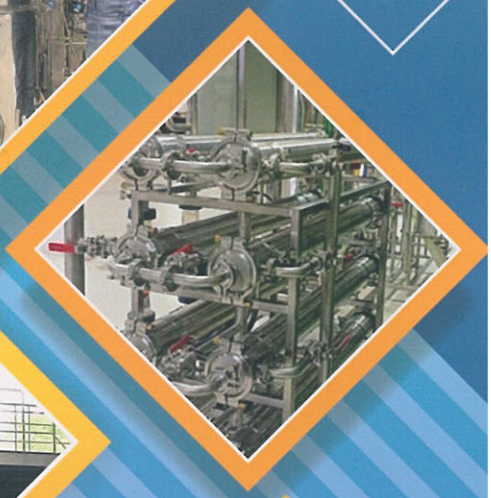
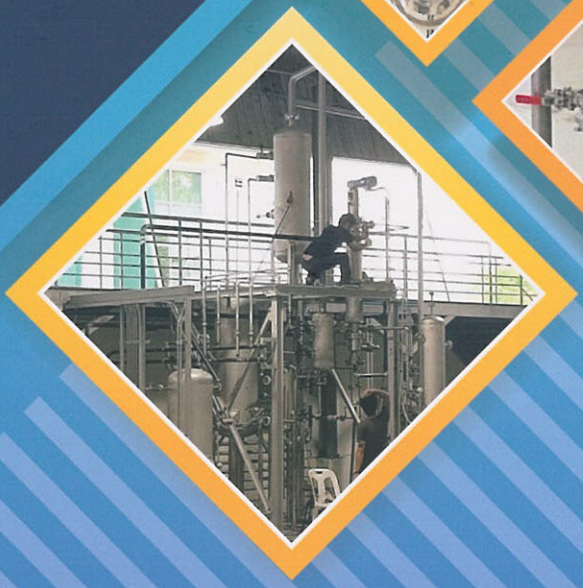
SUT
มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี

หลักการกระบวนการแยก และการทำบริสุทธิ์ผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ

Principle of Bio-Product Recovery and Purification Processes





รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ บุญทาวัน

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

หลักการกระบวนการแยกและการทำบริสุทธิ์ผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ

Principle of Bio-Product Recovery and Purification Processes

อภิชาติ บุญทาวัน

สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สารบัญ

หน้า

คำนำ.....ก
สารบัญ.....ข
สารบัญภาพ.....ฌ
สารบัญตาราง.....ฏ
คำอธิบายสัญลักษณ์.....ธ
บทที่ 1 กระบวนการผลิตทางชีวภาพ (Biological Production Process).....1
1.1 ความสำคัญของผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ.....1
1.2 กระบวนการผลิตทางชีวภาพ.....2
1.3 ปัจจัยที่มีผลเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตทางชีวภาพ.....5
1.4 ขั้นตอนพื้นฐานของกระบวนการผลิตทางชีวภาพ.....7
1.4.1 ขั้นตอนต้นน้ำ.....7
1.4.2 ขั้นตอนกลางน้ำ.....17
1.4.3 ขั้นตอนปลายน้ำ.....21
1.5 การเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์ทางชีวภาพ.....21
1.6 การจัดการของเสียจากกระบวนการผลิตทางชีวภาพ.....23
1.7 เอกสารอ้างอิง.....24
บทที่ 2 เทคโนโลยีเมมเบรน (Membrane Technology).....28
2.1 วิวัฒนาการของเมมเบรน.....28
2.2 คำจำกัดความและนิยามของเมมเบรน.....28
2.3 การจำแนกประเภทเมมเบรน.....29
2.3.1 จำแนกตามลักษณะของความเป็นรูพรุน (Porosity) 29
2.3.2 จำแนกตามความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ (Hydrophilic/Hydrophobic).....31
2.3.3 จำแนกตามแรงขับดัน (Driving Forces).....31
2.4 ลักษณะของเมมเบรน.....32
2.4.1 เยื่อแผ่นสมมาตร (Symmetric Membranes) 32
2.4.2 เยื่อแผ่นไม่สมมาตร (Asymmetric or Anisotropic Membranes).....35

สารบัญ

หน้า

2.5 ชนิดของเมมเบรน....36
2.5.1 เมมเบรนเซรามิค....36
2.5.2 พอลิเมอร์เมมเบรน (Polymer Membrane)....37
2.5.3 เมมเบรนจากน้ำยางธรรมชาติ (Natural Rubber Latex)....40
2.5.4 เยื่อแผ่นเชิงประกอบ (Composite Membrane)....42
2.6 ลักษณะการใช้งานของเมมเบรนและโมดูล....46
2.6.1 การประกอบหน่วยเมมเบรนในระบบ....46
2.6.2 โมดูลของเมมเบรนลักษณะต่าง ๆ....47
2.7 ชนิดของโมดูลเมมเบรน....48
2.7.1 แบบแผ่นและแบบกรอบ (Plate and Frame Module) 48
2.7.2 แบบรูปหมอน (Pillow-Shaped Module) 48
2.7.3 แบบหลอดหรือท่อ (Tubular Module) 48
2.7.4 แบบแคปิลารี (Capillary Module) 49
2.7.5 แบบท่อกลวง (Hollow Fiber Module) 49
2.7.6 แบบม้วน (Spiral Wound Module) 50
2.8 การเลือกโมดูลเมมเบรน....51
2.9 เอกสารอ้างอิง....56
บทที่ 3 เทคนิคการแยกเซลล์ด้วยระบบไมโครฟิลเตรชันและเทคนิคอัลตร้าฟิลเตรชัน เทคนิคนาโนฟิลเตรชัน (Cell Removal by Microfiltration, Ultrafiltration and Nanofiltration)....60
3.1 คำจำกัดความของไมโครฟิลเตรชัน....60
3.2 หลักการทำงานของเทคนิคไมโครฟิลเตรชัน....60
3.2.1 ทฤษฎีของไมโครฟิลเตรชันแบบปิดตาย Dead-End....63
3.2.2 ทฤษฎีของไมโครฟิลเตรชันแบบไหลขวาง Cross-Flow....64
3.3 หลักการทำงานของอัลตร้าฟิลเตรชันและนาโนฟิลเตรชัน....65
3.4 หลักการทำงานของระบบนาโนฟิลเตรชันในรูปแบบต่าง ๆ....67
3.5 การนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพ....68
3.5.1 การแยกเซลล์ออกจากน้ำหมักกรดซัคซินิก....68

