

การนำกลับไตรโคลอโรเอทรีนและโทลูอินโดยกระบวนการเพอร์เวเพอร์ชัน

นาย นฤเทพ เล็กศิริไฉ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-4274-6

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

RECOVERY OF TRICHLOROETHYLENE AND TOLUENE USING
PERVAPORATION PROCESS

Mr. Naruetep Lecksiwilai

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003


ISBN 974-17-4274-6

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การนำกลับไตรโคลอโรเอทธิลีนและโทลูอินโดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน
โดย นายนฤเทพ เล็กศิริไว
สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยรับนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

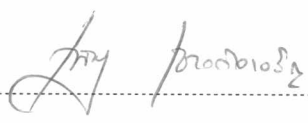

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(อาจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. สุรพล สายพานิช)


..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ)

นฤเทพ เล็กศิริไธ : การนำกลับไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอิน โดยกระบวนการเพอร์เวเพอ-
เรชัน (Recovery of Trichloroethylene and Toluene using Pervaporation Process)
อ.ที่ปรึกษา : อ.ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล , 129 หน้า. ISBN 974-17-4274-6.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำกลับไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอิน โดยกระบวนการเพอร์เว-
เพอเรชันเนื่องจากผลของอุณหภูมิ (40-70 องศาเซลเซียส) และอัตราการไหลของสารป้อน (3.3-
25.1 ล./ชม.) โดยทำการทดลอง 2 ขั้นตอน ได้แก่การทดลองการดูดซึมสารละลายอินทรีย์ในยาง
ซิลิโคนเพื่อหาค่าความสามารถของการละลาย และการทดลองแยกไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอิน
ด้วยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันขนาดชุดทดสอบและเยื่อแผ่นซิลิโคนแบบท่อ เพื่อศึกษา
ประสิทธิภาพการแยก พลั๊กซ์ของเพอร์มิเอท ความสามารถในการซึมผ่าน ความสามารถในการ
เลือก และ ค่าดัชนีการแยกของกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน ซึ่งใช้เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของ
ระบบ โดยแบบจำลองการละลาย-การแพร่ จากผลการทดลองดูดซึมสารละลายอินทรีย์ในยาง
ซิลิโคน พบว่าไตรคลอโรเอทิลีนถูกดูดซึมได้มากกว่าโทลูอิน และจากการทดลองแยกสารละลาย
ไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอิน พบว่าสามารถแยกได้สูงสุดร้อยละ 98 และ 97 และความสามารถ
ของการซึมผ่านมีค่าสูงสุด 7.2×10^{-9} และ 7.1×10^{-9} ตร.ม./ชม. สำหรับไตรคลอโรเอทิลีนและ
โทลูอิน ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิและอัตราการไหลของสารป้อนสูงขึ้น โดยที่พลั๊กซ์
ของสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นเล็กน้อยอยู่ในช่วง 4-8 กรัม/ตร.ม.-ชม. แต่พลั๊กซ์ของน้ำสูงขึ้นอย่างมาก
ประมาณ 2-3 เท่าเมื่ออุณหภูมิของสารป้อนสูงขึ้น ซึ่งมีผลต่อค่าการเลือกที่ได้ลดลง และเมื่อ
พิจารณาหาสภาวะที่เหมาะสมพบว่า ที่สภาวะการทดลองอุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 50 องศา
เซลเซียส และอัตราไหลของสารป้อนสูงสุดเท่ากับ 25.1 ล./ชม. มีค่าดัชนีการแยกโดยกระบวนการ
เพอร์เวเพอเรชันสูงที่สุด

สรุปได้ว่ากระบวนการเพอร์เวเพอเรชันแยกสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนได้ดีกว่าการ
แยกสารละลายโทลูอินเล็กน้อย โดยที่ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารป้อนทำให้
ประสิทธิภาพการแยกสูงขึ้น

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่อนิสิต หฤเทพ เล็กศิริไธ

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ศิริมา

ปีการศึกษา 2546

##4370353421 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD : PERVAPORATION / ORGANIC SOLVENT / TOLUENE /

TRICHLOROETHYLENE / SOLUTION-DIFFUSION MODEL

NARUETEP LECKSIWILAI : RECOVERY OF TRICHLOROETHYLENE AND TOLUENE USING PERVAPORATION PROCESS. THESIS ADVISOR : SIRIMA PANYAMETHEEKUL, Ph.D., 129 pp. ISBN 974-17-4274-6.

