวกับกรณีของคอลลอยด์ ขนาดและรูปร่างของโมเลกุลสารอินทรีย์ก็มีบทบาทสำคัญต่อการเคลื่อนที่ผ่านเมมเบรนเช่นเดียวกัน

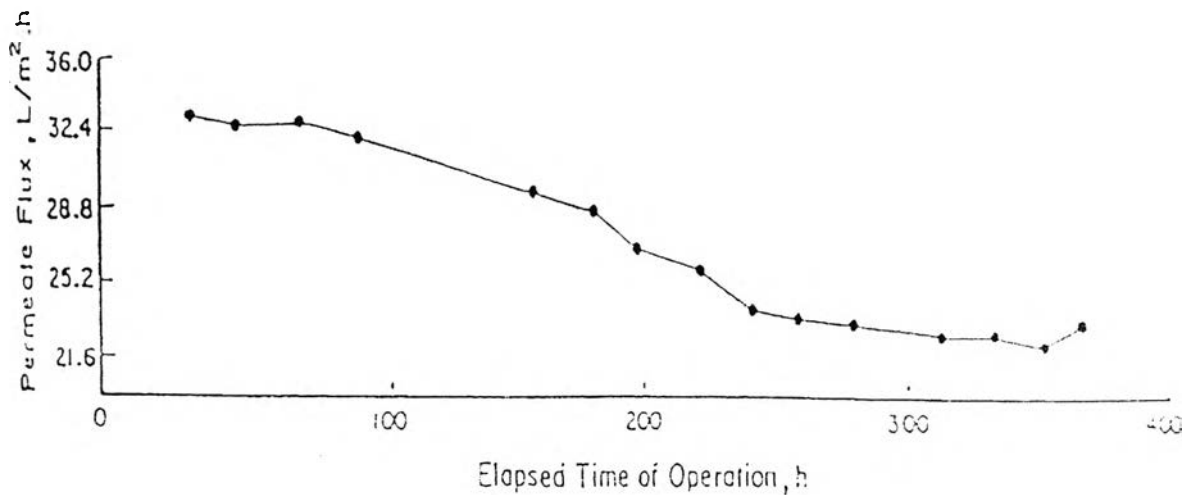
Koottatep (1979) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารแขวนลอยกับอัตราไหลของน้ำ Permeate ผ่านเมมเบรนแบบ T2A ผลในรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นว่าฟลักซ์มีค่าลดลงกับการเพิ่มความเข้มข้นของสารแขวนลอย การลดลงของฟลักซ์เนื่องมาจากการอุดตันของเมมเบรน



รูปที่ 2.21 ผลของสารแขวนลอยต่อค่าฟลักซ์ ในการกำจัดกรดฮิวมิก แรงดันที่ใช้ 20 บาร์  
MWCO 6000 (Kootatep, 1979)

#### 2.2.4.10 ระยะเวลาในการเดินระบบ

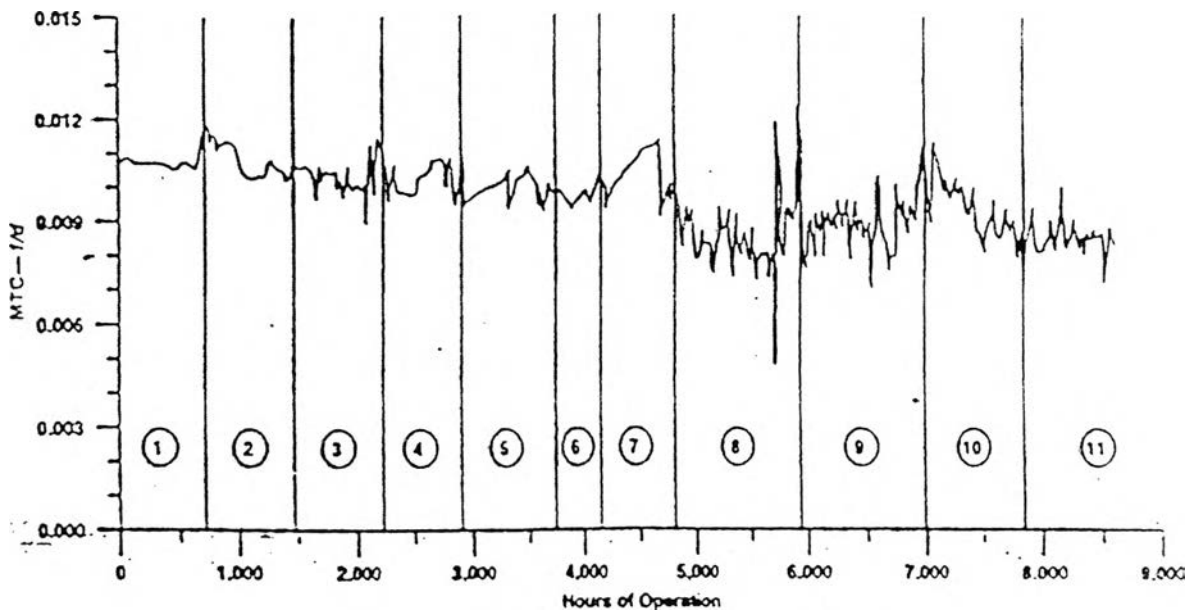
การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ กับเวลาในการดำเนินระบบ สำหรับ NF เมมเบรน ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของน้ำหรือน้ำเสียที่เข้าระบบ Taylor และคณะ (1987) ได้รายงานผลที่ได้จากการใช้เมมเบรนแบบ NF40 ในการบำบัดน้ำผิวดิน (รูปที่ 2.22)



รูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ กับเวลาในการดำเนินระบบ สำหรับ NF เมมเบรน Taylor และคณะ (1987)

การลดลงของค่าฟลักซ์เกิดขึ้นเนื่องจากการอุดตันของสารอินทรีย์ หรือการเติบโตของจุลชีพภายในเมมเบรน เพราะในน้ำผิวดินประกอบไปด้วยสารอินทรีย์ และการเติบโตของจุลชีพถูกเร่งให้เกิดในช่วงที่ไม่มีการทำงานของเมมเบรนเป็นเวลา 18 ชั่วโมง ระหว่างการทำงานในแต่ละวัน

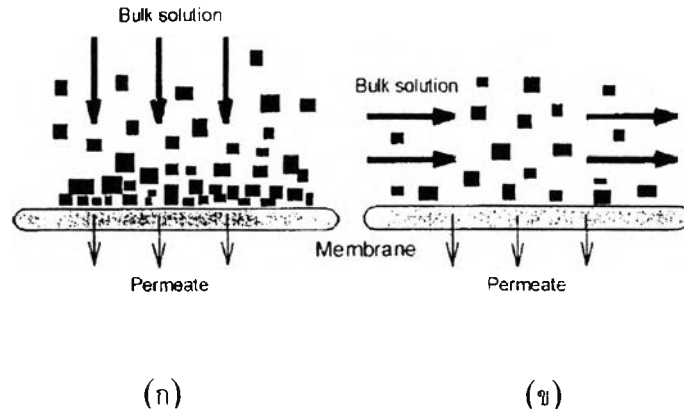
สัมประสิทธิ์การซึมผ่านของน้ำ ( $K_w$ ) ที่ลดลงตามเวลาเป็นผลมาจากการอุดตันและการเสื่อมสภาพของเมมเบรน จากรูปที่ 2.23 จะเห็นได้ว่าการลดลงของค่า  $K_w$  จะมีค่าคงที่ในช่วงเวลา 0 - 4,750 ชั่วโมง จากชั่วโมงที่ 4,750 - 5,750 ค่า  $K_w$  จะลดลงอย่างมากและรวดเร็ว แสดงให้เห็นถึงการเพิ่มการอุดตันของเมมเบรน หลังจากนั้นค่า  $K_w$  จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการทำความสะอาดเมมเบรน



รูปที่ 2.23 การเปลี่ยนแปลงของค่า  $K_w$  กับเวลาในการดำเนินระบบ (Blau และคณะ, 1992)

#### 2.2.4.11 Crossflow Velocity

กระบวนการกรองที่ใช้กับกระบวนการ NF เป็นกระบวนการที่เรียกว่า Crossflow Filtration ซึ่งแตกต่างจากกระบวนการกรองตามปกติที่ใช้ เช่นการกรองผ่านชั้นทราย ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 (ก) การกรองแบบทั่วไป และ (ข) Crossflow Filtration

วิธี Crossflow Filtration สารที่ถูกกำจัดออกโดยเมมเบรนจะไหลออกจากผิวหน้าของตัวเมมเบรนอย่างต่อเนื่อง ทำให้ไม่เกิดการสะสมตัวของสารเหล่านั้น ทำให้ลดปัญหาของการเกิด Concentration Polarization และทำให้ผิวหน้าของเมมเบรนพร้อมจะกำจัดสารต่าง ๆ ที่ไหลเข้ามาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ถึงแม้ว่ายังมีความต้องการทำความสะอาดเมมเบรนอีกเป็นระยะ ๆ แต่การทำความสะอาดด้วยตัวเองของ Crossflow Filtration ก็ทำให้อายุการใช้งานของเมมเบรนยาวนานขึ้น

ตัวแปรสำคัญที่จะทำให้ Crossflow Filtration ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ Crossflow Velocity โดยจะต้องมีค่ามากพอที่จะไม่ทำให้เกิดการสะสมของสารต่าง ๆ ที่ถูกกำจัดโดยเมมเบรน นอกจากนี้ค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมยังจำเป็นเพื่อให้เมมเบรนมีประสิทธิภาพในการแยกสารที่ไม่ต้องการออกได้อย่างเต็มที่ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับสารละลาย โดยค่า Crossflow Velocity ที่เหมาะสมนี้จะทำให้เกิดการผสมของสารละลายที่ Boundary Layer อย่างเพียงพอ และป้องกันการเกิด Concentration Polarization (Williamson และ Paulson, 1990)

Ratanatamskul และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาผลของ Crossflow Velocity ที่มีต่อประสิทธิภาพในการกำจัดอ็อกซิเจนประจุลบหลายชนิดในสารละลายเจือจาง และพบว่า Crossflow Velocity ในช่วง 0.05 - 0.7 m/s ไม่มีผลต่อการกำจัด  $\text{SO}_4^{2-}$  และ  $\text{PO}_4^{3-}$  ของเมมเบรนชนิด NTR - 729HF เนื่องจาก NF เมมเบรนสามารถกำจัดอ็อกซิเจนที่มีสองวาเลนซ์ได้ดี แต่ในการกำจัดอ็อกซิเจนที่มีหนึ่งวาเลนซ์ เช่น  $\text{Cl}^-$  และ  $\text{NO}_3^-$  มีค่าลดลงเล็กน้อย เมื่อค่า Crossflow Velocity มีค่าไม่เพียงพอ แต่สำหรับเมมเบรนชนิด NTR - 759HR ผลของ Crossflow Velocity จะมีน้อยมากสำหรับทุกชนิดของอ็อกซิเจน เนื่องจากเมมเบรนชนิดนี้มีความหนาแน่นของประจุที่ผิวเมมเบรนสูงมาก



#### 2.2.4.12 เปอร์เซนต์ Recovery

เป้าหมายที่สำคัญของกระบวนการเมมเบรนทุกชนิด คือ ประสิทธิภาพที่สูงในการกำจัดสารที่ไม่ต้องการออก โดยมีปริมาณการผลิตน้ำ Permeate ที่มากที่สุด ซึ่งวิธีหนึ่งที่สามารถทำให้ผลิตน้ำ Permeate ได้มากก็คือ การใช้ค่า % Recovery ที่ในการดำเนินระบบสูง

Hanra และคณะ ได้ทำการทดลองโดยใช้ Rapid Bench-Scale Membrane Test (RBSMT) เพื่อประเมินความสามารถในการใช้กระบวนการ NF ในการกำจัด NOM และโบรไมด์ จากแหล่งน้ำผิวดิน 2 แหล่งในประเทศสหรัฐอเมริกา โดยใช้เมมเบรนที่มีคุณสมบัติแตกต่างกัน 6 ชนิดที่ค่า % Recovery ต่าง ๆ กัน และพบว่าสำหรับเมมเบรนชนิด NF 70 และ NTR 7450 ค่า Bulk Rejections,  $R_b$  ซึ่งคำนวณจาก  $R_b = ((C_f - C_p) / C_f)$  เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Feed Rejection,  $R_f$  ซึ่งคำนวณจาก  $R_f = ((C_f - C_p) / C_f)$  มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มค่า % Recovery โดยที่  $C_f$ ,  $C_f$  และ  $C_p$  คือ ความเข้มข้นของ Influent , Feed และ Permeate ตามลำดับ และยังพบว่า  $R_b$  มีค่าสูงกว่า  $R_f$  นอกจากนี้ยังพบว่า % Recovery มีผลต่อ  $R_b$  น้อยกว่า  $R_f$  โดย % Recovery มีผลกระทบต่อเมมเบรนที่มีค่า MWCO ต่ำ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบ มีผลอย่างมากต่อการกำจัด NOM โดยเฉพาะเมมเบรนที่มีค่า MWCO สูง ๆ

### 2.3 อุตสาหกรรมฟอกย้อม

#### 2.3.1 กระบวนการฟอกย้อม

กระบวนการฟอกย้อมเป็นกระบวนการหนึ่งที่มีความสำคัญในอุตสาหกรรมสิ่งทอ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ปรับเปลี่ยนเส้นใย โดยการใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมและอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง ดังนั้นกระบวนการฟอกย้อมจึงเป็นกระบวนการที่ใช้น้ำมาก และมีการใช้สารเคมีที่หลากหลาย เป็นกระบวนการที่สร้างของเสียในปริมาณมาก กระบวนการฟอกย้อมจะประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการ ได้แก่

### 2.3.1.1 การเตรียมผ้า (Preparation)

กระบวนการเตรียมนับว่าเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญมากต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่จะผลิตได้จากการฟอกย้อมและตกแต่งสำเร็จ ทั้งนี้เพราะขั้นตอนนี้เป็นการนำเส้นด้ายหรือผ้าดิบออกจากโรงปั่นหรือทอ มาผ่านกระบวนการต่าง ๆ เพื่อเตรียมเส้นด้ายหรือผ้านั้นให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปย้อมสีหรือตกแต่งสำเร็จได้เป็นอย่างดี จุดประสงค์ของขั้นตอนการเตรียมผ้า คือ เพื่อขจัดสิ่งสกปรกเจือปนเส้นใย ทำให้เส้นใยสะอาด ดูดติดสีย้อมและสารเคมีต่าง ๆ ได้ดี ทำให้เส้นใยมีการดูดน้ำได้ดี เพื่อให้กระบวนการย้อม พิมพ์ และตกแต่งสำเร็จทำได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และเพื่อให้เส้นใยมีความคงรูป ไม่เสียรูปไปในขณะผ่านกระบวนการอื่น ๆ ที่ตามมา เป็นต้น กระบวนการเตรียมสิ่งทอหลาย ๆ กระบวนการที่สำคัญได้แก่

