

บทที่ 2

ทบทวนเอกสาร

2.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile Organic Compounds)

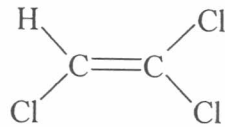
สารอินทรีย์ระเหยง่าย เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่สำคัญคือเป็นสารอินทรีย์ที่มีความดันไอต่ำ จุดเดือดต่ำ มวลโมเลกุลไม่สูงนัก ทำให้สามารถระเหยเป็นไอได้ง่ายที่อุณหภูมิปกติ ส่วนใหญ่สารอินทรีย์ระเหยง่ายมีอยู่ทั่วไปในธรรมชาติ เช่น แอมโมเนีย เอทานอล ไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น และอีกส่วนหนึ่งเกิดจากการสังเคราะห์ขึ้นของมนุษย์ เช่น คลอโรฟอร์ม เบนซีน ไตรคลอโรฟลูออโรมีเทน (CFC-11) เป็นต้น เกณฑ์การจำแนกสารแต่ละชนิดว่าเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายนั้นไม่มีแน่นอน แต่จะเจาะจงกำหนดสารอินทรีย์ชนิดใดเป็นสารอินทรีย์ระเหยง่ายเลย คุณสมบัติทางกายภาพของสารแต่ละชนิดที่แสดงถึงความสามารถของการระเหยเป็นไอได้ เช่น ความดันไอ จุดเดือด พลังงานในการระเหย ค่าคงที่ของเฮนรี ถูกนำมาใช้จำแนกได้อย่างคร่าว ๆ ว่าสารนั้นอยู่ในกลุ่มสารอินทรีย์ระเหยง่ายหรือไม่ เช่น สารอินทรีย์ที่มีค่าคงที่ของเฮนรีมากกว่า 0.01 มก./ล. ต่อ มก./ล. (Card, 1998) เป็นต้น

คุณสมบัติที่ระเหยได้ง่ายและสามารถสังเคราะห์ได้ปริมาณมาก ๆ จากผลผลิตของอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ทำให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายบางชนิดถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลายอินทรีย์เพื่อใช้ทำความสะอาดชิ้นงานในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมหลายชนิด ปัญหาที่สำคัญของการนำตัวทำละลายอินทรีย์ ไปใช้งาน คือ มีการปนเปื้อนในแหล่งน้ำทั้งแหล่งน้ำผิวดิน และแหล่งน้ำใต้ดิน สารปนเปื้อนเหล่านี้เกิดจากหลายสาเหตุ ได้แก่ การปล่อยน้ำเสียที่ปนเปื้อนสารเหล่านี้ทิ้งสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติโดยตรง การฝังกลบขยะที่ปนเปื้อนอย่างไม่ถูกวิธี การรั่วซึมของถังเก็บสารใต้ดิน น้ำที่ไม่ผ่านระบบบำบัดอย่างเหมาะสมและถูกอัดกลับลงสู่แหล่งน้ำใต้ดิน หรือ การหกรั่วไหลจากอุบัติเหตุต่าง ๆ เป็นต้น ส่วนใหญ่ตัวทำละลายที่ถูกใช้งานในลักษณะเดียวกันมีคุณสมบัติที่เสถียรต่อปฏิกิริยาเคมี ย่อยสลายทางชีวภาพได้ช้า และถูกดูดซับในดินได้น้อย จึงทำให้ตกค้างอยู่ในสิ่งแวดล้อมเป็นเวลานาน

2.1.1 ไตรคลอโรเอทิลีน

คุณสมบัติและความเป็นพิษ

ไตรคลอโรเอทิลีน (Trichloroethylene ; TCE) เป็นไฮโดรคาร์บอนชนิดแอลิฟาติก เป็นอนุพันธ์ของสารประกอบคลอรีเนเตดไฮโดรคาร์บอน มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.1 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของไตรคลอโรเอทิลีนในตาราง ก.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของไตรคลอโรเอทิลีน

ไตรคลอโรเอทิลีนค่อนข้างเป็นพิษ จัดเป็นสารก่อมะเร็งชนิดหนึ่ง ถูกพิจารณาให้เป็นสารเคมี 1 ใน 129 ชนิดให้เป็นสารเคมีที่เป็นมลพิษที่สำคัญโดย หน่วยงานด้านสิ่งแวดล้อมของ ประเทศสหรัฐอเมริกา (United State Environmental Protection Agency ;USEPA) ผู้ป่วยที่ได้รับไตรคลอโรเอทิลีนเข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินระบบหายใจ ส่วนใหญ่เกิดจากการทำงานที่มีความเสี่ยงหรืออยู่ใกล้ขีดบริเวณที่มีไอระเหยความเข้มข้นสูงเป็นเวลานาน ไตรคลอโรเอทิลีนมีผลโดยตรงต่อระบบประสาทส่วนกลาง ลักษณะอาการ คือ ปวดหัว วิงเวียนศีรษะ ง่วงนอน หมด-สติหรืออาการหนักถึงขั้นรุนแรง รายละเอียดสภาพความเป็นพิษของไตรคลอโรเอทิลีน แสดงในตาราง ก.2

การนำไปใช้งาน

ไตรคลอโรเอทิลีน เป็นสารอินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มสารประกอบคลอรีเนเตด ไฮโดรคาร์บอน สามารถระเหยได้เองที่อุณหภูมิไม่สูงมากนัก ถูกนำมาใช้เป็นตัวทำละลายระเหยเพื่อทำความสะอาดคราบไขมันและน้ำมันของชิ้นงาน โลหะ หรือใช้เป็นน้ำยาซักแห้งเครื่องนุ่งห่ม ประโยชน์อื่น ๆ ของไตรคลอโรเอทิลีน ที่สำคัญมีดังนี้

- 1) เป็นตัวทำละลายเพื่อทำความสะอาดชิ้นส่วนโลหะ หรือชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์
- 2) เป็นส่วนประกอบผสมกับตัวทำละลายอื่น ๆ ในสารล้างคราบน้ำมัน น้ำยาเช็ดรอยเปื้อน หรือผสมในยาฆ่าแมลง น้ำยากันเชื้อรา เป็นต้น
- 3) เป็นตัวทำละลายในสี หมึกพิมพ์ และ น้ำยาเคลือบผิววัสดุ

4) ใช้เป็นสารตั้งต้น หรือสารตัวกลาง (intermediate) เพื่อสังเคราะห์สารอินทรีย์ชนิดอื่น ๆ เช่น เพนตะคลอโรอีเทน (pentachloroethane) เป็นต้น

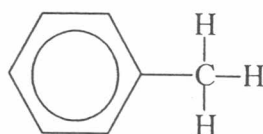
ไตรคลอโรเอทิลีนที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมเกือบทั้งหมดอยู่ในรูปไอระเหยและปนเปื้อนในน้ำทิ้งจากการผลิตของโรงงานอุตสาหกรรม จากการประมาณร้อยละ 60 – 90 ของการใช้ไตรคลอโรเอทิลีนทั้งหมดทั่วโลกถูกปล่อยออกสู่บรรยากาศและสิ่งแวดล้อม (World Health Organization [WHO], 1985)

2.1.2 โทลูอิน (Toluene)

คุณสมบัติและความเป็นพิษ

โทลูอิน (Toluene) เป็นไฮโดรคาร์บอนชนิดอะโรมาติก เป็นหนึ่งในอนุพันธ์ของเบนซีน มีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของโทลูอินในตารางที่ ก.1

ส่วนใหญ่ผู้ป่วยจะได้รับโทลูอินเข้าสู่ร่างกายผ่านทางเดินหายใจ ซึมผ่านผิวหนังและเยื่อต่าง ๆ จะเกิดผลโดยตรงต่อประสาทส่วนกลาง ลักษณะอาการที่เห็นได้ชัดคือ เกิดอาการมึนงง ปวดศีรษะ จิตใจฟุ้งซ่าน เหนื่อย อ่อนเพลีย จนถึงหมดสติได้ ส่วนใหญ่เกิดจากการทำงานที่มีความเสี่ยงหรืออยู่ใกล้ขีดบริเวณที่มีไอระเหยความเข้มข้นสูงหรือสัมผัสเป็นเวลานานๆ รายละเอียดสภาพความเป็นพิษของโทลูอิน แสดงในตาราง ก.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของโทลูอิน

การนำไปใช้งาน

โทลูอินเป็นสารอินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน สามารถระเหยได้เองแต่น้อยกว่าไตรคลอโรเอทิลีน และความเป็นพิษน้อยกว่าไตรคลอโรเอทิลีน จากโครงสร้างทางเคมีของโทลูอิน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 มีวงแหวนเบนซีนเป็นองค์ประกอบจึงถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นและสารตัวกลางในการสังเคราะห์สารอินทรีย์อะโรมาติกชนิดอื่น ๆ โทลูอินยังเป็นตัวทำละลายที่สำคัญในกระบวนการอุตสาหกรรมหลายประเภท ประโยชน์ของโทลูอินที่สำคัญมีดังนี้

- 1) เป็นองค์ประกอบ ในน้ำมันเชื้อเพลิง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง
- 2) ใช้เป็นตัวทำละลายหลักในสี น้ำยาเคลือบเงา น้ำหมึก และน้ำยาทำความสะอาดอื่นต่าง ๆ
- 3) เป็นตัวทำละลายในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เครื่องหนัง สิ่งพิมพ์ และกระดาษ

4) ใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้น และเป็นสารตัวกลางที่สำคัญในการสังเคราะห์สารอินทรีย์อื่น ๆ เช่น กรดเบนโซอิก ไซลีน หรืออนุพันธ์อื่น ๆ ที่ผลิตจากโทลูอิน เช่น สีย้อม น้ำยากันเชื้อรา เป็นต้น

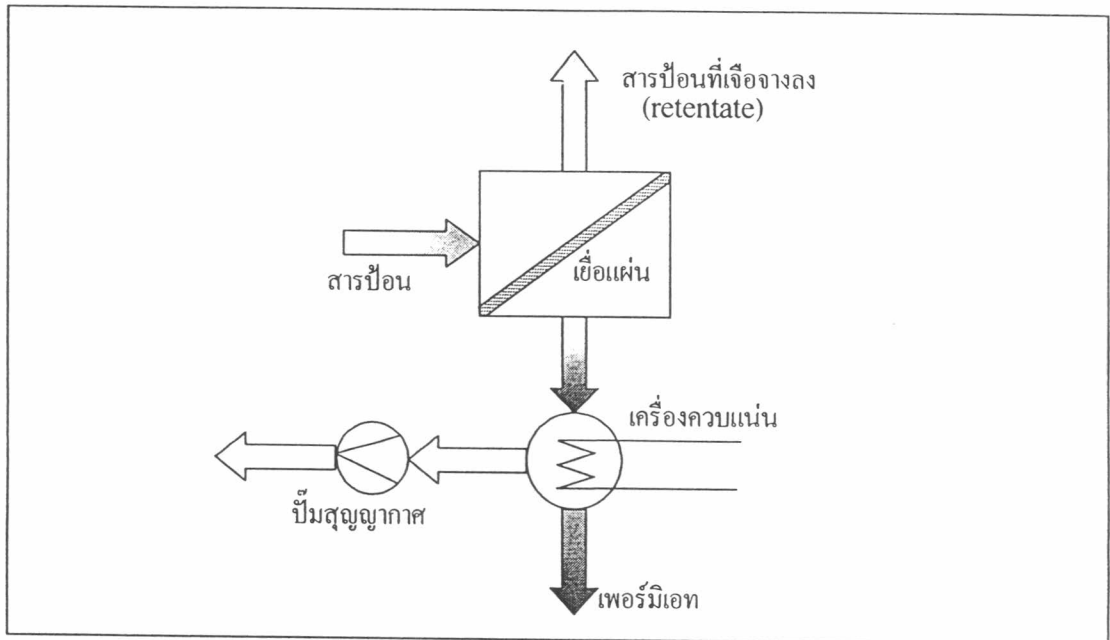
โทลูอินที่พบในสิ่งแวดล้อมมาจากสองแหล่งใหญ่ด้วยกันคือ ส่วนใหญ่ร้อยละ 65 เกิดจากการรั่วไหลของน้ำมันเชื้อเพลิง ทั้งในรูปไอระเหยและรั่วซึมจากถังบรรจุแพร่กระจายในดิน ปนเปื้อนในแหล่งน้ำ และอีกส่วนหนึ่ง (ประมาณร้อยละ 35) เกิดจากการระเหยของตัวทำละลายของโรงงานอุตสาหกรรมต่าง ๆ สู่บรรยากาศ จากการรวบรวมข้อมูลต่าง ๆ จากทั่วโลกประมาณว่าร้อยละ 86 ของโทลูอินที่ผลิตทั่วทั้งโลกถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ (WHO, 1986)

2.2 กระบวนการเพอร์เวพอเรชัน

2.2.1 หลักการเบื้องต้น

กระบวนการเพอร์เวพอเรชัน (Pervaporation) เป็นกระบวนการแยกสาร โดยเยื่อแผ่นชนิดหนึ่ง แต่กระบวนการนี้ไม่เป็นที่แพร่หลายมากนักเมื่อเทียบกับกระบวนการแยกโดยเยื่อแผ่นชนิดอื่น ๆ แต่มีการใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ ค.ศ. 1985 (Fleming, 1992) เพื่อทำการแยกน้ำออกจากสารอินทรีย์ ซึ่งเป็นสารผสมอะซิโโทป โดยทั่วไปใช้แยกน้ำออกจากเอทานอล หรือโพรพานอล เป็นต้น