The objective of this research was to determine the recovery of trichloroethylene and toluene using pervaporation process according to effect of feed temperature (40-70 °C) and feed flow rate (3.3-25.1 liter/hr.). The study involved 2 stages. The first stage was the sorption test to provide a solubility of organic solution into the silicone. Secondly, the removal of trichloroethylene and toluene using pilot scale pervaporation process was conducted to evaluate ; removal efficiency, permeate flux, permeability, selectivity, and pervaporation separation index. Based on such factors and the solution-diffusion model, the optimal condition then, was gained. Regarding the former test, the result revealed that a solubility of trichloroethylene was more than that of toluene. The later experiment indicated that trichloroethylene and toluene removal were 98% and 97%, and the permeability of trichloroethylene and toluene were 7.2×10^{-9} and 7.1×10^{-9} m²/hr. respectively. Also, the removal percentage and the permeability were both raised by increasing the temperature and feed flow rate. By contrast, the higher temperature resulted in decreasing the selectivity. This was probably due to the water flux was 2-3 times higher when increasing the temperature, in comparison to the organic flux which was 4-8 g/m²-hr. The optimal condition having the maximum pervaporation separation index were feed temperature at 50 °C and feed flow rate 25.1 liter/hr.

In short, the removal of trichloroethylene was slightly higher than that of toluene. Moreover, the removal efficiency could be raised as a result of increasing temperature and feed flow rate.

Department Environmental Engineering Student's signature Naruetep L.

Field of study Environmental Engineering Advisor's signature Sirima A. P.

Academic year 2003

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ได้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทาง รวมถึงข้อคิดเห็นต่าง ๆ ที่ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณ รศ.ดร.จिरกานต์ เมืองนาโพธิ์ ที่ช่วยแนะนำและให้คำปรึกษากับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รศ. วงศพันธ์ ลิ้มปเสนีย์ รศ. ดร. มั่นสิน ตันทุลเวศม์ รศ. ดร.สุรพล สายพานิช และ รศ. ดร.เพ็ชรพร เซาวกิจเจริญ ที่ช่วยแนะแนวทาง ทำให้วิทยานิพนธ์นี้มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ได้ให้ความรู้และการอบรมแก่ผู้วิจัย

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและบุคลากรภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมที่ให้ความช่วยเหลือในระหว่างดำเนินการวิจัย

ขอขอบคุณกองทุนอุดหนุนและส่งเสริมวิทยานิพนธ์ระดับปริญญาโท-เอก ในสถาบันอุดมศึกษาของรัฐ ทบวงมหาวิทยาลัย กองทุนเพื่อการศึกษา มูลนิธิชิน โสภณพานิช และบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนให้ทุนในงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณครูและอาจารย์ที่ผ่านมามากท่านที่ให้การอบรม สั่งสอน ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ทั้งหลายให้ผู้วิจัย

ขอขอบคุณพี่ ๆ น้อง ๆ และ เพื่อน ๆ ทุกคนที่ทำให้กำลังใจและความช่วยเหลือด้วยดีตลอดมา

ขอขอบคุณอีกหลาย ๆ ท่านที่มีได้กล่าวถึงที่ได้ช่วยเหลือในด้านอื่น ๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จได้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา-มารดา และพี่ของผู้วิจัย ซึ่งเข้าใจ สนับสนุน และให้กำลังใจจนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ฉ
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	ณ
บทที่	
1. บทนำ	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	3
2. ทบทวนเอกสาร	
2.1 สารอินทรีย์ระเหยง่าย	4
2.1.1 ไตรคลอโรเอทิลีน	5
2.1.2 โทลูอีน	6
2.2 กระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน	7
2.2.1 หลักการเบื้องต้น	7
2.3 การดูดซึมสารอินทรีย์ในเยื่อแผ่น	8
2.4 แบบจำลองการถ่ายเทมวล	10
2.5 ประสิทธิภาพของกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน	21
2.5.1 ความสามารถในการเลือก	21
2.5.2 ค่าดัชนีการแยกโดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน	22

