



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตเอทิลเอสเตอร์เชิงอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มดิบ

Commercial Production of Ethyl Ester from Crude Palm Oil

สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

วิทยาเขตหาดใหญ่

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ชาศกริต ทองอุไร

ดร. พิมพรรณ เกียรติชิมกุล

นางสาวรวมพร นิคม

นายทรงธรรม ไพธัถาวร

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2553

จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

600254391

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



249832



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การผลิตเอทิลเอสเตอร์เชิงอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มดิบ
Commercial Production of Ethyl Ester from Crude Palm Oil
สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพีชน้ำมัน
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
วิทยาเขตหาดใหญ่

ผู้วิจัย

รองศาสตราจารย์ ดร. ชาคกริต ทองอุไร
ดร. พิมพรรณ เกียรติชิมกุล
นางสาวรวมพร นิคม
นายทรงธรรม โพธิ์ถาวร



ได้รับทุนอุดหนุนวิจัยงบประมาณแผ่นดิน ประจำปี 2553
จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ



กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgement)

งานวิจัยเรื่อง การผลิตเอทิลเอสเทอร์เชิงอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มดิบ (Commercial Production of Ethyl Ester from Crude Palm Oil) สำเร็จลุล่วงด้วยดีด้วยความร่วมมือจากหลายๆ ฝ่าย ทั้งนี้ขอขอบคุณ ทุนอุดหนุนวิจัยของสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โรงงานต้นแบบไบโอดีเซล คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่สถานวิจัยฯ ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องในการทำวิจัยครั้งนี้ทุกๆ ท่านที่ช่วยเหลือให้ งานวิจัยสำเร็จสมบูรณ์ลงได้ด้วยดี

คณะผู้วิจัย

พฤษภาคม 2555



รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย

ส่วนที่ 1 รายละเอียดเกี่ยวกับแผนการวิจัย

ชื่อโครงการวิจัย (ภาษาไทย) การผลิตเอทิลเอสเตอร์เชิงอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มดิบ

(ภาษาอังกฤษ) Commercial Production of Ethyl Ester from Crude Palm Oil

ได้รับทุนอุดหนุนวิจัย ประจำปี 2553 จำนวนเงิน 876,000 บาท

ระยะเวลาทำวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 24 ตุลาคม 2552 – กันยายน 2553

ส่วนที่ 2 หน่วยงานและคณะผู้ดำเนินงานวิจัย

1. ผู้อำนวยการแผนงาน

รองศาสตราจารย์ ดร. ชاکริต ทองอุไร

ตำแหน่ง ผู้อำนวยการสถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและ
พีชน้ำมัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ 074-287450 โทรสาร 074-287185

E-mail chakrit.t@gmail.com

สัดส่วนการทำวิจัย 30 %

2. ผู้ร่วมงานวิจัย

ดร. พิมพ์พรรณ เกียรติชิมกุล

ตำแหน่ง อาจารย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
90112

โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-287185

สัดส่วนการทำวิจัย 20 %

3. ผู้ร่วมงานวิจัย

นางสาวรวมพร นิคม

ตำแหน่ง นักศึกษาหลักสูตรดุษฎีบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา
90112



โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-287185

สัดส่วนการทำวิจัย 20 %

4. ผู้ร่วมงานวิจัย

นายทรงธรรม โพธิ์ถาวร

ตำแหน่ง นักศึกษาหลักสูตรดุษฎีบัณฑิต

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา

90112

โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-287185

สัดส่วนการทำวิจัย 15 %

5. ผู้ร่วมงานวิจัย

นักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.

หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112

โทรศัพท์ 074-287055-6 โทรสาร 074-287185

สัดส่วนการทำวิจัย 15 %

6. หน่วยงานหลัก : สถานวิจัยและพัฒนาพลังงานทดแทนจากน้ำมันปาล์มและพืชน้ำมัน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

7. หน่วยงานสนับสนุน : ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์



บทคัดย่อ

249832

โครงการวิจัยนี้เป็นการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการผลิตเอทิลเอสเทอร์เชิงอุตสาหกรรมจากน้ำมันปาล์มดิบ ในระดับโรงงานสาธิต (pilot plant) ขนาดกำลังการผลิต 500 ลิตร/วัน โดยดำเนินการด้วยระบบต่อเนื่องทุกขั้นตอน ตั้งแต่เอสเทอริฟิเคชัน ทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน การแยกคีนเอทานอล และกระบวนการล้างด้วยน้ำร่วมกับสารดูดซับ

น้ำมันปาล์มดิบที่ใช้ศึกษามีปริมาณกรดไขมันอิสระในช่วง 4.43-8.32% โดยน้ำหนัก เอทานอลที่ใช้เชิงการค้ามีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่า 99.9% โดยปริมาตร กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 98wt% เกรดทางการค้า และโพแทสเซียมเมทอกไซด์ ($KOCH_3$) ความเข้มข้น 32 wt% ในเมทานอล เกรดทางการค้า ดังปฏิกรณ์เอสเทอริฟิเคชันแบบกวนต่อเนื่อง (CSTR) ปริมาตร 87.4 ลิตร และดังปฏิกรณ์ทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบแยกกลีเซอรอลออกแบบต่อเนื่อง (continuous deglycerolization) ปริมาตร 16 ลิตร แยกคีนเอทานอลเกินพอด้วยอุปกรณ์การระเหยแบบแฟลช (flash evaporator) ขนาดถังแฟลชปริมาตร 250 ลิตร การล้างดำเนินการด้วยการดูดซับสลับด้วยเรซินซึ่งบรรจุในถังปฏิกรณ์แบบเบตนิ่ง (fixed bed) ปริมาตร 55 ลิตร 2 ถัง ถังน้ำล้าง 1 ถัง และถังกรองเกลือ 1 ถัง

การวิจัยพบว่าขั้นตอนการเอสเทอริฟิเคชันด้วยกรดซัลฟิวริกสามารถลดปริมาณยางเหนียว (gum) ไปด้วยพร้อมกัน โดยปริมาณฟอสฟอรัสลดลงจาก 11.24-21.70 mg/kg เหลือเพียง 1.01-1.46 mg/kg ซึ่งผ่านมาตรฐานค่าฟอสฟอรัสของกรมธุรกิจพลังงาน ซึ่งกำหนดค่าไว้ที่ไม่สูงกว่า 10.0 mg/kg สภาวะการเอสเทอริฟิเคชันแบบต่อเนื่องที่เวลากักเก็บ (retention time) 1 ชั่วโมง อุณหภูมิ 60 °C อัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอลต่อกรดไขมันอิสระเป็น 30 : 1 และปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น 60 wt% ของกรดไขมันอิสระ สามารถลดกรดไขมันอิสระลงเหลือ 0.81 wt% ได้

การแก้ปัญหาการไม่แยกชั้นของเฟสกลีเซอรอล ซึ่งพบว่ามีมาจากการเกิดไมเซลล์ของกลีเซอรอลที่ล้อมรอบด้วยโมเลกุลสบู่ ดำเนินการแก้ไขโดยลดปริมาณน้ำในระบบด้วยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโพแทสเซียมเมทอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและดำเนินการแยกกลีเซอรอลและสบู่ออกอย่างต่อเนื่องด้วยการใช้ถังปฏิกรณ์แบบแยกกลีเซอรอลแบบต่อเนื่อง (continuous deglycerolization) สภาวะทรานส์เอสเทอริฟิเคชันแบบต่อเนื่องใช้เวลากักเก็บ (retention time) 25 นาที อุณหภูมิ 66 °C อัตราส่วนเชิงโมลของเอทานอลต่อไตรกลีเซอไรด์ 5.7: 1 และสัดส่วนเชิงโมลของตัวเร่งปฏิกิริยาต่อไตรกลีเซอไรด์ 0.2: 1 จะได้ความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเทอร์สูงกว่า 98%

อย่างไรก็ตามค่าความเป็นกรดของเอทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าประมาณ 0.6 mg KOH/g ซึ่งสูงกว่าค่ามาตรฐาน เนื่องจากค่าสมดุลของปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำและเอทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นได้รวดเร็วใน



เอทานอล ค่าปริมาณสบู่ที่มีค่าสูงมากเกือบ 30,000 ppm ซึ่งเป็นอุปสรรคในการล้าง อีกทั้งค่าผลได้ที่มีค่าประมาณ 90% ยังเป็นปัญหาที่ต้องดำเนินการแก้ไขต่อไป

เมื่อทำการวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์การผลิตเอทิลเอสเทอร์ โดยต้นทุนน้ำมันปาล์มดิบกิโลกรัมละ 26 บาท และเอทานอลกิโลกรัมละ 20 บาท ราคาการผลิตเอทิลเอสเทอร์จะมีค่า 34 บาท/ลิตร



Abstract

249832

This research aimed to study the optimum conditions of commercial ethyl ester production from crude palm oil (CPO) in a pilot scale plant of 500 litre biodiesel/day capacity which including esterification, transesterification, ethanol recovery and resin co-washing processes, all of the units were carried out continuously.

In this study, CPO containing free fatty acid (FFA) of 4.43-8.32wt% and commercial grade of ethanol (99.9%V purity) were used as reactants, sulfuric acid (98wt%) and potassium methoxide (32 wt% in methanol) were used as esterified and transesterified catalysts, respectively. Continuous stirred tank reactor for esterification step was 87.4 litres in volume and continuous deglycerolization reactor of 16 litres was used in transesterification step. High pressure at 30 bars and temperature of 220°C were carried out with a flash tank of 250 litres. Washing equipment contain 2 tanks of resin adsorption, 1 tank of water washing and 1 tank of salt filter tank, all of them were 55 litres in volume.

It was found that the esterification step with sulfuric acid catalyst could decrease phosphorous content from 11.24-21.70 mg/kg of crude palm oil to 1.01-1.46 mg/kg of esterified palm oil, certainly met the Thai Nation Standard of Methyl Ester which is below 10.0 mg/kg biodiesel. Optimized continuous esterification step was carried out at 1 hour of retention time, 60°C, molar ratio of ethanol to FFA at 30: 1 and sulfuric catalyst of 60 wt% of FFA resulted in 0.81 wt% FFA of esterified palm oil.

It could be seen that the cause of no phase separation of glycerol in ethyl ester came from the micells formation in the existing of high soap content. This obstacle was solved by lowering water content in the system, potassium methoxide was used as a catalyst and glycerol pahse was continuous separated out by using the continuous deglycerolization reactor. The best condition of our trial was at 25 minute of retention time, 66°C, molar ratio of ethanol to triglyceride at 5.7: 1 and molar ratio of methoxide to triglyceride of 0.2: 1 resulted in higher than 98% of ethyl ester content in the produced biodiesel.

However, the obtained acid value of biodiesel was about 0.6 mg KOH/g higher than the standard value of 0.5 mg KOH/g which came from the fast reaction rate of hydrolysis reaction of



water and ester in matrix of ethanol. The soap content in ester phase was very high of nearly 30,000 ppm resulted in a difficulty of washing step and higher loss of biodiesel yield. Also a lower yield of production (90%) which gave a higher production cost, anyhow these problems should be solved in the further studied.

According economical study of the ethyl ester production, cost of CPO and ethanol were 26 and 20 baht/kg, respectively. It yielded 34 baht/litre of ethyl ester.

สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ข
รายละเอียดเกี่ยวกับโครงการวิจัย	ค
บทคัดย่อภาษาไทย	จ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ช
สารบัญตาราง	
สารบัญภาพ	
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
1.5 สถานที่ดำเนินการวิจัย	4
บทที่ 2 หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ไบโอดีเซล	5
2.2 น้ำมันปาล์มดิบ	6
2.3 เอทานอล	9
2.4 การเร่งปฏิกิริยาด้วยด่าง (alkaline catalysis)	10
2.5 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน (Transesterification)	14
2.6 ปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชัน (Esterification)	17
2.7 ปฏิกิริยาสะพอนิฟิเคชัน (saponification)	18
2.8 การแยกคีนแอลกอฮอล์	19
2.9 การล้าง (washing)	21
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 วัตถุประสงค์และสารเคมี	27
3.2 กิจกรรมที่ 1 วิเคราะห์คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันปาล์มดิบ	27

3.3 กิจกรรมที่ 2 ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยใช้กระบวนการเอสเตอริฟิเคชันแบบแบทช์	28
3.4 กิจกรรมที่ 3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตเอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันที่สภาวะเหมาะสม	28
3.5 กิจกรรมที่ 4 ศึกษาการผลิตเอทิลเอสเทอร์แบบต่อเนื่องของกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันและทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	31
3.6 กิจกรรมที่ 5 การแยกคีนแอลกอฮอล์และการล้างไบโอดีเซล	36
3.7 กิจกรรมที่ 6 ศึกษาคุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ตามมาตรฐานของกรมมาตรฐานพลังงาน	41
3.8 การวัดวิเคราะห์	41
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 คุณสมบัติพื้นฐานของน้ำมันปาล์มดิบ	44
4.2 กระบวนการเอสเตอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล	44
4.3 กระบวนการทรานส์เอสเตอริฟิเคชันน้ำมันปาล์มดิบที่ผ่านกระบวนการเอสเตอริฟิเคชัน (Esterified Palm Oil, EPO) และน้ำมันปาล์มรีไฟน์	48
4.4 กระบวนการเอสเตอริฟิเคชันและทรานส์เอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่องขนาด 500 ลิตร/วัน	62
4.5 การปรับแต่งคุณภาพไบโอดีเซล	70
4.6 คุณสมบัติทางเชื้อเพลิงของเอทิลเอสเทอร์ที่ผลิตได้ตามมาตรฐานของกรมมาตรฐานพลังงาน	74
บทที่ 5 การวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์	
5.1 ข้อมูลพื้นฐานในการวิเคราะห์	78
5.2 การวิเคราะห์ความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ	81
บทที่ 6 สรุปผลการวิจัย	
เอกสารอ้างอิง	84
ภาคผนวก	86

ภาคผนวก ก. การหาปริมาณกรดไขมันอิสระ (FFA, %)	87
ภาคผนวก ข. การหาปริมาณสบู่	90
ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์ปริมาณกลีเซอไรด์ที่เหลือในไบโอดีเซลด้วยวิธีการกะประมาณ (อนุสิทธิบัตรเลขที่ 5060)	92
ภาคผนวก ง. มาตรฐานของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน	95
ภาคผนวก จ. รายงานผลการวิเคราะห์/ทดสอบ	98
ภาคผนวก ฉ. ราคาอ้างอิงเอทานอลแปลงสภาพและไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน และการคำนวณราคาไบโอดีเซล (B100) ประกาศคณะกรรมการบริหารนโยบาย พลังงาน	113
ภาคผนวก ช. รูปถังปฏิกรณ์ขนาด 80 ลิตรและรูปถังปฏิกรณ์ขนาด 18 ลิตร	116
ภาคผนวก ซ. ผลงานการตีพิมพ์ระดับนานาชาติ	121
ภาคผนวก ฅ. อบรมการผลิตไบโอดีเซลขั้นพื้นฐานและขั้นสูง	129



สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
2.1 ระดับคลอเรสเทอรอลในน้ำมันดิบและไขมัน	8
2.2 องค์ประกอบสเตอรอลของน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันวีไฟน์และผลผลิต	8
2.3 คุณสมบัติตามธรรมชาติของน้ำมันปาล์มมาเลเซีย	8
2.4 คุณสมบัติที่ควรรู้ของแอลกอฮอล์	9
2.5 การกระจายตัวของแอลกอฮอล์ กลีเซอรอล เอสเตอร์ สบูโซเดียม ในเฟสเอสเตอร์และ กลีเซอรอล	20
3.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลองที่ออกแบบโดยใช้วิธี Taguchi	34
3.2 orthogonal array	35
4.1 สมบัติพื้นฐานของน้ำมันปาล์มดิบที่วิเคราะห์เพิ่มเติม	44
4.2 เอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบด้วยเอทานอล	45
4.3 สภาวะที่เลียนแบบสภาวะที่จุดสมดุลของกระบวนการเอสเตอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบ ด้วยเอทานอล	46
4.4 ผลของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส	47
4.5 คุณสมบัติน้ำมันปาล์ม EPO ที่ใช้ในการทดลอง	48
4.6 แสดงชนิดและปริมาณของสารที่ใช้ในการแยกเอทิลเอสเตอร์ออกจากกลีเซอรอล	52
4.7 ค่ากรดไขมันอิสระที่ได้จากการทำปฏิกิริยาเอสเตอริฟิเคชันแบบต่อเนื่อง	63
4.8 Response characteristics	64
4.9 Response table	65
4.10 Energy efficiency	67
4.11 แสดงสภาวะในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันใน CD reactor	67
4.12 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยา สบู เอทิลเอสเตอร์ และค่ากรดในเฟสเอสเตอร์	68
4.13 แสดงปริมาณเอทานอลเริ่มต้นและหลังออกจากชุดระเหยแอลกอฮอล์แบบต่อเนื่อง	72
4.14 การลดค่าสบูในไบโอดีเซล (เอทิลเอสเตอร์)	74
4.15 ผลการวิเคราะห์ตามมาตรฐานข้อกำหนดลักษณะและคุณภาพ และประเภทเมทิล เอสเตอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2552 ของกรมธุรกิจพลังงาน	74
5.1 แสดงการประเมินราคาต้นทุนคงที่	78
5.2 ปริมาณและราคาการใช้จ่ายต่อวัน	79



ตาราง	หน้า
5.3 แสดงต้นทุนการบำรุงรักษา	79
5.4 ค่าใช้จ่ายตลอดวัฏจักรชีวิต 10 ปี	80
5.5 แสดงรายรับโครงการต่อปี	80
5.6 แสดงต้นทุนตลอดอายุโครงการของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบ	81