1) การเผาขน (Singeing) เพื่อทำให้ผิวผ้าเรียบ เป็นมันเงาขึ้น มีความจำเป็นสำหรับผ้าที่จะนำไปชุบมัน อัดรีดหรือขัดมัน ผ้าพิมพ์ที่ต้องการความละเอียดสูง นอกจากนี้ยังลดปัญหาการเกิดขุยบนผ้าของผ้าใยสังเคราะห์ เมื่อใช้ไปนาน วิธีการที่ใช้ทั่วไปคือการผ่านผ้าเข้าไปในเปลวแก๊ส หรือบนแผ่นโลหะที่ถูกเผาจนร้อน ด้วยอัตราเร็วที่สูงพอที่จะไม่ทำให้ผ้าติดไฟ

2) การลอกแป้ง (Desizing) เป็นการลอกแป้ง ที่ได้มีการลงไว้ในขั้นตอนการทอ ซึ่งแป้งนี้จะต้องกำจัดออกก่อนเข้าสู่ขั้นตอนย้อมสี เพราะถ้าล้างแป้งออกไม่หมดจะมีผลต่อการดูดซึมสารเคมีและน้ำของเส้นใย และยังทำให้ผ้ามีความแข็งกระด้าง

3) การขจัดสิ่งสกปรก (Scouring) ได้แก่การกำจัดไขมัน และสารปนเปื้อนต่าง ๆ เช่น สารประกอบพวกเกลือทั้งอินทรีย์และอนินทรีย์ ซึ่งจะมีผลกับการดูดซึมน้ำและดูดติดสีของผ้าหรือเส้นใย การขจัดสิ่งสกปรกของผ้าแต่ละประเภทก็จะแตกต่างกันไป สารเคมีที่ใช้ เช่น โซดาไฟ น้ำสบู่ สารจับโลหะประเภทสารคีเลต เป็นต้น

4) การฟอกขาว (Bleaching) เป็นการกำจัดสารมีสีในธรรมชาติที่ติดมากับวัสดุสิ่งทอ โดยใช้ปฏิกิริยาเคมีทำให้เส้นใยมีความขาวขึ้น ซึ่งเป็นขั้นตอนที่จำเป็นโดยเฉพาะกับผ้าที่จะนำไปทำเป็นผ้าขาว และผ้าที่จะนำไปย้อมสีอ่อน ผ้าที่จะนำไปย้อมสีเข้มไม่จำเป็นต้องผ่านขั้นตอนนี้ สารที่ใช้ฟอกขาวมีหลายชนิดแบ่งเป็นสารออกซิไดส์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) โซเดียมไฮโปคลอไรด์ ( $NaClO$ ) และสารรีดิวซ์ เช่น โซเดียมไฮไดรซัลไฟท์ ( $Na_2S_2O_4$ ) โซเดียมเมทาไบซัลไฟท์ ( $Na_2S_2O_5$ )

5) การชุบมัน (Mercerization) เพื่อเพิ่มและปรับปรุงความสามารถในการดูดติดสี เพิ่มความสดใส เงามัน มีผิวสัมผัสที่อ่อนนุ่ม และมีความคงทนแข็งแรงเป็นต้น ประเภทของการชุบมันแบ่งตามสารเคมีที่ใช้ได้ 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ การชุบมันด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และการชุบมันด้วยแอมโมเนียมเหลว

### 2.3.1.2 การย้อมสี (Textile Dyeing)

วัสดุสิ่งทอส่วนใหญ่ต้องมีการให้สีก่อนนำไปใช้งาน ด้วยวิธีการย้อม (Dyeing) จะให้สีพื้น ผ้าผืนหรือเส้นด้ายที่มีลักษณะแตกต่างกันไป หลักการย้อมสีคือ การใช้วิธีการที่เหมาะสมให้สารประกอบเคมีที่ละลายเป็นสารละลายหรือกระจายอยู่ในสารละลาย (Dispersion) ไปทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อม (Substrates) เส้นใย ผ้า เป็นต้น แล้วทำให้เกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมอย่างถาวร การเกิดสีบนวัสดุที่จะย้อมไม่เพียงแต่เกิดบนผิวหน้าเท่านั้น แต่จะสามารถซึมให้เกิดสีตลอด (Uniformly) บนผิวรอบภาคตัดขวางของวัสดุที่จะย้อมด้วย

ขั้นตอนการย้อม (Dyeing Process) มีวิธีการดังนี้คือ ผ่าดิบที่ผ่านการเตรียมและทำความสะอาดแล้วจะนำไปย้อมให้สีย้อมติดบนเส้นใยของผ้าด้วยเครื่องย้อม (Dyeing Machine) กลไกของการดูดซึมสีย้อมและเกาะติดแน่นบนเส้นใยของผ้าจะมีความซับซ้อนมาก แต่โดยหลักการทั่วไปแล้วสีย้อมจะต้องทำให้อยู่ในรูปของสารละลาย แล้วให้มีการดูดซึมสารละลายสีย้อมโดยเส้นใยในอ่างย้อม (Dyeing Bath) แรงที่ทำให้เกิดการดูดซึมและเกาะติดบนเส้นใยของโมเลกุลของสีย้อมอาจเป็นแรงทางเคมี เช่น แรงโควาเลนต์ แรงไอออนิก หรือแรงดึงดูดทางกายภาพ เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ ดังนั้นปัจจัยทางด้านระยะเวลาในการย้อม อุณหภูมิ pH และสารเคมีช่วยย้อมต่าง ๆ เช่น สาร Electrolytes สารพวก Solvents สารพวก Surface Active Agents จะมีผลต่อประสิทธิภาพและความสม่ำเสมอของสีย้อมที่จะติดอยู่บนเส้นใย ในทางปฏิบัติจึงจำเป็นต้องให้สารละลายของสีย้อมเคลือบหุ้มตลอดทั้งผิวหน้าของวัสดุที่จะย้อม ซึ่งเป็นหลักการพื้นฐานของเครื่องย้อมทุกชนิด และเพื่อให้การย้อมใช้เวลาน้อยลง การเพิ่มอัตราการแพร่กระจาย (Diffusion) ของโมเลกุลของสีย้อมไปยังเส้นใยสามารถทำได้โดยการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมให้สูงขึ้น ซึ่งการเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายสีย้อมจะมีผลทำให้การแพร่กระจายของสีย้อมบนผิวหน้าเส้นใยมีความสม่ำเสมอมากขึ้นด้วย นอกจากนี้ในกรณีของเส้นใยที่เป็น Hydrophobic Synthetic Fibers จะสามารถเพิ่มอัตราการแพร่กระจายของสีย้อมโดยใช้สารนำพา (Carriers) พวกสารอินทรีย์ช่วยย้อมต่าง ๆ หรือเพิ่มอุณหภูมิให้สูงยิ่งขึ้น โดยเครื่องย้อมระบบปิด (Closed Dyeing System) ที่สามารถย้อมสีได้ที่อุณหภูมิสูงถึง 150 องศาเซลเซียส

กรรมวิธีในการย้อมนั้นมียุหลายวิธี ทั้งที่เป็นแบบต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง ขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่จะย้อม สภาพโรงงาน เทคโนโลยีที่มี และงบประมาณ ซึ่งแบ่งออกกว้าง ๆ ได้ 3 วิธีคือ