สารบัญ

หน้า

3.5.2 การแยกเซลล์ออกจากน้ำหมักกรดแล็คติกด้วยวิธีไมโครฟิลเตรชัน (Cell Removal using Microfiltration Process).....73
3.6 การจัดการทดลองและหน่วยปฏิบัติการในการใช้เทคนิคอัลตร้าฟิลเตรชันและการประยุกต์ใช้และการพัฒนาต่อยอดในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ.....76
3.7 การจัดการทดลองและหน่วยปฏิบัติการในการใช้เทคนิคนาโนฟิลเตรชันและการประยุกต์ใช้และการพัฒนาต่อยอดในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ.....78
3.8 เอกสารอ้างอิง.....92
บทที่ 4 เพอร์แวปพอเรชันและเวเปอร์เพอมิเอชัน (Pervaporation and Vapor Permeation).....97
4.1 หลักการและลักษณะการทำงานของเทคนิคเพอร์แวปพอเรชัน.....97
4.2 หลักการและลักษณะการทำงานของเทคนิคเวเปอร์เพอมิเอชัน.....98
4.3 การจัดหน่วยปฏิบัติการของระบบเพอร์แวปพอเรชัน.....100
4.4 การจัดหน่วยปฏิบัติการของระบบเวเปอร์เพอมิเอชัน.....102
4.5 การประยุกต์ใช้เพอร์แวปพอเรชัน ในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ.....105
4.6 การประยุกต์ใช้ระบบเวเปอร์เพอมิเอชันในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ.....112
4.7 เอกสารอ้างอิง.....126
บทที่ 5 เพอร์สแทรกชัน (Perstraction).....130
5.1 ทฤษฎีของระบบเพอร์สแทรกชัน.....130
5.2 การวิเคราะห์การถ่ายมวลในระบบเพอร์สแทรกชัน.....132
5.3 การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทมวลของตัวทำละลายอินทรีย์ในระบบเพอร์สแทรกชัน.....133
5.4 การประยุกต์ใช้ระบบเพอร์สแทรกชันในงานด้านเทคโนโลยีชีวภาพ.....137
5.5 การศึกษาการหมักเอทานอลในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรนด้วยระบบเพอร์สแทรกชัน (Perstraction).....140
5.5.1 การศึกษาการพองตัวสำหรับระบบเพอร์สแทรกชัน.....142
5.5.2 ค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัว.....142
5.5.3 การศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างเยื่อแผ่น/น้ำ.....142

สารบัญ

หน้า

5.5.4 สัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างตัวทำละลายอินทรีย์/น้ำ (P_{aq}^{org}).....145
5.5.5 การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับและการแพร่ของสารตัวอย่างในเยื่อแผ่นซิลิโคน.....146
5.5.6 การวิเคราะห์ถ่ายเทมวล และ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยรวม.....149
5.6 เอกสารอ้างอิง.....154
บทที่ 6 อิเลคโตรไดอะไลซีส และอิเลคโตรดีไอออไนซ์เซชัน (Electrodialysis and Electrodeionization).....158
6.1 ทฤษฎีและหลักการทำงานของอิเลคโตรไดอะไลซีส (ED) และอิเลคโตรดีไอออไนซ์เซชัน (EDI).....158
6.2 การศึกษาระบบและการจัดชุดการทดลองของอิเลคโตร-ไดอะไลซีส (ED) และอิเลคโตรดีไอออไนซ์เซชัน (EDI).....159
6.2.1 การจัดชุดการทดลองระบบ Electrodialysis Bipolar Membrane (EDBM) Technique.....162
6.2.2 การจัดชุดการทดลองระบบอิเลคโตรดีไอออไนซ์เซชัน (EDI).....163
6.3 การประยุกต์ใช้อิเลคโตรไดอะไลซีส (ED) และอิเลคโตร-ดีไอออไนซ์เซชัน (EDI) ในงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพ.....165
6.3.1 เทคนิคอิเลคโตรไดอะไลซีสในการแยกกรดซัคซินิก.....165
6.3.2 เทคนิคอิเลคโตรดีไอออไนซ์เซชัน (EDI) ในการแยกกรดแล็คติก.....174
6.4 เอกสารอ้างอิง.....181
บทที่ 7 การดูดซับ (Adsorption).....184
7.1 คำจำกัดความและหลักการทำงานของการดูดซับ.....184
7.2 กลไกของการดูดซับ (Characteristics of Adsorption) 185
7.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....187
7.4 ประเภทของการดูดซับ.....188
7.4.1 การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) 189
7.4.2 การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) 189

สารบัญ

หน้า

7.5 ตัวดูดซับ (Adsorbent) 191
7.6 ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption Isotherm) 193
7.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isoltherm) 195
7.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption Isotherm) 197
7.7 การนำไปประยุกต์ใช้การดูดซับกับงานต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีชีวภาพ.....199
7.7.1 การดูดซับด้วยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....199
7.7.2 กระบวนการแยกน้ำเพื่อผลิตเชื้อเพลิงเอทานอลด้วยการดูดซับแบบสลับความดัน (Pressure Swing Adsorption, PSA).....201
7.8 เอกสารอ้างอิง.....207
บทที่ 8 การระเหยน้ำแบบฟิล์มบาง (Falling Film Evaporation).....211
8.1 หลักการพื้นฐานของการระเหย.....211
8.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการระเหย.....214
8.3 ชนิดของเครื่องระเหย (Type of Evaporators) 215
8.3.1 เครื่องระเหยแบบกะหรือแบบเป็นครั้ง (Batch – Type Pan Evaporator) 215
8.3.2 เครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลขึ้น (Rising – Film Evaporator).....216
8.3.3 เครื่องระเหยแบบฟิล์มเคลื่อนที่ลง (Falling – Film Evaporator) 217
8.4 การออกแบบหน่วยปฏิบัติการการระเหยแบบแบบฟิล์มไหลลง Process Requirements for Falling – Film Evaporation.....220
8.5 การเลือกชนิดของเครื่องระเหยสำหรับการใช้งาน (Selecting an Evaporator) 221
8.6 การประยุกต์ใช้กระบวนการระเหยในผลิตภัณฑ์ชนิดต่าง ๆ.....224
8.6.1 กระบวนการระเหยที่ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่ม.....224
8.6.2 กระบวนการระเหยน้ำในตัวอย่างสารละลายสังเคราะห์กรดแล็คติก.....227