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อระบบ	22
2.6.1 สมบัติทางกายภาพและเคมี	22
2.6.2 ความหนาของเยื่อแผ่น	23
2.6.3 ความเข้มข้นของสารป้อน	23
2.6.4 อัตราไหลของสารป้อน	25
2.6.5 อุณหภูมิ	26
2.2.6 ความดันด้านเพอร์มิเอท	27
2.7 รูปแบบลักษณะเยื่อแผ่น	28
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	29
3. แผนการวิจัยและการดำเนินการทดลอง	
3.1 แผนการวิจัย	34
3.1.1 การทดลองดูดซึมสารละลายไตรกลอโรเอทิลีนและโทลูอินในยางซิลิโคน	34
3.1.2 การทดลองแยกสารละลายไตรกลอโรเอทิลีนและโทลูอิน โดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน	35
3.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	36
3.2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดลองดูดซึมสารละลายอินทรีย์ ในยางซิลิโคน	36
3.2.2 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการทดลองแยกสารละลายอินทรีย์ โดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน	36
3.3 ขั้นตอนการทดลอง	39
3.3.1 การเตรียมสารละลายไตรกลอโรเอทิลีนและโทลูอิน	39
3.3.2 การทดลองดูดซึมสารละลายไตรกลอโรเอทิลีนและโทลูอินในยางซิลิโคน	39

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.3 การทดลองแยกสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอิน โดยกระบวนการเพอร์เวเพอเรนซ์	40
3.4 การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอินด้วยเทคนิค ก๊าซโครมาโตกราฟีแบบเฮคสเปส	41
3.4.1 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บและวิเคราะห์ตัวอย่าง	43
3.4.2 ขั้นตอนการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโตกราฟีแบบเฮคสเปส	44
3.4.3 การทำกราฟมาตรฐานของสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนและโทลูอิน	44
4. ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซึมสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนและ โทลูอินในยางซิลิโคน	45
4.2 ผลการทดลองเพอร์เวเพอเรนซ์ของสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนและ โทลูอิน	51
4.2.1 ประสิทธิภาพของการแยกสารละลายไตรคลอโรเอทิลีนและ โทลูอิน ด้วยชุดทดลองเพอร์เวเพอเรนซ์	51
4.2.2 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อฟลักซ์ของสารอินทรีย์	54
4.2.3 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อความสามารถของการซึมผ่าน และความสามารถในการแพร่	60
4.2.4 ผลของอุณหภูมิและอัตราการไหลที่มีต่อความสามารถของการเลือก	69
4.2.5 ค่าดัชนีการแยกของกระบวนการเพอร์เวเพอเรนซ์	69
5. สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	73
5.2 ความสำคัญทางวิศวกรรมและการนำไปใช้	75
5.3 ข้อเสนอแนะ	75
รายการอ้างอิง	77

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
ภาคผนวก	82
ภาคผนวก ก คุณสมบัติของไตรคลอโรเอทีนและโทลูอิน	83
ภาคผนวก ข เทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟีแบบเสดสเปส	86
ภาคผนวก ค กราฟมาตรฐาน	89
ภาคผนวก ง โครมาโทแกรมจากการทดลอง	92
ภาคผนวก จ ผลการทดลองการดูดซึมสารละลาย TCE และโทลูอินในยางซิลิโคน	95
ภาคผนวก ฉ ผลการทดลองเพอร์เมอเรนซ์ของสารละลาย TCE และโทลูอิน	100
ภาคผนวก ช ตัวอย่างการคำนวณ	121
ภาคผนวก ซ การวิเคราะห์สมการความสัมพันธ์ของตัวแปรที่ทำการวิจัย	127
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	129

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แบบจำลองต่าง ๆ ที่ใช้พิจารณาการดูดซึมในโพลีเมอร์	11
ตารางที่ 3.1 สภาวะของกระบวนการเพอร์เวเพอร์ชันและตัวแปรต่าง ๆ	40
ตารางที่ 3.2 คุณสมบัติและสภาวะของเครื่องก๊าซโครมาโทกราฟีที่ใช้ในการวิเคราะห์ ของการวิจัย	42
ตารางที่ 5.1 สรุปลค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการทดลอง	73

