บทที่ 3

ทฤษฎี

การสกัดสารบาราคอลขั้นต้นออกจากใบขี้เหล็ก อาศัยหลักการสกัดในขวดเขย่าและในถังกวนและทำให้เข้มข้นขึ้นโดยอาศัยวิธีการเพอร์เวเพอเรชัน ในที่นี้จะขอกล่าวหลักการที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

3.1) การสกัดสารบาราคอล (Extraction of Barakol)

งานวิจัยในครั้งนี้ เราจะทำการสกัดสารบาราคอล (Barakol) ขั้นต้นออกจากใบขี้เหล็ก โดยใช้ตัวทำละลายคือ สารละลายเอธานอล ซึ่งการสกัดในลักษณะนี้เป็นการสกัดแบบชะละลายของเหลว-ของแข็ง(Liquid-Solid Leaching)หรือเรียกสั้นๆ ว่า การชะละลาย (Leaching) หมายถึงการสกัดสารที่อยู่ในของแข็ง (ใบขี้เหล็ก) ที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลาย การสกัดสารจะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของสารที่ละลายได้ (Soluble substance) ที่มีอยู่ในของแข็ง การกระจายตัวในของแข็ง ลักษณะและขนาดของของแข็ง ถ้าตัวถูกละลาย (Solute) มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอในของแข็ง สารที่อยู่ใกล้ผิวจะถูกชะละลายออกมาก่อน และจะเหลือเป็นของแข็งที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุน ซึ่งตัวทำละลายจะต้องซึมทะลุผ่านชั้นนอกเหล่านี้จนเข้าไปถึงตัวถูกละลาย และกระบวนการสกัดสารจะยากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุน ทำให้อัตราการสกัดสารจะลดลง จนเข้าสู่สภาวะสมดุลแต่ถ้าตัวถูกละลายมีอยู่มากในของแข็ง การทำให้โครงสร้างที่เป็นรูพรุนเหล่านี้จะแตกออกเป็นของแข็งชิ้นเล็กๆ ตัวทำละลายก็จะสัมผัสกับตัวถูกละลายได้ง่ายขึ้น โดยทั่วๆ ไปกระบวนการสกัดจะแบ่งออกเป็นสามส่วน[18]ดังนี้ ส่วนที่หนึ่งคือตัวทำละลายจะแพร่ (Diffusion) เข้าไปในใบขี้

ห้องสมุดศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เหล็กแล้วทำการชะละลายสารบาราคอลในใบขี้เหล็ก ส่วนที่สองคือสารละลายจะแพร่ออกจากใบขี้เหล็กออกมาสู่ชั้นนอกรอบๆใบขี้เหล็ก ส่วนที่สามคือสารละลายบาราคอลเกิดการถ่ายเทมวลกระจายไปยังสารละลายส่วนใหญ่ (Bulk solution) หนึ่งในจำนวนเหล่านี้อาจเป็นตัวจำกัดอัตราการสกัด แต่โดยส่วนมากแล้วส่วนที่หนึ่งมักจะเกิดขึ้นเร็ว ทั้งนี้เป็นผลมาจากการชะละลายเกิดที่ผิวภายนอกของของแข็งก่อน

ในบางกรณีสารที่ต้องการ (ที่สามารถละลายได้) จะกระจายอยู่ในส่วนเล็กๆ ของของแข็ง ซึ่งส่วนนี้ตัวทำละลายไม่สามารถแพร่เข้าถึงได้ กรณีเช่นนี้ของแข็งจะถูกบดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ก่อนทำการสกัดเพื่อให้สารที่ต้องการสามารถสัมผัสกับตัวทำละลายได้ดี และถ้าของแข็งมีโครงสร้างคล้ายเซลล์ (Cellular structure) อัตราการสกัดโดยปกติจะต่ำลง ทั้งนี้เพราะผนังเซลล์จะเป็นตัวต้านทาน ดังตัวอย่างเช่น ในการสกัดน้ำตาลจากหัวบีท (Beet) ผนังเซลล์จะเป็นตัวแปรสำคัญในการสกัดน้ำตาล หัวบีทจึงมักถูกหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ ตามความยาวเพื่อลดส่วนที่เป็นผนังเซลล์ และในการสกัดน้ำมันจากเมล็ดพืช ตัวถูกละลายคือน้ำมันพืช ซึ่งเป็นของเหลวที่ได้จากการสกัดและสามารถแพร่ผ่านตัวทำละลายได้ออกมาเป็นน้ำมันพืช

ขั้นตอนการเตรียมของแข็งเพื่อการชะละลาย ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกละลายว่ามีมากเพียงไร การกระจายตัวของสาร ตลอดจนโครงสร้างพื้นฐานของของแข็ง ธรรมชาติของของแข็งเป็นอย่างไร เช่น ส่วนประกอบของเซลล์พืชจะประกอบเป็นโครงสร้างเซลลูล่า (Cellular) อัตราการชะละลายอาจจะเป็นไปอย่างช้าๆ เพราะว่าผนังเซลล์ทำให้เกิดความต้านทานการแพร่ อย่างไรก็ดีการบดเป็นผงเล็กๆ จะทำให้การสัมผัสได้ดี สำหรับการชะละลายทางผลิตภัณฑ์เภสัชวิทยา จากส่วนที่เป็นใบ, ก้าน, ลำต้น, และราก ควรทำให้แห้งก่อนทำการสกัดจะช่วยการแตกตัวของผนังเซลล์ดีขึ้น ดังนั้นตัวทำละลายสามารถชะละลายได้ในทันที ทำให้ระยะเวลาในการสกัดลดน้อยลงได้.

3.1.1) คำจำกัดความในการสกัดเชิงเภสัชวิทยา[19]

การสกัด (Extraction) เป็นกระบวนการสกัดเอาตัวยาที่มีฤทธิ์ทางการรักษา ออกจากสมุนไพร (Crude Drug) โดยใช้ตัวทำละลาย (Solvent) ที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพรแต่ละชนิด

สมุนไพร (Crude Drug) ตามพจนานุกรมฉบับบัณฑิตยสถานกล่าวไว้ว่า หมายถึง พืชที่ใช้ทำเครื่องยา และที่บ่งไว้ในพระราชบัญญัติยา หมายความถึง ยาที่ได้จากพฤกษชาติ สัตว์หรือแร่ ซึ่งยังมิได้ผสม ปรุง หรือแปรสภาพ สมุนไพรส่วนใหญ่ได้มาจากพืช ที่ได้มาจากสัตว์มีน้อยมากในปัจจุบันไม่มี Official Tincture, Fluid Extract และ สารสกัดที่ได้จากสัตว์ สมุนไพรที่เตรียมได้จากสัตว์ในรูป Tincture ที่มี Official สุดท้ายใน NFX คือ Cantharides Tincture ซึ่งเตรียมในการสกัดจากแมลงวันสเปญที่ตากแห้ง (Dry insects, Cantharis vesicatoria) โดยใช้ตัวทำละลายคือ ส่วนผสมของ Glaciai acetic acid กับ Alcohol เป็นตัวสกัดให้ได้ตัวยาที่มีฤทธิ์ทางด้าน Irritant และ Visicant

