การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม

นายพงศ์ประวิน พานิชกุล

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3650-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

I 22436956

PRODUCTION OF BIODIESEL FROM VEGETABLE OILS VIA TRANSESTERIFICATION IN MIXED FLOW REACTOR

Mr. Pongprawin Panichkul

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of Master of Science Program in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 974-17-3650-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม
โดย	นายพงศ์ประวิน พานิชกุล
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุณยเกียรติ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร. เปี่ยมศักดิ์ เมนะเศวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร. ธราพงษ์ วิฑิตศานต์)

.....อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุณยเกียรติ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

.....กรรมการ

(อาจารย์ ดร. ชวลิต งามจรัสศรีวิชัย)

.....กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ ดร.ชาคริต ทองอุไร)

พงศ์ประวิน พานิชกุล : การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชด้วยทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม (PRODUCTION OF BIODIESEL FROM VEGETABLE OILS VIA TRANSESTERIFICATION IN MIXED FLOW REACTOR)
อ. ที่ปรึกษา : รศ. กัญจนา บุณยเกียรติ , อ.ที่ปรึกษาร่วม : รศ. ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์, 117 หน้า. ISBN 974-17-3650-9.

การผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องจากน้ำมันพืชด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม พารามิเตอร์หลักที่ศึกษาคือ ถังกวน ปริมาตรของของเหลว ชนิดของใบพัดกวน ความเร็วรอบของใบพัดกวน อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช ชนิดและปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา และเวลาเฉลี่ยที่สารทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ ขั้นแรกศึกษาภาวะที่มีผลต่อการผสมเป็นเนื้อเดียวกันในถังกวนขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 14 เซนติเมตร พบว่าปริมาตรของของเหลวที่ดีที่สุด คือ 2000 มิลลิลิตร จากนั้นออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล พบว่าอัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์มกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยามีอันตรกิริยาต่อกัน และภาวะที่เหมาะสมซึ่งได้ร้อยละความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์สูงสุด คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์มเท่ากับ 9 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส สำหรับใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ใช้ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที และเวลาเฉลี่ยที่สารทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที ได้ความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์สูงสุดในช่วงร้อยละ 93-95 สำหรับใบพัดกวนแบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ใช้ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที และเวลาเฉลี่ยที่สารทำปฏิกิริยาอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที ได้ความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์สูงสุดในช่วงร้อยละ 91-93 นอกจากนี้พบว่าการใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาแทนโซเดียมไฮดรอกไซด์พบว่ามีอัตราการเกิดปฏิกิริยาช้ากว่า และการใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นจำเป็นต้องใช้ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาที่เพิ่มขึ้นกว่ากรณีของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม เพราะว่าน้ำมันมะพร้าวมีค่าของกรดสูงกว่า

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่อนิสิต.....พงศ์ประวิน พานิชกุล.....
สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4672339323 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD : VEGETABLE OIL; BIODIESEL; TRANSESTERIFICATION; CONTINUOUS PRODUCTION; MIXED FLOW REACTOR

PONGPRAWIN PANICHKUL : PRODUCTION OF BIODIESEL FROM VEGETABLE OILS VIA TRANSESTERIFICATION IN MIXED FLOW REACTOR. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. KUNCHANA BUNYAKIAT. THESIS CO-ADVISOR : ASSOC. PROF. SOMKIAT NGAMPRASERTSITH, Ph. D., 117 pp. ISBN 974-17-3650-9.

Continuous production of biodiesel from vegetable oils via transesterification was carried out in a mixed flow reactor. The investigated parameters were: reactor vessel, liquid volume, types of impeller, speed of impeller, molar ratio of methanol to vegetable oil, type and amount of catalyst, reaction temperature and residence time. In the first part, conditions affecting mixing in the reactor vessel having inside diameter 14 centimeter were found at the optimal liquid volume at 2000 millitre. In the second part, by employing, 2^3 factorial design, the interaction between molar ratio of methanol to vegetable oil and amount of catalyst was found. The optimal condition for maximum purity of methyl ester was found to be; molar ratio of methanol to palm kernel oil of 9, 1% by weight of sodium hydroxide, and reaction temperature at 60 $^{\circ}$C. For the 6-blade flat blade turbine, at impeller speed of 900 rpm and residence time 60 min, the maximum purity of methyl ester was found in the range of 93-95%. For the 4-blade 45° pitched blade turbine, at impeller speed of 1200 rpm and residence time 60 min, the maximum purity of methyl ester was found in range of 91-93%. Furthermore, when potassium hydroxide catalyst was used in stead of sodium hydroxide, the rate of reaction was slower. When coconut oil was used as raw material, the amount of catalyst needed was higher than in the case of palm kernel oil because of the higher acid value of coconut oil.

