รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

โดย

รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ และคณะ

พฤษภาคม พ.ศ. 2553

สัญญาเลขที่ RDG5250092

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

คณะผู้วิจัย

1. รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ
2. รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์
3. นางสาวเกศกนก ขุ่มด้วง

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ชุดโครงการฝ่ายสนับสนุนการวิจัยในอุตสาหกรรม

สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานฉบับนี้เป็นของผู้วิจัย สกว. ไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษากระบวนการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ โดยอาศัยข้อมูลเบื้องต้นจากการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ ตัวแปรที่ศึกษาสำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส อัตราการไหลของสารตั้งต้น 20, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ คือ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 90 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลเชิงปริมาตรของสารตั้งต้นคือน้ำมันปาล์มดิบผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล 40 มิลลิลิตรนาที ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ

นอกจากนี้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล โดยทำการศึกษาที่ความเร็วรอบในการเหวี่ยง 50, 150, 300 และ 450 รอบต่อนาที เวลาในการเหวี่ยง 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที พบว่าภาวะที่เหมาะสมในการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์ คือ ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที และเวลาในการเหวี่ยง 25 นาที ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีปริมาณเมทิลเอสเทอร์ 97 กลีเซอรอล 1.8 และน้ำ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร และสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เป็นไปตามมาตรฐานของไบโอดีเซลโดยความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 3.5 เซนติสโตกส์ ความถ่วงจำเพาะเอพีไอเท่ากับ 38.9 ความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 องศาเซลเซียสเท่ากับ 0.83 และจุดวาบไฟ 162 องศาเซลเซียส

ABSTRACT

This research studied the production of biodiesel via transesterification of crude palm oil and methanol using sodium hydroxide catalyst in a continuous tubular reactor. The preliminary data were obtained by a batch experiment. For the continuous operation, the molar ratio of methanol and crude palm oil was fixed at 6:1 with sodium hydroxide concentration of 1 % by weight of crude palm oil. The reaction temperature was varied at 60, 70, 80, 90 and 100°C at the volumetric flow rate of the reactant of 20, 40 and 60 ml/min. It was found that the optimum conditions were at the temperature of 90°C and the volumetric flow rate of reactant of 40 ml/min to obtain methyl ester 97.84 % by weight of crude palm oil.

In order to study the separation of methyl ester from glycerol, the centrifugal speed was varied 50, 150, 300 and 450 rpm at the separation time of 5, 10, 15, 20, 25 and 30 min. By using the centrifugal speed of 450 rpm and the separation time of 25 min, the product with methyl ester 97, glycerol 1.8 and water 1.2 % by volume was obtained. The properties of biodiesel were in accordance with the biodiesel standards, i.e., the viscosity at 40°C was 3.5 cSt, °API gravity was 38.9, the specific gravity at 15.6°C was 0.83 and flash point was 162°C.

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ที่สนับสนุนทุนวิจัย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.อัญชลีพร วาริทสวัสดิ์ หล่อทองคำ อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.ธราพงษ์ วิทิตศานต์ ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ให้คำปรึกษาและแนวคิดในการแก้ปัญหา และคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ที่ให้คำแนะนำ ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบรูณ์มากยิ่งขึ้น

ขอบพระคุณคุณครูและคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ขอบพระคุณบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ให้ความช่วยเหลือในเรื่องต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัวที่เป็นกำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ เรื่อง ทำให้ผู้วิจัยสามารถสำเร็จการศึกษาได้ด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่านทั้งที่กล่าวนามและไม่ได้กล่าวนาม หากมีสิ่งผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยขอน้อมรับและขออภัยมา ณ ที่นี้

เกศกนก ขุ่มด้วง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการศึกษา	4
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	4
1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย	5
บทที่ 2 พืชน้ำมันที่มีศักยภาพสำหรับผลิตไบโอดีเซล	6
2.1 เมล็ดเรพ	6
2.2 ปาล์มน้ำมัน	6
2.3 มะพร้าว	17
2.4 ถั่วเหลือง	18
2.5 สบู่ดำ	19
2.6 ศักยภาพของพืชน้ำมันเพื่อใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบผลิตไบโอดีเซลในประเทศ	21
บทที่ 3 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
3.1 ไบโอดีเซล	24
3.2 มาตรฐานและคุณภาพของไบโอดีเซล	31
3.3 น้ำมันดีเซลและเครื่องยนต์ดีเซล	37
3.4 เครื่องปฏิกรณ์	42
3.5 การเหวี่ยงแยก	44
3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัย 47

4.1 สารเคมี 47

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ 47

4.3 วิธีการทดลอง 47

4.3.1 วิเคราะห์สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบ 47

4.3.2 กำจัดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบ 48

4.3.3 การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ 48

4.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน 49

4.3.5 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก 52

4.3.6 วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ 52

บทที่ 5 ผลการทดลองและอภิปรายผล 53

5.1 องค์ประกอบของกรดไขมันและสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปาล์มดิบ 53

5.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ 54

5.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ 55

5.4 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ 57

5.5 การแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก 61

5.6 สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ 62

บทที่ 6 สรุปผลการทดลอง 63

บรรณานุกรม 64

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก. การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ 71

ภาคผนวก ข. การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง 73

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

ภาคผนวก (ต่อ)

ภาคผนวก ค. การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล 75

ภาคผนวก ง. วิทยานิพนธ์และบทความสำหรับการเผยแพร่ 77

ภาคผนวก จ. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการและผลที่ได้รับตลอดโครงการ 84

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 7

2.2 เนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของปาล์มน้ำมันของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ ปี 2548-2550 9

2.3 เนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของปาล์มน้ำมันของประเทศไทยเป็นรายภาคและรายจังหวัด ปี 2549-2551 10

