การจำลองการดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่จำลองแบบสี่โซนสำหรับแยกของผสม อีเทน-เอทิลีน

นาย ธวัชชัย พราวแจ้ง

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2541

ISBN 974-332-415-1

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I19306957

SIMULATION OF FOUR ZONES SIMULATED MOVING BED ADSORPTION FOR SEPPARATION OF THE ETHANE-ETHYLENE MIXTURE

Mr Thawatchai Prawchaeng

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Engineering in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 1998

ISBN 974-332-415-1

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจำลองการดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่จำลองแบบสี่โซน สำหรับแยกของผสม อีเทน-เอทิลีน
โดย	นายธวัชชัย พราวแจ้ง
ภาควิชา	วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....คณะบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ศาสตราจารย์ นายแพทย์ ศุภวัฒน์ ชุติวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. เจิดศักดิ์ ไชยคุนา)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร)

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้เพียงแผ่นเดียว

ธวัชชัย พราวแจ้ง : การจำลองการดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่จำลองแบบสี่โซนสำหรับแยกของผสมอีเทน-เอทิลีน (SIMULATION OF FOUR ZONES SIMULATED MOVING BED ADSORPTION FOR SEPARATION OF THE ETHANE-ETHYLENE MIXTURE) อ.ที่ปรึกษา : ดร.เดชา ฉัตรศิริเวช, 84 หน้า. ISBN 974-332-415-1.

การจำลองเชิงตัวเลขของกระบวนการดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่จำลองแบบ 4 โซน สำหรับใช้แยกของผสมอีเทนและเอทิลีนในสภาวะที่เป็นแก๊ส ถูกศึกษาโดยใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่รูปแบบการไหลเป็นแบบเบดนิ่งที่มีการแพร่ในแนวแกน สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นทันทีทันใด ณ ทุกจุดในหอดูดซับ และแบบจำลองของสมดุลการดูดซับที่ใช้เป็นแบบจำลองของแลงเมียร์ชนิดหลายองค์ประกอบ ตัวดูดซับที่ใช้ศึกษามีอยู่ 2 ชนิด คือซิลิกาเจล ซึ่งใช้มีเทน และโพรเพนเป็นตัวคายการดูดซับ และอีกชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ ซึ่งใช้คาร์บอนไดออกไซด์และไนโตรเจนเป็นตัวคายการดูดซับ ความยาวของแต่ละโซนมีผลต่อความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์น้อยกว่าจำนวนคอลัมน์ย่อย และสัดส่วนอัตราการไหลในแต่ละในแต่ละโซน และจำนวนคอลัมน์ย่อยในแดละโซนมีผลต่อความบริสุทธ์ของผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนทมากกว่าของผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรกตัวดูดซับซิลิกาเจลมีสมรรถนะในการแยกดีกว่าถ่านกัมมันต์ และตัวคายการดูดซับที่มีค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์สูงกว่าสารป้อนได้แก่ โพรเพน และ ไนโตรเจน ให้ผลิตภัณฑ์ทั้งสองสายมีความเข้มข้นที่สูงกว่า ตัวดูดซับที่มีค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ต่ำกว่าสารป้อนได้แก่ มีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ ตัวดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีค่าคงที่สมดุลการดูดซับของแลงเมียร์ต่ำกว่าสารป้อนมาก ไม่สามารถแยกอีเทน และเอทิลีนออกจากกันได้อย่างสมบูรณ์ ภายใต้สภาวะที่ศึกษา

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต ธวัชชัย พราวแจ้ง

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

พิมพ์ต้นฉบับบทคัดย่อวิทยานิพนธ์ภายในกรอบสีเขียวนี้แต่เพียงแผ่นเดียว

C817365 : MAJOR CHEMICAL ENGINEERING
KEY WORD: SIMULATED MOVING BED ADSORPTION / ETHANE-ETHYLENE SEPARATION / SIMULATION

THAWATCHAI PRAWCHAENG : SIMULATION OF FOUR ZONES SIMULATED MOVING BED ADSORPTION FOR SEPARATION OF THE ETHANE-ETHYLENE MIXTURE. THESIS ADVISOR: DEACHA CHATSIRIWECH, Ph.D..84 pp. ISBN 974-332-415-1.