1) การย้อมแบบดูดซึม (Exhaust Method) วิธีนี้ผ้าหรือวัสดุที่ย้อมจะถูกแช่อยู่ในอ่างย้อม จนกระทั่งการย้อมเสร็จสมบูรณ์ (Batchwise Process)

2) การย้อมด้วยวิธีกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Method) หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Pad-Batch Dyeing ประกอบด้วยขั้นตอนของการอัดน้ำสีและล้าง การม้วนเก็บ และการซัก

3) การย้อมด้วยวิธีต่อเนื่อง (Continuous Method) วิธีนี้ผ้าจะเคลื่อนที่ไปตามขั้นตอนการย้อมต่าง ๆ อย่างต่อเนื่อง โดยไม่มีการหยุดแช่อยู่ที่จุดหนึ่งจุดใด ตั้งแต่เป็นผ้าขาวจนกระทั่งออกมาเป็นผ้าย้อมสำเร็จ วิธีนี้จึงเป็นวิธีที่เร็วที่สุดและเหมาะกับการย้อมทีละมาก ๆ ประกอบด้วยขั้นตอน การอัดน้ำสีและล้าง การอบแห้ง การฟีนิกซ์โดยใช้ไอน้ำหรือความดัน และการซัก

### 2.3.1.3 การตกแต่งสำเร็จ (Textile Finishing)

การตกแต่งสำเร็จเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการตกแต่งสิ่งทอ ซึ่งมักกระทำเป็นขั้นตอนสุดท้ายต่อการเตรียมและการให้สีสิ่งทอ เพื่อที่จะเปลี่ยนแปลงปรับปรุง หรือเพิ่มเติมคุณสมบัติบางอย่างให้กับผลิตภัณฑ์ สามารถจำแนกประเภทของการตกแต่งสำเร็จเป็น 2 ประเภท ได้แก่

- 1) การจำแนกตามกรรมวิธีการตกแต่ง ได้แก่
  - การตกแต่งด้วยวิธีทางเชิงกล (Mechanical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอ โดยการใช้เครื่องจักรในการผลิต
  - การตกแต่งสำเร็จด้วยสารเคมี (Chemical Finishing) เป็นการตกแต่งสิ่งทอ ด้วยสารเคมีจากธรรมชาติ หรือสารที่สังเคราะห์ขึ้นมา
- 2) การจำแนกตามวัตถุประสงค์ของการตกแต่ง เช่น
  - ประโยชน์การใช้งาน เช่นตกแต่งให้ผ้าแข็ง (Stiffening Finishing) การตกแต่งให้ผ้านุ่ม (Soft Finishing) การตกแต่งให้ผ้าคุณสมบัติการคืนตัวต่อรอยยับ และการตกแต่งเพื่อสร้างความอบอุ่นกับร่างกาย เป็นต้น

- การบำรุงรักษาให้ใช้ได้ดี และสวยงามตลอด (Protection Finishing) เช่นผ้า ตกแต่ง จำพวกผ้าปูม่าน ผ้าคลุมเตียง เป็นต้น หรือการตกแต่งเพื่อให้ซักล้างสิ่งสกปรกออกได้ง่าย

### 3) การจำแนกตามความปลอดภัยในการใช้งาน เช่น

- การตกแต่งผ้าเพื่อไม่ให้ติดไฟง่าย (Fire Retardant)
- การตกแต่งผ้าเพื่อป้องกันแบคทีเรียและเชื้อรา (Bacteria & Funji Resistant)
- การตกแต่งผ้าเพื่อสุขภาพอนามัยตามเกณฑ์ของแต่ละประเทศ

### 4) จำแนกตามการตกแต่งเพื่อความสวยงาม หรือเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพของผ้า เช่น

- การตกแต่งผ้าเพื่อให้มีความเงามัน (Calendering)
- การตกแต่งผ้าเพื่อควบคุมการหดตัว (Shrinkage)
- การตกแต่งผ้าด้วยกระบวนการตะกรูยขน (Raising)
- การตกแต่งผ้าด้วยกระบวนการตัดขน (Shearing)

## 2.3.2 สีย้อม (dye)

### 2.3.2.1 ลักษณะโดยทั่วไปของสีย้อม

สีย้อมเป็นสารเคมีที่สำคัญสำหรับการฟอกย้อม โดยจะทำหน้าที่ให้สีติดไปกับผ้าหรือด้ายที่นำมาย้อม โดยคุณสมบัติของสีที่จะติดผ้าชนิดต่างๆ นั้น ต้องติดคงทน, ทนต่อแสงแดด, น้ำ, สบู่ และน้ำยาซักแห้ง ดังนั้นเมื่อสีย้อมส่วนที่ไม่ได้ติดไปกับเนื้อผ้าก็จะปนไปกับน้ำทิ้ง ซึ่งจะกลายเป็นน้ำเสียที่ยากแก่การบำบัด เพราะจะมีโครงสร้างที่ซับซ้อน

การเกิดสีของสีย้อมเกิดจากการเรียงตัวของกลุ่มอะตอมประเภทหนึ่งภายในโมเลกุลของสีย้อมกลุ่มอะตอมนี้เรียกว่า โครโมเจน (chromogen) เป็นตัวรับอิเล็กตรอนและส่วนที่ทำหน้าที่เกี่ยวกับการละลายและลักษณะที่เกี่ยวกับการย้อมเรียกว่า ออกโซโครม (auxochromes) เป็นตัวให้อิเล็กตรอน โครโมเจนเป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยอะโรมาติก ซึ่งประกอบด้วยส่วนที่ทำให้เกิดสีเรียกว่า โครโมฟอร์ (chromophores)

โครโมฟอร์ทำให้เกิดสีได้โดยการเปลี่ยนแปลงช่วงการดูดกลืนแสงให้อยู่ในช่วงสเปกตรัมที่สามารถมองเห็นได้ ซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 7 กลุ่มคือ (Austin, 1984)

- กลุ่มไนโตรโซ (nitroso group)
- กลุ่มไนโตร (nitro group)
- กลุ่มเอโซ (azo group)
- กลุ่มเอทิลีน (ethylene group)
- กลุ่มคาร์บอนิล (carbonyl group)
- กลุ่มคาร์บอนิล-ไนโตรเจน (carbon-nitrogen groups)

สีย้อมมีมากมายหลายชนิดการนำสีย้อมมาใช้ย้อมให้ได้ผลดี ขึ้นอยู่กับอำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ การเกิดสภาวะนี้เมื่อโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดเรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดติด (substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดบอนด์ (bond) ยึดกันแน่น อิทธิพลที่ทำให้สีดูดติดกับเส้นใยได้ คือ

- ไฮโดรเจนบอนด์ (hydrogen bond)
- แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van Der Waal's forces)
- แรงไอออน (Ionic forces)
- โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond)

การดูดติดกันระหว่างโมเลกุลของสีย้อมกับโมเลกุลของเส้นใย อย่างน้อยจะต้องประกอบไปด้วยแรง 2 ชนิดขึ้นไป บางครั้งก็อาจจะเกิดแรงทั้ง 4 ชนิดผสมผสานกัน แรงดึงดูดทางเคมีที่จะทำให้การยึดติดได้ดีที่สุด ได้แก่ โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond) นอกจากอิทธิพลของแรงทั้ง 4 แล้ว อิทธิพลของรูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสีก็มีผลต่อการยึดติดหรือมีผลกระทบต่อการใช้ย้อมอย่างมากด้วย เช่น ถ้าโมเลกุลของสีย้อมยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้นทำให้การติดสีดีขึ้นหรือถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีลักษณะแบนและมีความกว้าง ความยาวมากๆ จะทำให้เกิดการติดสีมีความทนสูงมากขึ้น

