

การจำลองเชิงตัวเลขของเพอร์แวนพเพอเรนซ์สถานะไม่คงตัวของน้ำ



นาย ธีรพงศ์ ชูศรี

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

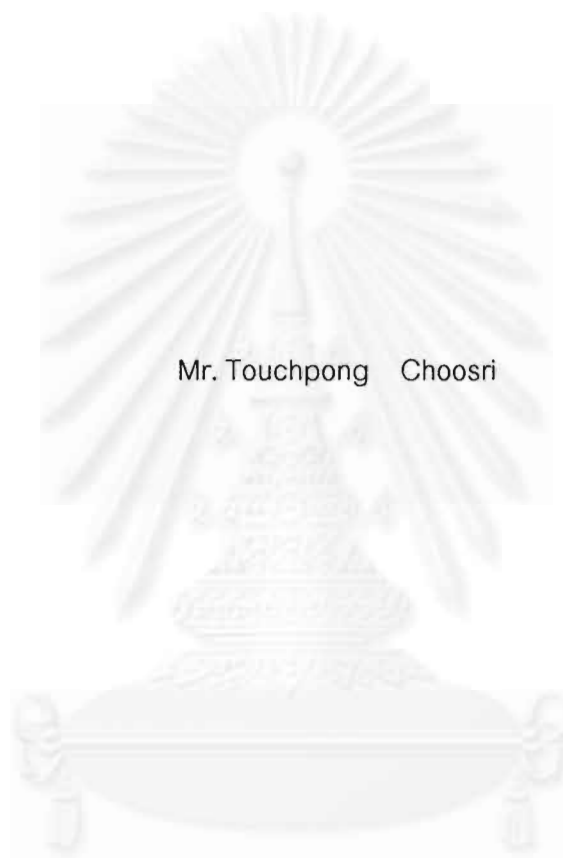
ปีการศึกษา 2542

ISBN 974-333-496-3

ลิขสิทธิ์ของ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

๕ ๑๙ ๑๖ ๔๖๐๗

NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY-STATE WATER PERVAPORATION



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 1999

ISBN 974-333-496-3

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การจำลองเชิงตัวเลขของเพอร์เวปเพอเรชันสถานะไม่คงตัวของน้ำ

โดย

นาย ธัชพงศ์ ชูศรี

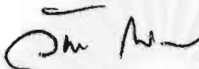
ภาควิชา

เคมีเทคนิค

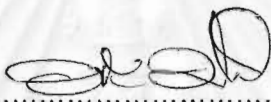
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

อาจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

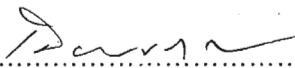

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันชัย โพธิ์พิจริต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

ชันทอง สุนทรภา
..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ชันทอง สุนทรภา)

10-1277
..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เลอสรอง เมฆสุต)


..... กรรมการ
(อาจารย์ ดร. เพ็ญพรรณ ทศคร)

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

อัครพงศ์ ชูศรี : การจำลองเชิงตัวเลขของเพอร์เวปเพอเรชันสถานะไม่คงตัวของน้ำ
(NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY-STATE WATER PERVAPORATION)
อ.ที่ปรึกษา : ดร. ชันทอง สุนทรภา, 85 หน้า. ISBN 974-333-496-3.

กลไกการถ่ายโอนมวลของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันสำหรับระบบน้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด อธิบายได้ด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ ซึ่งการแพร่ขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่น เป็นไปตามกฎของฟิกส์ การเปลี่ยนแปลงของเพอร์มิเอทเป็นขั้นตอนหนึ่งที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน เนื่องจากสารป้อนในเฟสของเหลวจะสัมผัสกับเยื่อแผ่นและด้านขาออกของเยื่อแผ่นจะถูกทำให้เป็นสุญญากาศ ทำให้เกิดเป็นชั้นของเยื่อแผ่นที่พองตัวและชั้นเยื่อแผ่นแห้งอยู่ทางด้านป้อนและด้านขาออกตามลำดับ สมประสิทธิ์การแพร่ในเยื่อแผ่นส่วนที่พองตัวขึ้นกับความเข้มข้น โดยใช้ความสัมพันธ์เชิงเอกซิโพเนนเชียลกับความเข้มข้นซึ่งพิจารณาผลจากการเกิดอันตรกิริยาระหว่างน้ำกับเยื่อแผ่น แสดงได้ดังนี้

$$D_i^I = 2.4 \times 10^{-11} \exp\left(0.58 \times \frac{c_i^I}{c_0^I}\right) \quad \text{ตร.ม./วินาที} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 25 \text{ } ^\circ\text{ซ}$$

$$D_i^I = 4.3 \times 10^{-11} \exp\left(0.6 \times \frac{c_i^I}{c_0^I}\right) \quad \text{ตร.ม./วินาที} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 40 \text{ } ^\circ\text{ซ}$$

$$D_i^I = 4.8 \times 10^{-11} \exp\left(0.61 \times \frac{c_i^I}{c_0^I}\right) \quad \text{ตร.ม./วินาที} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 50 \text{ } ^\circ\text{ซ}$$

เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงเฟสเกิดขึ้นภายในเยื่อแผ่นสมประสิทธิ์การแพร่ในส่วนเยื่อแผ่นแห้งซึ่งมีค่าคงที่เป็นดังนี้คือ $D_i^V = 4 \times 10^{-13}$, $D_i^V = 4.12 \times 10^{-13}$ และ $D_i^V = 4.13 \times 10^{-13}$ ตร.ม./วินาที ที่สภาวะอุณหภูมิดำเนินการ 25, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งมีการเปลี่ยนแปลงจากสถานะไม่คงตัว (unsteady state) จนถึงสถานะคงตัวแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ (1) ช่วงสถานะไม่คงตัว มีการเปลี่ยนแปลงของระยะชั้นเยื่อแผ่นแห้งตามเวลาสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ $y = kt^{1/2}$ (2) ช่วงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะไม่คงตัวสู่สถานะคงตัว และ (3) ช่วงสถานะคงตัวซึ่งระยะของชั้นเยื่อแผ่นแห้งมีค่าคงที่เท่ากับ 4.07×10^{-10} , 2.65×10^{-10} และ 1.17×10^{-10} เมตร ที่อุณหภูมิดำเนินการ 25, 40 และ 50 องศาเซลเซียส ตามลำดับสำหรับระบบน้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด พลังงานความร้อนเพื่อการเปลี่ยนแปลงเฟสของงานศึกษานี้ได้จากของเหลวป้อน แต่อุณหภูมิลดคร่อมเยื่อแผ่นจากการคำนวณน้อยมากจนสามารถสมมุติว่ามีค่าคงที่ แสดงว่ามีการละลายและการแพร่กระจายขององค์ประกอบในส่วนของเยื่อแผ่นที่พองตัวอย่างรวดเร็วกว่าการแพร่กระจายขององค์ประกอบในส่วนของเยื่อแผ่นแห้งจนสามารถชดเชยอุณหภูมิได้

ผลการศึกษาพบว่าเมื่อใช้เยื่อแผ่นที่อิมมิดด้วยสารป้อนในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน สามารถสมมุติได้ว่าการเปลี่ยนแปลงเฟสขึ้นที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่น แต่ถ้าใช้เยื่อแผ่นแห้งในการดำเนินกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันควรพิจารณาว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสขึ้นภายในเยื่อแผ่น

ภาควิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่อนิสิต อัครพงศ์ ชูศรี

สาขาวิชา เคมีเทคนิค

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ชันทอง สุนทรภา

ปีการศึกษา 2542

4072359323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: PERVAPORATION / SIMULATION / SOLUTION-DIFFUSION.

TOUCHPONG CHOOSRI : THESIS TITLE. NUMERICAL SIMULATION OF UNSTEADY-STATE WATER PERVAPORATION. THESIS ADVISOR : KHANTONG SOONTARAPA, Ph.D., 85 pp. ISBN 974-333-496-3.

Mass transfer in pervaporation process of water through polyacrylic acid membrane can be described by solution-diffusion mechanism. The diffusion of component through membrane follows Fick's law of diffusion. Phase change of permeate occurs in pervaporation process because liquid feed is touched with membrane on upstream side and the downstream side of membrane is under vacuum. So, the membrane is consisted of swollen part and dry path in series from upstream to downstream. Diffusion coefficient of i component in swollen part is concentration dependent. Exponential dependent diffusion coefficient is chosen to consider the interaction between permeate component and membrane as follows.

$$D_i^I = 2.4 \times 10^{-11} \exp\left(0.58 \times \frac{c_i^I}{c^0}\right) \quad \text{m}^2/\text{s} \quad \text{at } 25 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$D_i^I = 4.3 \times 10^{-11} \exp\left(0.6 \times \frac{c_i^I}{c^0}\right) \quad \text{m}^2/\text{s} \quad \text{at } 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$D_i^I = 4.8 \times 10^{-11} \exp\left(0.61 \times \frac{c_i^I}{c^0}\right) \quad \text{m}^2/\text{s} \quad \text{at } 50 \text{ } ^\circ\text{C}$$

In case of considering phase change within membrane, the diffusion coefficient in dry part is considered constant as follows, $D_i^V = 4 \times 10^{-13}$, $D_i^V = 4.12 \times 10^{-13}$ and $D_i^V = 4.13 \times 10^{-13}$ m^2/s at 25, 40 and 50 $^\circ\text{C}$, respectively. The thickness change of dry part can be divided into 3 zone that is i) changing with time following equation $y = kt^{1/2}$. in unsteady state region ii) The transition zone iii) steady state zone with constant dry layer 4.07×10^{-10} , 2.65×10^{-10} and 1.17×10^{-10} m. at 25, 40 and 50 $^\circ\text{C}$, respectively for water-polyacrylic acid system. Heat for phase change of this study is supplied from liquid feed but calculated temperature drop is very small. It is reasonable to assume isothermal condition. It is also meant that the dissolution of permeate component into membrane and diffusion through swollen part is much faster than the diffusion in dry path to compensate the temperature drop in membrane.

We can assume that the phase change is occurred on the downstream side of membrane if the equilibrated saturated membrane with feed solution is used for pervaporation. However, the phase change inside the membrane must be considered in case of using dry membrane for operation.

ภาควิชา เคมีเทคนิค
สาขาวิชา เคมีเทคนิค
ปีการศึกษา 2542

ลายมือชื่อผู้เขียน โฟงด์ ฟูริ
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ชนเขต วัฒนพาน
.....



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลืออย่างดียิ่งของอาจารย์ ดร.ชั้นทอง สุนทรภาภา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ซึ่งท่านได้ให้คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่างๆ และให้แรงกระตุ้นในการทำวิจัยมาด้วยดีตลอด และขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้ทุนอุดหนุนในการทำวิจัยบางส่วน

ขอขอบคุณ คุณชัยวัช ชูศรี พี่ชายผู้คอยให้กำลังใจและช่วยเหลือด้านการเงินตลอดมา
ขอขอบคุณ คุณวิภู นันทิธัญญธาตา ที่ให้กำลังใจตลอดการทำวิทยานิพนธ์นี้

ท้ายนี้ ผู้วิจัยใคร่ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ซึ่งสนับสนุนในด้านการเงินและให้กำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมาจนสำเร็จการศึกษา



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญรูป	ฎ
คำอธิบายสัญลักษณ์	ฐ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา	3
2 วารสารปริทรรศน์	4
2.1 แบบจำลองการละลาย-การแพร่	5
2.2 แบบจำลอง pore-flow	6
2.3 การเกิด plasticizing effect และ coupling effect	8
2.4 เกรเดียนท์ความเข้มข้นและเกรเดียนท์ความดันในเยื่อแผ่น	9
2.5 สัมประสิทธิ์การแพร่	13
2.6 ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสในกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชัน	16
2.7 อุณหภูมิและพลังงานกระตุ้นสำหรับกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชัน	18
3 แบบจำลองการถ่ายโอนมวลของกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชัน	20
3.1 สมมุติฐานสำหรับแบบจำลอง	20
3.1.1 แบบจำลองที่ 1 : เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก	20
3.1.2 แบบจำลองที่ 2 : เกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น	21
3.2 สมการพื้นฐาน	21
3.2.1 สมการการถ่ายโอนมวล	22
3.2.2 การเคลื่อนที่ของขอบเขตระหว่างเฟส	24

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
3	3.2.3 สมการการถ่ายโอนความร้อน	25
	3.2.4 ตัวแปรไร้หน่วย	26
4	การคำนวณและกระบวนการเชิงตัวเลข	28
	4.1 การคำนวณสำหรับแบบจำลองที่ 1	28
	4.2 การคำนวณสำหรับแบบจำลองที่ 2	29
5	ผลและวิจารณ์ผล	38
	5.1 วิเคราะห์ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ 1	38
	5.1.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองกับข้อมูลการทดลอง	38
	5.1.2 พลังงานกระตุ้นของการแพร่	42
	5.1.3 อุณหภูมิลดในกระบวนการเทอร์เวปเพอเรนซ์	43
	5.2 วิเคราะห์ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ 2	44
	5.2.1 เปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองกับข้อมูลการทดลอง	44
	5.2.2 ระยะของชั้นเยื่อแผ่นแห้ง	47
	5.2.3 อุณหภูมิลดในกระบวนการเทอร์เวปเพอเรนซ์	50
6	สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	51
	6.1 สรุปผลการวิจัย	51
	6.2 ข้อเสนอแนะ	52
	รายการอ้างอิง	53
	ภาคผนวก	56
	ภาคผนวก ก	57
	ภาคผนวก ข	60
	ภาคผนวก ค	62
	ภาคผนวก ง	65
	ภาคผนวก จ	68
	ภาคผนวก ฉ	71
	ภาคผนวก ช	74
	ประวัติผู้วิจัย	85

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองของกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ - พอลิอะคริลิกแอซิด ที่ 25 °ซ.	60
ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองของกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ - พอลิอะคริลิกแอซิด ที่ 40 °ซ.	60
ข.3 ข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองของกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ - พอลิอะคริลิกแอซิด ที่ 50 °ซ.	60
ค.1 ข้อมูลฟลักซ์เพอร์แวกเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิ สารป้อน 25 °ซ	62
ค.2 ข้อมูลฟลักซ์เพอร์แวกเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิ สารป้อน 40 °ซ	63
ค.3 ข้อมูลฟลักซ์เพอร์แวกเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิ สารป้อน 50 °ซ	64
ง.1 ผลการคำนวณฟลักซ์กระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์จากแบบจำลองที่ 1 และ แบบจำลองที่ 2 สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 25 °ซ	65
ง.2 ผลการคำนวณฟลักซ์กระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์จากแบบจำลองที่ 1 และ แบบจำลองที่ 2 สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 40 °ซ	66
ง.3 ผลการคำนวณฟลักซ์กระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์จากแบบจำลองที่ 1 และ แบบจำลองที่ 2 สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 50 °ซ	67
จ.1 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาสำหรับ กระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ ที่อุณหภูมิ 25 °ซ	68
จ.2 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาสำหรับ กระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ ที่อุณหภูมิ 40 °ซ	69
จ.3 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาสำหรับ กระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ ที่อุณหภูมิ 50 °ซ	70
ฉ.1 ผลการคำนวณอุณหภูมิลดสำหรับกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ ที่ อุณหภูมิมสารป้อน 25 °ซ	71
ฉ.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิลดสำหรับกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ ที่ อุณหภูมิมสารป้อน 40 °ซ	72

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ฉ.3	ผลการคำนวณอุณหภูมิสดสำหรับกระบวนการเทอร์เวปเพอเรนซ์ที่ อุณหภูมิสารป้อน 50 °ซ	73



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน	4
2.2 กลไกของการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นโดยแบบจำลองการละลาย – การแพร่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน	5
2.3 กลไกของการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นโดยแบบจำลองพอร์ – โพลี ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน	7
2.4 แรงขับในกระบวนการเพอร์มิเซชันขององค์ประกอบเดี่ยวผ่านเยื่อแผ่น (ก) ตามแบบจำลองการละลาย-การแพร่ และ(ข) แบบจำลองพอร์ - โพลี	12
2.5 แบบจำลองการเกิดขึ้นของเยื่อแผ่นแห้ง (dry layer) ที่แตกต่างกัน 3 แบบ	16
3.1 ภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นแสดงลักษณะการถ่ายโอนมวลในเยื่อแผ่น กรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในเยื่อแผ่น	22
4.1-ก แสดงขั้นตอนของโปรแกรมหลักสำหรับกระบวนการคำนวณฟลักซ์ โดยแบบจำลองที่ 1	31
4.1-ข โปรแกรมย่อย CONC1 สำหรับคำนวณความเข้มข้นขององค์ประกอบในชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัว สำหรับแบบจำลองที่ 1	32
4.1-ค โปรแกรมย่อย TEMP1 สำหรับคำนวณอุณหภูมิสำหรับแบบจำลองที่ 1	33
4.2-ก แสดงขั้นตอนของโปรแกรมหลักสำหรับกระบวนการคำนวณฟลักซ์ โดยแบบจำลองที่ 2	34
4.2-ข โปรแกรมย่อย DRYPT สำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ในส่วนชั้นเยื่อแผ่นแห้ง และความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้ง ณ เวลาเริ่มต้น	35
4.2-ค โปรแกรมย่อย CONC2 สำหรับคำนวณความเข้มข้นขององค์ประกอบในชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัวสำหรับแบบจำลองที่ 2	36
4.2-ง โปรแกรมย่อย TEMP2 สำหรับคำนวณอุณหภูมิสำหรับแบบจำลองที่ 2	37
5.1-ก เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่อุณหภูมิ 25 °ซ	39
5.1-ข เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่อุณหภูมิ 40 °ซ	40

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.1-ค	40
5.2-ก	41
5.2-ข	41
5.2-ค	42
5.3	43
5.4	44
5.5-ก	45
5.5-ข	45
5.5-ค	46
5.6	47
5.7	48
5.8	49
5.9	50

คำอธิบายสัญลักษณ์

J_i^I	ฟลักซ์ขององค์ประกอบ i ในส่วนชั้นเยื่อแผ่นพองตัว, โมล/ลบ.ม.-วินาที
J_i^V	ฟลักซ์ขององค์ประกอบ i ในส่วนชั้นเยื่อแผ่นแห้ง, โมล/ลบ.ม.-วินาที
β	ค่าคงที่แสดงอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบ i กับเยื่อแผ่น (ไม่มีหน่วย)
D_i^V	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ องค์ประกอบ i ใน เยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นแห้ง, ตร.ม./วินาที
D_i^I	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นพองตัว, ตร.ม./วินาที
D_i^0	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์, ตร.ม./วินาที
c_i^I	ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นพองตัว, โมล/ลบ.ม.
c_i^0	ความเข้มข้นอิมิตัวเริ่มต้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่น, โมล/ลบ.ม.
c_i^V	ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นแห้ง, โมล/ลบ.ม.
Δp_i	ผลต่างของความดันไอขององค์ประกอบ i ระหว่าง $x = I$ กับ $x = L$, บรรยากาศ
m_i^I	ปริมาณขององค์ประกอบ i ในเฟสของเหลวที่เคลื่อนที่เข้ามายังขอบเขตระหว่างเฟส, โมล
m_i^V	ปริมาณขององค์ประกอบ i ในเฟสไอที่เคลื่อนที่ออกจากขอบเขตระหว่างเฟส, โมล
H_i^V	ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอขององค์ประกอบ, จูลย์/โมล
H_i^I	เอนทาลปีขององค์ประกอบ i ในเฟสของเหลว (specific enthalpy), จูลย์/โมล
λ	ค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์, จูล/เมตร-วินาที-เคลวิน
y	ระยะของเยื่อแผ่นส่วนที่แห้ง, เมตร
x	ระยะในเยื่อแผ่น, เมตร
t	เวลา, วินาที
k	ค่าคงที่ในสมการของ Crank
L	ความหนาของเยื่อแผ่น, เมตร
R	ค่าคงที่ของแก๊ส (Gas constant) มีค่าเท่ากับ 8.2057×10^{-5} ลบ.ม.-บรรยากาศ/โมล-เคลวิน

คำอธิบายสัญลักษณ์ (ต่อ)

T	อุณหภูมิของเยื่อแผ่น, เคลวิน
T^L	อุณหภูมิที่ผิวทางด้านขาออกของเยื่อแผ่น, เคลวิน
T^0	อุณหภูมิที่ผิวทางด้านป้อนของเยื่อแผ่น, เคลวิน
$c_i^{(1)}$	ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเฟสของเหลวที่ขอบเขตระหว่างเฟส, โมล/ลบ.ม.
$p_i^0(T)$	ความดันไออิ่มตัว (saturated vapor pressure) ขององค์ประกอบ i ที่ขอบเขตระหว่างเฟส, บรรยากาศ
$\alpha_{i/j}$	ค่าการเลือกผ่าน (selectivity)
$\alpha_{i/j}^S$	ค่าการเลือกผ่านการละลาย
$\alpha_{i/j}^D$	ค่าการเลือกผ่านจากการแพร่
γ_i	สัมประสิทธิ์แอกติวิตีขององค์ประกอบ i
v_i	ปริมาตรเชิงโมล (molar volume) ขององค์ประกอบ i
μ_i	ศักย์เคมีขององค์ประกอบ i
μ_i^0	ศักย์เคมีขององค์ประกอบ i ซึ่งสัมพันธ์กับความดัน p_i^0
k	สัมประสิทธิ์ของ Darcy (Darcy's law coefficient)
L_i	สัมประสิทธิ์ของแรงขับของศักย์เคมีกับฟลักซ์



เพอร์เวปเพอเรชัน (pervaporation) ซึ่งเป็นเทคนิคหนึ่งของกระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่น (membrane) ได้รับความสนใจในอุตสาหกรรมเคมีเนื่องจาก เพอร์เวปเพอเรชันเป็นกระบวนการที่ใช้พลังงานและต้นทุนในการผลิตต่ำ มีต้นทุนในการก่อสร้างปานกลาง ต้องการใช้พื้นที่น้อย เป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการดำเนินการ สามารถใช้ร่วมกับเทคนิคอื่นได้เช่นใช้ร่วมกับการกลั่น และเป็นกระบวนการที่สะอาดไม่ก่อให้เกิดมลภาวะ [1] มีการนำมาใช้ในงานทางอุตสาหกรรมเคมี เช่น ในกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ (purification) กระบวนการทำให้เข้มข้น (concentration) และ กระบวนการแยกของไหลผสมออกจากกัน (fractionation of fluid mixture) เป็นต้น

กลไกการแยกสารด้วยเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน มีความซับซ้อนมาก เนื่องจากในการถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่น จะมีการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างองค์ประกอบกับเยื่อแผ่น และ ระหว่างองค์ประกอบหนึ่งกับอีกองค์ประกอบหนึ่ง [1] เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า "plasticizing effect" และ "coupling effect" ตามลำดับ ในการวิจัยและพัฒนาทางด้านเยื่อแผ่นโดยการสร้างแบบจำลอง (model) การถ่ายโอนมวลทำให้สามารถเข้าใจกลไกการถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่นได้มากขึ้น โดยในการศึกษากลไกนี้นิยมใช้แบบจำลอง 2 แบบมาเป็นพื้นฐานในการอธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน คือ แบบจำลองการละลาย-การแพร่ (solution-diffusion model) และ แบบจำลอง pore-flow (pore-flow model)

จนถึงปัจจุบันการศึกษากลไกการแยกด้วยกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันกระทำที่สถานะคงตัว [2,3,4,5,6] แต่สิ่งที่เกิดขึ้นในระหว่างสถานะไม่คงตัวมีความน่าสนใจอย่างยิ่งเพื่อให้มีความเข้าใจเพิ่มขึ้นในกลไกการถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน โดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงเฟสของสารเพอร์มิเอตเกิดขึ้นที่ใดที่หนึ่งในเยื่อแผ่นหรือเกิดขึ้นบนผิวเยื่อแผ่นด้านขาออก (downstream)

งานวิจัยนี้จะพิจารณาถึงกลไกการถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน โดยรวมผลจากการเกิด plasticizing effect สำหรับการแพร่ขององค์ประกอบเดี่ยว ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้น รวมถึงตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงและการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นของขอบเขตระหว่างเฟส เมื่อเริ่มต้นจากสถานะไม่คงตัวจนถึงสถานะคงตัว

1.1 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาปรากฏการแพร่ซึมของน้ำผ่านเยื่อแผ่นเนื้อเดียวชนิดชอบน้ำ (hydrophilic homogeneous membrane) คือ เยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิด (polyacrylic acid) ในกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชัน ตั้งแต่สถานะไม่คงตัว (unsteady-state condition) โดยใช้แบบจำลองการละลาย-การแพร่ และแก้ปัญหาแบบจำลองดังกล่าวด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยวิธีวิเคราะห์เชิงตัวเลข

1.2 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ระบบที่ศึกษาคือเพอร์แวกเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิด ที่ 25, 40 และ 50 °ซ
2. ผลการทดลองฟลักซ์เพอร์แวกเพอเรชันและผลการดูดซึมน้ำของเยื่อแผ่น นำมาจากงานวิจัยอื่น [7]
3. ใช้โปรแกรมภาษาวิซวลเบสิกในการแก้ปัญหาการคำนวณ

1.3 ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน

1. ค้นคว้าข้อมูลและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีในอดีตเพื่อกำหนดหัวข้อปัญหาสำหรับงานวิจัยต่อไป
2. กำหนดตัวแปรตั้งสมมติฐานและสร้างแบบจำลองคณิตศาสตร์
3. เขียนแผนผังสำหรับ การเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้น
4. เขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์
5. คำนวณฟลักซ์จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น
6. เปรียบเทียบค่าฟลักซ์จากการคำนวณกับผลการทดลองที่มีอยู่แล้วเพื่อ ประเมินความถูกต้องของแบบจำลอง
7. ทำซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 - 6 จนกระทั่งได้ผลการคำนวณค่าฟลักซ์ใกล้เคียงกับการทดลองที่สุด
8. สรุปตัวแปรที่เกี่ยวข้อง สมมติฐานของกลไกการแพร่ซึม และแบบจำลองคณิตศาสตร์ที่เหมาะสม

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษานี้

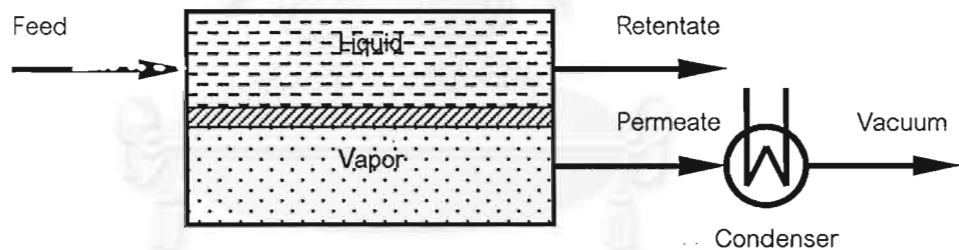
1. เข้าใจกลไกการถ่ายโอนมวลในระบบวนการ เพอร์เวปเพอเรชันขององค์ประกอบเดี่ยวได้ดีขึ้น
2. ใช้เป็นพื้นฐานสำหรับการศึกษากลไก เพอร์เวปเพอเรชัน ของระบบหลายองค์ประกอบต่อไป