Simulation of simulated moving bed adsorption for ethane-ethylene separation in gas phase condition was studied using axial disperse plug flow model with local multicomponent Langmuir adsorption model. Two kinds of adsorbent were used. The first adsorbent was silica gel with methane and propane as desorbent. The second one was activated carbon with nitrogen and carbon dioxide as desorbent.Product purity was affected slightly with the length of each zone, while it was significantly depended upon the number of columns in each zone and flow ratio. In addition, the number of columns had more effect on the purity of raffinate product than on that of the extract one. Siliga gel provided higher separation performance than activated carbon. Both propane and nitrogen could be employed to produce greater product concentration than methane and carbon dioxide. However, the complete separation could not be obtained with carbon dioxide.

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา 2541 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม .....

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ดร. เดชา ฉัตรศิริเวช ผู้มีส่วนสำคัญในการริเริ่มงานวิจัย รวมทั้งการช่วยเหลือ และการให้คำแนะนำตลอดงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.วิวัฒน์ ตัณฑะพานิชกุล และกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร. เจิดศักดิ์ ไชยคุนา และ ดร. ไพศาล กิตติศุภกร สำหรับความช่วยเหลือ ตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ตลอดจนข้อเสนอแนะต่างๆ ในการศึกษา

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ สำหรับเงินสนับสนุนบางส่วนในงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ในภาควิชาวิศวกรรมเคมี สำหรับการอำนวยความสะดวกตลอดการศึกษา รวมทั้งความช่วยเหลือจากพี่ๆ ในห้องวิจัย process system engineering และห้องวิจัย separation

ท้ายสุดนี้ ขอขอบคุณครอบครัว และเพื่อนๆ ทุกคนที่เป็นกำลังใจในระหว่างการศึกษาจนสำเร็จได้ด้วยดี

สารบาญ

บทคัดย่อ ..... ง

บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ) ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบาญ ..... ช

สารบาญรูป ..... ญ

สารบาญตาราง ..... ฒ

สัญลักษณ์และอักษรย่อ ..... ด

1 บทนำ 1

2 การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่จริง 8

2.1 การแบ่งโซนในระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริง 9

2.1.1 การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน 9

2.1.2 การดูดซับบนบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน 11

2.1.3 การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่สวนทงจริงแบบ 4 โซน 13

2.2 สภาวะการไหลและแผนภาพการดำเนินการของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 4 โซน 15

2.2.1 ระบบ 2 องค์ประกอบ 15

2.2.2 ระบบหลายองค์ประกอบ 17

2.3 สมดุลการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ 19

2.3.1 สมดุลการดูดซับแบบเป็นเส้นตรง 19

2.3.2 สมดุลการดูดซับแบบไม่เป็นเส้นตรง 20

2.4 บทบาทของตัวคายการดูดซับ 21

2.5 เงื่อนไขของสภาวะการไหลที่ทำให้เกิดการแยกโดยสมบูรณ์ 21

2.6 ความต้านทานการถ่ายโอนมวลและการแพร่ในแนวแกน 25

3 การดูดซับบนระบบเบดเคลื่อนที่จำลอง **27**

3.1 ความสัมพันธ์ของระบบเบดเคลื่อนที่จำลองกับระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริง 27