กระบวนการเพอร์เวพอเรชัน เป็นการรวมกันระหว่างขั้นตอนการซึมผ่านและการระเหยเป็นไอ เยื่อแผ่นของกระบวนการนี้เป็นโพลิเมอร์ที่เลือกดูดซึมเฉพาะองค์ประกอบที่ต้องการและแพร่ผ่านเยื่อแผ่นสู่อีกด้านหนึ่งและเปลี่ยนสถานะเป็นไอ ในกรณีที่ต้องการแยกสารอินทรีย์ที่เจือจางออกจากน้ำ เยื่อแผ่นที่ใช้จะมีคุณสมบัติการซึมผ่านสารอินทรีย์ดีกว่าน้ำ ทำให้สารอินทรีย์ถูกแยกออกจากน้ำผ่านเยื่อแผ่นและถ่ายเทสู่ด้านเพอร์มิเอท ส่วนในกรณีที่ต้องการทำให้ตัวทำละลายอินทรีย์เข้มข้นขึ้น เยื่อแผ่นที่ใช้ทำจากโพลิเมอร์ที่เลือกซึมผ่านน้ำได้ดี (hydrophilic polymer) แต่ไม่เลือกซึมผ่านสารอินทรีย์ เช่น โพลียูรีเทน (Polyurethane) โพลีอะคริเลต (Polyacrylate) เป็นต้น น้ำจะถูกทำให้ระเหยในฝั่งเพอร์มิเอทที่สถานะสูญญากาศ และรักษาระดับความแตกต่างของความดันไอของทั้งสองฝั่งเยื่อแผ่น ซึ่งเป็นแรงขับเคลื่อนที่สำคัญของระบบ กระบวนการเพอร์เวพอเรชันเป็นกระบวนการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุน ไอเพอร์มิเอทจะถูกดึงออกอีกด้านหนึ่งของเยื่อแผ่น การถ่ายเทมวลถูกเหนี่ยวนำทำให้ความดันย่อยของสารในด้านเพอร์มิเอทต่ำกว่าความดันไอของสารด้านสารป้อน โดยทำให้เกิดสถานะสูญญากาศ ใช้ก๊าซเป็นสารพาหรือทำให้ควบแน่นบนผิวที่เย็น ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการเพอร์เวเฟอเรชันอย่างง่าย (ชมพูนุช พิภพลาภอนันต์, 2537)

2.3 การดูดซึมสารละลายอินทรีย์ในเยื่อแผ่น

การดูดซึมสารละลายอินทรีย์ในโพลิเมอร์ซึ่งถูกใช้เป็นเยื่อแผ่นสำหรับกระบวนการเพอร์เวเฟอเรชันเป็นมีความสำคัญต่อกระบวนการ โดยเกี่ยวข้องกับอัตราการถ่ายเทมวลและความสามารถในการเลือกของเยื่อแผ่น ดังนั้นการทำนายและวิเคราะห์การดูดซึมจึงมีส่วนสำคัญต่อการเลือกชนิดของโพลิเมอร์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นเยื่อแผ่นของกระบวนการเพอร์เวเฟอเรชันสำหรับแยกองค์ประกอบต่าง ๆ ออกจากกัน

ค่าความสามารถของการละลาย (Solubility ; S) ของโพลิเมอร์ที่นำมาเป็นเยื่อแผ่นขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ทางเคมีของสารอินทรีย์กับโพลิเมอร์แต่ละชนิด เช่น สภาพความเป็นขั้วขององค์ประกอบที่ดูดซึม ช่องว่างระหว่างโซ่โพลิเมอร์ เป็นต้น การดูดซึมสามารถอธิบายได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว (Distribution Coefficient ; K_1) ซึ่งก็คือค่าสัดส่วนของความเข้มข้นหรือแอกติวิตีขององค์ประกอบต่าง ๆ ในโพลิเมอร์ต่อวัฏภาคของของเหลวหรือก๊าซที่สภาวะสมดุล

วิธีหาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวมีลักษณะคล้ายการทดสอบการดูดซึมแบบไอโซเทอม (Isotherm Test) โดยการวัดค่าการกระจายตัวในวัฏภาคของเหลว (K_1^L) ทำโดยวิธี Direct Immerse Method เป็นการแช่ชิ้นโพลิเมอร์ตัวอย่างลงในสารละลายความเข้มข้นต่าง ๆ และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ และวิเคราะห์องค์ประกอบต่าง ๆ ในโพลิเมอร์และสารละลายที่สภาวะสมดุล

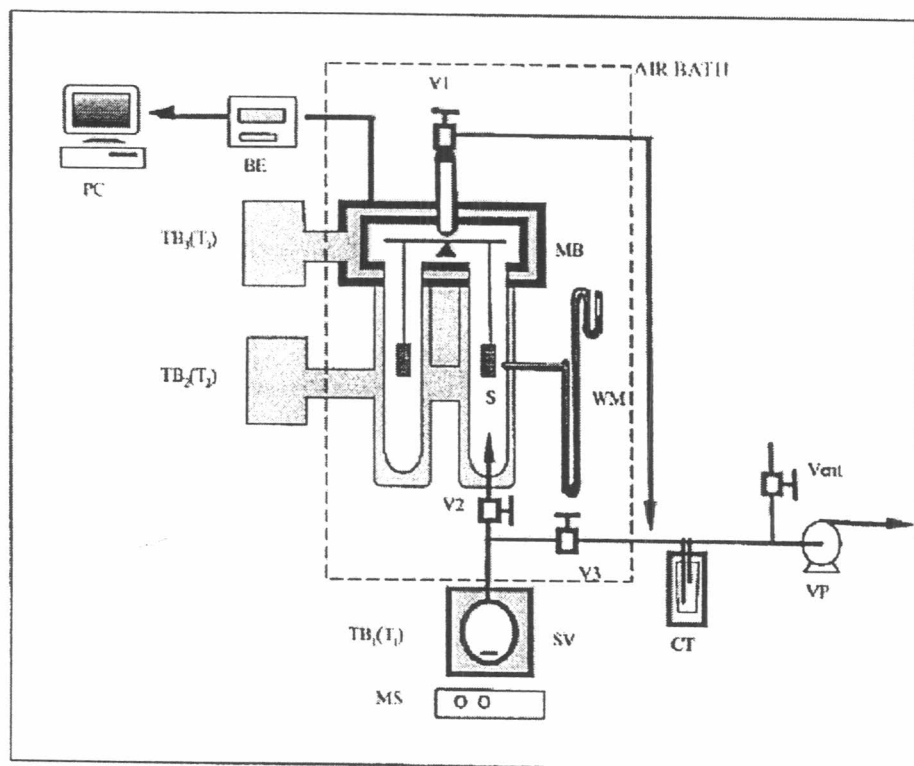
สำหรับระบบของเหลว ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว K_i^L อธิบายได้ดังนี้

$$K_i^L = \frac{C_{i(m)}}{C_{i(l)}} \quad (2.1)$$

โดยที่ $C_{i(m)}$ และ $C_{i(l)}$ คือความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในตัวอย่างโพลิเมอร์และในสารละลาย ส่วนค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวในวัฏภาคของไอ (K_i^G) หาได้โดยทำการทดลองวิธี (Isopiestic Method หรือ Gravitation Vapor Sorption Method) โดยที่วัดน้ำหนักขึ้นตัวอย่างโพลิเมอร์ที่เพิ่ม เนื่องจากการดูดซึมไอขององค์ประกอบมากขึ้น จนอยู่ในสภาวะสมดุล เพื่อการหาค่าการกระจายตัวในวัฏภาคของไอ แผนผังอุปกรณ์การทดลองแสดงในรูป 2.4 ค่าการกระจายตัวในระบบก๊าซแสดงในรูป Henry's Law Isotherm ดังสมการ 2.2

$$K_i^G = \frac{C_{i(m)}}{P_{i(g)}} \quad (2.2)$$

เมื่อ $P_{i(g)}$ คือ ความดันไอย่อยขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคของไอ



- | | |
|-------------------------------|--------------------------|
| MB : Vacuum Micro balance | CT : Cold Trap |
| TB : Thermostat Bath | VP : Vacuum Pump |
| WM : W-tube Mercury Manometer | PC : Personal Computer |
| SV : Solvent Vessel | BE : Balance Electronics |
| S : Polymer Sample | MS : Magnetic Stirrer |
| V : High Vacuum Valves | T1 < T2 < T3 |

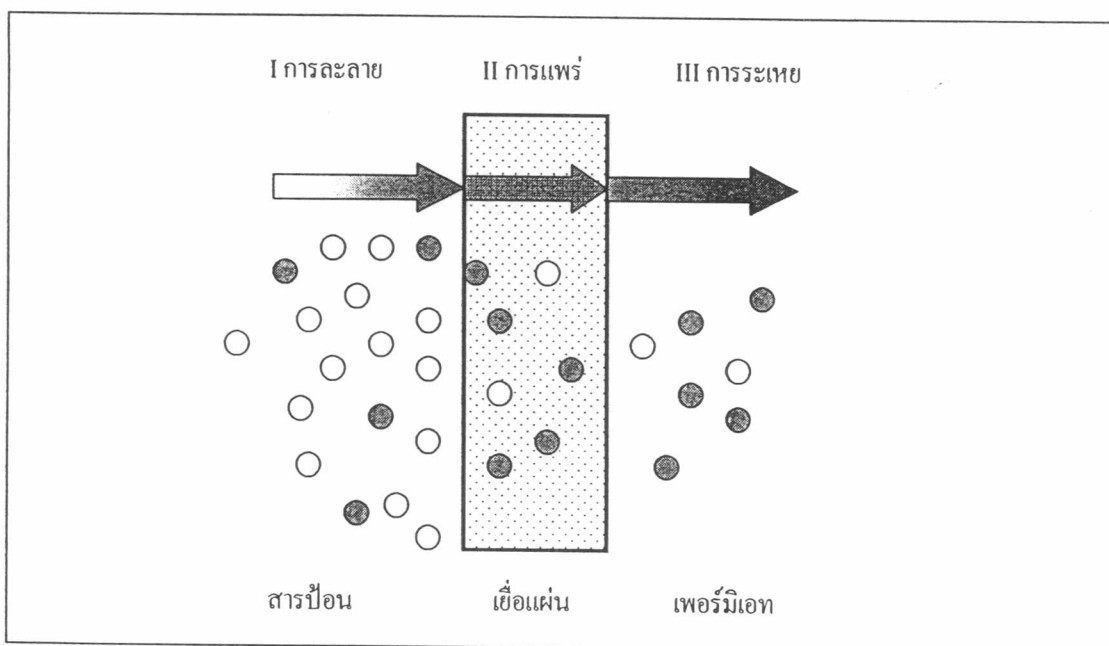
รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ในการทดลองการดูดซึมไอของโพลิเมอร์ (Kim และคณะ, 1998)

แบบจำลองอธิบายการดูดซึมสารอินทรีย์ในโพลิเมอร์มีหลากหลายแบบทั้งสำหรับระบบหนึ่งองค์ประกอบ สององค์ประกอบ และ หลายองค์ประกอบ หรืออธิบายด้วยหลักการทางทฤษฎี และแบบจำลองที่ได้จากการทดลอง เป็นต้น ตาราง 2.1 แสดงแบบจำลองต่าง ๆ ที่อธิบายการดูดซึมองค์ประกอบต่าง ๆ ในโพลิเมอร์ (Lipnizki และ Trägårdh, 2001)

2.4 แบบจำลองการถ่ายเทมวล (Wijmans และ Baker, 1995; Baker, 2000)

การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่มีรูพรุนสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการละลาย - การแพร่ (Solution – Diffusion Model) การถ่ายเทมวลประกอบด้วย 3 ขั้นตอน และแสดงในรูป 2.5 ดังนี้ (ลลิตา อัดนโถ, 2543)

1. การละลายหรือการดูดซับของสารผสมในสารป้อนเข้าสู่เยื่อแผ่น
2. การแพร่ของสารละลายซึมผ่านเยื่อแผ่น
3. การระเหยหรือคายซับของสารจากผิวเยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอท



รูปที่ 2.5 แบบจำลองกลไกการละลาย - การแพร่ ในกระบวนการเพอร์มิเอชัน (ลลิตา อัดนโถ, 2543)

ตาราง 2.1 แสดงแบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาการดูดซับในโพลีเมอร์ (Lipnizki and Trägårdh, 2001)

Model	Classification of Model	Number of Component	Type of Polymer				
			Glassy	Semi Crystalline	Cross-linked	Rubbery	Co-Polymers
Langmuir and Henry's Law Isotherm	empirical	single	•	•	•	•	•
Solubility Parameter Theory	semi- empirical	binary	•		•	•	•
Flory - Huggins	semi- empirical	binary	•	•	•	•	
UNIQUAC	semi- empirical	multi	•		•	•	•
UNIFAC	theoretical	multi	•	•	•	•	
ASOG-FV	semi- empirical	multi	•				
Entropic-FV	semi- empirical	multi	•			•	•
Modified NRTL	semi- empirical	binary	•			•	
ENSIC	semi- empirical	single				•	•
Molecular Simulations for Sorption	theoretical	binary	•			•	

การอธิบายแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการแพร่ในเยื่อแผ่นที่ต้องการพิสูจน์นั้นอยู่บนพื้นฐานของเทอร์โมไดนามิกส์ แรงขับเคลื่อนของระบบไม่ว่าจะเป็น ความดัน ความเข้มข้น หรือ อุณหภูมิ มีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน แรงขับเคลื่อนระบบทั้งหมดที่ทำให้เพอร์มิเทคเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นรวมเรียกว่าความแตกต่างของพลังงานศักย์เคมีของสาร ดังนั้นฟลักซ์ของการซึมผ่าน J_i มีหน่วยคือ กรัม/ตร.ซม.-วินาที ขององค์ประกอบ i สามารถอธิบายอย่างง่ายได้ดังสมการ 2.3

$$J_i = -L_i \frac{d\mu_i}{dx} \quad (2.3)$$

เมื่อ $\frac{d\mu_i}{dx}$ คือ ความแตกต่างของพลังงานศักย์เคมีของ i ต่อระยะทาง

L_i คือ สัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานศักย์เคมีและฟลักซ์

แรงขับเคลื่อน เช่น ความแตกต่างของความเข้มข้น ความดัน และอุณหภูมิ สามารถแสดงแทนพลังงานศักย์เคมีได้ และผลที่มีต่อฟลักซ์ก็สามารถอธิบายได้ด้วยสมการอย่างง่ายนี้เช่นกัน หากจำกัดเพียงความแตกต่างของความดันและความเข้มข้นให้เป็นแรงขับเคลื่อนระบบ สมการของพลังงานศักย์เคมีแสดงได้ดังสมการ 2.4

$$d\mu_i = RT d[\ln(\gamma_i n_i)] + v_i dp \quad (2.4)$$

เมื่อ n_i คือ เศษส่วนเชิงโมลของสาร i (โมล/โมล)

γ_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีเชิงโมลของสาร i (โมล/โมล)

p_i คือ ความดันของสาร i

v_i คือ ปริมาตรเชิงโมลของสาร i

T คือ อุณหภูมิของระบบ (เคลวิน)

R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ

ในสถานะที่ไม่สามารถอัดตัวได้ (incompressible phase) เช่น ของเหลวหรือของแข็ง (เยื่อแผ่น) ปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน ในกรณีนี้ ผลของการอินทิเกรตสมการ 2.4 เท่ากับสมการ 2.5

$$\mu_i = \mu_i^o + RT \ln(\gamma_i n_i) + v_i(p - p_i^o) \quad (2.5)$$

ในกรณีที่ก๊าซอัดตัวได้ ปริมาตรจะเปลี่ยนแปลงตามความดัน สมมติให้เป็นก๊าซอุดมคติ ผลของการอินทิเกรตสมการ 2.4 เท่ากับสมการ 2.6

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln(\gamma_i n_i) + RT \ln \frac{P}{P_i^\circ} \quad (2.6)$$

เพื่อให้แน่ใจว่าพลังงานศักย์เคมีอ้างอิง μ_i° ในสมการ 2.5 และสมการ 2.6 เป็นค่าเดียวกัน ที่ความดันอ้างอิง P_i° จึงถูกแทนที่ด้วยความดันไออิ่มตัวของสาร i ; P_i^{sat} จากสมการ 2.5 และ 2.6 สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

สำหรับในสถานะของเหลวและของแข็งที่ไม่สามารถอัดตัวได้

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln(\gamma_i n_i) + v_i(p - P_i^{sat}) \quad (2.7)$$

สำหรับสถานะก๊าซที่สามารถอัดตัวได้

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln(\gamma_i n_i) + RT \ln \frac{P}{P_i^{sat}} \quad (2.8)$$

การพิจารณาแบบจำลองการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นจำเป็นต้องตั้งข้อกำหนดขึ้นหลายข้อ เพื่อให้กำหนดขอบเขตที่จะพิจารณานั้นให้เพียงพอและง่ายต่อการทำความเข้าใจ โดยทั่วไป ข้อกำหนดอย่างแรกที่ควบคุมการถ่ายเทมวลผ่านสู่อีกฝั่งหนึ่งของเยื่อแผ่นนั้น คือสถานะที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น ต้องสมดุลซึ่งกันและกัน จากข้อกำหนดนี้หมายความว่าความแตกต่างของพลังงานศักย์เคมีที่เกิดจากทั้งสองฝั่งนั้นคงที่ และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง แสดงว่าอัตราการดูดซับและอัตราการคายซับของสารที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นสูงกว่าอัตราการแพร่ผ่านเยื่อแผ่น

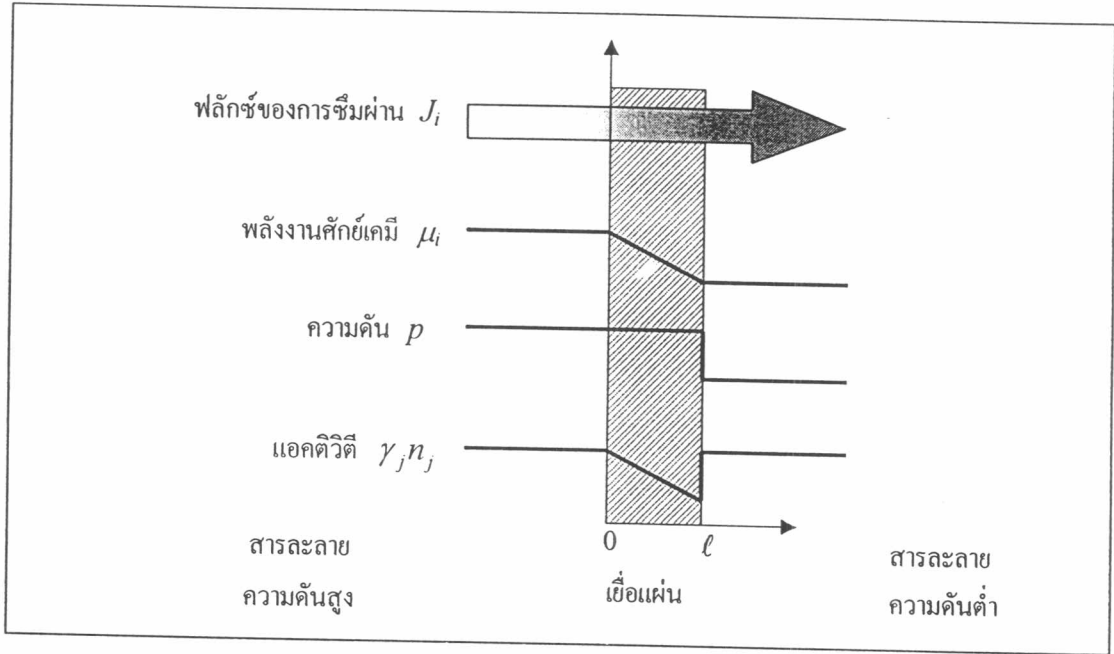
ข้อกำหนดข้อที่สองนั้นเกี่ยวกับความแตกต่างของความดันและความเข้มข้นในเยื่อแผ่น แบบจำลองการละลาย - การแพร่ สมมติให้ความดันในเยื่อแผ่นนั้นยังคงเท่าเดิมและความแตกต่างของพลังงานศักย์เคมีระหว่างเยื่อแผ่น ถูกแทนด้วยความแตกต่างของความเข้มข้นเท่านั้น จากข้อกำหนดทั้งสองข้อ แสดงด้วยรูปด้านข้างของเยื่อแผ่นดังรูปที่ 2.6

เพอร์เวอเรชันเป็นกระบวนการแยกสาร องค์ประกอบของสารแต่ละชนิดจะสามารถละลายในเยื่อแผ่นและอัตราการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นที่ไม่เท่ากัน ความดันด้านเพอร์มิเททถูกทำให้ต่ำกว่าความดันไอของสารจึงทำให้องค์ประกอบที่ต้องการแยกนั้นอยู่ในสถานะไอ การถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นถูกเหนี่ยวนำโดยการรักษาความดันไอของก๊าซด้านเพอร์มิเททให้ต่ำกว่าความดันไอของสารป้อนในสถานะของเหลว ความแตกต่างของพลังงานศักย์เคมี ความดัน และ แอคติวิตีระหว่างเยื่อแผ่นทั้งสองฝั่ง ถูกแสดงด้วยรูปที่ 2.7

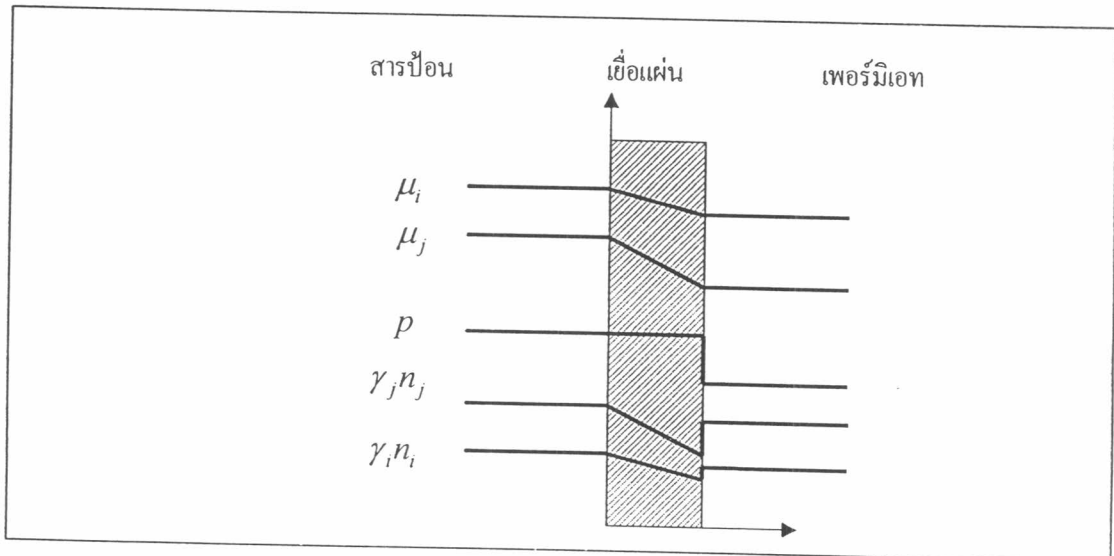
ที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นด้านสารป้อน พลังงานศักย์เคมีของสารป้อนถูกทำให้อยู่ในสถานะสมดุล กับพลังงานศักย์เคมีของสารที่อยู่ในเยื่อแผ่น ที่ความดันเดียวกัน จากสมการ 2.5 เขียนได้เป็นดังนี้

$$\mu_i^o + RT \ln(\gamma_{io}^L n_{io}) + v_i(p_0 - p_i^{sat}) = \mu_i^o + RT \ln(\gamma_{io(m)} n_{io(m)}) + v_i(p_0 - p_i^{sat}) \quad (2.9)$$

จากสมการ 2.9 สถานะในสารป้อนแสดงด้วยตัว L และสถานะในเยื่อแผ่นแสดงด้วยตัว m



รูปที่ 2.6 แบบจำลองการละลาย - การแพร่โดยมีความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการซึมผ่านเยื่อแผ่นความหนา l ขององค์ประกอบ i (Baker, 2000)



รูปที่ 2.7 ค่าพลังงานศักย์เคมี ความดัน และแอกติวิตีที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบ i และ j ที่ซึมผ่านเยื่อแผ่น ตามแบบจำลองการละลาย - การแพร่ (Baker, 2000)

ความเข้มข้นที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นด้านสารป้อน เป็นดังนี้

$$c_{i_0(m)} = \frac{\gamma_{i_0}^L P_m}{\gamma_{i_0(m)} P_0} c_{i_0} = K_i^L c_{i_0} \quad (2.10)$$

K_i^L คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ i ในวัฏภาคของเหลว

ที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอท ความดันลดลงจากความดันของสารป้อนในเยื่อแผ่น ; p_0 สู่ความดันด้านเพอร์มิเอทของสารในสถานะก๊าซ ; p_i

$$\mu_i^o + RT \ln(\gamma_{i_0}^G n_{i_0}) + RT \ln \frac{P_i}{P_i^{sat}} = \mu_i^o + RT \ln(\gamma_{i_0(m)} n_{i_0(m)}) + v_i (p_0 - p_i^{sat}) \quad (2.11)$$

เมื่อจัดรูปสมการ 2.11 ใหม่

$$n_{i_0(m)} = \frac{\gamma_{i_0}^G P_i}{\gamma_{i_0(m)} P_i^{sat}} n_{i_0} \exp \frac{-v_i (p_0 - p_i^{sat})}{RT} \quad (2.12)$$

เนื่องจาก v_i ในสมการ 2.12 คือปริมาตรเชิงมวลของสารในสถานะของเหลวในเยื่อแผ่น ซึ่งถือว่ามิต่ำน้อยมาก ดังนั้นเทอมเอกซ์โปเนนเชียลในสมการ 2.12 จึงมีค่าประมาณเท่ากับ 1

$$n_{i_0(m)} = \frac{\gamma_{i_0}^G P_i}{\gamma_{i_0(m)} P_i^{sat}} n_{i_0} \quad (2.13)$$