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2 วารสารปริทรรศน์

เพอร์เวปเพอเรชันเป็นกระบวนการแยกของเหลวผสมที่มีหลายองค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่น ซึ่งจะผ่านเยื่อแผ่นไปได้หนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งองค์ประกอบ โดยของเหลวผสมจะป้อนเข้าทางด้าน ป้อนของเยื่อแผ่น (upstream) และองค์ประกอบที่ผ่านออกทางด้านขาออกของเยื่อแผ่น (downstream) ในรูปของไอเรียกว่าเพอร์มิเอต (permeate) ดังแสดงในรูปที่ 2.1 มีการควบคุมความดันไอ (vapor pressure) ด้านเพอร์มิเอตให้ต่ำโดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) หรือ ให้แก๊สเฉื่อยเป็นตัวพาเพอร์มิเอตออกไป ในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันจะมีการเปลี่ยนเฟส ของเพอร์มิเอต จากของเหลวไปเป็นไอเพอร์มิเอตด้วยพลังงานสำหรับการกลายเป็นไอ (heat of vaporization) ในการให้ความร้อนของการกลายเป็นไอ ได้มาจากของเหลวที่ป้อนเข้า หรือให้โดยตรงจากแหล่ง ความร้อนภายนอกกับเยื่อแผ่น การถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นทางด้านที่เป็นของเหลว (liquid phase) มีความเข้มข้นเป็นแรงขับ (driving force) ส่วนการถ่ายโอนมวลสารผ่านเยื่อแผ่นทางด้าน ที่เป็นแก๊ส (gas phase) จะเกิดขึ้นโดยการควบคุมความดันไอ ด้านเพอร์มิเอตให้ต่ำกว่าความดันย่อย (partial pressure) ของของเหลวผสม [1]

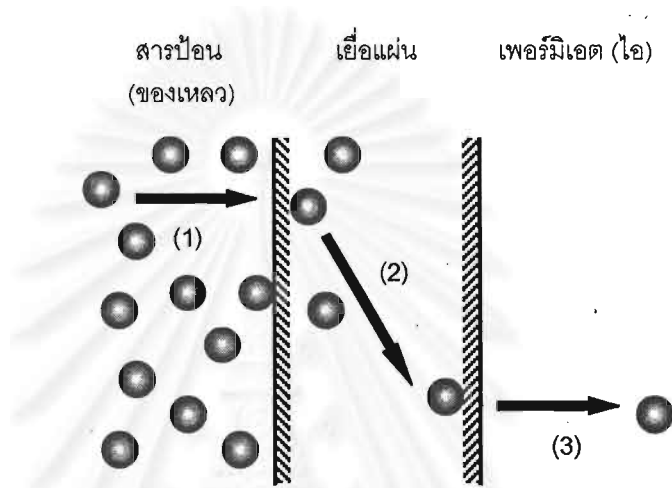


รูปที่ 2.1 แสดงกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน

จากการศึกษากระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ยังเข้าใจกลไกการแยกด้วยเยื่อแผ่นได้ไม่ดีนัก เนื่องจากความซับซ้อนของการเกิดอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบที่แพร่กับเยื่อแผ่น จึงทำให้อธิบายการถ่ายโอนมวลที่ซับซ้อนนี้ได้ยาก มีแบบจำลอง 2 แบบ ที่นิยมนำมาใช้อธิบายการถ่ายโอนมวลสำหรับกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน คือ แบบจำลองการละลาย – การแพร่ (solution-diffusion model) กับแบบจำลอง pore-flow

2.1 แบบจำลองการละลาย-การแพร่

แบบจำลองการละลาย-การแพร่ เป็นแบบจำลองที่นิยมนำมาใช้เป็นพื้นฐานในการอธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่น โดยกลไกการถ่ายโอนมวลประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ (1) องค์ประกอบจากของเหลวป้อนละลายเข้าไปยังเยื่อแผ่น (2) องค์ประกอบแพร่ภายในเยื่อแผ่น และ (3) องค์ประกอบระเหยเป็นไอออกจากเยื่อแผ่น โดยสามารถแสดงขั้นตอนการถ่ายโอนมวลในกลไกนี้ด้วยรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 กลไกของการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นโดยแบบจำลองการละลาย - การแพร่ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

จากการรวบรวมการศึกษาเอกสาร Wijmans และ Baker [8] สรุปว่าแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ซึ่งนำมาใช้อธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลของกระบวนการด้านเยื่อแผ่น เช่น กระบวนการไดอะไลซิส (dialysis) กระบวนการแยกแก๊สด้วยเยื่อแผ่น (gas separation) กระบวนการออสโมซิสย้อนกลับ (reverse osmosis) และกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชั่นมากกว่า 20 ปี ยังคงใช้อธิบายได้ดี Zhang และ Drioli [9] กล่าวถึงพื้นฐานของกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชั่นว่า ชั้นเยื่อแผ่นแน่น (dense membrane) เท่านั้นที่ส่งผลให้เกิดการแยกองค์ประกอบของสารผสม โดยการถ่ายโอนมวลอธิบายได้ด้วยแบบจำลองการละลาย-การแพร่ พลั๊กซ์การแพร่ซึมผ่านเยื่อแผ่นเป็นไปตามกฎของฟิคส์ (Fick's law) ค่าการเลือกผ่าน (selectivity) ตามกลไกการละลาย-การแพร่ ได้จากค่าการเลือกผ่านการละลาย (solubility selectivity) และค่าการเลือกผ่านในการแพร่ (diffusivity selectivity) ดังสมการที่ (1)

$$\alpha_{i/j} = \alpha_{i/j}^S \alpha_{i/j}^D \quad (1)$$

โดยค่าการเลือกผ่านการละลายแสดงได้โดยสมการที่ (2)

$$\alpha_{i/j}^S = \frac{c_i^f / c_j^f}{x_i / x_j} \quad (2)$$

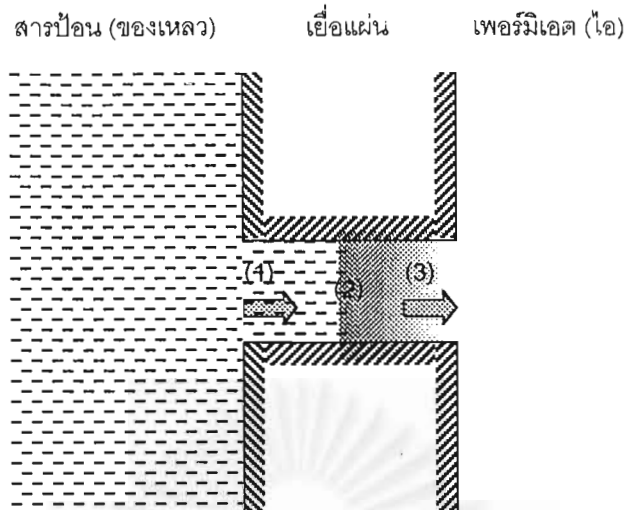
ค่าการเลือกผ่านการแพร่แสดงได้โดยสมการที่ (3)

$$\alpha_{i/j}^D = \frac{D_i}{D_j} \quad (3)$$

ในการศึกษาการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันนั้น งานวิจัยส่วนมาก [3,4,6,10,11] ใช้แบบจำลองการละลาย-การแพร่ เป็นพื้นฐานในการศึกษาซึ่งพบว่าสามารถใช้แบบจำลองการละลาย-การแพร่ อธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นได้ดี

2.2 แบบจำลอง pore-flow

Okada และคณะ [2] เสนอแบบจำลองการถ่ายโอนมวลสำหรับเพอร์เวปเพอเรชันบนพื้นฐานของกลไก pore-flow สำหรับอธิบายกลไกของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ซึ่งคิดว่ามีรูทงกระบอกตรงผ่านจากผิวด้านป้อนถึงผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่น การถ่ายโอนมวลของกลไก pore-flow ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนคือ (1) ของเหลวถ่ายโอนจากสารป้อนผ่านเข้าไปสู่ขอบเขตของเฟส (2) ของเหลวเกิดการระเหยที่ขอบเขตของเฟส (3) ไอน้ำถ่ายโอนจากขอบเขตของเฟสออกจากรูสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.3 สำหรับแบบจำลอง pore-flow จะคิดว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น การถ่ายโอนมวลรวมเกิดจากการถ่ายโอนมวลในส่วนของเหลวและไอน้ำตามลำดับ Okada และ Matsuura [5] กล่าวว่าเยื่อแผ่นสำหรับเพอร์เวปเพอเรชัน ที่อธิบายด้วยกลไก pore-flow จะมีรูแต่ไม่สามารถพบรูนั้นได้โดยตรงเนื่องจากมีขนาดเล็กมากเป็นอังสตรอม (angstrom) การศึกษาทางกายภาพทำได้ยาก



รูปที่ 2.3 กลไกของการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นโดยแบบจำลองพอร์ - โพลีเมอร์ ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน

Feng และ Huang [1] กล่าวถึงการพิจารณารู (pore) ในเยื่อแผ่นเพอร์เมอแพนตามแบบจำลองการละลายการแพร่ว่าจริงๆ แล้วเยื่อแผ่นไม่มีรู แต่การเคลื่อนไหวของสายพอลิเมอร์ (chain segment) ทำให้เกิดช่องว่าง (gap) ชั่วคราวขึ้นในโครงข่ายพอลิเมอร์ (polymer matrix) ของเยื่อแผ่น มีผลทำให้เกิดการแพร่ขององค์ประกอบจากด้านป้อนไปยังด้านขาออกของเยื่อแผ่น แต่รูในเยื่อแผ่นตามแบบจำลอง pore-flow เป็นช่องว่างจริงของโครงข่ายพอลิเมอร์ในเยื่อแผ่นซึ่งเกิดการถ่ายโอนมวล อย่างไรก็ตามรูในเยื่อแผ่นตามแบบจำลอง pore-flow และช่องว่างชั่วคราวตามแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ซึ่งมีขนาดเพียงแค่อันดับโมเลกุลสื่อความหมายถึงสิ่งเดียวกันคือ ช่องว่างเพื่อการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบแพร่ซึมผ่านเยื่อแผ่น

โดยภาพรวมความแตกต่างของ แบบจำลองทั้งสองคือ (1) โครงสร้างทางกายภาพของเยื่อแผ่นสำหรับแบบจำลอง pore-flow มีโครงสร้างที่แน่นอน คือมีรูทะลุจากด้านป้อนไปยังด้านขาออก (2) ในแบบจำลอง pore-flow มีตำแหน่งการเปลี่ยนเฟสที่แน่นอนภายในเยื่อแผ่น (3) ในแบบจำลอง pore-flow คิดความเข้มข้นขององค์ประกอบมีค่าคงที่ตลอดเยื่อแผ่น ดังนั้นจะสนใจศักย์เคมีเฉพาะส่วนของแรงขับเคลื่อนจากความดันเท่านั้น และ (4) ในแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ความดันตลอดภาคตัดขวางในเยื่อแผ่นมีค่าเท่ากันดังนั้นจะสนใจศักย์เคมีเฉพาะส่วนของแรงขับเคลื่อนจากความเข้มข้นเท่านั้น

2.3 การเกิด plasticizing effect และ coupling effect

รัตนา จิระรัตนานนท์ [12] กล่าวว่า การละลายหรือการดูดซับเป็นขั้นตอนสำคัญที่มีผลต่อการแยก การละลายโดยเยื่อแผ่นเกิดขึ้นได้เนื่องจากการเกิดอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างสารที่ต้องการแยกกับเยื่อแผ่น ทำให้สารนั้นๆ ละลาย หรือถูกละลายในเยื่อแผ่น อันตรกิริยาดังกล่าวอาจขึ้นกับปัจจัยต่างๆ เช่น ความแรงของขั้ว (dipole moment) ในโมเลกุลของสารป้อนและเยื่อแผ่นแต่ละชนิด ความสามารถในการเกิดพันธะไฮโดรเจน (H-bonds) ผลจากความเกะกะหรือการบิดบัง (steric effect) และค่าแอกติวิตี (activity) ของสารที่ต้องการแยก การละลายของสารในเยื่อแผ่นชนิดไม่ชอบน้ำ (hydrophobic membrane) อาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างโมเลกุลไม่มีขั้ว (dispersion หรือ non-polar forces เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์) สำหรับเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำ (hydrophilic membrane) นั้นการละลายอาจเกิดขึ้นเนื่องจากแรงกระทำระหว่างขั้ว (dipole-dipole interaction) หรือการเกิดพันธะไฮโดรเจน ระหว่างเยื่อแผ่นกับโมเลกุลของของเหลว สารที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับเยื่อแผ่นได้จะละลายบนเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำได้มากกว่า ในกรณีที่สามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนได้เหมือนกัน (คือ มีพันธะ H-F, H-O, H-N ในโมเลกุล) สารที่มีแรงกระทำระหว่างขั้วสูงกว่าและ/หรือมีจำนวนไฮโดรเจนที่จะเกิดพันธะไฮโดรเจนได้สูงกว่า จะละลายบนเยื่อแผ่นได้ดีกว่า นอกจากนี้แล้วโครงสร้างของโมเลกุลของเหลวที่มีผลต่อการละลายบนเยื่อแผ่นเช่นกัน สารที่มีโครงสร้างซับซ้อนและเกะกะจะละลายในเยื่อแผ่นได้น้อย เพราะว่าการเกิดอันตรกิริยา โมเลกุลของสารกับเยื่อแผ่นจะต้องเข้าใกล้กันจนได้ระยะทางที่เหมาะสมพอที่จะเกิดอันตรกิริยาได้

ในขั้นตอนการแพร่ นั้น การแพร่ของสารจะขึ้นกับขนาดและรูปร่างของโมเลกุลของสารที่แพร่ โดยส่วนใหญ่สารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำและ/หรือมีรูปร่างเล็กกว่าจะแพร่ได้เร็วกว่า นอกจากนั้นแล้วการละลายและการแพร่ของสารในเยื่อแผ่นยังมีความสัมพันธ์ต่อกันอีกด้วย โดยที่การเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวกับเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ด้วยแรงกระทำระหว่างขั้วและพันธะไฮโดรเจนจะมีความแข็งแรงของพันธะค่อนข้างสูง ซึ่งจะทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของพอลิเมอร์ (เช่นความยืดหยุ่น) เปลี่ยนแปลงไป หรือเรียกว่าเยื่อแผ่นเกิดการพองตัวซึ่งจะมีผลให้การแพร่ของสารในเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงไปด้วยเช่นกัน ในลักษณะเช่นนี้โมเลกุลของเหลวจะเปรียบเสมือนเป็น "plasticizing agent" การเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของเหลวกับเยื่อแผ่นที่ทำให้สมบัติของเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงไปจึงเรียกว่า plasticizing effect โดยปกติแล้วการเกิด plasticizing effect ทำให้เกิดการพองตัวของเยื่อแผ่นจะมีผลให้สัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในเยื่อแผ่นสูงขึ้นด้วยเหตุผลต่อไปนี้คือ (1) สารพอลิเมอร์จะเคลื่อนไหวหรือหมุนได้อย่างอิสระทำให้พลังงานกระตุ้นของการแพร่ลดลง (2) มีช่องว่างสำหรับการแพร่มากขึ้น (3) เยื่อแผ่นจะอิมมิดด้วยของเหลว การแพร่ของสารผ่านของเหลวจะเร็วกว่าการแพร่ผ่านพอลิเมอร์

ในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันของของเหลวผสม 2 องค์ประกอบ องค์ประกอบ j ที่เพิ่มเข้ามาย่อมจะมีผลกระทบต่อทั้งค่าการละลายและการแพร่ของ i ในแง่ของการละลายจะทำให้การละลายขององค์ประกอบ i ลดลง เนื่องจากองค์ประกอบ j จะไปบังและแย่งพื้นที่ในการละลายของ i ในเยื่อแผ่น ส่วนในแง่ของการแพร่จะเกิดผลใน 2 ทางคือ plasticizing effect จะทำให้สภาพการแพร่ของ i เพิ่มขึ้นถ้า j เป็นสารที่ทำให้เยื่อแผ่นพองตัว ด้วยเหตุผลที่กล่าวมาข้างต้น coupling effect ซึ่งหมายถึงการเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุล i และ j ในพอลิเมอร์โดยอาจเป็นผลให้การแพร่ของ i เพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้ ทั้งนี้การเกิด coupling จะทำให้โมเลกุลใหญ่ขึ้น โมเลกุลที่เกิด coupling จึงแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้ช้าลง แต่ในเยื่อแผ่นที่มีการพองตัวสูงจะมีช่องว่างใหญ่พอที่โมเลกุลที่เกิด coupling แพร่ผ่านไป กรณีเช่นนี้จะทำให้การแพร่ของโมเลกุล i เพิ่มขึ้น (แม้ว่าจะแพร่ได้ช้าลง แต่จะแพร่ไปในรูปของทั้งโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลที่เกิด coupling)

2.4 เกรเดียนต์ความเข้มข้นและเกรเดียนต์ความดันในเยื่อแผ่น

Wijmans และ Baker [8] ได้อธิบายกระบวนการเพอร์มิเอชันเชิงคณิตศาสตร์ในเยื่อแผ่นทุกประเภทจากพื้นฐานทางด้านเทอร์โมไดนามิกส์โดยแรงขับเคลื่อนเนื่องจาก ความดัน อุณหภูมิ ความเข้มข้น มีความสัมพันธ์กันและกัน และแรงขับเคลื่อนที่ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบแพร่ซึมผ่านเยื่อแผ่นคือเกรเดียนต์ศักย์ทางเคมี (chemical potential) ขององค์ประกอบนั้น โดยสามารถอธิบายฟลักซ์ขององค์ประกอบ i ได้ด้วยสมการ (4)

$$J_i = L_i \frac{d\mu_i}{dx} \quad (4)$$

เมื่อ	J_i	คือ ฟลักซ์ขององค์ประกอบ i
	μ_i	คือ ศักย์เคมีขององค์ประกอบ i
	L_i	คือ สัมประสิทธิ์ของแรงขับเคลื่อนของศักย์เคมีกับฟลักซ์
	x	คือ ระยะในเยื่อแผ่น

แรงขับทั่วไปทุกประเภท เช่น เกรเดียนต์ความเข้มข้น เกรเดียนต์ความดัน เกรเดียนต์อุณหภูมิ สามารถเขียนอยู่ในรูปของเกรเดียนต์ศักย์ทางเคมีได้ทั้งสิ้น และผลเกรเดียนต์นี้ต่อฟลักซ์สามารถแสดงได้ด้วยสมการที่แสดงกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับแรงขับมากกว่าหนึ่งแรงเช่น ความเข้มข้นขององค์ประกอบ และความดัน จะแสดงศักย์ทางเคมีได้เป็น

$$d\mu_i = RTd \ln(\gamma_i c_i) + v_i dp \quad (5)$$

เมื่อ	c_i	คือ ความเข้มข้นเชิงโมล (molar concentration) ขององค์ประกอบ i (โมล/โมล)
	γ_i	คือ สัมประสิทธิ์แอกติวิตีขององค์ประกอบ i
	v_i	คือ ปริมาตรเชิงโมล (molar volume) ขององค์ประกอบ i
	R	คือ ค่าคงที่ของแก๊ส
	T	คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
	p	คือ ความดัน

สำหรับเฟสของเหลว หรือเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ ซึ่งปริมาตรไม่เปลี่ยนแปลงตามความดัน (incompressible phase) อินทิเกรตสมการ (5) เทียบกับความเข้มข้นและความดันได้

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln(\gamma_i c_i) + v_i (p - p_i^0) \quad (6)$$

เมื่อ μ_i^0 คือ ศักย์เคมีขององค์ประกอบ i ซึ่งสัมพันธ์กับความดัน p_i^0

สำหรับแก๊สที่ปริมาตรไม่คงที่ (compressible gas) ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความดัน โดยใช้กฎของแก๊สอุดมคติ (ideal gas law) กับสมการที่ (5) ได้

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln(\gamma_i c_i) + RT \ln\left(\frac{p}{p_i^0}\right) \quad (7)$$

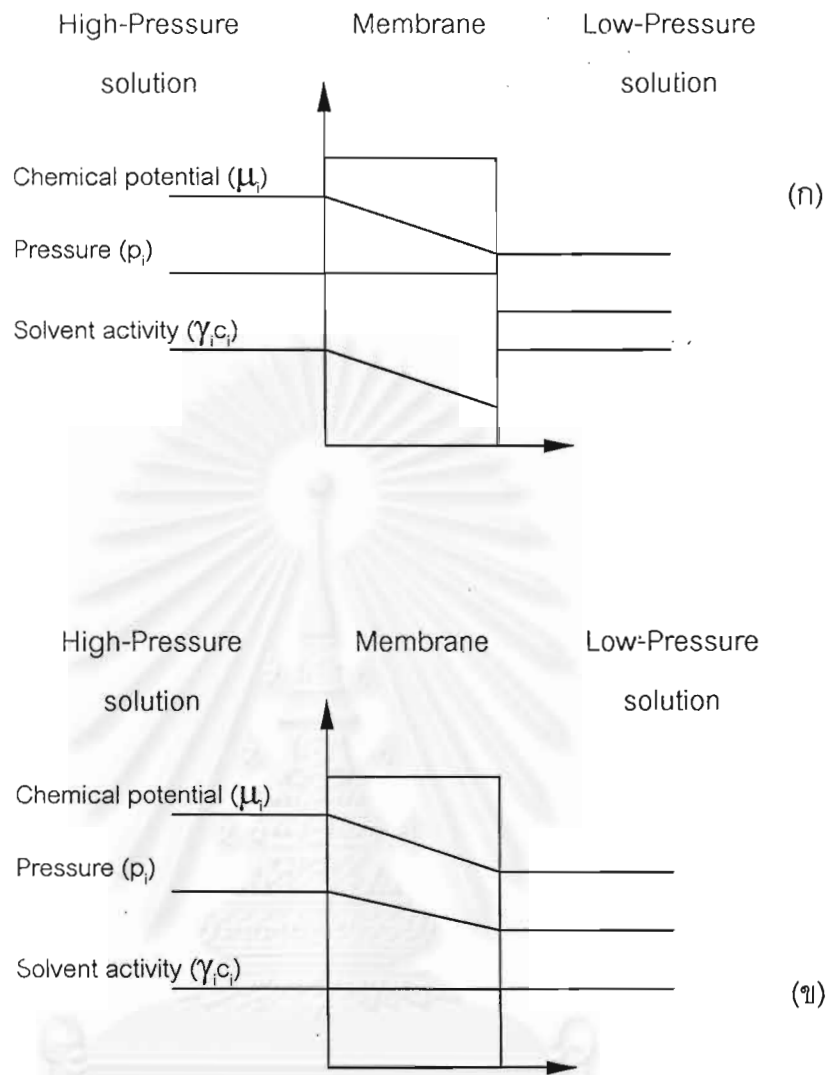
เพื่อให้ศักย์เคมีอ้างอิง μ_i^0 ในสมการ (6) และ (7) เป็นค่าเดียวกัน ความดันอ้างอิง p_i^0 ในสมการ (6) และ (7) กำหนดให้เป็นความดันไออิ่มตัวขององค์ประกอบ i , p_i^{sat} สามารถเขียนสมการ (6) และ (7) สำหรับของเหลวปริมาตรคงที่ (incompressible liquid) และเยื่อแผ่นได้ใหม่เป็นสมการ (8) และสำหรับแก๊สที่ปริมาตรไม่คงที่ (compressible gas) ได้ใหม่เป็นสมการ (9)

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln(\gamma_i c_i) + v_i (p - p_i^{\text{sat}}) \quad (8)$$

$$\mu_i = \mu_i^0 + RT \ln(\gamma_i c_i) + RT \ln\left(\frac{p}{p_i^{\text{sat}}}\right) \quad (9)$$

ต้องมีการตั้งสมมุติฐานเพื่อการจำกัดความแบบจำลองสำหรับกระบวนการเพอร์มิเอชัน สมมุติฐานแรกของการเคลื่อนที่ผ่านเยื่อแผ่นโดยปกติคือ การกำหนดให้เกิดสมดุขขององค์ประกอบที่ผิวหน้าของเยื่อแผ่นทั้ง 2 ด้าน หมายความว่า จะมีความต่อเนื่องของเกรเดียนท์ (gradient) ศักย์เคมีจากด้านหนึ่งของเยื่อแผ่นไปยังอีกด้านหนึ่งเนื่องจากอัตราเร็วของการละลาย (sorption) และ การปล่อยออก (desorption) ที่ผิวของเยื่อแผ่นทางด้านป้อน และ ด้านขาออก ตามลำดับสูงกว่าอัตราเร็วของการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นมากเกรเดียนท์ศักย์เคมีคร่อมเยื่อแผ่นตามแบบจำลองการละลาย-การแพร่ แทนได้ด้วยเกรเดียนท์ความเข้มข้น เนื่องจากสมมุติว่าความดันตลอดเยื่อแผ่นมีค่าคงที่ ส่วนเกรเดียนท์ศักย์เคมีคร่อมเยื่อแผ่นตามแบบจำลอง pore-flow แทนได้ด้วยเกรเดียนท์ความดัน เนื่องจากสมมุติฐานว่าความเข้มข้นขององค์ประกอบแพร่ผ่านเยื่อแผ่นมีค่าคงที่

จากสมมุติฐานที่กล่าวมาข้างต้นแสดงได้ด้วยรูปที่ 2.4 ซึ่งแสดงถึงแรงขับของกระบวนการเพอร์มิเอชันขององค์ประกอบเดี่ยวสำหรับแบบจำลองการละลาย - การแพร่ และ แบบจำลอง pore-flow สำหรับแบบจำลอง pore-flow นั้นความแตกต่างของความดันทำให้เกิดความดันลดอย่างต่อเนื่อง (smooth gradient) แต่แอกติวิตีขององค์ประกอบในเยื่อแผ่นมีค่าคงที่ ส่วน แบบจำลองการละลาย-การแพร่ จะสมมุติว่าความดันทุกๆ จุดในเยื่อแผ่นมีค่าคงที่เท่ากับความดันค่าสูง



รูปที่ 2.4 แรงขับในกระบวนการเพอร์มิเซชันขององค์ประกอบเดียวผ่านเยื่อแผ่น (ก) ตามแบบจำลองการละลาย-การแพร่ และ(ข) แบบจำลอง pore-flow

