

## บทที่ 2

### ทบทวนเอกสาร

#### 2.1 สีย้อม

##### 2.1.1 ทฤษฎีการย้อมสี

อัจฉราพร ไสละสูต (2527) ได้กล่าวว่า สีติดเส้นใยได้ เพราะสารประกอบทั้งสองชนิดรวมกันเป็นสารประกอบเคมีใหม่อีกชนิดหนึ่ง การรวมนี้แม้ว่าจะมิใช่เป็นการรวมตัวแบบเดียวกับโซเดียมรวมตัวกับคลอรีนแล้วเปลี่ยนรูปเป็นเกลือแกงซึ่งเป็นสารชนิดใหม่จริงๆ คุณสมบัติเดิมของโซเดียมและคลอรีนเปลี่ยนไปตามอัตราส่วนของโซเดียมและคลอรีนที่มีอยู่ในสารประกอบใหม่แต่ละชนิด แต่การรวมตัวของสีและเส้นใยนั้น ไม่ทำให้คุณสมบัติเดิมเปลี่ยนไป จะเปลี่ยนก็เพียงคุณสมบัติกายภาพเห็นเป็นสีชนิดต่างๆขึ้นมาเท่านั้น อัตราส่วนจะมากน้อยอย่างไรก็ตาม เราอาจย้อมได้สีเข้มมากจนกระทั่งเป็นสีอ่อนจางอย่างไรก็ตาม ยังคงเป็นสารประกอบอยู่นั่นเอง บางครั้งสารประกอบนี้สลายตัวออกโดยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่ง เปลี่ยนตัวสีเป็นสารประกอบเคมีซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างออกไปจากเดิม และมักจะไม่ละลายน้ำ เช่น เมื่อลิวโคเวต (Leuco vat) ออกซิไดส์ หรือตัวคอปปลิง (Coupling Component) ทำปฏิกิริยากับเบสกับไดอะโซโซเดียมเบส (diazotised base) เป็นต้น ถ้าไม่มีการตกค้างภายหลังย้อมใดๆ แล้ว ตามทฤษฎีกระบวนการย้อมสีนี้เปลี่ยนกลับไปมาได้ หมายความว่า เมื่อย้อมสีติดเส้นใยแล้ว สามารถทำให้หลุดแยกออกเป็นตัวสีและเส้นใยในสภาพเดิมได้ ตัวสีบางชนิดทำได้ง่าย ดังเช่นที่เมื่อเวลาซักก็มีสีตกลอกออกมา บางตัวก็ทำยากจึงเกิดเป็นสีไม่ตก (Color fastness) อันเป็นคุณสมบัติที่ต้องการมากที่สุดในการให้สีผ้า

โมเลกุลของสีย้อมค่อนข้างใหญ่ และดูเหมือนว่าไม่สามารถจะซึมเข้าไปในระหว่างโมเลกุลของเส้นใยได้ ในขณะที่เมื่อสายโมเลกุลนี้เรียงตัวกันอย่างหนาแน่นมีระเบียบ ได้มีผู้ทดลองหาขนาดโมเลกุลของสีที่เหมาะสมที่จะซึมผ่านเข้าไปภายในของโมเลกุลของเส้นใยได้นั้น ปรากฏว่าต้องไม่เล็กไปกว่าขนาดของสีโมโนอะโซ (Monoazo) ขนาดของช่องว่าง (pore) กับขนาดโมเลกุลของสีจึงมีส่วนสัมพันธ์กันมาก ถ้าทราบขนาดของทั้งสองการเลือกตัวสีและกระบวนการย้อมก็ทำได้ง่ายขึ้น การย้อมสีส่วนใหญ่ใช้ย้อมด้วยน้ำ และใยฝ้ายนั้นเมื่อนำไปแช่น้ำจะพองตัวออกมากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับปริมาณกลุ่มเคมีไฮดรอกซิล (OH) ซึ่งมีอยู่ในเส้นใยนั้น การพองตัวของเส้นใยนี้จะ

เกิดแต่เฉพาะบริเวณช่องว่างของเส้นใยเท่านั้น ช่องว่างนี้จะมีขนาดใหญ่ขึ้น เส้นใยทุกชนิดมีขนาดช่องว่างไม่เท่ากัน ขนาดโมเลกุลของสีย้อมก็ไม่เท่ากันด้วย จึงเป็นสาเหตุอย่างหนึ่งที่ทำให้สีบางตัวย้อมเส้นใยบางชนิดไม่ติดหรือติดสีอ่อน นอกเหนือไปจากคุณสมบัติเคมีโดยตรงระหว่างตัวสีกับเส้นใย

เมื่อโมเลกุลของสีซึมผ่านช่องว่างเข้าไปภายในเส้นใยแล้ว จะต้องมีความทำอะไรใหม่อีกอย่างหนึ่งมาทำให้ตัวสีแยกตัวออกจากน้ำ ตัวสีใหม่ที่อยู่ในน้ำย้อมภายนอกเส้นใยจะซึมเข้าไปแทนที่ ดังนั้นเส้นใยจะค่อยๆมีโมเลกุลของสีรวมอยู่มากขึ้นทุกที สีก็เข้มมากขึ้นไปตามลำดับ จะดูดซับไว้ได้เป็นปริมาณมากน้อยเท่าไรขึ้นอยู่กับกลุ่มเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยา (Reactive group) ของตัวสีและเส้นใยนั้นๆ

ทฤษฎีการย้อมสีที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง ก็คือ ย้อมให้สีสม่ำเสมอ ไม่ด่าง และมีสีเหมือนกันตลอด นอกจากคุณสมบัติเคมีของตัวสี และเส้นใยที่จะต้องพิจารณาแล้ว กระบวนการย้อมต่างๆตามลักษณะของวัสดุที่ต้องการย้อม และลักษณะของเครื่องย้อมก็จำเป็นต้องนำมาพิจารณาเปรียบเทียบด้วย สีบางตัวมีคุณสมบัติพิเศษซึ่งเมื่อย้อมในครั้งแรกแล้วด่าง ก็สามารถจะปรับตัวเองให้สม่ำเสมอได้ โดยปล่อยตัวหลุดออกจากส่วนที่ติดมากเกินไป แล้วกลับมาดูดซับเข้าส่วนที่ติดน้อย คุณสมบัตินี้เรียกว่า การซึมกระจาย (Migration) การย้อมสีให้ได้ผลดีและง่าย เมื่อเลือกสีตัวใดมาใช้ ก็จำเป็นต้องพิจารณาคณะสมบัติการซึมกระจายของสีด้วย การย้อมเส้นใยบางชนิดต้องการสีที่มีการซึมกระจายตัวดี แต่บางครั้งไม่ต้องการ

การที่จะย้อมให้ได้ผลดีนั้น อำนาจการรวมตัวของสีกับเส้นใยต้องมีมากกว่าอำนาจการรวมตัวของสีกับน้ำ และสามารถทำให้เกิดเช่นนี้ขึ้นได้ ถ้าโมเลกุลของสีย้อมมีหมู่อะตอมซึ่งถูกจัดให้เรียงตัวกันในลักษณะที่จะทำให้เกิดการดูดซับ (Substantivity) กับเส้นใยแล้วเกิดบอนด์ (bond) ยึดกันแน่น อาจกล่าวได้อย่างกว้างๆว่า มีอิทธิพลเชิงเคมี 4 ชนิดที่ทำให้สีติดกับเส้นใยได้ คือ

**1. ไฮโดรเจนบอนด์ (Hydrogen bond)** ไฮโดรเจนในกลุ่มไฮดรอกซี (hydroxy) จะยึดอย่างหลวมๆกับอะตอมอื่นได้ เป็นวาเลนซ์ที่สอง (secondary valency) ตัวอย่างที่ดีได้แก่ การยึดตัวของไฮโดรเจนกับออกซิเจนในโมเลกุลของน้ำ ซึ่งทำให้มีจุดหลอมละลายและจุดเดือดสูงกว่าที่ได้คาดหมายกันไว้ เส้นใยและตัวสีเกือบทุกชนิดจะมีกลุ่มไฮดรอกซีที่ทำหน้าที่รวมตัวนี้ โดยเฉพาะใยสังเคราะห์ เช่น อะซิเตด เป็นกลุ่มเคมีที่สำคัญอย่างยิ่งในการย้อมสี ส่วนไนโพลีเอสเตอร์ และโพรตีนก็มีความสำคัญเช่นเดียวกัน

2.แรงแวนเดอร์วาลส์ (Van der Waals' forces) แรงนี้เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ เป็นแรงที่ทำให้อะตอมและโมเลกุลเข้ามายึดติดกันได้เอง โดยเฉพาะระหว่างตัวสีกับเส้นใย จะเกิดแรงนี้ยึดให้ติดกันได้ เมื่อโมเลกุลของทั้งสองมีเอกลักษณ์พิเศษ คือ มีโมเลกุลยาวและแบนคังเช่น โมเลกุลของเซลลูโลส สีแวนด์หรือสีไคเร็กซ์ หรือระหว่างใยเซลลูโลสอะซิเตดกับสีดีสเพอร์ส หรือเมื่อโมเลกุลทั้งสองมีอัตราส่วนของกลุ่มไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon group) ทั้งอะลิฟาติกหรืออะโรมาติก (aliphatic or aromatic) คังเช่นในสีบางตัวที่ใช้ข้อมขนสัตว์ และที่ใช้ข้อมโพลีเอสเตอร์เกือบทั้งหมด น้ำในน้ำย้อมยังช่วยให้เส้นใยและสียึดติดกันด้วย และกลุ่มไฮโดรเจนคาร์บอนพยายามที่จะแยกตัวหนีออกจากน้ำ แล้วมารวมกลุ่มกันเอง ในกรณีนี้รู้จักกันว่าเป็นการรวมตัวแบบไฮโดรโฟบิก (hydrophobic bonding)

3.แรงไอออน (Ionic forces) การยึดรวมตัวระหว่างเส้นใยและสีแบบที่ 3 นี้ เกิดขึ้นได้โดยไฟฟ้าต่างศักย์ เส้นใยเมื่ออยู่ในน้ำจะมีปฏิกิริยาไฟฟ้าเป็นลบ ส่วนใหญ่สีซึ่งละลายน้ำเป็นแอนไอออน ไอออนของสีเป็นลบ การดูดซึมจึงไม่อาจเกิดขึ้นได้ ดังนั้นจำเป็นต้องเปลี่ยนไอออนของเส้นใยก่อนที่ไอออนของสีจะเข้ามาใกล้พอที่แรงแวนเดอร์วาลส์จะทำหน้าที่ได้ แต่ถ้าใช้ตัวสีซึ่งเป็นแคทไอออนก็ไม่จำเป็นต้องใช้ ตัวอย่างที่ดีได้แก่ สีที่ใช้ข้อมเส้นใยอะคริลิก

4.โคเวเลนต์บอนด์ (Covalent bond) สีรีแอคทีฟยึดกับเส้นใยได้โดยโคเวเลนต์บอนด์สามารถยึดได้แน่นยิ่งกว่าการยึดติดใดๆ ที่กล่าวมาแล้วทั้งสิ้น และทำให้แยกตัวออกจากกันได้ยาก สีรีแอคทีฟบางตัวเมื่อนำไปใช้กับด่างหรือกรดสามารถจะแยกตัวละลายปนกับน้ำออกมาได้บ้างเล็กน้อย ถ้าจะให้แยกตัวออกให้เกือบหมด จะต้องต้มเดือดในไฮดราซีน (hydrazine) 40% นาน 3 ชั่วโมง

อิทธิพลของสารช่วยย้อม สารช่วยย้อมที่สำคัญแบ่งออกได้เป็นชนิดต่างๆ 7 ชนิด คือ

1.กรด ใช้สำหรับย้อมเส้นใยโปรตีนและไนลอนเมื่อใช้สีแอซิด ทำหน้าที่เป็นตัวที่ทำให้ประจุไฟฟ้าลบในเส้นใยลดน้อยลง และเพิ่มประจุไฟฟ้าบวก แอนไอออนของสีจึงสามารถเข้าไปติดภายในเส้นใยได้ ตัวสีซึ่งดูดซึมได้น้อยก็จำเป็นต้องเพิ่มกรดให้มากขึ้น ส่วนตัวสีที่ย้อมได้สมำเสมอ ดีก็สามารถซึมกระจายตัวจากส่วนที่มีย้อมมาก ไปยังส่วนซึ่งมีตัวสีน้อยได้ง่าย เวลาซักสีตกออกได้ง่าย สีประเภทนี้ต้องการกรดแก่เพื่อให้ซึมติดเข้าไปภายในเส้นใยดีขึ้น

2.ด่าง ใช้สำหรับเส้นใยเซลลูโลสกับสีแวนด์ สีอะโซอิก สีกำมะถันและสีรีแอคทีฟ สีแวนด์และสีกำมะถันใช้ข้อมในน้ำย้อมซึ่งเป็นด่างแก่และสารรีดิวซิ่ง สารคอลปลิงของสีอะโซอิกหรือ

แบบจำลองละลายในค้างแ่ (โซคาไฟ) ส่วนสิริแอคทีฟนั้นใช้ค้างอ่อน (โซเดียมคาร์โบเนท) มีวัตถุประสงค์แตกต่างกัน หน้าที่ของค้างเมื่อใช้กับสิริแอคทีฟเพื่อเพิ่มปฏิริยาระหว่างโมเลกุลของสิและไฮเซลลูโลสให้มีมากและดีขึ้น

3.เกลือ ใช้ในการย้อมด้วยสีแอซิด และการย้อมไฮเซลลูโลสทุกชนิด เมื่อย้อมขนสัตว์ด้วยสีแอซิดคือควอลไลซ์ ใช้โซเดียมซัลเฟตเป็นสารควบคุม เนื่องจากโซเดียมซัลเฟตมีแอนไอออนมากมาต่อสู้กับแอนไอออนของตัวสี เพื่อจะดูดซึมเข้าไปภายในเส้นใย กรดกำมะถันซึ่งใส่ลงไปพร้อมๆกัน จะทำให้เส้นใยและตัวสีดูดติดกันได้มากขึ้น กรดและเกลือทำหน้าที่ตรงกันข้ามในน้ำย้อม จะให้ผลอย่างเดียวกันถ้าไม่ใช้โซเดียมซัลเฟต แล้วใช้กรดแต่น้อย หรือใช้กรดอ่อนแทน การย้อมวิธีแรกจะควบคุมระดับติดสีได้ยาก เพราะปริมาณกรดที่ต้องการอย่างแท้จริงนั้นหาความแน่นอนได้ยาก การย้อมวิธีที่สองทำให้มีราคาค้นทุนสูงกว่าปกติ เพราะกรดอินทรีย์ย้อมมีราคาแพงกว่ากรดอนินทรีย์ โซเดียมไอออนส่วนหนึ่งของเกลือที่ใช้ในการย้อม ทำหน้าที่ลดปฏิริยาลบของเส้นใยด้วย ทำให้แอนไอออนของสีสามารถเข้าไปใกล้เส้นใยจนกระทั่งแรงแวนเดอวัลส์มีประสิทธิภาพ เมื่อใช้สีแควด ย้อมฝ้ายที่อุณหภูมิปานกลาง (อุ่น) โซเดียมไอออนที่ทำหน้าที่นี้ได้มาจากโซเดียมไดไซโอไนท์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ละลายสี ถ้าย้อมเส้น สีแควดจะดูดติดเส้นใยได้น้อยลง ดังนั้นเมื่อต้องการให้สีดูดติดได้ดีขึ้นก็จำเป็นต้องเพิ่มโซเดียมไอออนในน้ำย้อมให้มากขึ้น โดยการเติมเกลือแ่ง แต่ทั้งนี้จะทำให้อุณหภูมิการย้อมลดลงไปได้อีก(ต้องระมัดระวังในข้อนี้)

4.สารช่วยให้สีสม่ำเสมอ (Surface-active Levelling Agents) ใช้กับสีแควด สีดีสเพอร์ส และสีแอซิดบางชนิด (levelling agent) ในบางกรณีเพื่อให้แน่นอนใจว่า สีจะติดเส้นใยอย่างสม่ำเสมอ จำเป็นต้องลดคุณสมบัติการดูดติดสีของเส้นใยให้มัน้อยลง โดยการเติมสารประกอบเคมีบางชนิดในน้ำย้อม ปฏิริยาของสารนี้อาจแบ่งออกได้เป็น 2 ทางด้วยกัน ทางหนึ่งนั้นสารประกอบเคมีนี้จะแข่งขันกันดูดติดเข้าไปในเส้นใย สารประกอบประเภทนี้ดูดติดเส้นใยได้ง่าย ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือการย้อมขนสัตว์ในลอนด้วยสีแอซิด ขณะเดียวกัน สารเคมีนี้จะไปเพิ่มพลังงานให้แก่สีย้อมเพื่อรักษาสภาพเดิมของตัวสีไว้ ไม่ทำปฏิริยากับน้ำรวมตัวกันเป็นสารประกอบสมบูรณชนิดใหม่ เป็นการทำให้ตัวสีรวมตัวกับเส้นใยได้ช้าลง

5.สารนำ (Carriers) สารประเภทนี้ใช้กันมากเมื่อย้อมไฮโพลีเอสเตอร์ ทำให้สามารถย้อมสีเข้มได้แม้ใช้กระบวนการย้อมตามปกติ มักเป็นพวก 2-ไฮดรอกซีไดฟีนิล (2-hydroxy diphenyl) สารทำหน้าที่ได้โดยดูดติดอยู่ที่ผิวเส้นใยก่อน เมื่อสีเข้าไปติดจะละลาย เส้นใยจะดูดสีไว้ได้มากขึ้น ระดับการติดสีก็เพิ่มขึ้น สารตัวนี้ยังช่วยให้เส้นใยของตัวได้มากขึ้นด้วย

6. สารละลายอินทรีย์ เมื่อพิจารณาการใช้สีบางชนิดซึ่งละลายน้ำได้น้อยข้อมขนสัตว์และ โนลอน เช่น 1:2 เมทัลคอมเพล็กซ์ (metal complex) ในน้ำข้อมผสมสารละลายอินทรีย์ที่ละลายน้ำ ได้ จะข้อมได้ผลดีขึ้น วิธีปฏิบัติให้เติมเบนซิลแอลกอฮอล์ (benzyl alcohol) ประมาณ 3 % ของน้ำ ข้อมลงไปด้วย สีจะติดเส้นใยที่ 60-80 องศาเซลเซียส แทนที่จะเป็นจุดเดือดและข้อมได้เร็วกว่า สามารถประหยัดไอน้ำที่ใช้ในการข้อมเส้นใยจะมีลักษณะดีกว่าการข้อมตามปกติ ทั้งนี้อาจเป็น เพราะสารละลายอินทรีย์สามารถก่อเป็นเยื่อบางๆภายในเส้นใยได้อย่างรวดเร็ว ทำให้สีซึมผ่านเข้าไปติดเส้นใยได้เร็วขึ้น

7. สารรีดิวซ์ ใช้สำหรับรีดิวซ์ตัวสีบางชนิดเพื่อประโยชน์ในการดูซึมเข้าไปในเส้นใย

อิทธิพลด้านเรขาคณิตของโมเลกุลของสี รูปร่างและขนาดของโมเลกุลของสี เรียกกันโดยทั่วไปว่า เรขาคณิตของโมเลกุลของสี มีผลกระทบต่อการข้อมอย่างยิ่ง อาจสรุปได้สั้นๆ ดังนี้

1. การติดเส้นใย (Substantivity) ลักษณะแบนๆของโมเลกุลของสีข้อม บางครั้งมีผลกระทบต่อคุณสมบัติการข้อมของสีตัวนั้นๆ กลุ่มเคมีใดๆที่นำมาใช้กับสีไครเร็กซ์และสีดีสเพอร์ส ที่ทำให้ความแบนของสีข้อมต้องกระทบกระเทือน และทำให้เกิดบิดพันกันของโมเลกุลจะทำให้ลดปริมาณติดสีของเส้นใยเซลลูโลสและอะซิเตดด้วย

2. ระดับการติดสี (Rate of Dyeing) หมายความว่าถึงอัตราการดูซึมของสีเข้าไปภายในเส้นใยในช่วงระยะเวลาที่กำหนดให้ สีจะค่อยๆซึมซ้าๆ เข้าไปตามช่องว่างของเส้นใยสู่ภายใน ถ้าเส้นใยมีโมเลกุลที่เป็นระเบียบมาก เส้นด้ายหรือผ้ามันพันกันแน่นจะข้อมช้าลง ต้องการเวลาข้อมนานขึ้น คุณสมบัติส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับขนาดโมเลกุลของสี หรือนัยหนึ่งตามขวางของโมเลกุลของเส้นใยส่วนหนึ่งจะเป็นคุณสมบัติเชิงกล ถ้าโมเลกุลยิ่งเล็กและยาวเท่าไรก็จะผ่านช่องว่างเข้าไปในเส้นใยได้มากขึ้นเท่านั้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนในกรณีข้อมฝ้ายด้วยสีไครเร็กซ์ ข้อมขนสัตว์ด้วยสีแอซิดหรือเจลาตินและสีดีสเพอร์สซึมเข้าไปภายในใยอะซิเตด

3. ความคงทนของสี (Color Fastness) สีกรดที่ใช้ข้อมขนสัตว์ทุกตัวจะมีกลุ่มซัลโฟ (Sulpho) สองกลุ่มในหนึ่งโมเลกุล ตัวสีซึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและขนาดโมเลกุลใหญ่กว่าจะคงทนมากกว่า รูปร่างของโมเลกุลของสี ก็มีส่วนทำให้ความคงทนเปลี่ยนแปลงได้เหมือนกันโดยเฉพาะความแบนของโมเลกุล บางครั้งถ้าโมเลกุลมีความกว้างมากกว่าความยาว จะติดคงทนมากกว่าสีจำพวกพทาโลไซแอนนิน (Phthalocyanine) และสีแวนทาลายตัว โมเลกุลมีความกว้างมากกว่าความ

ยาวจึงมีความคงทนสูง แต่ในขณะที่เดียวกันสีไดเร็กต์หลายตัวที่โมเลกุลมีความยาวมากกว่าความกว้าง มีความคงทนต่ำมาก อย่างไรก็ตามความคงทนของสีแต่ละตัวยังขึ้นอยู่กับสาเหตุอื่นอีกด้วยสมควรจะได้พิจารณาโดยเฉพาะของสีแต่ละตัวที่ต้องการใช้

### 2.1.2 การย้อมสี

ในการย้อมสี Joseph (1992) ได้กล่าวไว้ว่า การย้อมสีสิ่งทอเป็นการทำให้วัสดุสิ่งทอเกิดสีขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์หลัก 2 ประการ คือ

1. ให้ได้สีสม่ำเสมอ
2. ให้มีความคงทนต่อการใช้งานและทั้งกระบวนการผลิตขั้นต่อมา เช่น กระบวนการตกแต่งสำเร็จ

นอกจากวัตถุประสงค์หลักแล้วยังควรคำนึงถึงด้านอื่นด้วย เช่น ความสามารถในการย้อมซ้ำ ต้นทุนการย้อม กระบวนการและวิธีการย้อมที่ถูกต้องเหมาะสม ไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสภาพแวดล้อม รวมทั้งระยะเวลาที่ใช้ในการย้อม

กระบวนการย้อม สามารถเกิดขึ้นได้ ณ ชั้นใดชั้นหนึ่งใน 4 ขั้นตอนหลักของกระบวนการผลิตในรูปแบบต่างๆ ดังต่อไปนี้

- 1.เส้นใย
- 2.เส้นด้าย
- 3.ผืนผ้า
- 4.เสื้อผ้า/ผลิตภัณฑ์สิ่งทอสำเร็จรูป

### 2.1.3 ชนิดของสี

นวลแข ปาลิวนิช (2526) ได้กล่าวถึง ชนิดของสีที่ใช้ย้อมผ้า อาจแบ่งออกได้เป็นชนิดใหญ่ๆ 2 ชนิด คือ

- 1.สีชนิดที่ละลายน้ำได้ (Dye) เป็นสีที่ละลายในน้ำหรือสารละลายอื่นได้ เมื่อนำมาย้อมผ้า สีจะแทรกเข้าไปในเนื้อเส้นใยได้ดี
- 2.สีชนิดที่ไม่ละลายน้ำ (Pigment) เป็นสีที่ไม่ละลายในน้ำ ต้องใช้สารอื่นช่วย ย้อมได้ง่ายและเร็วราคาไม่แพง สีแต่ละชนิดใช้ย้อมเส้นใยแต่ละอย่างได้ไม่เหมือนกัน สีจะติดกับผ้าด้วยกระบวนการทางกล ผ้าที่ย้อมจะแข็ง สีจะเลือนและหลุดออกง่าย อันเป็นปัญหาในการใช้สีชนิดนี้

ย้อมผ้า สีปิกเมนต์ได้ถูกนำมาใช้ผสมลงในของเหลวที่จะผลิตออกมาเป็นเส้นใยสังเคราะห์ หรือ เรียกว่าการย้อมเส้นใยตั้งแต่ยังเป็นของเหลว (Solution dyed) สีชนิดที่ย้อมแล้วทำให้ผ้ามีสีแวววาว เป็นประกายเมื่อถูกกับแสงอัลตราไวโอเลตนั้น ก็เป็นสีปิกเมนต์ชนิดหนึ่ง

#### 2.1.4 คุณลักษณะของสีย้อม

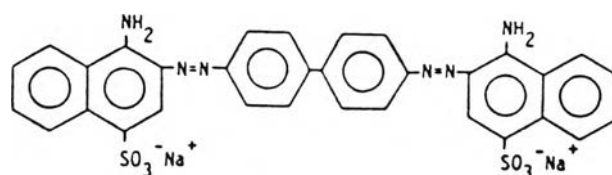
Joseph (1992) ได้กล่าวว่า สีย้อมที่ดีควรมีลักษณะต่างๆดังนี้

1. มีความเข้มสูง
2. ละลายน้ำได้หรือเปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้
3. มีแรงดึงดูดหรือมีแรงยึดกับเส้นใย
4. คงทนต่อการซักและการใช้งาน
5. คงทนต่อกระบวนการผลิตขั้นต่อมา
6. ให้ความปลอดภัย ความสะดวกในการใช้งานและมีราคาเหมาะสม

#### 2.1.5 โครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสี ประกอบด้วย 3 ส่วน คือ

1. พันธะคู่สลับ (conjugated double bonds)
2. หมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่า โคร โมฟอร์ (chromophore)
3. หมู่ปฏิกิริยาที่เรียกว่าอโซ โครม (auxochromes)

ทั้งโคร โมฟอร์และอโซ โครมต่างเชื่อมอยู่กับพันธะคู่สลับ ทั้ง 3 ส่วนนี้เรียกรวมกันว่า โคร โมเจน (chromogen) ตัวอย่างโครงสร้างทางเคมีของโมเลกุลสี เช่น C.I. Acid Red 1 ดังแสดงในรูปที่ 2.1



Congo Red

รูปที่ 2.1 C.I. Acid Red 1 (Joseph, 1992)

โครโมฟอร์ คือ หมู่ปฏิกิริยาที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงที่มองเห็นได้ เป็นหมู่ที่ไม่อิมตัว ยกเว้น  $-NR_3^+$  หน้าที่ของโครโมฟอร์ คือ เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างของโครโมฟอร์ ได้แก่

- N=N- หมู่เอโซ (azo group)
- NO<sub>2</sub> หมู่ไนโตร (nitro group)
- C=O หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group)
- NR<sub>3</sub><sup>+</sup> อนุพันธ์แอมโมเนียม (alkyl ammonium derivatives)

อโซโครม คือ หมู่ปฏิกิริยาที่อิมตัวที่มีอิเล็กตรอนซึ่งยังไม่เกิดพันธะเชื่อมอยู่กับพันธะคู่ สลับ ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างของอโซโครม ได้แก่

- NH<sub>2</sub> หมู่อะมิโน (amino groups)
- NHR หมู่โมโนแอลคิลอะมิโน (mono alkyl amino group)
- NR<sub>2</sub> หมู่ไดแอลคิลอะมิโน (dialkyl amino group)
- OH หมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group)
- OR หมู่อีเทอร์ (ether group)

นอกจากนี้ อโซโครมยังให้คุณสมบัติการละลายน้ำ รวมทั้งการรวมตัวเกิดเป็นพันธะกับเส้นใยอีกด้วย การรวมกันของพันธะคู่สลับกับโครโมฟอร์ทำให้เกิดสีขึ้น แต่ความเข้มและความสว่างของสีขึ้นอยู่กับอโซโครม

**2.1.6 การจำแนกสีย้อม (dye classification)** มีหลายระบบด้วยกัน เช่น จำแนกตามแหล่งกำเนิด ตามกลุ่มเคมี ภายในโครงสร้างหรือการใช้งาน ระบบที่ใช้กันมากในปัจจุบันเป็นระบบที่ใช้ในดัชนีสี (Color Index) ที่แบ่งตามการใช้งานดังนี้ (Hussain,1994) และแสดงคุณสมบัติของสีชนิดต่างๆ ดังตารางที่ 2.1

- สีแอซิด (acid dyes)
- สีเอโซอิก (azoic dyes)
- สีเบสิก (basic dyes)
- สีไดเรกต์ (direct dyes)
- สีดีสเพอร์ส (disperse dyes)
- สารสี (pigments)
- สีรีแอคทีฟ (reactive dyes)
- สีซัลเฟอร์ (sulphur dyes)
- สีแวต (vat dyes)



ตารางที่ 2.1 ชนิดของสีย้อมจำแนกตามลักษณะการใช้งาน (Hussain,1994)