2.4 สมบัติทางการค้าของน้ำมันปาล์มดิบ 14

2.5 เนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของมะพร้าวของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ ปี 2548-2550 18

2.6 ชนิดและองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันสบู่ดำ 20

2.7 ประมาณการความต้องการน้ำมันปาล์มดิบในอุตสาหกรรมไบโอดีเซล 23

3.1 ข้อดีและข้อจำกัดของวิธีการต่างๆ ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล 26

3.2 มาตรฐานของไบโอดีเซลของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีและสหรัฐอเมริกา 31

3.3 สมบัติและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ 32

3.4 สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ 33

3.5 สมบัติของน้ำมันดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ 39

3.6 ลักษณะเฉพาะของน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า 40

4.1 ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในเมทานอล 500 มิลลิลิตร 51

5.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบ 53

5.2 สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบก่อนและหลังการกำจัดกรดไขมันอิสระ 53

5.3 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น 59

5.4 ความเร็วรอบและเวลาในการเหวี่ยงที่สามารถแยกเมทิลเอสเทอร์ 61

5.5 ร้อยละโดยปริมาตรของเมทิลเอสเทอร์ กลีเซอรอล น้ำและอื่นๆ ที่ได้จากภาวะการทดลองต่างๆ เมื่อนำมาเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที เวลา 25 นาที 61

5.6 สมบัติของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนช้า ดีเซลหมุนเร็ว และไบโอดีเซลเทียบกับมาตรฐานตามประกาศกรมธุรกิจพลังงาน 62

ก-1 ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายมาตรฐาน 71

ก-2 ปริมาณกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบในรูปเปอร์เซ็นต์ของกรดปาล์มมิติก 72

จ-1 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับตลอดโครงการ 84

จ-2 เปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับจากการดำเนินการ 84

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 เป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนของไทยในปี พ.ศ. 2554 2

2.1 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ 13

2.2 การกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์จากน้ำมันปาล์มดิบโดยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ 15

3.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล 25

3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องแบบถังกวนและแบบท่อ 42

4.1 แผนภาพแสดงเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ 49

4.2 การแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล 50

4.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง 52

5.1 ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอล ต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ 54

5.2 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ 55

5.3 ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที 56

5.4 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที 57

5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ 58

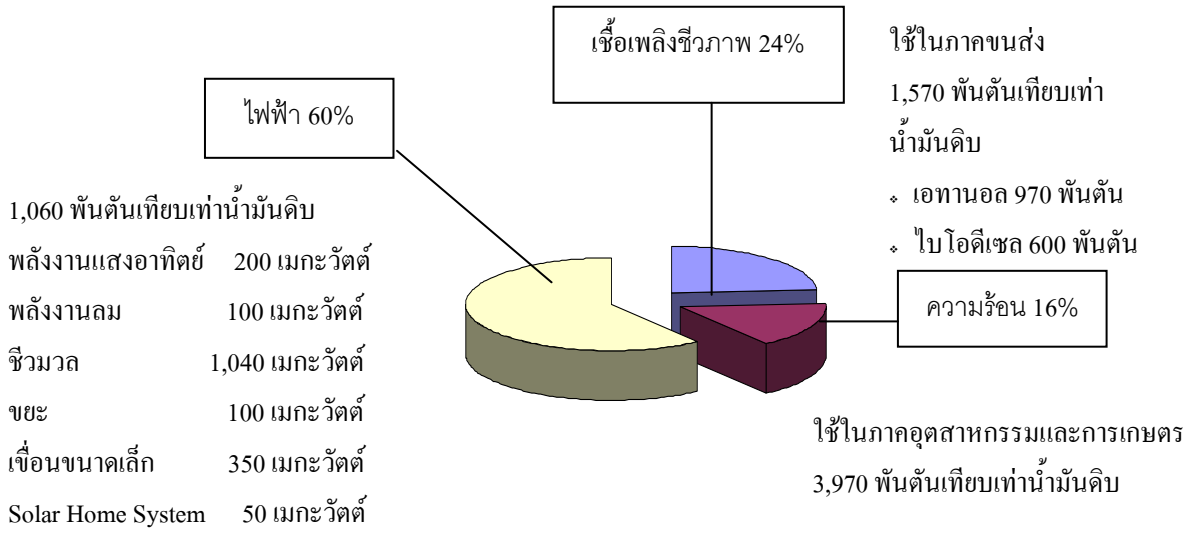
บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในขณะที่ปริมาณปิโตรเลียมจากแหล่งต่างๆ ทั่วโลกมีปริมาณจำกัด แต่ความต้องการใช้น้ำมันปิโตรเลียมกลับเพิ่มขึ้นทุกปี จึงมีความจำเป็นต้องหาพลังงานทางเลือกมาทดแทนพลังงานจากน้ำมันปิโตรเลียม ดังนั้นประเทศไทยโดยกระทรวงพลังงานจึงได้กำหนดนโยบายด้านพลังงานของประเทศ [1] ดังนี้

1. สร้างความมั่นคงด้านพลังงาน
2. กำหนดให้การพัฒนาพลังงานทดแทนเป็นวาระแห่งชาติ
3. ส่งเสริมการอนุรักษ์และประหยัดพลังงานอย่างต่อเนื่อง
4. กำกับราคาพลังงานให้เหมาะสม เป็นธรรม และมีเสถียรภาพ
5. ดูแลรักษาสิ่งแวดล้อม พลังงานสะอาด จัดการแก๊สเรือนกระจก