ผลคูณ $n_{i_0} P_i$ สามารถเขียนแทนด้วยความดันย่อย p_{i_0} ได้

$$n_{i_0(m)} = \frac{\gamma_{i_0}^G P_i}{\gamma_{i_0(m)} P_i^{sat}} \frac{p_{i_0}}{P_i} \quad (2.14)$$

หรือเขียนแทนด้วยความเข้มข้นโดยมวล

$$c_i = m_i \rho n_i \quad (2.15)$$

$$c_{i_0(m)} = m_i \rho_m \frac{\gamma_{i_0}^G P_i}{\gamma_{i_0(m)} P_i^{sat}} = K_i^G p_i \quad (2.16)$$

K_i^G คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายของ i ในวัฏภาคของไอ

เทอมของความเข้มข้นในสมการ 2.10 และ 2.16 แทนลงใน Fick 's law ทำให้ได้ค่าฟลักซ์ของการซึมผ่านเยื่อแผ่นขององค์ประกอบ i

$$J_i = \frac{D_i (K_i^L c_{i_0} - K_i^G p_{i_0})}{\ell} \quad (2.17)$$

แต่ทว่าค่าคงที่การดูดซึมในสมการ 2.10 เป็นค่าคงที่ของสมดุลวัฏภาคของเหลว แต่ค่าคงที่การดูดซึมในสมการ 2.16 เป็นค่าคงที่ของสมดุลวัฏภาคไอ ดังนั้นการแปลงค่าคงที่ทั้งสองสามารถทำได้โดยพิจารณาสถานะสมดุลของไอสมมติในสารป้อน สมดุลไอ-ของเหลว ของระบบนี้สามารถแสดงได้ด้วยสมการดังนี้

$$\mu_i^o + RT \ln(\gamma_i^L n_i^L) + v_i(p_i - p_i^{sat}) = \mu_i^o + RT \ln(\gamma_i^G n_i^G) + RT \ln \frac{P_i}{P_i^{sat}} \quad (2.18)$$

ด้วย L และ G แสดงสถานะของเหลวและไอลตามลำดับ เมื่อนำสมการ 2.18 แทนลงในสมการ 2.11 จะได้เศษส่วนโมล n_i จากสมการ 2.14 ได้ดังนี้

$$n_i^L = \frac{\gamma_i^G P_i}{\gamma_i^L P_i^{sat}} \quad (2.19)$$

และความเข้มข้นของสาร i เท่ากับ

$$c_i^L = m_i \rho_m \frac{\gamma_i^G P_i}{\gamma_i^L P_i^{sat}} \quad (2.20)$$

$$c_i^L = \frac{K_i^G}{K_i^L} P_i \quad (2.21)$$

จากความสัมพันธ์ของความเข้มข้น c_i^L ของสาร i ในวัฏภาคของเหลวกับความดันไอย่อย p_i ในสมดุลของเหลว นำสมการ 2.21 แทนลงในสมการ 2.15 จะได้

$$J_i = \frac{D_i K_i^G (p_{i_0} - p_{i_t})}{\ell} \quad (2.22)$$

เมื่อ p_{i_0} และ p_{i_t} เป็นความดันไอย่อยของสาร i ของแต่ละฝั่งของเยื่อแผ่น และ D_i เป็นค่าความสามารถของการแพร่ (Diffusivity) นิยามค่าความสามารถของการซึมผ่าน (Permeability ; P) เท่ากับ

$$P_i = D_i K_i \quad (2.23)$$

ดังนั้นสมการ 2.22 สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$J_i = \frac{P_i (p_{i_0} - p_{i_t})}{\ell} \quad (2.24)$$

จากสมการ 2.24 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่า แรงขับเคลื่อนของเพอร์เวเพอเรชัน คือ ความดันไอที่แตกต่างกันของสารในแต่ละฝั่งเยื่อแผ่น สมการ 2.22 แสดงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นของไอที่ถูกดูดซึมในเยื่อแผ่นไว้ ซึ่งจากกฎของเฮนรี เขียนให้อยู่ในรูปทั่วไปได้ คือ

$$H_i c_i^L = p_i \quad (2.25)$$

จากสมการที่ 2.21 และ 2.25 ค่าคงที่ของเฮนรี ; H_i สามารถแปลงได้เป็น

$$H_i = \frac{K_i^L}{K_i^G} = \frac{\gamma_i^L P_i^{sat}}{m_i \rho_m \gamma_i^G} \quad (2.26)$$

แสดงอยู่ในรูปของสมการ 2.24 ได้เป็น

$$J_i = \frac{P_i^G (C_{i_0} H_i - p_{i_t})}{\ell} \quad (2.27)$$

$$\text{หรือ} \quad J_i = \frac{P_i^L (C_{i_0} - p_{i_t} / H_i)}{\ell} \quad (2.28)$$

จากสมการ 2.24 แสดงให้เห็นถึงแรงขับเคลื่อนของเพอร์เวเพอเรชันในรูปของความดันไอ และแรงขับเคลื่อนสามารถแสดงให้อยู่ในรูปของความแตกต่างของความเข้มข้น ดังเช่นสมการ 2.28 แต่ในทางปฏิบัติผลลัพธ์ที่ได้จากสมการที่แสดงอยู่ในรูปความดันไอ จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์และมีความถูกต้อง ชัดเจนมากกว่า

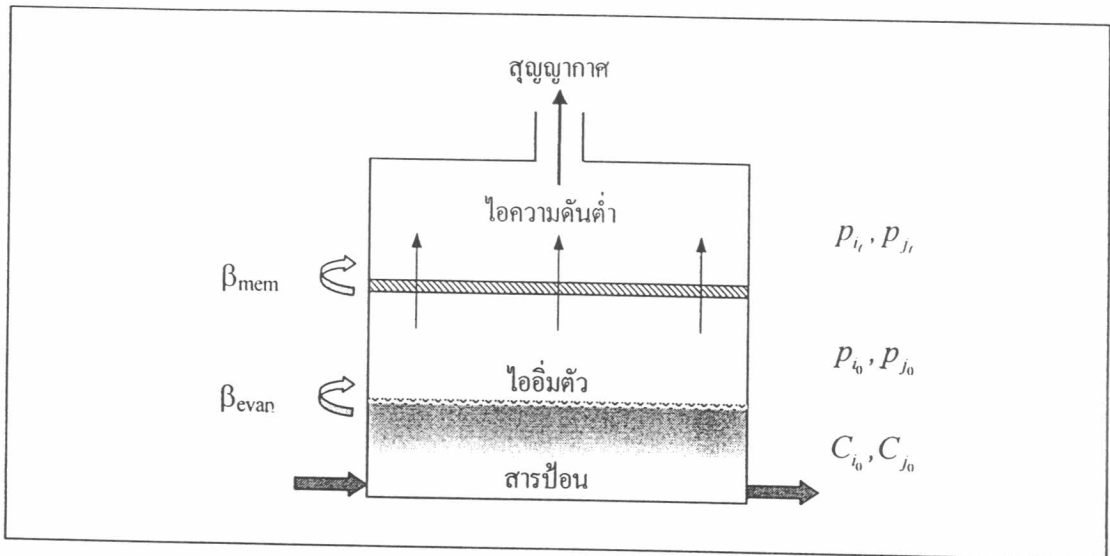
นิยามค่าแฟคเตอร์การแยกของระบบเพอร์เวเพอเรชันด้วยตัวแปร β_{pervap} ซึ่งมีค่าเท่ากับ

$$\beta_{pervap} = \frac{p_{i_t} / P_{J_t}}{C_{i_0} / C_{J_0}} \quad (2.29)$$

ค่าตัวแปรนี้อธิบายได้อย่างง่าย เมื่อแยกกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันออกเป็น 2 ขั้นตอนดังรูป 2.8 (Wijmans และ Baker, 1993) ขั้นตอนแรกคือการระเหยสารป้อนที่อยู่ในสถานะของเหลวจนกลายเป็นไออิ่มตัวสัมผัสกับเชื้อแผ่น ขั้นตอนที่สองเป็นการแพร่ของไอผ่านเชื้อแผ่นสู่ด้านสารเพอร์มิเอทที่มีความดันต่ำกว่า โดยสมมติให้สภาพทางเทอร์โมไดนามิกส์ยังมีค่าเท่ากับที่เกิดขึ้นจริงในเพอร์เวเพอเรชัน

จากกระบวนการที่แสดงในรูป 2.8 ขั้นตอนการระเหยสามารถแยกสารด้วยค่าการระเหยของสารที่แตกต่างกันในสารผสม ค่าแฟคเตอร์การแยกของขั้นตอนการระเหย β_{evap} เขียนได้ดังนี้

$$\beta_{evap} = \frac{p_{i_0} / P_{J_0}}{C_{i_0} / C_{J_0}} \quad (2.30)$$



รูปที่ 2.8 ระบบเพอร์เวพอเรชันที่ถูกจำลองให้มีการแยกเกิดขึ้นสองขั้นตอน (Baker, 2000)

ขั้นตอนที่สองเป็นการซึมผ่านเยื่อแผ่นขององค์ประกอบ i และ j แรงขับเคลื่อนของขั้นตอนนี้คือความแตกต่างของความดันไอของสารทั้งสองด้านของเยื่อแผ่น ค่าแฟกเตอร์การแยกของขั้นตอนการซึมผ่านเยื่อแผ่น β_{mem} เขียนได้ดังนี้

$$\beta_{mem} = \frac{P_{i_t} / P_{j_t}}{P_{i_o} / P_{j_o}} \tag{2.31}$$

ค่าแฟกเตอร์การแยกของเพอร์เวพอเรชัน คือผลคูณของการแยกจากทั้งสองขั้นตอน

$$\beta_{pervap} = \beta_{evap} \times \beta_{mem} \tag{2.32}$$

เทอม β_{evap} ในสมการ 2.32 นั้นสามารถคำนวณได้จากข้อมูลสมดุลวัฏภาค ไอ-ของเหลวที่มีการศึกษาถั่นแยกสารที่มีการศึกษาผ่านมา และสำหรับค่าแฟกเตอร์การแยกโดยเยื่อแผ่น β_{mem} นั้น สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการละลาย - การแพร่ ดังสมการ 2.27 ดังนี้

จากสมการ 2.27 ฟลักซ์ขององค์ประกอบ i

$$J_i = \frac{P_i^G (c_{i_o} H_i - p_{i_t})}{\ell} \tag{2.27}$$

และสำหรับองค์ประกอบ j

$$J_j = \frac{P_j^G (c_{j_o} H_j - p_{j_t})}{\ell} \tag{2.33}$$

เมื่อนำสมการ 2.27 หารด้วย 2.33 ดังนี้

$$\frac{J_i}{J_j} = \frac{P_i^G}{P_j^G} \left(\frac{p_{i_0} - p_{i_t}}{p_{j_0} - p_{j_t}} \right) \quad (2.34)$$

โดยที่ตัวแปรต่าง ๆ ในสมการ 2.34 นั้นมีหน่วยเชิงน้ำหนักทั้งหมด ฟลักซ์ ; J มีหน่วย กรัม/ตร. ซม.-วินาที และ ค่าความสามารถของการซึมผ่าน ; P มีหน่วยเป็น กรัม/ตร. ซม.-วินาที- ซม.ปรอท เปลี่ยนเป็นหน่วยเชิงโมล จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$\frac{j_i}{j_j} = \frac{\rho_i^G}{\rho_j^G} \left(\frac{p_{i_0} - p_{i_t}}{p_{j_0} - p_{j_t}} \right) \quad (2.35)$$

ทั้ง j มีหน่วยเป็น โมล/ตร. ซม.-วินาที และ ρ มีหน่วยเป็น โมล/ตร. ซม.-วินาที- ซม.ปรอท และจากสมการ 2.35 นิยามอัตราส่วนค่าความสามารถของการซึมผ่านเชิงโมล คือ ความสามารถในการเลือกของเยื่อแผ่น (membrane selectivity ; α_{mem})

$$\alpha_{mem} = \frac{\rho_i}{\rho_j} = \frac{D_i K_i}{D_j K_j} \quad (2.36)$$

สัดส่วนของฟลักซ์เชิงโมล มีค่าเท่ากับสัดส่วนความดันย่อยของทั้งสององค์ประกอบ

$$\frac{j_i}{j_j} = \frac{p_{i_t}}{p_{j_t}} \quad (2.37)$$

เมื่อรวมสมการ 2.32 2.35 และ 2.37 ผลลัพธ์ที่ได้คือ

$$\beta_{pervap} = \beta_{evap} \alpha_{mem} \left(\frac{p_{j_0}}{p_{j_t}} \right) \left(\frac{p_{j_0} - p_{j_t}}{p_{i_0} - p_{i_t}} \right) \quad (2.38)$$

จากสมการ 2.38 สามารถแยกพิจารณาได้ 3 ส่วน เพื่ออธิบายประสิทธิภาพของระบบเพอร์เวเพอเรชัน ค่าแรก β_{evap} เป็นค่าที่ได้จากสภาวะสมดุลวัฏภาคไอ - ของเหลว นั้น ๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับสัดส่วนขององค์ประกอบและอุณหภูมิของสารผสม ค่าที่สองคือความสามารถของการเลือกของเยื่อแผ่น ; α_{mem} ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของวัสดุแต่ละชนิดที่นำมาใช้เป็นเยื่อแผ่น และค่าที่สามนั้นคือผลของความแตกต่างของความดันไอของด้านสารป้อนและด้านเพอร์มิเอท