เมื่อพิจารณาแบบจำลอง pore-flow โดยการรวมสมการที่ (4) กับ (5) โดยไม่พิจารณาแรงขับเนื่องจากความเข้มข้น

$$J = -Lv \frac{dp}{dx} \quad (10)$$

เมื่ออินทิเกรตตลอดความหนาของเยื่อแผ่นจะได้สมการตาม Darcy's law

$$J = \frac{\kappa(p_0 - p_1)}{l} \quad (11)$$

เมื่อ κ คือ สัมประสิทธิ์ของ Darcy (Darcy's law coefficient) มีค่าเท่ากับ L_u
 l คือ ความหนาของเยื่อแผ่น

สำหรับแบบจำลองการละลาย - การแพร่ ความดันภายในเยื่อแผ่นมีค่าคงที่เท่ากับความดันสูง และ เกรเดียนท์ของศักย์เคมีคร่อมเยื่อแผ่นแสดงได้ด้วยเกรเดียนท์แอคติวิตีขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่น เมื่อรวมสมการที่ (4) กับ (5) โดยไม่พิจารณาแรงขับเคลื่อนจากความดัน

$$J_i = -\frac{RTL_i}{c_i} \frac{dc_i}{dx} \quad (12)$$

สมการนี้มีรูปแบบเหมือนกับกฎของฟิกส์ เมื่อแทนเทอม RTL_i/c_i ด้วย D_i

$$J_i = -D_i \frac{dc_i}{dx} \quad (13)$$

เมื่อ D_i คือ สัมประสิทธิ์การแพร่
 เมื่ออินทิเกรตสมการ (13) ตลอดความหนาของเยื่อแผ่นจะได้

$$J_i = D_i \frac{(c_i^u - c_i^d)}{l} \quad (14)$$

เมื่อ c_i^u, c_i^d คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นด้านของเหลวป้อนและด้านขาออกตามลำดับ

2.5 สัมประสิทธิ์การแพร่

การถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันทั้งในระบบองค์ประกอบเดี่ยวและหลายองค์ประกอบตามแบบจำลองการละลาย-การแพร่ สามารถอธิบายได้โดยกฎของฟิกส์ [1] ตามสมการที่ 13 โดยมีสัมประสิทธิ์การแพร่เป็นพารามิเตอร์สำคัญในการถ่ายโอน

มวลด Mulder และ Smolders [3] ศึกษากลไกการแยกสารผสมบิโอนของเอทานอล/น้ำ ในเยื่อแผ่น เซลลูโลสแอสเตตด้วยกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ตามแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ได้แสดงให้เห็นว่าสัมประสิทธิ์การแพร่แบบเป็นค่าคงที่อธิบายการถ่ายโอนมวลได้ไม่ดีเท่ากับการใช้สัมประสิทธิ์การแพร่แบบเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นเชิงเอกซ์โพเนนเชียล ความสำเร็จของการใช้สัมประสิทธิ์การแพร่แบบเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นเชิงเส้นตรง (linear) ในการแยกของผสมของเฮปแทน-เฮกเซน ตามที่นักวิจัยกลุ่ม Greenlaw ใช้เพราะของผสมของเฮปแทน-เฮกเซน เป็นของผสมอุดมคติ (ideal solution) [3] Tsuyumoto และคณะ [11] ได้ใช้สัมประสิทธิ์การแพร่แบบเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นเชิงเส้นตรงในการอธิบายการถ่ายโอนมวลของน้ำและเอทานอล ผ่านเยื่อแผ่น polyion complex ในกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ได้ดีเช่นกันแต่ในกรณีที่มีอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบกับเยื่อแผ่น หรือเกิดแรงกระทำระหว่างโมเลกุล (coupling effect) ต้องใช้รูปแบบความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การแพร่แบบเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นเชิงเอกซ์โพเนนเชียล (exponential concentration dependence) ดังที่นักวิจัยหลายๆกลุ่มนำไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]

การพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีได้หลายแบบตามกลุ่มนักวิจัยต่างๆ ดังนี้ Fels และ Huang [13] เสนอวิธีหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของเพอร์มิเอตในเฟสของเหลวเป็นฟังก์ชันกับความเข้มข้นของมันในเยื่อแผ่นจากข้อมูลการทดลองการคายการดูดซับ (desorption data) ของระบบที่ประกอบด้วยของเหลวอินทรีย์ (organic liquid) คือเบนซิน กับเยื่อแผ่นพอลิเอทิลีน โดยใช้พื้นฐานของทฤษฎี free volume โดยการลองผิดลองถูกหา free volume parameter ที่ทำให้ค่าจากการคำนวณใกล้เคียงค่าจากการทดลองการคายที่สุด การทราบค่า free volume parameter ทำให้เราสามารถทำนายเชิงปริมาณของผลการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างพอลิเมอร์และส่วนประกอบสารผสมต่อการถ่ายโอนมวลในเยื่อแผ่น ต่อมา Huang และ Rhim [14] เสนอแบบจำลองสำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ของเพอร์มิเอตเฟสของเหลวในเยื่อแผ่น โดยใช้พื้นฐานของทฤษฎี Fujita' free volume และพิจารณาถึงความเป็นผลึกในเยื่อแผ่น (crystallinity) ร่วมด้วย พบว่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากแบบจำลองดังกล่าวใช้ทำนายพลิกซ์ขององค์ประกอบเดียวในกระบวนการเพอร์แวกเพอเรนซ์ได้ดีพอใช้ Yeom และ Huang [4] เสนอวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และ free volume parameter จากผลการทดลองเพอร์แวกเพอเรนซ์ขององค์ประกอบเดียว (single component) ที่สถานะคงตัว โดยใช้ทฤษฎี Fujita's free volume และ Flory-Huggins thermodynamic เป็นพื้นฐานในการศึกษาและได้ทดสอบความถูกต้องเหมาะสมของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่และ free volume parameter ที่คำนวณได้โดยการเปรียบเทียบค่าความสามารถในการแพร่ซึม (permeability) จากการคำนวณของแต่ละองค์ประกอบในเยื่อแผ่นกับผลการทดลอง พบว่าให้ผลลัพธ์ที่ดี

Doong และคณะ [6] เสนอการใช้แบบจำลองความสามารถในการละลาย และความสามารถในการแพร่ บนพื้นฐานของกลไกการละลาย-การแพร่ เพื่อหาฟลักซ์และค่าการเลือกผ่านจากกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันโดยแบบจำลองการละลายพัฒนามาจาก free energy ในระบบของผสมขององค์ประกอบแพร่ซึ่มกับพอลิเมอร์ ส่วนแบบจำลองการแพร่พัฒนามาจากพื้นฐานของทฤษฎี free-volume และ molecular model รวมเรียกว่า “hybrid model”

Mohammad และ Taghi [15] พัฒนาแบบจำลองการละลาย-การแพร่ ให้สามารถทำนายฟลักซ์ของเอทานอลจากของผสมใกล้จุดอะซีโอโทรป (azeotrope) ให้ใกล้เคียงถูกต้องยิ่งขึ้นกว่าแบบจำลองการละลายการแพร่ตามแบบดั้งเดิม โดยรวมพิจารณาผลของ coupling effect ต่อสัมประสิทธิ์การแพร่ Ren และ Jiang [16,17] วิเคราะห์ coupling effect ต่อการพองตัว (swelling process) ของเยื่อแผ่นพบว่า การเปลี่ยนแปลงของค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของแต่ละองค์ประกอบในเยื่อแผ่นเกิดขึ้นเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างแต่ละองค์ประกอบกับเมทริกซ์ของเยื่อแผ่น และเนื่องจาก coupling effect ระหว่างองค์ประกอบในเยื่อแผ่น โดยการเบี่ยงเบนของค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของแต่ละองค์ประกอบในเยื่อแผ่นจากค่า ณ สถานะอ้างอิง (reference state) สะท้อนถึงอิทธิพลของ coupling effect ต่อการพองตัวโดยได้ศึกษากับระบบที่ประกอบด้วยสารละลายเอทานอลและเยื่อแผ่นไคโตแซน ได้ผลว่าอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบน้ำกับเยื่อแผ่นมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของน้ำในเยื่อแผ่น และ coupling effect ระหว่างน้ำกับเอทานอลภายในเยื่อแผ่นมีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของน้ำเพียงเล็กน้อย แต่มีอิทธิพลต่อค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตีของเอทานอลอย่างมากเนื่องจากมีปริมาณน้ำจำนวนมากอยู่ในเยื่อแผ่น

Mulder และ Smolders [3] ทำการศึกษาสัมประสิทธิ์การแพร่ 2 แบบ คือ 1) สัมประสิทธิ์การแพร่คงที่ 2) สัมประสิทธิ์การแพร่แบบเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นเชิงเอกซ์โพเนนเชียล พบว่าในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันของน้ำกับเอทานอล สัมประสิทธิ์การแพร่จะขึ้นกับความเข้มข้น Brun และคณะ [10] เสนอค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จากแบบจำลอง “Exponential six – coefficients model” ดังสมการที่ (15) และ (16) โดยมีสมมุติฐานว่าสัมประสิทธิ์การแพร่มีความสัมพันธ์เป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลกับความเข้มข้น สามารถอธิบายการแยกของผสมสองชนิด (binary mixture) ผ่านเยื่อแผ่นที่บวมปานกลาง (moderately swelling membrane) ในสถานะคงตัวด้วยกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน

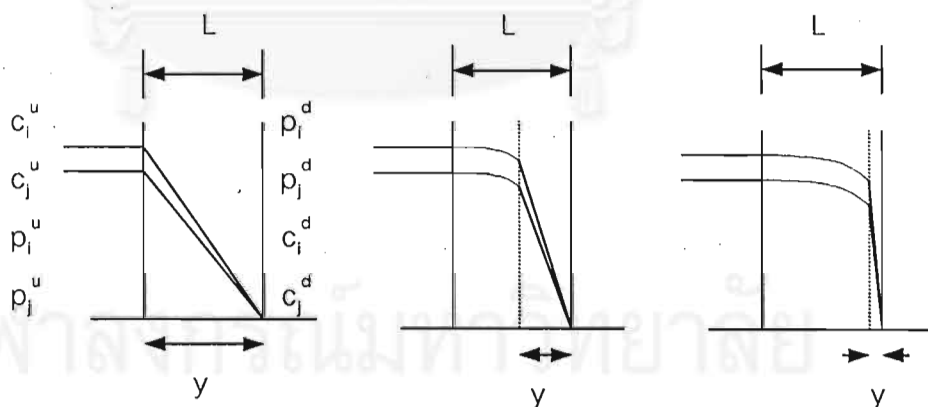
$$D_i = D_i^0 \exp(\beta_{ip}c_i + \beta_{ij}c_j) \quad (15)$$

$$D_j = D_j^0 \exp(\beta_{ji}c_i + \beta_{jp}c_j) \quad (16)$$

เมื่อ β_{ij}, β_{ji} เป็นค่าคงที่แสดงอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบ i กับ j และ β_{ip}, β_{jp} เป็นค่าคงที่แสดงอันตรกิริยาขององค์ประกอบกับพอลิเมอร์ (p) สำหรับองค์ประกอบ i และ j ตามลำดับ

2.6 ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน

Zhang และ Drioli [9] และ Nakagawa [18] กล่าวว่า การถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันตามพื้นฐานของกลไกการละลาย-การแพร่ มีแรงขับเป็นเกรเดียนท์ของความเข้มข้นขององค์ประกอบคร่อมเยื่อแผ่น แต่เนื่องจากสมบัติที่แตกต่างกันขององค์ประกอบแพร่ซึมกับเยื่อแผ่นทำให้เกิดชั้นของเยื่อแผ่นแห้ง (dry layer) อยู่ทางด้านขาออกเป็นเฟสแก๊ส และชั้นของเยื่อแผ่นมีการพองตัว (swell) อยู่ทางด้านขาเข้าเนื่องจากการละลายขององค์ประกอบจากของเหลวป้อนเข้าสู่เยื่อแผ่นทางด้านป้อนทำให้เกิดเป็นเฟสของเหลว แยกออกได้เป็น 3 กรณีคือ กรณีแรกเยื่อแผ่นมีการพองตัวน้อย (มีชั้นที่มีการพองตัวบางกว่าชั้นที่แห้งมาก) กรณีที่สองเยื่อแผ่นมีการพองตัวปานกลาง (ชั้นที่มีการพองตัวและชั้นที่แห้งไม่หนาหรือบางกว่ากันมาก) กรณีที่สามเยื่อแผ่นมีการพองตัวมาก (ชั้นที่มีการพองตัวมีความหนามากกว่าชั้นที่แห้งมาก) แสดงได้ดังรูปที่ 2.5 ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าอยู่ที่ใดที่หนึ่งในเยื่อแผ่น ที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านป้อนหรือที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก งานวิจัยโดยมากมักจะคิดว่าตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสอยู่ที่บริเวณผิวของเยื่อแผ่นทางด้านขาออก [3,4,6,10,15]



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการเกิดขึ้นของเยื่อแผ่นแห้ง (dry layer) ที่แตกต่างกัน 3 แบบ

พลักร์ของแต่ละองค์ประกอบเป็นสัดส่วนกับเกรเดียนท์ความเข้มข้นและค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นเยื่อแผ่นเนื้อแน่น อย่างไรก็ตามโพรไฟล์ของความเข้มข้น (concentration profile) ภายในเยื่อแผ่นมักไม่เป็นเส้นตรงเนื่องจากเยื่อแผ่นมีการบวมอันเป็นผลมาจากการดูดซับของเหลวไว้และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นเยื่อแผ่นที่มีการพองตัวเต็มที่มีค่าเป็น 10 - 100 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของชั้นเยื่อแผ่นแห้ง [19] Wijmans และ Baker [20] เสนอแบบจำลองที่ใช้อธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันในสถานะคงตัว ซึ่งสร้างจากพื้นฐานของกลไกการละลาย-การแพร่ โดยคิดว่าเยื่อแผ่นเป็นเยื่อแผ่นแห้งตลอดทั้งแผ่น แรงขับเกิดจากผลต่างของความดันไอแทนความเข้มข้น และมีกลไกการถ่ายโอนมวลเกิดขึ้นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน 2 ขั้นตอนคือ (1) ของเหลวด้านป้อนระเหยเป็นไออิ่มตัวที่ด้านป้อนของเยื่อแผ่น และ (2) เกิดการถ่ายโอนมวลของไอด้านเยื่อแผ่น

Ito และคณะ [21] เสนอแบบจำลอง "swollen - dry - layer model" สำหรับอธิบายกลไกของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันของระบบน้ำกับเอทานอล ผ่านเยื่อแผ่นชนิดชอบน้ำพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ และ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ในการทดลองได้ทำการหาสัดส่วนของระยะของส่วนที่พองตัวกับส่วนที่แห้งโดยใช้วิธีย้อมสี (staining method) โดยการทดลองเพอร์เวปเพอเรชันเริ่มจากการใช้เยื่อแผ่นแห้ง แบบจำลองดังกล่าวคิดว่าเยื่อแผ่นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันเกิดเป็นชั้นของเยื่อแผ่นที่พองตัวและเยื่อแผ่นที่แห้งต่อกัน โดยเยื่อแผ่นที่พองตัวจะสัมผัสกับของเหลวทางด้านป้อนของเยื่อแผ่น โดยมีกลไกการถ่ายโอนมวล 4 ขั้นตอนคือ (1) ของเหลวป้อนละลายเข้าไปในเยื่อแผ่น (2) องค์ประกอบเคลื่อนที่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัว (3) เกิดการระเหยที่ขอบเขตระหว่างเฟสภายในเยื่อแผ่น และ (4) องค์ประกอบในรูปของไอแพร่ผ่านชั้นเยื่อแผ่นที่แห้ง Shieh และ Huang [22] ได้เสนอแบบจำลอง Pseudo - phase change solution - diffusion (PPCSD) model สำหรับอธิบายกลไกของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันขององค์ประกอบเดี่ยวในสถานะคงตัว โดยคิดว่าการถ่ายโอนมวลในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันประกอบด้วยกลไกการแพร่ผ่านเยื่อแผ่นในเฟสของเหลวและเฟสไอติดต่อกันในเยื่อแผ่น กล่าวคือมีการเปลี่ยนเฟสขึ้นภายในเยื่อแผ่น ความดันลดในเฟสของเหลวของเยื่อแผ่นลดลงเป็นเส้นตรงตามกลไกการแพร่ซึมของของเหลว ส่วนความดันลดในเฟสไอลดลงเป็นเส้นโค้งตามกลไกการแพร่ซึมของไอ ในกรณีเมื่อความดันด้านป้อนเท่ากับความดันบรรยากาศ และความดันด้านเพอร์มิเอตประมาณ 0 กลไกการแพร่ซึมเกือบตลอดภาคตัดขวางเป็นไปตามกลไกการแพร่ซึมของไอ และมีพลักร์เกือบเท่ากับพลักร์ที่ได้จากกระบวนการแพร่ซึมไอ (vapor permeation process) ที่ค่าแรงขับเดียวกัน และได้ขยายใช้แบบจำลองกับการเพอร์เวปเพอเรชันของของผสม 2 ชนิด [23] โดยได้ทดสอบแบบจำลองกับของผสมเฮกเซน-เฮปเทนผ่านเยื่อแผ่นพอลิเอทิลีน โดยพิจารณาผลของ plasticizing และ

coupling effect ร่วมด้วย ให้ผลพลักซ์และค่าการเลือกผ่านซึ่งคำนวณจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลการทดลองที่ดี

2.7 อุณหภูมิและพลังงานกระตุ้นสำหรับกระบวนการเพอร์เวปเพอร์เรชัน

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงเฟสขององค์ประกอบจากของเหลวเป็นไอในกระบวนการเพอร์เวปเพอร์เรชัน จึงต้องมีการให้พลังงานสำหรับการเปลี่ยนแปลงและป้องกันการเกิดอุณหภูมิต่ำที่อาจเกิดขึ้น [1] แต่งานวิจัยส่วนมากจะมีการตั้งสมมุติฐานขึ้นว่าในขั้นตอนการถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นนั้นเป็นกระบวนการที่เกิดที่อุณหภูมิคงที่ (isothermal process) [3,6,10]

Ito และคณะ [24] ศึกษาการถ่ายโอนความร้อนในกระบวนการเพอร์เวปเพอร์เรชันของระบบ น้ำ-เอทานอล และ น้ำ-แอมโมเนีย ผ่านไมโครทิวบ์ microtube ของยางซิลิโคน เพื่อดูถึงศักยภาพของการนำไปใช้เป็นหน่วยแลกเปลี่ยนความร้อน โดยดำเนินการวัดอุณหภูมิต่อของสารผสมป้อน เป็นฟังก์ชันกับอัตราการไหลของสารป้อน ความเข้มข้นของสารป้อน และความดันด้านเพอร์มิเอตแบบจำลองเพื่อการคำนวณการถ่ายโอนมวล และการถ่ายโอนความร้อนจากแรงขับของความดันได้ถูกเสนอขึ้นและได้ทดสอบเทียบกับผลการทดลอง

Doong และคณะ [6] และ Chang และคณะ [25] เสนอว่าผลกระทบของอุณหภูมิต่อพลักซ์ ซึ่งประกอบด้วยพลักซ์รวมและพลักซ์ของแต่ละองค์ประกอบเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และเมื่อนำค่าพลักซ์ไปพล็อต (plot) กับ $1/T$ ตามความสัมพันธ์ของ อาร์เรเนียส (Arrhenius type) จะได้ค่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการเพอร์มิเอชันดังสมการที่ (17)

$$J = J_0 \exp\left(\frac{-E_f}{RT}\right) \quad (17)$$

เมื่อ E_f คือ พลังงานกระตุ้นสำหรับกระบวนการเพอร์มิเอชัน พบว่าพลังงานกระตุ้นของกระบวนการเพอร์มิเอชันเพิ่มขึ้นตามขนาดของโมเลกุล และพบว่าค่าการเลือกจะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น แต่ Feng และ Huang [1] กล่าวว่าความสัมพันธ์ที่เสนอในสมการที่ (17) ยังใช้อธิบายกระบวนการเพอร์มิเอชันได้ไม่ดีนัก โดยเมื่อศึกษาจากพื้นฐานของแบบจำลองการละลาย-การแพร่สามารถแสดงพลักซ์ได้เช่นเดียวกับกระบวนการแพร่ซึมแก๊ส (gas permeation) ดังสมการ

$$J_i = \frac{P_i}{l} (p_i^u - p_i^d) \quad (18)$$

เมื่อ p_i^a , p_i^d คือ ความดันไอย่อยขององค์ประกอบ i ในของเหลวป้อนและไอเพอร์มิเอทตามลำดับ และ P_i คือ ค่าสัมประสิทธิ์ความสามารถการส่งผ่าน (permeability coefficient) ตามแรงขับเคลื่อนในรูปของความดันไอย่อย และมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การละลาย และสัมประสิทธิ์การแพร่ดังนี้

$$P = DS \quad (19)$$

เมื่อสัมประสิทธิ์การละลายและสัมประสิทธิ์การแพร่โดยปกติขึ้นอยู่กับอุณหภูมิดังนี้

$$S = S_0 \exp\left(\frac{-\Delta H_s}{RT}\right) \quad (20)$$

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (21)$$

ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ความสามารถการส่งผ่านกับอุณหภูมิสามารถแสดงได้ดังนี้

$$P = P_0 \left(\frac{-E_p}{RT}\right) \quad (22)$$

เมื่อ E_D คือ พลังงานกระตุ้นของการแพร่ ΔH_s คือ ค่าความร้อนในการละลาย และ E_p คือ พลังงานกระตุ้นของการส่งผ่านซึ่งเป็นผลรวมของค่าพลังงานกระตุ้นของการแพร่กับค่าความร้อนในการละลาย รัตนา จิระรัตนานนท์ [12] กล่าวว่าอุณหภูมิมีผลต่อการเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ และทำให้ plasticizing effect มีอิทธิพลเพิ่มขึ้น ทำให้เยื่อแผ่นเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นเนื่องจากเยื่อแผ่นสามารถดูดซับสารที่ต้องการแยกได้เพิ่มขึ้นทำให้สารแพร่ผ่านเยื่อแผ่นได้เร็วขึ้นแต่การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ความสามารถในการเลือกละลายขององค์ประกอบจากสารป้อนมีค่าลดลง Ren และ Jiang [16,17] กล่าวว่าอุณหภูมิของสารป้อนมีผลมากต่อการแพร่ขององค์ประกอบในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ผลการศึกษาการเพอร์เวปเพอเรชันของน้ำ-เอทานอล ผ่านเยื่อแผ่นไคโตแซน (chitosan membrane) แบบที่มีการเชื่อมขวาง (crosslink) และแบบที่ไม่มีการเชื่อมขวาง พลิกซ์ของน้ำและเอทานอลจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารป้อนเนื่องจากอัตราการแพร่ขึ้นกับอุณหภูมิ แต่อุณหภูมิมีผลต่อการพองตัวของเยื่อแผ่นและค่าการเลือกผ่านของเยื่อแผ่นน้อยมาก

บทที่ 3

แบบจำลองการถ่ายโอนมวลของกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชัน

งานวิทยานิพนธ์นี้เป็นการศึกษาการถ่ายโอนมวลของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิคแอซิด ซึ่งเป็นเยื่อแผ่นเนื้อแน่นชนิดชอบน้ำในกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชัน แบบจำลองที่จะพัฒนาขึ้น เป็นไปตามกลไกการละลาย-การแพร่ สำหรับการแพร่ขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่นอธิบายด้วยสัมประสิทธิ์การแพร่ซึ่งเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลกับความเข้มข้นเพื่อคำนึงถึงผลของอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบแพร่ซึมกับ เยื่อแผ่นผลการคำนวณพลั๊กซ์จากแบบจำลองที่พัฒนาขึ้น ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลพลั๊กซ์จากการทดลองของงานวิจัยอื่น [7] (ซึ่งดำเนินกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันจากเยื่อแผ่นที่ได้ถูกทำให้อิ่มตัวสมดุลด้วยน้ำ) เพื่อทดสอบการใช้งานได้ของแบบจำลอง

เนื่องจากตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสในกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันยังไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าอยู่ที่ใด โดยมีงานวิจัยส่วนมากเสนอว่าการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่น [3,4,5,6,10,15] และงานวิจัยอีกส่วนหนึ่งเสนอว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสขึ้นในเยื่อแผ่น [21,22,23] ดังนั้นในการศึกษากลไกเพอร์แวกเปอเรชันจึงมีการสร้างแบบจำลองขึ้นสองแบบ คือแบบจำลองแรกคิดว่าการเปลี่ยนเฟสเกิดขึ้นที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่น และแบบจำลองที่สองคิดว่าเกิดการเปลี่ยนเฟสขึ้นในเยื่อแผ่น โดยมีสมมุติฐานที่ใช้เป็นพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ดังนี้

3.1 ข้อสมมุติสำหรับแบบจำลอง

3.1.1 แบบจำลองที่ 1 : เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก

- (1) การแพร่ผ่านขององค์ประกอบ i ผ่านเยื่อแผ่นเป็นไปตามกลไก การละลาย - การแพร่
- (2) คุณสมบัติคงที่ตลอดเยื่อแผ่น และเท่ากับคุณสมบัติสารป้อน
- (3) เกิดสมดุลการดูดซับ (sorption) และการปล่อยออก (desorption) ที่ผิวของเยื่อแผ่นทางด้านสารป้อนตลอดเวลา
- (4) ความดันและความเข้มข้นทางด้านเพอร์มิเอตเป็น 0
- (5) การถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นขึ้นอยู่กับการแพร่โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นที่เกิดการพองตัวแสดงได้ด้วยสมการที่ (3.1)

$$D_i^1 = D_i^0 \exp\left(\beta \frac{c_i^1}{c^0}\right) \quad (3.1)$$

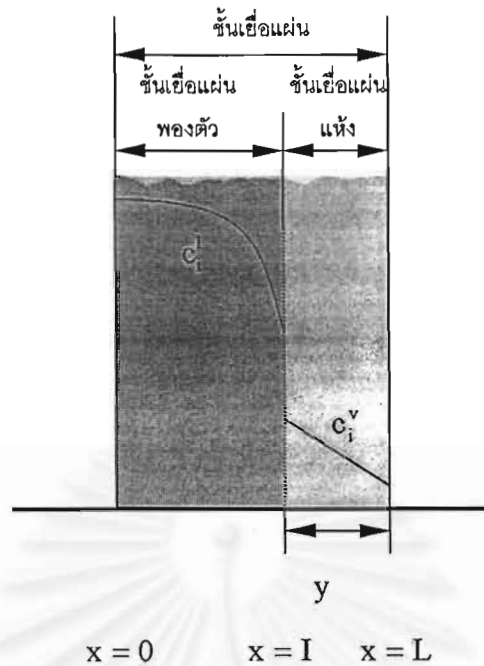
- เมื่อ D_i^1 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นของชั้นเยื่อแผ่นพองตัว, ตร.ม./วินาที
- D_i^0 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์, ตร.ม./วินาที
- c_i^1 คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นพองตัว, โมล/ลบ.ม.
- c_i^0 คือ ความเข้มข้นอิมิตัวเริ่มต้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่น, โมล/ลบ.ม.
- β คือ ค่าคงที่แสดงอันตรกิริยาระหว่างองค์ประกอบ i กับเยื่อแผ่น (ไม่มีหน่วย)