ชนิดสีย้อม	สมบัติทางกายภาพ	เส้นใยที่เหมาะสม	กลไกการติดสี	สารช่วยย้อม
Acid dye	ประจุลบ ละลายน้ำดี สีติดไม่แน่น	ไนลอน ขนสัตว์	พันธะไอออนิก	กรดซัลฟูริก กรดอะซิติก โซเดียมซัลเฟต สารลดแรงตึงผิว
Asoic dye	เป็นคอลลอยด์หลังจาก เกิดปฏิกิริยาในเส้นใย สีติดแน่น	ผ้า วิสคอส	ปฏิกิริยาตก ตะกอนผลึกภายใน เส้นใย	เกลือของโลหะ ฟอร์มาลดีไฮด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไนไตรท์ กรด
Basic dye	ประจุบวก ละลายน้ำดี	อะคริลิก	พันธะไอออนิก	กรดอะซิติก softening agent
Direct dye	ประจุลบ ละลายน้ำได้ดี สีติดไม่แน่น	ผ้า วิสคอส	พันธะไอออนิก	เกลือของโซเดียม fixing agent เกลือของโลหะ
Disperse dye	กระจายตัวในน้ำเป็น คอลลอยด์ สีติดแน่นดี	อะคริลิก โพลีเอสเตอร์ ไนลอน เซลลูโลส อะซิเตต	คอลลอยด์ของสี เชื่อมติดติดผิวกับ เส้นใย	สารนำ(carrier) โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮโดรซัลไฟท์
Reactive dye	ประจุลบ ละลายน้ำดี สีติดแน่นดี	ผ้า วิสคอส ขนสัตว์	พันธะโควาเลนต์	โซเดียมคลอไรด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ เอทิลีนไดอะมีน
Sulfer dye	เป็นคอลลอยด์หลังจาก เกิดปฏิกิริยาในเส้นใย สีติดแน่น	ผ้า วิสคอส	ปฏิกิริยาตก ตะกอนผลึกภายใน เส้นใย	เกลือของ โซเดียมซัลไฟด์ กรดอะซิติก
Vat dye	เป็นคอลลอยด์หลังจาก เกิดปฏิกิริยาในเส้นใย สีติดแน่น	ผ้า วิสคอส	ปฏิกิริยาตก ตะกอนผลึกภายใน เส้นใย	โซเดียมไฮดรอกไซด์ เกลือของโซเดียม ไฮโดรซัลไฟท์ สารลดแรงตึงผิว
Metal complex acid dye	ประจุลบ ละลายน้ำน้อย สีติดแน่นดี	ไนลอน ขนสัตว์	พันธะไอออนิก	ข้อมูลไม่เพียงพอ
Mordant dye	ประจุลบ ละลายน้ำได้ สีติดแน่นดี	ขนสัตว์	พันธะเชิงซ้อน ของเส้นใยโครม และสีย้อม	เกลือของโครเมียม กรดอะซิติก โซเดียมซัลเฟต

### 2.1.6.1 สีแอซิด

สีชนิดนี้เป็นที่รู้จักกันในอีกนามว่า anionic dyes เนื่องจากส่วนมากมีโครงสร้างเป็นเกลือโซเดียมของกรดอินทรีย์ (กรดซัลโฟนิก) ที่ละลายในน้ำได้ และให้ประจุลบ ใช้เป็นสีหลักในการย้อมเส้นใยโปรตีนธรรมชาติ ได้แก่ ขนสัตว์และไหมและเส้นใยโพลีเอไมด์ (polyamide) ได้แก่ ไนลอน (nylon) ซึ่งเส้นใยเหล่านี้เป็นเส้นใยที่มีหมู่อะมิโน (amino group) ที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสีได้

สีแอซิดสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

1.สีแอซิดที่ไม่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (non-metallic acid dyes) สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มย่อยตามการใช้งานได้ 3 กลุ่ม คือ

*กลุ่มที่ 1* เป็นกลุ่มสีที่เส้นใยดูดซึมได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดแก่ ซึ่งได้จากการใส่กรดแก่ เช่น กรดซัลฟูริก ( $H_2SO_4$ ) ลงไปให้ค่า pH อยู่ในช่วง 2-3 และเป็นที่ยอมรับกันดีในนามของ levelling-dyeing acid dye เนื่องจากให้คุณสมบัติการย้อมที่สม่ำเสมอ สีกลุ่มนี้มีค่าความคงทนต่อแสงค่อนข้างดี แต่มีความคงทนต่อการซักต่ำ

*กลุ่มที่ 2* เป็นกลุ่มสีที่เส้นใยดูดซึมได้ดีในสภาวะที่เป็นกรดอ่อน ค่า pH อยู่ในช่วง 5.2-6.2 การย้อมด้วยสีกลุ่มนี้ไม่จำเป็นต้องใส่เกลือเนื่องจากที่ pH มากกว่า 4.7 เกลือจะเป็นตัวช่วงเร่งการติดสีแทนที่จะชะลอหรือยับยั้งการดูดซึมและมักใช้กรดอะซิติก ในการปรับ pH ถ้าเปรียบเทียบกับสีกลุ่มแรกแล้ว สีกลุ่มนี้ให้คุณสมบัติความสม่ำเสมอในการย้อมดีกว่า แต่มีความคงทนต่อการซักดีกว่า เนื่องจากมีขนาด โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ขึ้น เรียกสีกลุ่มนี้ว่า milling acid dye

*กลุ่มที่ 3* เป็นกลุ่มสีที่เส้นใยดูดซึมได้ดีในสภาวะที่เป็นกลาง มีโครงสร้างโมเลกุลขนาดใหญ่ที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิต่ำๆ สีกลุ่มนี้จะกระจายตัวเป็นอนุภาคในน้ำ แต่ถ้าให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิใกล้จุดเดือด โมเลกุลสีจะกระจายตัวเหมือนสีกลุ่มแรก เนื่องจากสีกลุ่มนี้มีการกระจายตัวไม่ดี จึงควรย้อมด้วยความระมัดระวัง ในการย้อมมักใส่แอมโมเนียมอะซิเตตที่สามารถสลายตัวให้แอมโมเนียออกมาและระเหยไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ pH ของน้ำย้อมค่อยๆ ลดลง เป็นกรดอ่อนๆ สีกลุ่มนี้ มักถูกเรียกว่า fast acid dye หรือ neutral acid dye หรือ super-milling acid dye และเป็นสีที่ให้คุณสมบัติความคงทนต่อการซักดีมาก

2. สีแอซิดที่มีโลหะเป็นองค์ประกอบ (metal-complex acid dyes) สีนี้เป็นสีแอซิดที่เกิด co-ordinated complex กับโลหะ เช่น โครเมียม (chromium) และ โคบอลต์ (cobalt) โดยที่โลหะ 1 อะตอมจับกับโมเลกุลของสีข้อม 1 หรือ 2 โมเลกุล

### 2.1.6.2 สีเอโซอิก

สีเอโซอิก คือ สีเอโซ (azo) ที่ไม่ละลายน้ำ เรียกกันอีกชื่อว่าแนปทอล (naphthol) เกิดจากการรวมกันของสารประกอบ 2 ชนิดที่ต่างก็ละลายน้ำได้ กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ขึ้นที่ไม่ละลายน้ำ สารประกอบ 2 ชนิดนี้คือ แนปทอล หรือ coupling component (มักเป็นอนุพันธ์ของเบตาแนปทอล, *b*-Naphthol) และเกลือไดอะโซเนียม (diazonium)

#### คุณสมบัติทั่วไปของสีเอโซอิก

สีเอโซอิกใช้ทั้งในการย้อมเส้นใยเซลลูโลสและเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำ เช่น โพลีเอสเตอร์ และ ไตรอะซิเตต เป็นสีที่จัดว่ามีความคงทนทั่วไปอยู่ในเกณฑ์ดี โดยเฉพาะอย่างยิ่งความคงทนต่อการซักและแสงแดด จึงทำให้เหมาะกับการย้อมผลิตภัณฑ์ที่ใช้นอกร้าน เช่น ชงหรือเค้นท์ แต่ถ้าเป็นสีอ่อนความคงทนต่อแสงยังไม่ดีนัก

การใช้งานของสีเอโซอิกในปัจจุบันได้ลดลงอย่างมากเนื่องจากความยุ่งยากในขั้นตอนการย้อม ระยะเวลาที่ใช้ก็ค่อนข้างยาวนาน รวมทั้ง ราคาก็แพงในเรื่องสีด้วย สีเอโซอิกมีสีไม่ครบช่วง เช่น ไม่มีสีเขียวหรือสีฟ้าสด แต่มีครบในช่วงสีแดง รวมทั้งสีเลือดหมู สีส้มสการ์เลด และสีไวน์เบอร์กันดี

ในระหว่างกลุ่มสีที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสด้วยกันนั้น สีเอโซอิกยังคงถูกเลือกใช้ในกรณีที่ต้องการย้อมสีแดงสด ส้มและเหลืองที่มีมาตรฐานความคงทนสูงและสามารถย้อมได้ทั้งกระบวนการแบบคู่ซึมและแบบต่อเนื่อง ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 4 ขั้นตอนคือ

1. แนปทอลเลชัน (naphtholation) การย้อมด้วยเกลือแนปทอลเลด
2. ขั้นอินเทอมีเดียท (Intermediate step) ขจัดแนปทอลเลด ส่วนเกินออกจากผิวเส้นใย
3. คอลปลิง (coupling) การย้อมด้วยเกลือไดอะโซเนียม
4. การทำขั้นท้าย (after treatment) ล้างผ้าที่ย้อมแล้วให้สะอาด แล้วต้มสบูเพื่อเพิ่มความคงทน โดยเฉพาะต่อการซัก

### 2.1.6.3 สีเบสิก

สีเบสิกหรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า cationic dyes เนื่องจากเป็นสีที่ให้ประจุบวกเมื่อแตกตัวในน้ำย้อม และส่วนที่เป็นประจุบวกของสีเป็นส่วนที่เกิดพันธะกับเส้นใย ลักษณะเด่นของสีกลุ่มนี้คือ มีความสดใสสูง แต่มีความคงทนต่อแสงต่ำ สำหรับสีเบสิกที่ใช้กันในปัจจุบันนี้ได้รับการปรับปรุงให้มีความคงทนต่อแสงดีขึ้น แล้วนิยมใช้ในการย้อมเส้นใยอะคริลิก (acrylic fiber) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้ยังสามารถย้อมเส้นใยไหมและขนสัตว์ได้อีกด้วย

#### คุณสมบัติของสีเบสิก

สีเบสิกมีคุณสมบัติเด่น คือ สีสว่างสดใสและมีความเข้มสูง ละลายได้ง่ายในแอลกอฮอล์ แต่ละลายในน้ำได้ยาก ในการละลายควรทำด้วยความระมัดระวัง เพราะถ้าเกิดเป็นยางเหนียวๆ แล้วจะละลายได้ยากและน้ำที่ใช้ในการละลายสีหรือในการย้อมไม่ควรมีสถานะเป็นด่าง เนื่องจากสีเบสิกสลายตัวในสารละลายด่าง ได้สารไม่มีสีที่ละลายในน้ำได้เล็กน้อย เมื่อทิ้งไว้ชั่วคราวจะเกิดการตกตะกอน ดังนั้น ถ้าน้ำมีสถานะเป็นด่าง ควรทำให้เป็นกลางด้วยกรดอะซิติกก่อน

สีเบสิกเป็นสีที่มีแรงยึดกับเส้นใยอะคริลิกสูงมาก สีจะเข้าติดที่เส้นใยอย่างรวดเร็ว และหลังจากที่สีติดเส้นใยแล้ว การเคลื่อนย้ายกระจายตัวเพื่อให้ได้การติดสีที่สม่ำเสมอขึ้นเกิดได้ยากและประกอบกับตำแหน่งที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับเส้นใยอะคริลิกมีจำกัด ถ้าใช้สีเบสิกมากกว่า 1 ตัวมาผสมกัน ในการย้อมจะมีโอกาสได้ผลการย้อมที่ไม่สม่ำเสมอค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงควรเลือกสีที่มีอัตราการดูดซึมเท่ากัน หรือใกล้เคียงกันและสามารถเข้ากันได้

#### ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการย้อมด้วยสีเบสิก

- ค่าความอิ่มตัวของเส้นใย (Fiber Saturation Value, Sf) เป็นค่าคงที่ของเส้นใยอะคริลิกแต่ละชนิดที่บ่งชี้ถึงจำนวนของตำแหน่งในเส้นใยที่สามารถเกิดปฏิกิริยากับสีได้ ใช้อธิบายถึงปริมาณสีที่ถูกดูดซึมสูงสุดว่ามีค่าเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณสีเบสิกที่มีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 400 เกิดพันธะกับเส้นใย
- ความเร็วในการย้อมของเส้นใย (Fiber Dyeing Speed) อัตราการย้อมโดยทั่วไปขึ้นกับอุณหภูมิ ทรานสิชันและความเป็นผลึกหรือช่องว่างของเส้นใย เส้นใยที่มีโครงสร้างเปิดมากกว่าและมีอุณหภูมิทรานสิชันต่ำกว่าจะมีอัตราการย้อมเร็วกว่าหรือมีค่า V สูงกว่า สำหรับเส้นใยที่มีการผลิตจำหน่ายในปัจจุบัน มีค่า V ตั้งแต่ 1.0 ถึง 10.0 ตัวอย่างเช่น Acrilan 16 มีค่า V 3.0

- สารหน่วงเหนี่ยวหรือชะลอการย่อย (Retarder) สารหน่วงเหนี่ยวหรือชะลอการย่อย มีทั้งที่เป็นประจุบวกและประจุลบ แต่ที่มีประจุบวกได้รับความนิยมมากกว่า Cationic Retarder เมื่อใส่สารหน่วงเหนี่ยวการย่อยลงในน้ำย่อยจะแตกตัวและเข้าแย่งทำปฏิกิริยากับตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาได้ของเส้นใยกับโมเลกุลสี และเนื่องจากโมเลกุลของสารหน่วงเหนี่ยวที่ใช้มีขนาดเล็กกว่า จึงกระจายตัวไปยังตำแหน่งที่เกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่า เป็นการขัดขวางการเข้าทำปฏิกิริยาของสีชั่วคราว หรือชะลออัตราการย่อย แต่ในการย่อยมีสมมูลทางไดนามิกส์เข้ามาเกี่ยวข้องกับ โมเลกุลที่มีขนาดเล็กกว่าของสารหน่วงเหนี่ยว จะค่อยๆ ถูกแทนที่โดยโมเลกุลสีและมีแนวโน้มอยู่ได้นานกว่า เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นปริมาณสีที่เข้าแทนที่ก็มากขึ้นด้วย

#### 2.1.6.4 สีไคเร็กซ์

สีไคเร็กซ์เป็นสีที่ละลายน้ำได้และแสดงประจุลบเมื่ออยู่ในสภาพสารละลายมีแรงยึดกับเส้นใยเซลลูโลส วิธีการย่อยไม่ยุ่งยาก ต้องการสารช่วยย่อยที่จำเป็นเพียงชนิดเดียวเท่านั้น คือ เกลือ เช่น เกลือแกง (NaCl) หรือ เกลือ โซเดียมซัลเฟต ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) การที่สีไคเร็กซ์ยึดติดกับเส้นใยเซลลูโลสได้นั้น เชื่อกันว่ามาจากแรงดึงดูดเป็นจำนวนมากของพันธะไฮโดรเจนและแรงแวนเดอร์วาลส์ แต่แรงดึงดูดเหล่านี้ไม่แข็งแรง ประกอบกับคุณสมบัติที่ละลายน้ำได้ของสีไคเร็กซ์ จึงมีแนวโน้มที่สีจะหลุดออกมาจากภายในเส้นใยทำให้เป็นสีที่ไม่คงทนต่อการซัก แต่ความไม่คงทนต่อการซักนี้สามารถปรับปรุงได้ โดยการใช้สารที่มีประจุบวกให้มารวมตัวกับสีได้โครงสร้างที่ใหญ่ขึ้น แต่ความคงทนนี้ไม่ได้คงอยู่อย่างถาวร ดังนั้นในปัจจุบันจึงมักใช้สีไคเร็กซ์กับการย้อมสีอ่อนๆ

สีไคเร็กซ์สามารถนำมาย้อมได้ทั้งวิธีแบบดูดซึม (exhaustion) และแบบต่อเนื่อง (continuous) สำหรับวิธีการย้อมแบบดูดซึมนั้น มักใช้อุณหภูมิการย้อมที่ใกล้จุดเดือดและอาจใส่เกลือในช่วง 10-20 กรัม/ลิตร หรือ 5-25% ขึ้นกับความเข้มข้นของสีที่ต้องการ อัตราส่วนระหว่างผ้ากับน้ำย่อย รวมทั้งชนิดของสีไคเร็กซ์ที่ใช้ในทางปฏิบัติ การใส่เกลือมักแบ่งออกเป็นส่วนๆ เช่น 4 ส่วนในสัดส่วนที่ไม่เท่ากัน โดยจะเริ่มเติมส่วนที่มีปริมาณน้อยก่อน แล้วตามด้วยส่วนที่มีปริมาณมากขึ้น

กลุ่มสีไคเร็กซ์ส่วนใหญ่จะเป็นอะโซ มีคุณสมบัติเหมาะที่จะนำมาย้อมบนเส้นใยเซลลูโลส รวมทั้งเส้นใยเซลลูโลสแปรงรูป (regenerated cellulose) สำหรับการพิมพ์นั้นไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้พิมพ์โดยตรง ส่วนใหญ่จะนำมาใช้ในการย้อมเป็นสีพื้นแล้วทำดีสซาร์จ เพราะสามารถย้อมด้วยสีไคเร็กซ์ได้โทนสีเข้ม

สาเหตุที่ไม่นิยมใช้สปีโดเร็กซ์มาพิมพ์โดยตรง เพราะจะต้องใช้เวลานานในการทำให้สปีโดเร็กซ์ติดบนผ้า นอกจากนั้นการซักล้าง หลังพิมพ์ก็มีความยุ่งยากเพราะความคงทนของสีเมื่อเปียกจะต่ำ โอกาสที่สีหลุดออกมาติดบนผ้าพื้นขาวหรือผ้าสีอ่อนจึงมีมาก

การจำแนกชนิดสปีโดเร็กซ์ ถ้าจำแนกสปีโดเร็กซ์โดยอาศัยวิธีการย้อมและเป็นไปตามที่จำแนกไว้ในดัชนีสี สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่มคือ

กลุ่ม A ได้แก่ สีที่มีคุณสมบัติเคลื่อนย้ายกระจายตัวดี ให้ผลการย้อมที่มีความสม่ำเสมอดี ตัวอย่างสี  
กลุ่ม B ได้แก่ สีที่มีคุณสมบัติความสม่ำเสมอปานกลาง ต้องใส่เกลือเพื่อควบคุมผลการย้อมให้สม่ำเสมอ

กลุ่ม C ได้แก่ สีที่มีคุณสมบัติความสม่ำเสมออ่อน ต้องควบคุมสภาพการย้อมให้ดีทั้งการใส่เกลือและอุณหภูมิการย้อม

### ปัจจัยที่มีผลต่อการย้อม

- **เกลือ** ทำหน้าที่ส่งเสริมการดูดซึม โดยช่วยให้โมเลกุลสีสามารถกระจายตัวเข้าใกล้เส้นใย และเข้าไปภายในเส้นใยได้มากขึ้น นอกจากนี้เกลือยังทำให้ความสามารถในการละลายน้ำของสีลดลง เนื่องจากน้ำชอบที่จะรวมตัวกับเกลือมากกว่าสี ทำให้อยู่ในสภาพที่คล้ายกับว่ามีปริมาณน้ำที่ใช้ในการละลายสีน้อยลง จึงเสมือนเป็นการผลักดันให้สีเข้าไปภายในเส้นใยมากขึ้น
- **การละลายของสี** โดยทั่วไปสปีโดเร็กซ์ละลายน้ำได้แต่มีแนวโน้มรวมตัวกันอยู่ภายในสารละลายตั้งแต่ 2 โมเลกุล จนถึง 20 หรืออาจมากกว่า ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะกระจายเข้าไปในเส้นใยได้ แต่เนื่องจากมีสมดุระหว่างสีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ได้จากการรวมตัวกันและสีโมเลกุลเดี่ยวเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ดังนั้น เมื่อสีโมเลกุลเดี่ยวถูกเส้นใยดูดซึมไป สีโมเลกุลใหญ่จะกระจายตัวให้โมเลกุลเดี่ยวมาแทนที่เพื่อรักษาสมดุไว้และการรวมตัวกันของสีจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้น ดังนั้นในการย้อมสีเข้มควรหลีกเลี่ยงการใช้อัตราส่วนระหว่างผ้าต่อน้ำย้อมน้อยๆ นอกจากนี้การรวมตัวกันจะเพิ่มขึ้นตามปริมาณเกลือที่ใส่ลงไป แต่จะลดลงถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น
- **อุณหภูมิ** มีผลต่อทั้งการดูดซึม อัตราการย้อมและความสม่ำเสมอในการย้อม สำหรับการดูดซึมของสปีโดเร็กซ์นั้นจะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิจนถึงจุดๆหนึ่ง ถ้าสูงกว่าจุดนี้ขึ้นไป การดูดซึมจะลดลง สีแต่ละตัวมีอุณหภูมิการดูดซึมสูงสุดแตกต่างกัน อัตราการย้อมมีความแตกต่างกับการดูดซึม คือถ้าอุณหภูมิยิ่งสูงขึ้นอัตราการย้อมก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทำนองเดียวกันกับความสม่ำเสมอและการ

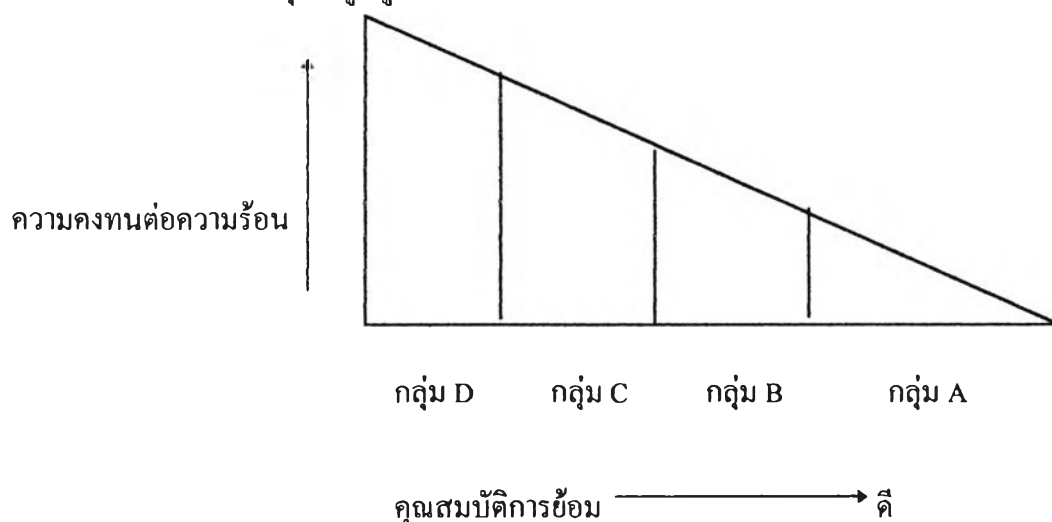
แทรกซึมที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เพื่อให้ได้ผลการซึมที่ดีสม่ำเสมอควรเลือกอุณหภูมิการซึมให้สูงกว่าอุณหภูมิที่ให้ค่าการดูดซึมสูงสุด

- **พีเอช** โดยทั่วไปการซึมสีไคเร็กซ์จะกระทำในสภาวะที่เป็นกลาง แต่บางครั้งอาจทำในสภาวะด่างโดยการใส่โซดาแอซลงเล็กน้อย เพื่อช่วยให้ได้ผลการซึมที่สม่ำเสมอ เนื่องจากด่างมีผลให้ความสามารถในการละลายของสีเพิ่มขึ้น อัตราการดูดซึมช้าลง รวมทั้งป้องกันสีบางตัวที่ไวต่อสภาวะที่เป็นกรดไม่ให้ถูกทำลายอีกด้วย

#### 2.1.6.5 สีคิสเพอร์ส

สีคิสเพอร์สเป็นสีที่ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้องได้น้อยมากแต่สามารถกระจายตัวในน้ำได้ มีแรงยึดกับเส้นใยที่ไม่ชอบน้ำบางชนิด เช่น โพลีเอสเตอร์ จัดเป็นสีที่มีน้ำหนักโมเลกุลไม่สูงนัก ส่วนใหญ่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 150-250 องศาเซลเซียส และระเหิดได้โดยไม่สลายตัว การละลายของสีชนิดนี้จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิ เช่น ที่ 80 องศาเซลเซียส สามารถละลายได้ตั้งแต่ 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร ถึง 1 กรัม/ลิตร แต่ที่ 130 องศาเซลเซียส ละลายได้หมด

รูปที่ 2.2 และตารางที่ 2.2 เป็นการจำแนกกลุ่มสีคิสเพอร์สโดยอาศัยคุณสมบัติการซึมและความคงทนต่อความร้อน สามารถแบ่งได้เป็น 4 กลุ่ม คือ A, B, C และ D โดยที่กลุ่ม A คือ กลุ่มสีที่มีค่าพลังงานน้อยที่สุด ให้ผลการซึมที่สม่ำเสมอดี กลุ่ม D คือ กลุ่มสีที่มีค่าพลังงานมากที่สุด มีความคงทนต่อความร้อนดีเยี่ยมแต่ซึมค่อนข้างยากเหมาะสำหรับการซึมที่อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2.2 การจำแนกกลุ่มสีคิสเพอร์สโดยอาศัยคุณสมบัติการซึมและความคงทนต่อความร้อน

(Hussain, 1994)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของสีดีสเพอร์สกลุ่มต่างๆ (Hussain, 1994)

กลุ่มสี	ความคงทนต่อ ความร้อน	คุณสมบัติการย้อม		
		ย้อมแบบดูดซึม		ย้อมแบบต่อเนื่อง
		แคริเออร์	อุณหภูมิสูง	
D	ดีเยี่ยม	ไม่เหมาะสม	เหมาะสม	เหมาะอย่างยิ่งสำหรับเทอร์โมฟิกซ์ Thermofix 215-220 °C
C	ดี	สำหรับสีอ่อน	เหมาะสม	เหมาะอย่างยิ่งสำหรับเทอร์โมฟิกซ์ Thermofix 200-215 °C
B	ปานกลาง	เหมาะสม	เหมาะสม	เหมาะสำหรับความร้อนน้อยกว่า 190 °C
A ไม่เหมาะสำหรับการย้อมโพลีเอสเตอร์ หรือผ้าผสมโพลีเอสเตอร์/ฝ้าย สามารถใช้ย้อมเซลลูโลสอะซิเตดได้				

ถ้าใช้สีดีสเพอร์ส ย้อมเส้นใยโพลีเอสเตอร์ จะสามารถย้อมได้หลายวิธีดังนี้

1. ย้อมที่จะเดือด โดยมีแคริเออร์ (carrier) เป็นตัวช่วย
2. ย้อมที่อุณหภูมิสูง (130 องศาเซลเซียส)
3. ย้อมโดยการจุ่มอัด ทำให้แห้งแล้วทำการผนึกสีโดยใช้ความร้อนแห้งที่ 200-210 องศาเซลเซียส ที่เรียกว่า pad-thermosol
4. ย้อมโดยการจุ่มอัด ทำให้แห้งแล้วผนึกสีโดยการใช้ไอน้ำที่เรียกว่า pad-steam

สำหรับการย้อมแบบอุณหภูมิสูงที่ 130 องศาเซลเซียสนั้น มักย้อมในเครื่องย้อม Package หรือ เครื่อง Jet เมื่อเพิ่มความร้อน สีจะละลายและค่อยๆซึมเข้าไปในเส้นใยช้าๆ จนกระทั่งความร้อนสูงถึง “อุณหภูมิวิกฤต” สีจะเข้าไปได้อย่างรวดเร็ว ถ้าเป็นสีที่ย้อมได้ในเวลาสั้นๆ ที่เรียกกันว่า คอมแพกต์ (compact) หรือการย้อมเร็ว (rapid dyeing) จะเป็นสีที่มีอุณหภูมิวิกฤตต่ำกว่าสีดีสเพอร์สทั่วไป สีเหล่านี้จะเข้าไปในเส้นใยได้มากกว่าสีดีสเพอร์ส ปกติที่อุณหภูมิก่อนถึง 130 องศาเซลเซียส ดังนั้น ถ้าย้อมที่ 130 องศาเซลเซียสต่อไปอีกเพียงประมาณ 15 นาที สีก็จะเข้าไปได้เกือบสมบูรณ์

สีดีสเพอร์สเป็นกลุ่มสีที่สังเคราะห์ขึ้นมาใช้สำหรับการย้อมและพิมพ์บนวัสดุสิ่งทอประเภทอะซิเตด และโดยเฉพาะอย่างยิ่งโพลีเอสเตอร์ ตัวอย่างชื่อสีดีสเพอร์สและบริษัทผู้ผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2.3



ตารางที่ 2.3 ตัวอย่างสีย้อมเพอร์สและผู้ผลิต (Hussain, 1994)

สีย้อมเพอร์ส	ผู้ผลิต
Resolin	Bayer
Palanil	BASF
Samaron	Dystar
Foron	Clariant
Terasil	Ciba Specialty Chemicals
Dispesol	Zeneca
Serisol	Yorkshire
Sumikaron	Sumitomo

สีย้อมเพอร์ส เหมาะสำหรับที่จะนำมาพิมพ์บนผ้าโพลีเอสเตอร์ให้สีที่สดใสและมีความคงทนดี วิธีการที่จะทำให้สีย้อมบนผ้าโพลีเอสเตอร์นั้น สามารถทำได้หลายวิธีการด้วยกัน เช่น

- วิธีการใช้น้ำความดันสูง (high pressure steaming process)
- วิธีการใช้น้ำที่อุณหภูมิสูง (high temperature steaming process)
- วิธีการเทอร์โมซอล (thermosol process)