3.2 การแบ่งเบดออกเป็นส่วนย่อย 28

4 การจำลองระบบเบดเลื่อนที่จำลอง **30**

4.1 แบบจำลองคณิตศาสตร์ของระบบ 30

4.2 การหาคำตอบของแบบจำลองคณิตศาสตร์ 33

4.3 การทดสอบแบบจำลองกับการทดลองจริง 34

4.3.1 การเลือกพารามิเตอร์เชิงตัวเลขที่เหมาะสม 34

4.3.2 การทดสอบแบบจำลองกับผลการทดลองจริง 36

4.4 แนวทางการศึกษา 39

4.5 ขอบเขตของการศึกษา 42

5 ผลการจำลอง และวิจารณ์ผล **44**

5.1 อิทธิพลของความดันต่อสัดส่วนการไหลในแต่ละโซน 44

5.2 อิทธิพลของสภาวะเริ่มต้นต่อการเข้าสู่สภาวะคงตัว 46

5.3 อิทธิพลของการแพร่ในแนวแกน 48

5.4 ความยาวของคอลัมน์ 52

5.5 เปลี่ยนจำนวนคอลัมน์ 58

5.6 สัดส่วนอัตราการไหล m_j 61

5.7 ตัวคายการดูดซับ 63

6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ **68**

6.1 สรุปผลการทดลอง 68

6.2 ข้อเสนอแนะ 69

รายการอ้างอิง **69**

ภาคผนวก **76**

ก ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB ที่สภาวะคงตัว ณ เวลาท้ายคาบของการเลื่อนตำแหน่งดึงสารเข้าออกจากระบบ **76**

ก.1 ตัวคายการดูดซับเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ 77

ก.2 ตัวคายการดูดซับเป็น มีเทน 79

ก.3 ตัวคายการดูดซับเป็น ไนโตรเจน 81

ก.4 ตัวคายการดูดซับเป็น โพรเพน 82

ประวัติผู้เขียน **84**

สารบาญรูป

1.1 แสดงความจำเพาะในการแยกของผสมพาราฟิน-โอลีฟินเมื่อใช้การแยกโดย (1) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (2) การดูดซับ 2

1.2 แสดงลักษณะการดูดซับแบบต่อเนื่อง 2

1.3 กระบวนการ SORBEX (AC = หอดูดซับ EU = หน่วยแยกผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรก RU = หน่วยแยกผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท RV = โรตารีวาล์ว) 4

2.1 แสดงแผนภาพระบบการดูดซับโดยทั่วไป 8

2.2 แสดงแผนภาพระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน 9

2.3 แสดงแผนภาพการดำเนินการของ McCabe-Thiele ของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 2 โซน (ADS line = เส้นสภาวะดำเนินการของโซนดูดซับสาร ,REG line = เส้นสภาวะดำเนินการของโซนฟื้นฟูสภาพตัวดูดซับ) 10

2.4 แสดงแผนภาพระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน 12

2.5 แสดงแผนภาพการดำเนินการ McCabe-Thiele ของระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 3 โซน 13

2.6 แสดงแผนภาพระบบเบดเคลื่อนที่สวนทางจริงแบบ 4 โซน 14

2.7 แผนภาพ Mccabe Thile ของ (1) องค์ประกอบ A (2) องค์ประกอบ B 17

2.8 ผลของตัวคายการดูดซับต่ออัตราการไหลของตัวดูดซับและตัวคายการดูดซับ (1)กรณีที่เป็นของผสมสององค์ประกอบ (3)กรณีที่เป็นของผสมหลายองค์ประกอบ (SR = ปริมาณของตัวคายการดูดซับที่ต้องใช้ DR = ปริมาณตัวคายการดูดซับที่ต้องใช้ . . . 22

2.9 ลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวในระบบ TMB เมื่อเกิดการแยกโดยสมบูรณ์ ขององค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้มากกว่า(เส้นทึบ) และองค์ระกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่า(เส้นประ) 23

3.1 ผลของความยาวของหอดูดซับและจำนวนคอลัมน์ย่อย n คอลัมน์ ต่อสัดส่วนการใช้งานตัวดูดซับ(1 แทนระบบเบดนิ่ง (n = 1), ∞ แทนระบบไหลสวนทางจริง) 29