Extractives คือของเหลวที่ๆได้จากการสกัดไม่ว่าจะทำการสกัดโดยวิธีใดก็ตาม ปกติตัวยาที่สกัดได้จากสมุนไพร ไม่ว่าจะได้จากพืชหรือสัตว์ มักเป็นสารจำพวก Heterogeneous Mixture คือ ประกอบด้วยสารที่มีฤทธิ์ในทางการรักษา (Pharmaceutically active) ซึ่งเป็นสิ่งที่ต้องการจากการสกัด กับสิ่งที่ไม่มีฤทธิ์ทางการรักษา (Pharmaceutically inactive หรือ Inert substance) ซึ่งสิ่งที่ไม่มีฤทธิ์ทางการรักษามักมีผลต่อความคงตัว (Stability) ของตัวยา หรือของเหลวที่ได้จากการสกัด ที่อาจจะทำให้ยาเตรียมที่ได้มีสีจางลง หรือไม่น่าดู รสไม่ดี จึงจัดเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการ อันจะต้องป้องกันมิให้เกิดขึ้นในของเหลวที่ได้จากการสกัด หรือต้องกำจัดออกหากมีการปนอยู่ในของเหลวที่ได้หลังการสกัด

Menstruum คือตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดเอาตัวยาออกจากสมุนไพร

Marc คือกากของยาที่เหลือจากการสกัดซึ่งถูกสกัดเอายาที่มีฤทธิ์ทางการรักษาออกไปจนหมดแล้ว

3.1.2) เหตุผลของการสกัดตัวยาจากสมุนไพร

- เพื่อให้ได้ตัวยาที่เข้มข้นพอที่สามารถควบคุมความแรงของยาได้ง่าย
- เพื่อลดการเสื่อมสภาพของตัวยาให้น้อยลง เช่น อาจมีการเสื่อมสภาพของตัวยาอันเนื่องมาจากการกระทำของเอนไซม์ (Enzyme) ที่ปนอยู่ในสมุนไพร
- เพื่อทำให้ง่ายต่อการพัฒนาตำรับยาเตรียมชนิดต่างๆ ให้คงตัวได้มากกว่า ผลิตภัณฑ์ที่ได้สวยงามและน่าใช้มากขึ้น
- ขนาดของยาที่รับประทานจากตัวยาที่สกัดได้จะมีขนาดน้อยลง และสะดวกในการเก็บและขนส่งมากกว่าในรูปสมุนไพร

ในสมุนไพรจำพวกพืช มักมีตัวยาที่จะสกัดได้อยู่ในรูปของสารเคมีต่างๆ เหล่านี้ในอัตราส่วนต่างๆ กัน ได้แก่ Sugar, Starched Mucilages, Proteins, Albumond, Pectins, Cellulose, Gums, Inorganic salts, Fixed and Volatile Oils, Resins, Tannins, Coloring materials และสารที่จัดเป็นตัวยาสำคัญที่ต้องการสกัดเช่น Alkaloids หรือ Terpenoids

การสกัดตัวยาออกจากสมุนไพร เพื่อให้ได้กลุ่มสารเคมีที่มีฤทธิ์ทางการรักษาจะช่วยให้ยานั้นมีความคงตัวมากกว่าและควบคุมความแรงของยาที่ให้ได้ถูกต้องกับการรักษามากขึ้น ยารักษาโรคในปัจจุบันมักได้จาก การนำเอาสารที่สกัดได้จากสมุนไพรมาทำการสกัดจนได้กลุ่มสารที่มีฤทธิ์ทางการรักษา หรืออาจได้จาการสังเคราะห์ขึ้นมา หรืออาจเตรียมขึ้นมาจากทั้งการสกัดและสังเคราะห์ร่วมกัน การสกัดตัวยาออกจากสมุนไพรควรต้องพยายามสกัดให้ได้เฉพาะสารที่ต้องการ ซึ่งการสกัดเพื่อให้ได้ดังนี้จึงจำเป็นต้องเลือกใช้ตัวทำละลาย ที่เหมาะสมในการสกัดสมุนไพรแต่ละชนิด

ตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดตัวยาจากสมุนไพร เรียกว่า Menstruum โดยที่ตัวทำละลายไม่เพียงแต่จะละลายเอาเฉพาะตัวที่ต้องการเท่านั้น แต่ยังสามารถสกัดเอาสารที่ไม่มีฤทธิ์ทางการรักษาที่ไม่ต้องการออกมาด้วย ดังนั้นในการสกัดจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการเลือกใช้ Menstruum ให้เหมาะสมกับการสกัด แต่ละครั้งเพื่อให้สกัดได้กลุ่มสารที่มีฤทธิ์ทางการรักษามากที่สุด

3.1.3) การเตรียมสมุนไพรสำหรับการสกัด

สมุนไพรที่เก็บมาจะถูกทำให้แห้งก่อนทำการสกัดเพื่อ

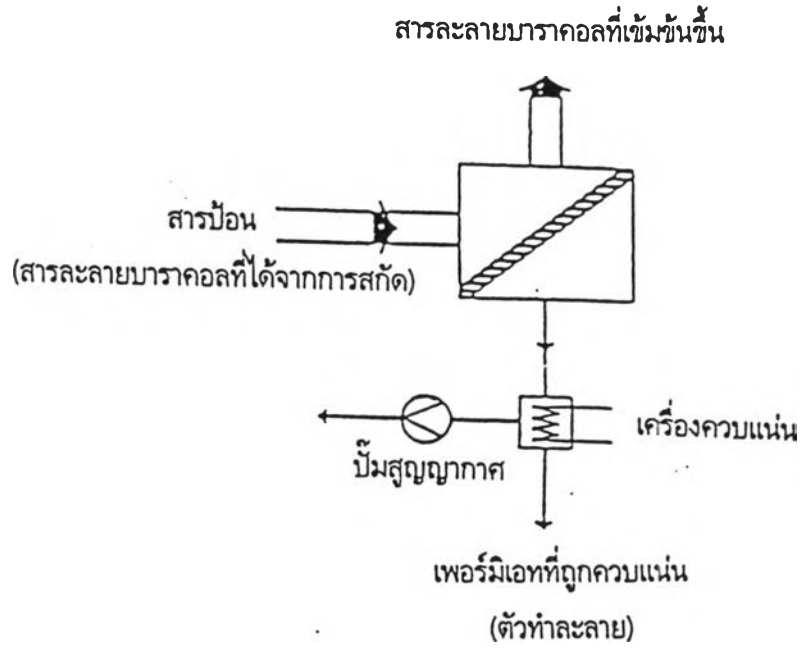
- ลดค่า Enzymatic activity ที่อาจทำลายตัวยาสำคัญในสมุนไพรนั้น
- ป้องกันการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ เช่น แบคทีเรีย ราและยีสต์
- ทำให้ง่ายแก่การบรรจุ เก็บรักษาและการขนส่ง