นโยบายที่กำหนดให้การพัฒนาพลังงานทดแทน (Alternative energy) เป็นวาระแห่งชาติ ตามยุทธศาสตร์การพัฒนาพลังงานทดแทน พ.ศ. 2551-2565 เป้าหมายและแผนการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2554 เท่ากับ 8 % แสดงดังรูปที่ 1.1 และได้ตั้งเป้าหมายการใช้พลังงานทดแทนในปี พ.ศ. 2565 เท่ากับ 20.3 % ของการใช้พลังงานทั้งหมด โดย 2.4 % เป็นพลังงานไฟฟ้าจากแหล่งน้ำขนาดเล็ก พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล แก๊สชีวภาพ ขยะ และไฮโดรเจน และ 7.6 % เป็นพลังงานความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ ชีวมวล แก๊สชีวภาพ และขยะ อีก 6.2 % เป็นแก๊สธรรมชาติสำหรับยานยนต์ (Natural gas for vehicles: NGV) จากชีวมวล และแก๊สชีวภาพ และ 4.1 % เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพที่ได้จากเอทานอลและไบโอดีเซล ซึ่งคาดว่าการใช้พลังงานทดแทนใน ปี พ.ศ. 2565 จะทดแทนพลังงานได้ 19,700 พันตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ และสามารถลดการนำเข้าพลังงานประมาณ 461,800 ล้านบาทต่อปี ลดแก๊สเรือนกระจกได้ 42 ล้านตันต่อปี



รูปที่ 1.1 เป้าหมายและแผนการใช้พลังงานทดแทนของประเทศไทยในปี พ.ศ. 2554 [1]

พลังงานทดแทนที่มีศักยภาพอันดับต้นๆ ของประเทศไทย ได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ และพลังงานชีวมวล ซึ่งนับตั้งแต่วิกฤตน้ำมันในปี พ.ศ. 2516 มีการศึกษานำน้ำมันของพืชน้ำมันและชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ที่สันดาปภายใน สารประกอบไตรกลีเซอไรด์ซึ่งเป็นสารประกอบหลักในน้ำมันจากพืชจะทำปฏิกิริยากับหมู่อัลคอกไซด์ในเมทิลหรือเอทิลแอลกอฮอล์โดยมีตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบสได้ไบโอดีเซลหรือน้ำมันดีเซลชีวภาพ ซึ่งคือเมทิลหรือเอทิลเอสเทอร์ที่สามารถนำมาใช้แทนน้ำมันดีเซลจากน้ำมันปิโตรเลียมในเครื่องยนต์ดีเซล ไบโอดีเซลสามารถผลิตได้จากพืชน้ำมันประเภทปาล์มน้ำมัน มะพร้าว เมล็ดละหุ่ง งา เมล็ดทานตะวัน ถั่วเหลือง ถั่วลิสง และสบู่ดำ (Jatropha Curcas) หรือน้ำมันจากพืชที่ผ่านการใช้แล้ว เป็นต้น [2-6] เมื่อพิจารณาปริมาณผลผลิตของพืชน้ำมันภายในประเทศที่ได้จากการเกษตรและสมบัติของน้ำมันที่ได้ พบว่าน้ำมันปาล์มดิบ น้ำมันเมล็ดในปาล์ม น้ำมันปาล์มสเตียริน และน้ำมันมะพร้าว มีแนวโน้มสูงที่จะสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์เนื่องจากมีความต้องการใช้เป็นอาหารน้อยกว่าน้ำมันที่ได้จากพืชชนิดอื่นๆ มีต้นทุนการผลิตต่ำ และได้จากพืชที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่การปลูกสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น และจากการวิเคราะห์ศักยภาพของพืชน้ำมัน พบว่าปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีศักยภาพสูงสุดในการนำมาเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซล เนื่องจากมีปริมาณผลผลิตต่อไร่สูงกว่ามะพร้าวและไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เหมือนน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันปาล์มสเตียริน [7-11] ไบโอดีเซลเป็นพลังงานทดแทนที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย และเป็นทางเลือกหนึ่งที่ช่วยพัฒนาประเทศเนื่องจากผลิตจากวัตถุดิบหลักที่มีอยู่ในประเทศ ทำให้สามารถลดการนำเข้าน้ำมันปิโตรเลียมจากต่างประเทศ ลดการขาดดุลการค้า

และเสริมสร้างความมั่นคงด้านพลังงานของประเทศ ไบโอดีเซลไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมและไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนเครื่องยนต์เพราะไม่มีกำมะถันเป็นส่วนประกอบ [12] จากผลการทดลองของสถาบันวิจัยและเทคโนโลยี บริษัทปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) พบว่าการผสมไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซลที่ปริมาตรต่างๆ จะลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนได้ร้อยละ 10-20 และลดควันดำได้ร้อยละ 20 ถ้าใช้ไบโอดีเซล 100 เปอร์เซ็นต์สามารถลดควันดำได้ร้อยละ 60 [13] ไบโอดีเซลเป็นที่นิยมใช้ในประเทศสหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมัน และบราซิลมากกว่า 20 ปี กำลังการผลิตไบโอดีเซลสูตร B20 (ไบโอดีเซล 20 % โดยปริมาตรผสมกับน้ำมันดีเซล 80 %) ในต่างประเทศมีหลายพันล้านลิตรต่อปี สำหรับประเทศไทยไบโอดีเซลที่ผลิตและจำหน่ายเชิงพาณิชย์ที่สถานีจ่ายน้ำมันของบริษัทปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย จำกัด (มหาชน) และบริษัท บางจากปิโตรเลียม จำกัด (มหาชน) คือสูตร B5 นอกจากนี้มีการรวมกลุ่มของเกษตรกรเพื่อผลิตไบโอดีเซลใช้เองในชุมชนอีกจำนวนมาก