4.1 รูปแสดงภาคตัดขวางของหอดูดซับ 31

4.2 แสดงลักษณะการเชื่อต่อการไหลของของไหลในโซนต่างๆของระบบ SMB แบบ 4 โซน 32

4.3 ลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่ได้จากการจำลองเมื่อใช้ค่า NX และ NT ต่างๆกันโดยใช้พารามิเตอร์ต่างๆในการจำลองตามตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2 (1) ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของอีเทน (2) ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของเอทิลีน . 36

4.4 ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของของผสม ฟรุตโตส-กลูโคส ที่ได้จากแบบจำลองที่ศึกษาเทียบกับผลการทดลองจริงจากการทดลองที่ 1 38

4.5 ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของของผสม ฟรุตโตส-กลูโคส ที่ได้จากแบบจำลองที่ศึกษาเทียบกับผลการทดลองจริงจากการทดลองที่ 4 38

5.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันกับค่า m_j เมื่อใช้ระบบตัวดูดซับ-ตัวคายการดูดซับแบบต่างๆ (1): ซิลิกาเจล-มีเทน (2): ซิลิกาเจล-โพรเพน (3): ถ่านกัมมันต์-คาร์บอนไดออกไซด์ (4): ถ่านกัมมันต์-ไนโตรเจน 44

5.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคามดันกับค่า m_F/m_D ของระบบที่ใช้ตัวคายการดูดซับที่ต่างกัน 45

5.3 ลักษณะการกระจายความเข้มข้นที่สภาวะคงตัวเมื่อใช้สภาวะเริ่มต้นที่ต่างกัน 47

5.4 ความบริสุทธิของผลิตภัณฑ์ที่ได้ที่สภาวะคงตัวเมื่อใช้สภาวะเริ่มต้นที่ต่างกัน 48

5.5 แสดงโปรไฟล์ความเข้มข้นเมื่อสมดุลเป็นแบบแลงเมียร์ (1 : กรณีของการคายการดูดซับ 2 : กรณีของการดูดซับ) 49

5.6 แสดงลักษณะการกระจายความเข้มข้นในระบบ SMB ของระบบที่ศึกษา เมื่อ D_L ระบบมีค่าต่างๆกัน 51

5.7 ลักษณะการกระจายความเข้มข้นภายในคอลัมน์ของระบบ SMB จากงานวิจัยของ Zhong กรณีที่การดูดซับเป็นแบบอุดมคติ(เส้นทึบ) และกรณีที่มีการแพร่ในแนวแกน(เส้นประ) 51

5.8 ความสัมพันธ์ของความเร็วของของไหล (u) ต่อค่า D_L และค่า u/D_L 54

5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้กับค่า Pe_L 55

5.10 แสดงลักษณะการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB เมื่อใช้ความยาวของโซนต่างๆกัน 56

5.11 แสดงความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้ เมื่อใช้ความยาวของโซนต่างๆกัน 56

5.12 แสดงลักษณะการกระจายความเข้มข้นเมื่อมีคอลัมน์ย่อยต่อ 1 โซนเป็น 1 ถึง 6 คอลัมน์ตามลำดับ 60

5.13 แสดงการเปรียบเทียบลักษณะการกระจายความเข้มข้นในระบบ SMB เมื่อปรับอัตราส่วนอัตราการไหลในแต่ละโซน 61

5.14 แสดงการเปรียบเทียบความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้เมื่อเปลี่ยน m_j ในโซนต่างๆ (1): ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ (2): ความบริสุทธ์ของผลิตภัณฑ์ 62

5.15 แสดงลักษณะการกระจายความเข้มข้นเฉลี่ย ของระบบ SMB ที่มีสมดุลการดูดซับแบบแลงเมียร์ซึ่งใช้ตัวคายการดูดซับที่ต่างกันทั้ง 4 แบบ (1) ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์แอ็กซ์แทรก (2) ลักษณะการกระจายความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท 66

ก.1 แสดงการกระจายความเข้มข้น ของระบบ SMB เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (1): ใช้ m_j เท่ากับระบบ TMB (2): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.05 เท่าของระบบ TMB (3): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.1 เท่าของระบบ TMB (4): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.15 เท่าของระบบ TMB 77

ก.2 แสดงการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (1): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 2 (2):ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 3 (3): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 4 (4):ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 5 78

ก.3 แสดงการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (1): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 1 (2):ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 2 (3): ใช้คอลัมน์pย่อยเป็น 3 (4):ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 4 (5): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 5 (6):ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 6 79

ก.4 แสดงการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับเป็นมีเทน (1): ใช้ความยาวแต่ละโซนเป็น 25 cm (2): ใช้ความยาวแต่ละโซนเป็น 50 cm (3): ใช้ความยาวแต่ละโซนเป็น 100 cm (4): ใช้ความยาวแต่ละโซนเป็น 200 cm . . . 80

ก.5 แสดงการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับเป็นไนโตรเจน (1): ใช้ m_j เท่ากับระบบ TMB (2): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.05 เท่าของระบบ TMB (3): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.1 เท่าของระบบ TMB (4): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.15 เท่าของระบบ TMB (5): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.2 เท่าของระบบ TMB (6): ใช้ m_j เท่ากับระบบ 1.25 เท่าของระบบ TMB 81

ก.6 แสดงการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับเป็นโพรเพน (1): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 1 (2): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 2 (3): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 3 (4): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 4 (5): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 5 (6): ใช้คอลัมน์ย่อยเป็น 6 82

ก.7 แสดงการกระจายความเข้มข้นของระบบ SMB เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับเป็นโพรเพน (1): ใช้คอลัมน์ยาวแต่ละโซนเป็น 25 cm (2): ใช้คอลัมน์ยาวยาวแต่ละโซนเป็น 50 cm (3): ใช้คอลัมน์ยาวยาวแต่ละโซนเป็น 200 cm (4): ใช้คอลัมน์ยาวยาวแต่ละโซนเป็น 400 cm 83

สารบาญตาราง

2.1 ลำดับความสามารถในการดูดซับของสารในระบบการดูดซับหลายองค์ประกอบ 18

3.1 ตารางแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระบบ SMB ระบบ TMB 28

4.1 แสดงพารามิเตอร์ที่ใช้ทดสอบวิธีการแก้สมการด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์แบบเอ็กพลิซิตในระบบที่ใช้ตัวดูดซับเป็นซิลิกาเจลและตัวคายการดูดซับเป็นมีเทน 35

4.2 แสดงผลการทดสอบวิธีการแก้สมการด้วยวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอร์เรนซ์แบบเอ็กพลิซิต . . 36

4.3 แสดงอัตราการไหลที่ใช้ในโซนต่างๆ 37

4.4 แสดงค่าอัตราการไหลของของแข็ง ความเข้มข้นในสายป้อนและจำนวนการแบ่งช่วงตัวแปร t และ x ที่เหมาะสม 37

4.5 แสดงค่าพารามิเตอร์ A1 ถึง A3 37

4.6 ระบบตัวดูดซับ-ตัวถูกดูดซับที่ใช้ศึกษา 40

4.7 แสดงค่าพารามิเตอร์ของสมดุลแบบแลงเมียร์ของระบบที่ศึกษา 41

5.1 แสดงจำนวนรอบของการเลื่อนจุดป้อนสารเข้าและจุดดึงสารออกที่ต้องใช้ก่อนที่ระบบจะเข้าสู่สภาวะคงตัว 46

5.2 พารามิเตอร์ของการไหลที่ได้ในแต่ละโซนเมื่อ 54

5.3 ความยาวต่ำสุดของแต่ละโซนที่ต้องใช้เพื่อให้ได้ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ตาที่ต้องการ 57

5.4 แสดงค่า m_j ของระบบ SMB ในโซนต่างๆ เมื่อใช้ตัวคายการดูดซับต่างๆกัน 64

5.5 แสดงความเข้มข้นและความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ทั้งสองสายเมื่อใช้ตัวคายการดูดซับต่างกัน 65

สัญลักษณ์และอักษรย่อ

สัญลักษณ์

A	องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้ดีกว่า สำหรับสายป้อนที่เป็นของผสมสององค์ประกอบ
A	พื้นที่หน้าตัดของหอดูดซับ (cm^2)
B	องค์ประกอบที่ถูกดูดซับได้น้อยกว่า สำหรับสายป้อนที่เป็นของผสมสององค์ประกอบ
C	ความเข้มข้นรวมของระบบในเฟสแก๊ส ($mmol/cm^3$
d_p	เส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ยของตัวดูดซับ (cm)
D	ตัวคายการดูดซับ
DR	ปริมาณตัวคายการดูดซับที่ต้องใช้ต่อปริมาณของสายป้อนในระบบที่มีการไหลสวนทางจริง
D_{AB}	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่เชิงโมลขององค์ประกอบ A ใน B (cm^2/s)
D_L	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ในแนวแกน (cm^2/s)
E	ผลิตภัณฑ์เอ็กซ์แทรก
F	สายป้อน
H	ความสูงเทียบเท่า 1 ขั้นตอนสมดุล (cm)
i	องค์ประกอบที่ i ของสารในระบบ
j	โซนที่ j ในระบบ SMB
k	สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนมวล (s^{-1})
K	ค่าคงที่สมดุลการดูดซับ
L	ความยาว (cm)
n	จำนวนคอลัมน์ย่อยใน 1 โซน
N	จำนวนขั้นตอนสมดุล
NC	จำนวนองค์ประกอบทั้งหมดในระบบการดูดซับ
P	ความดันรวมของระบบ (atm)
P_E	ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์แอ็กซ์แทรก
P_R	ความบริสุทธิ์ของผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท
q	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยปริมาตรของตัวดูดซับ ($mmol/cm^3$)
q_s	ปริมาณการดูดซับสูงสุดต่อหน่วยปริมาตรของตัวดูดซับ ($mmol/cm^3$)
Q	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของไหล (cm^3/s)
R	ผลิตภัณฑ์ราฟฟิเนท
S	อัตราการไหลเชิงปริมาตรของของแข็ง (cm^3/s)
SR	ปริมาณตัวดูดซับที่ต้องใช้ต่อปริมาณของสายป้อนในระบบที่มีการไหลสวนทางจริง
t	เวลา (s)
t_p	ช่างเวลา 1 คาบ ของการเลื่อนตำแหน่งดึงสารเข้าออกจากระบบ (s)

u_j	ความเร็วเชิงเส้นของของไหลในโซนที่ j (cm/s)
u_s	ความเร็วเชิงเส้นของของแข็ง (cm/s)
V	ปริมาตรของหอดูดซับ (cm^3)
x	ระยะทางในแนวแกนของหอดูดซับ (cm)
y	สัดส่วนโดยโมล
z	ระยะทางในเทอมไร้หน่วย, x/L

อักษรกรีก

Γ	ปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mmol/g)
ε	ความพรุนของเบด
μ	ความหนืดของของไหล (g/cm-s)
ρ	ความหนาแน่นของของไหลในระบบ (g/cm^3)
ρ_s	ความหนาแน่นปรากฏของตัวดูดซับ (g/cm^3)
τ	เวลาในเทอมไร้หน่วย

เทอมไร้หน่วย

Pe	Peclet number, ud_p/D_L
Re	Renold nimber, $\rho u d_p/\mu$
Sc	Schmidt number, $\mu\rho/D_{AB}$
St	Stanton number, kL/u