ปกติตัวยาสำคัญในสมุนไพรที่ยังสดอยู่จะอยู่ในเซลล์ของสมุนไพรในลักษณะของ สารละลายน้ำในรูปของ Colloidal suspension แต่เมื่อสมุนไพรนั้นถูกทำให้แห้งแล้ว ตัวยาในสมุนไพรนั้นจะปรากฏอยู่ในเซลล์แห้งในรูปของสารที่เป็นผลึก เมื่อนำสมุนไพรแห้งนั้นมาทำการสกัดโดยไปแช่ในตัวทำละลายที่สามารถละลายเอาตัวยา ออกมาจากเซลล์ภายในของสมุนไพรโดยวิธี Osmosis และบางส่วนอาจชะละลายออกมาอยู่ภายนอกของเซลล์ โดยผ่านรอยแตกของเนื้อเยื่อ ดังนั้นการสกัดให้ได้ตัวยาออกมาจากสมุนไพรได้มากควรต้องมีการจำกัดผนังเซลล์ (Cell wall) ออกให้มากที่สุดก่อนการสกัดและ Menstruum ที่ใช้ควรมีจำนวนมากพอที่ จะละลายเอาตัวยาออกมาได้หมด เพราะฉะนั้น สมุนไพรที่จะนำมาสกัด ควรบดให้เป็นผงก่อนเพื่อทำลายผนังเซลล์ แต่การบดหยาบหรือละเอียดแค่ไหนก็ต้องดูชนิดของสมุนไพรและวิธีการสกัดที่ใช้ โดยมากจะแบ่งขนาดของสมุนไพรไว้ในแต่ละตำรับที่จะทำการสกัด โดยอาจจะทำให้ Menstruum ไหลผ่านได้ยากหรือไหลผ่านได้ไม่สม่ำเสมอทุกส่วน ทำให้การสกัดตัวยาออกมาได้ไม่หมด

ในการสกัดตัวยาจากสมุนไพร จำนวนของสารทั้งหมดที่ละลายออกมาในตัวทำละลายที่ใช้เรียกว่า Total Extractive ส่วนที่เป็นสารที่ไม่มีฤทธิ์ทางการรักษา (Pharmacologically inert) เรียกว่า Inert Extractive สาร Inert ที่ได้ปนออกมาในสารที่สกัดออกมาได้ มักเป็นตัวทำให้เกิดความยุ่งยากในการเก็บรักษา สารบางอย่างอาจทำปฏิกริยากับออกซิเจนในอากาศและเกิดการเปลี่ยนแปลง เช่น เปลี่ยนแปลงสีจากสีเขียวหรือเหลืองไปเป็นสีน้ำตาลเข้ม หรือดำ หรืออาจจะตกเป็นตะกอน การเปลี่ยนแปลงแบบนี้ จะเกิดง่ายและเร็วหากการสกัดนั้นต้องใช้ความร้อนช่วยในการสกัด และอาจเกิดช้าๆ แต่เมื่อตั้งที่ไว้นานๆ โดยที่สารพวก Inert Extractive จะเกิด Hydrolysis โดยการรวมตัวเป็น Insoluble Compounds หรือพวก Colloidal suspension อาจเกิดการ Coagulate เมื่อตั้งทิ้งไว้ ดังนั้น Menstruum ที่จะใช้ในการสกัดหากละลายเอาพวก Inert Extractive ออกมาได้น้อยมากเท่าไร ก็จะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสกัดที่สวยงามและมีความคงตัวดีมากขึ้นเท่านั้น

3.2) กระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน (Pervaporation)[20]

กระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน(Pervaporation) เป็นกระบวนการถ่ายเทมวลสารจากสารป้อนที่เป็นของเหลวผ่านเยื่อแผ่นโพลีเมอร์ที่ไม่มีรูพรุน ประกอบด้วยสายการป้อนและสายขาออกเรียกว่า สายรีเทนเตท (Retentate) ด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นจะมีความดันเป็นสูญญากาศซึ่งเรียกว่าเพอร์มิเอท (Permeate) จะถูกดึงออกอีกทางด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นในสถานะไอ การถ่ายเทมวลเกิดขึ้น จากการทำให้ความดันย่อยของสารทางด้านเพอร์มิเอทต่ำกว่าความดันไอทางสายการป้อน โดยทำให้เกิดสภาวะสูญญากาศ หรือใช้ก๊าซเป็นตัวพาหรือการทำให้ควบแน่นสารบนพื้นผิวที่เย็น ในงานวิจัยนี้ด้านสายการป้อนเป็นสารสกัดจากใบขี้เหล็ก ตัวทำละลายเอธานอลและน้ำ ส่วนทางด้านสายรีเทนเตทจะเป็นสารละลายจากใบขี้เหล็กที่เข้มข้นขึ้น อันเป็นผลมาจากตัวทำละลายถูกดึงออกมาทางด้านเพอร์มิเอทในสภาพไอ แล้วจะถูกทำให้ควบแน่นเป็นของเหลวด้วยเครื่องควบแน่น ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน

กระบวนการเพอร์เวเพอเรชันมีกลไกของการส่งผ่านสารดังต่อไปนี้

1. มีการดูดซับของสารผสมของสารป้อนที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารป้อน
2. เกิดการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของสารละลาย
3. การระเหยของสารจากผิวเยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอท

การถ่ายเทมวลสารผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุน อธิบายได้โดยใช้แบบจำลองการละลาย-การแพร่ (Solution-diffusion model) อธิบายขั้นตอนการถ่ายเทมวลประกอบด้วยขั้นตอนทั้งสามดังนี้

3.2.1) การดูดซับของสารผสมของสารป้อนที่ผิวเยื่อแผ่น-สารป้อน

ที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นกับสารป้อน ของเหลวในเยื่อแผ่นจะสมดุลกับของเหลวในสารป้อน ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่น แสดงได้ในรูปของสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Distribution coefficient)

$$S_i = \frac{C_{im}}{C_{il}} \qquad (3.1)$$

เมื่อ S_i คือค่าสัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficient) ของสาร i

C_{im} คือค่าความเข้มข้นของสาร i ในเยื่อแผ่น

C_{il} คือค่าความเข้มข้นของสาร i ในของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่น

การดูดซับของของเหลวในโพลีเมอร์คล้ายแก้วอธิบายได้ด้วย ฟลอรี่-ฮักกิ้นส์ ไอโซเทอม (Flory-Huggins isotherm) [21] ที่ความเข้มข้นต่ำๆ ในสารละลาย

$$S_i = \gamma_{il} \exp(-(1+\chi)) \qquad (3.2)$$

เมื่อ χ คือพารามิเตอร์แสดงแรงกระทำระหว่างของเหลวกับโพลีเมอร์ (Liquid-membrane interaction parameter)

γ_{il} คือแอคติวิตีโคเอฟฟีเซียน (Activity coeffivient) ของสาร i ในของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่น

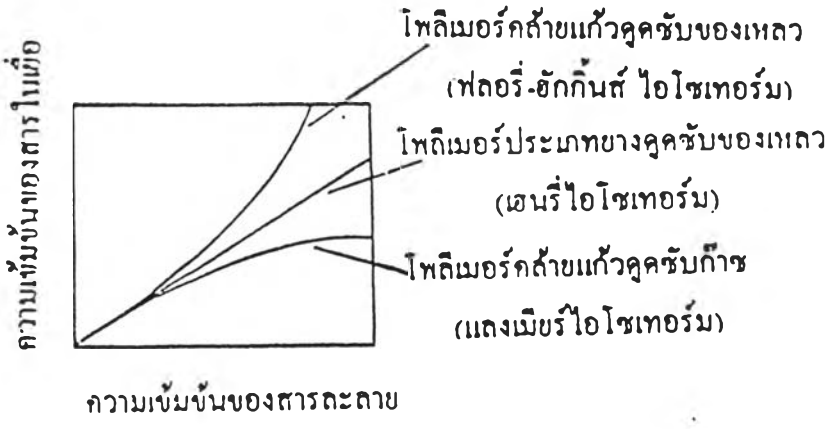
และการดูดซับของของเหลวและก๊าซในโพลีเมอร์จำพวกยาง อธิบายได้ด้วยไอโซเทอมของเฮนรี่ (Henry isotherm) [22]

$$S_i = \frac{\gamma_{im}^{\infty}}{\gamma_{il}^{\infty}} \qquad (3.3)$$

เมื่อ γ^{∞}_{im} คือแอคติวีตีโคเอฟฟีเชียนของสาร i ในเยื่อแผ่นเมื่อของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่นมีความเข้มข้นต่ำมาก

γ^{∞}_{il} คือแอคติวีตีโคเอฟฟีเชียนของสาร i ในของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่น เมื่อของเหลวที่สัมผัสเยื่อแผ่นมีความเข้มข้นต่ำมาก

สัมประสิทธิ์การกระจายขึ้นอยู่กับแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับโมเลกุลของเยื่อแผ่น ตัวทำละลายที่มีแรงกระทำกับโพลีเมอร์สูงกว่าจะถูกดูดซับในโพลีเมอร์ได้ดีกว่า โดยปกติการละลายของโพลีเมอร์มีสองลักษณะ[23] คือกรณีแรกโมเลกุลของตัวทำละลายจะซึมผ่านเข้าไปในโพลีเมอร์ ทำให้โพลีเมอร์พองตัวขนาดของโซ่โพลีเมอร์จะใหญ่ขึ้น กรณีนี้โพลีเมอร์ต้องมีแรงดึงระหว่างสายโซ่โมเลกุลสูงกว่า แรงกระทำระหว่างโมเลกุลของตัวทำละลายกับโซ่โพลีเมอร์ ซึ่งโพลีเมอร์อาจเป็นโครงร่างแหหรือตาข่าย มีความเป็นผลึกสูง หรืออาจจะมีพันธะไฮโดรเจนที่แข็งแรง การละลายในลักษณะที่สองคือเมื่อแรงกระทำระหว่างตัวทำละลายกับโพลีเมอร์มากกว่าแรงดึงระหว่างสายโซ่โพลีเมอร์ก็จะเกิดการสลาย การดูดซับในกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันเป็นการละลายแบบการพองตัว โดยบริเวณผิวสัมผัสกับสารป้อนจะพองมากที่สุด และค่อยๆ ลดลงตามความหนาของเยื่อแผ่นจนกระทั่งไม่มีการพองตัวเลยที่ผิวสัมผัส ด้านเพอร์มิเอทของเยื่อแผ่น ซึ่งสารเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ



รูปที่ 3.2 แสดงไอโซเทอมของการดูดซึม

3.2.2) เกิดการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นของสารละลาย

การแพร่ผ่านเยื่อแผ่นสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของฟิคส์ (Fick's law)

$$J_i = -D_i \frac{dC_{im}}{dx} \qquad (3.4)$$

เมื่อ J_i คือฟลักซ์ของสารผ่านเยื่อแผ่นของสารละลาย

D_i คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารละลาย

$\frac{dC_{im}}{dx}$ คือเกรเดียนต์ (Gradient) เนื่องจากความแตกต่างของความเข้มข้น

สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในเยื่อแผ่นขึ้นกับธรรมชาติของเยื่อแผ่นและความเข้มข้นเฉพาะที่ของสาร ฟังก์ชันที่นิยมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การแพร่กับความเข้มข้นของสารคือ[24]

$$D = D^{o}\exp(bc) \qquad (3.5)$$

เมื่อ D^{o} คือสัมประสิทธิ์การแพร่เมื่อความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่นเท่ากับศูนย์ เมื่อไม่มีการพองตัว

b คือสัมประสิทธิ์พลาสติไซซิ่ง (Plasticizing coefficient) แสดงผลของการพองตัวของเยื่อแผ่นต่อการแพร่

c คือความเข้มข้นเฉพาะที่ของสารในเยื่อแผ่น

ของเหลวจะประพฤติตัวเป็นพลาสติไซเซอร์ (Plasticizer) ทำให้ส่วนของโพลีเมอร์เคลื่อนไหวได้มากขึ้น ทำให้การแพร่เกิดขึ้นง่าย แต่ในบางกรณีสัมประสิทธิ์การแพร่อาจลดลง เมื่อความเข้มข้นของสารเพิ่มขึ้น สารเกิดการรวมตัวเป็นกระจุกแทนที่จะรวมตัวกับโพลีเมอร์ การที่โมเลกุลรวมตัวกันทำให้การเคลื่อนไหวได้น้อยลงในระบบของผสม สัมประสิทธิ์การแพร่จะเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นของทุกองค์ประกอบ สัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ แสดงได้ด้วยสมการของอาร์รีเนียส (Arrhenius equation)

$$D^{o} = D^{\infty}\exp\left(\frac{-E_d}{RT}\right) \qquad (3.6)$$

เมื่อ D^{∞} คือ Pre-exponential Factor

E_d คือพลังงานการดุ้นของการแพร่

R คือค่าคงที่ของก๊าซ

T คือค่าอุณหภูมิสมบูรณ์

3.2.3 การระเหยของสารจากผิวเยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอท

เป็นขั้นตอนที่เกิดรวดเร็วเมื่อเทียบกับขั้นตอนอื่น ความดันย่อยของแต่ละองค์ประกอบที่ด้านเพอร์มิเอท แสดงด้วยสมการดังนี้

$$p_i = y_i P \qquad (3.7)$$

เมื่อ p_i คือค่าความดันย่อยของสาร i

y_i คือค่าเศษส่วนโมลของสาร i

P คือค่าความดันด้านเพอร์มิเอท

เพอร์เวเพอเรชันแตกต่างจากกระบวนการเยื่อแผ่นอื่นๆ คือมีการเปลี่ยนสถานะเข้ามาเกี่ยวข้องจึงต้องมีการให้ความร้อนแก่ระบบ ปริมาณความร้อนที่ต้องใช้อย่างต่ำเท่ากับปริมาณความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอของสารที่แพร่ และเป็นการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นแบบไม่มีรูพรุนซึ่งมีฟลักซ์ต่ำแต่ค่าการเลือกผ่านของกระบวนการสูง เพอร์เวเพอเรชันจึงจะนำมาใช้เมื่อการแยก โดยวิธีการอื่นไม่ได้ผลหรือใช้พลังงานสูงมาก หรือค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง เช่น การแยกสารผสมอะซิโอโทรปสารผสมที่มีจุดเดือดใกล้เคียงกัน

จากแบบจำลองการละลายและการแพร่ (Solution-diffusion model) ความสามารถในการซึมผ่านเป็นผลมาจากความสามารถในการละลาย และการแพร่ของสารในเยื่อแผ่นภายใต้แรงขับเนื่องจากเกรเดียนต์ของศักย์ทางเคมี ที่ผิวสัมผัสระหว่างของไหลกับเยื่อแผ่น ของไหลในแผ่นเยื่อจะสมดุลกับของไหลที่สัมผัสเยื่อแผ่น ความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่นจะแปรผันตามศักย์ทางเคมีของสารในของไหลที่อยู่ถัดกัน ศักย์ทางเคมีของสารแทนได้ด้วยความดันไอของสาร

พิจารณาระบบที่สารป้อนประกอบด้วยองค์ประกอบ i และ j มีความเข้มข้นโดยโมล c'_i และ c'_j ตามลำดับดังรูปที่ 3.3 กำหนดให้

ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ i ในสารป้อนแทนด้วย p_i'

ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ j ในสารป้อนแทนด้วย p_j'

ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ i ในเพอร์มิเอทแทนด้วย p_i''

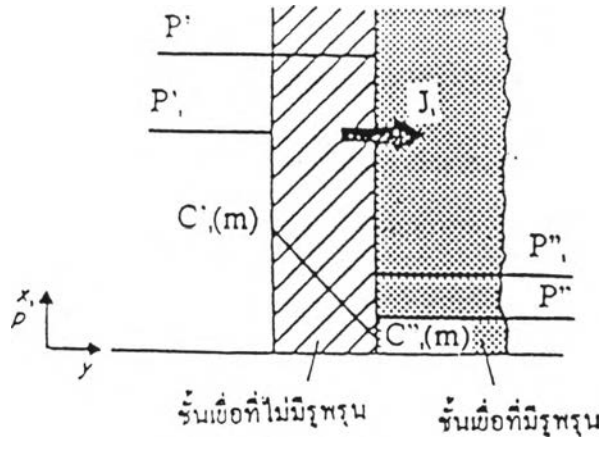
ศักย์ทางเคมีขององค์ประกอบ j ในเพอร์มิเอทแทนด้วย p_j''

ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสกับสารป้อน $c_i'(m) = K_i p_i'$

ความเข้มข้นขององค์ประกอบ j ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสกับสารป้อน $c_j'(m) = K_j p_j'$

ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสด้านเพอร์มิเอท $c_i''(m) = K_i p_i''$

ความเข้มข้นขององค์ประกอบ j ในเยื่อแผ่นที่ผิวสัมผัสด้านเพอร์มิเอท $c_j''(m) = K_j p_j''$



รูปที่ 3.3 แสดงการกระจายความเข้มข้นและความดันในแผ่นเยื่อแบบการละลายและการแพร่

จากกฎของฟิคส์ (Fick's law) สำหรับองค์ประกอบ i

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \qquad (3.8)$$

อินทิเกรทสมการ (3.8) ตลอดความหนาของเยื่อแผ่น l

$$J_i = D_i \frac{(c_i'(m) - c_i''(m))}{l} \qquad (3.9)$$

D_i คือค่าเฉลี่ยสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารผ่านเยื่อแผ่น

$$J_i = D_i K_i \frac{(p_i' - p_i'')}{l} \qquad (3.10)$$

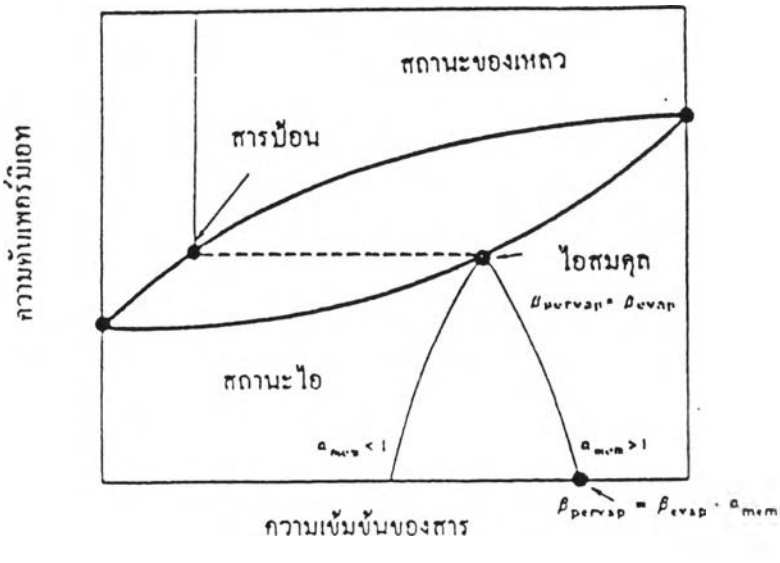
ให้ P_i (Permeability) = $D_i K_i$

$$J_i = P_i \frac{(p_i' - p_i'')}{l} \qquad (3.11)$$

สำหรับองค์ประกอบ j จะได้ว่า

$$J_j = P_j \frac{(p_j' - p_j'')}{l} \qquad (3.12)$$

ทางเทอร์โมไดนามิคส์กำหนดขั้นตอน 2 ขั้นตอนที่ประกอบเป็นกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน คือ การกลายเป็นไอแบบสมดุลและการซึมผ่านเยื่อแผ่นของไอสมมุติดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพทอมป์สัน (Thompson)

การเลือกของกระบวนการเกิดจากการเลือกของแต่ละขั้นตอน

$$\beta_{pervap} = \beta_{evap} * \beta_{mem} \qquad (3.13)$$

β_{pervap} แฟคเตอร์การแยกโดยรวม (Overall separation factor) เท่ากับสัดส่วนขององค์ประกอบด้านเพอรมิเอทต่อสัดส่วนขององค์ประกอบในสารป้อน

$$\beta_{pervap} = \frac{p_i^{'} / p_j^{'}}{c_i^{'} / c_j^{'}} \qquad (3.14)$$

β_{evap} แฟกเตอร์การแยกโดยการกลายเป็นไอ (Evaporation separation factor) แทนการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเมื่อสารป้อนกลายเป็นไอสมมุติในสภาวะที่สมดุลกัน

$$\beta_{evap} = \frac{p_i^{'} / p_j^{'}}{c_i^{'} / c_j^{'}} \qquad (3.15)$$

β_{mem} แฟกเตอร์การแยกโดยเยื่อแผ่น (Membrane separation factor) แทนสัดส่วนของสารป้อนที่เป็นไอสมมุติต่อสัดส่วนของสารด้านเพอร์มิเอท

$$\beta_{mem} = \frac{p_i^{'} / p_j^{'}}{p_i^{''} / p_j^{''}} \qquad (3.16)$$

การวิเคราะห์เป็นสองขั้นตอนไม่ได้แสดงว่า สารกลายเป็นไอก่อนแล้วจึงแพร่ ในความเป็นจริงสารกลายเป็นไอที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นดังสมการ 3.13 แสดงให้เห็นว่าความดันไอของสารป้อนมีผลโดยตรงต่อการแยก เนื่องจากเป็นแรงขับดันของชั้นการแพร่

กำหนด α คือ Membrane selectivity = $\frac{P_i}{P_j}$

จากสมการ 3.11 จะได้ว่า

$$\frac{J_i}{J_j} = \frac{P_i(p_i^{'} - p_i^{''})}{P_j(p_j^{'} - p_j^{''})} \qquad (3.17)$$

อัตราส่วนของฟลักซ์ขององค์ประกอบเท่ากับอัตราส่วนของความดันไอด้านเพอร์มิเอทของสารจะได้ว่า

$$\frac{J_i}{J_j} = \frac{p_i^{"}}{p_j^{"}} \tag{3.18}$$

$$\frac{p_i^{'}}{p_j^{"}} = \alpha_{mem} \frac{(p_i^{'} - p_i^{"})}{(p_j^{'} - p_j^{"})} \tag{3.19}$$

$$\beta_{mem} = \alpha_{mem} \frac{(p_i^{'} - p_i^{"})p_j^{'}}{(p_j^{'} - p_j^{"})p_i^{'}} \tag{3.20}$$

พิจารณาขอบเขต 2 กรณี

1) เมื่อความดันเพอร์มิเอทมีค่าเท่ากับความดันไอสมมุติในสารป้อน

$p''/p' \longrightarrow 1$

$p_i''/p_i' \longrightarrow 1$

$p_j''/p_j' \longrightarrow 1$

จากสมการที่ 3.16

$\beta_{mem} = 1$

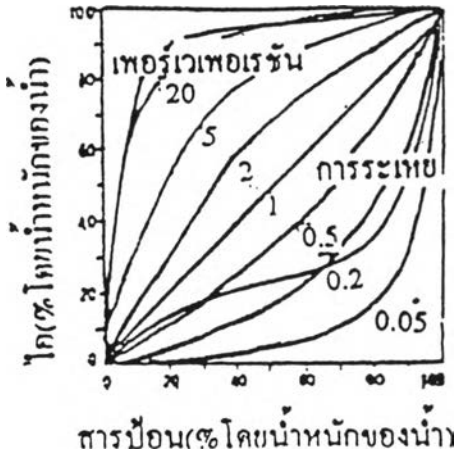
$\beta_{pervap} = \beta_{evap}$

2) เมื่อความดันด้านเพอร์มิเอทเป็นศูนย์ ซึ่งเกิดจากการทำให้ระบบเป็นสูญญากาศ หรือการที่เพอร์มิเอทควบแน่นที่อุณหภูมิต่ำๆ และดึงออกจากระบบตลอดเวลาจะได้

$$\beta_{pervap} = \beta_{evap} * \alpha_{mem}$$

การเลือกผ่านของเยื่อแผ่นถูกใช้เต็มที่เมื่อ p" = 0 ถ้าค่าการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นมีค่ามากกว่าหนึ่ง เยื่อแผ่นจะให้องค์ประกอบที่ระเหยง่ายกว่าผ่านได้มากกว่า เยื่อแผ่นจะเสริมประสิทธิภาพในการแยก ถ้าค่าการเลือกเยื่อแผ่นน้อยกว่าหนึ่ง ระบบอาจจะให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยง่ายกว่าเพิ่มขึ้น แต่จะน้อยกว่าความเข้มข้นจากการระเหย หรืออาจจะให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยยากกว่ามากขึ้น

I 17904730



รูปที่ 3.5 แผนภาพแม็คเคป-ทิล (McCabe-Thiele)

การประเมินค่าการเลือกผ่านของกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันอาจทำได้โดยใช้แผนภาพ McCabe-Thiele ดังตัวอย่างในรูปที่ 3.5 เปรียบเทียบการระเหยที่ความดันสูญญากาศ และเพอร์เวเพอเรชันผ่านเซลลูโลสไดรอะซิเตทของน้ำกับเอธานอล เส้นอ้างอิงแสดงแฟคเตอร์การแยกคงที่

3.3) ตัวแปรที่มีผลต่อกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน

3.3.1) สมบัติทางกายภาพและเคมีของเยื่อแผ่น

การดูดซับของตัวทำละลายจะเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารป้อน ปริมาณการดูดซับของตัวทำละลายแต่ละชนิด ถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทางเคมีของโพลีเมอร์กับตัวทำละลาย องค์ประกอบที่มีแรงกระทำต่อโซ่โพลีเมอร์สูง จะทำให้โพลีเมอร์พองตัวได้มาก แต่ถ้าแรงกระทำนี้สูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโซ่โพลีเมอร์ โพลีเมอร์จะถูกละลายในตัวทำละลายนั้น ในกระบวนการเมมเบรนโพลีเมอร์จะต้องคงรูปเป็นของแข็ง วัสดุที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เช่นโพลีเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย กราฟโคโพลีเมอร์ขึ้นกับปัจจัย 2 อย่างคือ องค์ประกอบเป็นตัวทำละลายที่ดีของโพลีเมอร์นั้นหรือไม่ และความยืดหยุ่นของโซ่โพลีเมอร์ ซึ่งจะมีแรงต้านการพองตัวมากหรือน้อย สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในระบบที่มีตัวทำละลาย 2 ชนิด เขียนได้ในรูป

$$D_i = D_i^{\circ}\exp(k_{ii}c_i + k_{ij}c_j) \qquad (3.21)$$

$$D_j = D_j^{\circ}\exp(k_{ji}c_i + k_{jj}c_j) \qquad (3.22)$$

เมื่อ D_i°, D_j° คือสัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร i และ j เมื่อไม่มีตัวทำละลายในโพลีเมอร์ เป็นฟังก์ชันของโครงสร้างโพลีเมอร์ ขนาดและรูปร่างโมเลกุลแพร่ผ่าน

k_{ij} แสดงผลของการเป็นพลาสติไซเซอร์ของสาร j ที่มีต่อการแพร่ของสาร i แรงกระทำซึ่งกันและกันของตัวทำละลายอาจทำให้การแพร่ในโพลีเมอร์ลดลง

การซึมผ่านเยื่อแผ่นด้วยอัตราที่แตกต่างกันของแต่ละองค์ประกอบทำให้เกิดความสามารถในการเลือกผ่าน ซึ่งอาจเป็นผลจากความแตกต่างของการละลายหรือการแพร่ หรืออาจเกิดจากกรณีทั้งสอง ปรากฏการณ์ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของระบบ ระบบที่ตัวทำละลายมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน การดูดซึมที่ต่างกันจะเป็นผลให้เกิดค่าการเลือกผ่าน การแพร่ทำให้เกิดค่าการเลือกผ่านเมื่อขนาดและรูปร่างของโมเลกุลต่างกันมากๆ ค่าการเลือกผ่านของซิลิโคนเกิดจากการดูดซึมสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ แต่เปอร์เซนต์ของการดูดซึมจะมีค่าต่ำ ความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่นซิลิโคนจึงมีค่าต่ำมาก ดังนั้นอาจจะไม่มีแรงกระทำระหว่างสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่น (Coupling effect)[25]

3.3.2) ความหนาของเยื่อแผ่น

ฟลักซ์ของสารเป็นสัดส่วนผกผันกับความหนาของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นที่บางจะให้ฟลักซ์ที่มีค่าสูงกว่าเยื่อแผ่นที่หนา ในระบบสารผสม การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์ของทุกองค์ประกอบจะมีผลให้ค่าการเลือกผ่านลดลง แรงกระทำระหว่างตัวทำละลายจะเป็นตัวกำหนดความหนาต่ำสุดที่เป็นไปได้ในทางปฏิบัติ เพื่อจะรักษาค่าการเลือกผ่าน เยื่อแผ่นที่บางมากๆ จะทำให้ความต้านทานการแพร่ของเยื่อแผ่นลดลง ตัวทำละลายจะแพร่ออกมาได้มาก ฟลักซ์ที่สูงทำให้การรักษาความดันด้านเพอร์มิเอทได้ยาก

3.3.3) ความเข้มข้นของสารป้อน

ความเข้มข้นของสารป้อน หมายถึงความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านได้มากกว่า มีผลโดยตรงต่อการดูดซึมที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น-สารป้อน แอคติวิตี (Activity) ของสารจะเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยตามการเปลี่ยนของความเข้มข้นของสาร ขึ้นกับธรรมชาติทางเคมีของสารผสม เมื่อปริมาณขององค์ประกอบที่ถูกดูดซึมง่ายในเยื่อแผ่นมากขึ้น เยื่อแผ่นก็พองตัวมากขึ้น ทำให้โพลีเมอร์มีขนาดใหญ่องค์ประกอบอื่นๆ ที่ถูกดูดซึมยากกว่าจะซึมเข้าได้มากขึ้น ค่าการเลือกผ่านจึงลดลง การพองตัวของเยื่อแผ่นขึ้นกับโครงสร้างของโซ่โพลีเมอร์ โพลีเมอร์ที่มีโครงสร้างตาข่ายการขยายตัวของโซ่โพลีเมอร์จะถูกจำกัดโดยจำนวนจุดเชื่อมโยง (Links) จึงมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นที่ต่ำกว่า เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซึมง่ายต่ำ ความเข้มข้นของสารที่ผิวด้านเพอร์มิเอทของเยื่อแผ่นก็ต่ำ ผิวเยื่อแผ่นจะแห้ง โครงสร้างโพลีเมอร์ที่แน่นจะยอมให้องค์ประกอบที่มีความชอบต่ำซึมผ่านได้ยาก

3.3.4) อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลต่อทุกขั้นตอนของการถ่ายเทมวลในกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน ผลของอุณหภูมิต่อฟลักซ์ในการซึมผ่าน สัมประสิทธิ์การแพร่ และสัมประสิทธิ์การกระจาย สามารถเขียนได้ในรูปแบบของอาร์รีเนียส (Arrhenius-type)

$$J_p = J_o \exp\left(\frac{E_p}{RT}\right) \qquad (3.24)$$

เมื่อ J_p คืออัตราของเพอร์มิเอท (Permeation rate)

J_o คือ Pre-exponential factor

E_p คือ พลังงานกระตุ้นปรากฏของการซึมผ่าน

R คือค่าคงที่ของก๊าซ

T คือค่าอุณหภูมิสมบูรณ์

ฟลักซ์รวมและฟลักซ์ของแต่ละองค์ประกอบจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการเลือกผ่านขึ้นกับพลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านของสารที่ซึมผ่าน ถ้าสารที่ซึมผ่านได้เร็วมีพลังงานกระตุ้นของการซึมผ่านสูงกว่า เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะมีผลทำให้ค่าการเลือกผ่านลดลง การเพิ่มของอุณหภูมิจะทำให้ฟลักซ์เพิ่มขึ้น และมักจะทำให้ค่าการเลือกผ่านลดลง อุณหภูมิมีผลต่อกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันเป็นอย่างมาก เพราะมีการกลายเป็นไอของสารเพอร์มิเอท ความร้อนที่ใช้ในการกลายเป็นไอมาจากสารป้อน ถ้าให้ความร้อนแก่ระบบไม่เพียงพอ อุณหภูมิของของเหลวจะลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าฟลักซ์มีค่ามากอุณหภูมิก็จะลดลงมาก การดำเนินการโดยใช้อุณหภูมิสูง จะต้องให้ความร้อนสูงและต้องใช้ปั๊มสูญญากาศที่มีกำลังสูงมาก

3.3.5) ความดันเพอร์มิเอท

คือความดันรวมของไอที่สัมผัสเยื่อแผ่น เป็นผลลัพธ์จากไอของสารที่ซึมผ่านกับไอที่ถูกดึงไปยังปั๊มสูญญากาศ การเพิ่มความดันไอด้านเพอร์มิเอท จะลดแรงขับของการถ่ายเทมวล ฟลักซ์ของสารจะลดลง ผลที่มีต่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์อธิบายได้โดย แผนภาพทอมป์สัน (Thompson diagram) การให้ปั๊มสูญญากาศที่มีกำลังมาก ความดันเพอร์มิเอทจะมีค่าน้อยเยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอทจะไม่มีการพองตัว ค่าการเลือกผ่านสูง แต่ค่าใช้จ่ายจะสูงตามไปด้วย

ในบางระบบอาจเกิดการอิ่มตัวของไอขององค์ประกอบหนึ่งในเพอร์มิเอท องค์ประกอบนี้จะเกิดการถ่ายเทมวลได้น้อย องค์ประกอบอื่นๆ ซึ่งแรงขับมีค่าสูง จะมีฟลักซ์สูงขึ้น ค่าการเลือกผ่านจะลดลงอย่างรวดเร็ว พฤติกรรมนี้จะเกิดกับเยื่อแผ่นที่ยอมให้สารที่ระเหยง่ายผ่านได้ดีมาก

3.4) เยื่อแผ่นและโมดุล

ลักษณะที่ดีของเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันมีดังต่อไปนี้

1.) มีค่าการเลือกผ่านและฟลักซ์ผ่านเยื่อแผ่นสูง

2.) มีความหนาที่เหมาะสมกับระบบที่ดำเนินการ

3.) สามารถดึงเพอร์มิเอทออกได้ง่าย

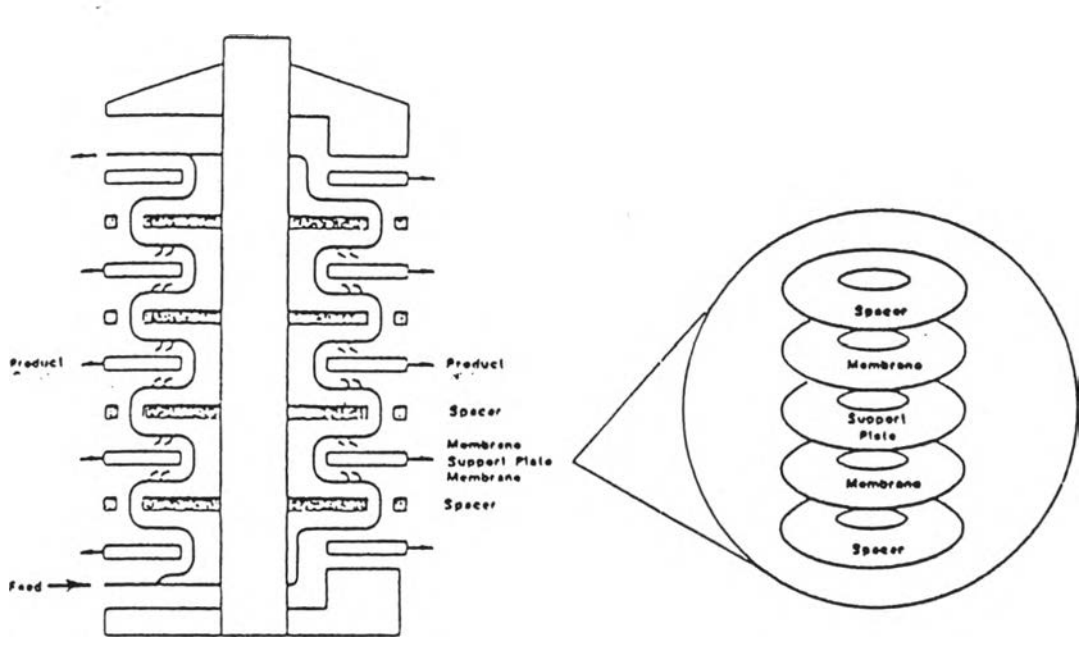
4.) มีความคงรูปภายใต้สภาวะการพองตัว

5.) มีอายุการใช้งานยาวนาน

อุปกรณ์ที่ใช้บรรจุเยื่อแผ่นในกระบวนการแยกเรียกว่า โมดุล ซึ่งโมดุลมีอยู่ด้วยกันหลายแบบด้วยกันซึ่งจะขอกล่าวเพียง 4 แบบด้วยกัน