สารบัญ

หน้า

8.6.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการระเหยน้ำในตัวอย่างกรดแล็คติก ในน้ำหมักจริง....229
8.7 เอกสารอ้างอิง....235
บทที่ 9 การกลั่น (Distillation)....239
9.1 นิยามการกลั่น....239
9.2 ทฤษฎีของการกลั่น....239
9.3 ชนิดของการกลั่น....241
9.3.1 การกลั่นแบบทั่วไป (Simple Distillation)....241
9.3.2 กลั่นลำดับส่วน (Fractional Distillation)....241
9.3.3 การกลั่นแบบไอน้ำ (Steam Distillation)....243
9.3.4 การกลั่นแบบโมเลกุล (Molecular Distillation) หรือ การกลั่นด้วยระยะทางสั้น (Short Path Distillation)....244
9.3.5 การกลั่นแบบมีปฏิกิริยา (Reactive Distillation)....248
9.4 การพัฒนาออกแบบหอกลั่นชนิดต่าง ๆ....251
9.4.1 การพัฒนาระบบการแยกเอทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ....252
9.4.2 การพัฒนากระบวนการกลั่นแบบต่อเนื่องด้วยหอกลั่นประสิทธิภาพสูง....255
9.5 การประยุกต์ใช้เทคนิคการกลั่นในงานทางเทคโนโลยีชีวภาพ....266
9.5.1 การทำบริสุทธิ์กรดแล็คติกด้วยปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดแล็คติกการแยกน้ำออกจากปฏิกิริยา และการกลั่นเอทิลแล็คเตท....266
9.5.2 การประยุกต์การกลั่นแบบมีปฏิกิริยาในระดับโรงงานต้นแบบสำหรับการกลั่นสารเคมีชีวภาพ....274
9.6 เอกสารอ้างอิง....279
บทที่ 10 การตกผลึก (Crystallization)....281
10.1 หลักการการตกผลึก....281
10.2 ทฤษฎีและกระบวนการตกผลึก....282
10.3 รูปแบบและชนิดของผลึก....284

สารบัญ

หน้า

10.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึกของสารชีวโมเลกุล.....285
10.5 การประยุกต์ใช้กระบวนการตกผลึกสำหรับการทำบริสุทธิ์
สารเคมีชีวภาพ.....286
10.5.1 การตกผลึกโปรตีน.....286
10.5.2 การตกผลึกกรดซัคซินิก (Crystallization Technique
of Succinic Acid).....288
10.5.3 การตกผลึกไซลิทอล (Crystallization Process
of Xylitol).....301
10.6 เอกสารอ้างอิง.....317
ดัชนีคำศัพท์.....321
ประวัติผู้เขียน.....323

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 1.1 โครงสร้าง (A) และฟังก์ชัน (B) ของ NAD(P)H สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction).....3
รูปที่ 1.2 รูปภาพหัวมันสำปะหลังสดที่ใช้เป็นวัตถุดิบ และขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ.....8
รูปที่ 1.3 ลักษณะการทำลายโครงสร้างของวัสดุลิกโนเซลลูโลสด้วยการปรับสภาพ (Pre-Treatment) (ภาพซ้ายคือไม่ผ่านการปรับสภาพ ภาพขวาคือผ่านการปรับสภาพแล้ว).....12
รูปที่ 1.4 แผนผังกระบวนการปรับสภาพกากมันสำปะหลังโดยการย่อยด้วยเอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) เพื่อให้ได้น้ำตาลสำหรับกระบวนการผลิตทางชีวภาพ.....15
รูปที่ 1.5 ปริมาณสารสัมพันธ์ของการเกิดผลิตภัณฑ์ในกระบวนการหมัก.....20
รูปที่ 2.1 กระบวนการแยกโดยใช้เยื่อแผ่นซึ่งใช้ขนาดของโมเลกุลเป็นตัวกำหนด.....29
รูปที่ 2.2 การวัดมุมสัมผัสของน้ำและเยื่อแผ่นเพื่อบ่งบอกความชอบน้ำ/ไม่ชอบน้ำ.....31
รูปที่ 2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตเยื่อแผ่นโดยวิธี Solution Casting.....33
รูปที่ 2.4 กรรมวิธีการผลิตและภาพขยายของเยื่อแผ่นชนิด Track-Etch.....34
รูปที่ 2.5 แสดงรูปวาดแสดงกรรมวิธีการผลิต และลักษณะเยื่อแผ่นชนิด Film-Stretch.....35
รูปที่ 2.6 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดของเยื่อแผ่นเซรามิค.....36
รูปที่ 2.7 เมมเบรนชนิดแผ่นและกรอบ (ก) เมมเบรนชนิดท่อม้วน (ข) 39
รูปที่ 2.8 การเตรียมเมมเบรนที่มีลักษณะเรียบด้วยการ Casting.....39
รูปที่ 2.9 รูปวาดภาคตัดขวางจำลองโครงสร้างของเยื่อแผ่นเชิงประกอบ.....42
รูปที่ 2.10 เยื่อแผ่นซิลิโคนภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราดซึ่งถูกเตรียมโดยวิธี Solution Casting.....44
รูปที่ 2.11 เยื่อแผ่นเชิงประกอบ PDMS/PVDF ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด ซึ่งถูกเตรียมโดยวิธีการเปลี่ยนเฟส (แสดงชั้นรองรับ PVDF ที่มีลักษณะคล้ายนิ้วมือ) 45
รูปที่ 2.12 เยื่อแผ่นเชิงประกอบ PDMS/PVDF ภายใต้กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด กำลังขยาย 10,000 เท่า.....46
รูปที่ 2.13 ลักษณะและรูปแบบการกรองของโมดูลเมมเบรนชนิดต่าง ๆ.....47
รูปที่ 2.14 โมดูลของเมมเบรนในรูปแบบต่าง ๆ.....50