3.1.2 แบบจำลองที่ 2 : เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในเยื่อแผ่น

- (1) การแพร่ผ่านขององค์ประกอบ i ผ่านเยื่อแผ่นเป็นไปตามกลไก การละลาย - การแพร่
- (2) อุณหภูมิคงที่ตลอด เยื่อแผ่น และเท่ากับอุณหภูมิสารป้อน
- (3) เกิดสมดุลการดูดซับ และการปล่อยออกที่ผิวของเยื่อแผ่นทางด้านสารป้อนตลอดเวลา
- (4) ความดันและความเข้มข้นทางด้านเพอร์มิเอตเป็น 0
- (5) มีการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบ i จากของเหลวเป็นไอที่ขอบเขตระหว่างเฟสในเยื่อแผ่น
- (6) การถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบ i ขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่โดยที่
 - (6.1) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นพองตัว แสดงได้ด้วยสมการที่ (3.1)
 - (6.2) ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของ องค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นแห้งเป็น ค่าคงที่แสดงด้วยพารามิเตอร์, D_i^y

3.2 สมการพื้นฐาน (Basic equation)

การถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบผ่านเยื่อแผ่นมีขอบเขตอยู่ระหว่าง 0 ถึง L เมื่อ L คือ ความหนาของเยื่อแผ่นที่ใช้ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นส่วนที่พองตัวแสดงด้วย c_i^1 สำหรับกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นส่วนที่พองตัวมีขอบเขตอยู่ระหว่าง $x = 0$ ถึง $x = L$ ส่วนกรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงภายในเยื่อแผ่น องค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นส่วนที่พองตัวจะมีขอบเขตอยู่ระหว่าง $x = 0$ ถึง $x = I$ เมื่อ I คือ ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนแปลง และความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเยื่อแผ่นส่วนที่แห้งแสดงด้วย c_i^y จะมีขอบเขตอยู่ระหว่าง $x = I$ ถึง $x = L$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางของเยื่อแผ่นแสดงลักษณะการถ่ายโอนมวลในเยื่อแผ่น กรณีที่เกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสภายในเยื่อแผ่น

3.2.1 สมการการถ่ายโอนมวล (Mass transfer equation)

อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ขององค์ประกอบ i ผ่านหนึ่งหน่วยพื้นที่ของตัวกลางหนึ่ง เป็นสัดส่วนกับเกรเดียนต์ความเข้มข้นในแนวตั้งฉากกับภาคตัดขวางนั้นตามกฎข้อหนึ่งของฟิกส์ (Fick's first law of diffusion) ดังสมการที่ (3.2) และสมการดิฟเฟอเรนเชียลพื้นฐานของการแพร่กระจายในตัวกลางหนึ่งได้จากการอนุพันธ์สมการ (3.2) เป็นสมการที่ (3.3) ตามกฎข้อสองของฟิกส์ (Fick's second law of diffusion)

$$J_i^1 = -D_i^1 \frac{\partial c_i^1}{\partial x} \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial c_i^1}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_i^1 \frac{\partial c_i^1}{\partial x} \right) \quad (3.3)$$

เมื่อ	J_i^1	คือ ฟลักซ์ของเยื่อแผ่นในส่วนชั้นเยื่อแผ่นช่องตัว, โมล/ลบ.ม.-วินาที
	c_i^1	คือ ความเข้มข้นในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นช่องตัว, โมล/ลบ.ม.
	x	คือ ระยะในเยื่อแผ่น, เมตร
	t	คือ เวลา, วินาที

โดยมี สภาวะขอบเขต (boundary conditions) คือ

แบบจำลองที่ 1 : เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก

$$\text{ที่ } t = 0 \quad c_i^l = c^0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.3.ก)$$

$$t > 0 \quad c_i^l = c^0 \quad x = 0 \quad (3.3.ข)$$

$$c_i^l = 0 \quad x = L \quad (3.3.ค)$$

แบบจำลองที่ 2 : เกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น

$$\text{ที่ } t = 0 \quad c_i^l = c^0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.4.ก)$$

$$c_i^v = 0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.4.ข)$$

$$t > 0 \quad c_i^l = c^0 \quad x = 0 \quad (3.4.ค)$$

$$c_i^v = 0 \quad x = L \quad (3.4.ง)$$

$$c_i^l = c_i^{l(I)} \quad x = I \quad (3.4.จ)$$

$$c_i^v = \frac{p_i^0(T)}{RT} \quad x = I \quad (3.4.ฉ)$$

โดย c_i^v คือ ความเข้มข้นในเยื่อแผ่นของส่วนชั้นเยื่อแผ่นแห้ง, โมล/ลบ.ม.

$c_i^{l(I)}$ คือ ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในชั้นเยื่อแผ่นพองตัวที่ตำแหน่ง $x = I$

$p_i^0(T)$ คือ ความดันไออิ่มตัว (saturated vapor pressure) ขององค์ประกอบ i ที่ขอบเขตระหว่างเฟสซึ่งสัมพันธ์กับอุณหภูมิ T และสมดุลกับ $c_i^{l(I)}$

ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในชั้นเยื่อแผ่นพองตัวที่ขอบเขตระหว่างเฟสภายในเยื่อแผ่น $c_i^{l(I)}$ กรณีที่เกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่นหาได้จากการทำสมดุลพลังงานที่ขอบเขตระหว่างเฟสดังสมการที่ (3.5) แสดงวิธีการคำนวณในภาคผนวก ข.

$$\dot{m}_i^l H_i^l = \dot{m}_i^v H_i^v \quad (3.5)$$

เมื่อ H_i^v คือ ความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอขององค์ประกอบ, จูล/โมล

\dot{m}_i^l คือ ปริมาณขององค์ประกอบ i ในเฟสของเหลวที่เคลื่อนที่เข้ามายังขอบเขตระหว่างเฟสซึ่งสามารถแทนได้ด้วย $c_i^{l(I)}$, โมล

- \dot{m}_i^v คือ ปริมาณขององค์ประกอบ i ในเฟสไอที่เคลื่อนที่ออกจากขอบเขตระหว่างเฟส ซึ่งสามารถแทนได้ด้วย c_i^v , โมล
- H_i^l คือ เอนทาลปีขององค์ประกอบ i ในเฟสของเหลว (specific enthalpy), จูล/โมล

3.2.2 การเคลื่อนที่ของขอบเขตระหว่างเฟส (Moving interphase)

พลั๊กซ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ภายในเยื่อแผ่นสามารถอธิบายได้โดยกฎข้อหนึ่งของฟิกส์ ที่ขอบเขตระหว่างเฟสตามกฎการอนุรักษ์พลั๊กซ์ขององค์ประกอบ i ในเฟสของเหลวของชั้นเยื่อแผ่นพองตัวแสดงได้ด้วยสมการที่ (3.6) และพลั๊กซ์ขององค์ประกอบ i ในเฟสไอของชั้นเยื่อแผ่นแห้งเมื่อแทนพารามิเตอร์ตามกฎของแก๊สอุดมคติแสดงได้ด้วยสมการที่ (3.6) เช่นกันดังนี้

$$J_i = -D_i^v \frac{\partial c_i^v}{\partial x} = -\frac{D_i^v}{RT} \frac{\partial p_i}{\partial x} \quad (3.6)$$

- เมื่อ J_i คือ พลั๊กซ์ขององค์ประกอบ i ณ ขอบเขตระหว่างเฟสซึ่งเท่ากับพลั๊กซ์เพอร์เวปเพอเรนซ์, โมล/ตร.ม.-วินาที
- R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส (Gas constant) มีค่าเท่ากับ 8.2057×10^{-5} ลบ.ม.-บรยากาศ/โมล-เคลวิน
- T คือ อุณหภูมิของเยื่อแผ่น, เคลวิน

และ เมื่อสมมติให้โพรไฟล์ความดันขององค์ประกอบภายในเยื่อแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงเป็นเส้นตรงจะได้ พลั๊กซ์ในเฟสของไอภายในเยื่อแผ่นเขียนได้ดังสมการที่ (3.7)

$$J_i \approx -\frac{D_i^v}{RT} \frac{\Delta p_i}{y} \quad (3.7)$$

- เมื่อ y คือ ระยะของเยื่อแผ่นส่วนที่แห้ง, เมตร
- Δp_i คือ ผลต่างของความดันไอขององค์ประกอบ i ระหว่าง $x = I$ กับ $x = L$, บรรยากาศ

ขอบเขตระหว่างเฟสภายในเยื่อแผ่นมีการเคลื่อนที่ที่เกิดขึ้นตลอดเวลาในสถานะไม่คงตัว เนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ซึ่งเป็นฟังก์ชันของความเข้มข้น มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลาตามความเข้มข้นขององค์ประกอบที่มีการเปลี่ยนแปลงกับเวลา ที่ขอบเขตระหว่างเฟสพลั๊กซ์ของ

เหลวจะเท่ากับฟลักซ์ของไอดังแสดงในสมการที่ (3.8) ตามกฎทรงมวล [26] กล่าวว่ามีฟลักซ์ขององค์ประกอบ i ซึ่งเคลื่อนที่มาจากส่วนเยื่อแผ่นที่บวมตัว ที่ขอบเขตระหว่างเฟสจะเท่ากับฟลักซ์ขององค์ประกอบ i เคลื่อนที่เข้าไปในส่วนเยื่อแผ่นที่แห้ง

$$D_i^l \frac{\partial c_i^l}{\partial x} = \frac{D_i^v}{RT} \frac{\Delta p_i}{y} \quad (3.8)$$

โดยระยะของส่วนเยื่อแผ่นแห้ง สามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (3.8) และมีการเปลี่ยนแปลงสัมพันธ์กับเวลาที่สถานะไม่คงตัว [26] ดังสมการที่ (3.9)

$$y = kt^{1/2} \quad (3.9)$$

โดย k คือ ค่าคงที่ในสมการ [26]

3.2.3 การถ่ายโอนความร้อน (Heat transfer equation)

ถึงแม้จะได้ตั้งข้อสมมุติให้มีอุณหภูมิคงที่ตลอดเยื่อแผ่นดังกล่าวในหัวข้อที่ 3.1 เพื่อการพิสูจน์ข้อสมมุตินี้ จึงได้คำนวณหาอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นว่ามีนัยสำคัญหรือไม่เพียงใด โดยในกระบวนการถ่ายโอนความร้อนผ่านเยื่อแผ่นพอลิเมอร์ อุณหภูมิ ณ จุดใดๆ ในเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงไปกับเวลาในสถานะไม่คงตัวดังสมการที่ (3.10)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.10)$$

เมื่อ λ คือ ค่าการนำความร้อนของพอลิเมอร์, จูล/เมตร-วินาที-เคลวิน

เนื่องจากกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันจะเกิดขึ้นตอนการเปลี่ยนเฟสจากของเหลวกลายเป็นไอ โดยในการระเหยนี้ต้องการความร้อนแฝงในการกลายเป็นไอซึ่งได้มาจากของเหลวป้อน จึงมีผลทำให้เกิดอุณหภูมิเกิดขึ้นในเยื่อแผ่น โดยการนำสมดุลพลังงานแสดงได้ด้วยสมการ (3.11)

$$H_i^v J_i = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (3.11)$$

โดยมี สภาวะขอบเขต ดังนี้

$$t = 0 \quad T = T^0 \quad 0 \leq x \leq L \quad (3.12.ก)$$

$$t > 0 \quad T = T^0 \quad x = 0 \quad (3.12.ข)$$

$$T = T^L \quad x = L \quad (3.12.ค)$$

เมื่อ T^0 คือ อุณหภูมิที่ผิวทางด้านป้อนของเยื่อแผ่น, เคลวิน

T^L คือ อุณหภูมิที่ผิวทางด้านขาออกของเยื่อแผ่น, เคลวิน

3.2.4 ตัวแปรไร้มิติ (Dimensionless parameter)

ในการสร้างสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ได้ทำการเปลี่ยนพารามิเตอร์ต่างๆ ให้เป็นพารามิเตอร์ไร้มิติก่อนเพื่อความสะดวกในการคำนวณเพราะไม่มีหน่วยเข้ามาเกี่ยวข้องและมีค่าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 สำหรับระยะในเยื่อแผ่น เวลา และ ความเข้มข้น ดังสมการที่ (3.13) (3.14) และ (3.15) ตามลำดับ

$$X = \frac{x}{L} \quad (3.13)$$

$$\tau = \frac{D_i^0 t}{L^2} \quad (3.14)$$

$$C_i = \frac{c_i}{c^0} \quad (3.15)$$

ทำให้สมการหลักและสภาวะขอบเขตเปลี่ยนไปดังนี้

$$\frac{\partial C_i^1}{\partial \tau} = \exp(\beta C_i^1) \frac{\partial^2 C_i^1}{\partial X^2} + \beta \exp(\beta C_i^1) \left[\frac{\partial C_i^1}{\partial X} \right]^2 \quad (3.16)$$

แบบจำลองที่ 1 : เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก

$$\text{ที่ } \tau = 0 \quad C_i^I = 1 \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (3.17.ก)$$

$$\tau > 0 \quad C_i^I = 1 \quad X = 0 \quad (3.17.ข)$$

$$C_i^I = 0 \quad X = 1 \quad (3.17.ค)$$

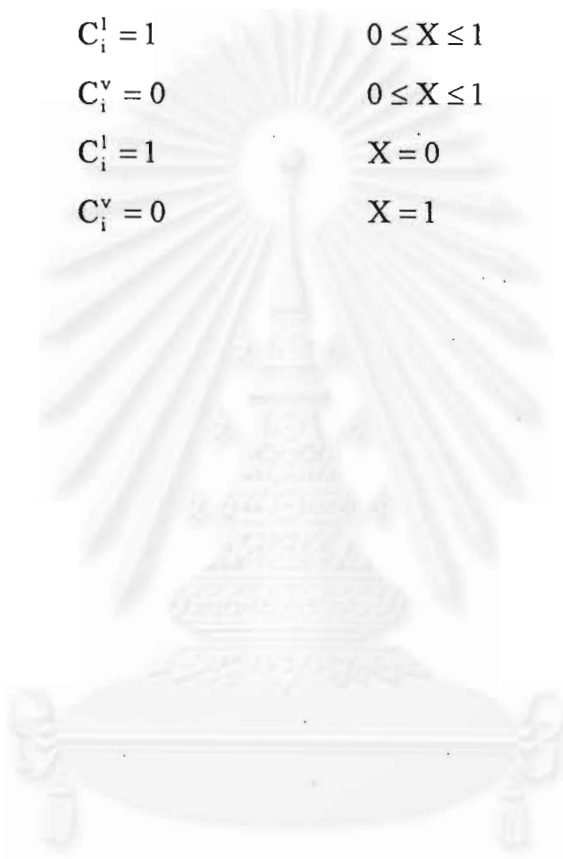
แบบจำลองที่ 2 : เกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น

$$\text{ที่ } \tau = 0 \quad C_i^I = 1 \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (3.18.ก)$$

$$C_i^Y = 0 \quad 0 \leq X \leq 1 \quad (3.18.ข)$$

$$\tau > 0 \quad C_i^I = 1 \quad X = 0 \quad (3.18.ค)$$

$$C_i^Y = 0 \quad X = 1 \quad (3.18.ง)$$



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

การคำนวณและกระบวนการเชิงตัวเลข

สมการคณิตศาสตร์สำหรับอธิบายการถ่ายโอนมวลขององค์ประกอบ i ผ่านเยื่อแผ่นโดยมีความเข้มข้น ณ จุดใดๆ ภายในเยื่อแผ่นเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ในช่วงสถานะไม่คงตัวดังสมการที่ (3.3) และมีค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ไม่คงที่ตามความเข้มข้นที่เปลี่ยนแปลงดังสมการที่ (3.1) ทำให้ไม่สามารถแก้ปัญหาโดยวิธีเชิงวิเคราะห์ (analytical solution) ได้ ดังนั้นจึงใช้วิธีการหาผลเฉลยเชิงตัวเลข (numerical solution) โดยวิธีผลต่างอันดับ (finite difference) ในการแก้ปัญหาดังกล่าว ดังแสดงรายละเอียดของวิธีการในภาคผนวก ก กระบวนการในการคำนวณด้วยคอมพิวเตอร์สำหรับแบบจำลองที่ 1 คือกรณีที่เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออกแสดงได้ดังรูปที่ 4.1-ก และสำหรับแบบจำลองที่ 2 คือกรณีที่เกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่นแสดงได้ดังรูปที่ 4.2-ก

4.1 การคำนวณสำหรับแบบจำลองที่ 1: กรณีเกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่น

การคำนวณสำหรับแบบจำลองที่ 1 (กรณีที่เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก) ขั้นตอนดังรูปที่ 4.1-ก เริ่มต้นด้วยการรับข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการคำนวณคือ อุณหภูมิของสารป้อน (T^0) ความหนาของเยื่อแผ่น (L) ความเข้มข้นอิมิตัวเริ่มต้นขององค์ประกอบในเยื่อแผ่น (c^0) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (λ) สำหรับพอลิเอทิลีนแอกซีตมีค่าเท่ากับ 0.071 จูล/เมตร-วินาที-เคลวิน [27] และข้อมูลพลาซิกซ์จากการทดลองที่สถานะคงตัว [7] จากนั้นทำการกำหนดค่าสภาวะขอบเขตสำหรับการถ่ายโอนมวลตามสมการที่ (3.17.ก) (3.17.ข) และ (3.17.ค) และสภาวะขอบเขตสำหรับการถ่ายโอนความร้อนตามสมการที่ (3.12.ก) (3.12.ข) และ (3.12.ค)

ต่อมาจึงกำหนดค่าเริ่มต้นของ plasticizing factor (β) และสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์, (D_i^0) เพื่อการคำนวณโดยวิธีลองผิดลองถูก (trial and error) โดยใช้ช่วงการลองผิดลองถูกระหว่าง 0-1 สำหรับ plasticizing factor และระหว่าง 1×10^{-16} - 1×10^{-9} ตร.ม./วินาที สำหรับสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์ โดยช่วงที่ใช้ในการคำนวณของพารามิเตอร์ทั้งสองตั้งจากการศึกษาของงานวิจัยที่ทำมาก่อนหน้านี้ [3,4,5,6,13,14] คำนวณค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ณ ตำแหน่งต่างๆ ภายในเยื่อแผ่นโดยโปรแกรมย่อย CONC1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1-ข ตามสมการที่ (4.1) เป็นการคำนวณแบบไร้หน่วยเพื่อความสะดวกในการกำหนดช่วงเวลาและระยะในเยื่อแผ่นสำหรับการคำนวณ คือช่วง 0 - 1

$$C_m^{n+1} = C_m^n + \Delta\tau \exp(\beta C_m^n) \frac{(C_{m+1}^n - 2C_m^n + C_{m-1}^n)}{\Delta X^2} + \beta \Delta\tau \exp(\beta C_m^n) \frac{(C_{m+1}^n - C_{m-1}^n)^2}{2\Delta X} \quad (4.1)$$

จากนั้นนำค่าความเข้มข้นไว้หน่วยที่คำนวณได้ข้างต้นมาเปลี่ยนเป็นค่ามีหน่วยและใช้ในการคำนวณฟลักซ์ของเพอร์เวปพอเรชันแบบมีหน่วย ณ เวลาต่างๆ จากสมการที่ (4.2)

$$J = -D^0 \exp \left[\beta \frac{(c_{m-1}^n + c_m^n)}{2c^0} \right] \left(\frac{c_m^n - c_{m-1}^n}{\Delta x} \right) \quad (4.2)$$

ตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนของฟลักซ์จากการคำนวณกับฟลักซ์จากการทดลองที่สถานะคงตัวให้มีค่าไม่เกิน 0.1%

จากนั้นคำนวณอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเยื่อแผ่นโดยใช้สมการที่ (4.3) และคำนวณอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่นด้วยสมการที่ (4.4) โดยใช้ฟลักซ์ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ผ่านมาในการคำนวณอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆ ในเยื่อแผ่นนั้นจะคิดแบบมีหน่วยในการคำนวณมีความสัมพันธ์กับฟลักซ์ที่คำนวณได้

$$T_m^{n+1} = T_m^n + k\Delta t \frac{(T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n)}{\Delta x^2} \quad (4.3)$$

$$T^L = T^{L-\Delta x} - \Delta x \frac{(\lambda J)}{k} \quad (4.4)$$

อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นคำนวณได้จากผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านป้อนกับอุณหภูมิที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่น โดยขั้นตอนทั้งหมดนี้อยู่ในโปรแกรมย่อย TEMP1 ดังแสดงในรูปที่ 4.1-ค แล้วจึงพิมพ์ เวลา ฟลักซ์ และ อุณหภูมิที่คำนวณได้ ณ เวลาต่างๆ ค่า plasticizing parameter และสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์ เป็นขั้นตอนสุดท้ายของโปรแกรม รายละเอียดโปรแกรมที่เขียนขึ้นทั้งหมดสำหรับแบบจำลองที่ 1 แสดงไว้ในภาคผนวก ข.

4.2 การคำนวณสำหรับแบบจำลองที่ 2 : กรณีเกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น

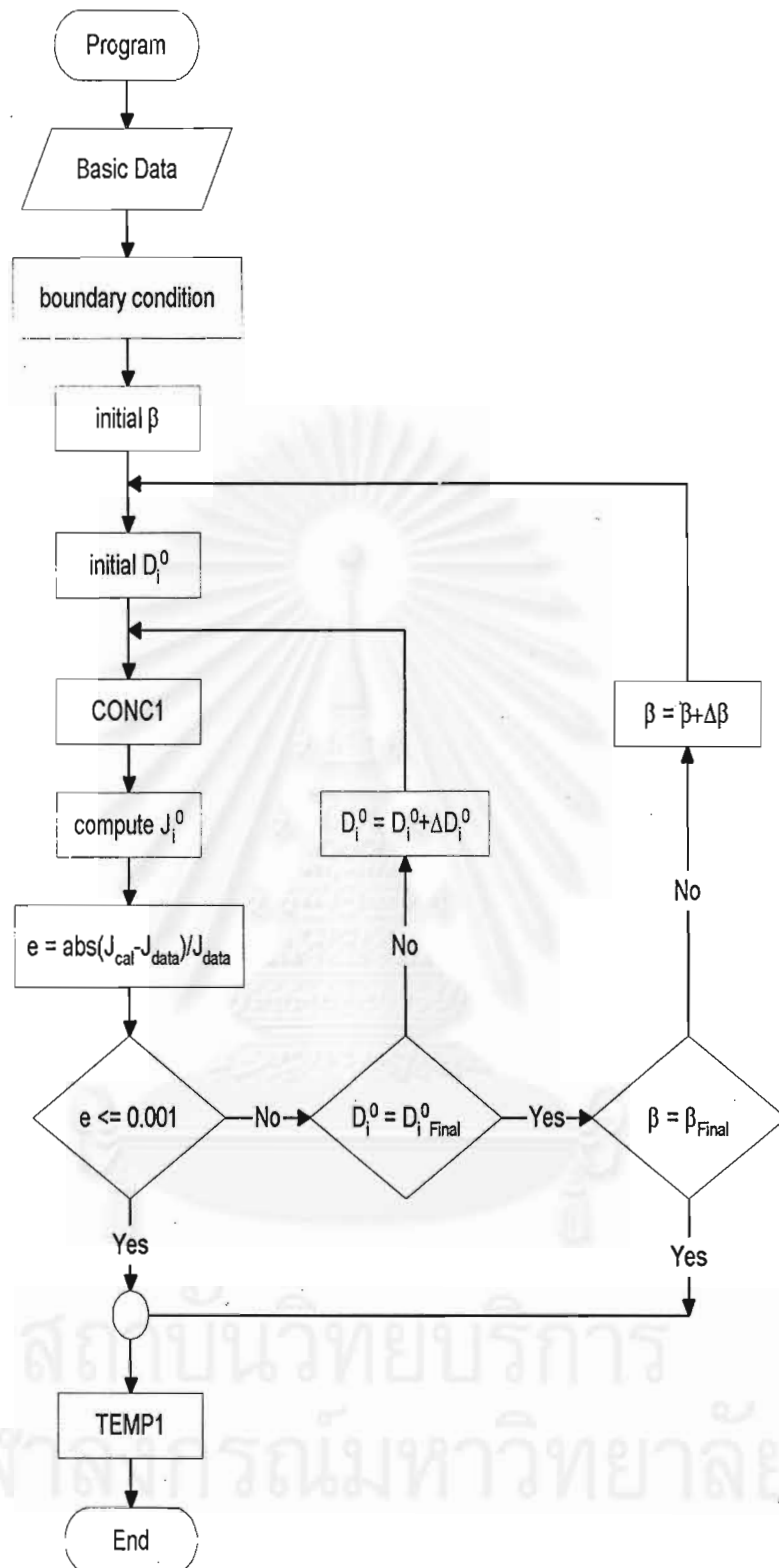
ขั้นตอนการการคำนวณสำหรับแบบจำลองที่ 2 (กรณีที่เกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น) ดังรูปที่ 4.2-ก เริ่มต้นด้วยการรับข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการคำนวณคือ อุณหภูมิของสารป้อน (T^0) ความหนาของเยื่อแผ่น (L) ความเข้มข้นอิมิตัวเริ่มต้นขององค์ประกอบในเยื่อแผ่น (c^0) ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (λ) สำหรับพอลิอะคริลิกแอซิดมีค่าเท่ากับ 0.071 จูล/เมตร-วินาที-เคลวิน [27] ค่าความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัวและชั้นเยื่อแผ่นที่แห้งที่บริเวณขอบเขตระหว่างเฟส ($c_i^{(1)}$) และ ($c_i^{(2)}$) ตามลำดับซึ่งแสดงการคำนวณในภาคผนวก

ข. และข้อมูลพลาซิกซ์จากการทดลองที่สถานะคงตัว [7] จากนั้นทำการกำหนดค่าสมภาวะขอบเขต สำหรับการถ่ายโอนมวลตามสมการที่ (3.18.ก) (3.18.ข) (3.18.ค) และ (3.18.ง) และสมภาวะขอบเขตสำหรับการถ่ายโอนความร้อนตามสมการที่ (3.12.ก) (3.12.ข) และ (3.12.ค)