3.4.1) โมดุลแบบแผ่นเรียบและกรอบ

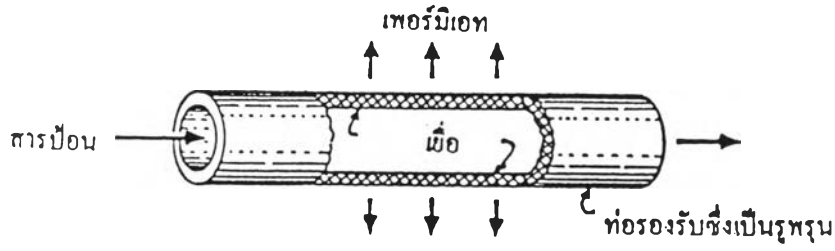
โมดุลแบบแผ่นเรียบและกรอบ (Plate and frame) เยื่อแผ่นที่ใช้กับโมดุลนี้เป็นแบบแผ่นเรียบ วัสดุหลายชนิดขึ้นรูปแบบแผ่นเรียบได้ การเปลี่ยนเยื่อแผ่นและทำความสะอาดทำได้ง่าย การควบคุมไม่ให้เกิดชั้นของเหลวทำได้ง่าย การถ่ายเทความร้อนจากสารป้อนไปยังเยื่อแผ่นดี แต่พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดุลค่อนข้างต่ำ ค่าใช้จ่ายในการติดตั้งและดูแลรักษาสูง ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 โมดุลแบบแผ่นเรียบและกรอบ (Plate and frame module)

3.4.2) โมดุลแบบท่อ

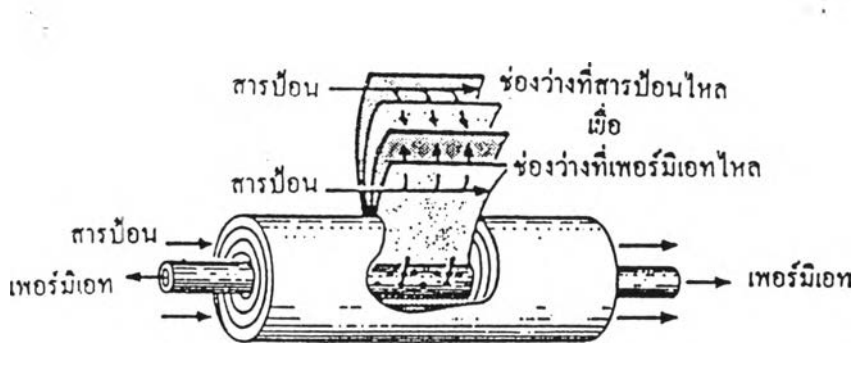
โมดุลแบบท่อประกอบด้วยท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในประมาณ 1-2 มิลลิเมตร มีชั้นรองรับที่แข็งแรงอาจจะมีเพียงท่อเดียวหรือหลายท่อบรรจุภายในภาชนะ เยื่อแผ่นอาจเคลือบอยู่ด้านในหรือด้านนอกของท่อ เนื่องจากมีขนาดใหญ่ ความดันลดในท่อจึงต่ำ สามารถใช้ท่อยาวมากได้ เหมาะสมที่จะใช้กับของเหลวที่มีความหนืดสูง ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการลงทุนสูง เนื่องจากพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดุลต่ำมาก หลีกเลี่ยงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน ได้โดยการใช้อัตราการไหลของสารป้อนที่เหมาะสม ใช้กับเพอร์เวเพอเรชันแบบใช้ก๊าซเป็นตัวพาดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 โมดุลแบบท่อ

3.4.3) โมดุลแบบม้วน

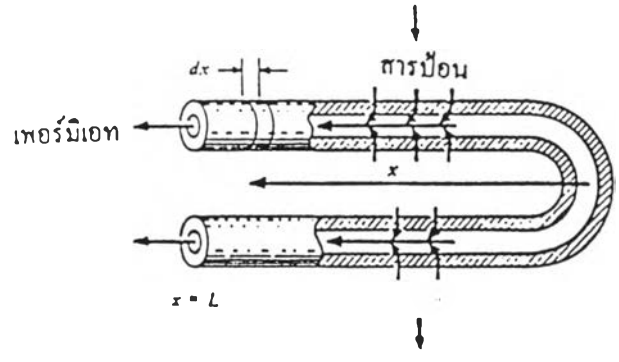
โมดุลแบบม้วน แผ่นเยื่อและชั้นรองรับที่วางซ้อนกันถูกม้วนรอบท่อกลาง บรรจุภายในภาชนะทรงกระบอก พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดุลค่อนข้างสูง ใช้กับเพอร์เวเพอเรชันที่ใช้ปั๊มสูญญากาศดึงเพอร์มิเอทออกจากโมดุลดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 โมดุลแบบม้วน

3.4.4) โมดุลแบบเส้นใยกลวง

โมดุลแบบเส้นใยกลวงเป็นเส้นใยมีขนาดเล็กมาก ประมาณ 100 นาโนเมตร และแข็งแรงมากไม่ต้องใช้ชั้นรองรับ ชั้นเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุนจะอยู่ภายนอก เส้นใยจะถูกมัดรวมกันและงอเป็นรูปเกือกม้า บรรจุอยู่ภายในท่อทรงกระบอก พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดุลจะสูงมาก ใช้กับเพอร์เวเพอเรชันที่ใช้ปั๊มสูญญากาศดึงเพอร์มิเอทออกจากโมดุลดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แสดงโมดุลแบบเส้นใยกลวง

รูปแบบการไหลของสารป้อนในโมดุล ต้องหลีกเลี่ยงการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชั่น (Concentration polarization) และคำนึงถึงปริมาณความร้อนที่ให้แก่ระบบ การถ่ายเทความร้อนจากสารป้อนไปยังเยื่อแผ่น ซึ่งมีผลอย่างมากต่อฟลักซ์ของกระบวนการ ถ้าแรงเสียดทานการไหลของเพอร์มิเอทมีค่าสูง จะส่งผลให้ความดันด้านเพอร์มิเอทเพิ่ม โดยเฉพาะบริเวณที่อยู่ห่างจากท่อสูญญากาศ มีผลให้ฟลักซ์และค่าการเลือกลดลง หรืออาจสูงมากจนทำให้เกิดการควบแน่นของเพอร์มิเอทที่ผิวของเยื่อแผ่น ตำแหน่งการวางท่อดึงสูญญากาศจึงมีความสำคัญมาก.