Department.....Chemical Technology... Student's signature Pongprawin Panichkul

Field of study.....Chemical Technology... Advisor's signature K. Bunyakiat

Academic year.....2005..... Co-advisor's signature S. Ngamprasertsith

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ กัญจนา บุณยเกียรติ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้คำแนะนำและข้อคิดเห็นต่างๆ ในการวิจัยมาตลอด

ขอขอบคุณ บริษัท ชุมพรอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม จำกัด (มหาชน) และ บริษัท น้ำมันมะพร้าวทับสะแก จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำมันพืชมาใช้การทดลอง

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและช่างเทคนิคทุกท่านที่อำนวยความสะดวก ในอุปกรณ์ เครื่องมือ และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นอย่างดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาเคมีเทคนิค โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านเชื้อเพลิง ภายใต้โครงการพัฒนาบัณฑิตศึกษาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ศูนย์วิจัยปิโตรเลียมและเทคโนโลยีปิโตรเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่สนับสนุนทุนวิจัยตลอดการศึกษา

ขอขอบคุณ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ในภาควิชาเคมีเทคนิคที่ให้การสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์มาโดยตลอด และขอขอบคุณ คุณ เรืองวิทย์ สว่างแก้ว ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือด้านเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ มาโดยตลอด

ท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา-มารดา ญาติพี่น้องที่เป็นกำลังใจเสมอมา จนสำเร็จการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ
กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ
สารบัญ ..... ช
สารบัญตาราง ..... ฎ
สารบัญภาพ ..... ฑ
สารบัญรูป ..... ณ
บทที่
1. บทนำ 1
1.1. ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1
1.2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย 2
1.3. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.4. ขอบเขตงานวิจัย 2
1.5. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 3
2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4
2.1. แนวคิดและทฤษฎี 4
2.1.1. น้ำมันดีเซล 4
2.1.2. ลักษณะเฉพาะทางเชื้อเพลิงของน้ำมันดีเซล 5
2.2. ไขมันและน้ำมัน 9
2.2.1. การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืช 11
2.2.2. สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืช 11
2.3. การใช้น้ำมันพืชเป็นเชื้อเพลิงทดแทน 12
2.3.1. การใช้น้ำมันพืชโดยตรง 16
2.3.2. การใช้น้ำมันพืชโดยปรับปรุงคุณภาพ 16
1) การผสมน้ำมันพืช 16
2) การทำให้เป็นของผสมไมโครอิมัลชัน 16
3) การแตกตัวของน้ำมันพืชด้วยความร้อน 16
4) การแตกตัวสบู่ของน้ำมันพืชด้วยความร้อน 17
2.3.3. การผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 17

บทที่ หน้า

1) กระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 18
- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด 18
- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส 19
- ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเอนไซม์ 21
2) กระบวนการที่ไม่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 22
2.4. กระบวนการผลิต 23
2.4.1. กระบวนการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง 23
1) เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ 23
2.4.2. กระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง 23
2) เครื่องปฏิกรณ์ท่อไหล 23
3) เครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม 24
2.5. การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี 24
2.5.1. ถังกวน 24
2.5.2. ชนิดของใบพัดกวน 26
1) ใบพัดกวนแบบใบพัด 26
2) ใบพัดกวนแบบกังหัน 26
3) ใบพัดกวนแบบใบพาย 26
4) ใบพัดกวนแบบใบเกลียว 26
2.5.3. แผ่นกั้น 28
2.5.4. พฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทคซ์ 29
2.5.5. พฤติกรรมการไหล 30
2.6. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 31
2.6.1. งานวิจัยและสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระกวนการผลิตไบโอดีเซล 31
2.6.2. งานวิจัยศึกษาพฤติกรรมการกวน 37
2.6.3. การเปรียบเทียบงานวิจัยและสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระกวนการ ผลิตไบโอดีเซล 37
3. วิธีการดำเนินงานวิจัย 40
3.1. เครื่องมือในการทดลอง 40
3.2. สารที่ใช้ในการทดลอง 43