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1	สิทธิบัตรที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันและเวเพอร์เพอร์มิเอชัน ที่ได้รับการจดในประเทศสหรัฐอเมริกาตั้งแต่ปี ค.ศ.1975-1999 2
รูปที่ 2.1	โครงสร้างทางเคมีของไตรคลอโรเอทิลีน 5
รูปที่ 2.2	โครงสร้างทางเคมีของโทลูอิน 6
รูปที่ 2.3	แผนภาพกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันอย่างง่าย 8
รูปที่ 2.4	อุปกรณ์ในการทดลองการดูดซึมไอของโพลีเมอร์ 9
รูปที่ 2.5	แบบจำลองกลไกการละลาย - การแพร่ ในกระบวนการเพอร์เวเพอเรชัน 10
รูปที่ 2.6	แบบจำลองการละลาย - การแพร่โดยมีความดันเป็นแรงขับเคลื่อนให้เกิดการซึมผ่าน เยื่อแผ่นความหนา l ขององค์ประกอบ i 14
รูปที่ 2.7	ค่าพลังงานศักย์เคมี ความดัน และแอกติวิตีที่เปลี่ยนแปลงไปขององค์ประกอบ i และ j ที่ซึมผ่านเยื่อแผ่นตามแบบจำลองการละลาย - การแพร่ 14
รูปที่ 2.8	ระบบเพอร์เวเพอเรชันที่ถูกจำลองให้มีการแยกเกิดขึ้นสองขั้นตอน 18
รูปที่ 2.9	ผลของความดันด้านเพอร์มิเอทที่มีต่อองค์ประกอบของไอด้านเพอร์มิเอทสำหรับ เพอร์เวเพอเรชัน 21
รูปที่ 2.10	ผลของความเข้มข้นของสารป้อนต่อฟลักซ์และความสามารถในการเลือก 24
รูปที่ 2.11	แผนภาพการกระจายของความเข้มข้นในชั้นขอบเขตที่บริเวณผิวสัมผัสเยื่อแผ่น 25
รูปที่ 2.12	แผนภาพกระบวนการแยกโทลูอินในน้ำเสียแบบที่ละเท และประสิทธิภาพ ของการแยกโทลูอินต่อเวลาที่ใช้เดินระบบ 27
รูปที่ 3.1	แผนภาพกระบวนการเพอร์เวเพอเรชันและทิศทางการไหลของสาร 37
รูปที่ 3.2	ชุดทดลองเพอร์เวเพอเรชันในการวิจัย 38
รูปที่ 3.3	ชุดเยื่อแผ่นเพอร์เวเพอเรชันที่ใช้ในงานวิจัย 38
รูปที่ 3.4	ชุดอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิสารป้อน 39
รูปที่ 3.5	เครื่องก๊าซโครมาโทกราฟี Phillip รุ่น PU-4410 41

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคก๊าซโครมาโทกราฟีแบบเฮคสเปส	43
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและประสิทธิภาพการดูดซึมสารละลาย TCE ในยางซิลิโคนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	47
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นและร้อยละการซึมสารละลายโทลูอิน ในยางซิลิโคนที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน	47
รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของ TCE ในยางซิลิโคนและในสารละลายอุณหภูมิต่าง ๆ กัน ที่สภาวะสมดุล	48
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของโทลูอินในยางซิลิโคนและในสารละลายอุณหภูมิต่าง ๆ กัน ที่สภาวะสมดุล	48
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการละลายและอุณหภูมิของ TCE และโทลูอิน	49
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ของค่า $\ln S_i$ และ $1/T$ เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานการละลายของ TCE และโทลูอิน	49
รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วที่ผิวสัมผัสของเยื่อแผ่นในช่วงอัตราการไหลที่ทำการทดลองของสารป้อน	50
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและร้อยละการแยก TCE ที่อัตราไหลของสารป้อนต่าง ๆ กัน	52
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและร้อยละการแยกโทลูอินที่อัตราไหลของสารป้อนต่าง ๆ กัน	52
รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์รวม/ฟลักซ์ของน้ำจากการทดลองเพอร์เวแพเรชันสารละลาย TCE ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน	53