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 2.15 รูปวาดจำลองเครื่องถ่ายเทมวลโดยระบบเพอร์สแทรกชัน.....55
รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบอนุภาคของสารโดยแสดงถึงความสามารถในการผ่านเมมเบรน ไมโครฟิลเตรชัน.....60
รูปที่ 3.2 หลักการทำงานของระบบไมโครฟิลเตรชัน.....61
รูปที่ 3.3 ลักษณะการกรองปิดตาย (Dead-End).....64
รูปที่ 3.4 ลักษณะการกรองแบบไหลขวาง (Cross Flow).....65
รูปที่ 3.5-ระบบไมโครฟิลเตรชันสำหรับการแยกเซลล์แบคทีเรียและโปรตีน ที่ใช้ในการศึกษา.....69
รูปที่ 3.6 กราฟแสดงการคำนวณหาค่าความต้านทานที่เกิดขึ้นจากเมมเบรน $R_m = 1.02 \times 10^{12}\ m^{-1}$.....72
รูปที่ 3.7 การลดลงของฟลักซ์เมื่อเวลาผ่านไปและปริมาตรสะสมของเพอร์มิเอทที่ได้.....73
รูปที่ 3.8 กราฟแสดงค่าฟลักซ์ที่ลดลงต่อเวลาที่ผ่านไปในระหว่างการกรองแบคทีเรีย กรดแล็คติกด้วยระบบไมโครฟิลเตรชัน.....74
รูปที่ 3.9 ระบบการแยกเซลล์ด้วยระบบไมโครฟิลเตรชันแสดงน้ำหมัก (Broth) และ ส่วนที่กรองได้ (Filtrate) 75
รูปที่ 3.10 แผนผังของเครื่อง External Hollow Fibber Membrane สำหรับการบำบัดน้ำเสีย.....78
รูปที่ 3.11 นาโนฟิลเตรชันในการแยกกรดซัคซินิกจากน้ำหมัก.....79
รูปที่ 3.12 อิทธิพลของพารามิเตอร์ในการกักกันการใช้สารละลายกรดอินทรีย์ (ก) ผลของ pH (ข) ความเข้มข้นของสารป้อน และ (ค) ความดันในการศึกษา โดยทดสอบ ระบบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....81
รูปที่ 3.13 การหาค่า Membrane Resistance และค่าฟลักซ์ในการทดสอบการใช้ น้ำหมักจริงในระบบนาโนฟิลเตรชัน.....84
รูปที่ 3.14 ค่าการกักกัน (Rejection) ของกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ในระบบนาโนฟิลเตรชัน ใช้เวลา 24 ชั่วโมง (ก) และ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัว ถูกละลายสัมพัทธ์ระหว่างการกรองแบบไดอะฟิลเตรชัน (ข).....87

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 3.15 กราฟแท่งแสดงสารประกอบที่ผสมอยู่ในสารป้อนและส่วน Permeate จากนาโนฟิลเตรชัน (ก) คือ กรดซัคซินิก, SO_4^{2-} Mg^{2+} Cl^- (ข) คือ กรดแล็คติก กรดอะมิโน กรดโพรพิโอนิก โปรตีน Na+ PO_4^{3-} Ca^{2+} (ค) คือ ความเข้มข้นของสีในสารป้อน, Retentate และ Permeate จากนาโนฟิลเตรชัน จากการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 nm.....89
รูปที่ 3.16 การศึกษาระบบนาโนฟิลเตรชันระหว่างน้ำหมักและของผสมของกรดอินทรีย์สังเคราะห์ และแสดงการวิเคราะห์แรงต้านทานต่าง ๆ.....91
รูปที่ 4.1 หลักการทำงานของการแยกโดยใช้ระบบ Pervaporation.....98
รูปที่ 4.2 หลักการทำงานของระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น (Vapor Permeation).....99
รูปที่ 4.3 การจัดการทดลองการแยกสารละลายตัวอย่างออกจากน้ำหมักด้วยเมมเบรนชนิดแผ่นแบนราบ (Flat Sheet Membrane) โดยมีการไหลเวียนสารละลายออกด้านนอกถังปฏิกรณ์.....101
รูปที่ 4.4 การจัดการทดลองการแยกสารละลายตัวอย่างออกจากน้ำหมักด้วยการจุ่มเมมเบรนท่อใยกลวงเชิงประกอบลงในถังหมักโดยตรง.....101
รูปที่ 4.5 รูป (ก) แสดงการประกอบเมมเบรนเข้ากับ Housing และรูป (ข) การประกอบเข้าเป็นระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น.....102
รูปที่ 4.6 ลักษณะโมดูลของเมมเบรนเซรามิก (Membrane Module) สำหรับระบบเวเปอร์เพอมิเอชัน.....104
รูปที่ 4.7 การแยกไอผ่านเยื่อแผ่นในระดับห้องปฏิบัติการโดยใช้ท่อใยกลวงเซรามิกเชิงประกอบ; 1 = Feed Tank 2 = Compressor 3 = Super Heater 4 = Permeate 5 = Condenser 1 6 = Membrane Module และ 7 = Condenser 2.....104
รูปที่ 4.8 แผนภาพการทดลองการแยกบิวทานอลควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบเพอร์แวปพอเรชัน (Pervaporation Membrane Bioreactor).....106
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบการซึมผ่านของบิวทานอลจากการทดลองเพอร์แวปพอเรชันโดยใช้เมมเบรน 3 ชนิดในการแยกบิวทานอลความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร.....108
รูปที่ 4.10 ความเข้มข้นของกลูโคส เซลล์ และตัวทำละลายทั้งหมดในกระบวนการหมัก ABE พร้อมระบบ Extractive Fermentation โดยใช้ *C. acetobutylicum* และเมมเบรน Ceramic/XSBR.....110