แผนปฏิบัติการพัฒนาและส่งเสริมไบโอดีเซลของกระทรวงพลังงานระหว่าง พ.ศ. 2548-2549 [1] ส่งเสริมการใช้ไบโอดีเซล B5 ระดับชุมชน และกำหนดให้เริ่มผลิตไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ตั้งแต่ พ.ศ. 2550 ซึ่งจะบังคับใช้ใน พ.ศ. 2554 เป็นต้นไป แผนพัฒนาไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ระหว่าง พ.ศ. 2551-2565 กำหนดให้ผสมไบโอดีเซลในน้ำมันดีเซล 2 และ 5 %โดยปริมาตร และหลังจากที่รัฐบาลประกาศให้ใช้ไบโอดีเซลสูตร B2 เมื่อต้นปี 2551 ปริมาณการใช้ไบโอดีเซลสูงขึ้นถึง 1.2 ล้านลิตร คิดเป็นร้อยละ 2.31 ของปริมาณการใช้น้ำมันดีเซล 55 ล้านลิตรต่อวันทั่วประเทศ ทั้งนี้แผนพัฒนาไบโอดีเซลเชิงพาณิชย์ยังมีเป้าหมายการใช้ไบโอดีเซล B10 ทั่วประเทศในปี 2555

การสำรวจงานวิจัยต่างๆ ที่สังเคราะห์ไบโอดีเซลจะใช้วัตถุดิบจากน้ำมันถั่วเหลือง ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว สบู่ดำ และน้ำมันพืชใช้แล้ว โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งกรดและเบส เช่น กรดซัลฟิวริก โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งส่วนใหญ่ศึกษาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) งานวิจัยนี้เลือกน้ำมันปาล์มดิบเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันกับเมทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพราะการใช้น้ำมันปาล์มดิบไม่ต้องมีกระบวนการทำให้บริสุทธิ์ สำหรับโซเดียมไฮดรอกไซด์เร่งปฏิกิริยาได้ดีกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาประเภทกรด มีราคาถูกกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเบสชนิดอื่น และสามารถละลายในเมทานอลได้ดี [14] การสังเคราะห์ไบโอดีเซลในงานวิจัยนี้ทำในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะก่อนเพื่อหาข้อมูลเบื้องต้น ได้แก่ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยาที่เหมาะสม แล้วสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ (Continuous tubular reactor) เพื่อใช้สังเคราะห์ไบโอดีเซล ปัจจัยที่ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอล ได้แก่ อุณหภูมิ และเวลาในเทอมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันปาล์มดิบผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล นอกจากนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ออกจากกลีเซอรอลซึ่งเป็นผลพลอยได้เพราะมักพบว่าในงานวิจัยส่วนใหญ่

การแยกเมทิลเอสเทอร์ทำได้ยากและใช้เวลานาน สุดท้ายจึงทดสอบสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานของน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

1.2.2ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.3.2 ทดสอบตัวแปรปฏิบัติการเบื้องต้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

1.3.3 ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

1.3.4 หาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลที่ใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

1.3.5 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก

1.3.6 วิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานของน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์

1.4 ขั้นตอนการทำวิจัย

1.4.1 ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1.4.2 ทดสอบตัวแปรปฏิบัติการเบื้องต้นในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

1.4.3 ศึกษาหลักการทำงาน ออกแบบ และสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

1.4.4 หาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อได้แก่ อุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา และเวลาในเทอมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันปาล์มดิบผสมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลที่เข้าเครื่องปฏิกรณ์

1.4.5 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกชั้นของเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก ได้แก่ ความเร็วรอบ และเวลาในการเหวี่ยง

1.4.6 วิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานของน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ความหนืดที่ 40 องศาเซลเซียส ความถ่วงจำเพาะเอพีไอ ความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 องศาเซลเซียส และจุดวาบไฟ

1.5 ประโยชน์ที่ได้รับจากงานวิจัย

1.5.1 สามารถสังเคราะห์ไบโอดีเซลที่มีคุณภาพเทียบเท่าน้ำมันดีเซล

1.5.2 สามารถลดเวลาในการแยกผลิตภัณฑ์เมทิลเอสเทอร์

1.5.3 สามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูลและแนวทางการศึกษาในการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

บทที่ 2
พืชน้ำมันที่มีศักยภาพสำหรับผลิตไบโอดีเซล

2.1 เมล็ดเรพ (Rapeseed) [15]

เรพเป็นพืชตระกูล Brassicaceae ปลูกได้ดีในพื้นที่ที่มีภูมิอากาศเย็น มีปริมาณฝนมาก และมีความชื้นสูง เช่น ประเทศในสหภาพยุโรป แคนาดา สหรัฐอเมริกา ออสเตรเลีย จีน และอินเดีย โดยทั่วไปผลผลิตเมล็ดเรพที่ได้ต่อไร่อยู่ระหว่าง 320-640 กิโลกรัม ประเทศในสหภาพยุโรปเริ่มใช้น้ำมันเมล็ดเรพเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซลตั้งแต่ พ.ศ. 2543 เมล็ดเรพมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 38-44 องค์ประกอบหลักเป็นกรดไขมันอีรูซิค (Erucic) ซึ่งเป็นพิษต่อร่างกาย ประเทศแคนาดาได้ปรับปรุงต้นเรพพันธุ์ Brassica napus และ Brassica rapa ทำให้ได้น้ำมันที่มีองค์ประกอบของกรดไขมันอีรูซิคต่ำกว่าเดิมมาก และเรียกชื่อน้ำมันชนิดนี้ว่า น้ำมันคาโนลา (Canola oil) ปัจจุบันยังไม่มีการปลูกต้นเรพในประเทศไทย

2.2 ปาล์มน้ำมัน (Palm) [5, 7-11]