สรุปได้ว่า การที่โมเลกุลของสีย้อมยึดเกาะกับโมเลกุลของเส้นใยเป็นผลเนื่องจากแรงทางเคมีและฟิสิกส์โดยมีสารบางอย่างเข้าช่วยเหลือเพื่อที่จะทำให้โมเลกุลของสีย้อมและโมเลกุลของเส้นใยเกิดปฏิกิริยาระหว่างกันได้ดีขึ้น สารบางอย่างนี้คือ สารช่วยย้อม

### 2.3.2.2 สารช่วยย้อม

สารช่วยย้อม คือ สารเคมีที่ใส่ลงไปในกระบวนการย้อมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดติดสีได้มากขึ้นทำให้สีที่ติดเส้นใยมีความคงทนและสม่ำเสมอสารช่วยย้อมแบ่งออกเป็น 7 ประเภท คือ

- กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอน เมื่อใช้สีย้อมแอซิด
- ด่าง ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยสีย้อมอะโซอิก สีย้อมเว็ต และสีย้อมกำมะถัน
- เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยสีย้อมอสิค และการย้อมเส้นใยเซลลูโลสทุกชนิด
- สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ ใช้กับสีเว็ต, ดิสเพอร์สและสีย้อมแอซิดบางชนิด
- สารนำ (carrier) ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารละลายอินทรีย์ ใช้เมื่อย้อมขนสัตว์และใยสังเคราะห์บางชนิด
- สารรีดิวซิ่ง ใช้สำหรับรีดิวซ์ตัวสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูดซึมเข้าไปในเส้นใย

สารช่วยย้อมแต่ละประเภทยังแบ่งออกเป็นสารเคมีชนิดต่าง ๆ มากมาย ดังนั้นสีย้อมแต่ละชนิดย่อมมีสารช่วยย้อมแตกต่างกันไป เป็นผลทำให้น้ำเสียจากกระบวนการย้อมแตกต่างกันไปด้วย (นวลละออ เนียมละอิ่ง, 2526 อ้างโดย นริษฐา 2541)

### 2.3.2.3 การจำแนกสีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในโรงงานทอผ้ามีมากมายหลายชนิดตามชนิดของเส้นใยหรือผ้าที่จะนำไปย้อมสีย้อมอาจจำแนกออกได้หลายประเภทตามลักษณะทางกายภาพโดยแบ่งออกเป็นสารสีที่ละลายน้ำได้และสารสีที่ไม่ละลายน้ำ หรือจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี ซึ่งวิธีนี้ยุ่งยากเพราะต้องอาศัยความรู้ทางด้านเคมีและสูตรโครงสร้างของสีด้วยวิธีจำแนกสีย้อมที่ได้รับความนิยมและเข้าใจง่าย ได้แก่ การจำแนกสีย้อมตามการนำไปใช้งาน ซึ่งแบ่งสีย้อมทั้งหมดออกเป็น 11 ประเภท (วุฒิ วิพันธ์พงษ์ . 2539 อ้างโดย นริษฐา 2541 ด้วยกันคือ

- สีย้อมดิสเพอร์ส (disperse dyes)
- สีย้อมแอซิด (acid dyes)
- สีย้อมอะโซอิก (azoic dyes)
- สีย้อมเบสิค (basic dyes)
- สีย้อมไดเรกท์ (direct dyes)

- สีย้อมมอดแดนท์ (modant dyes)
- สีย้อมซัลเฟอร์ (sulfur dyes)
- สีย้อมแว็ต (vat dyes)
- สีย้อมรีแอคทีฟ (reactive dyes)
- สีย้อมโลหะ (metallic dyes)
- สีย้อมโอเนียม (onium dyes)

#### 2.3.2.4 ชนิดของสีย้อมที่สำคัญ

##### 1) สีย้อมรีแอคทีฟ

สีย้อมรีแอคทีฟเป็นสีย้อมที่นิยมใช้ที่สุดชนิดหนึ่ง โดยเริ่มมีการใช้ตั้งแต่ปี 1950's ใช้ย้อมกับเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายน้ำได้ดีมีคุณสมบัติเป็นแอนไอออน เมื่ออยู่ในน้ำย้อมที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับหมู่ OH<sup>-</sup> ในเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดยโควาเลนต์บอนด์ เพื่อสร้างเป็น cross linked compound กลายเป็นสารประกอบเคมีชนิดใหม่กับเซลลูโลส สมบัติการละลายและดูดติดเส้นใยของตัวสีจะทำให้ตัวสีเข้าไปอยู่ภายในเส้นใยได้โดยสีย้อมรีแอคทีฟประกอบด้วยโครงสร้างพื้นฐาน 2 ส่วน คือ

- สารที่ทำให้เกิดสี (colouring substance) หรือกลุ่มของสารเคมีที่ทำให้เกิดสี (chromophore)
- ส่วนประกอบของไฮดรอกซิล หรือ อะมิโนในโมเลกุลของสี (reactive component)

##### 2) สีย้อมไดเรกต์

สีย้อมไดเรกต์ หรือสีย้อม โดยตรงที่ได้ชื่อแบบนี้เพราะสามารถย้อมพวกฝ้าย หรือเส้นใยพวกเซลลูโลสได้โดยลักษณะของสีย้อมนี้คือ จะละลายน้ำได้แม้จะอยู่ในเส้นใยก็ตาม จึงทำให้สีจางลงได้ง่ายเมื่อผ่านการฟอกหรือซักแห้ง



### 3) สีย้อมแควีต

สีย้อมแควีต ปกติจะไม่ละลายน้ำดังนั้นต้องเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้ก่อนจึงจะย้อมได้ และทำให้กลายเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ และทำปฏิกิริยาออกซิเดชันบนเส้นใยสีย้อมประเภทละลายน้ำได้ก่อนจึงจะย้อมได้และทำให้กลายเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำและทำปฏิกิริยาออกซิเดชันบนเส้นใยสีย้อมประเภทนี้ใช้ย้อมเส้นใยพวกเซลลูโลสโดยเฉพาะฝ้ายส่วนประกอบทางเคมีของสีย้อมประเภทนี้แบ่งเป็น 2 หมู่ ได้แก่ พวกอินดิโก (Indico) และพวกแอนทราควิโนน (antraquinone)

### 4) สีย้อมซัลเฟอร์

สีย้อมซัลเฟอร์เป็นสีย้อมที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสได้ดีที่สุด ละลายน้ำได้ดีมาก เมื่ออยู่บนสภาวะที่เป็นด่าง โมเลกุลของสีจะทำปฏิกิริยากับเซลลูโลสและเชื่อมโยงติดกันโดยโควาเลนต์บอนด์

### 5) สีย้อมอะโซอิก

สีย้อมประเภทนี้นิยมใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส ตัวสีเป็นสารประกอบเอโซ สีย้อมอะโซอิกเป็นสีย้อมที่เกิดขึ้นในเส้นใยด้วยตัวเอง โดยปฏิกิริยาทางเคมีที่เรียกว่าปฏิกิริยาคัปปลิง (coupling reaction)

### 6) สีย้อมแอซิด

สีย้อมประเภทนี้นิยมใช้ย้อมเส้นใยพวกโปรตีน ขนสัตว์ ในสภาวะที่เป็นกรดเจือจาง อาจย้อมพวกฝ้ายได้เล็กน้อย มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี ส่วนใหญ่เป็นสารประกอบของกรดกำมะถัน, และกลุ่มเอโซ (azo), แอนทราควิโนน (antraquinone)