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 4.11 ฟลักซ์ทั้งหมดและความเข้มข้นของตัวทำละลายในด้านการเกิดปฏิกิริยาและด้านที่ผลผลิตที่แยกได้ในกระบวนการหมัก ABE พร้อมกับ Extractive Fermentation โดยใช้ *Clostridium acetobutylicum* และเมมเบรน XSBR.....111
รูปที่ 4.12 แสดงการลดลงของน้ำในสารละลายเอทานอลเมื่อผ่านกระบวนการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น (Vapor Permeation).....114
รูปที่ 4.13 อิทธิพลของอุณหภูมิในด้านของสารป้อนและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวม.....115
รูปที่ 4.14 การพล็อตสมการอาร์เรเนียสระหว่างค่าการฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอทและค่าอุณหภูมิสัมบูรณ์ผกผัน.....116
รูปที่ 4.15 อิทธิพลของอัตราการไหลของรีเทนเทตและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท.....118
รูปที่ 4.16 อิทธิพลของความดันไอของรีเทนเทตและความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นที่มีต่อค่าฟลักซ์โดยรวมของเพอร์มิเอท.....119
รูปที่ 4.17 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์และลักษณะการถ่ายเทมวลภายในระบบการแยกไอผ่านเยื่อแผ่น.....120
รูปที่ 4.18 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการคำนวณพื้นที่ผิวของเยื่อแผ่นที่ต้องการ ณ ความดันและความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นร้อยละของรีเทนเทต (W_0).....125
รูปที่ 5.1 การถ่ายเทมวลของสารอินทรีย์ผ่านเยื่อแผ่นด้วยกลไกการละลาย-การแพร่ (Solution-Diffusion).....130
รูปที่ 5.2 แสดงพฤติกรรมการดูดซับของสารอินทรีย์ในเยื่อแผ่น.....131
รูปที่ 5.3 รูปจำลองแสดงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ระหว่างน้ำและตัวทำละลายอินทรีย์ในระบบเพอร์สแทรกชัน.....132
รูปที่ 5.4 รูปถ่ายการจัดการทดลองการผลิตเอทานอลแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเมมเบรน (โดยที่ ก คือ กากน้ำตาลอ้อย, ข คือ ตัวทำละลายอินทรีย์ ค คือ เครื่องแลกเปลี่ยนมวลสารแบบแผ่น และ ง คือ ถังหมัก).....141
รูปที่ 5.5 การหาค่า P_{aq}^{mem} โดยใช้กราฟของเยื่อแผ่นซิลิโคนที่อิ่มตัวด้วยเพนทานอล และ 1-เดคานอล ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....144

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 5.6 ลักษณะการดูดซับของสารละลายเอทานอลในเยื่อแผ่นซิลิโคนที่อิ่มตัวด้วย 1-เดคานอล....148
รูปที่ 5.7 ลักษณะการดูดซับของเยื่อแผ่นซิลิโคนที่ไม่ผ่านการทำให้อิ่มตัวด้วย 1- เดคานอล (30 องศาเซลเซียส) 149
รูปที่ 5.8 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของเอทานอลในด้านของตัวทำละลายอินทรีย์ (1-เด็คานอล) ในระหว่างการศึกษาการถ่ายเทมวลผ่านเยื่อแผ่นซิลิโคนด้วยระบบเพอร์สแทรกชัน (δ = 300 ไมครอน V_{org} = 500 มิลลิลิตร V_{aq} = 2 ลิตร E^0 = 10% และ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ตามลำดับ) 150
รูปที่ 5.9 การหาค่าสัมประสิทธิการถ่ายเทมวลโดยรวม (k_{ov})....151
รูปที่ 5.10 ผลจากความหนาของเยื่อแผ่นที่มีต่อค่าสัมประสิทธิการถ่ายเทมวลโดยรวม (V_{org} = 500 มิลลิลิตร V_{aq} = 2 ลิตร E^0 = 10% Re_{aq} = 4000 Re_{org} = 150 และ อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส)....153
รูปที่ 6.1 หลักการทั่วไปของเซลล์ Electrodialysis....160
รูปที่ 6.2 อุปกรณ์ ED ในภาพรวม....161
รูปที่ 6.3 แผนผังการประกอบจัดชุดการทดลองระบบ Electrodialysis Bipolar Membrane (EDBPM) 163
รูปที่ 6.4 การจัดการทดลองสำหรับเครื่อง Electrodeionization (EDI) 164
รูปที่ 6.5 แผนภาพจำลองการทำการทดลองโดยใช้ระบบอิเลคโตรดีไอออนไนเซชัน....165
รูปที่ 6.6 การจัดชุดการทดลองการแยกกรดซัคซินิกควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยระบบ Electrodialysis Bipolar Membrane (EDBM)....166
รูปที่ 6.7 แผนผังการประกอบจัดชุดการทดลองระบบ Electrodialysis Bipolar Membrane (EDBPM)....167
รูปที่ 6.8 Experimental Setup สำหรับกระบวนการแยกกรดซัคซินิกควบคู่กับกระบวนการหมักด้วยเทคนิคอิเลคโตรไดอะไลซีส....172
รูปที่ 6.9 ความเข้มข้นของกรดซัคซินิกทั้งสองด้านของสารละลายในระบบอิเลคโตรไดอะไลซีส....173
รูปที่ 6.10 การแตกตัวของกรดแล็คติกในสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์....177
รูปที่ 6.11 หลักการทำงานของเครื่อง Electrodeionization (EDI) 177

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 6.12 Experimental Setup สำหรับกระบวนการแยกกรดแล็คติกด้วย EDI Technique....178
รูปที่ 6.13 การแยกกรดแล็คติกออกจากน้ำหมักแบบต่อเนื่องด้วย ระบบ EDI....179
รูปที่ 7.1 ไอโซเทอมของการดูดซับประเภทต่าง ๆ ที่จำแนกโดย IUPAC....193
รูปที่ 7.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์....197
รูปที่ 7.3 Freundlich Adsorption Isotherm ในรูปแบบของกราฟเส้นตรง....198
รูปที่ 7.4 ลักษณะเม็ดดูดความชื้นที่ถูกสังเคราะห์ขึ้น....202
รูปที่ 7.5 กระบวนการ PSA สำหรับเอทานอลรอบครึ่ง (345 s) (ขั้นตอน I.–III.); ขั้นตอน IV เป็นการสลับไปมาระหว่างคอลัมน์การดูดซับ....204
รูปที่ 7.6 ผลของความเข้มข้นของน้ำเริ่มต้นในด้านสารป้อนที่มีต่อ Breakthrough Curve ที่ความความดัน 4 บาร์และอุณหภูมิ 145 องศาเซลเซียส....206
รูปที่ 8.1 ไดอะแกรมของเครื่องระเหยแบบฟล์มกะ (Batch – Type Pan Evaporator)....216
รูปที่ 8.2 ไดอะแกรมของเครื่องระเหยแบบฟล์มไหลขึ้น (Rising – Film Evaporator)....217
รูปที่ 8.3 ไดอะแกรมของเครื่องระเหยแบบฟิล์มไหลลง (Falling – Film Evaporator) 219
รูปที่ 8.4 กระบวนการเก็บเกี่ยวกรดแล็คติกจากกระบวนการหมัก....231
รูปที่ 8.5 เครื่องระเหยภายใต้สุญญากาศแบบ Falling Film Evaporator....233
รูปที่ 8.6 รูป (ก) ตัวอย่างน้ำหมักที่เป็นสารป้อนในการระเหยแบบ Falling Film และ รูป (ข) ตัวอย่างเข้มข้นที่ได้จากกระบวนการระเหยแบบ Falling Film....234
รูปที่ 9.1 ภายในของหอกลั่นในแบบ Cap Tray....242
รูปที่ 9.2 ระบบการกลั่นแบบต่อเนื่อง....243
รูปที่ 9.3 เครื่องกลั่นระยะทางสั้น (Short Path Distillation) 245
รูปที่ 9.4 ไดอะแกรมหลักการทำงานของเครื่องกลั่นแบบระยะทางสั้นสำหรับ การกลั่นกรดแล็คติก....246
รูปที่ 9.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความบริสุทธิ์และผลผลิตของกรดแล็คติกที่กลั่นได้ ที่มีต่ออัตราการป้อน....247
รูปที่ 9.6 เครื่องกลั่นแบบมีปฏิกิริยาในระดับห้องปฏิบัติการ....248