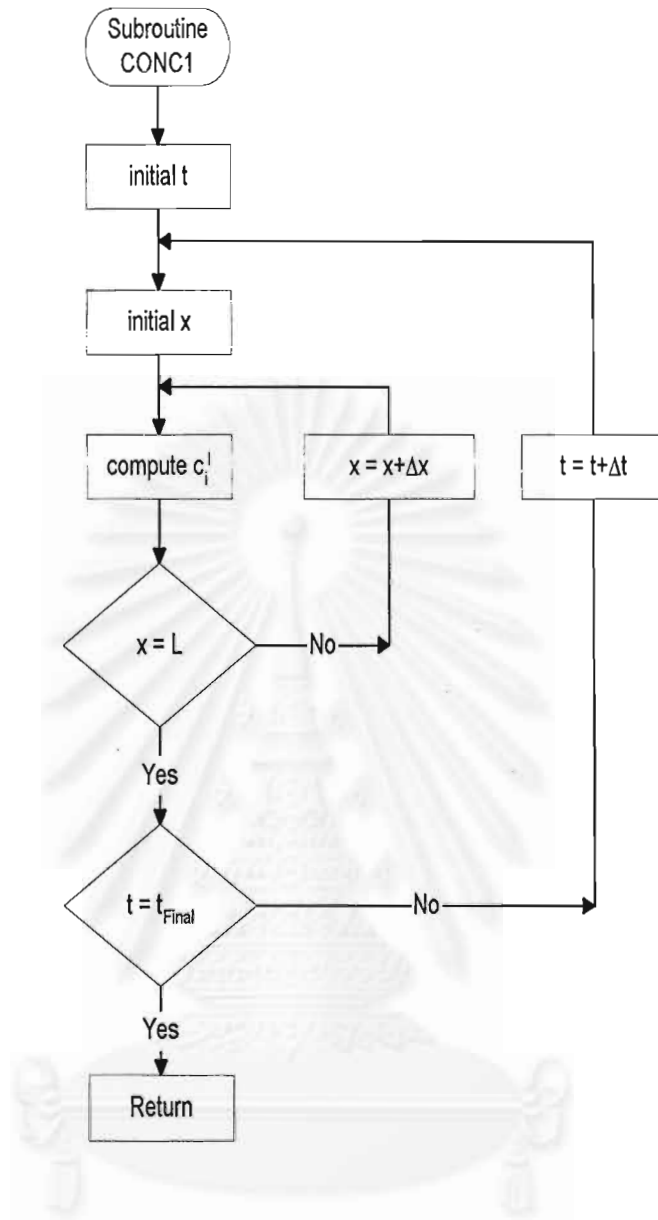
ต่อมาเป็นขั้นตอนการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในชั้นเยื่อแผ่นแห้ง (เฟสไอ, D_i^v) และความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้ง (y) ณ เวลาเริ่มต้นโดยวิธีลองผิดลองถูกโดยใช้ช่วงค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในชั้นเยื่อแผ่นแห้งเป็น 0.01-0.1 เท่าของค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์ [19] เพื่อคำนวณพลาซิกซ์ของชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัวและพลาซิกซ์ของชั้นเยื่อแผ่นแห้งจากสมการที่ (4.2) และ (3.7) ตามลำดับ ตรวจสอบว่าที่ขอบเขตระหว่างเฟสพลาซิกซ์ขององค์ประกอบ i จากชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัวเท่ากับพลาซิกซ์ขององค์ประกอบ i ที่เข้าสู่ชั้นเยื่อแผ่นแห้งดังสมการที่ (3.8) หรือไม่จึงจะออกจากโปรแกรมย่อย DRYPT ตามขั้นตอนการคำนวณในรูปที่ 4.2-ข

คำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งและพลาซิกซ์ของเพอร์แวปเพอเรชัน ณ เวลาต่อๆ มา โดยใช้สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ในชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่ได้จากขั้นตอนที่ผ่านมา โดยคำนวณความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ภายในเยื่อแผ่น ณ ตำแหน่งต่างๆ โดยโปรแกรมย่อย CONC2 แสดงในรูปที่ 4.2-ค ตามสมการที่ (4.1) ซึ่งเป็นการคำนวณแบบไร้หน่วยเพื่อความสะดวกในการกำหนดช่วงเวลาและระยะในเยื่อแผ่นสำหรับการคำนวณ จากนั้นนำค่าความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งมาใช้ในการคำนวณพลาซิกซ์ของชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัวและพลาซิกซ์ของชั้นเยื่อแผ่นแห้งจากสมการที่ (4.2) และ (3.7) ตามลำดับซึ่งเป็นการคำนวณแบบมีหน่วยโดยเปลี่ยนค่าความเข้มข้นไร้หน่วยที่คำนวณได้เป็นค่ามีหน่วยก่อน ตรวจสอบจนได้ว่าที่ขอบเขตระหว่างเฟสพลาซิกซ์ขององค์ประกอบ i จากชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัวเท่ากับ พลาซิกซ์ขององค์ประกอบ i ที่เข้าสู่ชั้นเยื่อแผ่นแห้งตามสมการที่ (3.8) จึงจะออกจากการคำนวณเข้าสู่ขั้นตอนการหาอุณหภูมิถัดไป

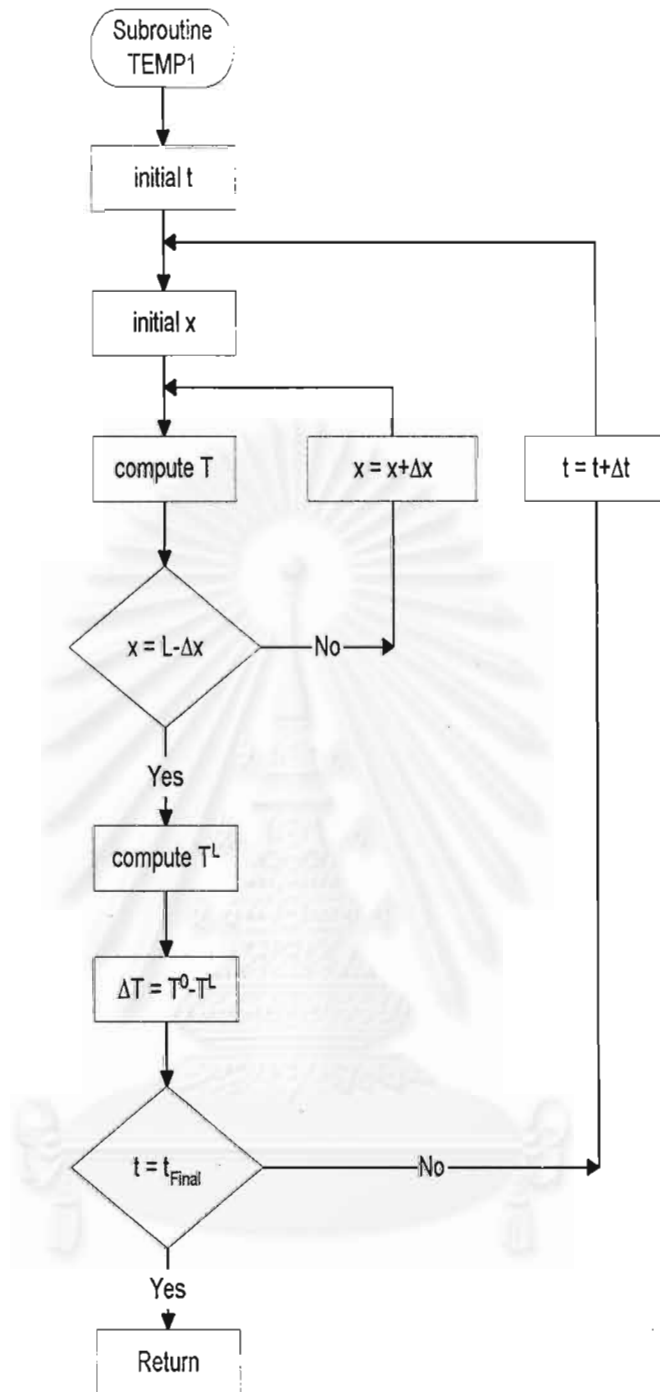
คำนวณอุณหภูมิ ณ ตำแหน่งต่างๆในเยื่อแผ่นโดยใช้สมการที่ (4.3) และคำนวณอุณหภูมิที่ตำแหน่งที่เกิดการเปลี่ยนเฟสทางด้านขาออกของเยื่อแผ่นด้วยสมการที่ (4.4) โดยใช้ พลาซิกซ์ที่คำนวณได้จากขั้นตอนที่ผ่านมา อุณหภูมิที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นคำนวณได้จากผลต่างของอุณหภูมิที่ผิวด้านป้อนกับอุณหภูมิที่ขอบเขตระหว่างเฟสในเยื่อแผ่น โดยขั้นตอนทั้งหมดนี้อยู่ในโปรแกรมย่อย TEMP2 ดังแสดงในรูปที่ 8.ง ในการคำนวณอุณหภูมิลดที่เกิดขึ้นในเยื่อแผ่นนั้นจะคิดแบบมีหน่วยเนื่องจากอุณหภูมิที่ขอบเขตระหว่างเฟสในเยื่อแผ่นมีความสัมพันธ์กับพลาซิกซ์ที่คำนวณได้ แล้วจึงพิมพ์ เวลา พลาซิกซ์ และ อุณหภูมิลดที่คำนวณได้ ณ เวลาต่างๆ ค่า plasticizing parameter และสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบ i ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์เป็นขั้นตอนสุดท้ายของโปรแกรม รายละเอียดโปรแกรมที่เขียนขึ้นทั้งหมดสำหรับแบบจำลองที่ 2 แสดงไว้ในภาคผนวก ข.



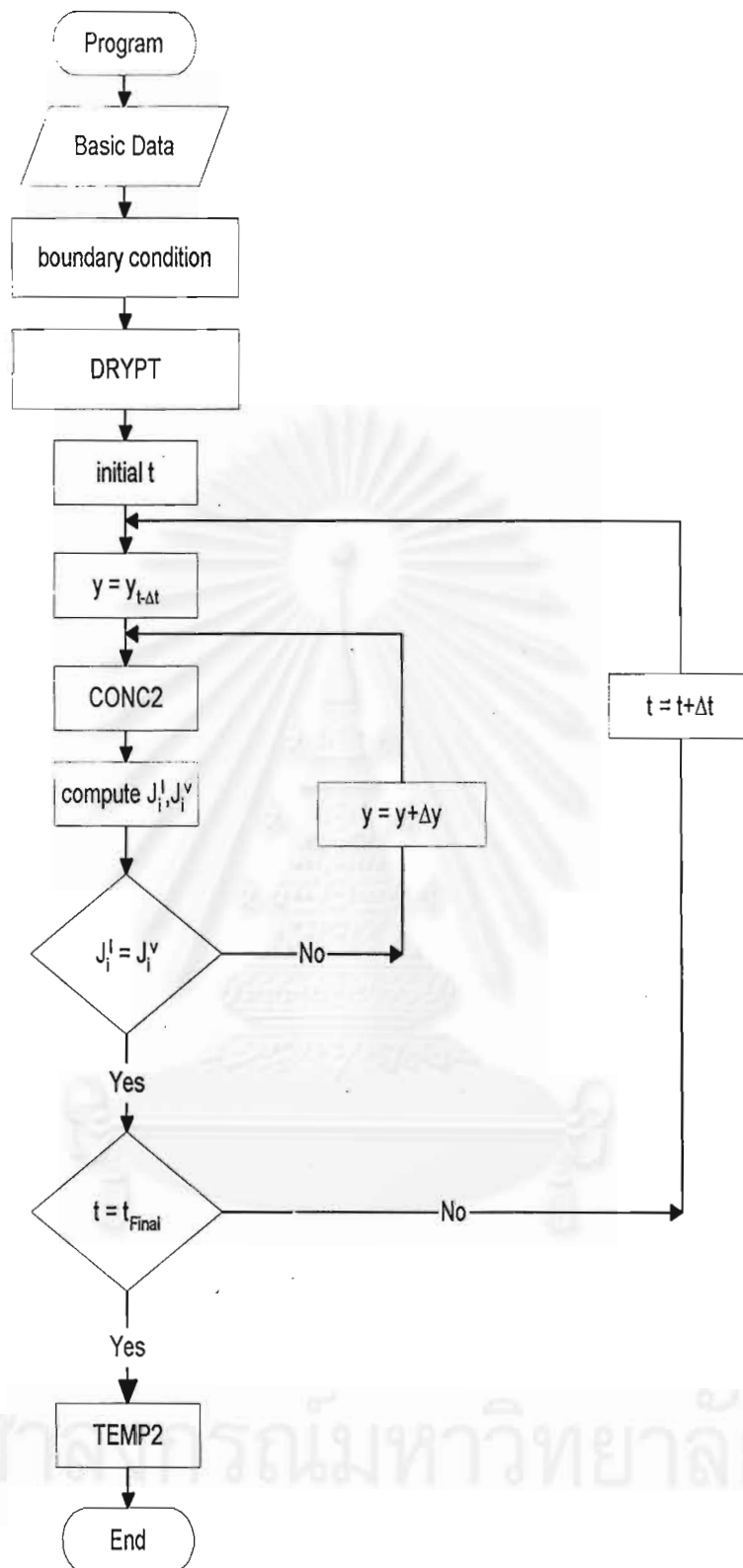
รูปที่ 4.1-ก แสดงขั้นตอนของโปรแกรมหลักสำหรับกระบวนการคำนวณปลั๊กซ์ โดยแบบจำลองที่ 1



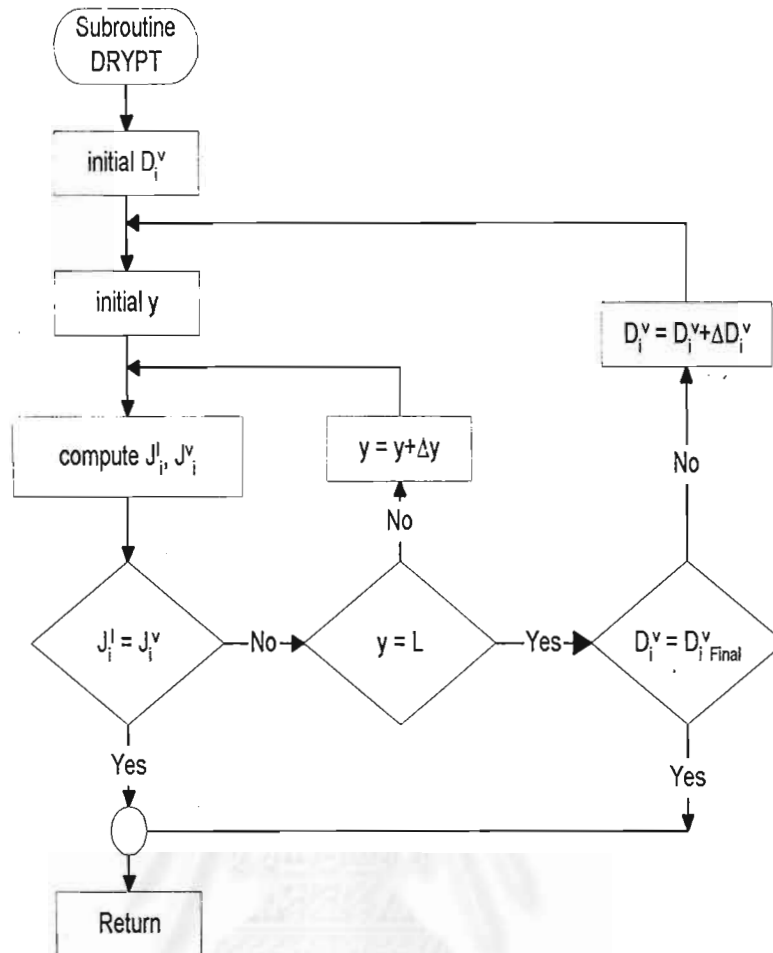
รูปที่ 4.1-ข โปรแกรมย่อย CONC1 สำหรับคำนวณความเข้มข้นขององค์ประกอบในชั้นเยื่อแผ่น
ที่พองตัว สำหรับแบบจำลองที่ 1



รูปที่ 4.1-ค โปรแกรมย่อย TEMP1 สำหรับคำนวณอุณหภูมิเฉลี่ยสำหรับแบบจำลองที่ 1

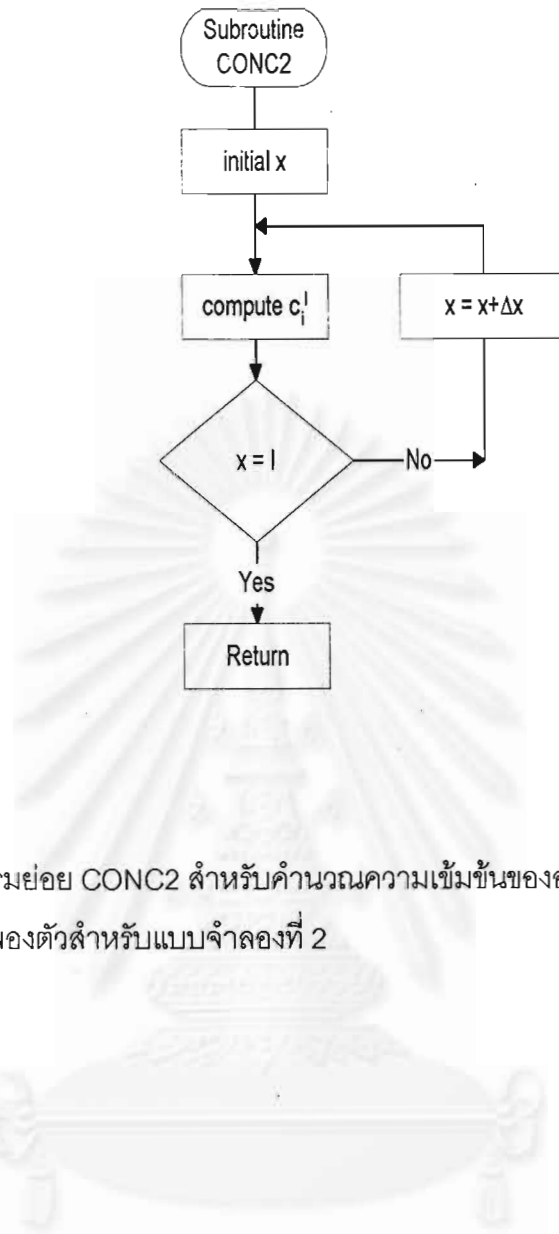


รูปที่ 4.2-ก แสดงขั้นตอนของโปรแกรมหลักสำหรับกระบวนการคำนวณฟลักซ์ โดยแบบจำลองที่ 2

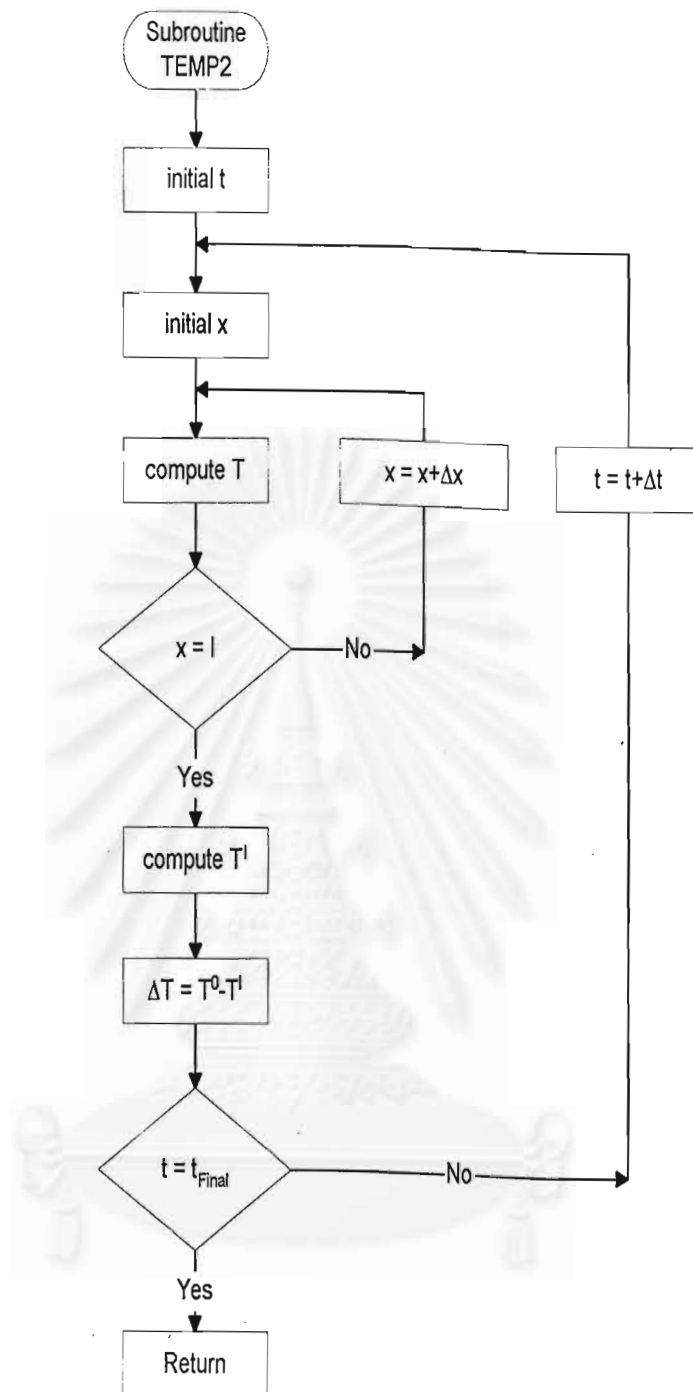


รูปที่ 4.2-ข โปรแกรมย่อย DRYPT สำหรับคำนวณสัมประสิทธิ์การแพร่ในส่วนชั้นเยื่อแผ่นแห้ง และความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้ง ณ เวลาเริ่มต้น

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.2-ค โปรแกรมย่อย CONC2 สำหรับคำนวณความเข้มข้นขององค์ประกอบในชั้นเยื่อ
แผ่นที่พองตัวสำหรับแบบจำลองที่ 2



รูปที่ 4.2-ง โปรแกรมย่อย TEMP2 สำหรับคำนวณอุณหภูมิผิวดิน สำหรับแบบจำลองที่ 2

บทที่ 5 ผลและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษากลไกการถ่ายโอนมวลของน้ำในเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิคแอซิดเนื้อแน่นชนิดขบหน้าในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันตั้งแต่ในสถานะไม่คงตัวจนถึงสถานะคงตัว ได้สร้างแบบจำลองสำหรับอธิบายกลไกการถ่ายโอนมวลที่เกิดขึ้น 2 แบบและเปรียบเทียบผลการคำนวณจากแบบจำลองกับข้อมูลจากการทดลองที่ทำไว้ในงานวิจัยอื่น [7] ซึ่งเริ่มจากการใช้เยื่อแผ่นที่ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยน้ำจนสมดุลแล้วจึงนำมาทดลองหาฟลักซ์ด้วยกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 °ซ ตั้งแต่ในสถานะไม่คงตัวจนถึงสถานะคงตัว เพื่อสร้างความเข้าใจในกลไกการถ่ายโอนมวลตั้งแต่เริ่มกระบวนการ เพื่อความสมบูรณ์ของงานวิจัยเกี่ยวกับการศึกษาการถ่ายโอนมวลในเยื่อแผ่นของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันเพราะงานวิจัยทั้งหลายก่อนหน้านี้เป็นการอธิบายในสถานะคงตัวทั้งสิ้น

5.1 วิเคราะห์ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ 1

5.1.1 การเปรียบเทียบฟลักซ์จากแบบจำลองกับข้อมูลการทดลอง

ฟลักซ์สำหรับเพอร์เวปเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิคแอซิด ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 °ซ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองเปรียบเทียบกับผลฟลักซ์จากข้อมูลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5.1-ก, 5.1-ข และ 5.1-ค โดยในช่วงแรกฟลักซ์จะลดลงอย่างรวดเร็วและต่อมาจะลดลงอย่างช้าๆ จนคงที่เมื่ออยู่ในช่วงสถานะคงตัว ทั้งนี้เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของโพธิ์ไฟล์ความเข้มข้นของน้ำภายในเยื่อแผ่นดังรูปที่ 5.2-ก, 5.2-ข และ 5.2-ค จากสภาวะเริ่มต้นความเข้มข้นของน้ำภายในเยื่อแผ่นมีค่าเท่ากับความเข้มข้นอิ่มตัวสมดุลของน้ำที่สามารถละลายเข้าไปในเยื่อแผ่น ที่ผิวทางด้านป้อนของเยื่อแผ่นจะมีความเข้มข้นเท่ากับความเข้มข้นเริ่มต้นตลอดเวลา ส่วนที่ผิวทางด้านขาออกของเยื่อแผ่นจะมีความเข้มข้นลดลงเป็นศูนย์ในทันทีทำให้เกิดโพธิ์ไฟล์ของความเข้มข้นขึ้นในเยื่อแผ่นและมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงสถานะไม่คงตัว

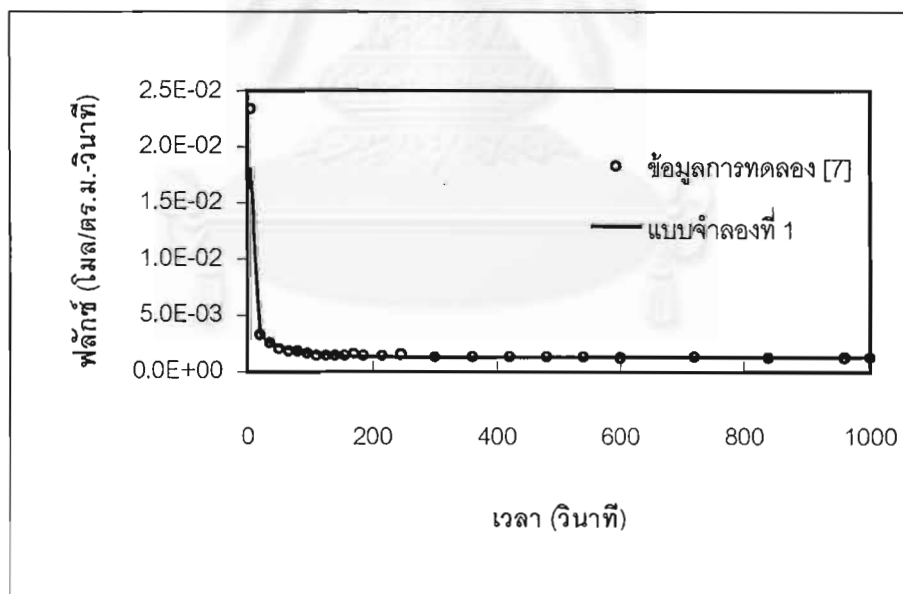
สมการสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบในชั้นเยื่อแผ่นที่พองตัวสำหรับกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันซึ่งเลือกใช้รูปแบบเป็นฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียลกับความเข้มข้น โดยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมได้จากวิธีการลองผิดลองถูกดังกล่าวในบทที่ 4 ตามขั้นตอนการคำนวณในรูปที่ 7.ก สามารถแสดงได้ดังสมการ (5.1.ก), (5.1.ข) และ (5.1.ค)

$$D_1^* = 2.4 \times 10^{-11} \exp\left(0.58 \times \frac{c_1}{c_0}\right) \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 25 \text{ °ซ} \quad (5.1.ก)$$