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชยืนต้นและเป็นพืชน้ำมันอุตสาหกรรมชนิดเดียวของโลกที่ให้ผลผลิตน้ำมันต่อหน่วยพื้นที่การปลูกสูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่น สามารถปลูกได้เฉพาะในเขตพื้นที่ร้อนชื้นเท่านั้น จึงมีเพียง 42 ประเทศ จาก 233 ประเทศทั่วโลกที่สามารถปลูกได้ และมี 4 ประเทศ ที่สามารถปลูกปาล์มน้ำมันได้ผลดี ได้แก่ อินโดนีเซีย มาเลเซีย ไนจีเรีย และประเทศไทย [8-9] สำหรับประเทศไทยพื้นที่ที่นิยมปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดคือภาคใต้ ได้แก่ กระบี่ สุราษฎร์ธานี ชุมพร สตูล สงขลา และตรัง ในปี 2550 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมัน ประมาณ 3.2 ล้านไร่ และให้ผลผลิตปาล์มน้ำมันประมาณ 6.7 ล้านตันต่อปี ได้ผลผลิตทะลายปาล์มประมาณ 7.2 ล้านตัน พันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ใช้ในประเทศไทย คือ ลูกผสมสุราษฎร์ธานี ให้ผลผลิตในช่วงอายุ 6-11 ปี ได้ผลผลิต 3,350-3,660 กิโลกรัมต่อไร่ต่อปี ส่วนที่ให้น้ำมันของผลปาล์ม คือ เนื้อของผลปาล์ม (Flesh) และเมล็ดใน (Kernel) ผลปาล์มสุกมีเอนไซม์ที่ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระในตัวเองสูงได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งกรดไขมันอิสระจะทำให้ปริมาณน้ำมันกลั่นใสที่ได้ลดลงและทำให้สีของน้ำมันเข้มขึ้น ดังนั้นเมื่อตัดผลปาล์มจากต้นจึงต้องส่งโรงงานสกัดโดยเร็ว การสกัดน้ำมันปาล์มอาจสกัดจากเนื้อของผลปาล์มได้น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil) หรือจากเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil) หรือจากปาล์มทั้งผลคือจากเนื้อและเมล็ดในของผลปาล์ม น้ำมันปาล์มดิบเมื่อนำไปกลั่นจะได้น้ำมันปาล์มโอเลอีน (Olein) ปาล์มสเตียรินหรือไขสเตียริน (Stearin) และกรดไขมันของปาล์มกลั่น น้ำมันที่ได้จากเนื้อและเมล็ดในของผลปาล์มจะมีสมบัติและองค์ประกอบต่างกัน น้ำมันจากเนื้อของผลปาล์มมีสมบัติคล้ายน้ำมันหมู และมีวิตามิน A และ E สูงกว่าน้ำมันที่ได้จากพืชน้ำมันชนิดอื่น จึงสามารถ

นำไปสกัดและใช้ประโยชน์เป็นสารตั้งต้นในอุตสาหกรรมอาหาร มีความเข้มของสีสูง ประกอบด้วยกรดไขมันที่มีคาร์บอน 16-18 อะตอม มีจุดหลอมเหลวสูง เป็นของเหลวปนกับของแข็งที่อุณหภูมิห้อง เมื่อจะนำไปใช้ประกอบอาหารต้องทำให้บริสุทธิ์โดยการกำจัดกรด สี และกลิ่นก่อน จากนั้นจึงทำการแยกของเหลวและของแข็งออกจากกัน ส่วนที่เป็นของเหลวคือน้ำมันปาล์มโอเลอีน สำหรับส่วนที่เป็นของแข็งคือปาล์มสเตียรินซึ่งสามารถนำไปใช้ทำเนยเทียม ครีมเทียม และสบู่ ส่วนน้ำมันจากเมล็ดในของผลปาล์มประกอบด้วยกรดไขมันที่มีคาร์บอน 12 อะตอมเป็นองค์ประกอบหลัก ไม่มีสี มีปริมาณกรดไขมันอิสระต่ำ มีความอิ่มตัวสูง มีสมบัติคล้ายน้ำมันมะพร้าวคือ มีกรดลอริก (Lauric acid) สูง มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องและความดันบรรยากาศ โดยทั่วไปน้ำมันที่ได้จากพืชจะมีกรดไขมันจากสารประกอบไตรกลีเซอไรด์เป็นองค์ประกอบร้อยละ 94-96 ของน้ำหนัก ไตรกลีเซอไรด์ประกอบด้วยกรดไขมันอิ่มตัวและไม่อิ่มตัว สมบัติทางเคมีและกายภาพของน้ำมันที่ได้จากพืชแต่ละชนิดแตกต่างกัน ควรเลือกใช้น้ำมันที่ได้จากพืชที่มีกรดไขมันอิ่มตัวสูงและมีค่าไอโอดีนต่ำ ถ้าปริมาณกรดไขมันอิ่มตัวลดลงหรือมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงขึ้น ค่าไอโอดีนจะสูงขึ้น ดังนั้นน้ำมันจะถูกออกซิไดส์และเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิสูงได้ง่าย ทำให้เกิดยางเหนียวของคาร์บอน (Gum) รวมตัวกันเป็นก้อน ยางเหนียวนี้จะอุดตันที่ระบบหัวฉีดของเครื่องยนต์ สรุปได้ว่าค่าไอโอดีนเป็นดัชนีบอกโอกาสของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของน้ำมันที่ได้จากพืช [5] ตัวอย่างองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม [16]

องค์ประกอบของกรดไขมัน	**น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil)**	**น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil)**
กรดไขมันอิ่มตัว	50 %	82 %
Caproic C 6:0	-	0.1-0.5
Caprylic C 8:0	-	3.4-5.9
Capric C 10:0	-	3.3-4.4
Lauric C 12:0	-	46.3-51.1
Myristic C 14:0	0.1-0.4	14.3-16.8
Palmitic C 16:0	40.9-47.5	6.5-8.9
Stearic C 18:0	3.8-4.8	1.6-2.6
Arachidic C 20:0	0-0.8	-

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันเมล็ดในปาล์ม (ต่อ) [16]