### 7) สีย้อมเบสิค

เป็นสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกของเกลือแอมโมเนียม หรือออกซิเนียมใช้ย้อมขนสัตว์และเส้นใยชนิดอื่นๆ ที่เตรียมให้มีประจุลบในสภาวะเป็นกรด มีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดี

### 2.3.3 น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม

น้ำเสียจากการฟอกย้อมมีแหล่งกำเนิดในเกือบทุกขั้นตอนของการฟอกย้อม ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมผ้า ขั้นตอนการให้สีและขั้นตอนการตกแต่งสำเร็จ โดยเฉพาะในกระบวนการชำระล้างทำความสะอาดของแต่ละขั้นตอนจะมีการใช้น้ำในอัตราที่สูงมาก ซึ่งสิ่งที่สามารถพบได้ในน้ำเสียเสมอ ได้แก่ เศษเส้นใย เศษผ้า สารเคมี กรดด่าง ไขมัน สบู่ สีย้อม และตัวทำละลาย ดังนั้นจึงทำให้ปริมาณสารมลพิษในน้ำเสียมีปริมาณสูงและเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อม

สภาพการเกิดและการระบายน้ำเสียจะเริ่มจากอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดที่ถ่ายน้ำเสียลงในรางระบายน้ำภายในโรงงาน หลังจากนั้นน้ำเสียจะไหลเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานก่อนระบายทิ้งออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะต่อไป

#### 2.3.3.1 แหล่งกำเนิดของน้ำเสียในกระบวนการฟอกย้อม

##### 1) น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ได้แก่ น้ำที่ใช้ในการดำเนินการฟอกย้อม น้ำที่ใช้ในส่วนนี้อาจมีการระเหยไปบ้างในระหว่างขั้นตอนการผลิต แต่ส่วนใหญ่จะถูกปล่อยออกมาเป็นน้ำเสียภายหลังการผลิต น้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิตนี้ ยังอาจแบ่งได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ ๆ คือ

- น้ำที่ใช้ในขั้นตอนการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้มีปริมาณไม่มากนัก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างสูง
- น้ำที่ใช้ในการซักล้างภายหลังการฟอกย้อม น้ำในส่วนนี้จะมีปริมาณมาก แต่มีความเข้มข้นของสิ่งสกปรกเจือปนโดยรวมแล้วต่ำกว่าในประเภทแรก

##### 2) น้ำที่ใช้ในหม้อน้ำ

ในกระบวนการฟอกย้อม มักจะมีการอาศัยไอน้ำเป็นตัวให้ความร้อนแก่น้ำที่ใช้ในกระบวนการและเป็นตัวให้ความร้อนในตู้อบไอน้ำ ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกปล่อยให้เย็นลงและกลั่นตัวในท่อไอน้ำก็จะได้น้ำที่สะอาดสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่ถ้าไอน้ำที่ใช้ถูกส่งไปให้ความร้อนแก่สารละลายสีย้อมโดยตรง ก็จะเป็นการเพิ่มปริมาตรของสารละลายสีย้อม และจะถูกรวมเป็นน้ำเสีย

### 3) น้ำที่ใช้ในการหล่อเย็น

ในกระบวนการพอกย้อม มีบ่อยครั้งที่ทางโรงงานจำเป็นต้องลดอุณหภูมิของสารละลาย สีย้อมลงในเวลาอันสั้น ซึ่งจะทำให้ได้ก็โดยอาศัยการใช้น้ำหล่อเย็น น้ำหล่อเย็นนี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำ สะอาดและสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ได้

### 4) น้ำที่ใช้ในการล้างเครื่องจักรและทำความสะอาดโรงงาน

น้ำส่วนนี้นับเป็นส่วนประกอบที่สำคัญส่วนหนึ่งของน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม พอกย้อม และในบางกรณีเป็นน้ำเสียที่มีความสกปรกสูงมากด้วย เช่น น้ำล้างถังเตรียมสีย้อม เป็นต้น

### 5) น้ำจากแหล่งอื่น ๆ

นอกจากน้ำเสียจากแหล่งต่าง ๆ ดังกล่าวข้างต้นแล้ว โรงงานอุตสาหกรรมพอกย้อมยัง อาจจะมีน้ำเสียจากแหล่งอื่น ๆ อีก เช่น น้ำใช้ของคนงาน หรือน้ำฝน เป็นต้น

#### 2.3.3.2 ประเภทของสิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการพอกย้อม

สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมพอกย้อมนั้น มีทั้งสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ ตัวอย่าง ของสารอนินทรีย์เช่น ด่างและกรดอนินทรีย์ ได้แก่ โซเดียมซิลิเกต ( $\text{Na}_2\text{OSiO}_2$ ) แอมโมเนียซัลเฟต ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) โซเดียมซัลไฟด์ ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) โซเดียมคลอไรด์ ( $\text{NaCl}$ ) โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) และสารฟอก ขาวธรรมชาติ ส่วนสารอินทรีย์นั้นมีการใช้กันอย่างกว้างขวาง ซึ่งประกอบด้วยกรดอินทรีย์ เช่น กรดฟอร์มิก ( $\text{HCOOH}$ ) กรดอะซิติก ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) กรดไขมัน พวกสบู่ แป้ง สารอินทรีย์ที่ใช้แทนแป้ง ผงซักฟอก สารที่ทำให้เกิดความอ่อนนุ่ม สีย้อม สารนำพา และสารเคมีอื่น ๆ อีก เช่น สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ ซึ่งล้วนแต่นำมาใช้ให้เป็นประโยชน์ต่อผ้ระหว่างกระบวนการตกแต่งสำเร็จ ทั้งสิ้น

สารเคมีบางตัวอาจมีค่าบีโอดีสูง ซึ่งในขณะเดียวกันสารเคมีอื่น ๆ ที่มีค่าบีโอดีต่ำและมี คุณสมบัติคล้ายกันก็สามารถนำมาใช้ทดแทนกันได้ จึงนิยมใช้สารที่มีค่าบีโอดีต่ำ เช่น การใช้ Carboxylmethyl Cellulose แทนแป้ง ซึ่งมีประโยชน์และไม่เป็นอันตราย หรือหาทางขจัดออกไปได้ง่าย

โดยวิธีทางเคมี หรือทางฟิสิกส์ แต่ทั้งนี้ก็อาจจะมีสารเคมีบางตัวที่ใช้ทดแทนกันแล้วทำให้เกิดผลต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลเสียหายต่อสัตว์น้ำหรือการใช้น้ำในอนาคต และทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมากขึ้น

เมื่อนำน้ำใช้ไปผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งในแต่ละขั้นตอนนั้นจะมีการใช้สารเคมีหลายชนิดและปริมาณต่าง ๆ กัน หลังจากน้ำใช้ผ่านเข้าไปในกระบวนการผลิตแล้วก็จะกลายเป็นน้ำเสียซึ่งจะต้องนำไปปรับปรุงให้มีคุณภาพที่เหมาะสมก่อนจะปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ โดยน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการฟอกย้อมนั้นมีสิ่งสกปรกเจือปนอยู่มากมายหลายประเภท ซึ่งอาจจะจำแนกออกเป็นประเภทที่สำคัญ ๆ ได้ดังนี้คือ