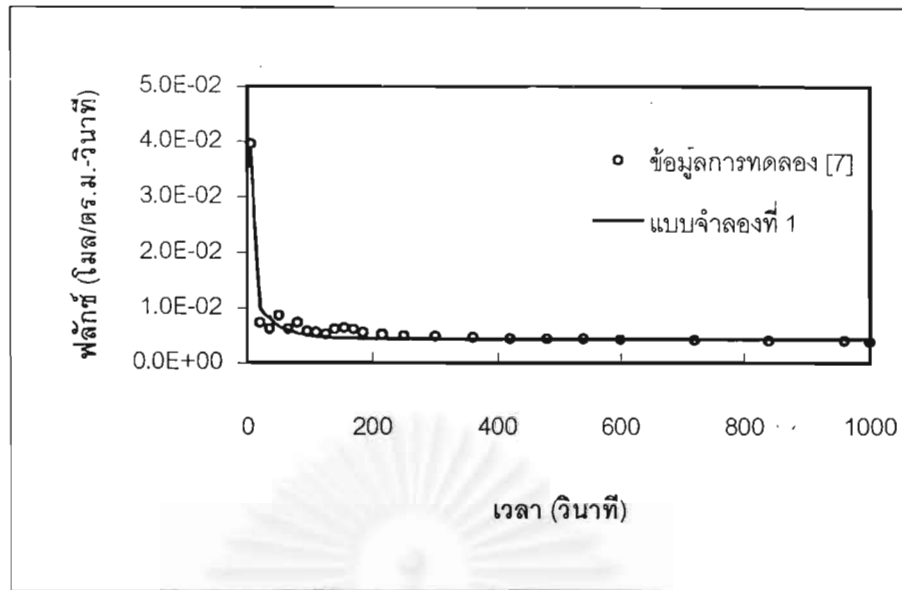
$$D_i^1 = 4.3 \times 10^{-11} \exp\left(0.6 \times \frac{c_i^1}{c_0^1}\right) \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 40 \text{ }^{\circ}\text{ซ} \quad (5.1.ข)$$

$$D_i^1 = 4.8 \times 10^{-11} \exp\left(0.61 \times \frac{c_i^1}{c_0^1}\right) \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 50 \text{ }^{\circ}\text{ซ} \quad (5.1.ค)$$

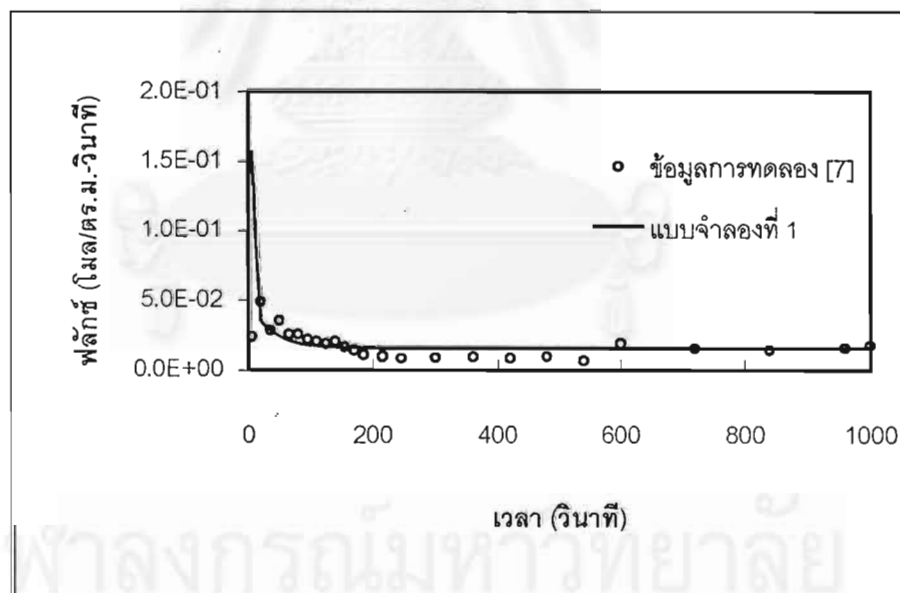
เมื่อเปรียบเทียบผลฟลักซ์การคำนวณจากแบบจำลองกับผลฟลักซ์จากข้อมูลการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 5.1-ก, 5.1-ข และ 5.1-ค ได้ผลดีแต่ไม่สมบูรณ์นักเนื่องจากเกิดการเบี่ยงเบน บริเวณสถานะไม่คงตัวเล็กน้อย โดยแสดงค่าความสัมพันธ์ (correlation) ระหว่างฟลักซ์จากการคำนวณกับข้อมูลการทดลองเพอร์เวปเพอร์ชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิดที่ 25, 40 และ 50 °ซ เท่ากับ 0.99, 0.98 และ 0.88 ตามลำดับ โดยฟลักซ์ที่ทำนายจากแบบจำลองที่สถานะคงตัวคลาดเคลื่อนจากข้อมูลฟลักซ์จากการทดลองไม่เกิน 0.1% แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นสามารถใช้อธิบายกลไกของกระบวนการเพอร์เวปเพอร์ชันได้ตั้งแต่สถานะไม่คงตัว



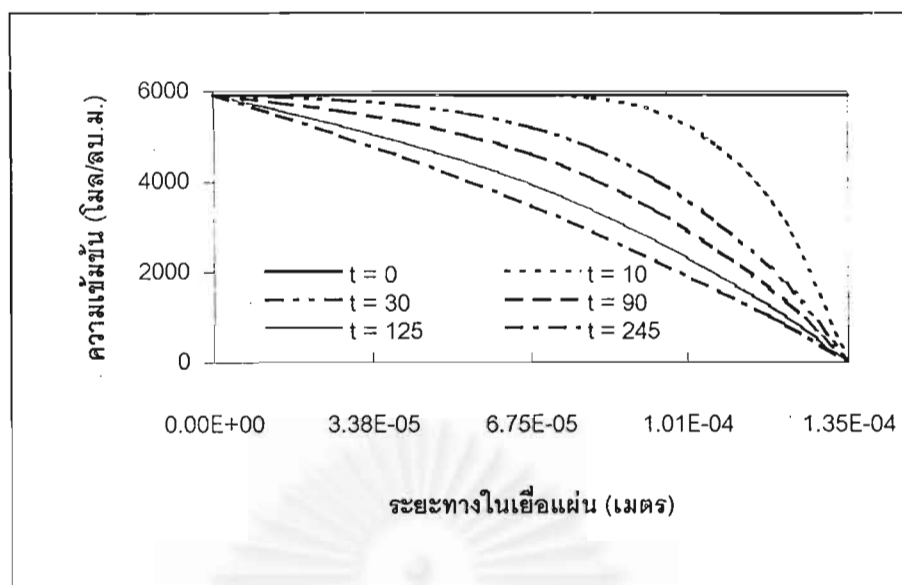
รูปที่ 5.1-ก เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่ อุณหภูมิ 25 °ซ



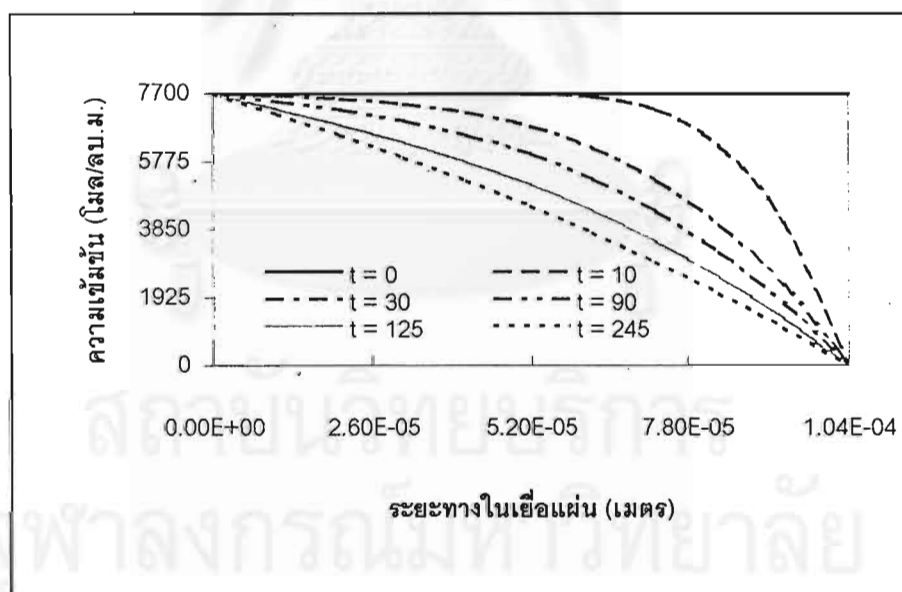
รูปที่ 5.1-ข เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่ อุณหภูมิ 40 °ซ



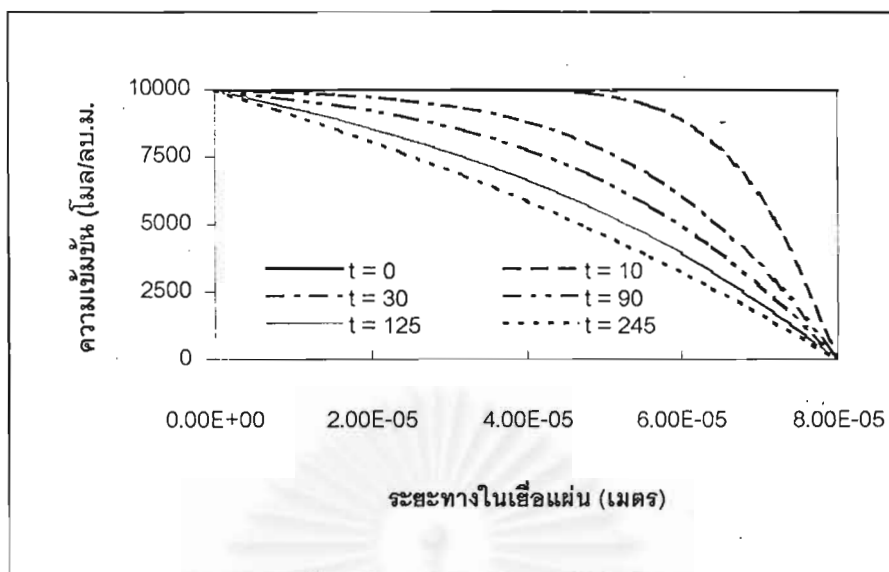
รูปที่ 5.1-ค เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่ อุณหภูมิ 50 °ซ



รูปที่ 5.2-ก โพรไฟล์ความเข้มข้นในเยื่อแผ่นที่เวลาต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ที่อุณหภูมิ 25 °ซ



รูปที่ 5.2-ข โพรไฟล์ความเข้มข้นในเยื่อแผ่นที่เวลาต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ที่อุณหภูมิ 40 °ซ



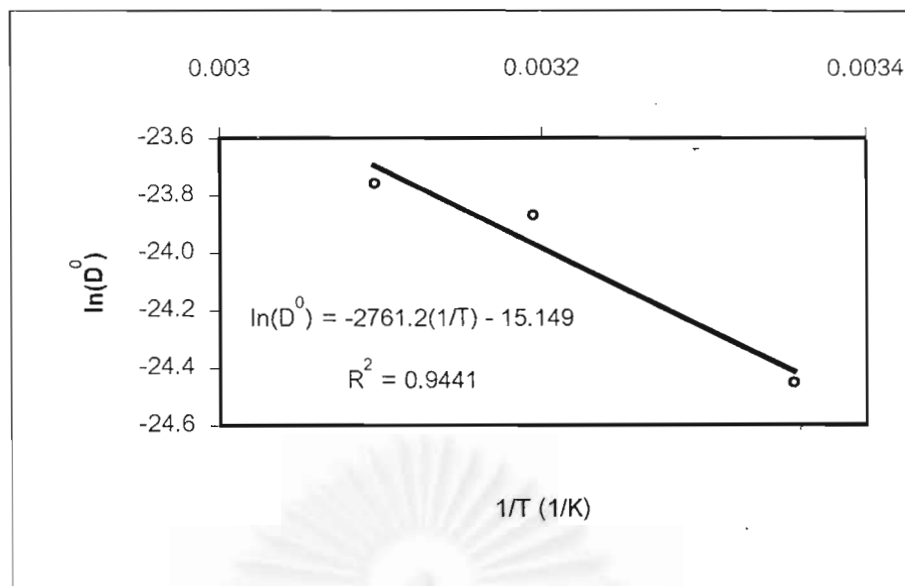
รูปที่ 5.2-ค โพรไฟล์ความเข้มข้นในเยื่อแผ่นที่เวลาต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 1 ที่ อุณหภูมิ 50 °ซ

5.1.2 พลังงานกระตุ้นของการแพร่

อุณหภูมิมีผลต่อค่า D^0 ซึ่งจะมีผลต่อเนื่องถึงฟลักซ์ โดย D^0 จะเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของ อุณหภูมิ D^0 จากการคำนวณในหัวข้อข้างต้นสำหรับกระบวนการเพอร์เวปเพอร์เรชั่นที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 °ซ มีค่าเท่ากับ 2.4×10^{-11} , 4.3×10^{-11} และ 4.8×10^{-11} ตร.ม./วินาที ตามลำดับ พลังงาน กระตุ้นของการแพร่จากการพล็อตระหว่าง $\ln D^0$ กับ $1/T$ ดังรูปที่ 5.3 ตามความสัมพันธ์ของอาร์รี เนียสตามสมการที่ (5.2) เท่ากับ 5.487 กิโลจูล/โมล

$$D^0 = D^* \exp\left(\frac{-E_D}{RT}\right) \quad (5.2)$$

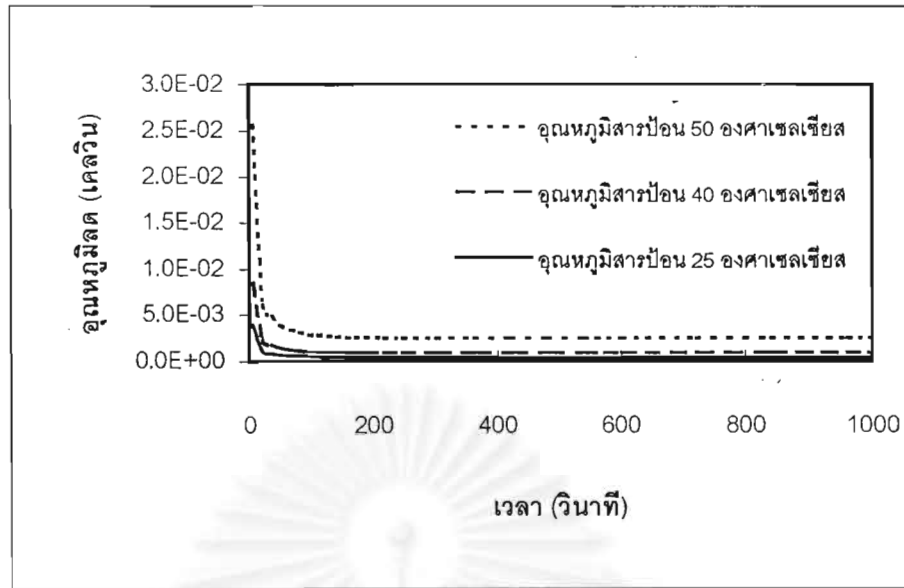
เมื่อ D^* คือ ค่าคงที่ตามความสัมพันธ์ของอาร์รีเนียส, ตร.ม. / วินาที



รูปที่ 5.3 พลังงานกระตุ้นในการแพร่สำหรับเพอร์แวปเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิด

5.1.3 อุณหภูมิผลในกระบวนการเพอร์แวปเพอเรชัน

อุณหภูมิผลที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพอร์แวปเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 °C ณ เวลาต่างๆ จากสมการที่ (3.11) แสดงดังรูปที่ 5.4 โดยอุณหภูมิผลในเยื่อแผ่นจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิดำเนินการที่สูงขึ้น อุณหภูมิผลสูงที่สุดจะเกิด ณ เวลาเริ่มต้นของกระบวนการเพอร์แวปเพอเรชันและจะลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นจึงค่อยๆ ลดลงอย่างช้าๆ และคงที่ในที่สุด เนื่องจากค่าอุณหภูมิผลมากที่สุดจากการคำนวณมีค่าไม่เกิน 3×10^{-2} °C ซึ่งถือว่าต่ำมาก จึงสามารถใช้สมมุติฐานว่าอุณหภูมิของเยื่อแผ่นมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิสารป้อน



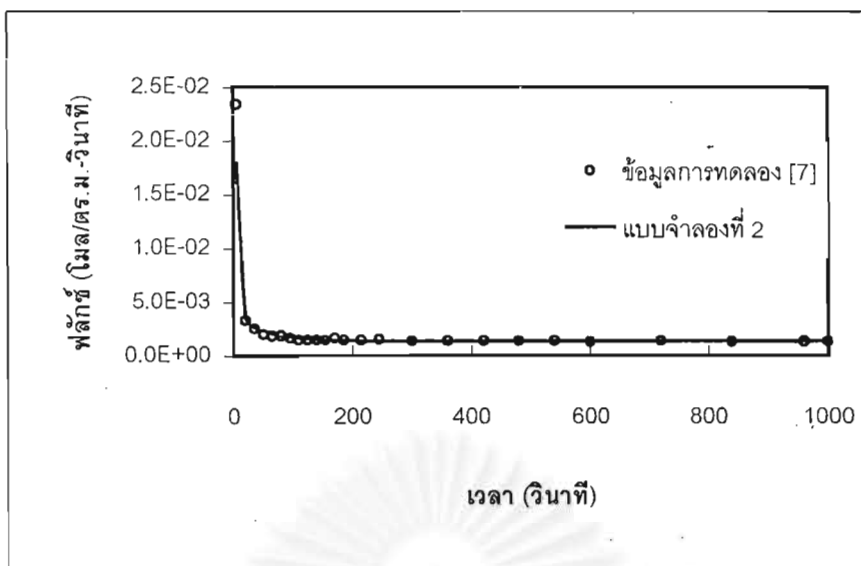
รูปที่ 5.4 อุณหภูมิลดจากกระบวนการเพอร์เวปเพอร์เรชั่นของ น้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิค แอซิด ที่อุณหภูมิ 25 40 และ 50 °ซ โดยแบบจำลองที่ 1

5.2 วิเคราะห์ผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ 2

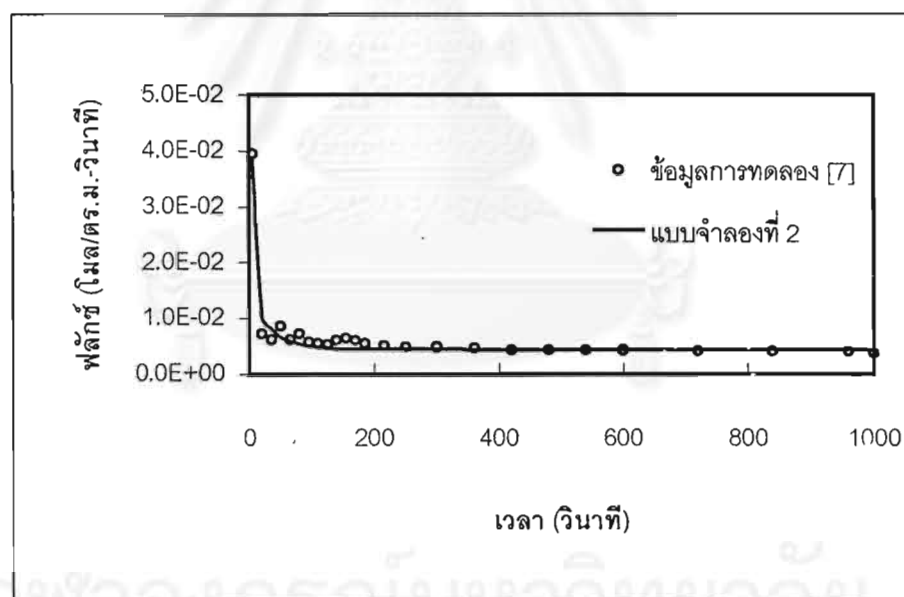
5.2.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองกับข้อมูลการทดลอง

ผลลัพธ์การคำนวณจากแบบจำลองเมื่อเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากข้อมูลการทดลอง แสดงดังรูปที่ 5.5-ก, 5.5-ข และ 5.5-ค โดยได้ผลสอดคล้องใกล้เคียงกันเช่นเดียวกับแบบจำลองที่ 1 คือในช่วงแรกผลลัพธ์จะลดลงอย่างรวดเร็วและต่อมาจะลดลงอย่างช้าๆ จนคงที่เมื่ออยู่ในช่วงสถานะคงตัว ทั้งนี้เนื่องการเปลี่ยนแปลงของโปรไฟล์ความเข้มข้นของน้ำภายในเยื่อแผ่นดังเช่นเดียวกับที่ได้กล่าวในหัวข้อ 5.1.1

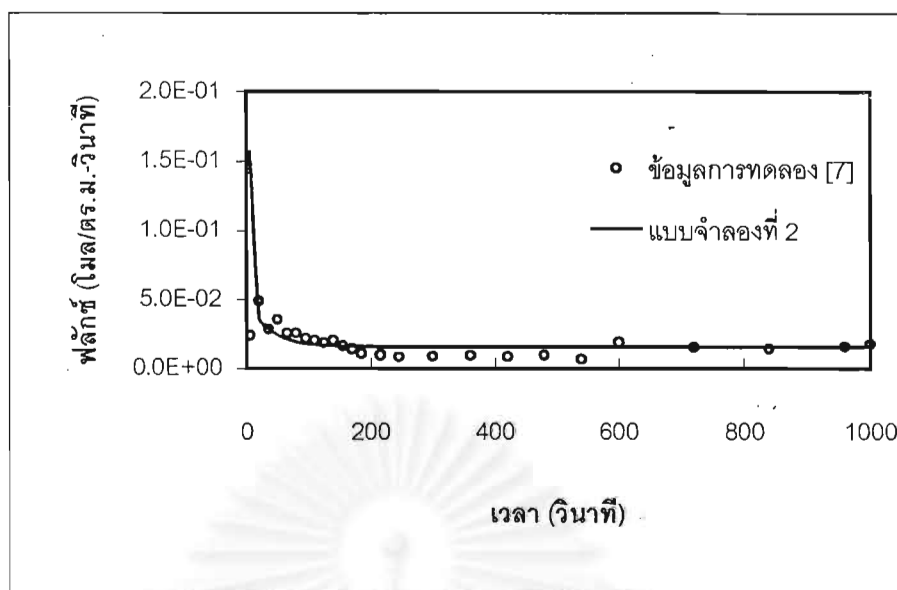
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 5.5-ก เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 2 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่ อุณหภูมิ 25 °ซ



รูปที่ 5.5-ข เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 2 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่ อุณหภูมิ 40 °ซ



รูปที่ 5.5-ค เปรียบเทียบฟลักซ์ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองที่ 2 ด้วย ฟลักซ์จากการทดลองที่ อุณหภูมิ 50 °ซ

สัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบในชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่คำนวณหาดังขั้นตอนในรูปที่ 8.ก พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่เหมาะสมเป็นดังแสดงในสมการ

$$D_i^y = 4 \times 10^{-13} \quad \text{ตร.ม./วินาที} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 25 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.2.ก)$$

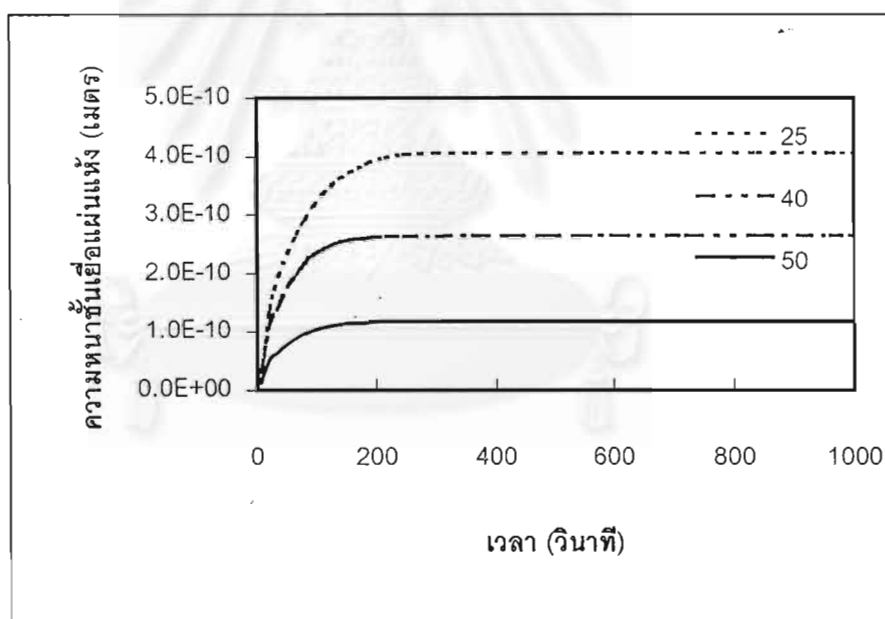
$$D_i^y = 4.12 \times 10^{-13} \quad \text{ตร.ม./วินาที} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 40 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.2.ข)$$

$$D_i^y = 4.13 \times 10^{-13} \quad \text{ตร.ม./วินาที} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 50 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5.2.ค)$$

โดยค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ขององค์ประกอบในชั้นเยื่อแผ่นแห้งมีค่าสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิดแห้งภายใต้ความเครียดจากการทดลองที่ Soontarapa และคณะ [28] ได้มีการศึกษาไว้เท่ากับ 4×10^{-13} ตร.ม./วินาที ค่าความสัมพันธ์ระหว่างฟลักซ์จากการคำนวณกับข้อมูลฟลักซ์จากการทดลองเพอร์เวปเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิดที่ 25, 40 และ 50 °ซ เท่ากับ 0.99, 0.98 และ 0.88 ตามลำดับเช่นเดียวกับแบบจำลองที่ 1 แสดงให้เห็นว่าในกรณีที่ใช้เยื่อแผ่นซึ่งได้ถูกทำให้อิ่มตัวด้วยสารป้อนมาดำเนินการเพอร์เวปเพอเรชันสามารถเลือกใช้แบบจำลองที่ 1 ในการอธิบายกลไกของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันได้ แต่ในกรณีที่ใช้เยื่อแผ่นแห้งมาดำเนินการกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันแบบจำลองที่ 2 นี้จะอธิบายกลไกได้สมเหตุสมผลกว่า