องค์ประกอบของกรดไขมัน	**น้ำมันปาล์มดิบ (Crude palm oil)**	**น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (Palm kernel oil)**
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	50 %	18 %
Palmitoleic C 16:1	0-0.6	-
Oleic C 18:1	36.4-41.2	13.2-16.4
Linoleic C 18:2	9.2-11.6	2.2-3.4
Linolenic C 18:3	0-0.5	-
Iodine value	53.0	17.9

หมายเหตุ C = อะตอมคาร์บอน

หมายเลขหน้าและหลังเครื่องหมาย : หมายถึง จำนวนอะตอมคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่ ตามลำดับ

โดยทั่วไปน้ำมันปาล์มดิบจะมีกรดไขมันอิ่มตัวใกล้เคียงกับกรดไขมันไม่อิ่มตัว ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มมักมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงกว่ากรดไขมันไม่อิ่มตัว ดังนั้นเมื่อนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไบโอดีเซลจะช่วยลดการเกิดยางเหนียวของคาร์บอนจากปฏิกิริยาการเผาไหม้ได้

นอกจากปาล์มน้ำมันจะเป็นพืชน้ำมันที่มีบทบาทสำคัญต่อการผลิตไบโอดีเซลแล้ว ยังสำคัญต่อธุรกิจน้ำมันพืชเพื่อการบริโภคและเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่อเนื่องอื่น เช่น สบู่ บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป นมข้นหวาน เนยเทียม ขนมขบเคี้ยว เป็นต้น

พื้นที่การเพาะปลูกและปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันของโลก

ข้อมูลเนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของประเทศผู้ผลิตปาล์มน้ำมันที่สำคัญ ปี 2548-2550 แสดงในตารางที่ 2.2 จากตารางพบว่าพื้นที่และปริมาณผลผลิตของทุกประเทศมีอัตราการขยายตัวเพิ่มขึ้น ประเทศผู้ผลิตปาล์มน้ำมันอันดับ 1 และ 2 ของโลก คือ อินโดนีเซีย และมาเลเซีย สามารถผลิตปาล์มน้ำมันรวมกันได้ประมาณร้อยละ 81 ของผลผลิตปาล์มน้ำมันทั่วโลก สำหรับผลผลิตปาล์มน้ำมันของประเทศไทยประมาณร้อยละ 3.4 และมีอัตราการขยายตัวของพื้นที่การเพาะปลูกในปี 2550 เพิ่มขึ้นจาก ปี 2548 ประมาณร้อยละ 15 เนื่องจากรัฐบาลให้การสนับสนุนเกษตรกรปลูกปาล์มน้ำมันแทนยางพาราและกาแฟ

ตารางที่ 2.2 เนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของปาล์มน้ำมันของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ ปี 2548-2550 [17-18]

ประเทศ	เนื้อที่ให้ผลผลิต (พันไร่)			ผลผลิต (พันตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		
	2548	**2549**	**2550**	**2548**	**2549**	**2550**	**2548**	**2549**	**2550**
อินโดนีเซีย	23,063	25,750	28,625	64,255	70,000	78,000	2,786	2,718	2,725
มาเลเซีย	22,188	23,000	23,688	75,650	75,400	77,700	3,410	3,278	3,280
ไนจีเรีย	20,938	19,219	19,688	8,500	8,300	8,500	406	432	432
ไทย	2,026	2,374	2,663	5,003	6,715	6,390	2,469	2,828	2,399
โคลัมเบีย	1,060	1,031	1,031	3,273	3,200	3,200	3,088	3,104	3,104
เอกวาดอร์	803	813	844	1,930	2,000	2,100	2,403	2,460	2,488
กานา	2,033	2,081	1,875	2,025	2,097	1,900	996	1,008	1,013
โกตดิวัวร์	1,232	1,138	1,188	1,350	1,413	1,448	1,096	1,242	1,219
ปาปัวนิวกินี	550	575	600	1,300	1,350	1,400	2,364	2,348	2,333
แคเมอรูน	363	363	363	1,300	1,300	1,300	3,581	3,581	3,581
อื่นๆ	6,191	5,850	5,899	8,687	8,514	8,635	1,403	1,455	1,464
รวมทั้งโลก	80,447	82,194	86,464	173,273	180,289	190,573	2,154	2,193	2,204

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณผลผลิตต่อไร่ในปี 2550 พบว่าแคเมอรูนมีผลผลิตต่อไร่สูงสุดคือ 3,581 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมาคือ มาเลเซีย โคลัมเบีย และอินโดนีเซีย ส่วนประเทศไทยมีผลผลิตต่อไร่ 2,399 กิโลกรัมต่อไร่ ซึ่งต่ำกว่าหลายประเทศเพราะมีข้อจำกัดทางด้านภูมิศาสตร์คือมีพื้นที่ที่เหมาะสมต่อการปลูกปาล์มน้ำมันน้อย ตารางที่ 2.3 แสดงพื้นที่การเพาะปลูกและปริมาณผลผลิตปาล์มน้ำมันของประเทศไทย

ตารางที่ 2.3 เนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของปาล์มน้ำมันของประเทศไทยเป็นรายภาคและรายจังหวัด ปี 2549-2551 [17]