สารบัญภาพ

รูป	หน้า
2.1 โมเดลตัวอย่างของโมเลกุลไบโอดีเซล	6
2.2 ปฏิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์และแอลกอฮอล์	14
2.3 ปฏิริยาสะพอนิฟิเคชันของไตรกลีเซอไรด์	18
2.4 กลไก 2 ขั้นตอนของปฏิริยาสะพอนิฟิเคชันของเอสเตอ์	19
2.5 ระบบการล้างไบโอดีเซลในอุตสาหกรรม	22
2.6 ระบบทำแห้งหลังการล้างด้วยน้ำด้วยการใช้เกลือเป็นสารดูดซับน้ำในไบโอดีเซล	24
3.1 แสดงส่วนประกอบของชุดผลิตเอทิลเอสเตอ์แบบ CD process	29
3.2 ชุดผลิตเอทิลเอสเตอ์แบบ CD process	30
3.3 Schematic diagram ของ กระบวนการเอสเตอริฟิเคชันและทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ขนาด 500 ลิตรต่อวัน	32
3.4 แสดงถึงปฏิกรณ์เอสเตอริฟิเคชันและทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ขนาด 500 ลิตร/วัน	33
3.5 แผนผังการทำงานของชุดระเหยแอลกอฮอล์โดยใช้ระบบ flash evaporation	36
3.6 ชุดระเหยแอลกอฮอล์โดยใช้ระบบ flash evaporation	37
3.7 ลักษณะของละอองเมื่อผ่านหัวฉีด	38
3.8 แผนผังกระบวนการทำงานของชุดกระบวนการล้างด้วยน้ำร่วมกับสารดูดซับระบบต่อเนื่อง	39
3.9 ชุดกระบวนการล้างไบโอดีเซลโดยกระบวนการล้างด้วยน้ำร่วมกับสารดูดซับระบบต่อเนื่อง	39
3.10 รายละเอียดของถังเรซิน ถังล้างและถังเกลือ	40
3.11 ลักษณะของ Confocal laser scanning microscope ที่ใช้ในการวิเคราะห์	41
4.1 ปริมาณกรดไขมันอิสระที่ลดลงตามเวลาของปฏิริยาเอสเตอริฟิเคชัน	45
4.2 การไฮโดรไลซิสของน้ำมันปาล์มดิบที่อุณหภูมิต่างกัน	47
4.3 แสดงผลของสัดส่วนเชิงโมลเอทานอลต่อ CPO ที่มีผลต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอ์ เมื่อใช้ปริมาณ KOH 1-3%	49
4.4 แสดงผลของเวลาในการทำปฏิริยาที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอ์	50
4.5 แสดงผลของอุณหภูมิในการทำปฏิริยาที่มีต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอ์	51
4.6 แสดงลักษณะการกระจายตัวของกลีเซอรอลและ a) เมทิลเอสเตอ์ b) เอทิลเอสเตอ์ หลัง ปฏิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน ที่กำลังขยาย 200 เท่า	54



รูป	หน้า
4.7 ปริมาณสบู่ที่เวลาต่างๆ ในปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชันโดยใช้เมทานอล และ เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์	55
4.8 G/S ratio ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้แอลกอฮอล์ผสมระหว่างเมทานอลต่อเอทานอลที่สัดส่วนเชิงโมล ต่างๆ ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเตอริฟิเคชัน	56
4.9 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีต่อปริมาณสบู่ในระบบผลิตเอทิลเอสเตอริ์	57
4.10 ผลของชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาต่อผลได้ของเอทิลเอสเตอริ์	58
4.11 ผลของปริมาณน้ำต่อปริมาณสบู่ในระบบผลิตเอทิลเอสเตอริ์	58
4.12 ผลของสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมัน:เอทานอลต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอริ์ ที่เวลาใน การทำปฏิกิริยาต่างๆ	60
4.13 ผลของสัดส่วนเชิงโมลของน้ำมัน:เอทานอลต่อปริมาณสบู่ในเอทิลเอสเตอริ์ ที่เวลาในการ ทำปฏิกิริยาต่างๆ	60
4.14 ผลของปริมาณ KOH ต่อความบริสุทธิ์ของเอทิลเอสเตอริ์ ที่เวลาในการทำปฏิกิริยา ต่างๆ	61
4.15 ปริมาณสบู่ในเอทิลเอสเตอริ์ที่เวลาทำปฏิกิริยาต่างๆ	62
4.16 เปลี่ยนอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์ของการทดลองแบบต่อเนื่อง	62
4.17 กรดไขมันอิสระที่ลดลง	64
4.18 The response graph	65
4.19 Predicted purity for the transesterification of palm oil in series of CSTRs at molar ratio 6:1	66
4.20 Outlet temperature profiles	68
4.21 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาในเฟสเอสเตอริ์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน	69
4.22 ปริมาณสบู่ในเฟสเอสเตอริ์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน	69
4.23 ปริมาณเอทิลเอสเตอริ์ในเฟสเอสเตอริ์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน	70
4.24 ปริมาณกรดในเฟสเอสเตอริ์ที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน	70
4.25 เปรอ์เซ็นต์การแยกคีนเอทานอลจากไบโอดีเซล	71
4.26 เปรอ์เซ็นต์การแยกคีนเอทานอลจากกลีเซอรอล	72