บทที่ หน้า

3.3. ขั้นตอนการวิจัย 44
3.3.1. วิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้น 44
3.3.2. การทดลอง 44
3.3.2.1. การศึกษารูปแบบการไหลของใบพัดกวนแต่ละชนิด ในถังปฏิกรณ์จำลองแบบกะที่ปริมาตรต่างๆ 44
3.3.2.2. การหาภาวะการทดลองของการผลิตไบโอดีเซล โดยใช้ถังปฏิกรณ์จริงแบบกะ 45
3.3.2.3. การหาภาวะการทดลองของการผลิตไบโอดีเซล อย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม 46
3.4. การวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 47
3.5. การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง 47
4. ผลการทดลองและการอภิปรายผล 49
4.1. ผลการวิเคราะห์สมบัติสารตั้งต้นและน้ำมันดีเซล 49
4.1.1. สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชตัวอย่างและน้ำมันดีเซล 49
4.1.2. ชนิดและปริมาณองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง 50
4.2. ผลการศึกษาอิทธิพลการกวนของใบพัดกวนในถังปฏิกรณ์จำลอง 51
4.3. ผลการหาภาวะการทดลองของการผลิตไบโอดีเซลโดยใช้ถังปฏิกรณ์จริงแบบกะ 60
4.3.1. ผลการวิเคราะห์การออกแบบการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล 60
4.3.2. ผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างอัตราส่วนโดยโมลเมทานอล ต่อน้ำมันพืชกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา 65
4.3.3. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา 66
4.3.4. ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการกวนของใบพัดกวน 68
4.4. ผลการหาภาวะการทดลองของการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง ในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม 71
4.4.1. ผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน 71
4.4.2. ผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° 73
4.4.3. ผลการเปลี่ยนทางออกของผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม 76

บทที่ หน้า

4.5. ผลการเปลี่ยนแปลงชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาของการผลิตไบโอดีเซล
อย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม 77
4.6. ผลการเปลี่ยนแปลงชนิดน้ำมันพืชของการผลิตไบโอดีเซล
อย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม 78
4.7. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิง 80
5. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 83
5.1. สรุปผลการทดลอง 83
5.1.1. การออกแบบถังปฏิกรณ์และใบพัดกวน 83
5.1.2. การหาภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องปฏิกรณ์ 83
5.1.3. การผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์
แบบไหลผสมจากน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 84
5.1.4. การผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์
แบบไหลผสมจากน้ำมันมะพร้าว 85
5.1.5. สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้จาก
น้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว 85
5.2. ข้อเสนอแนะ 86
5.2.1. ข้อสังเกตจากการทดลอง 86
5.2.2. ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานวิจัยต่อไป 86
รายการอ้างอิง 87
ภาคผนวก 91
ภาคผนวก ก 92
ภาคผนวก ข 99
ภาคผนวก ค 108
ภาคผนวก ง 113
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 117