### 2.1.6.6 สารสี

สารสีประกอบด้วยทั้งชนิดที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำยึดติดกับผิวเส้นใยโดยมีกาวโพลีเมอร์ (polymeric binders) เป็นตัวเชื่อมโดยใช้วิธีจุ่มอัด (padding) ทำให้แห้งและใช้ความร้อนสูงทำให้เกิดการยึดติด (curing) ตามลำดับ นอกจากนี้ยังสามารถใช้สารสีในการพิมพ์ผ้าที่ทำจากเส้นใยได้ทุกชนิดด้วย

### 2.1.6.7 สีรีแอคทีฟ

สีรีแอคทีฟเป็นสีที่มีประจุลบที่ละลายน้ำได้ สามารถทำปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ในเส้นใยเซลลูโลส ได้พันธะโควาเลนต์ที่มีความแข็งแรงกว่าพันธะไฮโดรเจนที่เกิดระหว่างสีไดเรกต์กับเส้นใยเซลลูโลส มากจึงมีความคงทนต่อการซักดี

สีรี แอคทีฟนอกจากจะเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลในเซลลูโลสได้แล้ว ยังสามารถเกิดปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำได้ด้วย ทำให้เกิดการสูญเสียบางส่วนไป แต่อย่างไรก็ตามสีส่วนใหญ่ยังคงมีแนวโน้มที่จะทำปฏิกิริยากับเส้นใยด้วยเหตุผล 2 ประการ คือ

1. อัตราเร็วของปฏิกิริยาระหว่างสีกับเส้นใยสูงกว่าอัตราเร็วระหว่างสีกับน้ำมาก
2. มีความเป็นไปได้ที่สีกระจายตัวเข้าทำปฏิกิริยากับเส้นใยมากกว่าน้ำ

### 2.1.6.8 สีซัลเฟอร์

สีซัลเฟอร์เป็นสีที่มีซัลเฟอร์ (S) เป็นองค์ประกอบ ในสภาพปกติไม่ละลายน้ำ แต่สามารถใช้สารรีดิวซ์เปลี่ยนให้อยู่ในรูปที่ละลายน้ำในสถานะต่างได้ ซึ่งเป็นรูปที่มีแรงยึดกับเส้นใยเซลลูโลส หลังจากผ่านขั้นตอนการย้อมแล้วต้องทำการออกซิไดส์ให้ได้รูปที่ไม่ละลายน้ำกลับคืนมาภายในเส้นใย นั่นก็คือสีซัลเฟอร์มีขั้นตอนการใช้งานแบ่งออกได้ 3 ขั้นตอนใหญ่ๆ คือ

- 1.รีดักชัน
- 2.การย้อม
- 3.ออกซิเดชันและกระบวนการหลังการย้อม

#### คุณสมบัติทั่วไป

การย้อมด้วยสีซัลเฟอร์สามารถให้ผลการย้อมที่มีความคงทนต่อการซักดีเยี่ยมและความคงทนต่อแสงดี ในราคาต้นทุนการย้อมที่ไม่สูง แต่สีซัลเฟอร์มีขีดจำกัดในเรื่องสีคือ มีช่วงสีไม่ครบโดยเฉพาะสีสว่าง นอกจากนี้ยังมีขีดจำกัดในการย้อมสีอ่อนที่ให้คุณสมบัติความคงทนต่อแสงต่ำ ดังนั้นจึงมักย้อมสีซัลเฟอร์เฉพาะสีดำ น้ำตาล กรมท่าและเขียวมะกอก ในระดับความเข้มสีสูงถึงปานกลาง

สีซัลเฟอร์เมื่อเทียบกับสีแควแล้ว เปลี่ยนเป็นรูปที่ละลายน้ำได้ง่ายกว่า โดยการใช้สารรีดิวซ์ที่ไม่รุนแรง เช่น โซเดียมซัลไฟด์ (sodium sulfide) กับโซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอส ส่วนการออกซิไดส์หลังการย้อมก็ใช้สารที่มีคุณสมบัติไม่รุนแรงเช่นกัน เช่น โซเดียมโบรเมท หรือโปตัสเซียมไอโอเดท แต่ถ้าใช้สารออกซิไดส์รุนแรง เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ( $H_2O_2$ ) ควรใช้ด้วยความระมัดระวังเพราะอาจเกิดการออกซิไดส์มากเกินไปได้สีซัลเฟอร์ที่ละลายน้ำอีกรูปหนึ่งได้

ผ้าที่ย้อมด้วยสีซัลเฟอร์ ถ้าเก็บไว้ที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิห้องที่มีความชื้น มีแนวโน้มที่จะเกิดออกซิเดชันได้กรดซัลเฟอร์ที่ทำให้เส้นใยเปื่อยได้ เพื่อป้องกันปัญหานี้ควรล้างผ้าที่ย้อมแล้วด้วยสารละลายด่างปานกลางในการล้างขั้นสุดท้าย

### 2.1.6.9 สีแวนด์

สีแวนด์ หรือ indanthren dyes เหมาะสำหรับการนำมาพิมพ์บนเส้นใยเซลลูโลส เป็นสีที่ไม่ละลายน้ำ ไม่มี affinity กับเส้นใยโดยตรง ต้องทำให้อยู่ในรูปของสารละลายเสียก่อนด้วยไฮโดรซัลไฟท์หรือ โซเดียมไดโทไอโนท์ในสถานะที่เป็นด่าง สีจะอยู่ในรูปของ โซเดียมลิวโคซึ่งละลายน้ำได้และมี affinity กับเส้นใย เมื่อทำการออกซิไดส์จะกลับมาอยู่ในรูปของสารที่ไม่ละลายเหมือนเดิม

สีแวนด์มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ มีหลักการย้อมคล้ายสีซัลเฟอร์ คือ ก่อนย้อมต้องทำการรีดิวซ์ เปลี่ยนให้อยู่ในรูปลิวโคที่ละลายน้ำได้ (water-soluble leuco) ซึ่งเป็นรูปที่มีแรงยึดกับเส้นใย จากนั้นจึงทำการออกซิไดส์ให้ได้รูปที่ไม่ละลายน้ำกลับคืนมา

ตารางที่ 2.4 ตัวอย่างชื่อทางการค้าของสีแวนด์พร้อมผู้ผลิต (Hussain, 1994)

ชื่อสีแวนด์	ชื่อผู้ผลิต
Cibanon	Ciba Specialty Chemicals
Sandothren	Clariant
Indanthren	Bayer
Indanthren	BASF
Indanthren	DyStar
Caledon	ICI
Nihonthrene	Sumitomo

สีแวนด์แบ่งตามโครงสร้างได้ 2 พวกใหญ่ๆ คือ

1. อินดิโกอยด์ (indigoid)
2. แอนทราควิโนน (anthraquinone)

การใช้งานแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน คือ

1. รีดักชัน หรือเวดดิ้ง เป็นขั้นตอนทำให้สีเวดที่ไม่ละลายน้ำเปลี่ยนรูปเป็น ลิวโคที่ละลายน้ำได้ในสถานะที่เป็นค่า และมีความเข้มข้นกับเส้นใยเซลลูโลส สารรีดิวซ์ที่นิยมใช้ คือ โซเดียมไดไทโอไนท์ (sodium dithionite) หรือโซเดียมไฮโดรซัลไฟท์ (sodium hydrosulphite) หรือไฮดรอส (hydros) ในการรีดิวซ์ปริมาณสารรีดิวซ์ที่ต้องการใช้ขึ้นอยู่กับกลุ่มที่ต้องการถูกรีดิวซ์ในโมเลกุลสี และควรให้มีปริมาณมากเกินพอเนื่องจากไฮดรอสมีความไวต่อออกซิเจนมาก นอกจากเพื่อให้สมดุลกับปริมาณออกซิเจนในน้ำย้อมแล้วยังเพื่อชดเชยกับการออกซิเดชันที่อาจเกิดขึ้นเมื่อผ้าสัมผัสอากาศ นอกจากต้องควบคุมปริมาณของสารรีดิวซ์แล้ว ยังควรควบคุมทั้งพีเอช และอุณหภูมิ ดังนั้นในการใช้งานจึงควรศึกษาคุณสมบัติการย้อมของสีแต่ละตัว

2. การย้อม วิธีการย้อมสีเวดคล้ายกับสีไดเร็กต์คือ ใช้เกลือเป็นตัวช่วยในการย้อม แต่เนื่องจากสีเวดมีความเข้มข้นสูงมากเมื่อเทียบกับสีไดเร็กต์แม้แต่การย้อมที่อุณหภูมิต่ำ ดังนั้นจึงควรควบคุมการเพิ่มอุณหภูมิให้เป็นไปอย่างสม่ำเสมอ

3. ออกซิเดชัน หลังสิ้นสุดขั้นตอนการย้อมและก่อนการออกซิเดชัน ควรนำวัสดุที่ย้อมมาล้างเพื่อขจัดสีที่ติดอยู่อย่างหลวมๆ และสารต่างๆ ที่หลงเหลืออยู่ เช่น สารรีดิวซ์และค่า ในการทำออกซิเดชันสารที่ใช้กัน ได้แก่ ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ และ โซเดียมเปอร์โบรเมต ต่อจากการออกซิไดส์ต้องนำวัสดุที่ย้อมแล้วมาต้มในสารละลายเซอร์เฟคแทนท์ เพื่อขจัดสีที่เกาะที่ผิวเส้นใยซึ่งจะมีผลให้ความคงทนต่อการซักและการขัดถูดีขึ้น

### การจำแนกสีเวด

เนื่องจากสีเวดมีความแตกต่างกันมาก สถานะการย้อมที่ให้ผลดีที่สุดจึงแตกต่างกัน สีบางกลุ่มสามารถรีดิวซ์ได้ง่าย บางกลุ่มต้องใช้อุณหภูมิในการรีดิวซ์สูงกว่าและปริมาณไฮดรอสกับค่ามากกว่า ดังนั้นจากเหตุผลนี้สามารถแบ่งกลุ่มสีเวด ได้เป็น IN, IK, IW และ IN แบบพิเศษ โดยที่

N = การย้อมปกติธรรมดา

W = อุณหภูมิแบบอุ่น

K = อุณหภูมิเย็น

กลุ่มที่ใช้กันมากในปัจจุบันคือ IN กลุ่มที่ใช้กันบ้าง คือ IW และกลุ่มที่ใช้กันน้อยคือ IK

สีกลุ่ม IN มีขนาดใหญ่เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่นๆ สีกลุ่มนี้ละลายน้ำแล้วมีแรงยึดกับเส้นใยสูงมาก จึงไม่  
 ต้องใส่เกลือเพื่อช่วยส่งเสริมการดูดซึมและเนื่องจากเป็นกลุ่มสีที่ละลายน้ำยาก จึงต้องใช้อุณหภูมิ  
 ในการรีดิวซ์สูงและปริมาณสารรีดิวซ์กับค่าต่างๆ

สีกลุ่ม IK มีคุณสมบัติตรงข้ามกับ IN คือ มีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า ละลายได้ง่ายกว่า ต้องการ  
 อุณหภูมิในการรีดิวซ์ต่ำกว่า ใช้สารรีดิวซ์และค่าในปริมาณที่น้อยกว่า แต่ต้องใส่เกลือลงไปช่วย  
 ส่งเสริมการดูดซึมด้วยเนื่องจากสีมีแรงยึดกับเส้นใยไม่มากนัก

กระบวนการย้อมที่สำคัญ ได้แก่

1. การย้อมแบบดูดซึม (batchwise dyeing process)
2. การย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง (semi-continuous process)
3. การย้อมแบบต่อเนื่อง (continuous process)

การย้อมแบบดูดซึม มีวิธีต่างๆ ดังนี้

- **กระบวนการลิวโค (Leuco Process)** กระบวนการแบบนี้เป็นกระบวนการย้อมที่เตรียมน้ำย้อม  
 ในสภาพที่ถูกรีดิวซ์ไว้ก่อนแล้ว โดยมีทั้งสารละลายต่าง สารรีดิวซ์ เกลือและอื่นๆ อยู่ในน้ำย้อม  
 ในปริมาณที่ต้องการ และขึ้นกับอัตราส่วนระหว่างผ้าค่อน้ำย้อมที่ใช้ คุณสมบัติการย้อมของสี  
 รวมทั้งปริมาณของสีที่ใช้
- **กระบวนการแบบพรี-พิกเมนต์เทชั่น (Pre-pigmentation Process)** กระบวนการนี้เป็นกระบวน  
 การที่ทำให้สีอยู่บนวัสดุอย่างสม่ำเสมอก่อนในสภาพที่ยังไม่ได้ถูกรีดิวซ์คือ ในสภาพที่ยังไม่  
 ละลายน้ำและยังไม่มีแรงยึดกับเส้นใยเป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับสีที่มีขนาดโมเลกุลเล็กๆ การทำให้  
 สีอยู่บนผิวเส้นใยหรือพิกเมนต์เทชั่นนั้น จะทำให้อุณหภูมิห้องแล้วจึงค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิขึ้นไป  
 ที่ 60-80 องศาเซลเซียส ถ้าจำเป็นก็สามารถใส่เกลือเพื่อช่วยการดูดซึมได้ ต่อจากนั้นจึงเติมด่างและ  
 ไฮดรอกไซด์เพื่อเปลี่ยนรูปสีที่อยู่บนเส้นใยเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการย้อมจนสมบูรณ์
- **กระบวนการแบบเซมิ-พิกเมนต์เทชั่น (semi-continuous process)** ในตอนเริ่มต้นน้ำย้อม มีทั้งสี  
 และสารเคมีอยู่รวมกันที่อุณหภูมิห้องแล้วค่อยๆเพิ่มอุณหภูมิให้สูงขึ้นเพื่อทำแวลด์ดิง (vatting)  
 อย่างช้าๆ สีแวลด์ที่กระจายตัวอยู่บนวัสดุจะเริ่มถูกรีดิวซ์และถูกดูดซึมโดยเส้นใย ในขณะที่เดียวกัน  
 การย้อมวิธีนี้ให้ผลการย้อมที่สม่ำเสมอว่าการย้อมแบบลิวโค
- **การย้อมแบบกึ่งต่อเนื่อง (Continuous Dyeing Process)** สิ่งจำเป็นสำหรับการย้อมแบบนี้คือ  
 วัสดุที่จะย้อมต้องสามารถดูดซึมได้ดีคือ เปียกได้เร็ว และสม่ำเสมอ กระบวนการที่นิยมคือ  
 pad/steam สีถูกอัดลงบนผ้า ทำให้แห้งแล้วอัดซ้ำอีกครั้งด้วยสารละลายด่างที่ผสมอยู่กับสาร

รีคิวซิง นำมาอบอีกครั้งด้วยไอน้ำประมาณ 60 วินาที ที่อุณหภูมิเกิน 100 องศาเซลเซียส เล็กน้อย เพื่อเปลี่ยนรูปสีและให้สีติดแน่นบนผ้า แล้วจึงทำออกซิเดชัน ล้างน้ำ และต้มสบู่ ตามลำดับ

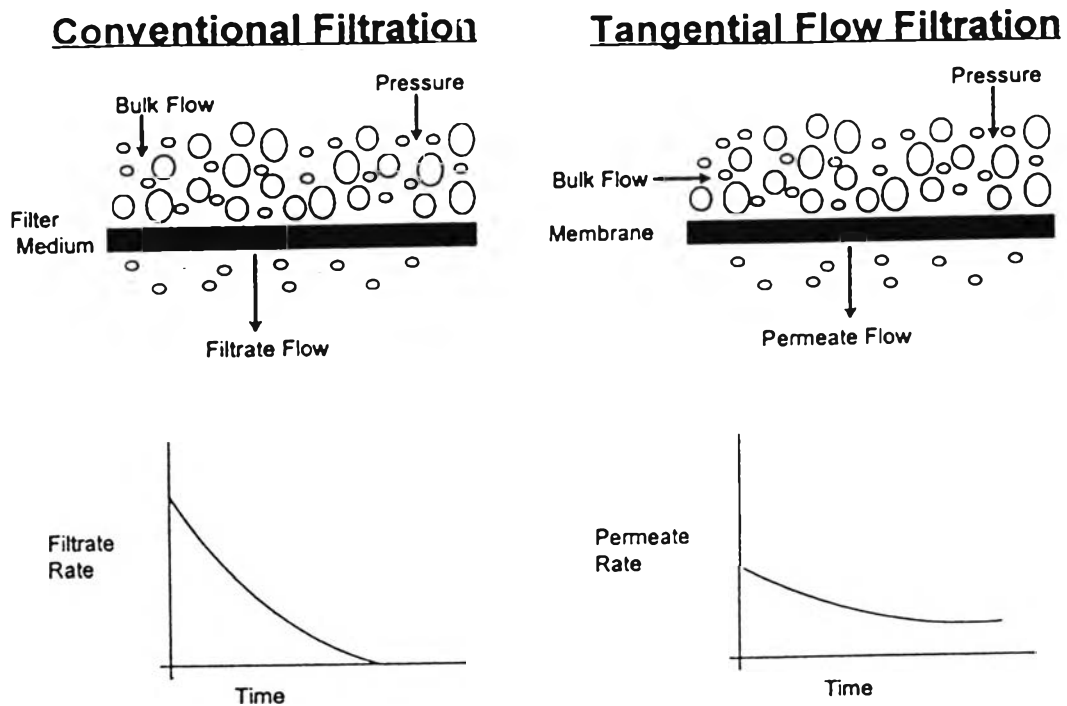
## 2.2 กระบวนการเมมเบรน

Fane (1987) ได้กล่าวว่า กระบวนการเมมเบรน (membrane process) เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเมมเบรนเพื่อแยกสาร หรือเพิ่มความเข้มข้น หรือทำสารให้บริสุทธิ์ขึ้น สำหรับสารละลายหรือก๊าซผสม กระบวนการเมมเบรนถูกค้นพบมานานกว่า 30 ปีแล้ว และมีการพัฒนาขึ้นมาเป็นลำดับ จนปัจจุบันนี้มีการใช้กระบวนการเมมเบรนหลายกระบวนการในอุตสาหกรรมต่างๆ โดยอาจนำไปใช้แทนกระบวนการแยกธรรมดา หรือใช้เสริมในกระบวนการเดิม

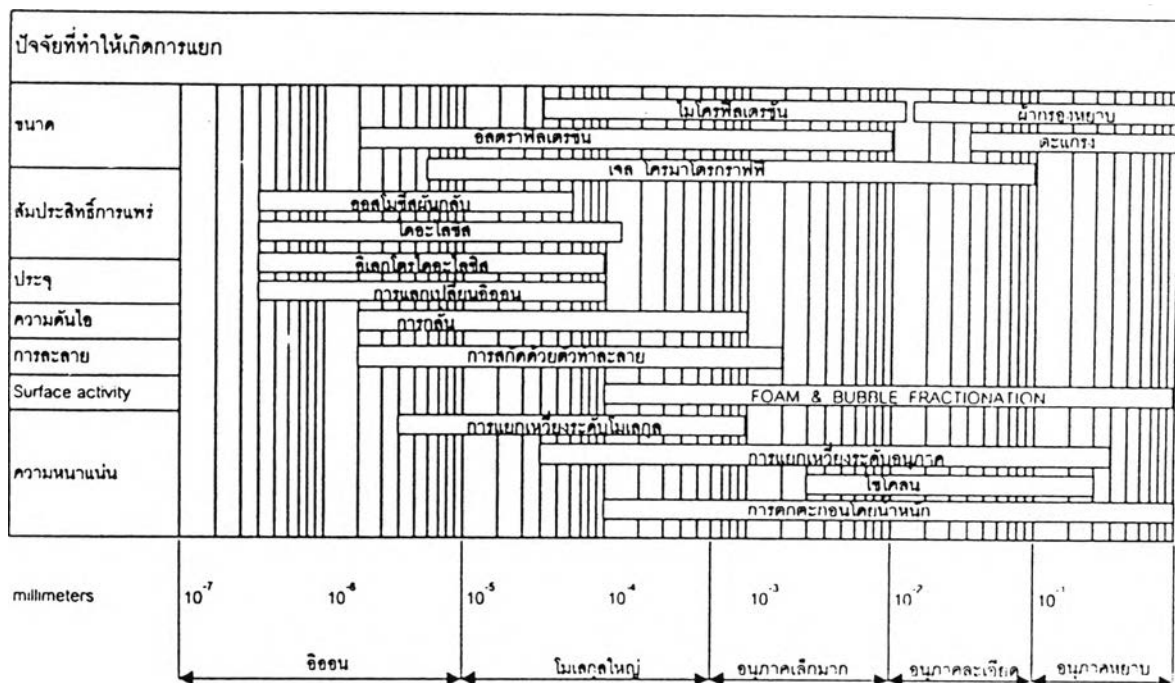
หลักการสำคัญของกระบวนการเมมเบรน คือ จะต้องมีแรงขับเคลื่อนที่ทำให้สารละลายไหลผ่านแผ่นเมมเบรนและเกิดการแยก เช่น ผลต่างของความเข้มข้น หรือผลต่างของความดัน การกรองโดยใช้แผ่นเมมเบรนนี้มีข้อแตกต่างจากการกรองธรรมดา รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นกรองธรรมดากับแผ่นเมมเบรน จะเห็นว่าทิศทางการไหลของน้ำแตกต่างกัน ทำให้การกรองแบบธรรมดามีการอุดตันของอนุภาคเร็วกว่าการกรองผ่านเมมเบรน แผ่นเมมเบรนที่ใช้งานอยู่ทั้งหมด กล่าวได้ว่าเป็นแผ่นเมมเบรนที่มีการสังเคราะห์หรือผลิตขึ้น (synthetic membranes) หรือไม่ใช้แผ่นจากธรรมชาติ ถ้าจะให้คำจำกัดความ อาจอธิบายได้ว่า แผ่นเมมเบรน คือ ตัวกลางซึ่งอาจเป็นฟิล์มบางๆ หรือหยดขนาดเล็กมากๆ ที่ทำหน้าที่กั้นระหว่าง 2 เฟส โดยทั่วไป แผ่นเมมเบรนเป็นฟิล์มที่เป็นของแข็ง และอาจเป็นของเหลว ลักษณะที่สำคัญที่สุดของแผ่นเมมเบรน คือ มีคุณสมบัติในการเลือกผ่านสารหนึ่งมากกว่าสารอื่น (semi-permeable/permeable membrane) การเลือกผ่านสารเป็นผลมาจากโครงสร้างทางเคมี หรือทางกายภาพ ซึ่งอาจพิจารณาได้จากการมี affinity ของแผ่นเมมเบรนต่อสารนั้นๆ หรือจากขนาดของรูพรุน หรือจากการมีประจุของแผ่นเมมเบรน เป็นต้น

ในที่นี้จะเปรียบเทียบกระบวนการเมมเบรนกับกระบวนการแยกอื่นๆ ให้เห็นชัดเจนขึ้นว่า กระบวนการเมมเบรนมีส่วนที่เหมือนหรือแตกต่างจากกระบวนการแยกอื่นๆอย่างไร รูปที่ 2.4 แสดงการจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดของโมเลกุลหรืออนุภาค และตามตัวแปรสำคัญหรือสาเหตุที่ทำให้เกิดการแยกได้ โดยโมเลกุลขนาดเล็ก หรือไอออนที่มีขนาด  $10^{-17}$ - $10^{-16}$  nm หรือ 0.0001-0.001  $\mu\text{m}$  อาจแยกออกจากสารละลายได้โดยใช้ออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis, RO) ไดอะไลซิส (dialysis, D) หรืออิเล็กโทรไดอะไลซิส (electrodialysis, ED) โดยทั้ง 3 กระบวนการนี้จัดเป็นกระบวนการเมมเบรน ซึ่งตัวแปรที่ทำให้เกิดการแยกต่างจากการแลกเปลี่ยนไอออน

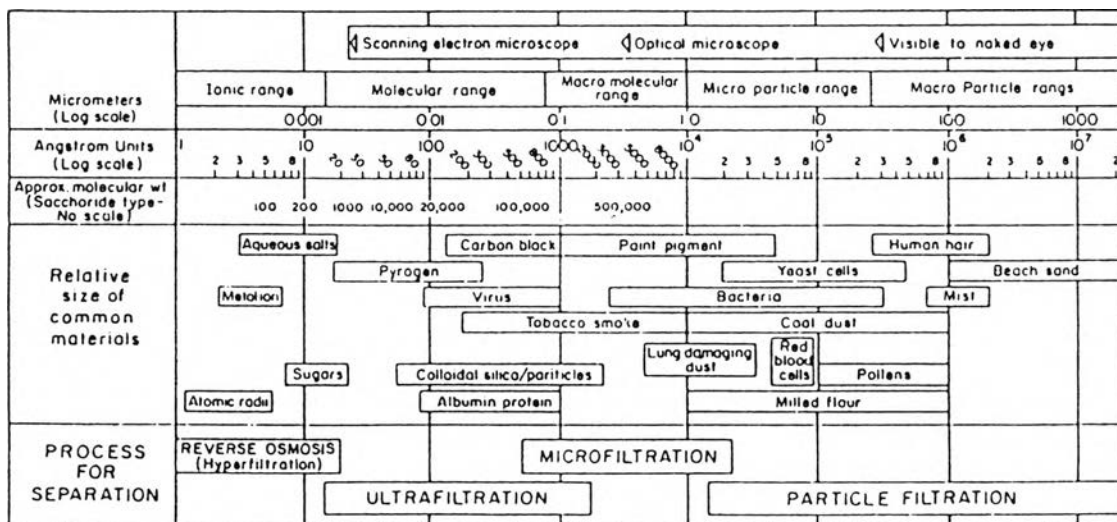
(ion- exchange resin) และการกลั่นหรือการสกัดด้วยตัวทำละลาย (solvent extraction) โมเลกุลที่มีขนาดใหญ่ขึ้นอาจแยกโดยใช้อัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration, UF) ซึ่งก็เป็นกระบวนการเมมเบรน หรือใช้เจลโครมาโตกราฟี (gel chromatography) เป็นต้น สำหรับอนุภาคเล็กและใหญ่ ก็อาจแยกโดยใช้ไซโคลน (cyclone) เครื่องแยกเหวี่ยง (centrifuge) และไมโครฟิลเตรชัน (microfiltration, MF) ซึ่งส่วนมากอาศัยผลของขนาดและความหนาแน่นในการแยก รูปที่ 2.5 นำกระบวนการเมมเบรนหลักๆ คือ RO UF และ MF มาเปรียบเทียบให้เห็นชัดเจนขึ้นว่ากระบวนการดังกล่าวสามารถแยกโมเลกุลหรืออนุภาคของสารใดๆ ได้บ้าง



รูปที่ 2.3 เปรียบเทียบการกรองน้ำผ่านแผ่นกรองธรรมดา กับแผ่นเมมเบรน (William, 1995)



รูปที่ 2.4 การจำแนกกระบวนการแยกตามขนาดของ โมเลกุล/อนุภาค (อำไพ,2536)



รูปที่ 2.5 ตัวอย่างโมเลกุล/อนุภาคที่สามารถแยกได้โดยใช้กระบวนการเมมเบรนและการกรอง

(Vigneswaran et al.,1991)



### 2.2.1 การจำแนกกระบวนการเมมเบรน

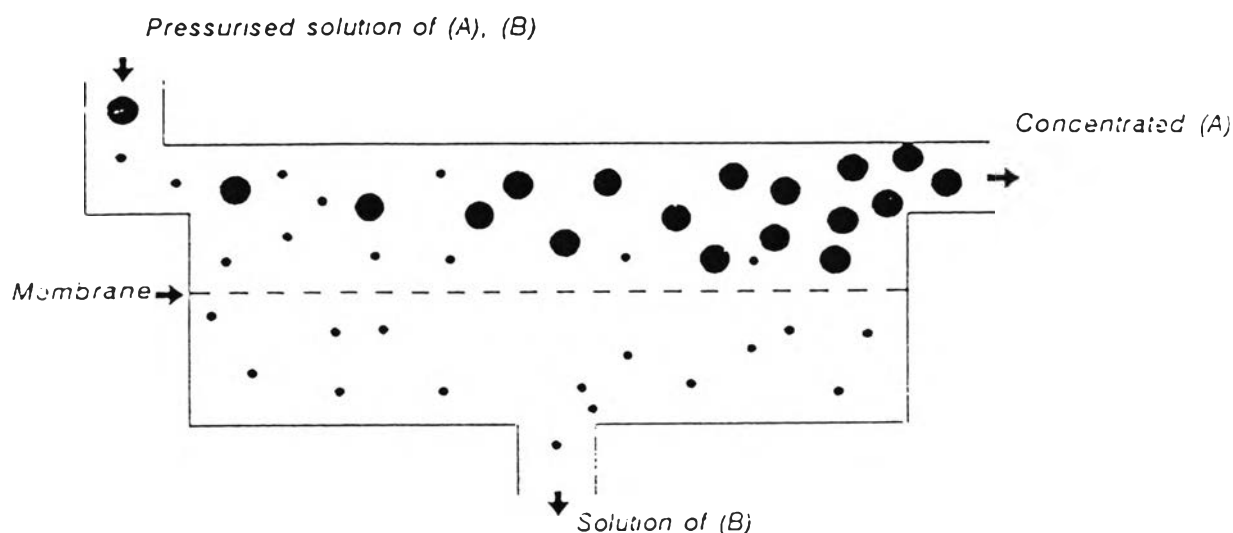
ตารางที่ 2.5 เป็นสรุปกระบวนการเมมเบรนทั้งหมดที่ได้มีการพัฒนาขึ้น โดยจำแนกตามหลักการของแรงขับเคลื่อน (เช่น ความเข้มข้น ความดัน ความต่างศักย์) สารที่ผ่านหรือถูกกักกันโดยแผ่นเมมเบรน รูปทั่วไปของกระบวนการเมมเบรนอาจพิจารณาจากรูป 2.6 ซึ่งสารละลายป้อน (feed) ไหลผ่านแผ่นเมมเบรนโดยแรงขับเคลื่อน สารละลายส่วนที่สามารถผ่านแผ่นเมมเบรนได้ คือ เพอมิเอท (permeate) และส่วนที่ไม่สามารถผ่านได้ คือ รีเทนเทท (retentate หรือ concentrate) ตัวแปรสำคัญที่แสดงความสามารถในการแยกคือ อัตราการไหลผ่านแผ่นเมมเบรนหรือฟลักซ์ (ของเพอมิเอท) ซึ่งอาจมีหน่วยเป็นปริมาตร หรือน้ำหนัก หรือโมล ของเพอมิเอทต่อเวลา ต่อหน่วยพื้นที่แผ่นเมมเบรน