สำหรับเพอร์เวเพอเรชัน การแยกที่เกิดขึ้นได้ด้นั้น อธิบายได้โดยการเลือกของเยื่อแผ่น และสัดส่วนความดันไอของทั้งสองด้าน ผลที่มีต่อกันของทั้งสองตัวแปรดังในสมการ 2.38 นั้น เมื่อจำกัดการพิจารณาเพียงสองกรณีที่ตัวแปรใดมีความสำคัญมากกว่าอีกตัวแปรหนึ่ง สำหรับกรณีแรกพิจารณาเมื่อความสามารถของการเลือกของเยื่อแผ่นมีค่ามากกว่าสัดส่วนความดันไอของสารป้อนและเพอร์มิเอทมาก ๆ :

$$\alpha_{mem} \gg p_0/p_c \quad (2.39)$$

หมายความว่าความสามารถของการเลือกของเยื่อแผ่นสูงมากจนทำให้เพอร์มิเอทที่ได้มีความบริสุทธิ์สูง (องค์ประกอบ i เกือบทั้งหมด) และความดันด้านเพอร์มิเอทต่ำกว่าความดันไอย่อย ด้านสารป้อนขององค์ประกอบ i ดังนั้น

$$p_{i_r} = p_c \quad \text{เมื่อ } p_c < p_{i_0} \quad (2.40)$$

เมื่อรวมสมการ 2.40 กับสมการ 2.31 จะได้ว่า

$$\beta_{mem} = \frac{p_{j_0}}{p_{j_r}} \quad (2.41)$$

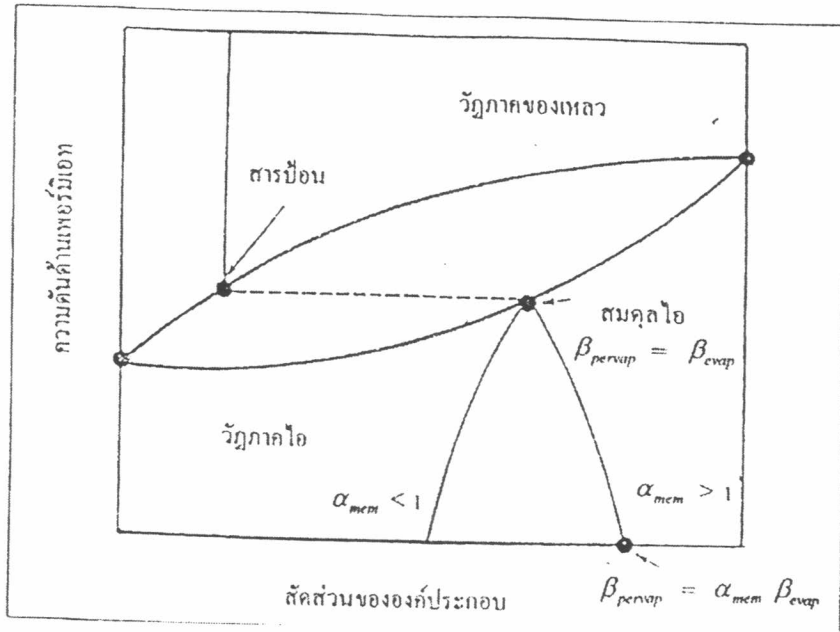
และเมื่อนำไปแทนในสมการ 2.38 ค่าแฟกเตอร์การแยกของระบบเพอร์เวเพอเรชันเท่ากับ

$$\beta_{pervap} = \beta_{evap} \frac{p_{j_0}}{p_{j_r}} \quad \text{เมื่อ } \alpha_{mem} \gg \frac{p_0}{p_c} \quad (2.42)$$

สำหรับกรณีที่สอง เมื่อสัดส่วนความดันไอนี้มีค่ามากกว่าความสามารถของการเลือกของเยื่อแผ่นมาก ๆ หมายถึงความดันไอย่อยด้านเพอร์มิเอทมีค่าน้อยกว่าความดันไอย่อยด้านสารป้อน และความดันด้านเพอร์มิเอท มีค่าเข้าใกล้ศูนย์มาก ๆ (p_{i_r} และ $p_{j_r} \rightarrow 0$) สมการ 2.38 จะลดรูปลงเหลือเพียง

$$\beta_{pervap} = \alpha_{mem} \times \beta_{evap} \quad \text{เมื่อ } \alpha_{mem} \ll \frac{p_0}{p_c} \quad (2.43)$$

การเลือกของเยื่อแผ่นถูกใช้เต็มที่เมื่อ $p_c = 0$ ถ้าความสามารถของการเลือกของเยื่อแผ่น (α_{mem}) มีค่ามากกว่า 1 เยื่อแผ่นจะให้องค์ประกอบที่ระเหยง่ายกว่าผ่านได้มากกว่า เยื่อแผ่นจะเสริมประสิทธิภาพในการแยก ถ้าความสามารถของการเลือกของเยื่อแผ่นมีค่าน้อยกว่า 1 ระบบอาจให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยง่ายกว่าเพิ่มขึ้น แต่ความเข้มข้นจะน้อยกว่าจากขั้นตอนการระเหย หรืออาจให้ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ระเหยยากกว่ามากขึ้นได้ แผนภาพการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารในระบบเพอร์เวเพอเรชัน และผลจากความสามารถของการเลือกของเยื่อแผ่นต่อแฟกเตอร์การแยกของระบบ แสดงดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ผลของความดันด้านเพอร์มิเอทที่มีต่อองค์ประกอบของไอด้านเพอร์มิเอทสำหรับเพอร์เวเพอร์ชัน (Blume และคณะ, 1990)

2.5 ประสิทธิภาพของกระบวนการเพอร์เวเพอร์ชัน

2.5.1 ความสามารถในการเลือก (Selectivity ; α)

กระบวนการเพอร์เวเพอร์ชันเป็นกระบวนการแยกสารหลายของค์ประกอบด้วยเยื่อแผ่น นอกจากปริมาณฟลักซ์ขององค์ประกอบที่ต้องการแยกแล้วต้องพิจารณาค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบที่แยกได้ควบคู่กัน ความสามารถในการเลือก (Selectivity ; α_i) ขององค์ประกอบ i ถูกนิยามดังสมการ 2.44

$$\alpha_i = \frac{(C_{i_l}/C_{j_l})}{(C_{i_v}/C_{j_v})} \tag{2.44}$$

เมื่อ C คือความเข้มข้นโดยน้ำหนักขององค์ประกอบ i และ j ในฝั่งสารป้อน (o) และฝั่งเพอร์มิเอท (l) หากความสามารถของการเลือกมีค่าเท่ากับ 1 แสดงว่าไม่มีการแยกองค์ประกอบเกิดขึ้น และเมื่อความสามารถของการเลือกมีค่าสูงแสดงว่าระบบมีการเลือกองค์ประกอบ i ได้ดี

Baker และคณะ (1997) ได้นิยามค่า Enrichment Factor (E) สำหรับกระบวนการที่มีความเข้มข้นของสารป้อนต่ำ แสดงดังสมการ 2.45

$$E = C_{i_v}/C_{i_o} \tag{2.45}$$

2.5.2 ดัชนีการแยกโดยกระบวนการเพอร์เวพอเรชัน (Pervaporation Separation Index ; PSI)

Huang and Rhim (1991) ได้นิยามค่าดัชนีการแยกโดยเพอร์เวพอเรชัน (Pervaporation Separation Index ; PSI) ดังสมการที่ 2.46 เป็นดัชนีที่ใช้เป็นเกณฑ์ในการเลือกเยื่อแผ่นและสถานะของระบบที่มีความเหมาะสม เป็นผลคูณระหว่างค่าฟลักซ์ของเพอร์มิเอท (J) และความสามารถของการเลือกของระบบ (α) สำหรับกระบวนการเพอร์เวพอเรชัน

$$PSI = J \times \alpha \quad (2.46)$$

2.6 ปัจจัยที่ผลต่อระบบ (ชมพูนุช พิภพลาภอนันต์, 2537 ;ลลิตา อตัน โถ, 2543)

2.6.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี

การดูดซึมของตัวทำละลายจะเกิดขึ้นที่บริเวณผิวสัมผัสเยื่อแผ่นกับสารป้อน ปริมาณการดูดซึมของตัวทำละลายแต่ละชนิดถูกกำหนดโดยคุณสมบัติทางเคมีของโพลิเมอร์กับตัวทำละลาย องค์ประกอบที่มีแรงกระทำต่อโซ่โพลิเมอร์สูงจะทำให้โพลิเมอร์ของตัวได้มาก แต่ถ้าแรงกระทำนี้สูงกว่าแรงดึงดูดระหว่างโซ่โพลิเมอร์ โพลิเมอร์จะถูกละลายในตัวทำละลายนั้น ในกระบวนการเพอร์เวพอเรชัน เยื่อแผ่นโพลิเมอร์ที่ใช้จะต้องคงรูปเป็นของแข็ง วัสดุที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติที่เหมาะสม เช่น โพลิเมอร์ที่มีโครงร่างตาข่าย กราฟโคโพลิเมอร์ (graftcopolymer) หรือการผสมวัสดุเนื้อในโพลิเมอร์หลัก การพองตัวมากหรือน้อยของโพลิเมอร์ขึ้นกับปัจจัยหลัก 2 ประการ คือ 1) องค์ประกอบเป็นตัวทำละลายที่ดีของโพลิเมอร์หรือไม่ และ 2) ความยืดหยุ่นของโซ่โพลิเมอร์ ซึ่งจะมีแรงต้านการพองตัวมากหรือน้อย

การซึมผ่านเยื่อแผ่นด้วยอัตราที่ต่างกันของแต่ละองค์ประกอบทำให้เกิดความสามารถของการเลือก ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของการละลายหรือการแพร่ หรืออาจเกิดจากทั้งสองปรากฏการณ์ขึ้นกับคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของระบบ ระบบที่มีตัวทำละลายมีรูปร่างและขนาดใกล้เคียงกัน การดูดซึมจะมีค่าต่างกันจะเป็นผลให้เกิดความสามารถของการเลือก การแพร่ผ่านทำให้เกิดความสามารถของการเลือกเมื่อขนาดและรูปร่างของโมเลกุลต่างกันมาก ๆ

ความสามารถของการเลือกผ่านโพลิเมอร์ชนิดยางซีลีโคนเกิดจากการดูดซึมสารอินทรีย์มากกว่าน้ำ แต่เปอร์เซ็นต์การดูดซึมจะมีค่าต่ำ ความเข้มข้นของสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่นชนิดนี้จึงมีค่าต่ำมาก ดังนั้น อาจไม่มีแรงกระทำระหว่างสารที่ซึมผ่านในเยื่อแผ่นโพลิเมอร์ (Coupling Effect)

การเกิดแรงกระทำระหว่างกันของโมเลกุลแต่ละชนิดในสารละลายจะมีผลต่อค่าการแพร่ของสารซึ่งเรียกว่า Coupling Effect เนื่องจากการเกิด Coupling ทำให้โมเลกุลมีขนาดใหญ่ขึ้นจึงมีความสามารถในการแพร่ลดลง ในกรณีที่เยื่อแผ่นมีการพองตัวสูงมีช่องว่างใหญ่พอที่โมเลกุล Coupling แพร่ผ่านได้ จะทำให้โมเลกุลที่มีความสามารถในการแพร่น้อยกว่าสามารถแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้มากขึ้น ส่งผลให้ค่าแฟลคเตอร์การแยกของระบบลดลง

2.6.2 ความหนาของเยื่อแผ่น

เยื่อแผ่นสำหรับใช้ในกระบวนการเพอร์เมเอชันมักมีความหนาตั้งแต่ 0.01 - 15 มม. เยื่อแผ่นควรมีความหนาบาง ๆ และมีคุณสมบัติเหมาะสมกับสถานะในการดำเนินการ อาจมีตะแกรงลวด โพลีเมอร์ หรือวัสดุอื่น ๆ เช่น เซรามิกส์ เป็นวัสดุรองรับ (support) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและความต้านสูง ๆ ได้ พลักซ์ของเพอร์มิเอทเป็นส่วนผกผันกับความหนาของเยื่อแผ่น เยื่อแผ่นที่บางจะให้ พลักซ์ที่สูงกว่าเยื่อแผ่นที่หนา เนื่องจากความต้านทานในการแพร่ของเยื่อแผ่นต่ำกว่า สารละลายจึงแพร่ออกมาได้มาก ในระบบสารผสมการเพิ่มขึ้นของพลักซ์ของทุกองค์ประกอบเนื่องจากเยื่อแผ่นที่บางนั้นมีผลทำให้ความสามารถของการเลือกลดลง

Nijhuis และคณะ (1999) ทำการแยกสารละลายโทลูอิน/น้ำ พบว่าพลักซ์ของน้ำลดลงจาก 51 เป็น 6 กรัม/ตร.ม.-ชม และพลักซ์ของ โทลูอินลดลงจาก 20 เป็น 13 กรัม/ตร.ม.-ชม เมื่อความหนาของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นจาก 30 เป็น 240 ไมโครเมตร