ภาค/จังหวัด	เนื้อที่ยืนต้น (ไร่)			เนื้อที่ให้ผลผลิต (ไร่)			ผลผลิต (ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		
	2549	2550	2551	2549	2550	2551	2549	2550	2551	2549	2550	2551
รวมทั้งประเทศ	2,953,924	3,199,914	3,622,778	2,374,202	2,663,252	2,872,836	6,715,036	6,389,983	9,263,784	2,828	2,399	3,225
ภาคกลาง	228,894	290,954	376,648	177,728	203,147	227,591	412,538	370,759	672,347	2,321	1,825	2,955
ภาคใต้	2,725,030	2,906,671	3,246,130	2,196,474	2,460,105	2,645,317	6,302,498	6,019,224	8,591,437	2,869	2447	3,248
ฉะเชิงเทรา	5,936	10,458	14,360	4,252	4,346	5 936	5,457	4,876	11,597	1,283	1,122	1,954
สระแก้ว	5,609	10,777	11,633	806	954	5 609	1,002	1,008	11,694	1,243	1,057	2,085
จันทบุรี	4,561	4,611	5,080	2,846	3,786	4,561	4,386	4,967	8,455	1,541	1,312	1,854
ตราด	40,874	59,860	67,096	18,816	30,184	40,874	38,178	48,089	132,523	2,029	1,593	3,242
ระยอง	14,092	19,928	20,965	12,934	13,843	14,092	27,536	23,812	36,357	2129	1,720	2,580
ชลบุรี	75,305	77,495	81,848	65,269	71,229	74,023	161,998	137,812	230,607	2,482	1,935	3,115
กาญจนบุรี	2,342	2,342	4,641	1,207	1,342	2,342	859	905	3,541	712	674	1,512
เพชรบุรี	451	2,341	2,798	-	-	451	-	-	632	-	-	1,401
ประจวบคีรีขันธ์	79,724	103,142	168,197	71,597	77,463	79,631	173,122	149,290	236,941	2,418	1,927	2,975
ชุมพร	652,102	693,622	732,371	478,656	578,920	642,626	1,354,118	1,356,638	2,171,318	2,829	2,343	3,379
ระนอง	48,041	63,923	73,274	35,483	41,301	48,041	102,439	107,402	140,520	2,808	2,600	2,925
สุราษฎร์ธานี	762,535	832,285	915,255	657,853	719,527	752,749	1,912,379	1,770,157	2429,963	2,907	2,460	3,228
พังงา	81,964	89,531	102,158	66,356	77,901	81,740	161,112	170,644	232,820	2,428	2,191	2,848

ตารางที่ 2.3 เนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของปาล์มน้ำมันของประเทศไทยเป็นรายภาคและรายจังหวัด ปี 2549-2551 (ต่อ) [17]

ภาค/จังหวัด	เนื้อที่ยืนต้น (ไร่)			เนื้อที่ให้ผลผลิต (ไร่)			ผลผลิต (ตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		
	2549	2550	2551	2549	2550	2551	2549	2550	2551	2549	2550	2551
ภูเก็ต	1,157	1,133	1,133	1,082	1,133	1,133	1,439	1,421	2,344	1,330	1,254	2,069
กระบี่	834,254	834,437	965,809	693,424	763,884	806,721	2,117,375	2,049,589	2,755,306	3,054	2,683	3,415
ตรัง	104,681	102,064	109,026	87,713	83,766	90,572	244,193	207,942	258,946	2,784	2,482	2,859
นครศรีธรรมราช	90,345	117,164	149,164	45,476	65,728	90,345	113,190	132,198	265,264	2,489	2,011	2,936
พัทลุง	3,221	8,894	100,88	1,493	2,375	3,221	3,279	4,347	8,252	2,196	1,830	2,562
สงขลา	19,707	19,588	24,022	16,982	17,938	19,232	41,029	37,052	50,660	2,416	2,066	2,634
สตูล	102,469	95,782	104,539	90,993	87,353	88,083	2108,31	148,681	225,730	2,317	1,702	2,563
ปัตตานี	420	7,686	12,985	-	-	420	-	-	596	-	-	1,419
ยะลา	2,444	4,732	7,031	898	898	944	1,611	1,439	1,890	1,794	1,602	2,002
นราธิวาส	21,690	35,830	39,275	19,065	19,381	19,490	39,503	31,714	47,828	2,072	1,636	2,454

จากตารางที่ 2.3 พื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันที่สำคัญของประเทศไทยอยู่ในเขตภาคใต้ จังหวัดที่มีการเพาะปลูกปาล์มน้ำมันมากที่สุดของประเทศ 3 อันดับแรกในปี 2550 ได้แก่ กระบี่ สุราษฎร์ธานี และชุมพร คิดเป็นพื้นที่ร้อยละ 74 ของพื้นที่เพาะปลูกปาล์มน้ำมันทั้งประเทศ ได้ผลผลิตร้อยละ 81 ของปริมาณผลผลิตทั้งหมด

การแปรรูปปาล์มน้ำมัน [19]

การแปรรูปปาล์มน้ำมันเป็นกระบวนการต่อเนื่อง 3 ขั้นตอน ได้แก่

1. การแปรรูปขั้นต้น เป็นการสกัดหรือการหีบน้ำมันออกจากผลปาล์ม

2. การแปรรูปขั้นสอง เป็นการแยกสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจากน้ำมันปาล์มที่ได้จากการแปรรูปขั้นต้น และนำมากลั่นให้บริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ในการอุปโภคบริโภคต่อไป

3. การแปรรูปขั้นสุดท้าย เป็นการนำส่วนต่างๆ ที่ได้จากการแปรรูปในขั้นที่สอง เช่น น้ำมันปาล์มโอเลอีน ปาล์มสเตียริน ไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบต่างๆ

น้ำมันปาล์มดิบที่มีคุณภาพดีเมื่อสกัดจากทะลายปาล์มสดต้องมีกรดไขมันอิสระต่ำกว่าร้อยละ 5 ความชื้นไม่เกินร้อยละ 0.5 และสิ่งเจือปนไม่เกินร้อยละ 0.05 ถ้าปริมาณกรดไขมันอิสระสูงจะทำให้ปริมาณน้ำมันกลั่นใสที่ได้ลดลงและสีเข้มขึ้น ดังนั้นเพื่อให้ได้น้ำมันที่มีคุณภาพดีจึงต้องลดการสร้างกรดไขมันอิสระในตัวเองของเอนไซม์ของผลปาล์มน้ำมันโดยคำนึงถึงวิธีและมาตรฐานในการเก็บเกี่ยวและขนส่งทะลายปาล์มน้ำมันซึ่งจะกล่าวต่อไป

