

การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรต์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี



นายเมธี ศิริศิลป์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2556  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5372306623



2521720007

SYNTHESIS OF MONOGLYCERIDES IN CAPILLARY MICROREACTOR

Mr. Matee Sirisin

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Petrochemistry and Polymer  
Science

Faculty of Science  
Chulalongkorn University

Academic Year 2013

Copyright of Chulalongkorn University



หัวข้อวิทยานิพนธ์

การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรต์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิด  
ท่อคัพฟิลลารี

โดย

นายเมธี ศิริศิลป์

สาขาวิชา

ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

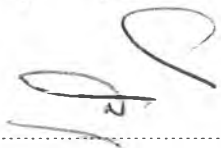
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่ง  
ของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบัณฑิต



..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

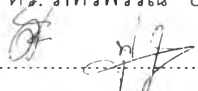
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์



..... ประธานกรรมการ

(ศาสตราจารย์ ดร. ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)



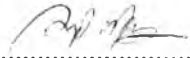
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ)



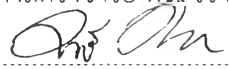
..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย)



..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วราวุฒิ ตั้งพสุธาตล)



..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนตรี ทองคำ)

35427176982

เมธี ศิริศิลป์ : การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะปิลลารี.  
(SYNTHESIS OF MONOGLYCERIDES IN CAPILLARY MICROREACTOR) อ.ที่  
ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ, อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์ร่วม:  
ผศ. ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย, 105 หน้า.

งานวิจัยนี้ศึกษาอุทกพลศาสตร์ของระบบของเหลวที่ไม่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันระหว่าง  
กลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะปิลลารี เพื่อหาภาวะที่เหมาะสม  
ในการสังเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร และเปรียบเทียบความเลือกสรรในการ  
สังเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครและเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ ใน  
การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของไหลภายในท่อคะปิลลารีจะได้ข้อมูลเบื้องต้นที่สำคัญ เช่น  
รูปแบบการไหล ขนาดของสลัก และความดันลด ที่สัมพันธ์กับอัตราเร็วในการไหลของสารตั้งต้น  
ทั้ง 2 ชนิด โดยรูปแบบการไหลสามารถแบ่งได้ 3 ลักษณะ ได้แก่ การไหลแบบสลัก การไหลแบบ  
หยุด และการไหลแบบผิดรูปของสลัก การไหลแบบสลักเป็นรูปแบบการไหลที่เหมาะสมที่สุดใน  
การสังเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ เนื่องจากรูปร่างสลักมีความเสถียร เหมาะต่ออัตราการถ่ายเทมวล  
และความร้อน ขนาดของสลักจะแปรผันตามอัตราเร็วในการไหลเข้าเครื่องปฏิกรณ์ของ  
กลีเซอรอลและกรดออกทานอิก โดยขณะที่ความดันลดที่เกิดขึ้นภายในท่อคะปิลลารีจะแปรผัน  
ตามความเร็วในการไหลของสลัก ดังนั้นภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์มอนอกลิเซอไรด์ในท่อ  
คะปิลลารีคือการใช้สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิก 2 : 1 ที่อุณหภูมิ 120  
องศาเซลเซียส เป็นเวลา 25 นาที ภายใต้ภาวะนี้ความเลือกสรรในการเกิดมอนอกลิเซอไรด์สูงสุด  
คือร้อยละ 92.0 นอกจากนี้พบว่าเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีความเลือกสรรในการสังเคราะห์มอนอกลิ-  
เซอไรด์สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์ เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ไมโครมีอัตราการถ่ายเทมวลและ  
ความร้อนที่สูงกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์

สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์

ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนิสิต

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์หลัก

ลายมือชื่อ อ.ที่ปริญญาวิทยานิพนธ์ร่วม

# # 5372306623 : MAJOR PETROCHEMISTRY AND POLYMER SCIENCE

KEYWORDS: MICROREACTOR / MONOGLYCERIDES / OLEOCHEMICAL / GLYCEROL / OCTANOIC ACID

MATEE SIRISIN: SYNTHESIS OF MONOGLYCERIDES IN CAPILLARY MICROREACTOR. ADVISOR: ASST. PROF. SIRILUX POOMPRADUB, PH.D, CO-ADVISOR: ASST. PROF. CHAWALIT NGAMCHARUSSIVICHAI, PH.D, 105 pp.

This work studied the hydrodynamic of immiscible liquid – liquid phase between glycerol and octanoic acid in capillary microreactor to find the optimum condition for monoglyceride synthesis. The percentage of selectivity of monoglyceride was also compared between capillary microreactor and a batch reactor. The hydrodynamic study provided the basic information such as flow regime, slug size and pressure drop which were related to input flow rate of glycerol and octanoic acid. The flow regime could be divided into 3 types including slug flow, drop flow and deformed flow. The slug flow showed a suitable pattern flow for monoglycerides synthesis because slug shape was stable and suitable for mass and heat transfers. The slug size was proportional to the input flow rate of glycerol and octanoic acid, while the pressure drop in capillary microtube was proportional to the slug flow velocity. Therefore, the optimum condition for synthesis monoglycerides in capillary microreactor was as follows: mole ratio of glycerol to octanoic acid of 2 : 1 at 120 °C for 25 min. Under this condition, the highest selectivity of monoglycerides (92.0%) was obtained. Additionally, the selectivity of monoglycerides in microreactor was higher than in the batch reactor due to better mass and heat transfers.

Field of Study: Petrochemistry and  
Polymer Science

Academic Year: 2013

Student's Signature *Matee Sirisin*

Advisor's Signature *Sirilux P.*

Co-Advisor's Signature *Chawalit Ngamcharussivichai*

### กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ. ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ และอาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ. ดร. ขวลิต งามจรัสศรีวิชัย ที่ให้คำแนะนำ แนวคิด ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ มาโดยตลอด จนวิทยานิพนธ์นี้เล่มนี้สำเร็จสมบูรณ์ ผู้ศึกษาจึงขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง และขอกราบขอบพระคุณบิดา และมารดา ที่ให้คำปรึกษาในเรื่องต่างๆ รวมทั้งเป็นกำลังใจที่ดีเสมอมา และต้องขอขอบคุณเพื่อน ๆ ที่ช่วยให้คำแนะนำดี ๆ รวมถึงกำลังใจตลอดเวลาที่ทำการทดลอง ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ผู้ให้ความอนุเคราะห์ในการจัดหาสถานที่ในการทำงานวิจัย รวมถึงอุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการศึกษาวิจัย ขอขอบพระคุณคณะกรรมการ ประธานการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่านที่เสียสละเวลามาร่วมรับฟัง และเสนอความคิดเห็นเกี่ยวกรงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณผู้ให้ความอนุเคราะห์หลายท่านที่ไม่กล่าวไว้ ณ ที่นี้ด้วย



## สารบัญ

หน้า

|  |    |
|--|----|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....   | ง  |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....  | จ  |
| กิตติกรรมประกาศ.....   | ฉ  |
| สารบัญ.....  | ช  |
| สารบัญตาราง.....   | 1  |
| สารบัญรูป.....   | 2  |
| บทที่ 1 บทนำ.....  | 6  |
| 1.1 มูลเหตุจูงใจ.....  | 6  |
| 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....   | 7  |
| 1.3 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....   | 8  |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 9  |
| 2.1 โมโนกลีเซอไรด์ (monoglycerides).....   | 9  |
| 2.1.1 กระบวนการผลิตโมโนกลีเซอไรด์ในอุตสาหกรรม.....   | 12 |
| 2.1.2 การกระจายตัวของโมโนกลีเซอไรด์.....   | 14 |
| 2.2 เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....   | 14 |
| 2.2.1 ข้อได้เปรียบของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....  | 15 |
| 2.2.2 ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....  | 15 |
| 2.2.3 ปัญหาที่พบในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....   | 16 |
| 2.2.4 การประยุกต์ใช้เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....   | 16 |
| 2.3 เปรียบเทียบเครื่องปฏิกรณ์ไมโครและเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์.....   | 17 |
| 2.3.1 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์กับ<br>เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....  | 17 |
| 2.3.2 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวลระหว่างเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์และ<br>เครื่องปฏิกรณ์ไมโคร..... | 19 |
| 2.4.1 การไหลแบบวัฏภาคเดียวกัน.....   | 20 |
| 2.4.2 การไหลแบบหลายวัฏภาค.....   | 23 |
| 2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....   | 26 |



|   |    |
|---|----|
| บทที่ 3 การทดลอง.....   | 31 |
| 3.1 สารเคมี.....  | 31 |
| 3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์.....   | 31 |
| 3.3 การทดลอง.....   | 32 |
| 3.3.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์.....   | 32 |
| 3.3.1 ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิด<br>ท่อคะพิลลารี..... | 36 |
| 3.3.2 การศึกษาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์.....                                  | 39 |
| 3.3.3 การวิเคราะห์เชิงปริมาณโดยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟี.....  | 39 |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....   | 40 |
| 4.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี.....                                      | 40 |
| 4.1.1 รูปแบบการไหลของของไหลในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี.....                                   | 40 |
| 4.1.2 ผลของความเร็วของสลัก.....   | 44 |
| 4.1.1 ความดันลดตามยาวของท่อคะพิลลารี.....   | 50 |
| 4.2 การศึกษาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี.....                       | 53 |
| 4.2.1 อิทธิพลของอุณหภูมิในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์.....  | 53 |
| 4.2.1 อิทธิพลของสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิก.....   | 57 |
| 4.2.3 อิทธิพลของเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....                       | 59 |
| 4.2.4 การศึกษาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์.....                                  | 61 |
| 4.3 การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ไมโครกับเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์.....                       | 63 |
| บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....   | 65 |
| 5.1 การศึกษาอุทกพลศาสตร์ของของเหลวในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคะพิลลารี.....                            | 65 |
| 5.2 การศึกษาหาปัจจัยที่เหมาะสมในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....                   | 65 |
| 5.3 ข้อเสนอแนะ.....   | 66 |
| รายการอ้างอิง.....  | 67 |
| ภาคผนวก ก. ตัวอย่างการคำนวณ.....  | 70 |
| ภาคผนวก ข. เส้นสอบเทียบมาตรฐาน (Calibration curve).....   | 86 |
| ภาคผนวก ค. โครมาโทแกรม.....   | 89 |







## สารบัญตาราง

หน้า

|  |     |
|--|-----|
| ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราเร็วในป้อนกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเข้าสู่เครื่องปฏิกรณ์ที่สัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกต่าง ๆ.....                  | 58  |
| ตารางที่ 4.2 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ระหว่างเครื่อง...64   | 64  |
| ตารางที่ ก.1 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.7) – (ก.11) เพื่อหาความดันลดที่ ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0025 เมตรต่อวินาที.....                  | 79  |
| ตารางที่ ก.2 ค่าของตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.12) เพื่อหาความดันลดที่ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0035 เมตรต่อวินาที.....                        | 80  |
| ตารางที่ ก.3 ค่าของตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.13) เพื่อหาสัดส่วนโดยโมลของสลักกรดออกทานอิกที่ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0022 เมตรต่อวินาที..... | 81  |
| ตารางที่ ก.4 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.15) เพื่อหาพื้นที่ผิวของสลักกรดออกทานอิกที่ความเร็วในการไหลของสลักที่ 0.0022 เมตรต่อวินาที.....       | 83  |
| ตารางที่ ก.5 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.16) เพื่อหาร้อยการเปลี่ยนแปลงไปของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที.....  | 83  |
| ตารางที่ ก.6 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.17) เพื่อหาร้อยผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที.....                       | 84  |
| ตารางที่ ก.7 ค่าตัวแปรที่ใช้คำนวณในสมการที่ (ก.18) เพื่อหาร้อยผลเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์ที่เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเคมี 35 นาที.....            | 85  |
| ตารางที่ ข.1 ข้อมูลจากรูปกราฟโครมาโทแกรมเพื่อสร้างเส้นสอบเทียบมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์มาตรฐาน.....   | 87  |
| ตารางที่ ข.2 สมการความสัมพันธ์ของเส้นสอบเทียบมาตรฐานของสารมาตรฐานในช่วงเวลาที่ปรากฏพีค.....  | 88  |
| ตารางที่ ค.1 ภาวะในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์และโครมาโทแกรม.....  | 89  |
| ตารางที่ ง.1 ข้อมูลที่สำคัญของสารตั้งต้น.....  | 104 |



3442176082

## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 2.1 โครงสร้างทางเคมีของโมโนกลีเซอไรด์.....  | 9    |
| รูปที่ 2.2 ปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน.....   | 10   |
| รูปที่ 2.3 กลไกการเกิดปฏิกริยาเอสเทอร์ฟิเคชันของแอลกอฮอล์กับกรดไขมัน.....  | 11   |
| รูปที่ 2.4 ปฏิกริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของกลีเซอรอลกับเอสเทอร์ของกรดไขมัน.....  | 11   |
| รูปที่ 2.5 กระบวนการทำโมโนกลีเซอไรด์ให้บริสุทธิ์.....  | 12   |
| รูปที่ 2.6 การสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์จากไขมันและน้ำมัน.....   | 13   |
| รูปที่ 2.7 ไอโซเมอร์ของโมโนกลีเซอไรด์.....   | 14   |
| รูปที่ 2.8 ผลของปริมาตรต่อความหนาแน่นที่วัดได้.....  | 16   |
| รูปที่ 2.9 แบบจำลองการกระจายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบดซ์.....  | 18   |
| รูปที่ 2.10 แบบจำลองการกระจายความร้อนในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....  | 18   |
| รูปที่ 2.11 แผนที่แสดงการกระจายตัวของกรดแอซติก (acetic acid) ในสารละลายเบสที่อัตราเร็วในการไหลเท่ากับ 0.1 mm/s; (a) 0.1 วินาที, (b) 0.5 วินาที, (c) 2.0 วินาที และ (d) 6.0 วินาที..... | 19   |
| รูปที่ 2.12 การไหลแบบ (a) engulfment flow (b) vortex หรือ dean flow ในท่อขนาด.....   | 21   |
| รูปที่ 2.13 การไหลแบบ (c) periodic pulsating flow (d) quasi-periodic pulsating flow(e).....  | 22   |
| รูปที่ 2.14 ผลของอัตราการไหลที่ส่งผลต่อขนาดของหยดอนุภาคในระบบน้ำและน้ำมันซิลิโคน.....  | 24   |
| รูปที่ 2.15 ลักษณะการไหลรูปแบบต่างๆภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....   | 24   |
| รูปที่ 2.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วของสารตั้งต้นสองชนิดในการไหลรูปแบบต่างๆของระบบไซโคลเฮกเซน-น้ำ ที่ความยาวท่อต่างกัน.....  | 25   |
| รูปที่ 3.1 การติดตั้งระบบเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพิลลารีสำหรับศึกษาอุทกพลศาสตร์.....   | 32   |
| รูปที่ 3.2 รูปวาดเสมือนของรูปแบบการไหลของของในท่อคัพิลลารี.....  | 33   |
| รูปที่ 3.3 การอินทิเกรตหาปริมาตรโดยหมุนรอบแกนแบบเปลือก (shell integration).....  | 34   |
| รูปที่ 3.4 ความดันลดต่อหนึ่งหน่วยสลัก: (a) แบบไม่มีฟิล์ม และ (b) แบบมีฟิล์ม.....   | 35   |
| รูปที่ 3.5 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพิลลารีในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์.....   | 38   |
| รูปที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวนสำหรับสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์.....  | 38   |
| รูปที่ 4.1 การย้อมสีสารตั้งต้น: (a) กลีเซอรอล และ (b) กรดออกทานอิก.....  | 41   |
| รูปที่ 4.2 การแยกเฟสของสารตั้งต้นในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครแบบท่อคัพิลลารีโดยย้อมสีกลีเซอรอล.....   | 41   |



- รูปที่ 4.3 ลักษณะการไหลของของเหลวทั้ง 2 ภูมิภาคในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครแบบท่อคัพพิลลารี (a, b) การไหลแบบสลัก, (c) การไหลแบบหยุด และ (d) การไหลแบบผิดปกติ.....42
- รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบการไหลกับอัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกที่เกิดขึ้นภายในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารี: ● สลักของกลีเซอรอล และ ▲ สลักของกรดออกทานอิก.....43
- รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรของสลักของกรดออกทานอิกกับความเร็วในการไหลเมื่อกำหนดให้อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน (ในกรณีที่ความเร็วน้อยกว่า 2 mm/s จะปรากฏสลักของกลีเซอรอล).....46
- รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักเมื่้อัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน.....46
- รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสลักของกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักกรดออกทานอิกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน.....47
- รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรสลักของกรดออกทานอิก (a) และปริมาตรของกลีเซอรอล (b) กับความเร็วในการไหลเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง.....48
- รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์สัดส่วนโดยโมลของสลักของกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหล ของสลักกรดออกทานอิกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1,500 ไมโครต่อชั่วโมง.....49
- รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ผิวสลักของกรดออกทานอิกกับอัตราเร็วในการไหลของสลักของกรดออกทานอิกเมื่ออัตราเร็วในการไหลของกลีเซอรอลคงที่เท่ากับ 1,500 ไมโครลิตรต่อชั่วโมง.....49
- รูปที่ 4.11 ลักษณะของสลักกรดออกทานอิก (a) ไม่มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ (b) มีฟิล์มของกลีเซอรอลมาเคลือบ.....51
- รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราเร็วในการไหลของสลักของกรดออกทานอิกเมื่ออัตราการไหลของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิกเท่ากัน.....51
- รูปที่ 4.13 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราเร็วในการไหลของสลักเมื่ออัตราเร็วในการ.....52
- รูปที่ 4.14 อัตราการเปลี่ยนแปลงไปของสารต้น และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....54
- รูปที่ 4.15 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพพิลลารี.....55
- รูปที่ 4.16 แก๊สโครมาโทแกรมแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสัญญาณกับเวลา ณ อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ (a) 80 °C, (b) 110 °C, (c) 120 °C, (d) 160 °C และ (e) 180 °C.....56

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกกับร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์.....  | 58 |
| รูปที่ 4.18 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่สัมพันธ์กับสัดส่วนโดยโมลของกลีเซอรอลต่อกรดออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร.....   | 59 |
| รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์และไดกลีเซอไรด์รวมถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกลีเซอรอลและกรดออกทานอิก.....   | 60 |
| รูปที่ 4.20 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่สัมพันธ์กับเวลาการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโครชนิดท่อคัพปลารี.....   | 61 |
| รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาที่ใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีของกลีเซอรอลกับกรดออกทานอิกในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์กับอัตราการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกและร้อยละผลได้ของโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์..... | 62 |
| รูปที่ 4.22 ความเลือกสรรในการเกิดโมโนกลีเซอไรด์และการเปลี่ยนแปลงไปของกรดออกทานอิกที่สัมพันธ์กับเวลาที่ใช้ในการสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรด์ในเครื่องปฏิกรณ์แบบแบตช์.....   | 63 |
| รูปที่ ก.1 ปริมาตรที่ได้จากการอินทิเกรตรอบแกนหมุนตามกระบวนกรของเซลล์.....   | 70 |
| รูปที่ ก.2 ภาพของสลักที่ถ่ายได้จากกล้องสเตอริโอ.....  | 71 |
| รูปที่ ก.3 ผลที่ได้จากการวัดความยาวในส่วนต่าง ๆ ของสลัก.....  | 71 |
| รูปที่ ก.4 การหาจุดบนเส้นโค้งของปลายสลัก.....   | 72 |
| รูปที่ ก.5 กราฟของเส้นโค้งส่วนปลายสลัก.....   | 72 |
| รูปที่ ก.6 ปริมาตรส่วนปลายสลักที่ได้จากการอินทิเกรตตามทฤษฎีของเซลล์.....  | 73 |
| รูปที่ ก.7 การหาจุดบนเส้นโค้งของท้ายสลัก.....   | 74 |
| รูปที่ ก.8 กราฟของเส้นโค้งส่วนท้ายสลัก.....   | 74 |
| รูปที่ ก.9 ปริมาตรส่วนท้ายสลักที่ได้จากการอินทิเกรตตามทฤษฎีของเซลล์.....  | 75 |
| รูปที่ ก.10 ความยาวจากส่วนปลายถึงส่วนท้ายของสลัก.....   | 75 |
| รูปที่ ก.11 ความยาวจากส่วนปลายของสลักอันหนึ่งไปถึงส่วนปลายของสลักถัดไป.....   | 76 |
| รูปที่ ข.1 เส้นสอบเทียบมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์.....  | 88 |
| รูปที่ ค.1 โครมาโทแกรมหมายเลข 1.....  | 90 |
| รูปที่ ค.2 โครมาโทแกรมหมายเลข 2.....  | 91 |
| รูปที่ ค.3 โครมาโทแกรมหมายเลข 3.....  | 92 |
| รูปที่ ค.4 โครมาโทแกรมหมายเลข 4.....  | 93 |



|  |     |
|--|-----|
| รูปที่ ค.5 โครมาโทแกรมหมายเลข 5.....   | 94  |
| รูปที่ ค.6 โครมาโทแกรมหมายเลข 6.....   | 95  |
| รูปที่ ค.7 โครมาโทแกรมหมายเลข 7.....   | 96  |
| รูปที่ ค.8 โครมาโทแกรมหมายเลข 8.....   | 97  |
| รูปที่ ค.9 โครมาโทแกรมหมายเลข 9.....   | 98  |
| รูปที่ ค.10 โครมาโทแกรมหมายเลข 10..... | 99  |
| รูปที่ ค.11 โครมาโทแกรมหมายเลข 11..... | 100 |
| รูปที่ ค.12 โครมาโทแกรมหมายเลข 12..... | 101 |
| รูปที่ ค.13 โครมาโทแกรมหมายเลข 13..... | 102 |
| รูปที่ ค.14 โครมาโทแกรมหมายเลข 14..... | 103 |