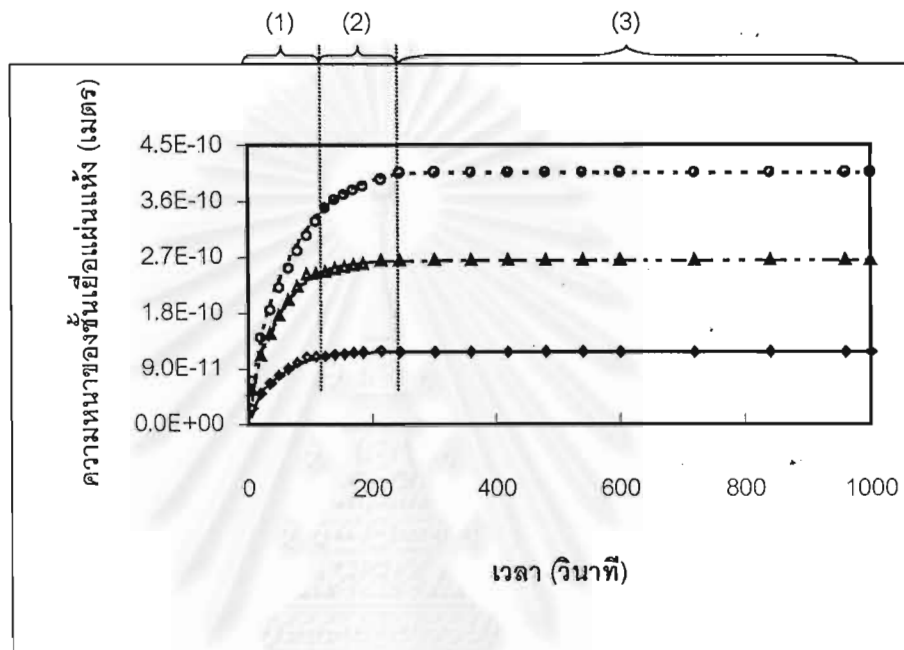
5.2.2 ระยะเวลาของชั้นเยื่อแผ่นแห้ง

ระยะเวลาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เกิดขึ้นในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 °ซ คำนวณโดยใช้แบบจำลองที่ 2 แสดงดังรูปที่ 5.6 เมื่อเริ่มต้นกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันจะเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ผิวของเยื่อแผ่นทางด้านขาออก และตำแหน่งของขอบเขตระหว่างเฟสจะเคลื่อนที่เข้าไปภายในเยื่อแผ่น โดยในช่วงแรกระยะเวลาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนคงที่ในที่สุดโดยความหนามากที่สุดของชั้นเยื่อแผ่นแห้งสำหรับกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 °ซ มีค่าเท่ากับ 4.07×10^{-10} , 2.65×10^{-10} และ 1.17×10^{-10} เมตร ตามลำดับซึ่งเมื่อเทียบกับความหนาของเยื่อแผ่นแห้งเริ่มต้นเท่ากับ 1.35×10^{-4} , 1.04×10^{-4} และ 8×10^{-5} เมตร ตามลำดับ จะเห็นว่าชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เกิดขึ้นน้อยมากจนแทบจะถือว่าไม่มีชั้นเยื่อแผ่นแห้งเกิดขึ้น ทำให้ผลการคำนวณพลักซ์จากแบบจำลองที่ 2 นี้มีค่าใกล้เคียงกับผลการคำนวณจากแบบจำลองที่ 1



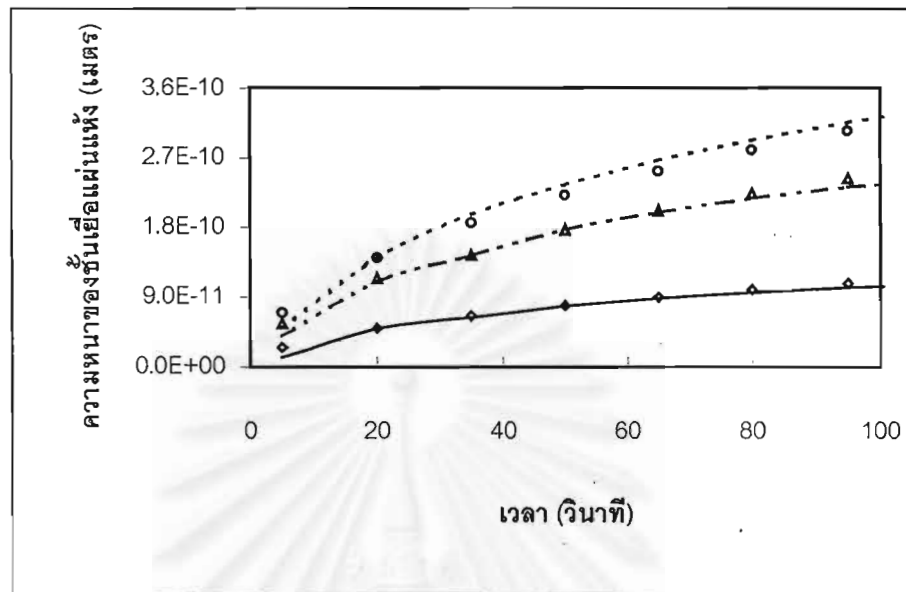
รูปที่ 5.6 ผลการคำนวณการเปลี่ยนแปลงของระยะเวลาเยื่อแผ่นแห้งในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ของน้ำที่อุณหภูมิ 25 40 และ 50 °ซ โดยแบบจำลองที่ 2

ในการพิจารณาการเปลี่ยนแปลงระยะของชั้นของเยื่อแผ่นแห้งในสถานะไม่คงตัวจนถึงสถานะ คงตัวนั้น ควรพิจารณาแบ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็น 3 ช่วงคือ (1) ช่วงสถานะไม่คงตัวซึ่งระยะของชั้นของเยื่อแผ่นแห้งเปลี่ยนแปลงกับเวลาอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์ $y = kt^{1/2}$ ตามสมการของ Crank [26] (2) ช่วงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะไม่คงตัวสู่สถานะคงตัว (transition) และ (3) ช่วงสถานะคงตัวซึ่งระยะของชั้นของเยื่อแผ่นแห้งมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับเวลา สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.7



รูปที่ 5.7 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของระยะเยื่อแผ่นแห้งกับเวลา ในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันซึ่งแบ่งการเปลี่ยนแปลงนี้เป็น 3 ช่วง

ในช่วงสถานะไม่คงตัวซึ่งระยะของชั้นเยื่อแผ่นแห้งมีความสัมพันธ์กับเวลาตามสมการที่ (3.9) สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 ความสัมพันธ์การเปลี่ยนแปลงของระยะเยื่อแผ่นแห้งกับเวลาในช่วงสถานะไม่คงตัวซึ่งเป็นไปตามความสัมพันธ์ $y = kt^{1/2}$

สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของระยะของชั้นของเยื่อแผ่นแห้งกับเวลาได้ดังนี้

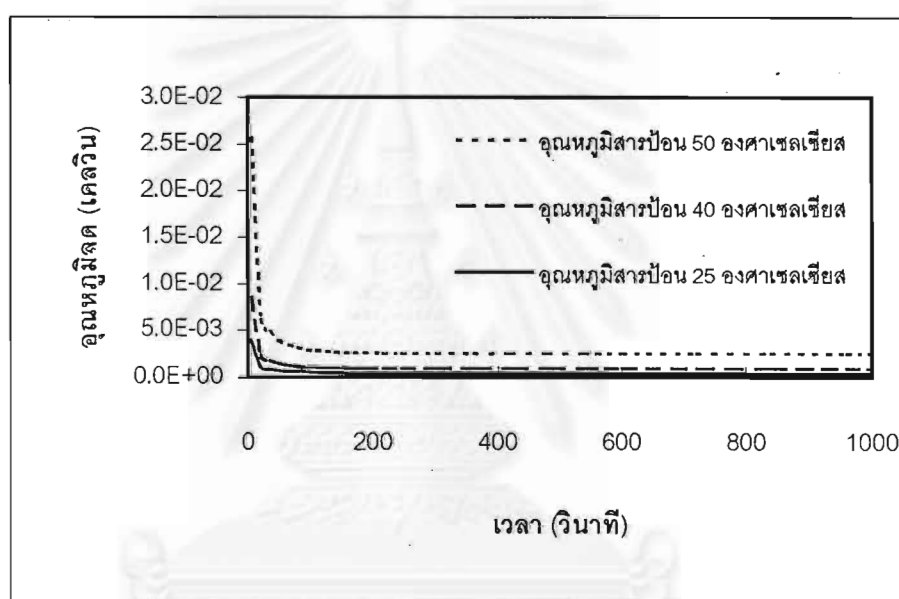
$$y = 3.13 \times 10^{-11} t^{1/2} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 25 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.3.ก)$$

$$y = 2.49 \times 10^{-11} t^{1/2} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 40 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.3.ข)$$

$$y = 1.11 \times 10^{-11} t^{1/2} \quad \text{ที่อุณหภูมิ } 50 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (5.3.ค)$$

5.2.3 อุณหภูมิลดในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน

อุณหภูมิที่เกิดขึ้น ในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันของน้ำผ่านเยื่อแผ่น พอลิอะคริลิก แอซิด ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 50 °ซ ณ เวลาต่างๆจากสมการที่ (3.11) แสดงดังรูปที่ 5.9 โดยได้ผลอย่างเดียวกับแบบจำลองที่ 1 กล่าวคืออุณหภูมิสูงสุดจะเกิดขึ้น ณ เวลาเริ่มต้นของกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันและจะลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นจึงค่อยๆลดลงอย่างช้าๆ และคงที่ในที่สุด และอุณหภูมิในเยื่อแผ่นจะสูงขึ้นตามอุณหภูมิดำเนินการที่สูงขึ้น โดยมีอุณหภูมิสูงสุดไม่เกิน 3×10^{-2} °ซ ซึ่งมีค่าต่ำมาก จึงสามารถใช้สมมุติฐานว่าอุณหภูมิของเยื่อแผ่นมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิสารป้อน



รูปที่ 5.9 อุณหภูมิลดจากกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันของ น้ำผ่านเยื่อแผ่นพอลิอะคริลิก แอซิด ที่อุณหภูมิ 25 40 และ 50 °ซ โดยแบบจำลองที่ 2

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัย และ ข้อเสนอแนะ

6.1 สรุปผลการวิจัย

1. การถ่ายโอนมวลของน้ำผ่านเยื่อแผ่นขอบน้ำเนื้อแน่นพอลิอะคริลิกแอซิด ในกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชัน สามารถใช้กลไกการละลาย-การแพร่ ในการอธิบายได้
2. เกรเดียนท์อุณหภูมิในเยื่อแผ่นมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากโดยมีอุณหภูมิสูงสุดในช่วงเริ่มต้นดำเนินการกระบวนการไม่เกิน 0.03°C จึงสามารถใช้ข้อสมมุติว่าอุณหภูมิของเยื่อแผ่นมีค่าคงที่เท่ากับอุณหภูมิสารป้อน
3. อันตรกิริยาระหว่างน้ำกับพอลิเมอร์ (plasticizing factor) มีค่าเท่ากับ 0.58, 0.6 และ 0.61 ที่อุณหภูมิดำเนินการ 25, 40 และ 50°C การแปรผันตามอุณหภูมิของค่า plasticizing factor เห็นไม่ชัดเจนในกรณีนี้จึงสามารถสมมติให้เป็นค่าคงที่ได้
4. การถ่ายโอนมวลเป็นไปตามกฎของฟิกส์ซึ่งขึ้นกับพารามิเตอร์สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นหลัก เยื่อแผ่นประกอบด้วยชั้นเยื่อแผ่นพองตัวและชั้นเยื่อแผ่นแห้งอยู่ติดต่อกัน สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นเยื่อแผ่นพองตัวคิดแบบขึ้นกับความเข้มข้นขององค์ประกอบแพร่ซึมเชิงเอกซ์โพเนนเชียล แต่สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นเยื่อแผ่นแห้งคิดแบบเป็นค่าคงที่
5. สัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นเยื่อแผ่นพองตัว พิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์ซึ่งเท่ากับ 2.4×10^{-11} , 4.3×10^{-11} และ 4.8×10^{-11} ตร.ม/วินาที ส่วนสัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นเยื่อแผ่นแห้ง มีค่าเท่ากับ 4×10^{-13} , 4.01×10^{-13} และ 4.02×10^{-13} ตร.ม/วินาที ตามลำดับสำหรับอุณหภูมิดำเนินการ 25, 40 และ 50°C ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ที่ความเข้มข้นเป็นศูนย์ในชั้นเยื่อแผ่นพองตัวมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในชั้นเยื่อแผ่นแห้ง ทำให้การแพร่ขององค์ประกอบในชั้นเยื่อแผ่นพองตัวเร็วกว่าการแพร่ในชั้นเยื่อแผ่นแห้ง จึงทำให้เกิดชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่บางมาก และมีการหดเซยอุณหภูมิจากด้านป้อนอย่างรวดเร็วทำให้เกิดอุณหภูมิลดน้อยมาก
6. การเปลี่ยนแปลงของระยะของชั้นเยื่อแผ่นแห้งแบ่งเป็น 3 ช่วง คือ ช่วงสถานะไม่คงตัวซึ่งสามารถอธิบายด้วยความสัมพันธ์ $y = kt^{1/2}$ ได้ ช่วงสถานะคงตัวที่ให้ค่าระยะของชั้นเยื่อแผ่นแห้งคงที่ และช่วงการเปลี่ยนแปลงจากสถานะไม่คงตัวสู่สถานะคงตัว
7. แบบจำลองการดำเนินการกระบวนการเพอร์แวกเพอเรชันเมื่อใช้เยื่อแผ่นที่ทำให้อิมมิดด้วยสารป้อน ทำให้การเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นใกล้ผิวของเยื่อแผ่นด้านขาออก ความหนามากที่สุดของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่สถานะคงตัวเท่ากับ 4.07×10^{-10} , 2.65×10^{-10} และ 1.17×10^{-10} เมตร ซึ่งคิดเป็น 3.01×10^{-6} , 2.55×10^{-6} และ 1.46×10^{-6} เท่าของชั้นเยื่อแผ่นเริ่มต้น (1.35×10^{-4} , 1.04×10^{-4} และ

8×10^{-5} เมตร) สำหรับอุณหภูมิดำเนินการ 25, 40 และ 50 °C ตามลำดับทำให้สามารถคิดว่าการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบจากของเหลวเป็นไอที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่นได้

8. แบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับอธิบายกลไกเพอร์เวปเพอเรชันในกรณีเริ่มจากเยื่อแผ่นที่อิ่มตัวด้วยสารป้อนคือแบบจำลองที่คิดว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่ผิวทางด้านขาออกของเยื่อแผ่น
9. ถ้าใช้เยื่อแผ่นแห้งในการดำเนินกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ควรเลือกใช้แบบจำลองที่พิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นในเยื่อแผ่นในการอธิบายกลไกการถ่ายโอนมวล เนื่องจากเริ่มเกิดการละลายของของเหลวป้อนเข้าไปภายในเยื่อแผ่นเมื่อเริ่มดำเนินกระบวนการ ทำให้ชั้นเยื่อแผ่นแห้งมีนัยสำคัญ

6.2 ข้อเสนอแนะ

1. กรณีที่ทำการศึกษาปรากฏการณ์ถ่ายโอนมวลผ่านเยื่อแผ่นของสารป้อนที่เป็นสององค์ประกอบหรือมากกว่านั้น ควรพิจารณาผลเนื่องจาก coupling effect ขององค์ประกอบเพิ่มเติมเข้าไปในสมการของสัมประสิทธิ์การแพร่
2. เพื่อให้เข้าใจกลไกการถ่ายโอนมวลในกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันมากขึ้นโดยเฉพาะการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นที่ใดควรทำการศึกษาการถ่ายโอนมวลในกรณีที่ใช้เยื่อแผ่นแห้งดำเนินการ

รายการอ้างอิง

1. Feng, X. , and Huang, R.Y.M. Liquid separation by membrane pervaporation : Review .Ind. Eng. Res. 36 (1997) : 1048-1066.
2. Okada, T.,Yoshikawa, M., and Matsuura, T. A study on the pervaporation of ethanol/water mixtures on the basis of pore flow model. J. Membrane Sci. 59 (1991) : 151-168.
3. Mulder, M.H.V., and Smolders, C.A. On the mechanism of separation of ethanol/ water mixtures by pervaporation. I. Calculations of concentration profiles. J. Membrane Sci. 17(1984) : 289-307.
4. Yeom, C.K.,and Huang, R.Y.M. A new method for determining the diffusion coefficients of penetrants through polymeric membranes from steady state pervaporation experiments. J. Membrane Sci. 68 (1992) : 11-20.
5. Okada, T., and Matsuura, T. A new transport model for pervaporation. J. Membrane Sci. 59 (1991) : 133-150.
6. Doong, S.J., Ho, W.S., Mastondrea R.P. Prediction of flux and selectivity in pervaporation through a membrane. J. Membrane Sci. 107(1995) : 129-146.
7. ชันทอง สุนทรภา. ข้อมูลการทดลองเพอร์เมอเรนซ์ของระบบน้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิดที่ไม่ได้ผสมแพร่.
8. Wijmans, J.G., and Baker, R.W. The solution-diffusion model : A review. J. Membrane Sci.107(1995) : 1-21.
9. Zhang, S., and Drioli, E. Pervaporation membranes : Review . Separation Science and Technology. 30 (1995) : 1-31.
10. Brun, J.P., Larchet, C., Melet, R., and Bulvestre, G. Modelling of the pervaporation of binary mixtures through moderately swelling, non – reacting membranes. J. Membrane Sci. 23(1985) : 257 – 283.
11. Tsuyumoto, M., Akita, K., Teramoto, A. Pervaporative transport of aqueous ethanol : Dependence of permeation rates on ethanol concentration and permeate side pressures. Desalination 103(1995) : 211-222.

12. รัตนา จิระรัตนานนท์. กระบวนการแยกด้วยเยื่อแผ่นสังเคราะห์.
กรุงเทพมหานคร : ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
ธนบุรี, (2541) : 219-239.
13. Fels, M., and Huang, R.Y.M. Diffusion coefficients of liquids in polymer membranes by a desorption method. J. Appl. Polym. Sci. 14(1970) : 523 – 536.
14. Huang, R.Y.M., and Rhim, J.W. Theoretical estimations of diffusion coefficients. J. Appl. Polym. Sci. 41(1990) : 535 – 546.
15. Mohammad, S., Taghi, Z. A modified solution – diffusion model for separation of ethanol – water azeotropic mixtures in pervaporation. Chem. Eng. Comm. 153 (1996) : 405-412.
16. Ren, J., Jiang, C. The coupling effect of the thermodynamic swelling process in pervaporation. J. Membrane Sci. 140(1998) : 221–233.
17. Ren, J., Jiang, C. Transport phenomena of chitosan membrane in pervaporation of water - ethanol mixture. Sep. Sci. and Tech. 33(1998) : 517–535.
18. Nakagawa, T. Membrane science and Technology. New York : Marcel Dekken, (1992) : 275-277.
19. McCabe, W.L., Smith, J.C. , and Harriott, P. Unit operation of chemical engineering. 5th ed. New York : McGraw-Hill, (1993) : 864-870.
20. Wijmans, J.G., and Baker, R.W. A simple predictive treatment of the permeation process in pervaporation, J. Membrane Sci. 79 (1993) : 101-113.
21. Ito, A., Watanabe, K., Feng, Y. Swollen-dry-layer model for the pervaporation of ethanol-water solution through hydrophilic membrane. Sep. Sci. and Tech. 30 (1995) : 3045 – 3060.
22. Shieh, J.J., Huang, R.Y.M. A pseudophase – change solution – diffusion model for pervaporation. I. single component permeation. Sep. Sci. and Tech. 33(1998) : 767 – 785.
23. Shieh, J.J., Huang, R.Y.M. A pseudophase – change solution – diffusion model for pervaporation. II. binary mixture permeation. Sep. Sci. and Tech. 33(1998) : 933 – 957.
24. Ito, A., Feng, Y. and Sasaki, H. Temperature drop of feed liquid during pervaporation. J. Membrane Sci. 133(1997) : 95-102.

25. Chang, J.H., Yoo, J.K., Ahn, S.H., Lee, K.H., and Ko, S.M. Simulation of pervaporation process for ethanol dehydration by using pilot test results. Korean J. Chem. Eng. 15(1998) : 28-36.
26. Crank J. The Mathematics of Diffusion. 2nd ed. London. : Oxford University Press, (1975) : 287-325.
27. James, E.M. Physical properties of polymers handbook. NewYork : American institute of physics, (1996): 114.
28. Soontarapa, K., Ohya, H. 2541. การทดลองหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กระจายของไอน้ำผ่านเยื่อแผ่นไฮโดรฟิลิกแห้งภายใต้ความเครียด. การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทยครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ. ประเทศไทย. 17 – 18 ธันวาคม 2541 : 597 – 604.





ภาคผนวก

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการผลอันตะ (Finite different explicit method)

1. สมการการถ่ายโอนมวล

จากกฎข้อที่สองของฟิกส์เขียนได้ด้วยสมการ (ก-1)

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) \quad (\text{ก-1})$$

สัมประสิทธิ์การแพร่เป็นฟังก์ชันของความเข้มข้นเขียนได้ดังสมการ (ก-2)

$$D = D^0 \exp\left(\beta \frac{c}{c^0}\right) \quad (\text{ก-2})$$

แทน (ก-2) ในสมการ (ก-1) จะได้

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ D^0 \exp\left(\beta \frac{c}{c^0}\right) \frac{\partial c}{\partial x} \right\} \quad (\text{ก-3})$$

ขยายทางขวามือของสมการ (ก-3) ได้

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D^0 \left\{ \exp\left(\beta \frac{c}{c^0}\right) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\exp\left(\beta \frac{c}{c^0}\right) \right] \frac{\partial c}{\partial x} \right\} \quad (\text{ก-4})$$

เปลี่ยนเป็นพารามิเตอร์ที่ไม่มีหน่วยจาก (3.13) (3.14) ได้

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial c}{\partial \tau} \frac{D^0}{L^2} \quad (\text{ก-5})$$

$$\frac{\partial c}{\partial x} = \frac{\partial c}{\partial X} \frac{1}{L} \quad (\text{ก-6})$$

$$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 c}{\partial X^2} \frac{1}{L^2} \quad (\text{ก-7})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\exp\left(\beta \frac{c}{c^0}\right) \right] = \frac{\beta}{c^0} \exp\left(\beta \frac{c}{c^0}\right) \frac{\partial c}{\partial X} \frac{1}{L} \quad (\text{ก-8})$$

$$c = c^0 C \quad (\text{ก-9})$$

แทน (ก-6) (ก-7) (ก-8) และ (ก-9) ในสมการที่ (ก-4) จะได้

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} = \exp(\beta C) \frac{\partial^2 C}{\partial X^2} + \beta \exp(\beta C) \left(\frac{\partial C}{\partial X} \right)^2 \quad (\text{ก-10})$$

จาก Taylor series expansion ได้ว่า

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} \approx \frac{(C_m^{n+1} - C_m^n)}{\Delta \tau} \quad (\text{ก-11})$$

$$\frac{\partial C}{\partial X} \approx \frac{(c_{m+1}^n - c_{m-1}^n)}{2\Delta X} \quad (\text{ก-12})$$

$$\frac{\partial^2 C}{\partial X^2} \approx \frac{(C_{m+1}^n - 2C_m^n + C_{m-1}^n)}{\Delta X^2} \quad (\text{ก-13})$$

แทน (ก-11) (ก-12) และ (ก-13) ในสมการ (ก-10) ได้

$$C_m^{n+1} = C_m^n + \Delta \tau \exp(\beta C_m^n) \frac{(C_{m+1}^n - 2C_m^n + C_{m-1}^n)}{\Delta X^2} + \beta \Delta \tau \exp(\beta C_m^n) \frac{(C_{m+1}^n - C_{m-1}^n)^2}{2\Delta X} \quad (\text{ก-14})$$

2. สมการการถ่ายโอนความร้อน

จากกฎข้อที่สองของฟูเรียร์เขียนได้ด้วยสมการ (ก-15)

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (\text{ก-15})$$

จาก Taylor series expansion ได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} \approx \frac{(T_m^{n+1} - T_m^n)}{\Delta t} \quad (\text{ก-16})$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \approx \frac{(T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n)}{\Delta x^2} \quad (\text{ก-17})$$

แทน (ก-16) และ (ก-17) ในสมการ (ก-15) ได้

$$T_m^{n+1} = T_m^n + \lambda \Delta t \frac{(T_{m+1}^n - 2T_m^n + T_{m-1}^n)}{\Delta x^2} \quad (\text{ก-18})$$

ภาคผนวก ข
ข้อมูลและการคำนวณข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลอง

ตารางที่ ข.1 ข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองของกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันของระบบ น้ำ - พอลิอะคริลิกแอซิด ที่ 25 °ซ

SWOLLEN RATIO (SR)	0.092	กรัมน้ำ / กรัมเยื่อแผ่นแห้ง
ความหนาของเยื่อแผ่น	1.35×10^{-4}	เมตร.
น้ำหนักแห้งของเยื่อแผ่น	0.3501	กรัม
พื้นที่ผิวเยื่อแผ่น	2.3×10^{-3}	ตร.ม.

ตารางที่ ข.2 ข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองของกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันของระบบ น้ำ - พอลิอะคริลิกแอซิด ที่ 40 °ซ

SWOLLEN RATIO (SR)	0.092	กรัมน้ำ / กรัมเยื่อแผ่นแห้ง
ความหนาของเยื่อแผ่น	1.04×10^{-4}	เมตร.
น้ำหนักแห้งของเยื่อแผ่น	0.3487	กรัม
พื้นที่ผิวเยื่อแผ่น	2.3×10^{-3}	ตร.ม.

ตารางที่ ข.3 ข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองของกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชันของระบบ น้ำ - พอลิอะคริลิกแอซิด ที่ 50 °ซ

SWOLLEN RATIO (SR)	0.094	กรัมน้ำ / กรัมเยื่อแผ่นแห้ง
ความหนาของเยื่อแผ่น	8.0×10^{-5}	เมตร.
น้ำหนักแห้งของเยื่อแผ่น	0.3554	กรัม
พื้นที่ผิวเยื่อแผ่น	2.3×10^{-3}	ตร.ม.