สารบัญตาราง

ตาราง		หน้า
2.1	การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันดีเซล	5
2.2	ตัวอย่างกรดไขมันสามัญที่พบในไขมัน	9
2.3	องค์ประกอบกรดไขมันของน้ำมันพืชชนิดต่างๆ	10
2.4	การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำมันพืช	11
2.5	สมบัติและค่าความร้อนของน้ำมันพืชต่างๆ เปรียบเทียบกับน้ำมันดีเซล	12
2.6	สมบัติทางกายภาพและเคมีของน้ำมันพืชบางชนิด	13
2.7	ภาวะการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด	19
2.8	ภาวะและผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทเบส	20
2.9	ภาวะและผลการทดลองของตัวเร่งปฏิกิริยาแระเภทเอนไซม์	21
2.10	การเปรียบเทียบส่วนประกอบของใบพัดกวนแต่ละชนิด	28
2.11	การเปรียบเทียบงานวิจัยและสิทธิบัตรเกี่ยวกับกระกวนการผลิตไบโอดีเซล	38
3.1	ค่าสูงสุดและต่ำสุดสำหรับการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล	45
3.2	ภาวะการวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟ	47
3.3	รายการการวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงและมาตรฐานอ้างอิง	48
4.1	สมบัติทางเชื้อเพลิงของน้ำมันพืชตัวอย่างเทียบกับน้ำมันดีเซล	49
4.2	ความหนาแน่นและสภาพความมีขั้วของน้ำมันตัวอย่างและเมทานอล	50
4.3	ชนิดและองค์ประกอบกรดไขมันในน้ำมันพืชตัวอย่าง	51
4.4	การเปรียบเทียบผลการผสมเมื่อใช้ใบพัดกวนสองชนิด ที่ปริมาตรรวมของเหลวรวม 1600 มิลลิลิตร	58
4.5	การเปรียบเทียบผลการผสมเมื่อใช้ใบพัดกวนสองชนิด ที่ปริมาตรรวมของเหลวรวม 2000 มิลลิลิตร	58
4.6	การเปรียบเทียบผลการผสมเมื่อใช้ใบพัดกวนสองชนิด ที่ปริมาตรรวมของเหลวรวม 2400 มิลลิลิตร	59
4.7	ค่าร้อยละความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์ของการทดลองแบบ 2^3 แฟกทอเรียล	61
4.8	การวิเคราะห์ความแปรปรวนของตัวแปรที่มีผลต่อค่าร้อยละความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์ (ANOVA Table)	62
4.9	ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงระหว่างอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที	65

บทที่ หน้า

4.10 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม ไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก 67

4.11 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการกวนของใบพัดกวนแบบ กังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 69

4.12 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการกวนของใบพัดกวนแบบ กังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 69

4.13 ข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม ที่เวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม ไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 71

4.14 ข้อมูลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม ที่เวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมล เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียม ไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 73

4.15 ข้อมูลการเปลี่ยนทางออกของผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม ที่ระดับทางออกถังปฏิกรณ์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 4 ใบแบบ เอียง 45° ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อ น้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที 75

บทที่ หน้า

4.16 ข้อมูลการเปลี่ยนแปลงชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาของการผลิตไบโอดีเซล
อย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบแบบ
ติดบนจาน ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลเมทานอล
ต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และ
เวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที 77
4.17 ข้อมูลผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม
จากน้ำมันมะพร้าว ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ
โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบ 900
รอบต่อนาที ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันมะพร้าว 9 ต่อ 1
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที 79
4.18 มาตรฐานน้ำมันดีเซลและมาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล 81
4.19 สมบัติทางเชื้อเพลิงของตัวอย่างน้ำมันดีเซลและเมทิลเอสเทอร์
ที่ภาวะการผลิตที่ดีที่สุด 81
ข1 ค่า m และ n สำหรับน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว 106
ข2 ข้อมูลสำหรับคำนวณสูตรโมเลกุลของน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันมะพร้าว 107
ค1 มาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนเร็วและดีเซลหมุนช้า 108
ค2 มาตรฐานน้ำมันไบโอดีเซล 111
ง1 การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 113
ง2 การคำนวณอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันมะพร้าว 9 ต่อ 1 115

สารบัญภาพ

ภาพประกอบที่ หน้า

3.1 ใบพัดใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน 42

3.2 ใบพัดกวนแบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° 42

4.1 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 1600 มิลลิลิตร 52

4.2 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 1600 มิลลิลิตร 52

4.3 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 1600 มิลลิลิตร 53

4.4 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 1600 มิลลิลิตร 53

4.5 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2000 มิลลิลิตร 54

4.6 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 4 ใบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2000 มิลลิลิตร 54

4.7 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2000 มิลลิลิตร 55

4.8 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2000 มิลลิลิตร 55

4.9 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2400 มิลลิลิตร 56

ภาพประกอบที่ หน้า

4.10 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ไม่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2400 มิลลิลิตร 56
4.11 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2400 มิลลิลิตร 57
4.12 การกวนภายในถังปฏิกรณ์ที่ติดตั้งแผ่นกั้นของใบพัดกวน
แบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ
ปริมาตรของเหลวรวมภายในถัง 2400 มิลลิลิตร 57