### 1) สีย้อม

ในการย้อมเส้นใยจะมีการดูดซึมสีย้อมจากสารละลายสีย้อมเพียงบางส่วนเท่านั้น สีย้อมที่เหลือจะคงอยู่ในสารละลายสีย้อม และจะถูกปล่อยออกมากับน้ำเสียในที่สุด ปริมาณสีย้อมที่ยังคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ร้อยละ 5 - 50 ขึ้นอยู่กับประเภทของสีย้อมที่ใช้

### 2) สารเคมีที่ใช้ช่วยในกระบวนการฟอกย้อม รวมทั้งสารเคมีที่ใช้ในการตกแต่งสำเร็จ

สารเคมีที่ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกย้อมและการตกแต่ง มีอยู่หลายประเภท แบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

- สารช่วยย้อม (Auxiliaries Chemicals) ได้แก่สารช่วยขจัดสิ่งสกปรก (Scouring Agent) สารช่วยเปียก (Wetting Agent) และสารที่ช่วยในการย้อมสีให้ได้สีที่สม่ำเสมอ (Leveling Agent)
- สารเคมีพื้นฐาน (Basic Chemicals) เป็นสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการฟอกย้อมโดยตรง ได้แก่ กรด ด่าง บัฟเฟอร์ เกลือ สารฟอกขาว และสารลอกแป้ง
- สารเคมีตกแต่งสำเร็จ ได้แก่ สารที่ป้องกันการซึมของน้ำ สารกันเชื้อรา สารกันไฟ กันยับ เป็นต้น

สารเคมีต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นเมื่อนำมาใช้ในกระบวนการฟอกย้อม สารเคมีเหล่านี้ส่วนใหญ่จะคงเหลืออยู่ในสารละลายสีย้อมหรือน้ำซักล้าง และจะถูกปล่อยปนออกมาในน้ำเสีย

### 3) สิ่งสกปรกเจือปนในเส้นใย

วัสดุสิ่งทอที่ถูกลำเล้าผ่านกระบวนการฟอกย้อม ล้วนแต่มีสิ่งสกปรกเจือปนมาบ้างไม่มากก็น้อย โดยทั่วไปเส้นใยธรรมชาติจะมีสิ่งสกปรกเจือปนสูงกว่าเส้นใยสังเคราะห์ เพราะนอกจากจะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมาระหว่างกระบวนการผลิตแล้ว ยังมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติซึ่งมีปริมาณค่อนข้างมากด้วย เช่น เส้นใยขนแกะมีสิ่งสกปรกเจือปนที่ติดมากับธรรมชาติที่ต้องขจัดออกไปในขั้นตอนการเตรียมผ้าถึงร้อยละ 10 สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้มีทั้งที่เป็นสารซีผึ้ง ไขมัน โปรตีน ตลอดจนสารประกอบโลหะต่าง ๆ นอกจากนี้ ในกระบวนการผลิตก็ยังมีสารเคมีต่าง ๆ ลงไปในเส้นใยด้วย เช่น พวกสารหล่อลื่น และแป้งที่ใช้ในการลงแป้งด้ายยืน เป็นต้น สิ่งสกปรกเจือปนเหล่านี้จะถูกขจัดออกจากเส้นใยในขั้นตอนการเตรียมผ้าก่อนการฟอกย้อม และจะหลุดติดมาในน้ำเสียจากขั้นตอนการเตรียมผ้า

### 4) เศษเส้นใย

ในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมมีองค์ประกอบอันหนึ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ เส้นใยที่หลุดออกมา เศษเส้นใยนี้หากมีปริมาณมากก็จะทำให้เกิดปัญหาการอุดตันของน้ำเสียในเครื่องย้อมได้ นอกจากนี้ ในกรณีของเส้นใยโพลีเอสเตอร์ยังมีสารโอลิโกเมอร์ (Oligomer) ที่อาจหลุดออกมาจากเส้นใยและปะปนในน้ำเสียด้วย

### 5) สิ่งสกปรกเจือปนอื่น ๆ

นอกจากสิ่งสกปรกเจือปนต่าง ๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้ว น้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อมยังอาจมีสิ่งสกปรกเจือปนอื่น ๆ อีก เช่น สารเคมีพิเศษที่ใช้ในการขจัดรอยเปื้อนบนผ้า ซึ่งมักจะเป็นสารประกอบพวก Chlorinated Benzene พวกสารเคมีที่ใช้ในการล้างเครื่อง เหล่านี้เป็นต้น ซึ่งสารเคมีบางตัวก็อาจจะมีผลอย่างมากต่อลักษณะของน้ำเสียในภายหลัง

จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่า สิ่งสกปรกเจือปนในน้ำเสียจากกระบวนการฟอกย้อม มีความหลากหลายอย่างยิ่งในแง่ขององค์ประกอบทางเคมี แต่น้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทนี้ก็ยังมีข้อดีอยู่บ้าง ตรงที่สารส่วนใหญ่เป็นสารที่ง่ายต่อการบำบัด และมีค่าความเป็นพิษต่ำ

## 2.4 เทคโนโลยีเมมเบรนกับอุตสาหกรรมสิ่งทอ

อุตสาหกรรมโรงงานทอผ้าในสหรัฐอเมริกา ประสบความสำเร็จในการลดของเสียที่เป็นของแข็งลง 50-75% และสามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ได้ 90-100% โดยความร่วมมือกันของโรงงานอุตสาหกรรมทอผ้าทั้ง 12 แห่ง ในการจัดตั้งโรงงานย้อมผ้า และทอผ้าที่สามารถนำสีย้อมที่ใช้แล้วรวมทั้งสารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการย้อมมาใช้ในระบบใหม่ และจัดระบบใหม่ที่สามารถประหยัดน้ำและพลังงานได้มากขึ้น

เป้าหมายระยะยาวของอุตสาหกรรมโรงงานทอผ้า คือ สามารถนำน้ำจากกระบวนการสารละลายและสารเคมีอื่นๆ กลับมาใช้ใหม่ได้ประมาณ 60-80% โดยมีคุณภาพสูง แต่ปัญหาที่มักเกิดขึ้นบ่อยๆ สำหรับอุตสาหกรรมโรงงานทอผ้า คือ ความไม่แน่นอนของสารเคมีที่ใช้ในการดำเนินการเนื่องจาก โครงสร้างที่ซับซ้อนและการไหลของน้ำเสียไม่คงที่

การดำเนินการเน้นสีย้อมรีแอคทีฟ เนื่องจากว่า สีย้อมชนิดนี้ละลายน้ำได้ดีมาก และยากต่อการกำจัดออกจากน้ำเสียในสหรัฐอเมริกาใช้สีย้อมรีแอคทีฟในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสประมาณ 40% โดยมีปริมาณของสารละลายเกลือสูงถึง 20-40% ของน้ำเสีย

ปัจจุบันน้ำเสียที่ออกมาจากโรงงานทอผ้า ประกอบไปด้วย สี สารละลาย เกลือ และโลหะต่างๆ ซึ่งสีก่อให้เกิดความน่ารังเกียจ ส่วนสารละลายเกลือ และโลหะเป็นพิษต่อจุลชีพ

เทคโนโลยีหนึ่งที่มีความสนใจ และคาดว่าจะมีบทบาทในการที่จะลดปริมาณน้ำเสียที่ออกมา คือ การกรองด้วยเมมเบรนซึ่งเคยถูกใช้มาแล้วเพื่อทำน้ำทะเลให้เป็นน้ำจืด การทำน้ำผลไม้และของเหลวอื่นๆ ในอดีตเคยใช้เมมเบรนชนิดอัลตราฟิลเตรชันร่วมกับนาโนฟิลเตรชันในการบำบัดน้ำเสียสีย้อมรีแอคทีฟเพื่อนำน้ำและสารละลายเกลือกลับมาใช้ใหม่พบว่าสามารถลดต้นทุนการผลิตได้ 20%

เพื่อให้เทคโนโลยีเมมเบรนและการนำน้ำและสารละลายเกลือมาใช้ใหม่เป็นกระบวนการที่ได้มาตรฐาน สิ่งที่ต้องคำนึงถึง คือ

- การกำจัด concentrate
- การกำจัดสลัดจ์

- วิธีลดปริมาณของ membrane fouling
- หาวิธีการใช้สารเคมีที่ช่วยในการย้อมผ้าให้น้อยที่สุด

การกรองด้วยเมมเบรนถูกใช้ในกระบวนการหมุนเวียนในอุตสาหกรรมทอผ้ามานาน เมมเบรน RO ที่ทำจาก PVA ถูกใช้ในกระบวนการนำกลับมาใช้ใหม่เป็นผลสำเร็จในโรงงานทอผ้าขนาดใหญ่กว่า 20 ปี จนได้รับการรับรองจากมหาวิทยาลัย Clemson และ The American Water Works Association

กระบวนการกรองด้วยเมมเบรนเป็นกระบวนการที่อาศัยขนาดช่องว่าง (pore size) ของเมมเบรนเพื่อแยกขนาดของโมเลกุลเมมเบรนไมโครฟิลเตรชันมีขนาดช่องว่างที่สามารถแยกอนุภาคคอลลอยด์ออกจากสารละลายโพลีเมอร์ เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถแยกสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง เมมเบรนนาโนฟิลเตรชันยอมให้อนุภาคอิออนวาเลนต์เดี่ยวไหลผ่านและกรองอนุภาคอิออนวาเลนต์คู่ไว้ เมมเบรนรีเวอร์สออสโมซิสสามารถกรองอนุภาคอิออนและสารอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงกว่า 100 โดยยอมให้เฉพาะน้ำไหลผ่านได้เท่านั้น

กระบวนการเมมเบรนแตกต่างจากการกรองแบบธรรมดาทั่วไป คือ กระบวนการเมมเบรนเป็นการไหลแบบ cross flow ผ่านผิวหน้าเมมเบรน สามารถผลิตน้ำที่บริสุทธิ์ได้ยาวนานกว่าการกรองแบบธรรมดาหลังจากการฟื้นคืนสภาพโดยการทำความสะอาดด้วยสารเคมีจะให้เมมเบรนที่มีสภาพการใช้งานใกล้เคียงสภาพเดิม อายุการใช้งานของเมมเบรนประมาณ 2-5 ปี ขึ้นกับการใช้งาน

## 2.5 งานวิจัยที่ผ่านมา

Maynarovich และคณะ (1999) ทำการศึกษาการใช้กระบวนการ NF ในการบำบัดสีประเภทรีแอคทีฟในน้ำทิ้ง (Effluent) จากโรงงานฟอกย้อม ขนาด Lab-scale โดยใช้เมมเบรนแบบ Flat Sheet รุ่น NF45 ของ Filmtec และพบว่าสามารถกำจัดสีได้ประมาณ 99 % และกำจัดโซเดียมคลอไรด์ได้มากกว่า 80 % และเมื่อเดินระบบไปได้ระยะหนึ่ง ฟลักซ์จะค่อย ๆ ลดลงเนื่องจากการเกิด Fouling ซึ่งสามารถลดปัญหานี้ได้ด้วยการล้างทำความสะอาดเป็นระยะ ๆ และได้พัฒนาโมเดลขึ้นมาจากสมการของ Nernst-Planck เพื่ออธิบายการผลทลลง แต่ก็ยังไม่สามารถอธิบายได้อย่างละเอียดถูกต้องมากนัก โดยเฉพาะกับระบบที่มีความซับซ้อน

Mulford และคณะ (1999) ทำการวิจัยเพื่อศึกษาว่าผลของการดำเนินระบบ NF ในระดับ Pilot-plant จะสามารถแสดงถึงผลของการดำเนินระบบ NF ในระดับ Full-scale ได้อย่างถูกต้องหรือไม่ โดยผลการทดลองพบว่าอัตราการผลิต และคุณภาพของน้ำที่ผลิตได้จากโรงงานผลิตน้ำจริง ถูกจำลองโดยการดำเนินระบบ Pilot-plant ในช่วงเวลา 4 เดือนของการทดลองได้อย่างถูกต้อง โดยใช้เมมเบรนจากขนาดต่าง ๆ ที่ผลิตจากที่เดียวกัน และดำเนินระบบภายใต้สภาวะเดียวกัน โดยน้ำที่ผลิตได้จากทุก Plant มีค่า TOC 0.4 mg/L THMFP 35 µg/L และ HAAFP 28 µg/L และยังพบว่าอัตราการผลิตน้ำของ Full-scale Plant มีค่าลดลง 50 % ในช่วงระยะเวลาในการดำเนินระบบ 5 ปี โดยพบว่าแบบจำลองการต้านทานแบบ Second-order สามารถทำนายอัตราการผลิตน้ำได้อย่างถูกต้อง

Tang และ Chen (2001) ได้ทำการศึกษาการใช้ระบบนาโนฟิลเตรชันกับน้ำเสียสังเคราะห์จากสารละลายซีรีแอคทีฟและ NaCl โดยใช้เมมเบรนแบบแผ่น เพื่อศึกษาถึงค่าฟลักซ์โดยอาศัยพารามิเตอร์สี่ตัวคือ Crossflow Velocity, ความเข้มข้นเริ่มต้น, ความดันในการเดินระบบและความเข้มข้นของสารละลาย ซึ่งได้พบว่าค่าฟลักซ์นั้นขึ้นอยู่กับความดันในการเดินระบบ ในขณะที่ความเข้มข้นของ NaCl และซีรี ไม่มีผลต่อค่าฟลักซ์หรือในส่วนของประสิทธิภาพการกำจัดอย่างเห็นได้ชัด และพบว่าระบบสามารถให้ค่าฟลักซ์ที่สูงเมื่อใช้ความดันในการเดินระบบเพียง 500 kPa ในขณะที่กำจัดซีรีได้มากกว่า 98 เปอร์เซ็นต์และกำจัด NaCl ได้น้อยกว่า 14 เปอร์เซ็นต์ และน้ำสะอาดที่ผลิตได้นั้นมีคุณภาพสูง และให้ค่า % Recovery สูงถึง 99 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในการทดลองยังไม่พบว่าเกิด Fouling กับเมมเบรน

Bes-Pia A. และคณะ (2002) ได้ศึกษาถึงการนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำเสียจากโรงงานสิ่งทอ โดยการใช้ระบบบำบัดแบบกายภาพ และเคมี ตามด้วยระบบเมมเบรน แบบอัลตราฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน พบว่ากระบวนการทางเคมี-กายภาพนั้นสามารถกำจัด COD ได้ประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำน้ำไปผ่านระบบเมมเบรนต่อ พบว่าระบบอัลตราฟิลเตรชันไม่สามารถกำจัด COD ได้อย่างเห็นได้ชัด ในขณะที่ระบบนาโนฟิลเตรชันกำจัด COD ได้มากกว่า 96 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ระบบอัลตราฟิลเตรชันยังไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความนำไฟฟ้าได้มากนัก ในขณะที่ระบบนาโนฟิลเตรชันกำจัดค่าความนำไฟฟ้าได้สูงกว่า 67 – 85 เปอร์เซ็นต์