2. ความเข้มข้นของน้ำอิมิตัวเริ่มต้นในเยื่อแผ่น

- สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 25 °ซ

$$c^o = \frac{0.092}{0.3501} \cdot \frac{18}{2.3 \times 10^{-3}} \cdot 1.35 \times 10^{-4}$$

$$= 5911 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

- สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 40 °ซ

$$c^o = 7673 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

- สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 50 °ซ

$$c^o = 9975 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

3. ความเข้มข้นของน้ำที่ขอบเขตระหว่างเฟสในกรณีเกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น

- สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 25 °ซ

ความเข้มข้นขององค์ประกอบ i ในเฟสไอที่ขอบเขตระหว่างเฟสคำนวณจาก

$$c_i^v = \frac{p_i^o(T)}{RT}$$

$$= 1.33 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

จากสมการที่ (3.5)

$$\dot{m}_i^l H_i^l = \dot{m}_i^v H_i^v$$

แทนปริมาณขององค์ประกอบ i ที่ขอบเขตระหว่างเฟสด้วยความเข้มข้น

$$c_i^{l(1)} = \frac{c_i^v H^v}{H^l}$$

$$= 31.24 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

- สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 40 °ซ

$$c_i^v = 2.90 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

$$c_i^{l(1)} = 40.74 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

- สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 50 °ซ

$$c_i^v = 4.62 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

$$c_i^{l(1)} = 49.17 \text{ โมล / ลบ.ม.}$$

ภาคผนวก ค.
ข้อมูลฟลักซ์จากการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ข้อมูลฟลักซ์เพอร์เวปเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิสาร
ป้อน 25 °ซ [7]

เวลา (วินาที)	ฟลักซ์ $\times 10^3$ (ไมล / ตร.ม. - วินาที)
5	23.40
20	3.27
35	2.54
50	2.00
65	1.82
80	1.82
95	1.63
110	1.45
125	1.45
140	1.45
155	1.45
170	1.63
185	1.45
215	1.45
245	1.54
300	1.36
360	1.36
420	1.36
480	1.36
540	1.36
600	1.27
720	1.36
840	1.27
960	1.27
1000	1.31

ตารางที่ ค.2 ข้อมูลฟลักซ์เทอร์เวปเพอร์เช็นของระบบ น้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิสาร
ป้อน 40 °ซ [7]

เวลา (วินาที)	ฟลักซ์ $\times 10^3$ (ไมล / ตร.ม. - วินาที)
5	39.50
20	7.21
35	6.18
50	8.59
65	6.18
80	7.21
95	5.67
110	5.51
125	5.17
140	6.03
155	6.38
170	6.03
185	5.51
215	5.08
250	4.91
300	4.84
360	4.58
420	4.32
480	4.32
540	4.34
600	4.25
720	4.09
840	4.00
960	4.00
1000	3.73

ตารางที่ ค.3 ข้อมูลฟลักซ์เทอร์เวปเพอเรนซ์ของระบบ น้ำ-พอลิอะคริลิกแอซิด ที่อุณหภูมิสาร
ป้อน 50 °ซ [7]

เวลา (วินาที)	ฟลักซ์ $\times 10^3$ (ไมล / ตร.ม. - วินาที)
5	23.8
20	48.9
35	28.6
50	35.3
65	25.2
80	25.2
95	21.8
110	20.2
125	18.7
140	20.5
155	16.6
170	14.1
185	10.9
215	9.60
245	8.43
300	8.69
360	9.16
420	8.58
480	9.74
540	6.44
600	18.9
720	15.3
840	14.3
960	15.8
1000	17.5

ภาคผนวก ง.
ผลการคำนวณฟลักซ์

ตารางที่ ง.1 ผลการคำนวณฟลักซ์กระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันจากแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 25 °ซ

เวลา (วินาที)	ฟลักซ์ $\times 10^3$ (ไมล / ตร.ม. - วินาที)	
	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2
5	18.00	18.00
20	3.50	3.49
35	2.60	2.59
50	2.28	2.27
65	2.00	2.00
80	1.82	1.82
95	1.69	1.69
110	1.59	1.59
125	1.52	1.52
140	1.47	1.47
155	1.43	1.43
170	1.40	1.40
185	1.37	1.37
215	1.34	1.34
245	1.32	1.32
300	1.31	1.31
360	1.31	1.31
420	1.31	1.31
480	1.31	1.31
540	1.31	1.31
600	1.31	1.31
720	1.31	1.31
840	1.31	1.31
960	1.31	1.31
1000	1.31	1.31

ตารางที่ ง.2 ผลการคำนวณฟลักซ์กระบวนการเพอร์เวปเพอเรชันจากแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 40 °ซ

เวลา (วินาที)	ฟลักซ์ $\times 10^3$ (โมล / ตร.ม. - วินาที)	
	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2
5	38.50	38.50
20	10.20	10.20
35	8.05	8.04
50	6.56	6.55
65	5.82	5.81
80	5.34	5.33
95	5.01	5.00
110	4.82	4.81
125	4.68	4.67
140	4.56	4.55
155	4.51	4.50
170	4.48	4.47
185	4.45	4.44
215	4.40	4.39
250	4.40	4.39
300	4.40	4.39
360	4.37	4.36
420	4.37	4.36
480	4.37	4.36
540	4.37	4.36
600	4.37	4.36
720	4.37	4.36
840	4.37	4.36
960	4.37	4.36
1000	4.37	4.36

ตารางที่ ง.3 ผลการคำนวณฟลักซ์กระบวนการเพอร์เวปเอชันจากแบบจำลองที่ 1 และแบบจำลองที่ 2 สำหรับอุณหภูมิสารป้อน 50 °ซ

เวลา (วินาที)	ฟลักซ์ $\times 10^2$ (ไมล / ตร.ม. - วินาที)	
	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2
5	15.60	15.60
20	3.69	3.68
35	2.90	2.89
50	2.37	2.36
65	2.10	2.09
80	1.93	1.93
95	1.81	1.81
110	1.74	1.74
125	1.69	1.69
140	1.65	1.65
155	1.63	1.63
170	1.62	1.62
185	1.61	1.61
215	1.59	1.59
245	1.59	1.59
300	1.59	1.59
360	1.58	1.58
420	1.58	1.58
480	1.58	1.58
540	1.58	1.58
600	1.58	1.58
720	1.58	1.58
840	1.58	1.58
960	1.58	1.58
1000	1.58	1.58

ภาคผนวก จ.

ผลการคำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นที่แห้ง

ตารางที่ จ.1 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาสำหรับกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชัน ที่อุณหภูมิ 25 °ซ

เวลา (วินาที)	ความหนาชั้นเยื่อแผ่นแห้ง $\times 10^{11}$ (เมตร)
5	1.5
20	14.0
35	19.6
50	23.5
65	26.7
80	29.3
95	31.6
110	33.6
125	35.1
140	36.3
155	37.3
170	38.1
185	38.9
215	39.8
245	40.4
300	40.7
360	40.7
420	40.7
480	40.7
540	40.7
600	40.7
720	40.7
840	40.7
960	40.7
1000	40.7

ตารางที่ ๑.2 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาสำหรับ
กระบวนการเพอร์แวกเพอเรชั่น ที่อุณหภูมิ 40 °ซ

เวลา (วินาที)	ความหนาชั้นเยื่อแผ่นแห้ง $\times 10^{11}$ (เมตร)
5	3.0
20	11.4
35	14.4
50	17.7
65	19.9
80	21.7
95	23.2
110	24.1
125	24.8
140	25.4
155	25.7
170	25.9
185	26.1
215	26.4
250	26.4
300	26.4
360	26.5
420	26.5
480	26.5
540	26.5
600	26.5
720	26.5
840	26.5
960	26.5
1000	26.5

ตารางที่ ๑.3 ผลการคำนวณความหนาของชั้นเยื่อแผ่นแห้งที่เปลี่ยนแปลงกับเวลาสำหรับ กระบวนการเพอร์เวปเพอเรนซ์ ที่อุณหภูมิ 50 °ซ

เวลา (วินาที)	ความหนาชั้นเยื่อแผ่นแห้ง $\times 10^{11}$ (เมตร)
5	1.2
20	5.0
35	6.4
50	7.8
65	8.8
80	9.6
95	10.2
110	10.6
125	11.0
140	11.2
155	11.4
170	11.4
185	11.5
215	11.7
245	11.7
300	11.7
360	11.7
420	11.7
480	11.7
540	11.7
600	11.7
720	11.7
840	11.7
960	11.7
1000	11.7

ภาคผนวก จ.

ผลการคำนวณอุณหภูมิผลิตสำหรับกระบวนการเพอร์แวกเปเปอร์เรชั่น

ตารางที่ จ.1 ผลการคำนวณอุณหภูมิผลิตสำหรับกระบวนการเพอร์แวกเปเปอร์เรชั่น ที่อุณหภูมิสารป้อน 25 °ซ

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิผลิต $\times 10^{-4}$ (เคลวิน)	
	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2
5	39.00	39.00
20	10.70	10.70
35	8.19	8.18
50	6.89	6.88
65	6.05	6.04
80	5.50	5.49
95	5.11	5.10
110	4.81	4.80
125	4.60	4.59
140	4.44	4.44
155	4.32	4.32
170	4.23	4.23
185	4.14	4.14
215	4.05	4.05
245	3.99	3.99
300	3.96	3.96
360	3.96	3.96
420	3.96	3.96
480	3.96	3.96
540	3.96	3.96
600	3.96	3.96
720	3.96	3.96
840	3.96	3.96
960	3.96	3.96
1000	3.96	3.96

ตารางที่ ๑.2 ผลการคำนวณอุณหภูมิลดสำหรับกระบวนการเพอร์แวกเปอเรชัน ที่อุณหภูมิสาร
ป้อน 40 °ซ

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิลด $\times 10^{-4}$ (เคลวิน)	
	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2
5	85.00	84.90
20	22.50	22.50
35	17.80	17.80
50	14.50	14.50
65	12.90	12.90
80	11.80	11.80
95	11.10	11.10
110	10.60	10.60
125	10.30	10.30
140	10.10	10.10
155	9.96	9.95
170	9.90	9.89
185	9.83	9.82
215	9.72	9.71
245	9.72	9.71
300	9.72	9.71
360	9.65	9.64
420	9.65	9.64
480	9.65	9.64
540	9.65	9.64
600	9.65	9.64
720	9.65	9.64
840	9.65	9.64
960	9.65	9.64
1000	9.65	9.64

ตารางที่ ๓.3 ผลการคำนวณอุณหภูมิลดสำหรับกระบวนการเพอร์เวปเพอเรชั่น ที่อุณหภูมิสาร
ป้อน 50 °ซ

เวลา (วินาที)	อุณหภูมิลด $\times 10^{-3}$ (เคลวิน)	
	แบบจำลองที่ 1	แบบจำลองที่ 2
5	25.60	25.60
20	6.06	6.05
35	4.76	4.75
50	3.89	3.89
65	3.45	3.45
80	3.17	3.17
95	2.97	2.97
110	2.86	2.86
125	2.77	2.77
140	2.71	2.71
155	2.67	2.67
170	2.65	2.65
185	2.64	2.64
215	2.61	2.61
245	2.61	2.61
300	2.61	2.61
360	2.61	2.61
420	2.61	2.61
480	2.61	2.61
540	2.61	2.61
600	2.61	2.61
720	2.61	2.61
840	2.61	2.61
960	2.61	2.61
1000	2.61	2.61

ภาคผนวก ข
โปรแกรมการคำนวณตามแบบจำลอง

1. โปรแกรมสำหรับแบบจำลองที่ 1 (กรณีเกิดการเปลี่ยนแปลงเฟสที่ผิวด้านขาออกของเยื่อแผ่น)

```
Private Sub Form_Load()
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
    Const R = 0.000082057
```

```
    Const t = 1000
```

```
    Const m = 1000
```

```
    Const n = 1000
```

```
    Const Tconduct = 0.071
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
    Dim Temp(1000, 1000), Temp_drop(1000) As Variant
```

```
    Dim i, j, k, v As Integer
```

```
    Dim D0, flux_liquid(1000) As Variant
```

```
    Dim Dx, Dt, DimDx, DinDt, Dimc0, e As Variant
```

```
    Dim Dimc(1000, 1000), c(1000, 1000), D(1000, 1000) As Variant
```

```
    Dim flux(1000), time(1000) As Variant
```

```
    Dim T0, L, Latent, C0 As Variant
```

```
////////////////////////////////////////////////////////////////
```

```
Temp_data = 25
```

```
Select Case Temp_data
```

```
Case 25
```

```
    Temp0 = 298
```

```
    L = 0.000135
```

```
    Latent = 135.7
```

```
    C0 = 5911
```

```
    flux_data = 0.00131
```

```
Case 40
```

```
    Temp0 = 313
```

```
    L = 0.000104
```

```
    Latent = 133.6
```

```
    C0 = 7673
```

```
    flux_data = 0.00437
```


Case 50

Temp0 = 323

L = 0.00008

Latent = 131.9

C0 = 9975

flux_data = 0.0158

End Select

'////////////////////////////////////

Dimc0 = C0 / C0

Dx = L / m

Dt = t / n

For i = 0 To m

Dimc(i, 0) = Dimc0

Next i

For j = 1 To n

Dimc(0, j) = Dimc0

Dimc(m, j) = 0

Next j

For i = 1 To m - 1

For j = 1 To n

Dimc(i, j) = Dimc0

Next j

Next i

For k = 1 To 10000

beta = 0

For v = 1 To 10000

D0 = 1E-16

Dimx = 1

Dimt = D0 * t / L ^ 2

```

DimDx = Dimx / m
DimDt = Dimt / n
'-----

CONC1
For j = 0 To n
flux_liquid(j) = D0 * Exp(beta * (c(m - 1, j) + c(m, j)) / (2 * C0)) * (c(m - 1, j) - c(m, j)) / Dx
Next j
e = Abs(flux_liquid(n) - flux_data) / flux_data
If e <= 0.001 Then GoTo Line1
D0 = D0 + 0.0000000000000001
Next v
beta = beta + 0.001
Next k
Line1:
'-----

TEMP1
T0 = 0
For j = 0 To n
time(j) = T0
T0 = T0 + Dt
Next j
'-----

Debug.Print "-----"
Debug.Print " time      flux      Temp drop "
Debug.Print "-----"

Debug.Print time(5), flux_liquid(1), Temp_drop(1)
Debug.Print time(20), flux_liquid(20), Temp_drop(20)
Debug.Print time(35), flux_liquid(35), Temp_drop(35)
Debug.Print time(50), flux_liquid(50), Temp_drop(50)
Debug.Print time(65), flux_liquid(65), Temp_drop(65)
Debug.Print time(80), flux_liquid(80), Temp_drop(80)
Debug.Print time(95), flux_liquid(95), Temp_drop(95)
Debug.Print time(110), flux_liquid(110), Temp_drop(110)
Debug.Print time(125), flux_liquid(125), Temp_drop(125)
Debug.Print time(140), flux_liquid(140), Temp_drop(140)

```

```

Debug.Print time(155), flux_liquid(155), Temp_drop(155)
Debug.Print time(170), flux_liquid(170), Temp_drop(170)
Debug.Print time(185), flux_liquid(185), Temp_drop(185)
Debug.Print time(215), flux_liquid(215), Temp_drop(215)
Debug.Print time(245), flux_liquid(245), Temp_drop(245)
Debug.Print time(300), flux_liquid(300), Temp_drop(300)
Debug.Print time(360), flux_liquid(360), Temp_drop(360)
Debug.Print time(420), flux_liquid(420), Temp_drop(420)
Debug.Print time(480), flux_liquid(480), Temp_drop(480)
Debug.Print time(540), flux_liquid(540), Temp_drop(540)
Debug.Print time(600), flux_liquid(600), Temp_drop(600)
Debug.Print time(720), flux_liquid(720), Temp_drop(720)
Debug.Print time(840), flux_liquid(840), Temp_drop(840)
Debug.Print time(960), flux_liquid(960), Temp_drop(960)
Debug.Print time(1000), flux_liquid(1000), Temp_drop(1000)

Debug.Print "-----"
Debug.Print "D0", D0, "beta", beta
Debug.Print "-----"
End Sub

```

```
Private Sub CONC1()
```

```
For j = 1 To n
```

```
For i = m - 1 To 1 Step -1
```

```
c1 = Dimc(i - 1, j - 1)
```

```
c2 = Dimc(i, j - 1)
```

```
c3 = Dimc(i + 1, j - 1)
```

```
c4 = c3 - 2 * c2 + c1
```

```
c5 = c3 - c1
```

```
c6 = c4 / DimDx ^ 2
```

```
c7 = (c5 / (2 * DimDx)) ^ 2
```

```
c8 = Exp(beta * c2)
```

```
c9 = c2 + DimDt * c8 * c6 + beta * DimDt * c8 * c7
```

```
Dimc(i, j) = c9
```

```
Next i
```

```
Next j
```

```

'-----
For j = 0 To n
  For i = 0 To m
    c(i, j) = Dimc(i, j) * CO
  Next i
Next j
'-----

```

End Sub

Private Sub TEMP1()

```

  For i = 0 To m
    Temp(i, 0) = Temp0
  Next i
  For j = 1 To n
    Temp(0, j) = Temp0
  Next j
'-----

```

For j = 1 To n

```

  For i = 1 To m - 1
    t1 = Temp(i - 1, j - 1)
    t2 = Temp(i, j - 1)
    t3 = Temp(i + 1, j - 1)
    t4 = t3 - 2 * t2 + t1
    t6 = Dt * Tconduct * t4 / Dx ^ 2
    Temp(i, j) = t2 + t6
  Next i

```

Next i

Temp(m, j) = Temp(m - 1, j) - flux_liquid(j) * Latent * Dx / Tconduct

Temp_drop(j) = Temp(0, j) - Temp(m, j)

Next j

End Sub

2. โปรแกรมสำหรับแบบจำลองที่ 2 (กรณีเกิดการเปลี่ยนเฟสภายในเยื่อแผ่น)

```
Private Sub Form_Load()
```

```
'////////////////////////////////////
```

```
Const R = 0.000082057
```

```
Const t = 1000
```

```
Const m = 1000
```

```
Const n = 1000
```

```
'////////////////////////////////////
```

```
Dim i, j, k, v As Integer
```

```
Dim Dx, Dt, Dy(1000), c(1000, 1000), Dimc(10, 1000) As Variant
```

```
Dim DimDx, DimDt, DimDy(1000) As Variant
```

```
Dim Dimc0, Dimcl_l, Dimcl_v As Variant
```

```
Dim D0, Dv, beta As Variant
```

```
Dim time(1000), flux_liquid(1000), flux_vapor(1000) As Variant
```

```
Dim e As Variant
```

```
Dim Temp(1000, 1000), Temp_drop(1000) As Variant
```

```
Dim Temp0, L, Latent, pl, C0, cl_l, cl_v As Variant
```

```
'////////////////////////////////////
```

```
Temp_data = 25
```

```
Select Case Temp_data
```

```
Case 25
```

```
Temp0 = 298
```

```
L = 0.000135
```

```
Latent = 135.7
```

```
pl = 0.03269
```

```
C0 = 5911
```

```
cl_l = 31.24 'at interphase
```

```
cl_v = 1.33 'at interphase
```

```
flux_data = 0.00131
```

```
Case 40
```

```
Temp0 = 313
```

```
L = 0.000104
```

```
Latent = 133.6
```

```
pl = 0.07454
```

$C0 = 7673$
 $cl_l = 40.74$
 $cl_v = 2.9$
 $flux_data = 0.00437$

Case 50

$Temp0 = 323$
 $L = 0.00008$
 $Latent = 131.9$
 $pI = 0.1225$
 $C0 = 9975$
 $cl_l = 49.17$
 $cl_v = 4.62$
 $flux_data = 0.0158$

End Select

'////////////////////////////////////'

Select Case Temp_data

Case 25

$D0 = 0.00000000024$

$beta = 0.58$

Case 40

$D0 = 0.00000000043$

$beta = 0.6$

Case 50

$D0 = 0.00000000048$

$beta = 0.61$

End Select

'////////////////////////////////////'

 $Dimcl_l = cl_l / C0$

$Dimcl_v = cl_v / C0$

$Dimc0 = C0 / C0$

$Dx = L / m$

$Dt = t / n$

```

For i = 0 To m
    Dimc(i, 0) = 0
Next i
For j = 1 To n
    Dimc(0, j) = Dimc0
    c(m, j) = 0
Next j

```

```

-----
For i = 1 To m
    For j = 1 To n
        c(i, j) = 0
    Next j
Next i

```

```

-----
Dimx = 1
Dimt = D0 * t / L ^ 2

```

```

-----
DimDx = Dimx / m
DimDt = Dimt / n

```

```

For i = 1 To m - 1
    For j = 1 To n
        Dimc(i, j) = Dimc0
    Next j
Next i

```

```

DRYPT

```

```

Line1:

```

```

For j = 2 To n
    Dy(j) = Dy(j - 1)
For k = 1 To 10000
    DimDy(j) = Dy(j) / L
CONC2
flux_liquid(j) = D0 * Exp(beta * (c(m - 1, j) + cl_l) / (2 * C0)) * (c(m - 1, j) - cl_l) / (Dx - Dy(j))
flux_vapor(j) = Dv * (cl_v - 0) / (Dy(j) * R * Temp)

```

```

e = Abs(flux_vapor(j) - flux_liquid(j)) / flux_liquid(j)
If e <= 0.001 Then GoTo Line2
Dy(j) = Dy(j) + 0.00000000000001
Next k
Line2:
Next j
'-----

TEMP2
T0 = 0
For j = 0 To n
  time(j) = T0
  T0 = T0 + Dt
Next j
'-----

Debug.Print "-----"
Debug.Print " time          flux          dry path          Temp drop "
Debug.Print "-----"

Debug.Print time(5), flux_vapor(5), Dy(5), Temp_drop(5)
  Debug.Print time(20), flux_vapor(20), Dy(20), Temp_drop(20)
  Debug.Print time(35), flux_vapor(35), Dy(35), Temp_drop(35)
  Debug.Print time(50), flux_vapor(50), Dy(50), Temp_drop(50)
  Debug.Print time(65), flux_vapor(65), Dy(65), Temp_drop(65)
  Debug.Print time(80), flux_vapor(80), Dy(65), Temp_drop(80)
  Debug.Print time(95), flux_vapor(95), Dy(95), Temp_drop(95)
  Debug.Print time(110), flux_vapor(110), Dy(110), Temp_drop(110)
  Debug.Print time(125), flux_vapor(125), Dy(125), Temp_drop(125)
  Debug.Print time(140), flux_vapor(140), Dy(140), Temp_drop(140)
  Debug.Print time(155), flux_vapor(155), Dy(155), Temp_drop(155)
  Debug.Print time(170), flux_vapor(170), Dy(170), Temp_drop(170)
  Debug.Print time(185), flux_vapor(185), Dy(185), Temp_drop(185)
  Debug.Print time(215), flux_vapor(215), Dy(215), Temp_drop(215)
  Debug.Print time(245), flux_vapor(245), Dy(245), Temp_drop(245)
  Debug.Print time(300), flux_vapor(300), Dy(300), Temp_drop(300)
  Debug.Print time(360), flux_vapor(360), Dy(360), Temp_drop(360)
  Debug.Print time(420), flux_vapor(420), Dy(420), Temp_drop(420)

```



```

Debug.Print time(480), flux_vapor(480), Dy(480), Temp_drop(480)
Debug.Print time(540), flux_vapor(540), Dy(540), Temp_drop(540)
Debug.Print time(600), flux_vapor(600), Dy(600), Temp_drop(600)
Debug.Print time(720), flux_vapor(720), Dy(720), Temp_drop(720)
Debug.Print time(840), flux_vapor(840), Dy(840), Temp_drop(840)
Debug.Print time(960), flux_vapor(960), Dy(960), Temp_drop(960)
Debug.Print time(1000), flux_vapor(1000), Dy(1000), Temp_drop(1000)
Debug.Print "-----"
Debug.Print "D0", D0, "beta", beta
Debug.Print "Dv", Dv
End Sub

Private Sub DRYPT()
Dy(1) = 0
Dv = 0.000000000000001
For k = 1 To 10000
flux_liquid(1) = D0 * Exp(beta * (C0 + cl_l) / (2 * C0)) * (C0 - cl_l) / (Dx - Dy(1))
flux_vapor(1) = Dv * (cl_v - 0) / (Dy(1) * R * Temp)
Dy(1) = Dy(1) + 0.000000000000001
e = Abs(flux_vapor(1) - flux_liquid(1)) / flux_liquid(1)
Debug.Print e, Dy(1)
If e <= 0.001 Then GoTo Line1
Next k

End Sub

Private Sub CONC2()
For i = 1 To m - 1
c1 = Dimc(i - 1, j - 1)
c2 = Dimc(i, j - 1)
c3 = Dimc(i + 1, j - 1)
c4 = c3 - 2 * c2 + c1
c5 = c3 - c1
c6 = c4 / DimDx ^ 2
c7 = (c5 / (2 * DimDx)) ^ 2

```

```

c8 = Exp(beta * c2)
c9 = c2 + DimDt * c8 * c6 + beta * DimDt * c8 * c7
Dimc(i, j) = c9
c(i, j) = Dimc(i, j) * C0
Next i
Dimc(m, j) = Dimc(m - 1, j) - ((Dimc(m - 1, j) - DimcL) / (DimDx - DimDy(j))) * DimDx

```

End Sub

Private Sub TEMP2()

```

For i = 0 To m
    Temp(i, 0) = Temp0
Next i
For j = 1 To n
    Temp(0, j) = Temp0
Next j

```

For j = 1 To n

```

For i = 1 To m - 1
    t1 = Temp(i - 1, j - 1)
    t2 = Temp(i, j - 1)
    t3 = Temp(i + 1, j - 1)
    t4 = t3 - 2 * t2 + t1
    t6 = Dt * Tconduct * t4 / Dx ^ 2
    Temp(i, j) = t2 + t6

```

Next i

```

Temp(m, j) = Temp(m - 1, j) - flux_liquid(j) * Latent * (Dx - Dy(j)) / Tconduct

```

```

Temp_drop(j) = Temp(0, j) - Temp(m, j)

```

Next j

End Sub

ประวัติผู้วิจัย

นายรัชพงศ์ ชูศรี เกิดวันที่ 28 ธันวาคม พ.ศ. 2516 ที่อำเภอเมือง จังหวัดสิงห์บุรี สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาเทคโนโลยีอาหาร ภาควิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร ในปีการศึกษา 2539 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2540



จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย