

การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่เร่งปฏิกิริยาด้วยไลเพสตรังรูป

นางสาว สุวิมล ทรัพย์ทวีวุฒิ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2550

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



4 7 7 2 5 4 1 8 2 3

BIODIESEL PRODUCTION FROM VEGETABLE OILS CATALYZED BY IMMOBILIZED LIPASE

Miss Suwimon Suptaweewut

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Biotechnology**

Faculty of Science

Chulalongkorn University

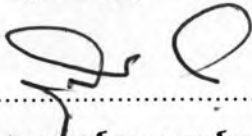
Academic Year 2007

Copyright of Chulalongkorn University

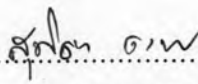
502133

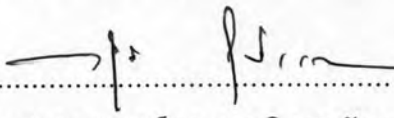
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่เร่งปฏิกิริยาด้วยไลเพสตรังรูป
โดย นางสาว สุวิมล ทรัพย์ทวีวุฒิ
สาขาวิชา เทคโนโลยีชีวภาพ
อาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร. วรุฒิ จุฬาลักษณ์านุกูล
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รองศาสตราจารย์ ทิฆัมพร ยงวณิชย์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทมหาบัณฑิต

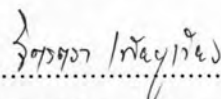

..... คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร. สุพจน์ หารหนองบัว)


คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์


..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ สุมิตรา คงชื่นสิน)


..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. วรุฒิ จุฬาลักษณ์านุกูล)


..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ทิฆัมพร ยงวณิชย์)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรตรา เพ็ญเขียว)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อลิสา วังใน)

สุวิมล ทรัพย์ทวีภูมิ: การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่เร่งปฏิกิริยาด้วยไลเปสตรึงรูป

(BIODIESEL PRODUCTION FROM VEGETABLE OILS CATALYZED BY

IMMOBILIZED LIPASE) อ. ที่ปรึกษา: รศ. ดร. วรวิมล จุฬาลักษณ์านุกุล, อ. ที่ปรึกษาร่วม:

รศ. ทิฆัมพร ยงวณิชย์, 105 หน้า.

จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันระหว่างน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ กับเมทานอล โดยใช้โนโวไซม์ 435 ตรึงรูปในการเร่งปฏิกิริยา เพื่อผลิตไบโอดีเซลหรือเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอย่างต่อเนื่อง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ พบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดของการทำปฏิกิริยาเป็นดังนี้ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว, อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอลเป็น 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณเอนไซม์ เท่ากับ 0.5 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4 หลังจากนั้น ทดสอบการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุ 3 คอลัมน์ ซึ่งกำหนดอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอลเป็น 1 : 1 ในแต่ละคอลัมน์ โดยใช้ปัจจัยทั้งหมดที่กล่าวมาข้างต้นเป็นปัจจัยควบคุม พบว่า สามารถผลิตไบโอดีเซลได้อย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลา 83.33 ชั่วโมง ซึ่งเท่ากับปริมาตรรวมของสารละลายผสมของสารตั้งต้น 1 ลิตร โดยหลังจากทำปฏิกิริยาผ่านคอลัมน์ที่ 1, 2 และ 3 ให้ผลรวมของเปอร์เซ็นต์การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์โดยเฉลี่ย เท่ากับ 11.67, 16.25 และ 23.42 เปอร์เซ็นต์ และให้อัตราการผลิต เท่ากับ 5.66, 7.34 และ 10.06 มิลลิโมลต่อกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีชีวภาพ.....ลายมือชื่อผู้จัดทำ.....สุวิมล ทรัพย์ทวีภูมิ.....

ปีการศึกษา.....2550.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4772541823: MAJOR BIOTECHNOLOGY

KEYWORDS: BIODIESEL/ LIPASE/ TRANSESTERIFICATION

SUWIMON SUPTAWEEWUT: BIODIESEL PRODUCTION FROM VEGETABLE OILS
CATALYZED BY IMMOBILIZED LIPASE. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF.
WARAWUT CHULALAKSANANUKUL, Ph.D., THESIS COADVISOR: ASSOC. PROF.
TIKAMPORN YONGVANICH, 105 pp.

The continuous productions of biodiesel or fatty acid methyl ester, FAME with refined palm oil and methanol catalyzed by immobilized Novozym 435 in a packed-bed column reactor were tested to investigate the optimal condition as followed: type of packed column as mixed Novozym 435 and glass beads, molar ratio of oil to methanol as 1:1, temperature of reaction as 50 °C, flow rate of substrate solution as 0.20 ml/min, and amount of enzyme as 0.5 g with ratio of amount of enzyme to glass beads as 1:4 weight by weight. After producing biodiesel by using the optimal condition in 3 columns of packed-bed column reactor with 1:1 molar ratio of oil to methanol per each column, the results showed that all 3 columns produced biodiesel through all of the period, 83.33 hours with total substrate solution volume as 1 L. The %conversion of first, second, and third columns were 11.67, 16.25, and 23.42 %, and the production rates were 5.66, 7.34 and 10.06 mmole/g/h.

Field of studyBiotechnology.....Student's signature.....*Suwimon Suptaweeewut*
Academic year.....2007.....Advisor's signature.....*Warawut Chulalak*
Co-advisor's signature.....*Tikamporn Yongvanich*.....

กิตติกรรมประกาศ

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. วรุณี จุฬาลักษณ์านุกูล อาจารย์ที่ปรึกษา วิทยานิพนธ์ และ รองศาสตราจารย์ ทิฆัมพร ยงวนิชย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้ คำแนะนำ ข้อคิดเห็น ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ สุมิตรา คงชื่นสิน ที่กรุณามาเป็นประธานในการสอบ วิทยานิพนธ์ครั้งนี้

กราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. จิตรตรา เพ็ญเขียว และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อลิสา วังไฉน ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ อาจารย์ ดร. ปกรณ์ วินะยานุวัตติคุณ ที่ได้กรุณาช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และข้อคิดเห็น ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ที่ให้ทุนดำเนินการวิจัย และ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย แก่งานวิจัยนี้

ขอขอบพระคุณ สาขาวิชาหลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ และ ภาควิชาพฤกษศาสตร์ สำหรับ ความช่วยเหลือดีจากเจ้าหน้าที่ทุกๆ ท่าน ตลอดจน สถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือ ในการทำงาน วิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ เพื่อน พี่ น้อง ในห้องปฏิบัติการทุกๆ ท่าน ด้วยความซาบซึ้งใจอย่างยิ่ง ที่ช่วยเหลือ ในการทำงานวิจัย และให้กำลังใจแก่ข้าพเจ้า จนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของข้าพเจ้าที่ให้การสนับสนุนทางการเงิน ตลอดจนคอยให้กำลังใจด้วยความรักและห่วงใยเป็นล้นพ้น ต่อข้าพเจ้าเสมอมา

สารบัญ

| | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | ง |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | จ |
| กิตติกรรมประกาศ..... | ฉ |
| สารบัญ..... | ช |
| สารบัญตาราง..... | ญ |
| สารบัญภาพ..... | ฎ |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| วัตถุประสงค์ของงานวิจัย..... | 3 |
| ขั้นตอนการวิจัย..... | 3 |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... | 4 |
| บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 5 |
| 2.1 น้ำมันพืช..... | 5 |
| 2.2 ไบโอดีเซล..... | 6 |
| 2.2.1 การผลิตไบโอดีเซล..... | 7 |
| 2.2.2 คุณภาพของไบโอดีเซล..... | 8 |
| 2.2.3 ประโยชน์ของการใช้ไบโอดีเซล..... | 11 |
| 2.3 ทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน..... | 12 |
| 2.3.1 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิคเกิล..... | 12 |
| 2.3.2 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิคกรด..... | 13 |
| 2.3.3 การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยานิคโค..... | 13 |
| 2.3.4 การทำเป็นของไหลภาวะเหนือวิกฤต..... | 13 |
| 2.4 ไลเพส..... | 15 |
| โนโวไซม์ 435..... | 15 |

| | หน้า |
|--|------|
| 2.5 ระบบการผลิตไบโอดีเซล..... | 16 |
| 2.5.1 การผลิตแบบกะ..... | 16 |
| 2.5.2 การผลิตแบบต่อเนื่อง..... | 16 |
| 2.6 เครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ..... | 17 |
| 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... | 18 |
| 2.7.1 การผลิตไบโอดีเซล..... | 18 |
| 2.7.2 การผลิตไบโอดีเซลในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดบรรจุ..... | 20 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย..... | 23 |
| วัสดุอุปกรณ์ในการทดลอง..... | 23 |
| สารเคมีในการทดลอง..... | 24 |
| ขั้นตอนในการทดลอง..... | 25 |
| 3.1 การทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน เพื่อผลิตไบโอดีเซล หรือ เมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมันอิสระ (FAME) แบบต่อเนื่อง..... | 25 |
| 3.1.1 การจัดวางสารละลายผสมของสารตั้งต้นอยู่ที่อุณหภูมิห้อง..... | 25 |
| 3.1.2 การจัดวางสารละลายผสมของสารตั้งต้นอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันกับ เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ..... | 26 |
| 3.1.3 ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน..... | 27 |
| 3.1.4 การผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ คอลัมน์เบดบรรจุ 3 คอลัมน์..... | 31 |
| 3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสาร..... | 33 |
| บทที่ 4 ผลการทดลอง..... | 35 |
| 4.1 ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน..... | 35 |
| 4.1.1 ประเภทของการบรรจุคอลัมน์..... | 35 |
| 4.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล..... | 38 |
| 4.1.3 ผลของอุณหภูมิต่อการทำปฏิกิริยา..... | 41 |
| 4.1.4 ผลของอัตราการไหลต่อการทำปฏิกิริยา..... | 45 |

| | หน้า |
|---|------|
| 4.1.5 ปริมาณเอนไซม์..... | 47 |
| 4.2 การผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์ เบดบรรจุ 3 คอลัมน์..... | 49 |
| บทที่ 5 วิจารณ์ผลการทดลอง..... | 55 |
| 5.1 ผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน..... | 55 |
| 5.2 การผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์ เบดบรรจุ 3 คอลัมน์..... | 63 |
| บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง..... | 65 |
| รายการอ้างอิง..... | 66 |
| ภาคผนวก..... | 71 |
| ภาคผนวก ก | 72 |
| ภาคผนวก ข | 81 |
| ภาคผนวก ค | 86 |
| ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์..... | 105 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | | หน้า |
|----------|--|------|
| 1 | ปริมาณอัตราการผลิตพืชน้ำมันของประเทศไทย (พินตัน)..... | 5 |
| 2 | มาตรฐานไบโอดีเซลของยุโรป (BS EN 14214: 2003) และมาตรฐานไบโอดีเซล ของสหรัฐอเมริกา (ASTM D 6751-03)..... | 9 |
| 3 | การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไบโอดีเซลด้วยวิธีต่างๆ..... | 14 |
| 4 | การทดลองผลของปัจจัยต่างๆ ต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันเพื่อ ผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ..... | 56 |
| ก-1 | องค์ประกอบของกรดไขมัน, ค่าการเกิดสบู่ (Saponification Number, SN), ค่าไอโอดีน (Iodine Value, IV) และค่าซีเทน (Cetane Number, CN) ของ ไบโอดีเซล (FAME) จากน้ำมันที่สกัดได้จากเมล็ดพืชที่สามารถรับประทานได้..... | 71 |
| ก-2 | ข้อมูลจากโครมาโทแกรมในรูปที่ ก-1..... | 76 |
| ก-3 | ข้อมูลจากการทดลองเรื่องการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง โดยใช้น้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาด้วยโนโวไซม์ 435 ตรังรูป ในเครื่องปฏิกรณ์แบบ คอลัมน์เบดบรรจุ 3 คอลัมน์ ณ เวลาการผลิตชั่วโมงที่ 83.33 ของคอลัมน์ที่ 3..... | 78 |
| ก-4 | ข้อมูลจากโครมาโทแกรมในรูปที่ ก-2..... | 80 |
| ข-1 | ความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานทั้งหมด..... | 81 |
| ค-1 | ข้อมูลจากการศึกษาประเภทของการบรรจุคอลัมน์..... | 86 |
| ค-2 | ข้อมูลจากการศึกษาผลของอัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อ เมทานอล..... | 88 |
| ค-3 | ข้อมูลจากการศึกษาผลของอุณหภูมิต่อการทำปฏิกิริยา..... | 92 |
| ค-4 | ข้อมูลจากการศึกษาผลของอัตราการไหลต่อการทำปฏิกิริยา..... | 96 |
| ค-5 | ข้อมูลจากการศึกษาในหัวข้อปริมาณโนโวไซม์ 435..... | 98 |
| ค-6 | ข้อมูลจากการศึกษาการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ คอลัมน์เบดบรรจุ 3 คอลัมน์..... | 101 |

สารบัญภาพ

| รูปที่ | | หน้า |
|--------|---|------|
| 1 | ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์กับแอลกอฮอล์..... | 12 |
| 2 | ปฏิกิริยาที่สามารถเร่งได้โดยไลเปส..... | 15 |
| 3 | ระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ โดยควบคุมให้สารละลายผสมของสารตั้งต้นอยู่ที่อุณหภูมิห้อง..... | 25 |
| 4 | ระบบการผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ โดยควบคุมให้สารละลายผสมของสารตั้งต้นอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันกับเครื่อง ปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ..... | 27 |
| 5 | การบรรจุคอลัมน์เพื่อใช้เป็นเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ 2 ประเภท..... | 28 |
| 6 | การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุโดย ควบคุมให้สารละลายผสมของสารตั้งต้นอยู่ที่อุณหภูมิห้อง..... | 30 |
| 7 | การผลิตไบโอดีเซลแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุโดย ควบคุมให้สารละลายผสมของสารตั้งต้นอยู่ที่อุณหภูมิเดียวกันกับเครื่องปฏิกรณ์ แบบคอลัมน์เบดบรรจุ..... | 30 |
| 8 | ระบบการทดลองเพื่อผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบ คอลัมน์เบดบรรจุ 3 คอลัมน์..... | 32 |
| 9 | การแยกชั้นของผลิตภัณฑ์กับน้ำจากการทดลอง..... | 33 |
| 10 | การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม บริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอลเป็น 1 : 0.5 อุณหภูมิใน การทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ เท่ากับ 40 องศา เซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตร ต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ ปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... | 36 |
| 11 | การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชัน | |

รูปที่

- ของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยไนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอลเป็น 1 : 0.5 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณไนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณไนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 37
- 12 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยไนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมไนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณไนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณไนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 39
- 13 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยไนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมไนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณไนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณไนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 40
- 14 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยไนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ

- ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสม
โนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อ
เมทานอลเป็น 1 : 3 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์
เบดบรรจุ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสาร
ตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม
โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 42
- 15 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชัน
ของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัย
ควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุ
คอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์ม
บริสุทธิ์ต่อเมทานอลเป็น 1 : 3 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาของเครื่องปฏิกรณ์
แบบคอลัมน์เบดบรรจุ เท่ากับ 40 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลาย
ผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435
เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว
เป็น 1 : 4..... 43
- 16 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชันของน้ำมันปาล์ม
บริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ
ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสม
โนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อ
เมทานอล เท่ากับ 1 : 3 อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ
0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วน
โดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 44
- 17 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิเฟเคชัน
ของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัย
ควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุ

รูปที่

หน้า

- คอลลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์ม
บริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 3 อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้ง
ต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดย
มีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 45
- 18 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม
บริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ
ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลลัมน์แบบบรรจุเป็นการบรรจุคอลลัมน์แบบผสม
โนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อ
เมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส
และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของ
ปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 46
- 19 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชัน
ของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัย
ควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลลัมน์แบบบรรจุเป็นการบรรจุ
คอลลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์ม
บริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศา
เซลเซียส และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนัก
ของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้วเป็น 1 : 4..... 47
- 20 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ิฟิเคชันของน้ำมันปาล์ม
บริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ
ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลลัมน์แบบบรรจุเป็นการบรรจุคอลลัมน์แบบผสม
โนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อ
เมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส
และอัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อ
นาที..... 48

รูปที่

หน้า

- 21 การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที..... 49
- 22 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 หลังจากผ่านคอลัมน์ที่ 1 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 0.5 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว เป็น 1 : 4..... 50
- 23 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 หลังจากผ่านคอลัมน์ที่ 2 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์แบบบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 0.5 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว เป็น 1 : 4..... 51
- 24 การเปลี่ยนแปลงของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 หลังจากผ่านคอลัมน์ที่ 3 โดยมีปัจจัย

รูปที่

หน้า

| | | |
|-----|--|----|
| | โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 0.5 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว เป็น 1 : 4..... | 52 |
| 25 | การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 0.5 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว เป็น 1 : 4..... | 53 |
| 26 | การเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์และอัตราการผลิตของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งปฏิกิริยาโดยโนโวไซม์ 435 โดยมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 0.5 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณโนโวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว เป็น 1 : 4..... | 54 |
| ก-1 | โครมาโทแกรมขององค์ประกอบของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งโดยโนโวไซม์ 435 ตรีงรูปด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของ | |

รูปที่

หน้า

| | | |
|-----|---|----|
| | เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.20 มิลลิลิตรต่อนาที และ ปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 0.5 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณ โนวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว เป็น 1 : 4..... | 75 |
| ก-2 | โครมาโทแกรมของสิ่งอุดตันจากคอลัมน์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์-เอสเทอร์ฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลที่เร่งโดยโนโวไซม์ 435 โครงสร้าง ด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุ ซึ่งมีปัจจัยควบคุม คือ ลักษณะของ เครื่องปฏิกรณ์แบบคอลัมน์เบดบรรจุเป็นการบรรจุคอลัมน์แบบผสมโนโวไซม์ 435 และเม็ดแก้ว อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล เท่ากับ 1 : 1 อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา เท่ากับ 50 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารละลายผสมของสารตั้งต้น เท่ากับ 0.06 มิลลิลิตรต่อนาที และ ปริมาณโนโวไซม์ 435 เท่ากับ 1 กรัม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของปริมาณ โนวไซม์ 435 ต่อเม็ดแก้ว เป็น 1 : 4..... | 80 |
| ข-1 | กราฟมาตรฐานของเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน..... | 82 |
| ข-2 | กราฟมาตรฐานของไตรกลีเซอไรด์..... | 82 |
| ข-3 | กราฟมาตรฐานของ 1, 3 ไดกลีเซอไรด์..... | 83 |
| ข-4 | กราฟมาตรฐานของ 1, 2 ไดกลีเซอไรด์..... | 83 |
| ข-5 | กราฟมาตรฐานของโมโนกลีเซอไรด์..... | 84 |
| ข-6 | กราฟมาตรฐานของกรดไขมันอิสระ..... | 84 |
| ข-7 | โครมาโทแกรมของสารละลายมาตรฐาน..... | 85 |