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 9.7 การทำงานของหอกลั่นแบบมีปฏิกิริยา (Reactive Distillation Reactor) ขนาด 50 ลิตร 250
รูปที่ 9.8 Katapak-SP Structured Packing.....250
รูปที่ 9.9 การออกแบบชั้นของหอกลั่นที่เป็นถาดแบบ Perforated Plant พร้อมช่องทำนบ (Weir) และ Down Comer.....251
รูปที่ 9.10 ความเข้มข้นของไอเอทานอลจากสารละลายเอทานอล/น้ำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ.....252
รูปที่ 9.11 ขั้นตอนการผลิตไบโอเอทานอลจากกระบวนการหมักโดยทั่ว ๆ ไป.....254
รูปที่ 9.12 หลักการทำงานของระบบการแยกเอทานอลบริสุทธิ์จากน้ำหมักควบคู่กับกระบวนการกลั่นลำดับส่วนแบบสุญญากาศ.....254
รูปที่ 9.13 ภาพวาดการออกแบบภายในของหอกลั่นแบบการปั่นผสมไอ.....257
รูปที่ 9.14 การออกแบบโรงงานต้นแบบสำหรับกระบวนการกลั่น (ซ้าย) และหอกลั่นประสิทธิภาพสูงที่ทำการพัฒนาขึ้นภายในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (ขวา).....258
รูปที่ 9.15 ผลการทดลองของการกลั่นของผสมเอทานอล/น้ำ เมื่อเส้นตรง (-) คือเส้น 45° สัญลักษณ์สี่เหลี่ยม (□) คือข้อมูลการทดลองของสมดุลวัฏภาคเอทานอล/น้ำ และสัญลักษณ์วงกลม (○) คือข้อมูลที่ได้จากการทดลองของหอกลั่น.....259
รูปที่ 9.16 ความสัมพันธ์ของความเร็วรอบของใบพัดที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้โดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอลที่ป้อนที่แตกต่างกัน โดยอัตราการป้อนคือ 3.2 มิลลิลิตรต่อวินาที.....262
รูปที่ 9.17 รูปแบบ Vapor Liquid Equilibrium (VLE) ของระบบเอทานอล/น้ำ.....264
รูปที่ 9.18 อิทธิพลของอัตราการป้อนของน้ำหมักต่อความบริสุทธิ์ของเอทานอลที่กลั่นได้และความเข้มข้นของเอทานอลที่เหลือในน้ำกากส่า อัตราการหมุน 1000 รอบต่อนาที.....265
รูปที่ 9.19 การลดลงของน้ำในส่วนกลั่นเอทานอลและการเพิ่มขึ้นของผลผลิตเอทิลแล็คเตทระหว่างการทำ Reactive Distillation ของปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของกรดแล็คติกกับเอทานอล ในถังขนาด 100 ลิตร.....269

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 9.20 สมดุลวัฏภาคของของเหลวและไอ (Vapor/Liquid Equilibria, VLE) ระหว่างเอทิลแล็คเตทกับเอทานอลบริสุทธิ์ ณ ความดัน 1 บรรยากาศ.....271
รูปที่ 9.21 โครมาโตแกรมของ (ก) คือส่วนกลั่นในระหว่างที่เอาเอทานอลออกในตอนแรก (ข) คือ โครมาโตรแกรมของของเหลวใน Reactor ระหว่างปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันและ (ค) คือโครมาโตรแกรมของเอทิลแล็คเตทบริสุทธิ์ในส่วนกลั่นที่ได้จากการกลั่นลำดับส่วน.....273
รูปที่ 9.22 การจัดการทดลองการผลิตไดเอทิลซัคซิเนตแบบต่อเนื่องในระดับโรงงานต้นแบบ.....275
รูปที่ 9.23 การกลั่นลำดับส่วนในระหว่างการทำปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชัน.....276
รูปที่ 9.24 การออกแบบ Reflux Drum ที่สามารถแยกส่วนของน้ำและบิวทานอลออกจากกัน.....277
รูปที่ 9.25 สมดุลวัฏภาคระหว่างของเหลวและไอ (Vapor-Liquid Equilibrium) สำหรับระบบเอทานอลและน้ำ.....278
รูปที่ 10.1 แผนภาพแสดงการตกผลึก ประกอบด้วยเฟสสองมิติ.....283
รูปที่ 10.2 อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้สำหรับการจัดชุดการทดลองสำหรับกระบวนการตกผลึกของกรดซัคซินิก.....289
รูปที่ 10.3 เทคโนโลยีการศึกษาการตกผลึก (Process Analytical Technology, PAT) ณ จุดกำเนิด.....290
รูปที่ 10.4 Solubility Curve ของตัวอย่างที่อุณหภูมิต่าง ๆ.....291
รูปที่ 10.5 Cooling Rate ในกระบวนการตกผลึก.....292
รูปที่ 10.6 การเปรียบเทียบขนาดของผลึกกรดซัคซินิกที่ต่าง ๆ กัน รวมทั้งผลึกทางการค้า.....295
รูปที่ 10.7 รูปถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนของผลึกกรดซัคซินิกที่เกิดขึ้นจากการทดลองต่างๆ โดยที่ (ก) คือ Seed (ข) คือ Unseeding (ค) คือ High Seeding (ง) คือ Low Seeding (จ) คือ ตัวอย่างที่ไม่ผ่านนาโนฟิลเตรชัน และ (ฉ) คือ ผลึกที่ขายทางการค้า.....296