สารบัญรูป

รูปประกอบที่ หน้า

2.1 รูปแบบถังกวนตามมาตรฐาน 25
2.2 ใบพัดกวนแบบใบพัด 26
2.3 ใบพัดกวนแบบกังหัน 27
2.4 ใบพัดกวนแบบใบพาย 27
2.5 ใบพัดกวนแบบใบเกลียว 27
2.6 ความสัมพันธ์ของการใช้งานใบพัดกวนแต่ละชนิดกับความหนืดของเหลว 27
2.7 ระบบที่มีการป้องกันการเกิดพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทคซ์ 29
2.8 การเกิดพฤติกรรมการไหลแบบวอร์เทคซ์ในระบบที่ไม่ได้ติดตั้งแผ่นกั้น 30
2.9 พฤติกรรมการไหลภายในถังกวนของใบพัดกวนแต่ละชนิด 31
2.10 กระบวนผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Barnhorst และคณะ 32
2.11 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Noureddini และคณะ 33
2.12 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Hanna และคณะ 34
2.13 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Darnoko และคณะ 35
2.14 กระบวนการผลิตไบโอดีเซลที่ประดิษฐ์ขึ้นโดย Bouaid และคณะ 36
3.1 แผนภาพอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง 40
3.2 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่อง 41
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการแจกแจงความน่าจะเป็นปกติแบบครึ่ง (Half normal probability plot) กับค่า Effect Estimate 61
4.2 ร้อยละความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มสูงสุดและต่ำสุด 63
4.3 ร้อยละความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดอกไซด์สูงสุดและต่ำสุด 64
4.4 ร้อยละความบริสุทธิ์เมทิลเอสเทอร์ที่ผลกระทบระหว่างกันของอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์มกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดอกไซด์สูงสุดและต่ำสุด 64
4.5 ผลการเปลี่ยนแปลงระหว่างอัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันพืชกับปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลาทำปฏิกิริยา 60 นาที 66

รูปประกอบที่ หน้า

4 6 ผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการทำปฏิกิริยา ที่อัตราส่วนโดยโมล
เมทานอลต่อน้ำมัน เมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก 67
4.7 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการกวนของใบพัดกวนแบบกังหัน
6 ใบแบบติดบนจาน ที่ความเร็วรอบต่างๆ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอล
ต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์
ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 70
4.8 ผลการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบการกวนของใบพัดกวนแบบกังหัน
4 ใบแบบเอียง 45° ที่ความเร็วรอบต่างๆ อัตราส่วนโดยโมลเมทานอล
ต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์
ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 70
4.9 ผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม
ที่เวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน
6 ใบแบบติดบนจาน ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมล
เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 72
4.10 ผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม
ที่เวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน
4 ใบแบบเอียง 45° ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมล
เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
โซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส 74
4.11 ผลการเปลี่ยนทางออกของผลิตภัณฑ์ของเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม
ที่ระดับทางออกถังปฏิกรณ์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 4 ใบแบบเอียง 45°
ความเร็วรอบ 1200 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดใน
ปาล์ม 9 ต่อ 1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก
อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที 76

รูปประกอบที่ หน้า

4.12 ผลการเปลี่ยนแปลงชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาของการผลิตไบโอดีเซล
อย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา
โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 6 ใบ
แบบติดบนจาน ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที อัตราส่วนโดยโมล
เมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 9 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส
และเวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที 77
4.13 ผลการผลิตไบโอดีเซลอย่างต่อเนื่องในเครื่องปฏิกรณ์แบบไหลผสม
จากน้ำมันมะพร้าว ที่ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ
โดยใช้ใบพัดกวนแบบกังหัน 6 แฉก ที่ความเร็วรอบ 900 รอบต่อนาที
ที่อัตราส่วนโดยโมลเมทานอลต่อน้ำมันมะพร้าว 9 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศา
เซลเซียส และเวลาเฉลี่ยที่สารอยู่ในเครื่องปฏิกรณ์ 60 นาที 79
ก1 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลคาไพรเลต 95
ก2 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลลอเรต 95
ก3 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลไมริสเตต 96
ก4 Calibration curve ของสารมาตรฐานเมทิลปาล์มิเตต 96
ก5 โครมาโทแกรมของเมทิลเอสเทอร์ 98