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์รวม/ฟลักซ์ของน้ำ จากการทดลองเพอร์เวพอเรชันสารละลายโทลูอิน ที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน	53
รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์ของ TCE จากการทดลองเพอร์เวพอเรชันที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน	55
รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของสารป้อนและฟลักซ์ของโทลูอิน จากการทดลองเพอร์เวพอเรชันที่อัตราการไหลต่าง ๆ กัน	55
รูปที่ 4.14 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของ TCE ที่อุณหภูมิของสารป้อน 40-70 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ	56
รูปที่ 4.15 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารป้อนและฟลักซ์ของโทลูอิน ที่อุณหภูมิของสารป้อน 40-70 °C และอัตราการไหลต่าง ๆ	58
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ของค่า $\ln J_i$ และ $1/T$ เพื่อคำนวณหาค่าพลังงานกระตุ้น การซึมผ่านของสารละลาย TCE และ โทลูอิน	60
รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการซึมผ่านของ TCE เฉลี่ยตลอดช่วง การทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน	63
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการซึมผ่านของ โทลูอิน เฉลี่ยตลอดช่วง การทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน	63
รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ TCE เฉลี่ยตลอดช่วง การทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน	64
รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ โทลูอิน เฉลี่ยตลอดช่วง การทดลองและอัตราการไหลของสารป้อน ที่อุณหภูมิของสารป้อนต่าง ๆ กัน	64
รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของ TCE และอัตราการไหล ของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 มก./ล. อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 40-70 °C	65

สารบัญรูป (ต่อ)

หน้า

รูปที่ 4.22	ความสัมพันธ์ของค่าความสามารถของการแพร่ของโทลูอิน และอัตราการใช้ของสารป้อน ที่ความเข้มข้นของสารป้อนอยู่ในช่วง 200 – 300 มก./ล. อุณหภูมิของสารป้อนเท่ากับ 40-70 °C	67
รูปที่ 4.23	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการเลือกจากการทดลองแยกสารละลาย TCE และสภาวะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 มก./ล.	71
รูปที่ 4.24	ความสัมพันธ์ระหว่างความสามารถของการเลือกจากการทดลองแยกสารละลายโทลูอินและสภาวะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 มก./ล.	71
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSI จากการทดลองแยกสารละลาย TCE และสภาวะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 มก./ล. ...	72
รูปที่ 4.26	ความสัมพันธ์ระหว่างค่า PSI จากการทดลองแยกสารละลายโทลูอิน และสภาวะของการทดลองต่าง ๆ กัน ที่ความเข้มข้นอยู่ในช่วง 200 – 300 มก./ล. ...	72

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

ตัวอักษรภาษาอังกฤษ

<i>a</i>	แอกติวิตี
<i>A</i>	พื้นที่ผิวจำเพาะของเชื้อแผ่น
<i>c</i>	ความเข้มข้นเชิงโมลาร์
<i>C</i>	ความเข้มข้นเชิงมวลต่อปริมาตร
<i>D</i>	ความสามารถของการแพร่
<i>E</i>	พลังงานกระตุ้น
<i>E</i>	Enrichment Factor (สมการ 2.45)
<i>H</i>	ค่าคงที่ของเฮนรี
<i>j</i>	ฟลักซ์เชิงโมลาร์
<i>J</i>	ฟลักซ์เชิงมวล
<i>K</i>	ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว
<i>L</i>	ค่าสัมประสิทธิ์ความสัมพันธ์ (สมการ 2.3)
<i>m</i>	มวลโมเลกุล
<i>n</i>	เศษส่วนเชิงโมลาร์
<i>p</i>	ความดัน
<i>P</i>	ความสามารถของการซึมผ่าน
<i>R</i>	ค่าคงที่ของก๊าซ
<i>S</i>	ความสามารถของการละลาย
<i>t</i>	เวลา
<i>T</i>	อุณหภูมิ
<i>W</i>	น้ำหนัก
<i>x</i>	ระยะทาง

ตัวอักษรภาษากรีก

α	ความสามารถของการเลือก
β	ค่าแฟคเตอร์การแยก
ℓ	ความหนาของเชื้อแผ่น
ν	ปริมาตรเชิงโมลาร์
μ	พลังงานศักย์เคมี
γ	ค่าสัมประสิทธิ์แอกติวิตี

ตัวห้อย

o, l	ด้านสารป้อนและด้านเพอร์มิเอท
$0, e$	ที่สถานะก่อนและสิ้นสุดกระบวนการ
i, j	องค์ประกอบ i และ j
(mem)	ภูมิภาคของเยื่อแผ่น
$n, n+1$	ลำดับที่ n และ $n+1$
lm	ค่าเฉลี่ยเชิงลอการิทึม

ตัวยก

L	ภูมิภาคของเหลว
G	ภูมิภาคก๊าซ
Sat	สภาวะอิ่มตัว
\circ	สภาวะอ้างอิง