Hoshi และคณะ (1999) ทำการแยกสารละลายไตรคลอโรเอทิลีน/น้ำ โดยใช้เยื่อแผ่นแบบ copolymer ความหนา 40-140 ไมโครเมตร พบว่าพลักซ์ของน้ำลดลงอย่างมากเมื่อเพิ่มความหนาของเยื่อแผ่น ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีนในเพอร์มิเอทเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 54.6 เป็น 62.7 โดยน้ำหนัก และค่าการแยกเพิ่มขึ้นจาก 610 เป็น 820

2.6.3 ความเข้มข้นของสารป้อน

ความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ซึมผ่านดีในสารป้อนมีผลโดยตรงต่อการดูดซึมที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่น แอคติวิตีของสารจะเปลี่ยนแปลงมากหรือน้อยตามการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารขึ้นกับธรรมชาติทางเคมีของสารผสม เทอร์โมไดนามิกส์แอคติวิตีขององค์ประกอบในของเหลว แสดงด้วยความดันไอขององค์ประกอบ i ดังนี้

$$p_{i_0} = n_{i_0} \gamma_i^L p_0 = a_i p_0 \quad (2.47)$$

γ_i^L คือ ค่าสัมประสิทธิ์แอคติวิตีเชิงโมล (activity coefficient) ขององค์ประกอบ i ในวัฏภาคของเหลว

n_{i_0} คือ เศษส่วนเชิงโมลขององค์ประกอบ ในวัฏภาคของเหลว

p_{i_0} คือ ความดันไอย่อยขององค์ประกอบ i

p_o คือ ความดันไอรวม

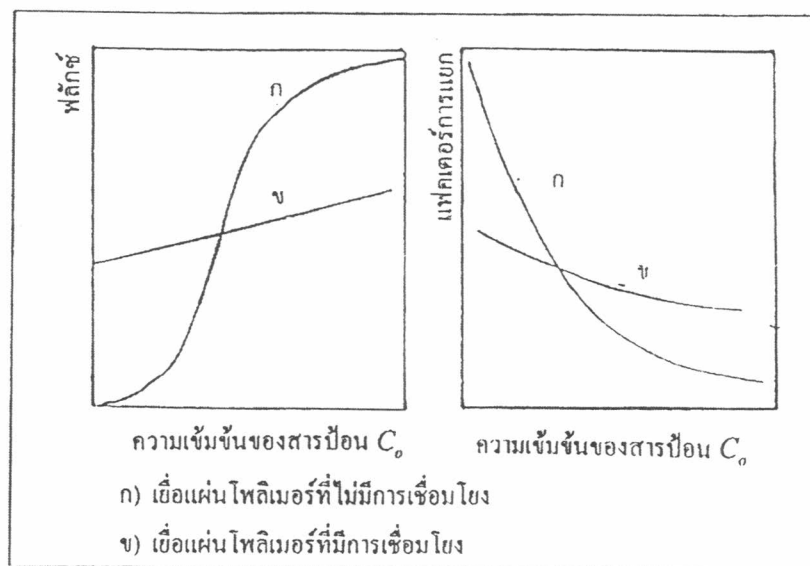
a_i คือ แอคติวิตีเชิงโมลขององค์ประกอบ i

สำหรับสารละลายอุดมคติ ค่า $\gamma_i^L = 1$ สารละลายจะประพฤติตัวเป็นไปตามกฎของราอูลท์ (Raoult's law) ซึ่งใช้กับสารละลายบริสุทธิ์ ($\gamma_i^L \rightarrow 1$)

เมื่อ $\gamma_i^L > 1$ สารละลายแสดงพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปทางบวกจากกฎของราอูลท์ ค่าแอกติวิตีจะมีค่าสูงกว่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มข้นต่ำลง ค่าการแยกจะดีขึ้นแต่ฟลักซ์จะลดลง

เมื่อ $\gamma_i^L < 1$ สารละลายแสดงพฤติกรรมเบี่ยงเบนไปทางลบจากกฎของราอูลท์ แอกติวิตีจะมีค่าต่ำกว่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้ และมีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นต่ำลง องค์ประกอบที่ถูกดูดซึมได้ง่ายจะถูกดูดซึมน้อยลง

การเพิ่มขึ้นของฟลักซ์แบบเอ็กซ์โปเนนเชียล (exponential type) ดังในรูปที่ 2.10 เป็นผลมาจากความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่กับความเข้มข้น การเพิ่มขึ้นจะถูกจำกัดเมื่อความเข้มข้นของสารละลายสูง ๆ เนื่องจากโซโพลิเมอร์ไม่สามารถยึดตัวได้อีก

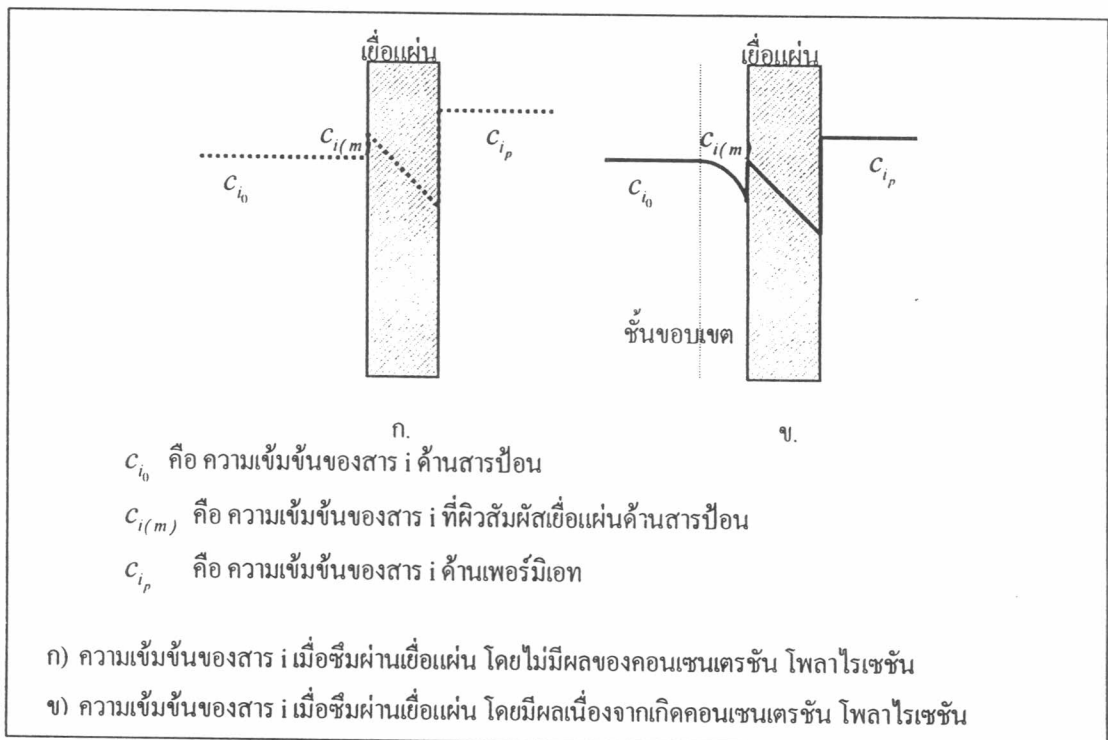


รูปที่ 2.10 ผลของความเข้มข้นของสารป้อนต่อฟลักซ์และความสามารถในการเลือก (ชมพูนุช พิภพลาภอนันต์, 2537)

เมื่อความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซึมได้ง่ายลดลง อัตราการแพร่ก็ลดลงตาม ทำให้ความเข้มข้นของสารที่ผิวด้านเพอร์มิเททของเยื่อแผ่นต่ำ ขณะที่ผิวของเยื่อแผ่นแห่ง โครงสร้างโพลิเมอร์ที่แน่นจะยอมให้องค์ประกอบที่มีความเข้ากันไม่ดีซึมผ่านได้ยาก ความสามารถในการเลือกของเยื่อแผ่นสูงขึ้น

2.6.4 อัตราการไหลของสารป้อน

อัตราการไหลของสารป้อนเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับประสิทธิภาพของกระบวนการเพอร์เวพรेशनเนื่องจากการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นของสารอินทรีย์ที่สามารถละลายและแพร่ในน้ำได้น้อย จะเกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน (concentration polarization) ทำให้เกิดเป็นชั้นขอบเขตความเข้มข้น (concentration boundary) คล้ายชั้นฟิล์มบาง ๆ ที่บริเวณใกล้ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่น ความเข้มข้นของสารป้อนในบริเวณชั้นขอบเขตเปลี่ยนแปลงไป โดยความเข้มข้นขององค์ประกอบที่ถูกดูดซึมได้ง่ายนั้นจะลดลงในชั้นขอบเขต ซึ่งจะจำกัดการดูดซึมของเยื่อแผ่นให้น้อยลง ทำให้ค่าฟลักซ์ของการซึมผ่านและความสามารถในการเลือกของระบบลดลง



รูปที่ 2.11 แผนภาพการกระจายของความเข้มข้นในชั้นขอบเขตที่บริเวณผิวสัมผัสเยื่อแผ่น (Baker, 2000)

ปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาไรเซชันเกิดขึ้นได้ง่ายกับกระบวนการเพอร์เวพรेशनเนื่องจากสารป้อนมีความเข้มข้นต่ำและมีเวลาสัมผัสกับเยื่อแผ่นนานกว่ากระบวนการเยื่อแผ่นอื่น ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกระบวนการที่ใช้ลักษณะเยื่อแผ่นแบบ spiral wound อัตราเร็วของสารป้อนที่ไหลช้า ลักษณะการไหลเป็นแบบราบเรียบ (laminar flow) เกิดเป็นชั้นขอบเขตความเข้มข้นขึ้นได้ง่าย ดังรูป 2.11 แสดงการเปรียบเทียบโปรไฟล์ของความเข้มข้นที่เปลี่ยนไปเนื่องจากผลของ

คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน รูป 2.11 ก แสดงโปรไฟล์ของความเข้มข้นขององค์ประกอบ i เมื่อไม่มีผลของคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน ความเข้มข้นด้านที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นจะเท่ากับความเข้มข้นของสารป้อน และไม่เกิดชั้นขอบเขต รูป 2.11 ข แสดงโปรไฟล์ของความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ที่เปลี่ยนไปเนื่องจากผลของคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน เกิดชั้นขอบเขตที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นและความเข้มข้นจะลดต่ำกว่าความเข้มข้นของสารป้อน

การเพิ่มอัตราการไหลของสารป้อนให้มีความเร็วมากพอที่จะทำให้เกิดความปั่นป่วน หรือ เพิ่มแรงดันน้ำเป็นจังหวะ (pulsation) เพื่อลดความหนาของชั้นขอบเขต ทำให้ลดผลของปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นได้ การเพิ่มอัตราการไหลทำได้โดยการดึงรีเทนเทรตบางส่วนหรือทั้งหมดกลับมาป้อนเข้าสู่เยื่อแผ่นใหม่ (feed-bleed) Cox and Baker (1998) ทำการทดลองดังรูป 2.12 ที่มีรูปแบบของการเดินระบบแบบทีละเท เพื่อแยกโทลูอินที่ปนเปื้อนในน้ำปริมาตร 50 แกลลอน ประสิทธิภาพการแยกแต่ละครั้งเท่ากับร้อยละ 99.8 โดยใช้เวลาดำเนินการครั้งละ 90 นาที

Psaume และคณะ (1988) ทำการทดลองแยกสารละลายไตรคลอโรเอทิลีน/น้ำ ความเข้มข้นต่ำ (0.15 พีพีเอ็ม) เมื่อเพิ่มความเร็วของสารป้อนจากค่าเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Reynold Number ; Re) จาก 2 เป็น 60 พบว่าฟลักซ์ของ TCE ที่ได้เพิ่มขึ้นจาก 0.36×10^{-3} เป็น 10.1×10^{-3} กรัม/ตร.ม.-ชม. โดยที่ฟลักซ์ของน้ำคงที่ 14 กรัม/ตร.ม.-ชม.

2.6.5 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมิผลต่อทุกขั้นตอนการถ่ายเทมวลในกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน ผลของอุณหภูมิต่อเพอร์มิเอทฟลักซ์ ความสามารถในการแพร่ และความสามารถของการละลายสามารถเขียนได้ในรูปของสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation)

$$J = J_0 \exp\left(\frac{-E_P}{RT}\right) \quad (2.48)$$

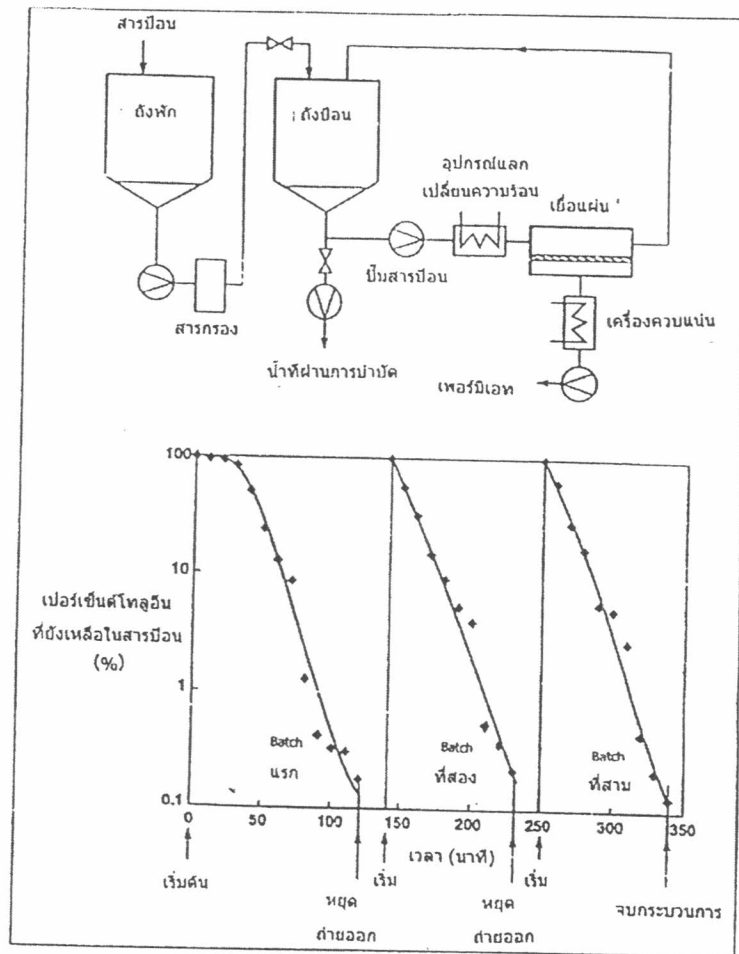
$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (2.49)$$

$$S = S_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_S}{RT}\right) \quad (2.50)$$

โดย E_P คือ พลังงานกระตุ้นของการซึมผ่าน

E_D คือ พลังงานกระตุ้นของการแพร่

ΔH_S คือ พลังงานของการละลาย



รูปที่ 2.12 แผนภาพกระบวนการแยกโพลีอิมินในน้ำเสียแบบที่ละเท และประสิทธิภาพของการแยกโพลีอิมินต่อเวลาที่ใช้เดินระบบ (Cox และ Baker, 1998)

อุณหภูมิของระบบที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ฟลักซ์รวมและฟลักซ์ของแต่ละองค์ประกอบจะเพิ่มขึ้นและความสามารถในการเลือกของเยื่อแผ่นจะลดลง เนื่องจากผลจากการพองตัวของเยื่อแผ่นโพลีเมอร์ ทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น องค์ประกอบที่ถูกดูดซึมได้ยากกว่าจะถูกดูดซึมได้มากขึ้น

2.6.6 ความดันด้านเพอร์มิเอต

ความดันรวมของไอที่สัมผัสเยื่อแผ่น เป็นผลลัพธ์จากไอของสารที่ซึมผ่านกับไอที่ถูกดึงไปยังปั๊มสุญญากาศ การเพิ่มความดันไอด้านเพอร์มิเอต จะลดแรงขับของการถ่ายเทมวล ฟลักซ์การซึมผ่านของสารลดลง ผลที่มีต่อความเข้มข้นของเพอร์มิเอตที่ควบคุมอธิบายได้ดังรูป 2.9

การใช้ปั๊มสุญญากาศที่มีกำลังมาก ความดันด้านเพอร์มิเอตจะมีค่าน้อย ทำให้เยื่อแผ่นด้านเพอร์มิเอตจะไม่มีอาการพองตัว ความสามารถในการเลือกจะสูงขึ้น แต่ค่าใช้จ่ายสำหรับปั๊ม

และพลังงานที่สูงขึ้นด้วย ในบางระบบ อาจเกิดสภาวะอิมตัวของไอขององค์ประกอบใด องค์ประกอบหนึ่งในเพอร์มิเอท องค์ประกอบนี้จะเกิดการถ่ายเทมวลได้น้อย องค์ประกอบอื่น ๆ ซึ่งที่มีแรงขับสูงจะมี ฟลักซ์สูงขึ้น ทำให้ความสามารถของการเลือกจะลดลงอย่างรวดเร็ว พฤติกรรมเช่นนี้จะเกิดกับองค์ประกอบที่ซึมผ่านโพลีเมอร์ได้ดีมากเท่านั้น

2.7 รูปแบบของลักษณะเยื่อแผ่น (Membrane Module) (ชมพูนุช พิภพลาภอนันต์, 2537)

1) แบบแผ่น (plate and frame) วัสดุที่ใช้กับลักษณะเยื่อแผ่นลักษณะนี้เป็นโพลีเมอร์ หรือวัสดุสังเคราะห์อื่น ๆ ชนิดที่สามารถขึ้นรูปเป็นแผ่นเรียบได้ การเปลี่ยนแผ่นเยื่อแผ่นและทำความสะอาดทำได้ง่าย สามารถควบคุมอัตราการไหลสูง ๆ ได้เพื่อป้องกันการเกิดปรากฏการณ์ คอนเซนเตรชันโพลาไรเซชัน การถ่ายเทความร้อนจากสารป้อนไปยังของเหลวทำได้ดี แต่พื้นที่ผิวจำเพาะ (effective area) เพื่อการถ่ายเทมวล ต่อปริมาตรของลักษณะเยื่อแผ่นต่ำ รวมทั้งค่าลงทุนและค่าดูแลรักษาสูง

2) แบบท่อ (tubular) ประกอบด้วยท่อที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในประมาณ 1-2 มม. มีชั้นรองรับที่แข็งแรงอาจจะมีเพียงท่อเดียวหรือหลายท่อบรรจุภายในภาชนะ เยื่อแผ่นอาจเคลือบด้านในหรือด้านนอกของท่อที่เป็นวัสดุรองรับ เนื่องจากท่อมี่ขนาดใหญ่ ความดันลดที่เกิดขึ้นต่ำ ทำให้สามารถใช้ท่อที่มีขนาดยาวได้ เหมาะสำหรับของเหลวที่มีความหนืดสูง สามารถปรับอัตราการไหลของสารป้อนให้เหมาะสมเพื่อลดการเกิดคอนเซนเตรชันโพลาไรเซชันได้ ค่าใช้จ่ายในการดำเนินการและการลงทุนค่อนข้างสูง เนื่องจากพื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของลักษณะเยื่อแผ่นค่อนข้างต่ำ

3) แบบม้วน (spiral wound) แผ่นเยื่อแผ่นและแผ่นรองรับที่วางซ้อนกันหลายชั้นถูกม้วนรอบท่อกลวง บรรจุภายในทรงกระบอก สารป้อนจะไหลในลักษณะเยื่อแผ่นผ่านเยื่อแผ่นแต่ละแผ่นอย่างช้า ๆ ทำให้เกิดคอนเซนเตรชันได้ง่าย พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรลักษณะเยื่อแผ่น ค่อนข้างสูง

4) แบบเส้นใยกลวง (hollow fiber) เส้นใยกลวงมีขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 100 นาโนเมตร ชั้นโพลีเมอร์ที่ไม่มีรูพรุนจะอยู่ภายนอก เส้นใยจะมัดรวมกันบรรจุอยู่ในทรงกระบอก สามารถทนต่อแรงดันสารป้อนสูง ๆ แต่อาจเกิดปัญหาอุดตันในท่อกลวงได้ สารป้อนจึงจำเป็นต้องผ่านการกรองหรือบำบัดขั้นต้นก่อน ลักษณะเยื่อแผ่นลักษณะนี้พื้นที่ถ่ายเทมวลต่อปริมาตรของโมดูลสูงมากทำให้ระบบโดยรวมมีขนาดเล็กกว่าระบบอื่น

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชมพูนุช พิภพลาภอนันต์ (2537) ทดลองแยกบิวทานอลจากสารละลายผสมบิวทานอล/น้ำ เป็นการทดลองแบบ single pass โดยเยื่อแผ่นที่ใช้เป็นท่ออย่างซิไลโคนเดี่ยว ความเข้มข้นบิวทานอลร้อยละ 0.5-4.38 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิของสารป้อน 35 - 60 องศาเซลเซียส ความดันด้านเพอร์มิเอท 20 - 50 มม.ปรอท พบว่าฟลักซ์ของบิวทานอลเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นและอุณหภูมิสูงขึ้นและความดันเพอร์มิเอทลดลง ส่วนความสามารถของการเลือกอยู่ในช่วง 20 - 60 ความเข้มข้นของบิวทานอลและอุณหภูมิมีผลต่อความสามารถของการเลือกน้อยมาก แต่จะเพิ่มขึ้นเมื่อความดันด้านเพอร์มิเอทลดลง ความหนาของเยื่อแผ่นที่ทำการทดลองอยู่ในช่วง 0.25 - 1.00 มม. ฟลักซ์ของบิวทานอลจะลดลงเมื่อความหนาของเยื่อแผ่นเพิ่มขึ้นซึ่งตรงข้ามกับความสามารถของการเลือก

ณรงค์ชัย ประภากรวิริยะ (2539) ทดลองกระบวนการเพอร์เวเพอร์ชันแยกสารละลายผสมหลายชนิดจากกระบวนการหมักทางชีวภาพ เยื่อแผ่นเป็นแบบท่ออย่างซิไลโคนต่อขนานกัน อุณหภูมิของสารป้อนอยู่ในช่วง 40 - 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ความหนาของเยื่อแผ่นที่สูงขึ้นทำให้ความสามารถของการเลือกสูงขึ้น แต่เพอร์มิเอทฟลักซ์ลดลง และจากการคำนวณค่าความสามารถของการซึมผ่านตามแบบจำลองการละลาย-การแพร่จะเพิ่มขึ้นตามมวลโมเลกุลของสารอินทรีย์ซึ่งตรงข้ามกับค่าความสามารถของการแพร่ซึ่งลดลง

Nijhuis และคณะ (1988) ทำการทดสอบเพอร์เวเพอร์ชันกับ โพลีเมอร์หลายชนิดเพื่อแยกสารละลายไตรคลอโรเอทิลีน/น้ำ และ โทลูอิน/น้ำ ความเข้มข้นเริ่มต้น 500 และ 250 พีพีเอ็ม ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส พบว่าฟลักซ์ของไตรคลอโรเอทิลีน เท่ากับ 22 กรัม/ตร.ม-ชม. ความสามารถในการเลือกประมาณ 6000 และฟลักซ์ของโทลูอิน เท่ากับ 17 กรัม/ตร.ม-ชม. ความสามารถในการเลือกประมาณ 5,000

Castillo (1993) ทดลองแยกไตรคลอโรเอทิลีนออกจากน้ำ ด้วยชุดทดลองแบบใช้อากาศเป็นตัวพาเพอร์มิเอท เยื่อแผ่นที่ใช้เป็นแบบท่อมัดทำจากวัสดุ composite polymer ระหว่างซิไลโคนเป็นเยื่อแผ่น โพลีเมอร์และ polyethersulfone เป็นวัสดุรองรับ ความหนาของชั้นเยื่อแผ่น 0.6 ไมโครเมตร พื้นที่ผิวถ่ายเทมวล 150 ตร.ชม. ทำการทดลองแยกสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนเข้มข้นเริ่มต้น 1100 พีพีเอ็ม สภาวะของการทดลองเป็นดังนี้ อุณหภูมิของสารป้อน 25 - 40 องศาเซลเซียส อัตราการป้อน 0.2 - 0.5 ลิตรต่อนาที อัตราการป้อนอากาศ 10 - 20 ลิตรต่อนาที

พบว่า ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทสูงเมื่อความเข้มข้นสูง แต่ไม่ขึ้นกับอัตราการป้อนอากาศ เมื่ออัตราการไหลของสารป้อนน้ำเสีย 0.5 ลิตรต่อนาที สามารถกำจัดไตรคลอโรเอทิลีนได้ร้อยละ 85 ภายใน 6 ชม. เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนเวียนกลับทำให้ ฟลักซ์ของเพอร์มิเอทเพิ่มขึ้น ส่วนความชื้นของอากาศ ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพมากนัก

Basu (1994) ใช้ชุดการทดลองคล้ายกับของ Castillo (1993) โดยผ่านอากาศเพื่อเป็นตัวพาและแยกไตรคลอโรเอทิลีนและไตรคลอโรอีเทน จากผลการทดลองที่สภาวะเดียวกัน พบว่าการแยกไตรคลอโรเอทิลีนให้ค่าฟลักซ์และความสามารถในการเลือกสูงกว่าไตรคลอโรอีเทน เนื่องจากสมบัติความเป็นขั้วต่ำกว่า และเมื่อทำการแยกสารผสมสามชนิด น้ำ/ไตรคลอโรเอทิลีน/ไตรคลอโรอีเทน พบว่าเมื่อความเข้มข้นของไตรคลอโรอีเทนเพิ่มขึ้น ฟลักซ์ของไตรคลอโรเอทิลีนจะลดลง แสดงให้เห็นว่าทั้งสององค์ประกอบเกิด Coupling Effect ซึ่งกันและกัน

Win (1998) ทดลองกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน โดยใช้ลักษณะเยื่อแผ่นเชิงอุตสาหกรรมแบบเส้นใยกลวง พื้นที่ผิวสูง 2.4 ตร.เมตร เพื่อแยกไตรคลอโรเอทิลีนและไตรคลอโรอีเทน จากน้ำปนเปื้อนสารอินทรีย์สังเคราะห์ที่มีลักษณะคล้ายน้ำใต้ดิน มีความเข้มข้นเริ่มต้น 1,000 ไมโครกรัมต่อลิตร (1 พีพีเอ็ม) ทำการทดลองทั้งแบบสุญญากาศและใช้อากาศเป็นสารพา (perstripping) สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองคือ อัตราการไหลของสารป้อน 5 ลิตรต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส และการไหลของอากาศเป็นแบบดูดผ่าน (negative) อัตราการไหลเท่ากับ 5 ลิตรต่อนาที สำหรับสารป้อน 5.68 ลิตร สามารถกำจัดไตร-คลอโรเอทิลีนได้ร้อยละ 90 ใช้เวลา 60 นาที มีฟลักซ์สูงสุด เท่ากับ 4.7 มก. ต่อ ตร.เมตร - ชม. และเมื่อเปรียบเทียบไตร-คลอโรเอทิลีนและไตรคลอโรอีเทน ความสามารถในการเลือกและฟลักซ์ที่ผ่านเยื่อแผ่นนั้น ไม่มีความแตกต่างกันมากนัก เพราะคุณสมบัติต่าง ๆ ของสารทั้งสองมีความคล้ายคลึงกันและความเข้มข้นของสารป้อนต่ำมาก

Wijmans และคณะ (1996) ศึกษาผลของชั้นขอบเขตความเข้มข้นที่เกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นของเพอร์เวเพอเรชันเพื่อแยกสารอินทรีย์ระเหยง่ายจากน้ำ พบว่าผลของชั้นขอบเขตทำให้เกิดปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันมากกว่ากระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นชนิดอื่น ๆ ความเข้มข้นของตัวทำละลายที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นมีประมาณร้อยละ 10 ของความเข้มข้นของสารป้อนเท่านั้น ด้วยลักษณะเยื่อแผ่นแบบ spiral wound ทำจากโพลิเมอร์ชนิด Polydimethylsiloxane (PDMS) และชนิดโพลีอิลิฟิน พบว่าการแยกด้วยโพลิเมอร์ชนิดโพลีอิลิฟินให้ค่า Enrichment Factor สูงกว่าโพลิเมอร์ชนิด PDMS ประมาณ 5 เท่า เนื่องจากโพลิเมอร์ชนิด PDMS ดูดซึมน้ำ

ได้ดีกว่า และเมื่อทำการทดลองแยกสารอินทรีย์ระเหยง่ายชนิดอะโรมาติกส์ไฮโดรคาร์บอน ที่ความดันด้านเพอร์มิเอทที่ 10-70 ทอร์ พบว่าไม่มีผลต่อ ฟลักซ์ของสารอินทรีย์ แต่ทำให้ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในเพอร์มิเอทสูงขึ้น เนื่องจากฟลักซ์ของน้ำที่ซึมผ่านเยื่อแผ่นได้ลดลง

Baker และคณะ (1997) ทำการทดลองเพอร์เวเพอเรชันแยกสารอินทรีย์ระเหยง่าย 2 ชนิด ได้แก่ โทลูอินและไตรคลอโรเอทิลีน ด้วยลักษณะเยื่อแผ่นแบบ spiral wound โดยมีผลผลิตของปรากฏการณ์คอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน และพบว่าทำให้ค่า Enrichment Factor ของระบบลดลงเหลือร้อยละ 10 - 20 จากค่า Enrichment Factor ที่ไม่ได้มีผลของคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชัน ผลการทดลองยังพบว่าความหนาของเยื่อแผ่น (3.5 - 20 ไมโครเมตร) ไม่มีผลต่อฟลักซ์ของสารอินทรีย์ที่ได้ แต่จะมีผลต่อค่า Enrichment Factor มากกว่า ส่วนค่าฟลักซ์ของไตรคลอโรเอทิลีนมากกว่าฟลักซ์ของโทลูอิน (0.047 และ 0.042 กก. ต่อ ตร.ม.- ชม. ที่ความเข้มข้นของสารละลาย 100 พีพีเอ็ม) และอัตราการเร็วของสารป้อนที่ผิวสัมผัสอยู่ในช่วง laminar ค่าฟลักซ์ของน้ำก่อนข้างที่ เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ผิวสัมผัสเยื่อแผ่นไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก แต่เมื่ออัตราเร็วของสารป้อนสูงขึ้นทำให้ค่า Enrichment Factor เพิ่มขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นทำให้ผลของคอนเซนเตรชัน โพลาริเซชันน้อยลง ฟลักซ์ของไตรคลอโรเอทิลีนจึงสูงขึ้น

Das และคณะ (1998) ทำการทดลองกระบวนการ Stripmeation เติมน้ำมันเวียนสารป้อน (feed-bleed) ใช้เยื่อแผ่นแบบเส้นใยกลวง ชนิด hydrophobic มีรูพรุนทำจากโพลีเมอร์ชนิด polypropylene และเคลือบผิวด้านนอกด้วย PDMS ภายในรูพรุนบรรจุอากาศไว้ (gas filled) เพื่อใช้แยกไตรคลอโรเอทิลีนจากน้ำที่ความเข้มข้น 200 - 1040 พีพีเอ็ม โดยเปรียบเทียบการไหลแบบในท่อ-กลวง (tube-side feed) และนอกท่อกลวง (shell-side feed) พบว่าค่าฟลักซ์ของไตรคลอโรเอทิลีนจากการทดลองแบบไหลในท่อกลวงสูงกว่าการไหลแบบนอกท่อกลวงประมาณ 3 เท่าและสูงกว่าเยื่อแผ่นแบบไม่มีรูพรุนประมาณ 1.5-6 เท่า

Schnabel และคณะ (1998) ทำการทดลองเพอร์เวเพอเรชันด้วยเยื่อแผ่นซิลิโคน 2 ลักษณะ คือแบบท่อมัดและท่อเดี่ยวพันรอบแกน โดยใช้แยกสารผสม 2 ชนิด คือ บิวทานอลและคลอโรฟอร์ม ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 - 1.0 โดยน้ำหนัก จากผลการทดลองพบว่าที่อัตราการป้อนไม่มีผลต่อฟลักซ์ของน้ำมากนัก และอัตราการไหลต่ำ ๆ เยื่อแผ่นแบบท่อเดี่ยวพันรอบแกนให้ประสิทธิภาพดีกว่า และฟลักซ์ของบิวทานอลและคลอโรฟอร์มเท่ากับ 3.8 และ 44 กรัม/ตร.ม.-ชม.

ที่สภาวะการทดลอง อุณหภูมิของสารป้อน 40 องศาเซลเซียส อัตราไหลของสารป้อน 67.7 ล./ชม. (ความเร็วของสารป้อน 0.35 ม./วินาที)

Periera และคณะ (1998) ทำการทดลองแยกสารอินทรีย์สองประเภท ได้แก่ คลอรีเนตไฮโดรคาร์บอน และอะโรมาติก ไฮโดรคาร์บอน ด้วยเยื่อแผ่นชนิด Ethene-propene terpolymer (EPDM) ทั้งแบบมีวัสดุรองรับและไม่มีวัสดุรองรับ ความหนาเฉลี่ย 5 และ 130 ไมโครเมตร ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลของสารทั้งสองประเภทเรียงลำดับจากมากไปหาน้อยดังนี้ ไตรคลอโรเอทิลีน โทลูอิน ไตรคลอโรมีเทน ไดคลอโรมีเทน อะนิลีน ฟีนอล เมื่อความเข้มข้นของสารป้อนประมาณ 1,000 พีพีเอ็ม ฟลักซ์ของไดคลอโรมีเทนที่ผ่านเยื่อแผ่นแบบมีวัสดุรองรับเท่ากับ 8 กรัม/ตร.ม.- ชม. มากกว่า ฟลักซ์ที่ได้จากเยื่อแผ่นแบบไม่มีวัสดุรองรับประมาณ 8 เท่า (1 กรัม/ตร.ม.- ชม.) และ ฟลักซ์ของน้ำที่ได้จะสูงกว่าประมาณ 3.5 เท่า (14 และ 4 กรัม/ตร.ม.- ชม. ตามลำดับ)

Dutta และ Sikdar (1999) ใช้เยื่อแผ่นชนิด copolymer S-B-S (Styrene and butadiene) แยกสารละลายไตรคลอโรอีเทน ไตรคลอโรเอทิลีน และโทลูอินในน้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ความดันด้านเพอร์มิเอท 1.0-1.4 ทอรร่ พบว่าฟลักซ์ของไตรคลอโรเอทิลีนมีค่าสูงสุด 40 กรัม/ตร.ม.- ชม. ตามด้วยโทลูอิน 25 กรัม/ตร.ม.- ชม. และไตรคลอโรอีเทน 7 กรัม/ตร.ม.- ชม. ความสามารถในการเลือกเรียงตามลำดับ ไตรคลอโรเอทิลีน/โทลูอิน/ไตรคลอโรอีเทน 6000 5000 3000 ตามลำดับ และได้ทำการศึกษาการดูดซึมของสารละลายในโพลิเมอร์พบว่าค่าการดูดซึมขึ้นกับสภาพความเป็นโมเมนต์ขั้วคู่ (dipole moment) ของสารอินทรีย์ ซึ่งโทลูอินมีค่าต่ำที่สุดมีค่าความสามารถของการละลายดีที่สุด ตามด้วย ไตรคลอโรเอทิลีนและไตรคลอโรอีเทนตามลำดับ

Freger และ คณะ (2000) เปรียบเทียบการดูดซึมแบบ Direct และ Isopiesticly ด้วยเยื่อแผ่นชนิด Sulphonated Polyethylene ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นสำหรับแยกน้ำจากสารละลายเอทานอล/น้ำ พบว่าผลของการดูดซึมแบบ Direct ให้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากกว่าค่าจากวิธี Isopiesticly เนื่องจากผลของการบวมของเยื่อแผ่นทำให้ฟลักซ์ที่ได้ต่ำกว่า และผลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าการดูดซึมและค่าความสามารถของการแพร่มีน้อยมาก

Mishima และ Nakagawa (2000) ทดลองแยกสารอินทรีย์หลายชนิดโดยโพลิเมอร์ PDMS ที่ผ่านการปรับปรุงคุณสมบัติเทคนิค graftcopolymer ด้วย fluoroalkyl methacrylates

(FALMA) พบว่าค่าความสามารถของการซึมผ่านของโพลูอินเพิ่มขึ้น และความสามารถของการละลายของสารอินทรีย์แต่ละชนิดขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ octanal/water ของสารอินทรีย์

Oh และคณะ (2001) เปรียบเทียบผลการทดลองและผลจากแบบจำลองของการดูดซึมและเพอร์มิเอทพลักซ์ของสารอินทรีย์หลายชนิดกับเยื่อแผ่นชนิด PDMS โดยใช้แบบจำลอง UNIFAC (Reid และคณะ, 1988) (Oishic และ Prausnitz, 1978) ทำนายค่าแอกติวิตีขององค์ประกอบต่าง ๆ ในเยื่อแผ่น และทำนายความสามารถของการแพร่ด้วยทฤษฎี Free Volume ซึ่งพัฒนาโดย Vrentas-Duda (Vrentas และ Vrentas, 1995) โดยใช้พารามิเตอร์ต่าง ๆ จาก Hong (1995) ในแบบจำลอง UNIFAC-FV พบว่าสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ง่ายเช่น โพลูอินและคลอโรฟอร์ม ผลที่ได้จากแบบจำลองใกล้เคียงกับผลจากการทดลอง ส่วนสารอินทรีย์ที่ระเหยได้ยากกว่า เช่น เมทานอลและ บิวทานอล มีผลที่ได้แตกต่างกัน และผลของความหนาแน่นของโพลิเมอร์ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์มีผลต่อค่าที่ได้จากแบบจำลองอย่างมาก

Oliveira และคณะ (2001) ทำการทดลองเพอร์เวเพอร์เรชันเพื่อแยกคลอโรเบนซีน ในช่วงอัตราการไหล transition regime โดยพิจารณาความคุมค่าทางเศรษฐศาสตร์ พบว่าอัตราการถ่ายเทมวลที่เกิดขึ้นในช่วงเรย์โนลด์ นัมเบอร์ (Re) ประมาณ 2800 ให้ความคุมค่าที่สุด สูงกว่าช่วงอัตราการไหล laminar และ turbulent

Urkiaga และคณะ (2002) ทำการทดลองการดูดซึมสารละลายอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ ไตรคลอโรเอทิลีน เอทิลเบนซีน และ methyl tertiary-butyl ether (MTBE) ความเข้มข้น 10-1250 มก./ล. ด้วยโพลิเมอร์หลายชนิด พบว่า PDMS มีค่าการดูดซับดีที่สุด และทำการทดลองเพอร์เวเพอร์เรชันเพื่อแยกสารละลายอินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ ไตรคลอโรเอทิลีน ไตรคลอโรอีเทน เปอร์คลอโรเอทิลีน และ MTBE ความเข้มข้นเริ่มต้น 1250 มก./ล. พบว่าผลของความดันด้านเพอร์มิเอท (0.2-1 ม.บาร์) และ อัตราการไหลของสารป้อน (0.4 -2.0 ล./นาที) มีผลต่อการแยกสารอินทรีย์ของระบบน้อยมาก