**กระบวนการไดอะไลซิส (Dialysis process)** ไดอะไลซิสใช้ผลต่างของความเข้มข้นของตัวถูกละลายระหว่างสองด้านของแผ่นเมมเบรนเป็นแรงขับเคลื่อนให้สารถ่ายเทผ่านแผ่นเมมเบรน ตัวถูกละลายขนาดเล็กจะถ่ายเทโดยการแพร่ผ่านแผ่นเมมเบรนจากด้านที่มีความเข้มข้นสูง ไปสู่ด้านที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำ ดังนั้น จึงสามารถใช้ในการแยกเกลือและตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากตัวถูกละลายขนาดใหญ่ การประยุกต์ใช้ที่สำคัญอันแรกคือ ใช้แผ่นเซลโลเฟน (cellophane) เพื่อแยกเกลือและตัวถูกละลายขนาดเล็กออกจากโปรตีนและวัคซีนเซรุ่ม การใช้งานหลักทางแพทย์คือ การทำเลือดให้บริสุทธิ์ (ไตเทียม) โดยแยกยูเรีย กรดยูริก และสารอื่นจากเลือด แต่การประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมไม่มากนัก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ช้ามากเพราะใช้ผลต่างความเข้มข้นเป็นแรงขับเคลื่อน และแผ่นเมมเบรนมีความสามารถในการแยกต่ำ คือ ไม่สามารถแยกโมเลกุลที่มีขนาดใกล้เคียงกันได้

**กระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิส (Electrodialysis, ED)** อิเล็กโตรไดอะไลซิสเป็นกระบวนการแยกองค์ประกอบที่มีประจุ (ไอออน) จากสารละลายอิเล็กโตรไลต์ โดยใช้แผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนมาต่ออนุกรมกันและอยู่ระหว่างขั้วบวก (anode) และลบ (cathode) มีความต่างศักย์ระหว่างขั้วอิเล็กโตรดเป็นแรงขับเคลื่อนร่วมกับการเลือกผ่านไอออนของแผ่นเมมเบรนทำให้เกิดการแยก โดยไอออนบวกจะผ่านแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนบวก ส่วนไอออนลบก็จะผ่านแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนลบเท่านั้น เป็นผลให้ได้สารละลายที่มีความเข้มข้นของไอออนสูง และสารละลายเจือจาง การใช้งานที่สำคัญของกระบวนการอิเล็กโตรไดอะไลซิสคือ การผลิตน้ำดื่มจากน้ำกร่อย หรือน้ำทะเล การเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเกลือ การบำบัดน้ำเสีย เช่น การแยกโลหะ ไอออนกลับคืนในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ (electroplating)

ตารางที่ 2.5 หลักการของกระบวนการเมมเบรน (Kumar,1994)

กระบวนการ	รูปแบบ	แรงขับเคลื่อน	สารที่ผ่าน	สารที่แยกกัน
ไดอะไลซิส (Dialysis)		$\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	ตัวถูกละลายที่เป็น ไอออน, โมเลกุลเล็ก	สารที่ละลายน้ำได้ หรือ สาร แขวนลอยที่มีน้ำหนัก, โมเลกุลสูงกว่า 1,000
อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)		$\Delta V$ ความต่างศักย์ 1-2V / cell pair	ไอออนบวก หรือ ลบ	สารที่ไม่ใช่ไอออน และสาร โมเลกุลใหญ่
ออสโมซิสผกผัน (Reverse osmosis)		$\Delta P$ ผลต่างความดัน 1-10 MPa	ตัวทำละลาย (น้ำ)	สารที่ละลายน้ำและ สาร แขวนลอย
อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration)		$\Delta P$ ผลต่างความดัน 100-800 MPa	น้ำและสารโมเลกุล เล็ก (น้ำหนัก โมเลกุล < 1,000)	สารโมเลกุลใหญ่ และคอลลอยด์
ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration)		$\Delta P$ ผลต่างความดัน 100-150 MPa	น้ำและโมเลกุลที่ ละลายน้ำได้	สารแขวนลอย, อนุภาค ใหญ่ และคอลลอยด์บาง ชนิด
การแยกก๊าซ Gas Permeation หรือ Gas Diffusion		$\Delta P$ ผลต่างความดัน $\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	ก๊าซ หรือ โด ที่ผ่าน เมมเบรนได้ดี	ก๊าซ หรือ โด ที่มีเมมเบรนแยก
เพอวาปอเรชัน Pervaporation		$\Delta P$ ผลต่างความดัน $\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	น้ำหรือสารอินทรีย์ (จับกับชนิดเยื่อ เมมเบรน)	สารที่ผ่านเมมเบรนไม่ได้
เยื่อเมมเบรนของเหลว Liquid Membrane		$\Delta C$ ผลต่างความเข้มข้น	อิมัลชันเวก/ลบ หรือ สารโมเลกุลเล็ก	



รูปที่ 2.6 หลักการของกระบวนการเมมเบรน (Green,1979)

ออสโมซิสผันทกลับ (Reverse osmosis, RO) หรืออาจเรียกว่า hyperfiltration เป็นกระบวนการแยกสารละลายโดยใช้ผลต่างของความดันระหว่างแผ่นเมมเบรนเป็นแรงขับเคลื่อน แผ่นออสโมซิสผันทกลับ มีความสามารถในการกักกัน โมเลกุลขนาดเล็ก เช่น เกลือ น้ำตาล (น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 1000 หรือมีขนาด 0.1-1.0 nm) แต่ยอมให้น้ำผ่านได้ และเป็นแผ่นที่มีโครงสร้างแน่นหรือไม่มีรูพรุน การผ่านแผ่นของสารเกิดจากความสามารถในการละลายและการแพร่ (solution-diffusion) ในแผ่น และเนื่องจากสารละลายของตัวถูกละลายโมเลกุลเล็กมีความดันออสโมติกสูง ทำให้ความดันที่ใช้ในการป้อนสารละลายต้องมีค่าสูง คือ อยู่ระหว่าง 1-10 Mpa หรือ 10-100 atm

การประยุกต์ใช้ที่แพร่หลายของกระบวนการออสโมซิสผันทกลับ คือ การแยกเกลือจากน้ำกร่อย น้ำทะเล เพื่อผลิตน้ำจืด การเพิ่มความเข้มข้นของน้ำผลไม้ การผลิตน้ำที่มีความบริสุทธิ์สูง ตลอดจนการบำบัดน้ำทิ้งที่มีโลหะหนักเจือปน เช่น จากอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะ

อัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF) เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) สำหรับแยกสาร โมเลกุลใหญ่ คอลลอยด์ ออกจากน้ำและสาร โมเลกุลเล็ก แผ่นอัลตราฟิลเตรชัน มีขนาดรูพรุนประมาณ 2-20 nm (20-2000 Å) แรงขับเคลื่อนที่ใช้ในการแยกต่ำกว่าออสโมซิสผันทกลับ คือ 100-800 kPa (1-8 atm) การใช้งานหลักๆ คือ การแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นโปรตีน คอลลอยด์ การบำบัดน้ำทิ้ง ทำน้ำให้บริสุทธิ์ การทำน้ำผลไม้ให้ใส เป็นต้น

**ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)** เป็นกระบวนการที่ใช้แผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดค่อนข้างใหญ่ ( $0.1-10 \mu\text{m}$ ) สำหรับแยกโมเลกุลใหญ่ๆ สารแขวนลอย หรืออนุภาคเล็กๆ ออกจากของเหลว โดยช่วงความดันหรือแรงขับเคลื่อนในการป้อนสารละลายต่ำกว่าออสโมซิสผันกลับและอัลตราฟิลเตรชัน คือ อยู่ในช่วง  $100-500 \text{ kPa}$  ( $1-5 \text{ atm}$ ) ถ้าใช้ไมโครฟิลเตรชันในลักษณะ dead-end จะทำให้เกิดการสะสมของเค้ก (cake) บนผิวเมมเบรน ดังนั้นการออกแบบการไหลผ่านแผ่นในลักษณะไหลขวางซึ่งเรียกกันทั่วไปว่า cross flow microfiltration (CFMF) จะเหมาะสมกว่าในแง่ช่วยลดการสะสมของเค้ก การใช้งานที่แพร่หลาย คือ การบำบัดน้ำทิ้ง ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องคั้มใช้ในเทคโนโลยีชีวภาพ อาจร่วมกับกระบวนการหมักเพื่อแยกเซลล์จากผลิตภัณฑ์

**กระบวนการแยกก๊าซ (Gas separation)** เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกก๊าซผสม แบ่งเป็น 2 แบบ แบบแรก คือ ก๊าซเพอเมชัน (gas permeation, GP) ซึ่งโมเลกุลของก๊าซหรือไอผ่านแผ่นเมมเบรนแบบแน่น/ไม่มีรูพรุน ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (คล้ายกับในออสโมซิสผันกลับ) แรงขับเคลื่อนในการแยก คือ ความดัน หรือความดันย่อย ซึ่งอาจต่ำเพียง  $100 \text{ kPa}$  หรือสูงถึง  $10 \text{ MPa}$  แบบที่สอง คือ ก๊าซดิฟฟิวชัน (gas diffusion, GD) เป็นการแยกก๊าซผ่านแผ่นเมมเบรนรูพรุนขนาดเล็ก ซึ่งแรงขับเคลื่อนอาจเป็นผลต่างของความเข้มข้นหรือความดันย่อยก็ได้ ตัวอย่างของแบบที่สอง คือ การเพิ่มความเข้มข้นไอโซโทป (isotopes) ของยูเรเนียม ส่วนในอุตสาหกรรมการใช้งานส่วนใหญ่เป็นก๊าซเพอเมชัน ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่เติบโตเร็ว ตัวอย่างเช่น การแยกฮีเลียม ไฮโดรเจน หรือคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซผสม

**เพอแวปอเรชัน (Pervaporation, PV)** เป็นการแยกองค์ประกอบหนึ่งๆ ออกจากสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรนแบบแน่น ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ องค์ประกอบที่ผ่านแผ่นเมมเบรนแล้วจะอยู่ในรูปของไอ (ด้านเพอเมเท) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากควบคุมความดันด้านเพอเมเทให้ต่ำกว่าความดันย่อยของสารที่ผ่านแผ่น และการเก็บตัวอย่างที่เป็นไอสามารถทำได้โดยการลดอุณหภูมิให้สารนั้นกลั่นตัวเป็นของเหลว หรืออาจใช้ carrier gas เช่น  $\text{N}_2$  เป็นตัวพาไอของสารผลิตภัณฑ์ แผ่นเมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการเพอแวปอเรชัน อาจเป็นแผ่น hydrophilic ซึ่งจะเลือกผ่านน้ำมากกว่าสารอินทรีย์ หรือถ้าเป็นแผ่น hydrophobic ก็จะเลือกผ่านสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้จึงเป็นการแยกน้ำ (dehydration) เพื่อผลิตสารอินทรีย์ เช่น แอลกอฮอล์ ความเข้มข้นสูง หรือการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายอินทรีย์เจือจาง

**การแยกด้วยแผ่นของเหลว (Liquid membranes, LM)** เป็นการแยกผ่านแผ่นเมมเบรนที่มีลักษณะเป็นของเหลว แผ่นของเหลวอาจมีลักษณะเป็นอิมัลชัน (emulsion) หรือเป็นฟิล์มของเหลวที่เกาะหรือพวยงตัวอยู่บนแผ่นธรรมดา (supported liquid membrane)

## 2.2.2 วัสดุและการผลิตแผ่นเมมเบรนสังเคราะห์ (Materials of Membranes and Preparation of Synthetic Membranes)

แผ่นเมมเบรนสังเคราะห์อาจจะผลิตจากวัสดุที่เป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ โดยแผ่นเมมเบรนส่วนใหญ่ผลิตจากวัสดุอินทรีย์ที่เป็นโพลิเมอร์ วิธีการผลิตแผ่นเมมเบรนขึ้นอยู่กับวัสดุที่เลือกใช้ และคุณสมบัติของแผ่นเมมเบรนที่ต้องการ ในบทนี้เป็นการกล่าวถึงการแบ่งชนิด ลักษณะ และ คุณสมบัติของแผ่นเมมเบรน กรรมวิธีการผลิตแผ่นเมมเบรนที่สำคัญ ตลอดจนรูปแบบแผ่นเมมเบรนและการเลือกใช้งาน

### 2.2.2.1 การแบ่งชนิดของแผ่นเมมเบรน

Kesting (1971) กล่าวว่า โพลิเมอร์สำหรับผลิตแผ่นเมมเบรน ส่วนใหญ่อาจจะสามารถนำมาผลิตเป็นแผ่นเมมเบรนได้ แต่เนื่องจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโพลิเมอร์ต่างกันมาก จึงทำให้ในทางปฏิบัติ มีโพลิเมอร์ที่สามารถนำมาผลิตเป็นแผ่นเมมเบรนได้จำนวนจำกัด ในที่นี้จะกล่าวถึงโพลิเมอร์หลักๆ หลายชนิดที่นำมาผลิตแผ่นเมมเบรนแล้วสามารถนำไปใช้งานได้ดี เนื่องจากว่าการแบ่งชนิดของแผ่นเมมเบรนแบบหยาบๆ ตามโครงสร้างรูพรุน อาจแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ 1) แผ่นเมมเบรนรูพรุน (porous membrane) ซึ่งใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชัน และ 2) แผ่นเมมเบรนแบบแน่น (dense/non-porous) ที่ใช้ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ การแยกก๊าซและเพอแวนพอเรชัน จึงควรจัดแบ่งชนิดของโพลิเมอร์ตามโครงสร้างรูพรุนตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน และไมโครฟิลเตรชัน การเลือกโพลิเมอร์สำหรับผลิตแผ่นเมมเบรนจะต้องคำนึง คือ วิธีการผลิตแผ่นเมมเบรน แนวโน้มการเกิด fouling และความคงทนต่อสารเคมีและความร้อน ส่วนแผ่นเมมเบรนแบบแน่นสำหรับการแยกก๊าซและเพอแวนพอเรชันนั้น การเลือกโพลิเมอร์ควรพิจารณาฟลักซ์และค่าการแยกเป็นสำคัญ

การแบ่งชนิดของแผ่นเมมเบรน สามารถแบ่งตามที่มา ว่าได้มาจากธรรมชาติหรือการสังเคราะห์ (ในที่นี้จะกล่าวถึงแผ่นเมมเบรนที่ได้จากการสังเคราะห์เท่านั้น) หรืออาจแบ่งตามโครงสร้าง ว่าเป็นแผ่นเมมเบรนไม่มีรูพรุนหรือแผ่นเมมเบรนมีรูพรุน บางกรณีอาจแบ่งตามการใช้งาน เช่น แผ่นเมมเบรนสำหรับการแยกของเหลว/ของเหลว ของเหลว/ก๊าซ หรือ ก๊าซ/ก๊าซ และท้ายสุดอาจแบ่งตามกลไกการทำงานของแผ่นเมมเบรน เช่น ถ้ากลไกการแยกเป็นการแพร่ เรียก diffusive membrane ถ้ากลไกการแยกเป็นการแลกเปลี่ยนไอออน เรียกแผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน (ion-exchange membrane) เป็นต้น

การแบ่งชนิดของแผ่นเมมเบรนที่จะทำให้เห็นความแตกต่างชัดเจนในลักษณะการทำงาน และวิธีการผลิต ก็คือ การแบ่งตามชนิดของโครงสร้าง อย่างไรก็ตาม ก็ยังไม่สามารถครอบคลุมแผ่นเมมเบรนที่ได้มีการพัฒนา/ใช้งานกันอยู่ ดังนั้นในที่นี้จะเสริมชนิดของแผ่นเมมเบรนที่สำคัญอื่นๆ เข้ากับการแบ่งชนิดตามโครงสร้าง และกลไกการแยก โดยแบ่งเป็น 4 ประเภท ดังแสดงในรูปที่ 2.7

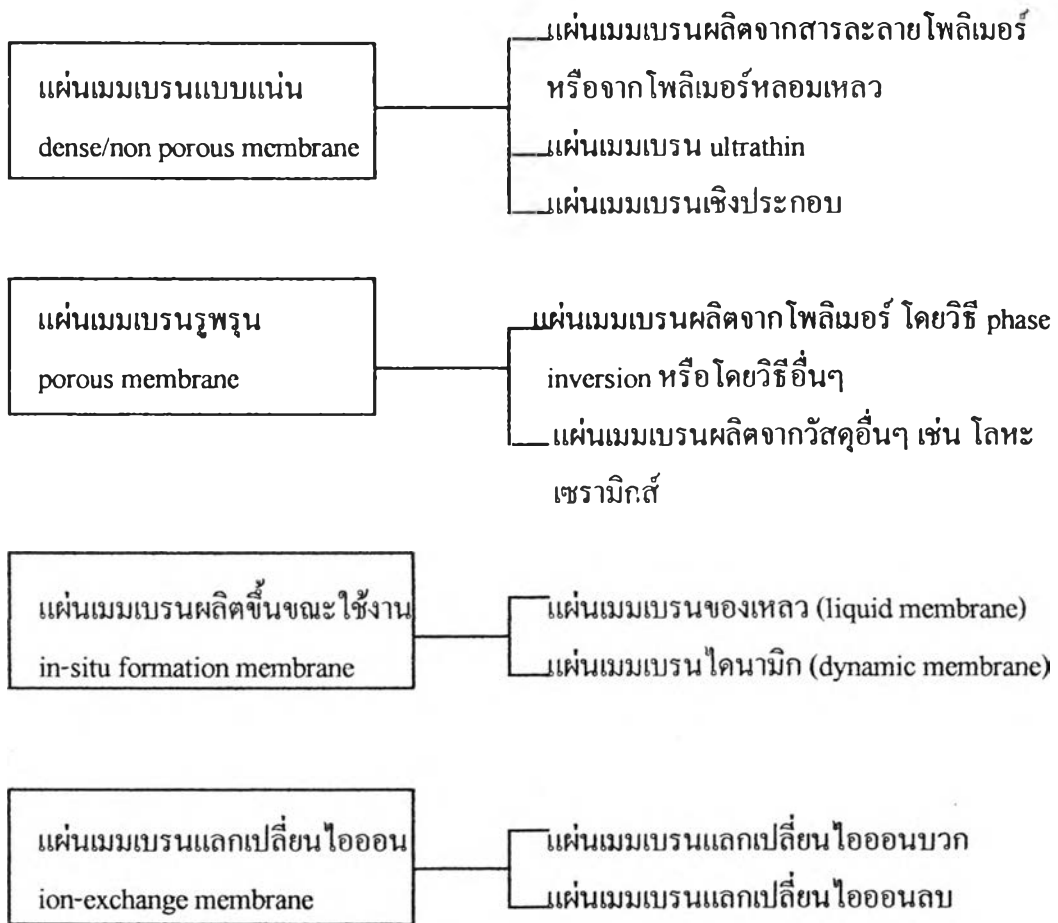
(ก) แผ่นเมมเบรนแบบไม่มีรูพรุนหรือแบบแน่น (Non porous/dense membrane) แผ่นเมมเบรนแบบแน่นส่วนมากผลิตจากโพลิเมอร์ แต่ก็มีบางชนิดที่เป็นพวกแผ่นเมมเบรนอนินทรีย์ (inorganic membrane) หรือผลิตจากโลหะบางชนิด ในที่นี้จะกล่าวถึงแผ่นเมมเบรนแบบแน่นที่ผลิตจากโพลิเมอร์ คำว่า แน่น ให้ความหมายว่า เป็นแผ่นเมมเบรนที่มีความหนาแน่นของเนื้อโพลิเมอร์สูง และมีจำนวนช่องว่างในเนื้อโพลิเมอร์น้อย (น้อยกว่า 40% ) ผลิตได้หลายวิธี เช่น

- แผ่นเมมเบรนผลิตจากสารละลายโพลิเมอร์ (dope) ซึ่งประกอบด้วยโพลิเมอร์และตัวทำละลาย และอาจมีตัวไม่ละลาย (non solvent) สารพองตัว (swelling agent) และอื่นๆ นำสารละลายมาทำเป็นแผ่นบางๆ หรือ cast บนแผ่นรองรับแล้วปล่อยให้ตัวทำละลายระเหยจนหมด จะได้แผ่นเมมเบรนแบบแน่น ที่มีช่องว่างน้อยและมีความเป็นผลึกสูงเมื่อเทียบกับแผ่นเมมเบรนชนิดอื่นๆ ตัวแปรสำคัญที่จะกำหนดคุณสมบัติของแผ่นเมมเบรนแบบนี้คือ องค์ประกอบของสารละลาย อัตราการระเหยของตัวทำละลาย (evaporation/desolvation) และความชื้นสัมพัทธ์ของบรรยากาศขณะระเหย

- แผ่นเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์หลอมเหลว โพลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกเมื่อหลอมเหลวจะสามารถทำให้มีรูปร่างตามต้องการได้ เมื่อทำให้เย็นตัวเป็นแผ่นเมมเบรนจะมีโครงสร้างที่ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของโพลิเมอร์ชนิดนั้น (แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลและน้ำหนักโมเลกุล เป็นต้น) และการเปลี่ยนแปลงอื่นๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวหรือทำให้หลอมเหลว

- แผ่นเมมเบรนเกิดระหว่างโพลิเมอไรเซชัน หมายความว่าในขณะที่เกิดโพลิเมอไรเซชัน (ซึ่งอาจมีการเชื่อมขวาง chain transfer เกิดขึ้นด้วย) มีการทำให้โพลิเมอร์ตกผลึกอย่างช้าๆ และทำเป็นแผ่นฟิล์ม อัตราเร็วของปฏิกิริยามีผลต่อโครงสร้างของแผ่นเมมเบรน ถ้าเกิดโพลิเมอไรเซชันช้าจะได้แผ่นเมมเบรนแบบแน่น หรือมีความเป็นผลึกสูง ตัวอย่างเช่น แผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนที่ผลิตโดยกรรมวิธีนี้มีโครงสร้างเป็นแผ่นเมมเบรนแบบแน่นหรือมีความเป็นเนื้อเดียว (homogeneous)

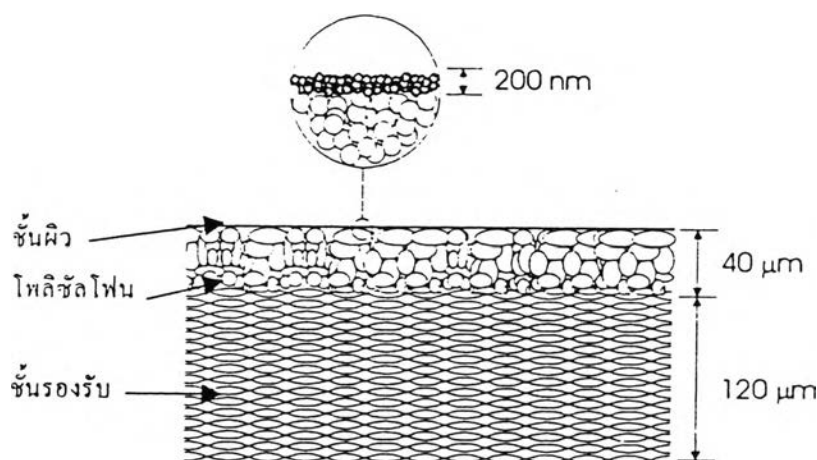
● แผ่นเมมเบรนแบบบางมาก (ultrathin membrane) เป็นแผ่นเมมเบรนแบบแน่นที่มีความหนาระหว่าง  $50-5,000 \text{ \AA}$  ข้อดีของแผ่นเมมเบรนแบบนี้คือ มีสัมประสิทธิ์การซึมผ่าน (permeability coefficient) สูง เพราะบางมาก การพัฒนาแผ่นเมมเบรนแบบนี้นำไปสู่การผลิตแผ่นเมมเบรนแบบไม่สมมาตร (asymmetric membrane) ซึ่งใช้กันอยู่เป็นส่วนใหญ่ การผลิตแผ่นเมมเบรนแบบบางมากอาจเตรียมจากสารละลายพอลิเมอร์เจือจางโดยการจุ่มแผ่นแก้วลงในสารละลาย สารละลายจะเกาะบนแผ่นแก้ว เมื่อแช่ลงในน้ำเยื่อแผ่นจะลอกหลุดออก หรืออาจทำเป็นแผ่นบางบนแผ่นรองรับข้อเสียของแผ่นเมมเบรนแบบนี้คือ การผลิตให้มีความสามารถในการเลือกผ่านสูงทำได้ยาก เกิดรูทะลุได้ง่าย ถ้าไม่เคลือบบนชั้นรองรับก็จะไม่แข็งแรง การเคลือบบนชั้นรองรับ จะต้องเลือกชั้นรองรับที่เหมาะสม หรือป้องกันไม่ให้สารละลายซึมไปในเนื้อชั้นรองรับ



รูปที่ 2.7 การแบ่งชนิดของแผ่นเมมเบรน (Kesting, 1971)

● แผ่นเมมเบรนเชิงประกอบ (composite membrane) จัดเป็นแผ่นเมมเบรนชนิดไม่สมมาตร โครงสร้างของแผ่นเมมเบรนแบบนี้ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนบนเป็นชั้นแผ่นเมมเบรนบาง (ชั้นผิว) หรือ active layer จะเป็นชั้นที่ควบคุมการกักกันสาร ส่วนล่างเป็นชั้นเสริม

หรือชั้นรองรับ (support) มีรูพรุนขนาดใหญ่เป็นโครงสร้างเสริมความแข็งแรงทางกลของแผ่นเมมเบรนโพลิเมอร์ที่ใช้ผลิตเป็นชั้นผิวและชั้นเสริมเป็นคนละชนิดกัน การผลิตชั้นผิวส่วนมากอาศัยการเกิดปฏิกิริยาบนชั้นเสริม เช่น การเกิดโพลิเอโรเซชันของโมโนเมอร์ (monomer) ความหนาของแผ่นเมมเบรนทั้งหมดประมาณ 150-200  $\mu\text{m}$  จะมีความหนาของชั้นผิวที่บางมาก เพียงประมาณ 100-200 nm เท่านั้น (ดูรูป 2.8) ปัจจุบันแผ่นเมมเบรนออสโมซิสผันกลับ อัลตราฟิลเตรชันที่ใช้งานอยู่หลายชนิดเป็นแผ่นเมมเบรนเชิงประกอบ ชั้นรองรับเป็นโพลีเอทิลีนเป็นส่วนใหญ่ ตัวอย่างเช่น NS-200, FT 30 ของบริษัท Film Tec. PEC 1000 ของบริษัท Toray และ NTR-7400 ของบริษัท Nitto-Denko แผ่นเมมเบรนแบบไม่สมมาตรอาจมีชั้นผิวและชั้นรองรับเป็นโพลิเมอร์ชนิดเดียวกัน แต่การที่โครงสร้างของชั้นผิว และชั้นรองรับต่างกันนั้นเกิดจากกลไกการผลิต ดังนั้น แผ่นเมมเบรนไม่สมมาตรในลักษณะดังกล่าวไม่ใช่แผ่นเมมเบรนเชิงประกอบ



รูปที่ 2.8 โครงสร้างของแผ่นเมมเบรนเชิงประกอบ FT 30 (Kesting , 1971)

(ข) แผ่นเมมเบรนรูพรุน (porous membrane) แผ่นเมมเบรนรูพรุนไมโครฟิลเตรชันมีขนาดรูพรุน 0.1-10  $\mu\text{m}$  และสำหรับอัลตราฟิลเตรชันเป็น 2-100 nm นอกเหนือจากขนาดรูพรุนแล้ว ฟลักซ์และการกักกัน อาจขึ้นอยู่กับ ปฏิกิริยาการเกิด fouling ระหว่างตัวถูกละลายกับแผ่นเมมเบรน ในการเลือกโพลิเมอร์จึงควรพิจารณาการเกิด fouling การล้าง/ทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนด้วย

แผ่นเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์ที่เป็น hydrophilic ดูดซับสารได้ต่ำจึงเกิด fouling น้อยกว่าแผ่นเมมเบรนที่ผลิตจากโพลิเมอร์ hydrophobic ตัวอย่างโพลิเมอร์ที่เป็น hydrophilic ที่สำคัญคือ cellulose acetate ซึ่งนำไปผลิตแผ่นเมมเบรนสำหรับอัลตราฟิลเตรชัน และออสโมซิสผันกลับ



ด้วย โพลีซัลโฟนเป็นโพลิเมอร์ hydrophobic ที่คงทนต่อสารเคมีและความร้อนมาก มีการนำไปใช้อย่างกว้างขวางสำหรับพวกแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ผลิตภัณฑ์จากโพลิเมอร์ที่แตกต่างออกไป และใช้วิธีการเปลี่ยนเฟส (phase inversion) เป็นส่วนมากซึ่งวิธีนี้ทำให้ได้รูพรุนที่มีขนาดเล็กกว่า ตัวอย่างโพลิเมอร์ที่ใช้ในการผลิตแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่สำคัญที่ดังนี้

polysulfone/polyether sulfone	polyacrylonitrile
cellulose ester	polyamide (aliphatic)
polyimide	polyvinylidene fluoride