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 10.8 XRD Pattern ของผลึกกรดซัคซินิกที่ได้จากตัวอย่างที่ไม่ผ่านนาโนฟิลเตรชัน Succinic Acid Standard และ Magnesium Sulfate Standard และรูปผลึกที่ได้จากตัวอย่างที่ไม่ผ่านนาโนฟิลเตรชัน (ก) และตัวอย่างที่ผ่านนาโนฟิลเตรชัน (ข) 297
รูปที่ 10.9 XRD Pattern ของผลึกกรดซัคซินิกที่ได้จากกระบวนการตกผลึกที่สภาวะต่าง ๆ กัน....298
รูปที่ 10.10 รูปภาพจาก SEM ของผลึกกรดซัคซินิก (ก) ไม่ผ่านนาโนฟิลเตรชัน (ข) Unseeding (ค) High Seeding (ง) Low Seeding และ (จ) ผลึกที่ขายทางการค้า....299
รูปที่ 10.11 ตัวอย่างผลึกที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ใช้กระบวนการต่าง ๆ กัน....300
รูปที่ 10.12 เครื่องปฏิกรณ์การตกผลึก (Crystallization Reactor) 302
รูปที่ 10.13 แผนผังการติดตั้งอุปกรณ์เพื่อตรวจสอบผลึกไซลิทอลโดยใช้ FBRM, Raman และ PVM....304
รูปที่ 10.14 ขั้นตอนหลักของกระบวนการตกผลึก....305
รูปที่ 10.15 ภาพ PVM ที่ถ่ายในเวลาต่าง ๆ กันระหว่างการตกผลึกไซลิทอล 70Bx โดยไม่มีการล่อผลึก....306
รูปที่ 10.16 แนวโน้มของจำนวนและขนาดผลึกระหว่างการตกผลึกด้วยไซลิทอล 70Bx ร่วมกับการล่อผลึก (Seeding) ที่ร้อยละ 1....309
รูปที่ 10.17 การกระจายขนาดอนุภาค (Particle Size Distribution , PSD) ของผลึกระหว่างการตกผลึกด้วยไซลิทอล 70Bx ร่วมกับการล่อผลึก (Seeding) ที่ร้อยละ 1....310
รูปที่ 10.18 ภาพ PVM ที่ถ่ายในเวลาต่าง ๆ กันระหว่างการตกผลึกด้วยไซลิทอล 70Bx ร่วมกับการล่อผลึก (Seeding) ที่ร้อยละ 1....311
รูปที่ 10.19 ลักษณะเฉพาะที่เป็นพีคของ Raman Spectroscopy ของไซลิทอลก่อนและหลังการตกผลึก (ภายในเครื่องตกผลึก) 313
รูปที่ 10.20 ลักษณะเฉพาะพีคของ Raman Spectroscopy ของไซลิทอลหลังการตกผลึก (ภายในเครื่องตกผลึก) และหลังการทำให้แห้ง (เครื่องตกผลึกภายนอก) 313

สารบัญภาพ

หน้า

รูปที่ 10.21 ลักษณะเฉพาะของพีคจาก Raman Spectroscopy ของไซลิทอล หลังจากการทำให้แห้ง (เครื่องตกผลึกภายนอก) และผลของไซลิทอล เชิงพาณิชย์.....314
รูปที่ 10.22 ลักษณะเฉพาะของพีคจาก Raman Spectroscopy ของไซลิทอลก่อนและ หลังการตกผลึก หลังจากการอบแห้ง (เครื่องตกผลึกภายนอก) และ ไซลิทอลเชิงพาณิชย์.....315
รูปที่ 10.23 ภาพจาก SEM ของผลึกไซลิทอล โดยที่แถวบนแสดงผลึกไซลิทอล เชิงพาณิชย์ แถบกลางแสดงผลึกไซลิทอลเชิงพาณิชย์หลังจากการตกผลึก และแถวล่างแสดง ผลึกไซลิทอลที่ผลิตได้จากกระบวนการย่อย กากชานอ้อย.....316

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1.1 ตัวอย่างวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการทางชีวภาพ.....6
ตารางที่ 1.2 การเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละวิธีการเตรียมวัสดุเส้นใยพืช (Pre-Treatment) 13
ตารางที่ 1.3 ตัวอย่างวิธีการแยกผลิตภัณฑ์โดยอาศัยสมบัติทางกายภาพและเคมีที่แตกต่างกัน.....22
ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของโมดูลที่ใช้ในกระบวนการแยกด้วยเมมเบรน.....51
ตารางที่ 2.2 คุณลักษณะเฉพาะของโมดูลเมมเบรนที่ใช้ในการแต่ละระบบ.....51
ตารางที่ 2.3 การจำแนกเยื่อแผ่นโดยอาศัยแรงขับดันเป็นตัวกำหนด.....53
ตารางที่ 3.1 ผลการทดลองอิทธิพลของความแตกต่างของความดันต่อค่าฟลักซ์ของน้ำ.....71
ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเมมเบรน 3 ชนิด จากการแยกบิวทานอลโดยเพอร์แวปพอเรชันสารละลายบิวทานอลต่อน้ำ 10 กรัมต่อลิตร.....107
ตารางที่ 4.2 กระบวนการหมัก ABE พร้อมกับระบบ Extractive Fermentation โดยใช้ *C. acetobutylicum*.....109
ตารางที่ 5.1 เปรียบเทียบผลของเทคนิคต่างๆในการเก็บเกี่ยวผลิตภัณฑ์อะซีโตน-บิวทานอล-เอทานอล (ABE).....139
ตารางที่ 5.2 สัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างเยื่อแผ่น/น้ำ และ สัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างตัวทำละลายอินทรีย์ /น้ำ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส.....146
ตารางที่ 6.1 เปรียบเทียบความเข้มข้นของกรดแล็คติกโดยกระบวนการหมักและการแยกกรดแล็คติกออกจากน้ำหมักโดยใช้ระบบ EDI กระแสไฟฟ้า 15 โวลต์....179
ตารางที่ 7.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ.....190
ตารางที่ 8.1 แนวทางในการเลือกชนิดเครื่องระเหยสำหรับการใช้งาน.....222
ตารางที่ 8.2 พารามิเตอร์จลนศาสตร์ของการระเหยกรดแล็คติกตามหลักการของอาร์เรเนียสและครีสซิงเกอร์.....228
ตารางที่ 8.3 คุณลักษณะของตัวอย่างน้ำหมักและผลผลิตที่ได้จากการระเหยแบบฟิล์มบาง.....232

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 9.1 ความเข้มข้นของเอทานอลในส่วนกลั่น (y) เมื่อเปรียบเทียบกับ
ความเข้มข้นของเอทานอลในสารละลาย (x) และ
ค่า Relative Volatility (α) 260
ตารางที่ 9.2 การทดสอบประสิทธิภาพของหอกลั่นในด้านต่าง ๆ.....263
ตารางที่ 9.3 สภาวะของอุณหภูมิและความดันที่ใช้ ระหว่างขั้นตอนการกลั่น
เอทิลแล็คเตท บริสุทธิ์ โดย T1 คืออุณหภูมิของของเหลว
ส่วน T2 คืออุณหภูมิของไอตามลำดับ.....271
ตารางที่ 9.4 สมบัติทางกายภาพและทางเคมีของผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้น
ในการสังเคราะห์ไดเอทิลซัคซิเนต.....274
ตารางที่ 10.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกผลึก.....285
ตารางที่ 10.2 ส่วนประกอบในตัวอย่างน้ำหมักหลังจากผ่านนาโนฟิลเตรชัน.....294
ตารางที่ 10.3 การตกผลึกของกรดซัคซินิกที่การทดลองต่างๆกัน.....294
ตารางที่ 10.4 ผลของกระบวนการที่มีผลต่อผลึก Phase Purity และลักษณะของ
ผลึกที่ได้.....296
ตารางที่ 10.5 ผลผลิตการตกผลึกและระดับความบริสุทธิ์ของการตกผลึกของไซลิทอล
ที่ความเข้มข้นและสภาวะต่างกัน.....307
ตารางที่ 10.6 จำนวนและขนาดเฉลี่ยของผลึกระหว่างการตกผลึกด้วยไซลิทอล 70Bx
ร่วมกับการล่อผลึก (Seeding) ที่ร้อยละ 1.....309

คำอธิบายสัญลักษณ์

A	พื้นที่ผิวของเยื่อแผ่น
C_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร
C_{aq}	ความเข้มข้นของสารละลาย
C_{aq}^{i}	ความเข้มข้นของสารละลายที่ผิวสัมผัส
C_{aq}^{0}	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย
C_{mem}	ความเข้มข้นของสารในเยื่อแผ่น
C_{org}	ความเข้มข้นของสารในตัวทำละลายอินทรีย์
C_{org}^{i}	ความเข้มข้นของสารในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ผิวสัมผัส
D	อัตราการเจือจาง
D_i	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสาร *i*
D_{mem}	ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ของสารในเยื่อแผ่น
d^{HR}	เส้นผ่านศูนย์กลางไฮโดรลิค
E_f	ความเข้มข้นของเอทานอล ณ เวลาสุดท้ายของการหมัก
E^0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเอทานอล
F	อัตราการป้อนสาร
F_0	อัตราการป้อนสารเริ่มต้น
g (Grams)	กรัม
g/L (Gram per Liters)	กรัมต่อลิตร
g/ml (Gram per Milliliters)	กรัมต่อมิลลิลิตร
h (Hours)	ชั่วโมง
J_i	ฟลักซ์ของสาร *i*
J_{aq}^{i}	ฟลักซ์ของสาร *i* ผ่านชั้นขอบเขตของน้ำ
J_{mem}^{i}	ฟลักซ์ของสาร *i* ผ่านเยื่อแผ่น
J_{org}^{i}	ฟลักซ์ของสาร *i* ผ่านชั้นขอบเขตของตัวทำละลายอินทรีย์
k_{ov}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลโดยรวม

คำอธิบายสัญลักษณ์

k_{aq}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นขอบเขตของน้ำ
k_{mem}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นของเยื่อแผ่น
k_{org}	สัมประสิทธิ์การถ่ายเทมวลในชั้นขอบเขตของตัวทำละลายอินทรีย์
K_S	ค่าคงที่ของ Michaelis-Menten
L (Liters)	ลิตร
M (Molar)	โมลาร์
mg (Milligrams)	มิลลิกรัม
mg/L (Milligrams per Liters)	มิลลิกรัมต่อลิตร
mg/ml (Milligrams per Milliliters)	มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร
M_t	มวลของสารที่ถูกดูดซับในเยื่อแผ่น ณ เวลา t
min (Minutes)	นาที
ml (Milliliters)	มิลลิลิตร
Mm (Millimetres)	มิลลิเมตร
M_∞	มวลของสารที่ถูกดูดซับในเยื่อแผ่นที่จุดสมดุล
N_i	อัตราการถ่ายเทมวลของสาร i
P	ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์
P_{aq}^{mem}	สัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างเยื่อแผ่น/น้ำ
P_{org}^{mem}	สัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างเยื่อแผ่น/ตัวทำละลายอินทรีย์
P_{aq}^{org}	สัมประสิทธิ์การกระจายตัวระหว่างตัวทำละลายอินทรีย์/น้ำ
r_E	อัตราการผลิตของเอทานอล
r_S	อัตราการใช้สารตั้งต้น
r_X	ผลผลิตของชีวมวล

คำอธิบายสัญลักษณ์

S	ความเข้มข้นของสารตั้งต้น
SEM (Scanning Electron Microscope)	กล้องจุลทรรศน์อิเลคตรอนแบบส่องกราด
S_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น
t	เวลา
t_f	เวลาสิ้นสุดของการหมักแบบกึ่งกะ
u	ความเร็วของของไหล
V_{aq}	ปริมาตรของสารละลาย
V_f	ปริมาตรสุดท้ายของน้ำหมัก
V_0	ปริมาตรเริ่มต้นของน้ำหมัก
V_{org}	ปริมาตรของตัวทำละลายอินทรีย์
V_{mem}	ปริมาตรของเยื่อแผ่น
X	ความเข้มข้นของเซลล์
X_0	ความเข้มข้นเริ่มต้นของเซลล์
X_f	ความเข้มข้นสุดท้ายของเซลล์
°C (Degree Celsius)	องศาเซลเซียส
°K (Degree Kelvin)	องศาเคลวิน
°F (Degree Fahrenheit)	องศาฟาเรนไฮต์
α (Separation Factor)	ความสามารถในการคัดเลือก
δ	ความหนาของเยื่อแผ่น
ρ	ความหนาแน่นของของเหลว
χ	ศักดิ์ทางเคมีของสาร
μ	ความหนืดของสาร
µL (Micro-Liters)	ไมโครลิตร
μ	อัตราการเจริญจำเพาะ
μ_{max}	อัตราการเจริญจำเพาะสูงสุด
% (w/v)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักต่อปริมาตร
% (v/v)	เปอร์เซ็นต์ปริมาตรต่อปริมาตร