แผ่นเมมเบรนรูพรุนอาจแบ่งแยกไปอีกว่า เป็นแบบรูพรุนขนาดเล็ก (microporous) หรือรูพรุนขนาดใหญ่ (macroporous) การแบ่งยังไม่มีความชัดเจนที่แน่นอน บางครั้งอาจจะจัดว่ารูพรุนขนาดน้อยกว่า 10  $\mu\text{m}$  เป็นรูพรุนขนาดเล็ก ในการแยกก๊าซ รูพรุนขนาด 10-100  $\text{\AA}$  ก็จัดเป็นรูพรุนขนาดเล็ก สำหรับการแยกตาม IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemistry) ถ้ารูพรุนมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 20  $\text{\AA}$  เป็นรูพรุนขนาดเล็ก ถ้ามีขนาดรูพรุน 20-500  $\text{\AA}$  เรียกว่า มีขนาดกลางๆ (mesoporous) แต่ถ้ามีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า 500  $\text{\AA}$  จัดว่าเป็นรูพรุนขนาดใหญ่ การทำให้เกิดรูพรุนในแผ่นเมมเบรนอาจเริ่มจากการทำรูพรุนจากแผ่นเมมเบรนแบบแน่น หรือจากรูพรุนขนาดใหญ่ทำให้รูพรุนเล็กลง แต่ส่วนใหญ่แล้วเป็นการใช้เทคนิคการผลิตจากวัสดุคิบเริ่มต้นให้ได้รูพรุนมีขนาดตามต้องการมากกว่า

- แผ่นเมมเบรนรูพรุนผลิตจากวัสดุอนินทรีย์ ตัวอย่างเช่น โลหะ แก้ว และเซรามิกส์ วิธีที่ใช้เป็นส่วนใหญ่ คือ การอบเชื่อม (sintering) ซึ่งหมายถึงการให้ความร้อน (พร้อมๆกับการอัด ) แก่ผงอนุภาค จนมีอุณหภูมิใกล้จุดหลอมเหลว ทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ของอนุภาคที่อยู่ชิดกัน รอยต่อระหว่างอนุภาคหายไปเกิดเป็นรูพรุน ขนาดรูพรุนขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาค และการกระจายขนาดของอนุภาค วิธีอบเชื่อมนี้จะได้แผ่นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุน 0.1-10  $\mu\text{m}$  (อยู่ในช่วงแผ่นเมมเบรนไมโครฟิลเตรชัน) สามารถใช้ผลิตแผ่นเมมเบรนรูพรุนจากโลหะ เซรามิกส์และโพลิเมอร์บางชนิดด้วย

- แผ่นเมมเบรนรูพรุนผลิตจากโพลิเมอร์ อาจใช้วิธีการอบเชื่อมเช่นเดียวกับที่กล่าวมาแล้ว ตัวอย่างโพลิเมอร์ที่สามารถนำมาผลิตแผ่นเมมเบรนรูพรุนโดยวิธีนี้ เช่น PTFE (หรือ tetrafluoroethylene เป็นโพลิเมอร์ที่ไม่ละลายในตัวทำละลายใดๆ) โพลีเอทิลีน โพลีโพรพิลีน นอกจากนั้นยังมีวิธี stretching ซึ่งทำได้โดยนำแผ่นฟิล์มของโพลิเมอร์มาดึงยืด โพลิเมอร์ที่ใช้ต้องเป็นโพลิเมอร์ที่กิ่งเป็นผลึก (ได้แก่ PTFE โพลีเอทิลีน โพลีโพรพิลีน เช่นเดียวกัน) แรงดึงทำให้มีการแยก/แตก ภายใน

โครงสร้างเกิดเป็นรูพรุน ซึ่งมีขนาด 0.1-3  $\mu\text{m}$  และมีความพรุน (porosity) สูงกว่าแผ่นเมมเบรนที่ผลิตโดยวิธีอบเชื่อม

(ค) แผ่นเมมเบรนเตรียมขึ้นขณะใช้งาน (in-situ formation membrane) เป็นแผ่นเมมเบรนที่เตรียมเมื่อต้องการใช้งาน หรือเพื่อนำไปใช้งานทันที (ไม่ใช่แผ่นเมมเบรนสำเร็จรูป) สามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

- แผ่นเมมเบรนไดนามิก เป็นแผ่นเมมเบรนที่เกิดจากอนุภาคของสารคอลลอยด์หรือสารแขวนลอยในสารละลายจับตัวหรือถูกดูดซับบนชั้นรองรับ (ซึ่งก็คือแผ่นเมมเบรนรูพรุนนั่นเอง) เมื่อกรองสารละลายนั้นๆ ภายใต้อุณหภูมิ ความดัน อนุภาคที่ถูกดูดซับไว้จะทำหน้าที่เสมือนเป็นแผ่นเมมเบรนอีกแผ่นหนึ่งและไปเปลี่ยนคุณสมบัติของแผ่นเมมเบรนเดิมที่เป็นชั้นรองรับ การสะสมของอนุภาคบนแผ่นเมมเบรนเดิมอาจทำโดยกรองสารแขวนลอยที่เหมาะสมผ่านแผ่นเมมเบรนรองรับ ซึ่งเมื่อสารแขวนลอยไปสะสมจะได้แผ่นเมมเบรนไดนามิกแบบ pre-coated ซึ่งสามารถนำไปกรองสารละลายอื่นที่ต้องการต่อไป ตัวอย่างเช่น การใช้สารละลาย zirconium oxide ผสม polyacrylic acid สร้างแผ่นเมมเบรนบนชั้นรองรับเซรามิกส์ (ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน) ทำให้ได้แผ่นเมมเบรนที่มีคุณสมบัติ คือ ค่าฟลักซ์และการกักกันดีขึ้นกว่าตัวรองรับเดิม หรือก่อนไปทางแผ่นเมมเบรนออสโมซิสผันกลับ (Nakao, 1986)

- แผ่นเมมเบรนของเหลว (liquid membrane) แผ่นเมมเบรนมีลักษณะการเกิดคล้ายกับแผ่นเมมเบรนไดนามิก แต่ต่างกันตรงที่แผ่นเมมเบรนไดนามิกเป็นของแข็ง แผ่นเมมเบรนของเหลวสามารถสร้างขึ้นโดยทำให้เกิดฟิล์มของเหลวบนและภายในรูพรุนของชั้นรองรับ ลักษณะเช่นนี้ เรียกว่า supported liquid membrane (SLM) หรืออาจจะผลิตจากสารละลายที่สามารถเกิดเป็นอิมัลชันจำนวนมากและอิมัลชันนี้มีความสามารถในการเลือกผ่านสาร กรณีนี้เรียกว่า emulsion liquid membrane (ELM)

(ง) แผ่นเมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออน ผลิตจากโพลีเมอร์ที่มีกลุ่มของประจุอยู่ด้วยในสายโซ่ของโพลีเมอร์อิเล็กโตรไลต์ และ มีความสามารถแลกเปลี่ยนไอออนบวกหรือไอออนลบ จึงใช้สำหรับแยกสารละลายอิเล็กโตรไลต์

### 2.2.2.2 Supports (แผ่นเสริมหรือชั้นรองรับ)

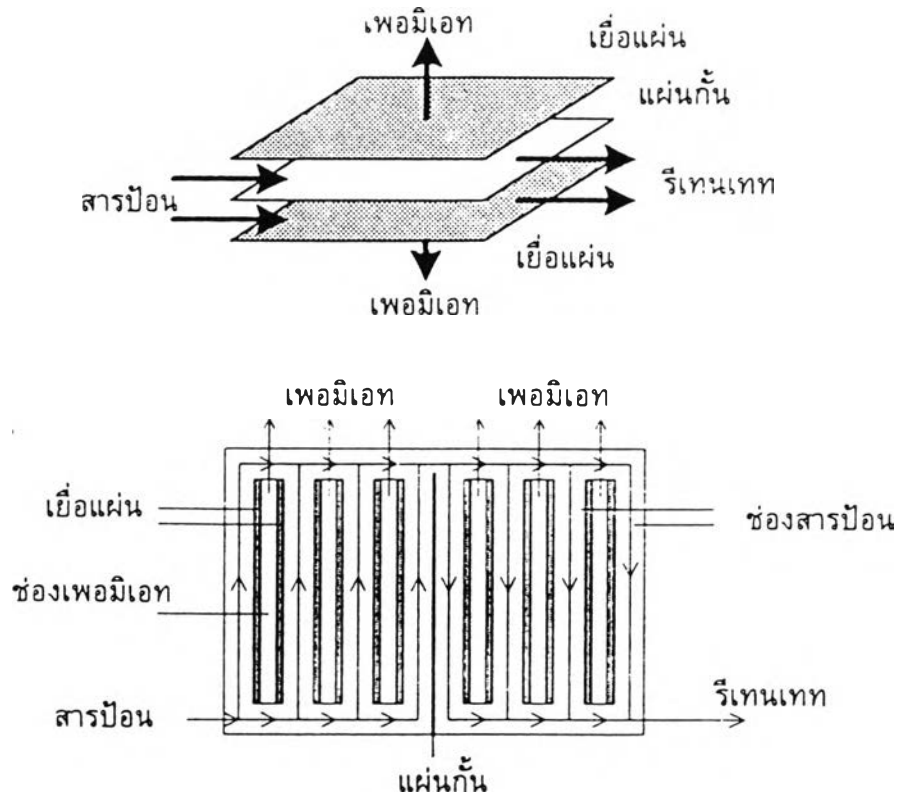
Johnson (1986) กล่าวว่า ในการผลิตแผ่นเมมเบรนต่างๆ ไป เป็นการ cast สารละลายโพลิเมอร์หรือเจลของเซรามิกส์ให้เป็นชั้นฟิล์มลงบนแผ่นเสริม เพื่อเสริมความแข็งแรงให้แผ่นเมมเบรน การที่แผ่นเสริมประกอบอยู่กับแผ่นเมมเบรนเสมือนเป็นแผ่นเดียวกัน เรียกว่า integral support แผ่นเมมเบรนโพลิเมอร์ที่ไม่ได้ cast บนแผ่นเสริม แต่เมื่อใช้งานนำมาวางบนแผ่นเสริมในกรณีนี้ว่า non-integral support แผ่นเสริมหรือชั้นรองรับ (สำหรับแผ่นเมมเบรนโพลิเมอร์) ส่วนใหญ่ผลิตจากโพลิเมอร์หรือเส้นใยที่มีรูพรุนหยาบ จึงไม่ควรมีความต้านทานต่อการไหล แผ่นเสริมของแผ่นเมมเบรนเซรามิกส์อาจผลิตจากวัสดุชนิดเดียวกับวัสดุที่ใช้ผลิตเป็นแผ่นเมมเบรน แต่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่า การเลือกแผ่นเสริมก็มีความสำคัญมาก คืออาจมีผลกระทบต่อสมรรถนะโดยรวมของแผ่นเมมเบรนได้

แผ่นเสริมที่ดีต้องมีความแข็งแรงไม่ยุบตัวง่าย เกณฑ์ในการเลือกอื่นๆ คล้ายกับแผ่นเมมเบรนคือต้องพิจารณาว่าเป็น hydrophilic หรือ hydrophobic มีความทนทานต่อสารเคมี มีความหนาสม่ำเสมอ หาได้ง่ายและราคาไม่แพง เป็นต้น

### 2.2.3 อุปกรณ์แผ่นเมมเบรน (Membrane module)

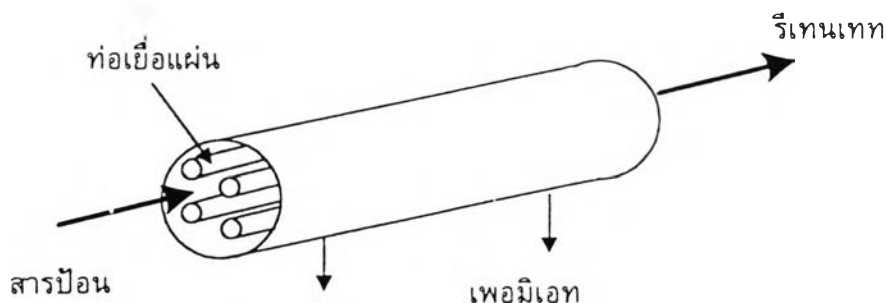
Kesting (1984) กล่าวว่า แผ่นเมมเบรนที่ผลิตขึ้นอาจมีรูปร่างต่างกัน เช่น เป็นเมมเบรนแผ่นเรียบ หรือเป็นท่อ ในการใช้งานต้องบรรจุหรือประกอบแผ่นเมมเบรนในหน่วยอุปกรณ์ให้มีพื้นที่แผ่นเมมเบรนตามต้องการ ซึ่งเรียกว่า module ได้มีการออกแบบอุปกรณ์ที่มีรูปร่างต่างกัน โดยสามารถแบ่งออกเป็น 4 แบบ คือแบบแผ่นและกรอบ แบบท่อ แบบเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน หลักในการออกแบบต้องคำนึงถึงการใช้งาน คือ ต้องมีอัตราการไหลผ่านสูง ลดการสะสมที่ผิวหน้าแผ่นเมมเบรน กะทัดรัด คือมีพื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง เป็นต้น

2.2.3.1 หน่วยอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (plate and frame module) มีลักษณะดังรูปที่ 2.9 คือ แผ่นเมมเบรนสองแผ่นประกบกันเป็นคู่สารละลายป้อนไหลผ่านระหว่างคู่ของแผ่นเมมเบรนแต่ละชุด อุปกรณ์จึงประกอบด้วยคู่แผ่นเมมเบรนวางซ้อนกัน หรือเรียงกันเป็นชั้นๆ และมีอุปกรณ์อื่นๆ ประกอบเพื่อกำหนดทิศทางการไหลของรีเทนเทท เพอมิเอท และเพื่อให้เป็นระบบที่ปิดสนิท เช่น แผ่นกั้น (spacer) อุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่ผิวแผ่นเมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรอุปกรณ์ (packing density) ประมาณ  $100-400 \text{ m}^2/\text{m}^3$  และบางทีอาจเรียกชุดอุปกรณ์แบบนี้ว่า thin channel เพราะช่องระหว่างเยื่อแผ่นที่สารป้อนไหลผ่านแคบ ( $\sim 5\text{mm}$ )



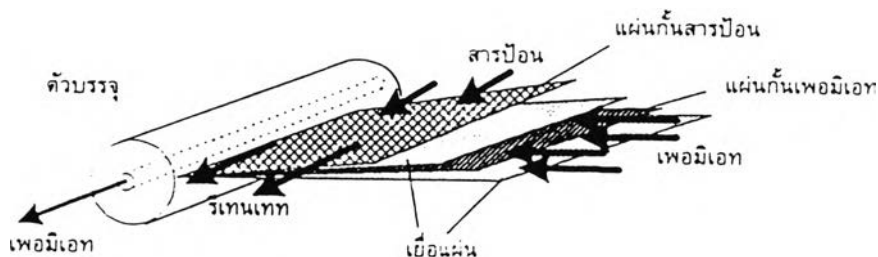
รูปที่ 2.9 รูปแบบและทิศทางการไหลในอุปกรณ์แบบแผ่นและกรอบ (Kesting ,1984)

2.2.3.2 อุปกรณ์แบบท่อ (tubular module) เมมเบรนแบบท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลาง  $\geq 10$  mm โดยปกติในตัวบรรจุ (housing) จะประกอบด้วยท่อเมมเบรนหลายๆ ท่อ (ขึ้นอยู่กับพื้นที่แผ่นเมมเบรนที่ต้องการ) สารป้อนไหลเข้าด้านในท่อและเพอมีเอท ซึ่งไหลผ่านแผ่นเมมเบรนจะถูกเก็บมารวมกัน (ดูรูปที่ 2.10) นอกจากตัวบรรจุแล้วก็ต้องมีอุปกรณ์ประกอบอื่นๆ ชุดอุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่แผ่นเมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรอุปกรณ์ ต่ำกว่าแบบแผ่นและกรอบ นอกจากแผ่นเมมเบรนโพลีเมอร์แล้วยังนิยมผลิตแผ่นเมมเบรนเซรามิกส์แบบท่อ และอาจจะเป็นแบบโมโนลิท

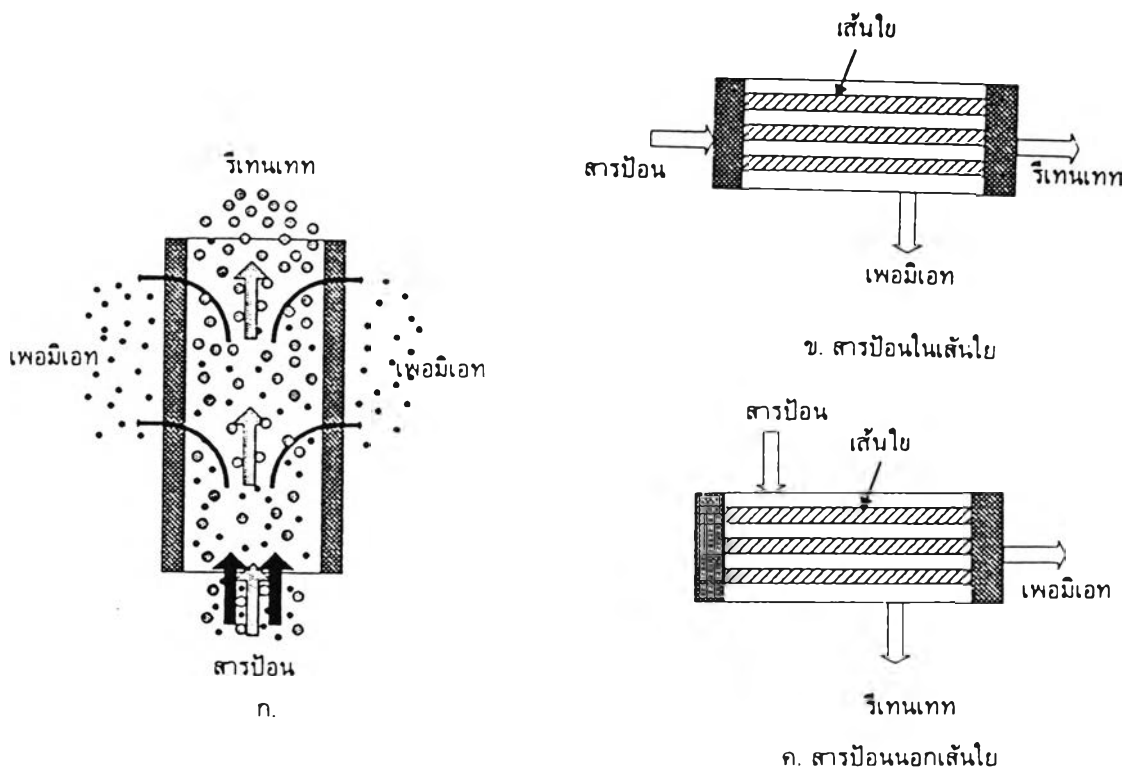


รูปที่ 2.10 ลักษณะอุปกรณ์แบบท่อซึ่งประกอบด้วยแผ่นเมมเบรนเล็กๆรวมกันอยู่ในตัวบรรจุ (housing) (Kesting ,1984)

2.2.3.3 อุปกรณ์แบบท่อม้วน เป็นการนำเมมเบรนแผ่นเรียบมาม้วนรอบแกน โดยต้องมีแผ่นกั้น มีลักษณะค่อนข้างซับซ้อน ดังรูปที่ 2.11 เป็นแบบที่ให้พื้นที่ต่อหน่วยปริมาตรอุปกรณ์ 300-1,000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> สูงกว่าแบบแผ่นและกรอบ



รูปที่ 2.11 แสดงเมมเบรนแผ่นแบบม้วนที่นำมาประกอบเป็นท่อม้วน (Kesting , 1984)



รูปที่ 2.12 ก) ภาพขยายของการไหลผ่านเส้นใยกลวง และการไหลผ่านอุปกรณ์เส้นใยกลวง  
 ข) การป้อนสารผ่านในเส้นใย (tube side feed) และ  
 ค) การป้อนสารผ่านนอกเส้นใย (shell side feed) (Kesting , 1984)

2.2.3.4 อุปกรณ์แบบเส้นใยกลวง นอกจากการผลิตแผ่นเมมเบรนโดยการ cast บนชั้นรองรับในลักษณะแผ่นเรียบและแบบท่อแล้วยังสามารถผลิตเป็นแบบเส้นใย (ใช้เทคนิค spinning) ที่มีรูกลวงมีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเพียง 0.1-0.5 mm. และความหนาของเส้นใยอยู่ระหว่าง 1-2 mm. จึงไม่มีชั้นรองรับ ปลายของเส้นใยสองด้านฝังอยู่ในชั้นฐานซึ่งอาจเป็นเรซิน โพลียูรีเทน หรือซิลิโคนรับเบอร์ แล้วบรรจุในตัวบรรจุซึ่งอาจจะเป็นอะคริลิก หรือ stainless steel แผ่นเมมเบรนแบบนี้ส่วนมากมีชั้นผิวอยู่ด้านใน (ดูรูปที่ 2.12ก) ทำให้ต้องป้อนสารละลายด้านนอก และเก็บเพอมีเอทจากด้านในเส้นใย (ดูรูปที่ 2.12ข และ ค) อุปกรณ์แบบนี้มีพื้นที่แผ่นเมมเบรนต่อหน่วยปริมาตรสูง อาจสูงถึง 30,000 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> ถ้าใช้เส้นใยมีขนาดใหญ่ขึ้นคือ มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 0.5-10mm. จะเรียกว่าแบบแคปิลลารี (capillary)

การพิจารณาเลือกแบบอุปกรณ์มักจะใช้เหตุผลทางเศรษฐศาสตร์ประกอบ แต่ต้องพิจารณาว่าต้องการประยุกต์ใช้กับสารละลายอะไร ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบลักษณะและข้อดี/ข้อจำกัดของแต่ละอุปกรณ์ซึ่งพอสรุปได้ว่า แบบท่อเหมาะสมกับสารละลายที่เกิด fouling ได้ง่าย เพราะทำความสะอาดง่ายกว่าแบบอื่นๆ แบบเส้นใยกลวงมีราคาถูก แต่เกิด fouling ง่าย ทำความสะอาดยากต้องการการบำบัดสารละลายก่อน

ตารางที่ 2.6 เปรียบเทียบอุปกรณ์แผ่นเมมเบรนแบบต่างๆ (Kesting , 1984)

ข้อมูล	แผ่นเรียบ	ท่อม้วน	ท่อ	เส้นใยกลวง
พื้นที่/ปริมาตร (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	100-400	300-1000	150-300	9000-30000
ฟลักซ์ (l/m <sup>2</sup> .h)	10-50	10-50	10-50	0.5-5.0
ความกว้างของช่องสารละลาย(mm)	~5	~1.5	>10-13	0.1-0.5
การเปลี่ยนแผ่นเมมเบรน	เป็นแผ่น	ทั้งชุด	เป็นท่อ	ทั้งชุด
การเกิด fouling	ปานกลาง	ปานกลาง	ต่ำ	สูง
การทำมาสะอาด	ปานกลาง	ปานกลาง	ง่าย	ยาก
ราคา	ปานกลาง	ถูก	แพง	ถูกมาก

2.2.4 ข้อดีของกระบวนการแผ่นเมมเบรน กระบวนการเมมเบรนมีข้อได้เปรียบกระบวนการแยกอื่นๆ คือ (Fane,1987)

- เป็นการแยกตามขนาดของโมเลกุล (หรือรูปร่าง หรือชนิดของประจุ) ซึ่งทำให้สามารถดำเนินการที่อุณหภูมิปกติ จึงเหมาะสำหรับแยกสารที่อาจเสื่อมสภาพเพราะความร้อนได้

- กระบวนการเมมเบรนส่วนใหญ่ใช้พลังงานในการแยกค่อนข้างต่ำ เพราะสามารถแยกได้โดยไม่ต้องเปลี่ยนเฟส ตัวอย่างเช่น สำหรับกระบวนการแยกเกลือจากน้ำกร่อยหรือน้ำทะเล ถ้าใช้ออสโมซิสผันกลับ หรืออิเล็กโตรไดอะไลซิส จะมีข้อได้เปรียบทางด้านพลังงานกว่าการกลั่นหรือการต้มระเหย
- ไม่ก่อให้เกิดของเหลือทิ้ง เพราะกระบวนการเมมเบรนทำให้สามารถแยกผลิตภัณฑ์ที่ต้องการได้สามารถใช้ประโยชน์ได้ทั้งเพอมีเอท และรีเทนเทท ตัวอย่างเช่น ในการผลิตน้ำสะอาดจากน้ำทะเล ได้เพอมีเอท คือ น้ำจืด ส่วนสารละลายเกลือเข้มข้นสามารถนำไปต้มระเหย ตกผลึก เพื่อผลิตเกลือ หรือในการบำบัดน้ำทิ้งบางชนิดที่ได้น้ำสะอาดกลับไปใช้ในกระบวนการและได้ผลิตภัณฑ์เข้มข้นซึ่งใช้ประโยชน์ต่อไปได้
- สามารถขยายขนาดจากระดับต้นแบบให้เป็นระดับอุตสาหกรรมได้ไม่ยาก เนื่องจากชุดแผ่นเมมเบรนมีลักษณะเป็นชุด (modular) หรือหน่วยและสามารถนำหน่วยย่อยๆ มาต่อกันเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการแยก
- สามารถดำเนินการแบบกะ (batch) หรือแบบต่อเนื่อง (continuous) ตลอดจนติดตั้งระบบควบคุมการทำงานแบบอัตโนมัติได้ไม่ยาก
- มีขนาดกะทัดรัดไม่เปลืองพื้นที่ เพราะชุดอุปกรณ์เยื่อแผ่นมีการออกแบบให้มีพื้นที่ในการกรองต่อหน่วยปริมาตรของอุปกรณ์สูง

ด้วยเหตุผลดังกล่าวมาแล้ว ทำให้สามารถนำกระบวนการเมมเบรนไปใช้แทนกระบวนการเดิมที่ใช้อยู่อาจจะในลักษณะแทนบางขั้นตอน หรือทั้งกระบวนการทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของกระบวนการนั้นๆ ตารางที่ 2.7 แสดงให้เห็นว่าสามารถนำกระบวนการเมมเบรนไปใช้แทนกระบวนการใดได้บ้าง

**2.2.5 ข้อจำกัดของกระบวนการเมมเบรน** ถึงแม้ว่ากระบวนการเมมเบรนจะมีประสิทธิภาพหรือศักยภาพในการประยุกต์ใช้แต่ก็มีข้อจำกัด หรือข้อเสีย เช่นเดียวกับกระบวนการอื่นๆ ซึ่งผู้ใช้งานจำเป็นต้องทราบ

- Concentration polarization (CP) เป็นคำที่อ้างถึงกันอยู่เสมอในการศึกษาวิจัยพื้นฐานของกระบวนการเมมเบรน CP หมายถึง การสะสมของโมเลกุล/อนุภาค ของตัวถูกละลายที่ไม่สามารถผ่านเยื่อแผ่นได้ทำให้ความเข้มข้นบริเวณผิวหน้าเยื่อแผ่นสูงกว่าใน bulk solution (บริเวณที่อยู่ห่างออกไป) จะลดสมรรถนะของการแยกทั้งในแง่ของฟลักซ์และการกักกัน เพราะส่งผล (ต่อเนื่อง) ให้เกิด fouling การลด CP ในระดับหนึ่งทำได้โดยการออกแบบอุปกรณ์ให้มี

การป้อนสารผ่านแผ่นเมมเบรนแบบไหลขวางและที่ความเร็วสูง ซึ่งจะช่วยให้ตัวถูกละลายที่สะสมเกิดการแพร่กลับไปใน bulk solution

ตารางที่ 2.7 ตัวอย่างการนำกระบวนการเมมเบรนไปใช้แทนกระบวนการแยกอื่นๆ (Fane,1987)

กระบวนการ	สารป้อน	ผลิตภัณฑ์	ตัวอย่าง	กระบวนการเมมเบรนที่อาจนำไปแทนที่
การต้มระเหย	ของเหลว	ของเหลว/ไอ	การเพิ่มความเข้มข้นน้ำผลไม้	RO
การกลั่น	ของเหลว/ไอ	ของเหลว/ไอ	การแยกสารไฮโดรคาร์บอน	GP,PV
			การผลิตน้ำบริสุทธิ์	RO,MD
การดูดกลืนก๊าซ	ก๊าซ	ของเหลว/ไอ	การแยก CO <sub>2</sub> จากก๊าซธรรมชาติ	GP
การสกัดด้วยของเหลว	ของเหลว	ของเหลว	การแยกยูเรเนียมจากสารละลาย	LM
			การแยกสารอินทรีย์	GP,PV
การแลกเปลี่ยนไอออน	ของเหลว	ของเหลว	การแยกเกลือจากน้ำ	ED,RO
การแยกเหวี่ยง	ของเหลว/ของแข็ง	ของเหลว/ของแข็ง	การแยกอนุภาค/สารแขวนลอย	MF (CFMF), UF
และการกรอง	ของแข็ง	ของแข็ง		

- Fouling การเกิด fouling หมายถึง การสะสม/อุดตันของตัวถูกละลายทั้งบนผิวหน้าแผ่นเมมเบรนและภายในรูพรุน ซึ่งทำให้ฟลักซ์ลดลงและการกักกัน โมเลกุลเปลี่ยนแปลง (อาจลดลงหรือเพิ่มขึ้น) fouling เกิดขึ้นด้วยกลไกที่ซับซ้อนขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของแผ่นเมมเบรนและสารละลาย สิ่งสะสมและอุดตันจะไม่สามารถล้างออกด้วยน้ำได้ ต้องล้างทำความสะอาดด้วยสารเคมีที่เหมาะสม
- ความคงตัวของแผ่นเมมเบรน แผ่นเมมเบรนที่ใช้อยู่ส่วนใหญ่ผลิตจากโพลีเมอร์จึงมีความคงตัวจำกัด เช่น แผ่นเมมเบรนจำพวกเซลลูโลส (cellulosics) คงตัวช่วง pH 4-8 ส่วนโพลีซัลโฟน (polysulfone) สามารถใช้งานในช่วงกว้างกว่า คือ pH 1-13 อุณหภูมิก็มีผลต่อเยื่อแผ่น ปัจจุบันมีการพัฒนาแผ่นเมมเบรนโพลีเมอร์ที่ทนอุณหภูมิได้สูง 60-80 องศาเซลเซียส แผ่นเมมเบรนบางชนิดไม่ทนต่อคลอรีน หรือตัวทำละลายอินทรีย์ ส่วนแผ่นเมมเบรนเซรามิกส์ (ceramics) มีความคงตัวต่ออุณหภูมิและสารเคมีดีมาก สามารถฆ่าเชื้อด้วยไอน้ำได้ ทนต่อจุลินทรีย์ แต่ความสามารถในการแยกยังด้อยกว่าแผ่นเมมเบรนโพลีเมอร์ การพัฒนายังค่อนข้างจำกัด และราคาแพง



## 2.2.6 การล้างและทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน (Membrane Cleaning)

Lindua (1994) ได้กล่าวว่า การนำแผ่นเมมเบรนไปใช้งานในการแยกสารละลายที่เป็นของเหลว เช่น ในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ อัลตราฟิลเตรชัน และไมโครฟิลเตรชัน ถึงแม้ว่าจะมีการบำบัดเบื้องต้น (pretreatment) เพื่อแยกองค์ประกอบที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายต่อแผ่นเมมเบรนและเพื่อยืดอายุการใช้งานของแผ่นเมมเบรน มีการออกแบบหน่วยอุปกรณ์ตลอดจนเลือกสถานะดำเนินการที่ลดการเกิด concentration polarization ก็ยังพบว่ามีเกิด fouling ส่งผลให้ค่าฟลักซ์ลดลง ค่าการกักกันเปลี่ยนแปลง ดังนั้น จึงต้องมีความจำเป็นต้องทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนด้วยวิธีที่เหมาะสมเป็นระยะๆ เพื่อให้แผ่นเมมเบรนมีสภาพใกล้เคียงแผ่นเมมเบรนใหม่มากที่สุด และเพื่อยืดอายุการใช้งาน

fouling เกิดจากองค์ประกอบในสารละลายที่ไปสะสมอยู่บริเวณผิวหน้าเมมเบรน และในรูพรุน และอาจเกิดจากจุลินทรีย์ที่ปนอยู่ในสารละลาย การเลือกวิธีการล้างและทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนจึงต้องพิจารณาชนิดของสารอุดตัน (foulant) วัสดุที่ผลิตเป็นแผ่นเมมเบรนและรูปแบบของอุปกรณ์ ตลอดจนค่าใช้จ่าย ความยากง่าย และระยะเวลาในการล้างประกอบด้วย วิธีทำความสะอาดแบ่งออกเป็น 2 วิธีหลัก ได้แก่ วิธีกายภาพ และวิธีเคมี

**2.2.6.1 วิธีกายภาพ (Physical methods)** หมายถึง การทำความสะอาดที่ใช้การเปลี่ยนแปลงสถานะการทำงานเป็นหลัก เช่น การเพิ่มอัตราการไหล ซึ่งจะเพิ่มแรงเฉือนที่ผิวหน้าแผ่นเมมเบรน แต่ก็ลดการสะสม/อุดตันได้ระดับหนึ่งเท่านั้น วิธีที่อ้างถึงกันอยู่เสมอ คือ การชุบชั้นที่สะสมออกจากผิวหน้าแผ่นเมมเบรนด้วยฟองน้ำ (sponge balls) ใช้กับแผ่นเมมเบรนแบบท่อโดยการใส่ก้อนฟองน้ำที่มีขนาดพอๆ กับเส้นผ่าศูนย์กลางของท่อแผ่นเมมเบรน เข้าไปในน้ำหรือสารละลายที่ไหลผ่านแผ่นเมมเบรนเพื่อให้ก้อนฟองน้ำชุบชั้นสะสมออก แต่ปัจจุบันวิธีนี้กล่าวได้ว่าไม่มีการใช้กันเลย

วิธีกายภาพที่แพร่หลายและได้ผลเป็นที่น่าพอใจ คือ การล้างย้อนกลับ (back washing) ซึ่งทำได้โดยการป้อนสารละลายภายใต้ความดันเข้าทางด้านเพอมิเอทซึ่งจะทำให้สารละลายดันสารอุดตันหลุดออกจากแผ่นเมมเบรน การล้างย้อนกลับอาจทำระหว่างการกรอง เช่น กรอง 30 นาที แล้วป้อนสารละลายกลับทาง 2-3 นาที เป็นต้น หรืออาจทำเมื่อเสร็จสิ้นการกรองคือ ล้างย้อนกลับด้วยน้ำหรือสารทำความสะอาด ตัวอย่างเช่น ในการทำงานปกติ ถ้าใช้แผ่นเมมเบรนแบบเส้นใยกลวงเป็นการป้อนสารละลายด้านในเส้นใย แต่ในการล้างย้อนกลับเป็นการป้อนสารทำความสะอาดด้าน

นอกเส้นใย (อาจดูจากรูป 2.12) ข้อจำกัดของวิธีนี้คือ อุปกรณ์จะต้องมีการออกแบบเฉพาะให้มีการล้างย้อนกลับได้

วิธีกายภาพใช้ได้ผลดีกรณีที่มีการสะสมที่ผิวหน้าแผ่นเมมเบรนมากกว่าการอุดตันในรูพรุน หลังจากการล้างย้อนกลับ ฟลักซ์อาจมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ในระดับที่น่าพอใจ ขึ้นอยู่กับชนิดของสารอุดตัน แต่ในระยะยาวแล้วก็อาจพบว่า ฟลักซ์ยังคงลดลงอยู่ ดังนั้น การล้างด้วยวิธีเคมี จึงมีความจำเป็นเป็นที่นิยมใช้และเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพดีกว่า

**2.2.6.2 วิธีเคมี** การทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนด้วยวิธีเคมี สารเคมีอาจช่วยให้มีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพโดยสารเคมีอาจทำให้สารอุดตันพองตัว หดตัว ละลาย เกิดการหลุดออก (desorption) หรือสารเคมีที่ใช้อาจทำปฏิกิริยาเคมีกับสารอุดตัน เช่น การเกิดไฮโดรไลซิส การย่อยสลายพันธะเปปไทด์ของโปรตีน และการเกิดสารประกอบเชิงซ้อน เป็นต้น สารเคมีที่ใช้ควรมีคุณสมบัติดังนี้

- ละลายสารอุดตันหรือทำให้สารอุดตันเกาะตัวกันน้อยลงด้วยกลไกทางกายภาพหรือทางเคมี
- รักษาสภาพการกระจายตัวของสารอุดตันไม่ให้กลับไปสะสมอีก
- ไม่เป็นสารที่อาจก่อให้เกิดการอุดตันเสียเอง
- ไม่ทำให้แผ่นเมมเบรนเสื่อมสภาพ

### 2.2.6.3 สารเคมีที่ใช้ทำความสะอาด สามารถแบ่งได้เป็นกลุ่มใหญ่ดังนี้

- กรด ใช้ได้ทั้งกรดอินทรีย์และกรดอนินทรีย์ เช่น กรดเกลือ (hydrochloric acid) กรดซัลฟูริก (sulfuric acid) กรดฟอสฟอริก (phosphoric acid) กรดออกซาลิก (oxalic acid) และกรดซิตริก (citric acid) เป็นต้น ใช้ได้ผลดีในการละลายตะกอนที่เป็นโลหะออกไซด์ เกลือคาร์บอเนต ซึ่งเป็นสารอุดตันที่พบในกระบวนการออสโมซิสผันกลับ แต่ใช้ไม่ได้ผลกับสารอุดตันที่เป็นซิลิกา ซิลิเกต คอลลอยด์ และจุลินทรีย์
- ด่าง ที่ใช้กันแพร่หลาย คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และ ฟอสเฟต ใช้ได้ผลดีกับสารอุดตันที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน เพคติน เซลลูโลส ดังนั้น จึงนิยมใช้ล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้ในอุตสาหกรรม อาหาร และน้ำผลไม้
- เอนไซม์ (enzyme) ใช้สำหรับทำความสะอาดสารอินทรีย์ เช่น โปรตีน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทำลายพันธะ เป็นโมเลกุลที่เล็กลง โดยต้องเลือกเอนไซม์ที่เหมาะสม เช่น ถ้าสารอุดตันเป็น

โปรตีน ควรใช้เอ็นไซม์ โปรติเอส (protease) ถ้าเป็นแป้ง ควรใช้อะมัยเลส (amylase) หรือควรใช้ไลเปส (lypase) ถ้าสารอุกคั้นเป็นไขมัน บางทีอาจต้องใช้หลายตัวผสมกัน หรือหาสูตรที่เหมาะสม เอ็นไซม์จัดเป็นสารทำความสะอาดที่อ่อน ไม่เป็นอันตรายต่อเยื่อแผ่น แต่มีราคาแพง

- สารลดแรงตึงผิว (surfactants) เป็นสารโมเลกุลใหญ่ที่ประกอบด้วยส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) และส่วนชอบน้ำ (hydrophilic) ซึ่งเป็นส่วนที่เมื่ออยู่ในน้ำจะแสดงประจุบวก ประจุลบ หรือเป็นกลาง ขึ้นอยู่กับชนิดของสารลดแรงตึงผิว ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวที่ใช้เป็นสารทำความสะอาด แสดงในตารางที่ 2.8

ตารางที่ 2.8 ตัวอย่างสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน (Lindua ,1994)

ชนิดของสารลดแรงตึงผิว	ตัวอย่างสาร
ประจุบวก (cationic surfactant)	-สารประกอบแอม โมเนีย (quaternary ammonium compound) มีประสิทธิภาพในการทำความสะอาดต่ำกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่น
ประจุลบ (anionic surfactant)	-สบู่ คีเทอเจนต์ (alkyl benzene sulfonate) มีประสิทธิภาพดีกว่าสารลดแรงตึงผิวชนิดอื่นๆ
ไม่มีประจุ (non-ionic surfactant)	-เอทิลีนออกไซด์ (ethylene oxide) มีประสิทธิภาพปานกลาง (ต่ำกว่าสารลดแรงตึงผิวประจุลบ)

สารลดแรงตึงผิวสามารถเข้าถึงส่วนต่างๆ ของแผ่นเมมเบรนได้ดี (เกิด wetting) จึงสัมผัสกับสารอุกคั้นได้ดี ล้างออกได้ง่าย แต่ควรเลือกอย่างระมัดระวัง เพราะสารลดแรงตึงผิวอาจถูกดูดซับได้โดยแผ่นเมมเบรนบางชนิด จึงอาจกลายเป็นสารอุกคั้นเสียเอง ตัวอย่างเช่น สารลดแรงตึงผิวที่เป็นสารต้านฟอง (antifoam) ที่ใช้ในกระบวนการหมัก

- สารฆ่าเชื้อ (disinfectant) สารฆ่าเชื้อส่วนมากเป็นตัวออกซิแดนท์ (oxidant) เช่น คลอรีน (chlorine) ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (hydrogen peroxide) สารพวกไฮโปคลอไรท์ (hypochlorite) เป็นสารที่ออกฤทธิ์แรง จึงควรใช้ด้วยความระมัดระวัง เพราะอาจมีผลเสียต่อแผ่นเมมเบรนและส่วนอื่นๆ ของหน่วยอุปกรณ์ นอกจากจะใช้ทำความสะอาดแล้ว ยังนิยมใช้เป็นสารเก็บรักษาแผ่นเมมเบรนด้วย
- สารทำความสะอาดกำหนดสูตร (formulated cleaner) เป็นสารที่มีผู้จำหน่ายกำหนดส่วนประกอบขึ้นโดยอาจใช้สารหลายชนิดผสมกันให้มีความเหมาะสมกับชนิดของสารอุกคั้นและแผ่นเมมเบรน ค่อนข้างมีราคาแพง ตัวอย่างชื่อทางการค้าของสารเหล่านี้ เช่น GB Fuller Ultrasil Klensade และ Argo Scientific ตารางที่ 2.9 สรุปสารทำความสะอาดที่ใช้ตามความเข้มข้นที่ระบุ

เพื่อกำจัดสารอุดตัน โดยบางตัวเป็นสารผสม ในกรณีที่ใช้สารทำความสะอาดเดี่ยวๆ ช่วงความเข้มข้นที่ใช้แสดงในตารางที่ 2.10

### 2.2.7 ขั้นตอนการทำความสะอาด (Cleaning sequences)

การล้างแผ่นเมมเบรนเป็นสิ่งสำคัญและอาจต้องใช้เวลานาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะของสารละลายและแผ่นเมมเบรน อาจมีความจำเป็นที่จะต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1 ชนิด เช่น ถ้าสารอุดตันมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ก็ควรล้างด้วยทั้งกรดและด่าง อาจจำเป็นต้องล้างมากกว่า 1 รอบ เพื่อให้แผ่นเมมเบรนมีสมรรถนะกลับไปใกล้เคียงกับก่อนเริ่มใช้งานมากที่สุด จึงจำเป็นต้องศึกษาเป็นแต่ละกรณีไป วิธีปฏิบัติใช้ค่าฟลักซ์ของน้ำที่สภาวะหนึ่ง เป็นค่าอ้างอิง เมื่อทราบฟลักซ์ของแผ่นเมมเบรนใหม่ หลังจากผ่านขั้นตอนการล้างแล้วจึงจำเป็นต้องทดสอบฟลักซ์ของน้ำ ซึ่งหลังจากการล้างค่าฟลักซ์ของน้ำควรสูงกว่า 85% ของค่าเริ่มต้น ขั้นตอนในการล้างที่ปฏิบัติโดยทั่วไปมีดังนี้

1. นำสารละลายออกจากระบบ
2. ล้างทิ้ง (rinse) ด้วยน้ำสะอาด
3. ล้างด้วยสารทำความสะอาดในลักษณะไหลวนอยู่ในระบบ และถ้าใช้สารทำความสะอาดมากกว่า 1 ชนิด ต้องทำซ้ำในขั้นตอนนี้
4. ล้างทิ้งด้วยน้ำเพื่อกำจัดสารทำความสะอาด
5. ทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำ ถ้ายังไม่ได้ค่าที่พอใจ (เช่น 85% ของค่าเริ่มต้น) ให้ทำซ้ำข้อ 3-4

นอกจากขั้นตอนแล้ว ยังต้องพิจารณาเวลาในการล้างของแต่ละขั้นตอน ซึ่งสามารถสังเกตได้จากสารละลาย หรือน้ำขณะล้างทิ้ง หรือล้างแบบไหลวน ว่ามีความขุ่น-ใส เพราะช่วยบอกให้ทราบว่า สามารถแยกสารอุดตันออกได้เพียงใด นอกจากนี้ สภาวะในการล้างซึ่งหมายถึงความเร็วในการป้อนสารทำความสะอาดผ่านแผ่นเมมเบรน ความดันในการป้อนสารละลาย ตลอดจนอุณหภูมิก็มีความสำคัญ การล้างที่ความเร็วสูง และ ความดันต่ำ ให้ประสิทธิภาพในการล้างดีกว่า เพราะที่ความเร็วสูง แรงเฉือนระหว่างสารละลายและแผ่นเมมเบรนช่วยให้สารอุดตันหลุดออก ที่ความดันต่ำช่วยไม่ให้เกิดการอัดตัวของสารอุดตันหรือเกิดการสะสมกลับเข้าไปในแผ่นเมมเบรน การล้างที่อุณหภูมิสูงจะช่วยให้ละลายสารอุดตันได้ดีขึ้น โดยต้องพิจารณาความคงทนต่ออุณหภูมิของแผ่นเมมเบรน

ตารางที่ 2.9 ตัวอย่างสารทำความสะอาดที่ใช้เดี่ยวๆ หรือเป็นสารผสมเพื่อกำจัดสารอุดตันต่างๆ (Lindua,1994)

การทำความสะอาด	สารอุดตัน		
	ตะกรันเกลือ ออกไซด์ของ โลหะ	คอลลอยด์	จุลินทรีย์
กรดเกลือ 0.5% (wt)	√		
กรดซัลฟิวริก 2% (wt) ผสมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (pH 4)	√		
กรดฟอสฟอริก 0.5% (wt)	√		
โซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 11-11.9		√	√
ไตรโซเดียมฟอสเฟต 1% (wt) ผสมกับเกลือโซเดียมของ		√	√
EDTA 1% (wt) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ pH 11-11.9			
โซเดียมไฮโครซัลไฟท์ 1% (wt)	√		
กรดซัลฟิวริก 2.5% (wt) และแอมโมเนียมไบฟลูออไรด์	√	√	

\*EDTA = ethylenediamine tetra acetic acid

ตารางที่ 2.10 ตัวอย่างช่วงความเข้มข้นของสารทำความสะอาด (Lindua,1994)

ชื่อสาร	ความเข้มข้น (%wt)
โซเดียมไฮดรอกไซด์	0.5-1.0
EDTA	0.5-1.0
กรดไนตริก	0.3-0.5
คลอรีน	0.002-0.02
ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์	0.1
โซเดียมไบซัลไฟท์	0.25

ตัวอย่างขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนโพลีซัลโฟนที่ใช้เพิ่มความเข้มข้นโปรตีนในน้ำนมของโรงงานแห่งหนึ่งมีดังนี้

1. ล้างทิ้งด้วยน้ำที่อุณหภูมิห้อง 10 นาที
2. ล้างโดยใช้สารละลายต่างไหลวนที่ 60-75 องศาเซลเซียส เวลา 30-60 นาที
3. ล้างทิ้งด้วยน้ำ 10 นาที
4. ล้างด้วยกรด ที่ 50-60 องศาเซลเซียส นาน 20-60 นาที
5. ล้างทิ้งด้วยน้ำ 10 นาที

6. ล้างด้วยสารละลายล้างไหลวน 15-30 นาที ที่ 60-75 องศาเซลเซียส
7. ล้างทิ้งด้วยน้ำ 10 นาที

โดยทั่วไป ผู้ผลิต/ผู้จำหน่ายแผ่นเมมเบรน จะกำหนดแนวทางการใช้สารทำความสะอาดให้ อย่างไรก็ตามอาจกล่าวได้ว่า การศึกษาการล้างแผ่นเมมเบรนที่มีประสิทธิภาพสำหรับการใช้งานหนึ่ง เป็นการลองผิดลองถูก (trial & error) ในระดับหนึ่ง Lindau และ Jonsson (1994) ศึกษาการทำความสะอาดแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (โพลีซัลโฟน) ที่ผ่านการใช้แยกน้ำมันในน้ำทิ้งโดยใช้สารทำความสะอาดที่มีจำหน่ายในท้องตลาด คือ Ultrasil 70, Ultrasil 75 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นกรด และ Ultrasil 11, Ultrasil 91 ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง ผลการศึกษาพบว่า ถ้าล้างด้วยสารทำความสะอาดที่มีฤทธิ์เป็นกรด ทำให้ฟลักซ์ของน้ำสูงขึ้น (เทียบกับแผ่นเมมเบรนที่ใช้งานแล้ว และยังไม่ได้อ้าง) เกือบ 3 เท่าตัว แต่เมื่อนำไปใช้งานอีกฟลักซ์ลดลงเทียบกับเวลาค่อนข้างชัดเจน การล้างด้วยสารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างทำให้ฟลักซ์ของน้ำเพิ่มขึ้น ประมาณ 50% เท่านั้น แต่ค่าฟลักซ์ค่อนข้างคงที่ การที่สารละลายกรด ล้างแผ่นเมมเบรนได้ดีกว่าสารละลายด่าง เพราะน้ำทิ้งที่เจือปนด้วยน้ำมัน เป็นน้ำมันที่ละลายน้ำได้ (soluble oil) ที่มีส่วนประกอบเป็นสารอินทรีย์ เช่น เหล็ก ซิลิกา แคลเซียม อยู่มากกว่าสารอินทรีย์ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังพบว่า ควรล้างด้วยทั้งสารละลายกรด และด่าง โดยการล้างด้วยกรดก่อน แล้วตามด้วยด่าง ให้ประสิทธิภาพในการล้างดีกว่า

### 2.2.8 การเก็บรักษา

การเก็บรักษาแผ่นเมมเบรนแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ได้แก่ ช่วงที่ผลิตแผ่นเมมเบรนแล้วมีความจำเป็นต้องเก็บรักษา เพื่อรอการจำหน่าย หรือระหว่างการขนส่ง อีกช่วงหนึ่ง คือ เมื่อมีการหยุดใช้งาน การเก็บรักษาแผ่นเมมเบรนที่ยังไม่ได้ใช้งานหรือใช้งานแล้ว ไม่ต่างกัน แต่แผ่นเมมเบรนที่ใช้งานแล้วต้องผ่านการล้างด้วยสารทำความสะอาดก่อน

สารเก็บรักษาแผ่นเมมเบรน ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสมคือ ไม่เปลี่ยนแปลงสมรรถนะของแผ่นเมมเบรน ป้องกันการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ล้างออกได้ง่าย ไม่เหลือตกค้าง และถ้าเก็บรักษาด้วยสารนั้นๆแล้วต้องขนส่งได้สะดวก

แผ่นเมมเบรนเซรามิกส์ หลังจากใช้งาน และผ่านการล้างทำความสะอาดแล้ว ควรถอดออกมาจากตัวบรรจุ ทำให้แห้งแล้วเก็บไว้ในสภาพแห้ง ไม่จำเป็นต้องแช่ในสารเก็บรักษา เพราะมีความคงทนกว่าแผ่นเมมเบรนโพลีเมอร์ ส่วนแผ่นเมมเบรนโพลีเมอร์ที่ผลิตเสร็จแล้วอาจเก็บรักษาได้ทั้งในสภาพแห้ง หรือเปียก การเก็บแห้งใช้วิธีเคลือบแผ่นเมมเบรนด้วยสารจำพวกกลีเซอรอล แล้วทำ

ให้แห้งก่อนนำมาใช้ ให้ล้างทิ้งด้วยน้ำ ถ้าเป็นแผ่นเมมเบรนที่ใช้งาน และทำความสะอาดแล้ว จะเก็บในสภาพเปียก และถ้าเป็นระบบใหญ่ จะไม่ถอดออกจากตัวบรรจุ ก็จะป้อนสารเก็บรักษาผ่านแผ่นเมมเบรน (เหมือนวิธีดำเนินการปกติ) ให้มีการไหลวนอยู่ในระบบ 5-10 นาที แล้วปิดเครื่อง สารเก็บรักษาจะค้างอยู่ในหน่วยอุปกรณ์แผ่นเมมเบรน เมื่อใช้งานอีกให้ล้างด้วยน้ำจนหมด

ผู้ผลิตแผ่นเมมเบรน นอกจากจะแนะนำสารทำความสะอาดแล้ว ยังแนะนำสารเก็บรักษาที่เหมาะสมสำหรับแผ่นเมมเบรนนั้นๆ ตารางที่ 2.11 แสดงตัวอย่างสารเก็บรักษาของแผ่นเมมเบรนโพลีเมอร์

ตารางที่ 2.11 ตัวอย่างสารเก็บรักษาแผ่นเมมเบรนโพลีเมอร์ (Lindua,1994)

ผู้ผลิต	รหัสชื่อแผ่นและชนิดโพลีเมอร์	สารเก็บรักษา
Amicon	YM(เซลลูโลส) PM (โพลีซัลโฟน)	เก็บเปียก 10% เอทานอล เก็บแห้ง แช่ในกลีเซอริน 50% 24 ชม. แล้วทำให้แห้ง
DDS	XM (อะคริลิก) GR (โพลีซัลโฟน) FS (PVDF) CA (เซลลูโลสอะซิเตต)	10% เอทานอล สารละลายผสมกรดโพรไพโอนิก 0.8% NaOH 0.8% และกลีเซอริน 50% กรดอะซิติก 0.8% NaOH 0.3% ฟอร์มอลดีไฮด์ 0.38% กลีเซอริน 50%
Flimtec	FT	โพรพิลีน หรือกลีเซอริน 20%
Filtron	NOVA (โพลีเอเทอร์ซัลโฟน)	ฟอร์มาลิน 0.2% หรือ NaOH 0.1 M
Osmonics	ทุกชนิด	ฟอร์มอลดีไฮด์ 0.5%
Millipore	PL (เซลลูโลส) PT (โพลีซัลโฟน)	ฟอร์มอลดีไฮด์ ไม่เกิน 4%หรือสารละลายผสม โซเดียมไฮโปคลอไรต์ 0.05% โซเดียมเบนโซเอท 0.05% และ โซเดียมกลูทาเรตไฮโดรไลต์ 0.05%

### 2.2.9 คุณภาพน้ำ

เนื่องจากกระบวนการเมมเบรนส่วนใหญ่ใช้แยกสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ และต้องใช้น้ำปริมาณมากในการล้าง ตลอดจนการเก็บรักษา ดังนั้น คุณภาพของน้ำจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งถ้าจะให้เหมาะสมและป้องกันการเกิด fouling เนื่องจากสิ่งเจือปนในน้ำแล้วต้องใช้น้ำกลั่น หรือน้ำที่ผ่านกระบวนการออสโมซิสผันกลับ เป็นที่ทราบกันดีว่า คอลลอยด์และแบคทีเรียจำนวนเล็กน้อยในน้ำสามารถทำให้ค่าการซึมผ่านของแผ่นเมมเบรนลดลง ฟลักซ์ของน้ำสะอาดจึง

ลดลงเทียบกับเวลา ยกตัวอย่างเช่น การใช้น้ำกลั่นมาตรฐานจะทำให้ฟลักซ์ของน้ำลดลงประมาณ 10 % คุณภาพน้ำที่เหมาะสมที่เสนอโดย DDS (ผู้ผลิตจำหน่ายระบบออสโมซิสผกกลับ และอัลตราฟิลเตรชัน ประเทศเดนมาร์ก) มีส่วนประกอบดังนี้

เหล็ก	<	0.05 ppm
แมงกานีส	<	0.02 ppm
ซัลไฟด์	<	5 ppm
ความกระด้าง	<	20 (German degree)
อนุภาค	<	25 $\mu\text{m}$
plate count	<	1000 ต่อ 1 ml
Coli count		0 ต่อ 100 th

### 2.3 กระบวนการเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration Membrane Process)

อัลตราฟิลเตรชันเป็นกระบวนการแยกสารโมเลกุลใหญ่ เช่น โปรตีน เอ็นไซม์ และแป้ง ออกจากน้ำและสารโมเลกุลเล็กอื่นๆ ตัวอย่างสารละลายที่อาจแยก หรือเพิ่มความเข้มข้นได้ โดยกระบวนการนี้ ได้แก่ นํ้านม นํ้าผลไม้ สารละลายเอ็นไซม์ สารปฏิชีวนะ ในการดำเนินงานใช้ความดันในการป้อนสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรนในช่วง 2-10 บรรยากาศ แผ่นเมมเบรนที่ใช้เป็นแผ่นเมมเบรนไม่สมมาตรที่มีชั้นผิวหนา 0.1-2  $\mu\text{m}$  มีขนาดรูพรุน 10-500  $\text{\AA}$  หรือเทียบเท่า MWCO 500-300,000

#### 2.3.1 ฟลักซ์และการกักกัน

ในอัลตราฟิลเตรชัน ฟลักซ์และค่าการกักกันเป็นค่าที่แสดงสมรรถนะของกระบวนการเช่นเดียวกับออสโมซิสผกกลับ สมการของฟลักซ์เขียนในรูปของแรงขับเคลื่อนและความต้านทานต่อการไหลเป็น ดังนี้

$$J_v = (\Delta P - \Delta \pi) / \mu_v R_f \quad (2.1)$$

เมื่อ  $J_v$  = ฟลักซ์ของสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรน ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

$\Delta P$  = ผลต่างความดันที่ให้กับสารละลาย (Pa)

$\Delta \pi$  = ผลต่างความดันออสโมติกของสารละลาย (Pa)



- $\mu_v$  = ความหนืดของสารละลายที่ผ่านแผ่นเมมเบรน (Pa.s)  
 $R_f$  = ความต้านทานรวมต่อการไหลผ่าน ( $m^{-1}$ )

สำหรับสารละลายของสาร โมเลกุลใหญ่ค่า  $\Delta P \gg \Delta \pi$  จึงอาจตัดเทอม  $\Delta \pi$  ทิ้ง สมการ 2.1 ลดรูปเป็น

$$J_v = \Delta P / \mu_v R_f \quad (2.2)$$

สำหรับกลไกที่แผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันสามารถกักกันตัวถูกละลายได้ เป็นกลไกการคัดขนาด (molecular sieving) โดยอาจมี interaction ระหว่างตัวถูกละลายและแผ่นเมมเบรนได้ เพราะสารละลายที่ต้องการแยกหรือเพิ่มความเข้มข้นโดยอัลตราฟิลเตรชันส่วนมากมีองค์ประกอบที่ซับซ้อนคือประกอบด้วยตัวถูกละลายที่มีขนาดต่างกัน ปริมาณที่ต่างกันด้วย

### 2.3.2 แบบจำลองการถ่ายเทมวล

Nor (1987) กล่าวว่า การเสนอแบบจำลองการถ่ายเทมวลในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันก็เพื่ออธิบายการเปลี่ยนแปลงของฟลักซ์ และเพื่อให้เข้าใจกลไกการถ่ายเทของโมเลกุลผ่านเมมเบรนหรือการกักกันโมเลกุลโดยแผ่นเมมเบรน แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในช่วงแรกๆ ได้แก่ แบบจำลองรูพรุน (Pore model) ซึ่งสมมติว่ารูพรุนเป็นทรงกระบอกและอนุภาคเป็นทรงกลม ฟลักซ์ของตัวถูกละลายเกิดจากการแพร่ผ่านรูพรุนและการกรองโดยการคัดขนาด และมีผลของการบดบังและแรงเสียดทานที่เกิดจากรูพรุนด้วย อย่างไรก็ตามสมการที่เกี่ยวข้อง ค่อนข้างซับซ้อน ถึงแม้ว่าจะมีการดัดแปลงให้เหมาะสมขึ้นก็ยังพบว่าไม่มีความถูกต้องเพียงพอในการอธิบายผลการทดลอง แบบจำลองที่ศึกษากันเป็นส่วนใหญ่มีดังต่อไปนี้

- แบบจำลองเจลโพลาริเซชัน (Gel polarization model ; GP) แบบจำลองนี้อธิบายว่าการลดลงของฟลักซ์เกิดขึ้นเนื่องจากการเกิดเจลที่ผิวหน้าเมมเบรน
- แบบจำลองความดันออสโมติก (Osmotic pressure model) แบบจำลองความดันออสโมติก อธิบายว่าการที่ฟลักซ์ลดลง เกิดจากความดันออสโมติกที่เพิ่มขึ้น ทำให้แรงขับเคลื่อน ( $\Delta P - \Delta \pi$ ) ลดลง โดยทั่วไปความดันออสโมติกของสาร โมเลกุลใหญ่มีค่าต่ำมากเมื่อเทียบกับสาร โมเลกุลเล็กๆ (เช่น เกลือ น้ำตาล) ที่มีความเข้มข้นเท่ากัน ดังนั้น การคำนวณฟลักซ์ในอัลตราฟิลเตรชันจึงมักตัดค่า  $\Delta \pi$  ออก

- แบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (Resistance-in-series model) อ่ำไพ (2536) กล่าวว่า แบบจำลองอนุกรมความต้านทานอธิบายการลดลงของฟลักซ์ว่าเกิดขึ้นเนื่องจากความต้านทานในการไหลเพิ่มขึ้น (สมการ 2.2)  $R_t$  คือความต้านทานรวมในการไหล ซึ่งเป็นผลบวกของความต้านทานเมมเบรน ( $R_m$ ) และความต้านทานที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการเกิด CP (รูปที่ 2.13) ความต้านทานที่เพิ่มขึ้นเกิดจาก 1) ความต้านทานจากการเกิดโพลาริเซชัน ( $R_p$ ) ซึ่งเป็นผลรวมของความต้านทานเนื่องจากการเกิด CP ( $R_{cp}$ ) และเจด ( $R_g$ ) 2) ความต้านทานเนื่องจากการเกิด fouling ( $R_f$ ) ซึ่งได้แก่ ความต้านทานเนื่องจากการดูดซับ ( $R_s$ ) และความต้านทานเนื่องจากการอุดตันรูพรุนของตัวถูกละลาย  $R_{pb}$  เป็นต้น ดังนั้น

$$R_t = R_m + (R_{cp} + R_g) + (R_s + R_{pb} + \dots)$$

$$R_t = R_m + R_p + R_f \quad (2.3)$$

ดังนั้น ความต้านทานรวมจึงเป็นผลบวกของความต้านทานย่อย

โพลาริเซชัน เป็นกระบวนการที่ผันกลับหรือสามารถล้างออกด้วยน้ำกลั่น ไม่ว่าจะใช้สถานะใด ซึ่งเมื่อใช้น้ำทำความสะอาดแผ่นเมมเบรน จะสามารถกำจัดเฉพาะชั้นโพลาริเซชันออกไปเท่านั้น แต่ไม่อาจทำลายชั้น fouling ได้ ดังนั้น ความต้านทานการไหลของน้ำ สำหรับแผ่นเมมเบรนที่ใช้แล้วหลังจากล้างด้วยน้ำกลั่น คือ ความต้านทานของเยื่อแผ่น  $R_m$  และ  $R_f$

$$J'_w = \Delta P / \mu_w (R_m + R_f) \quad (2.4)$$

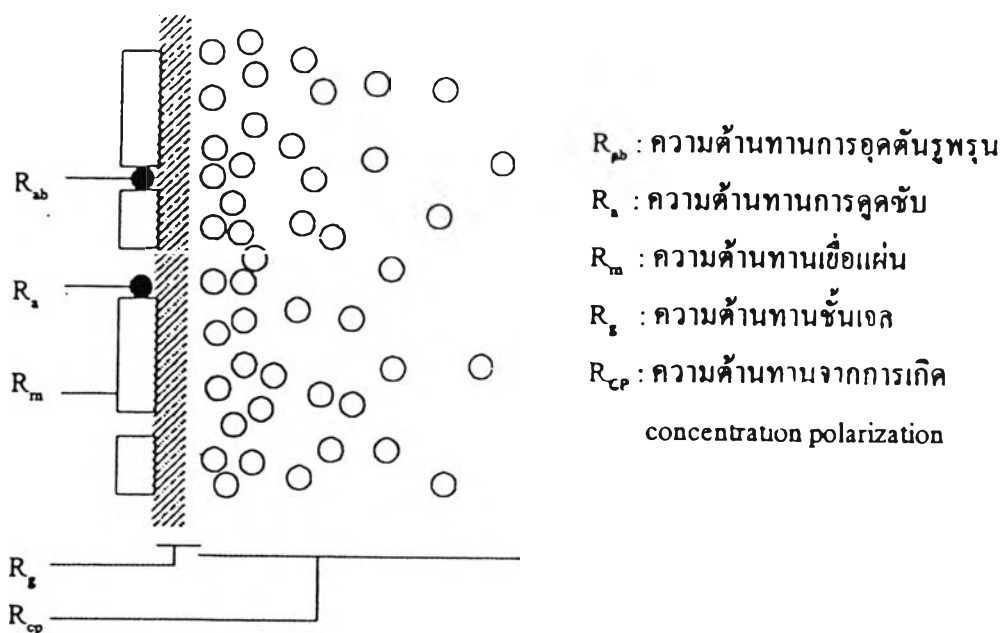
เมื่อ  $J'_w$  คือ ฟลักซ์ของน้ำหลังการล้างแผ่นเมมเบรนที่ใช้แล้วด้วยน้ำ

$R_m$  คำนวณจากสมการ 2.2 เมื่อสารละลายเป็นน้ำสะอาด โดย

$$J_w = \Delta P / \mu_w R_m \quad (2.5)$$

โดย  $J_w$ ,  $\mu_w$  เป็นฟลักซ์และความหนืดของน้ำตามลำดับ

สมการ (2.2-2.5) แสดงขั้นตอนการคำนวณความต้านทานต่างๆ จากผลการทดลอง เมื่อล้างแผ่นเมมเบรนด้วยสารทำความสะอาด และด้วยขั้นตอนที่เหมาะสม จะสามารถกำจัด  $R_f$  โดยทดสอบค่าฟลักซ์ของน้ำสะอาดว่าใกล้เคียงกับแผ่นเมมเบรนที่ยังไม่ได้ใช้งานหรือไม่



รูปที่ 2.13 แสดงความต้านทานต่างๆ ตามแบบจำลองอนุกรมความต้านทาน (อำไพ, 2536)

แบบจำลองอนุกรมความต้านทานเป็นแบบจำลองที่ง่าย เมื่อนำไปอธิบายผลการทดลอง และคำนวณค่าความต้านทานหลักๆ ออกมา (ได้แก่  $R_m$ ,  $R_p$  และ  $R_f$ ) จะทำให้เข้าใจกลไก หรือการลดลงของฟลักซ์ได้ชัดเจนขึ้นว่า ขึ้นอยู่กับตัวแปรอะไรบ้าง ปกติ  $R_m$  มีค่าต่ำ คือไม่เกิน 10% ของความต้านทานรวม ส่วน  $R_p$  และ  $R_f$  นั้นขึ้นอยู่กับการดำเนินงาน (เช่น ความดัน ความเร็วที่ป้อนสารละลายผ่านแผ่นเมมเบรน) และชนิดของสารละลายนั้นว่ามีส่วนประกอบอย่างไร ตลอดจน interaction ระหว่างตัวถูกละลายด้วยกันเอง จากขั้นตอนการคำนวณความต้านทานที่อธิบายมาแล้วข้างต้น จะเห็นได้ว่าเราอาจไม่สามารถแยก  $R_{cp}$  ออกจาก  $R_g$  เพราะคาดว่าชั้นของตัวถูกละลายที่สะสมเป็นเจล สามารถละลายน้ำได้  $R_f$  ก็เช่นเดียวกัน เกิดจากกลไกที่ซับซ้อน

การวิเคราะห์ความต้านทานต่างๆ เป็นฟังก์ชันกับตัวแปรในการดำเนินงานทำให้ทราบว่าความต้านทานใด มีผลต่อการลดลงของฟลักซ์มากกว่ากัน และควรปรับเปลี่ยนสภาวะการทดลองอย่างไร เพื่อให้ได้ค่าฟลักซ์สูงสุด Chiang และ Cheryan (1986) ศึกษาการเพิ่มความเข้มข้นของโปรตีนในน้ำนมด้วยแผ่นเมมเบรนแบบเส้นใยกลวง (โพลีซัลโฟน) และพบว่า  $R_p$  แปรผันตรงกับ ความดัน ส่วน  $R_f$  ไม่ขึ้นกับสภาวะการทำงาน และเป็นความต้านทานหลักที่มีผลต่อฟลักซ์

Jiratananon และ Chanachai (1996) อธิบายผลการเกิด fouling ในการกรองน้ำเสาวรศ โดยวิเคราะห์ความต้านทานต่างๆ และพบว่า  $R_p$  และ  $R_f$  เพิ่มขึ้นกับความดัน เพราะที่ความดันสูงเกิด CP มาก และโมเลกุลถูกพาไปสะสมที่ผิวหน้าเยื่อแผ่น และในรูพรุนมากขึ้น การเพิ่มอัตราการไหลช่วยลด CP จึงลดความต้านทานทั้ง  $R_p$  และ  $R_f$  ความเข้มข้นที่สูงขึ้น ส่งผลให้ความต้านทานเพิ่ม

ชั้นเช่นกัน โดยความต้านทานเนื่องจากชั้นโพลารไรซ์ เป็นความต้านทานหลักที่ทำให้ฟลักซ์ลดลง ส่วน Ousman และ Bennasar (1995) พบว่าความต้านทานเนื่องจากการสะสมของอนุภาคของเมล็ดแป้งบนแผ่นเมมเบรนเซรามิกส์ (ซึ่งก็คือความต้านทานส่วนหนึ่งของชั้นโพลารไรซ์) เป็นความต้านทานหลักต่อการกรอง

### 2.3.3 Fouling

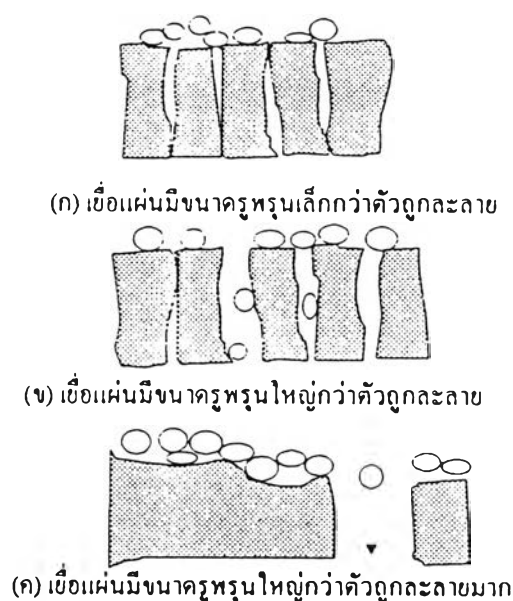
อำไพ (2536) กล่าวว่า ตามที่กล่าวแล้วว่าการเกิด CP นำไปสู่การเกิดเจล และ fouling ได้มีความพยายามที่จะอธิบายความหมายของ fouling และพบว่า fouling เกี่ยวข้องกับ CP/เจล ได้อย่างชัดเจน เพราะว่าปรากฏการณ์เหล่านี้มีผลต่อฟลักซ์และการกักกันคล้ายคลึงกัน โดยส่วนใหญ่จะพิจารณาว่า fouling เป็นสาเหตุที่ทำให้ฟลักซ์ลดลงในช่วงเวลายาวนาน แต่ fouling แตกต่างกับเจลในแง่ที่ว่าตามความเข้าใจของนักวิจัยทั่วไป เจลเกิดจากการที่ตัวถูกละลายมีความเข้มข้นสูงถึงขีดจำกัดการละลายของตัวละลายนั่นๆ ส่วน fouling เกิดขึ้นด้วยกลไกอื่นและเกิดพันธะอย่างใกล้ชิดกับผิวแผ่นเมมเบรนเพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนมากขึ้น ควรพิจารณาคำแห่ง การเกิดปรากฏการณ์เหล่านี้ โดยเริ่มต้นจากสารละลายใน bulk สู่วิวแผ่นเมมเบรน คือ CP, เจล และ fouling ตามลำดับ และจะแยกได้ว่า CP เป็นส่วนหนึ่งของชั้นขอบเขตและเจลเป็นส่วนหนึ่งของชั้น CP โดยทั้ง CP และเจลเกิดบริเวณผิวแผ่นเมมเบรน ส่วนชั้น fouling จะเกิดจากการเก็บกักหรือการดูดซับของตัวถูกละลายภายในรูพรุนและบนผิวหน้าแผ่นเมมเบรน ซึ่งเห็นได้ชัดว่า fouling เกิดใกล้ขีดและยึดติดแน่นกับแผ่นเมมเบรนมากกว่า CP/เจล

จึงกล่าวได้ว่า ลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของ fouling คือ ไม่สามารถใช้วิธีการเปลี่ยนสถานะการทำงาน (เช่น เพิ่มอัตราการไหลหรือปรับเปลี่ยนความดัน) หรือวิธีการง่ายๆ (เช่น การล้างน้ำ) ในการกำจัดชั้น fouling ออกจากแผ่นเมมเบรน เพื่อให้ฟลักซ์ที่ลดลงเพิ่มกลับคืนเท่าเดิมได้ การกำจัดชั้น fouling ออกจากแผ่นเมมเบรน จึงจำเป็นต้องใช้สารทำความสะอาดตรงกันข้ามกับ CP/เจล กล่าวคือ ฟลักซ์ที่ลดลงเนื่องจากการเกิด CP/เจล สามารถทำให้ฟลักซ์เพิ่มกลับคืนโดยการเปลี่ยนสถานะการทำงานหรือการล้างน้ำ อาจกล่าวได้อีกนัยหนึ่งว่า CP/เจล เป็นกระบวนการที่ผันกลับ ส่วน fouling เป็นกระบวนการที่ไม่ผันกลับ

อย่างไรก็ตาม CP/เจล กับ fouling ก็ไม่สามารถแยกจากกันได้อย่างแท้จริง ด้วยเทอมผันกลับ/ไม่ผันกลับ คือ อาจมี fouling จำนวนเล็กน้อยที่สามารถผันกลับได้ ทั้งนี้เป็นความจริงที่ว่า โดยทั่วไปแผ่นเมมเบรนจะไม่สามารถกักตัวถูกละลายได้ถึง 100% ซึ่งส่วนนี้อาจแปลความหมายได้ว่า ในระหว่างการดำเนินการของกระบวนการ UF มีตัวถูกละลายหลุดจากชั้น fouling สู่ออสมิเอท อย่าง

ซ้ำๆ คาดว่าประมาณ 10% fouling สามารถผันกลับได้ ในทำนองเดียวกัน ก็อาจมีเจลบางส่วนที่ไม่ผันกลับ โดยเฉพาะสำหรับตัวถูกละลายบางชนิด เช่น แป้ง เพคติน เจลาติน และโปรตีนบางชนิด ซึ่งอาจเปลี่ยนสภาพ (denature) ที่ผิวเยื่อแผ่นกลายเป็นเจลจริง (การที่สาร โมเลกุลใหญ่เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง โดยมีการเชื่อมขวางกันเป็นร่างแห) แต่การที่ตัวถูกละลายจะเปลี่ยนสภาพเป็นเจลนั้นย่อมขึ้นกับปัจจัยอื่นๆอีก เช่น อุณหภูมิต้องสูงพอ ซึ่งโดยส่วนใหญ่แล้ว จะดำเนินการที่อุณหภูมิไม่สูงนัก เพื่อรักษาคุณภาพผลิตภัณฑ์

ถ้าสรุปจากแนวความคิดและผลงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า fouling อาจเกิดขึ้นด้วยปรากฏการณ์ต่างๆ ต่อไปนี้ คือ 1) การคูดซับ 2) การเก็บกักพร้อมกับการหลุดออก 3) การเก็บกัก โดยไม่มีการหลุดออก และ 4) การอุดตันหรือปิดกั้นรูพรุนของตัวถูกละลาย



รูปที่ 2.14 ลักษณะการเกิด fouling ของแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่างๆ เทียบกับขนาดตัวถูกละลาย (Meireles, 1991)

fouling นอกจากจะทำให้ฟลักซ์ลดลงแล้วยังทำให้คุณสมบัติการกักกันสารเปลี่ยนแปลงด้วย Meireles (1991) ได้เสนอแผนภาพการเกิด fouling ดังรูปที่ 2.14 ซึ่งแสดงลักษณะการเกิด fouling ของแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนขนาดต่างๆ เทียบกับขนาดของตัวถูกละลาย สำหรับแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนแน่น (คือ จำนวนรูพรุนต่อพื้นที่ผิวสูง) และมีขนาดเล็กกว่าตัวถูกละลาย(รูปที่ 2.14ก) การเกิด fouling จะเกิดบนผิวแผ่นเมมเบรนเท่านั้น ทั้งขนาดรูพรุนและคุณสมบัติการกักกันสารของแผ่นเมมเบรนจึงไม่เปลี่ยนแปลง การกักกันตัวถูกละลายจะถูกควบคุมโดยแผ่นเมมเบรนเดิม แต่อย่างไรก็ตาม ความต้านทานการไหลของตัวทำละลายจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปิดรูพรุนของตัวถูกละลาย ฟลักซ์จึงลดลง ในกรณีที่แผ่นเมมเบรนมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายเล็กน้อย (รูป

2.14ข) fouling จะเกิดขึ้นมากทั้งภายในรูพรุนและบนผิวแผ่นเมมเบรน โดยจะเกิดบนแผ่นเมมเบรนเป็นส่วนใหญ่ ทำให้การกักกันตัวถูกละลายเปลี่ยนแปลง คือจะถูกควบคุมโดยโครงสร้างของ fouling เป็นหลัก ส่วนแผ่นเมมเบรนที่มีรูพรุนห่างและมีขนาดใหญ่กว่าตัวถูกละลายมากนั้น (รูป 2.14ค) fouling จะเกิดขึ้นมากทั้งภายในรูพรุนและบนผิวแผ่นเมมเบรน ทำให้คุณสมบัติการกักสารเปลี่ยนแปลงไปมากกว่าแบบอื่น ซึ่งสรุปได้ว่า กลไกการเกิด fouling มี 2 ขั้นตอนคือ การเกิด fouling ภายในรูพรุน และการสร้างชั้นของตัวถูกละลายบนผิวแผ่นเมมเบรน ซึ่งขึ้นกับทั้งขนาดรูพรุนและขนาดของตัวถูกละลาย แต่ fouling จะมีผลกระทบกับแผ่นเมมเบรนที่มีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าตัวถูกละลายมากกว่า

### 2.3.4 แผ่นเมมเบรนและอุปกรณ์ (Membranes and modules)

แผ่นเมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน เป็นแผ่นที่ผลิตจากโพลีเมอร์เป็นส่วนใหญ่ และมีการใช้แผ่นเซรามิกส้อยู่บ้าง ถึงแม้ว่าจะมีความพยายามในการพัฒนาวัสดุสำหรับผลิตแผ่นเมมเบรนอย่างกว้างขวาง แต่ก็กล่าวได้ว่ามีวัสดุเพียงไม่กี่ชนิดที่นำมาผลิตเป็นแผ่นเมมเบรนและประสบความสำเร็จในเชิงเทคนิคและการค้า ตารางที่ 2.12 สรุปวัสดุหลักๆ ที่ใช้ผลิตแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน

สำหรับรูปแบบของหน่วยอุปกรณ์ก็จะเหมือนกับที่ใช้อยู่ทั่วไป คืออาจเป็นแบบแผ่นแบบท่อ แบบเส้นใยกลวง และแบบท่อม้วน สำหรับผู้ผลิตแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันรายใหญ่ๆ ได้รวบรวมไว้ในตารางที่ 2.13 ส่วนตารางที่ 2.14 เป็นชนิดของแผ่นเมมเบรนที่มีขายอยู่ในท้องตลาดพร้อมคุณสมบัติโดยย่อ

### 2.3.5 รูปแบบของกระบวนการ (Process configuration)

การออกแบบกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันเพื่อการใช้งานหนึ่งๆ สามารถดำเนินการแบบกะ หรือแบบต่อเนื่อง ตลอดจนแบบหลายขั้นตอน เพื่อให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ของการใช้งาน เนื่องจากสารละลายที่เกี่ยวข้องส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารโมเลกุลใหญ่และเล็กปนกัน กรณีผลิตภัณฑ์ที่ต้องการเป็นสารโมเลกุลใหญ่มักเรียกว่า การเพิ่มความเข้มข้น (concentration) หรือรีเทนเททเป็นผลิตภัณฑ์ ในกรณีใช้คำว่า การทำให้บริสุทธิ์ (purification) หมายความว่า เพอมิเอทซึ่งมีสารโมเลกุลเล็กเป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ยังมีคำว่า ไดอะฟิลเตรชัน (diafiltration) ซึ่งเป็นกระบวนการอัลตราฟิลเตรชันและไมโครฟิลเตรชันแบบหนึ่ง

ตารางที่ 2.12 วัสดุสำหรับผลิตแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Kulkami,1992)

โพลีเมอร์	โพลีซัลโฟน โพลีอีเทอร์ซัลโฟน เซลลูโลสอะซิเตด โพลีเอไมด์ โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์ โพลีอะคริโลไนไตรล์
วัสดุอนินทรีย์	$\gamma$ -อะลูมินา / $\alpha$ -อะลูมินา เซอร์โคเนีย คาร์บอน โบโรซิลิเกต กลาส (borosilicate glass)

ตารางที่ 2.13 ตัวอย่างแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชันที่จำหน่ายในท้องตลาดพร้อมรายละเอียดโดยย่อ \*(Mcgregor,1986)

ผู้ผลิต	แบบหน่วยอุปกรณ์	วัสดุ	MWCO
Abcor	ท่อม้วน,ท่อ	โพลีไวนิลลิดีนฟลูออไรด์	10000-20000
Millipore	ท่อม้วน	โพลีซัลโฟน	8000
Nitto Electric	ท่อ	โพลีโอลิฟิน	20000/100000
Osmonics	แผ่นเรียบ	เซลลูโลสอะซิเตด	1000/20000
Peterson Candy	ท่อ	เซลลูโลสอะซิเตด	1000-20000
Romicon/Amicon	แคปปีลารี+	โพลีซัลโฟน	2000-50000
Rhone-Poulenc	แผ่นเรียบ	ซัลโฟเนตโพลีซัลโฟน	20000
Wafilin	ท่อ	โพลีอะคริโลไนไตรล์	10000
Fluid Systems	ท่อม้วน	โพลีอีเทอร์ซัลโฟน	6000-10000
Amicon	ท่อม้วน	โพลีซัลโฟน	100000
Nitto Denko	ท่อม้วน	โพลีซัลโฟน	50000
	ท่อ	โพลีโอลิฟิน	20000-100000

\*ในที่นี้ไม่ได้บอกพื้นที่ผิวเมมเบรนของแต่ละหน่วยอุปกรณ์เพราะมีการผลิตหลายขนาดตามความต้องการใช้งาน นอกจากนี้ผู้ผลิตอาจบอกค่าฟลักซ์ของน้ำประกอบกับค่า MWCO ซึ่งต่างก็ใช้สภาวะในการทดสอบต่างกัน จึงอาจเปรียบเทียบกันได้แบบประมาณเท่านั้น

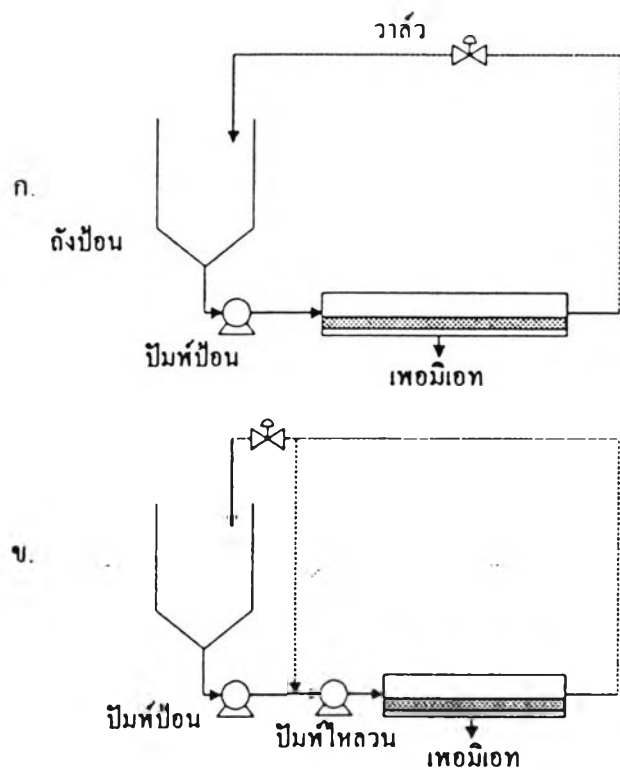
+แคปปีลารี (Capillary module) มีลักษณะคล้ายแบบเส้นใยกลวง แต่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในท่อใหญ่กว่า (0.5-10 mm)

ตารางที่ 2.14 รายชื่อผู้ผลิตจำหน่ายแผ่นเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน (Kulkarni, 1992)

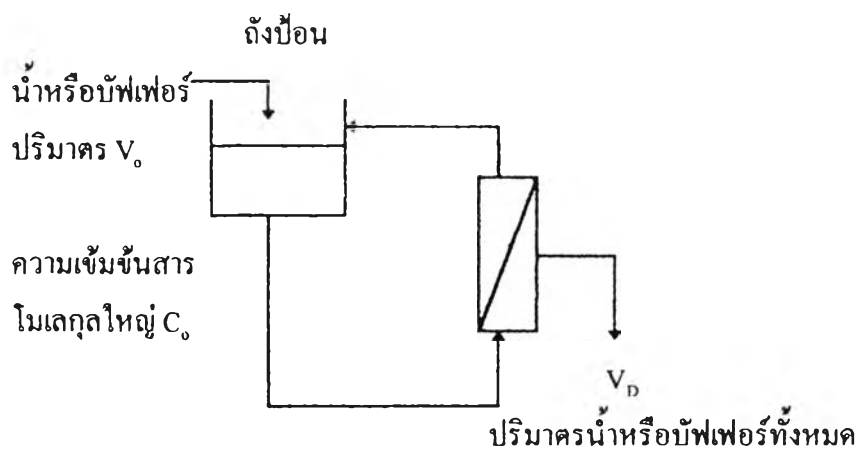
Abcor, Inc. USA	Peterson Candy Corp. UK
Amicon, Inc. USA	Millipore Corp. Japan
Dow Danmark A/S Denmark	Rhone-Poulenc France
UPO, USA	Du Pont, USA
Fluid Systems Corp. USA	Sartorius GmbH. Germany
Asahi-Kasei, Japan	Schleicher & Schull GmbH. Germany
Osmonic Inc. USA	Desalination Systems Inc. USA

- การดำเนินการแบบกะ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยรูปที่ 2.15(ก) เป็นแบบวนกลับหมด (total recycle) ส่วนรูปที่ 2.15(ข) เป็นการวนกลับบางส่วน (partial recycle) ความเข้มข้นในถังป้อนจะเพิ่มขึ้นกับเวลา จากผลของ CP ฟลักซ์จึงลดลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น โดยอาจมีลักษณะฟังก์ชันตามแบบจำลองเจลาโพลาริเซชัน
- ไดอะฟิลเตรชัน Jiratananon (1991) ได้อธิบายรูปแบบหนึ่งของกระบวนการอัลตราฟิลเตรชัน (หรือไมโครฟิลเตรชัน) ที่ขณะดำเนินการมีการเติมน้ำหรือสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer) เข้าไปในสารละลายป้อนเพื่อทดแทน เอมิเอทที่ถูกแยกออกไปโดยอาจเติมเป็นช่วงๆ หรือเติมอย่างต่อเนื่อง เมื่อเติมน้ำลงไปจะทำให้สารละลายในถังป้อนเจือจางลง ทำให้ค่าฟลักซ์สูงขึ้น จึงเป็นการเร่งให้สารโมเลกุลเล็กผ่านเยื่อแผ่นได้มากขึ้น ดังนั้น วัตถุประสงค์หลักของการใช้ไดอะฟิลเตรชัน ก็เพื่อกำจัดสารโมเลกุลเล็กออกจากสารโมเลกุลใหญ่ ให้ได้มากที่สุด โดยความเข้มข้นของสารโมเลกุลใหญ่ในถังป้อนยังคงเท่าเดิม เพราะโดยปกติจะเติมน้ำปริมาณเท่าๆ กับเอมิเอทที่ถูกแยกออก หรือถ้าเป็นแบบต่อเนื่องก็หมายความว่า อัตราการป้อนน้ำ เท่ากับอัตราการไหลของเอมิเอท (รูปที่ 2.16)





รูปที่ 2.15 การดำเนินการแบบกะ (ก) วนกลับ (ข) วนกลับบางส่วน (Jiratananon,1991)



รูปที่ 2.16 การดำเนินการแบบไดอะฟิลเตรชัน (Jiratananon,1991)

- การดำเนินการแบบต่อเนื่อง มีข้อได้เปรียบกว่าแบบกะ และการจัดเรียงอาจใช้หน่วยอุปกรณ์เดียว หรือหลายหน่วยอุปกรณ์มาต่อเรียงกัน แบบอนุกรม หรือแบบขนาน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเป้าหมายของกระบวนการตลอดจนผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ เนื่องจากในแบบต่อเนื่อง เยื่อแผ่นทำงานที่ความเข้มข้นของสารละลายสูง ทำให้มีค่าฟลักซ์ต่ำกว่าค่าฟลักซ์เฉลี่ยในระบบกะ เมื่อเทียบที่กำลังผลิตเท่ากัน ทำให้ในแบบต่อเนื่องต้องใช้พื้นที่แผ่นเมมเบรนสูงกว่า การดำเนินการแบบหลายขั้นตอน ซึ่งความเข้มข้นในขั้นตอนท้ายๆ สูงกว่าในขั้นตอนต้น ทำให้ได้ค่าฟลักซ์เฉลี่ยสูงขึ้น และลดพื้นที่แผ่นเมมเบรนที่ต้องการ

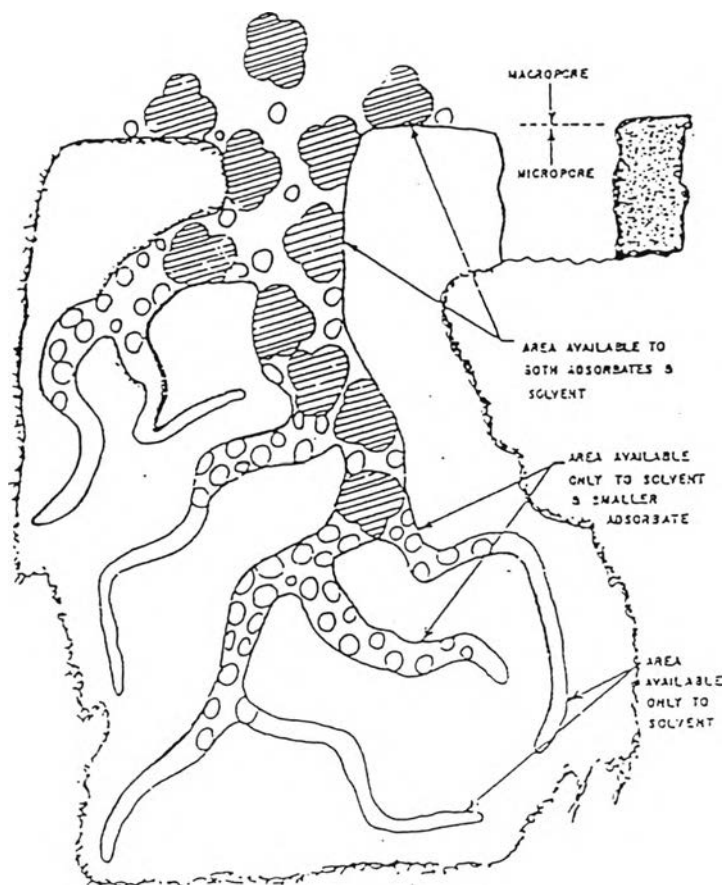
## 2.4 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษ เพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุดซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนให้มากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20 อังสตรอม ถึง 20,000 อังสตรอม ถ่านกัมมันต์จัดเป็นสารอนินทรีย์สังเคราะห์ การสังเคราะห์คาร์บอนชนิดนี้ กระทำได้โดยการไล่ความชื้นออกจากวัตถุดิบ (dehydration) ก่อน จากนั้น จึงเผาวัตถุดิบที่แห้งแล้วให้เป็นถ่าน (carbonization) โดยใช้อุณหภูมิ 400-600 องศาเซลเซียส คาร์บอนที่ได้จะมีอำนาจในการดูดซับไขมัน เนื่องจากภายในโพรงของคาร์บอนยังมีทาร์ (tar) อุดตันอยู่ จึงต้องทำการเผาต่อไปที่อุณหภูมิประมาณ 750-950 องศาเซลเซียส ภายใต้ความชื้นที่เหมาะสมเพื่อไล่ทาร์ออกให้หมด (activation) จึงจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีอำนาจดูดซับไขมันสูง วัตถุดิบที่ใช้ในการสังเคราะห์ถ่านกัมมันต์มีหลายชนิด เช่น กะลามะพร้าว ถ่าน หินบางชนิด ฯลฯ การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิว พื้นที่ผิวจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดขีดความสามารถในการดูดซับไขมัน (adsorptive capacity) วิธีการวัดสมรรถนะของถ่านกัมมันต์อาจจะกระทำได้โดยการวัด iodine number หรือ molass number

ถ่านกัมมันต์มี 2 ประเภท คือ แบบผง (powder) และแบบเกร็ด (granular) ถ่านกัมมันต์แบบผงมีขนาดประมาณ 10-15 ไมครอน หรือน้อยกว่า ข้อดีของถ่านกัมมันต์แบบผงก็คือ มีราคาถูกกว่าแบบเกร็ด ใช้งานและสะดวก การดูดซับไขมันเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว ส่วนข้อเสียก็คือ การฟื้นฟูสภาพ (regeneration) ไม่ประหยัดและไม่คุ้มค่า ถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ดังนี้

- กำจัดสี กลิ่น และรส ซึ่งเกิดจากสารอินทรีย์
- กำจัดคลอรีนในน้ำ
- กำจัดโลหะหนักต่างๆ
- กำจัดยาฆ่าแมลง

- กำจัดผงซักฟอก
- กำจัดฟีนอล และสารประกอบฟีนอล
- กำจัดสารไฮโดรคาร์บอน



รูปที่ 2.17 รูปตัดแสดงถึงโพรงและช่องว่างภายในถ่านกัมมันต์ (มันส์ติน ตั๋วทูลเวสม์,2538)

#### 2.4.1 กระบวนการดูดติดผิว (adsorption process)

การเกาะหรือดูดติดผิว (adsorption) เป็นความสามารถของสารบางชนิดในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ ซึ่งอยู่ในของเหลว หรือก๊าซ ให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ปรากฏการณ์เช่นนี้จัดเป็นการเคลื่อนย้ายสาร (mass transfer) จากของเหลวหรือก๊าซมายังผิวของของแข็ง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดติด เรียกว่า adsorbate ส่วนผิวที่เป็นที่เกาะจับ เรียกว่า adsorbent การเกิดกระบวนการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวของ ของแข็ง-ของแข็ง ก๊าซ-ของแข็ง ก๊าซ-ของเหลว ของเหลว-ของเหลว หรือของเหลว-ของแข็ง ก็ได้ การดูดติดผิวด้วยของแข็ง เช่นถ่านกัมมันต์ ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวของของแข็งนั้น การดูดติดผิวมี 2 กระบวนการ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (physisorption) และการ

ดูดซับผิวทางเคมี (chemisorption) ทั้ง 2 กระบวนการจะเกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในของเหลวเข้ามาจับกับผิวของของแข็ง ซึ่งเกิดขึ้นจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง (adsorbent) เอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลในของเหลว (adsorbate) ได้

การดูดซับผิวทางกายภาพ (physisorption) เกิดจากผลต่างของพลังงานและแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (weak Van Der Waal's force) โมเลกุลของ adsorbate จะยึดติดกับ โมเลกุลของตัว adsorbent การดูดซับผิวชนิดนี้เป็นแบบหลายชั้น (multilayered) คือ แต่ละชั้นของ โมเลกุลจะเกิดขึ้นบนชั้นของ โมเลกุลที่เกิดก่อนหน้า โดยที่จำนวนชั้นที่เกิดจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่ปนเปื้อนในของเหลว

การดูดซับผิวทางเคมี (chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (adsorbate) และสารดูดซับ (adsorbent) ทำให้เกิดสารประกอบเคมีขึ้น กระบวนการนี้เป็นแบบชั้นเดียว (monolayered) และไม่สามารถผันกลับได้ (irreversible) เพราะว่าพลังงานจะถูกใช้ไปในการสร้างสารประกอบทางเคมีขึ้นที่พื้นผิวที่ถูกเกาะจับ การผันกลับ (reversibility) ของการดูดซับผิวทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดึงดูดระหว่าง โมเลกุลที่ถูกเกาะติดและ โมเลกุลที่ถูกดูดซับ ถ้าหากแรงดึงดูดน้อยจะทำให้เกิดการหลุดออกไปของโมเลกุลที่ถูกดูดซับ (desorption)

กลไกการดูดซับผิว แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (external diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายจะเข้าถึงสารดูดซับผิว ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับผิวมีของเหลวห่อหุ้มอยู่ โดยโมเลกุลของตัวถูกละลายจะแทรกตัวผ่านชั้นของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับผิว

2. การแพร่ภายใน (internal diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างภายในสารดูดซับผิว เพื่อให้เกิดการดูดซับผิว

3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายดูดซับที่ผิวของสารดูดซับผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่

## 2.4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว (factors influencing adsorption)

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์มีหลายอย่าง เช่น พีเอช อุณหภูมิ ความปั่นป่วน เป็นต้น ซึ่งรายละเอียดของปัจจัยต่างๆ มีดังนี้

**2.4.2.1 ความปั่นป่วน (mixing speed)** น้ำที่มีความปั่นป่วนต่ำ พิล์มของน้ำที่ล้อมรอบถ่านกัมมันต์ไว้จะมีความหนามาก เนื่องจากไม่มีการรบกวน ในทางตรงกันข้าม ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูงจะทำให้น้ำไม่อาจจะสะสมตัวเป็นฟิล์มหนาได้ เป็นผลให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ผ่านฟิล์มน้ำเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ได้ดีกว่า ความปั่นป่วนมีผลต่ออัตราเร็วของการดูดติดผิว

**2.4.2.2 อุณหภูมิ (temperature)** การดูดติดผิวเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน (exo-thermic) ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง

**2.4.2.3 พีเอช (pH)** พีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและความสามารถในการละลายของสารต่างๆ ดังนั้น พีเอชจึงมีผลต่อการดูดติดผิวด้วย Hassler (1963) อ้างถึงใน Chen (1974) กล่าวว่า ที่พีเอชสูงกว่า 7 ความสามารถในการดูดติดผิวของสีจะต่ำ แต่ในภาวะที่พีเอชต่ำกว่า 7 การดูดติดผิวของสีจะดี

**2.4.2.4 ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (size and surface area)** คุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว จะพบว่า อัตราเร็วในการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ คือ ขนาดและพื้นที่ผิว จะพบว่า อัตราเร็วในการดูดติดผิวเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของถ่านกัมมันต์ ดังนั้น ผงถ่านกัมมันต์จึงมีอัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงกว่าแบบเกร็ด ส่วนพื้นที่ผิวมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการดูดติดผิว กล่าวคือ พื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลได้มากกว่าชนิดที่มีพื้นที่ผิวน้อย ขนาดของถ่านกัมมันต์มีผลต่อพื้นที่ผิวน้อย เนื่องจากพื้นที่ผิวส่วนใหญ่ได้มาจากโพรงภายในมากกว่าพื้นที่ผิวภายนอก

**2.4.2.5 ความสามารถในการละลายและขนาดของสารที่ถูกดูดติด** ขนาดของสารหรือโมเลกุลที่อยู่ในสารละลายมีความสำคัญมากต่อการดูดติดผิว ซึ่งส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นภายในโพรงของถ่านกัมมันต์ การดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดี เมื่อสาร หรือ โมเลกุลมีขนาดเล็กกว่าโพรงของถ่านกัมมันต์

### 2.4.3 โมเดลที่แสดงการดูดติดผิว

ในขณะที่เกิดการดูดติดผิว เมื่อตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะหลุดออกจากผิวกลับเข้าสู่สารละลาย ระบบจะเริ่มเข้าสู่สมดุล และเมื่อจำนวนของตัวถูกละลายที่ถูกดูดติดผิวและที่หลุดออกมาจากผิวเท่ากัน ระบบจะเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เรียกว่า สมดุลของการดูดติดผิว (adsorption equilibrium) ที่สมดุลนี้จะไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายบนผิวของสารดูดติดหรือในสารละลาย

Adsorption isotherm เป็นการแสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสารที่ถูกดูดติดต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ จุดสมดุล สมการของ adsorption isotherm มี 2 แบบ คือ

#### 2.4.3.1 Freundlich isotherm ซึ่งมีสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$q = KC^{1/n} \quad (2.6)$$

โดยที่  $q$  = มวลของสารที่ถูกดูดติดต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

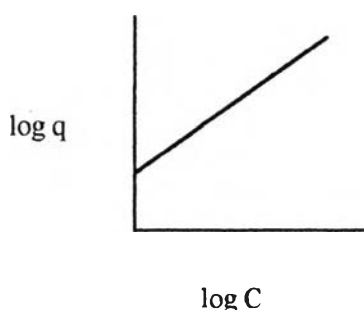
$C$  = ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดที่เหลืออยู่ในสารละลาย ณ จุดสมดุล

$K, n$  = ค่าคงที่

จากสมการที่ (2.6) สามารถจัดรูปใหม่เป็น

$$\log(q) = \log K + (1/n) \log C \quad (2.7)$$

เพื่อให้กราฟเป็นเส้นตรงจะได้ลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่มดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ลักษณะกราฟของ Freundlich isotherm (Walter, 1972)

### 2.4.3.2 Langmuir isotherm ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า

- เป็น single layer adsorption
- การดูดซับผิวเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ สมดุลจะเกิด เมื่ออัตราการดูดซับ (adsorption) ของโมเลกุลที่พื้นที่ผิวเท่ากับอัตราการปล่อยการดูดซับ (desorption) จากพื้นที่ผิวสามารถแสดงด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ คือ

$$k_d q = k_a C (q_m - q) \quad (2.8)$$

โดยที่  $k_d$  = ค่าคงที่อัตราการปล่อยการดูดซับ (desorption rate constant)

$k_a$  = ค่าคงที่อัตราการดูดซับ (adsorption rate constant)

$q_m$  = มวลของสารที่ถูกดูดซับที่มากที่สุดต่อน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์  
(maximum possible carbon loading)

$C$  = ความเข้มข้นของสารละลายหลังการดูดซับ

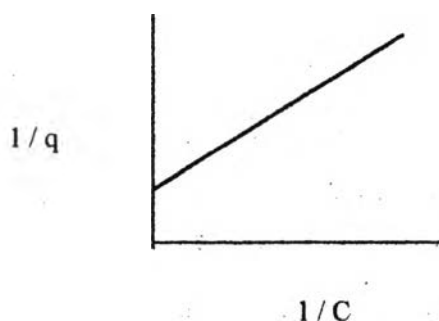
$q$  = มวลของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของผงถ่านกัมมันต์

จากสมการที่ (2.8) สามารถจัดรูปสมการใหม่ให้เป็นสมการเส้นตรง จะได้

$$\begin{aligned} 1/q &= (k_d + k_a C) / (k_a q_m C) \\ &= k_d / (k_a q_m C) + (1/q_m) \\ C/q &= (k_d / k_a) (1/q_m) + C/q_m \\ C/q &= (a/q_m) + C/q_m \end{aligned} \quad (2.9)$$

เมื่อ  $a$  เป็นค่าคงที่ สามารถแสดงโดยกราฟดังรูปที่ 2.20 จะได้กราฟมีลักษณะเป็นฟังก์ชันเพิ่ม

สำหรับการทำ adsorption isotherm ของน้ำเสีย จะนิยมใช้สมการของ Freundlich isotherm มากกว่า สมการของ Langmuir isotherm



รูปที่ 2.19 ลักษณะกราฟของ Langmuir isotherm (Walter , 1972)

## 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Ghosh (1978) กล่าวว่า การกำจัดน้ำเสียจากโรงงานทอผ้า เกี่ยวข้องกับสารอินทรีย์ และสี โดยทั่วไป วิธีการกำจัดสี และ สารอินทรีย์จะสามารถทำได้โดยการใช้ระบบทางชีววิทยาควบคู่กับระบบฟิสิกส์-เคมี แม้ว่าระบบกำจัดทางชีววิทยาจะสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีแต่ไม่สามารถกำจัดสีได้เป็นที่น่าพอใจ กระบวนการดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) หรือจะตามด้วยวิธีการตกตะกอนด้วยเคมี (chemical coagulation) เป็นวิธีที่สามารถกำจัดสีจากน้ำเสียได้ การรวมกระบวนการทางชีววิทยาและการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) สามารถกำจัดสารอินทรีย์ และ สี ของน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าได้

Porter (1976) ได้กล่าวถึงระบบบำบัดทางชีววิทยาว่า สามารถกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียของโรงงานทอผ้าเท่านั้น แต่ไม่สามารถกำจัดสารบางชนิดและสีออกไปได้ โดยได้ทดลองใช้ระบบชีววิทยากำจัดกีโรซีน (kerosene) ซึ่งเป็นสารประกอบตัวทำละลายไฮโดรคาร์บอน (hydrocarbon solvent) ที่ใช้ในกรรมวิธีทอผ้า พบว่า กีโรซีน ถูกกำจัดได้เพียง 1-5% ในขณะที่กระบวนการทางฟิสิกส์ ได้แก่ การระเหยกลายเป็นไอ (evaporation) สามารถกำจัดได้ถึง 90% สำหรับสีย้อมได้ทดลองเฉพาะสีดิสเพอร์ส สีแวต และ สีรีแอคทีฟบางชนิด พบว่า สีดิสเพอร์สและสีแวต เป็นพวกพิกเมนต์ (pigment) ไม่ละลายน้ำ ความเข้มข้นของสีย้อมลดลงได้เอง ประมาณ 15% หลังจากทิ้งไว้ให้ตกตะกอน 30 วัน สำหรับระบบชีววิทยานั้นไม่สามารถกำจัดสีทั้ง 3 ประเภทนี้ได้

Digiano (1977) พบว่า วิธีการดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption) โดยใช้ carbon column ไม่สามารถกำจัดสีดิสเพอร์ส ได้ เนื่องจากการแขวนลอยของสีดิสเพอร์ส เป็นตัวป้องกันการดูดซับของถ่าน วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี และ ozonization ถูกนำมาใช้ และให้ประสิทธิภาพแตกต่างกันไป เนื่องจากการทำการตกตะกอน ต้องควบคุมพีเอช และมีปัญหาเรื่องการกำจัดสลัดจ์ ขณะที่ ozonization สามารถกำจัดสีได้อย่างดี แต่ไม่สามารถลดซีโอติลงได้ เนื่องจากความยุ่งยากและความแตกต่างของสีย้อม วิธีการตกตะกอนด้วยสารเคมี และ ozonization ต้องมีระบบอื่นช่วยเพื่อกำจัดสารประกอบอื่นๆ Porter ได้ให้ข้อเสนอแนะว่า การใช้กระบวนการดูดซับด้วยถ่านควรตามด้วยระบบตกตะกอนด้วยสารเคมี สำหรับน้ำเสียที่มีสีดิสเพอร์ส ส่วน Shelley แสดงให้เห็นว่า การกำจัดสีและซีโอติของน้ำเสียจากโรงงานทอผ้า ควรใช้วิธีการตกตะกอนด้วยวิธีเคมีตามด้วยการดูดซับด้วยถ่าน (carbon adsorption)



สำหรับการกำจัดพวกสีข้อมผ้า Robertaccio (1973) พบว่าในการเติมผงถ่านปริมาณ 50, 100 และ 250 มก./ลบ.คม. ลงในระบบแอกทีเวตเต็ดสแตจจ์ สามารถลดสีลงจาก 1300 APHA units เหลือเพียง 560, 490 และ 210 AHPA units ตามลำดับ จากนั้น DuPont ได้ทำการทดลองกับระบบบำบัดน้ำเสียขนาด 151,000 ลบ.ม/วัน โดยการเติมผงถ่านปริมาณ 189 มก./ลบ.คม. สามารถกำจัดสีได้ 76% โดยสีในน้ำเสีย 2080 AHPA units และสีในน้ำทิ้งที่ออกจากระบบเหลือเพียง 490 AHPA units

Laine (1989) ได้ทดลองกรองน้ำผิวดินด้วยอัลตราฟิลเตรชันชนิดต่างๆ เพื่อศึกษาผลของการกำจัดความขุ่น สารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด(TOC) พบว่าสามารถกำจัด TOC ได้ 40% โดยไม่ขึ้นกับขนาดช่องว่างของเมมเบรน สำหรับความขุ่นถูกกำจัดได้มากกว่า 98%

ศิริมา ปัญญาเมธีกุล (2538) ได้ทดลองใช้ hollow-fiber UF เพื่อกำจัดโคลิฟาจออกจากน้ำ โดยใช้เมมเบรนขนาด 0.1 และ 0.03 ไมครอน จากผลการทดลองพบว่าสามารถกำจัด โคลิฟาจได้ 4-6 ล็อกสำหรับเมมเบรนขนาด 0.1 ไมครอน และ 6-7.3 ล็อกสำหรับเมมเบรนขนาด 0.03 ไมครอน

Buckley (1992) ได้นำเทคโนโลยีเมมเบรนมาบำบัดน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้า แยกทดลองแต่ละชนิดของเมมเบรน พบว่า

เมมเบรนชนิดไมโครฟิลเตรชัน ทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าชนิดเส้นใยโพลีเอสเตอร์ พีเอช 5.5-6 ด้วยอัตราการกรองต่อพื้นที่ 50 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง ความดัน 400 kPa สามารถกำจัดสีข้อมคิสเพอร์สได้ และน้ำมีความขุ่นต่ำ แต่น้ำที่ผ่านการบำบัดยังคงเห็นสีอยู่บางส่วน และสามารถกำจัดสีข้อมซัลเฟอร์ สีข้อมแวต และสีข้อมอะโซอิกได้

เมมเบรนชนิดออสโมซิสผันทกลับได้ ทดลองกับน้ำเสียโรงงานทอผ้าฝ้าย ใช้ความดันในการกรอง 2.7-3.1 MPa สำหรับสแดงแรกสามารถกำจัดของแข็งทั้งหมด(total solids) sodium ions และ conductivity ได้มากกว่า 96% และกำจัดสีได้ 90% ส่วนคาร์บอนทั้งหมด (total carbon) กำจัดได้ 87% concentrate จากสแดงที่หนึ่งจะป้อนเข้าสู่สแดงที่สอง ความดันที่ใช้สำหรับสแดงที่สอง คือ 5.3-5.8 MPa สามารถกำจัดของแข็งทั้งหมด (total solids) sodium ions และ conductivity ได้มากกว่า 98% กำจัดสีได้ 94% และพบข้อเสียของการใช้เมมเบรนชนิดออสโมซิสผันทกลับ คือ ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียที่เป็นคอลลอยด์ เนื่องจากจะทำให้เมมเบรน fouling

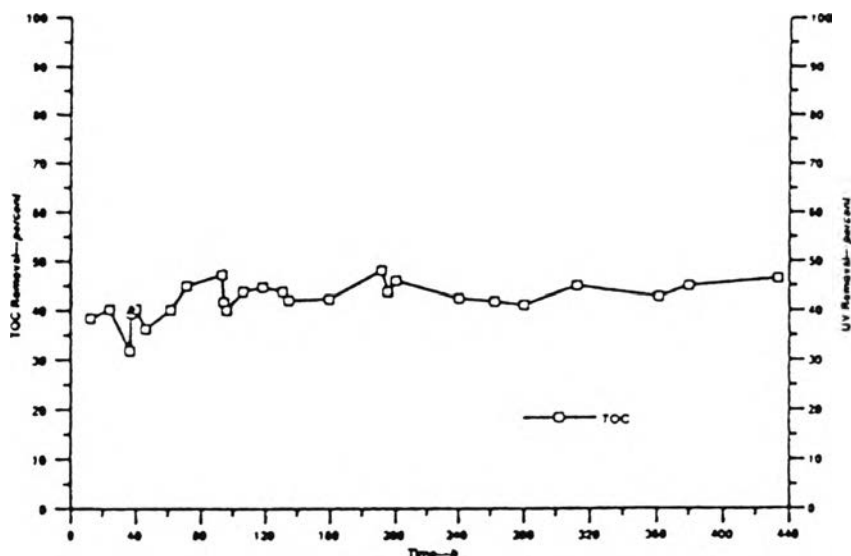
Dynamic membrane (ultrafiltration) ทดลองกับเส้นใยโพลีเอสเตอร์และวิสคอส น้ำเสียที่ออกมาประกอบด้วยสารละลายและคอลลอยด์ รวมทั้ง อะซิเตท alkali เกลือ และสารช่วยย้อม พีเอช 4-9 อุณหภูมิมากกว่า 75 องศาเซลเซียส ของแข็งละลายทั้งหมด (total dissolved solids) มากกว่า 4500 มก./ล. และสีมีค่ามากกว่า 10,000 ADMI ความดันที่

ใช้ คือ 6 MPa อุณหภูมิในการปฏิบัติการ 45 องศาเซลเซียส และอัตราการกรองต่อพื้นที่ 33 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง พบว่าสามารถกำจัดสีได้มากกว่า 95% และกำจัดไอออน(conductivity) ได้ประมาณ 80%

Nanofiltration (charged ultrafiltration) สามารถกำจัดสีที่ย้อมที่ละลายน้ำและไอออนได้ดี เช่นสีย้อมรีแอคทีฟ ที่ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส น้ำเสียที่ออกมาจะมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เช่น sodium chloride ความเข้มข้น 20-100 กรัม/ลิตร หรือ sodium sulphate ความเข้มข้น 15-85 กรัม/ลิตร และ ethylene diamine tetra-acetic acid (EDTA) พีเอชของน้ำเสีย 11.5-12.5 สามารถกำจัดสีได้มากกว่า 99%

Knocke (1994) ศึกษาการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานเยื่อกระดาษและโรงฟอกขาวโดยใช้สารเคมีทำให้ตกตะกอน และเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน พบว่า เมื่อใช้สารส้มและเกลือของเหล็กในการกำจัดสี มีประสิทธิภาพมากกว่า 90-95% ที่พีเอช 5.0-5.5 สำหรับสารส้ม และที่พีเอช 4.0 สำหรับเกลือของเหล็ก และเมื่อใช้เมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน ขนาด 10,000 mass unit ความดัน 25-90 psig ที่อัตราการไหลต่างๆ พบว่าสามารถกำจัดสีได้เฉลี่ย 90% และกำจัด TOC ได้ประมาณ 70% และได้ทดลองนำสารส้มมากำจัดสี ก่อนเข้าระบบเมมเบรน พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสี ไม่แตกต่างกัน เมื่อเทียบกับน้ำเสียที่ไม่ได้ผ่านการบำบัดด้วยสารส้มก่อน เนื่องจาก สารส้มสามารถกำจัดสีที่มีน้ำหนักโมเลกุลใหญ่เท่านั้น (molecular weight) แต่เมมเบรนสามารถกำจัดได้ในช่วงกว้างกว่า

Samer (1991) ได้ทำนายและตรวจสอบ การกำจัดสารอินทรีย์ทั้งหมด (total organic carbon) และสารเคมีอินทรีย์สังเคราะห์ (synthetic organic chemical, 2,4,6-trichlorophenol) จากน้ำธรรมชาติ ในบ่อรัฐ Illinois ซึ่งมีค่า TOC คงที่ที่ 3 มก./ล. ค่าพีเอช ประมาณ 7.5 โดยใช้ผงถ่านกัมมันต์ขนาดอนุภาค 10 ไมครอน ในระบบอัลตราฟิลเตรชัน ชนิด hollow-fiber ที่ทำจากอนุมูลของเซลลูโลส (cellulosic derivative material) มีค่า MWCO เท่ากับ 100,000 จำนวน 20 โมดูล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.93 มิลลิเมตร ความยาว 1.1 เมตรพื้นที่ผิวหน้า (surface area) 0.064 ตารางเมตร ด้วยความดัน 200 kPa (29 psi) พบว่า สามารถกำจัด TOC ได้ประมาณ 45% (รูปที่ 2.24) เมื่อใช้ความเข้มข้นผงถ่านกัมมันต์ 25 มก./ล. PAC RT = 8 ชม. และ HRT = 1 ชม. แต่ถ้าไม่มีการผ่านการบำบัดด้วยผงถ่านกัมมันต์ก่อน จะสามารถกำจัด TOC ได้เพียง 5-10% เท่านั้น และพบว่า อัตราการผลิตน้ำเฉลี่ย (average membrane production) ประมาณ 104-109 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง ที่ 20 องศาเซลเซียส ความดันบรรยากาศ ซึ่งผงถ่านกัมมันต์มีผลต่อการอุดตันของเมมเบรน (membrane fouling) น้อยมาก



รูปที่ 2.20 Percentage removal of TOC during ultrafiltration of PAC pretreated groundwater

(influent TOC=2.8-3.1 mg/l ; PACdose=25 mg/l ; PAC RT=8 h ; HRT=1 h)

(Samer S. Adham et al. , 1991)

Vincent Urbain (1996) ได้ทดลองศึกษาระบบ membrane bioreactor ซึ่งเป็นการรวมกันระหว่างเมมเบรนอัลตราฟิลเตรชัน และ ผงถ่านกัมมันต์ (powdered activated carbon, PAC) เพื่อกำจัดไนโตรเจน (denitrification) สารอินทรีย์ธรรมชาติ (natural organic matter, NOM) ยาฆ่าแมลง และเชื้อโรค โดยใช้โมดูล ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มิลลิเมตร ความยาวโมดูล 1.3 เมตร พื้นที่การกรอง 7.2 ตารางเมตร อัตราการไหลหมุนเวียน (recirculation flow rate) 4.53 ลบ.ม./ชม. ความดันระหว่างเมมเบรน 0.7 บาร์ ความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ (PAC dosing) 10 กรัม/ลบ.ม. พบว่า น้ำที่บำบัดแล้ว มีปริมาณไนเตรท 2.3 มก./ล ไนโตรเจน ไม่มีไนไตรท์เกิดขึ้นเลย ความเข้มข้นของยาฆ่าแมลงต่ำกว่ามาตรฐาน และ ประสิทธิภาพในการกำจัด NOM เท่ากับ 30% และ พบว่า อัตราการกรองต่อพื้นที่ อยู่ที่ค่า 60-70 ลิตร/ตารางเมตร-ชั่วโมง ซึ่งจัดว่าเป็นค่าที่ค่อนข้างสูง โดยผงถ่านกัมมันต์มีผลต่ออัตราการกรองน้อยมาก