การจัดการเพื่อลดการสร้างกรดไขมันอิสระของผลปาล์มน้ำมัน

1. การเก็บเกี่ยว อย่าให้ทะลายปาล์มน้ำมันถูกกระแทกรุนแรงและบอบช้ำ เพราะเมื่อเซลล์ชั้นเปลือกของผลปาล์มถูกทำลายจะทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของน้ำมัน จากนั้นทะลายสดปาล์มน้ำมันจะถูกนำไปอบด้วยความร้อนและความดัน ที่อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ 2.4-3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในเวลา 60-70 นาที เพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- ยับยั้งกระบวนการที่จะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ
- ทำให้ผลปาล์มน้ำมันหลุดร่วงออกจากทะลายง่ายขึ้น
- ทำให้ชั้นเปลือกของผลปาล์มน้ำมันนุ่มเพื่อความสะดวกในการหีบน้ำมัน
- ช่วยทำให้ขั้นตอนการกระเทาะเมล็ดออกจากเนื้อในของผลปาล์มน้ำมันสะดวกขึ้น
- ลดปริมาณน้ำจากผลปาล์มน้ำมัน
- ช่วยให้การสกัดแยกน้ำออกจากผลปาล์มน้ำมันได้ง่ายขึ้น

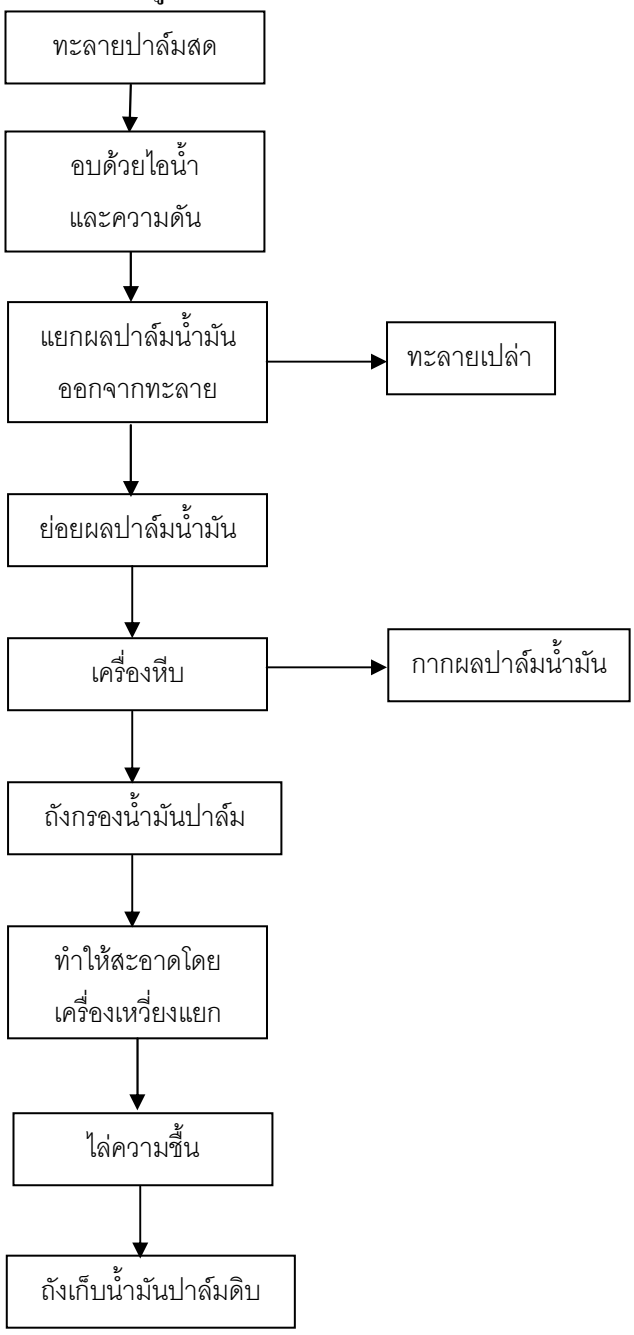
การอบทะลายปาล์มสดด้วยไอน้ำและความดันนานเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียน้ำมันปาล์มได้ แต่หากใช้เวลาสั้นไปจะทำให้ผลปาล์มน้ำมันจำนวนหนึ่งไม่สามารถหลุดจากทะลายในขั้นตอนการแยกผลปาล์มน้ำมัน

2. มาตรฐานการเก็บเกี่ยว ควรเก็บเกี่ยวในระยะที่ทะลายปาล์มน้ำมันสุกพอดี ไม่ควรเก็บทะลายปาล์มน้ำมันสุกเกินไปเนื่องจากผนังเซลล์ที่หุ้มน้ำมันจะเปราะและแตกหักได้ง่ายทำให้มีการสร้างกรดไขมันอิสระมากขึ้น

3. การขนส่ง หลังจากเก็บเกี่ยวแล้วควรรีบนำทะลายปาล์มน้ำมันส่งโรงงานสกัดภายใน 24 ชั่วโมง

กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม ประกอบด้วย 2 กระบวนการหลัก คือ

1. กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ [19]

จากรูปที่ 2.1 หลังจากอบด้วยไอน้ำและความดัน ทะลายปาล์มสดจะถูกป้อนเข้าเครื่องแยกผลปาล์มน้ำมันออกจากทะลายปาล์ม ทะลายเปล่าจะถูกลำเลียงไปเข้าเตาเผาเพื่อทำปุ๋ย ส่วนผลปาล์มน้ำมันจะถูกนำไปย่อยด้วยเครื่องย่อยและป้อนเข้าเครื่องหีบแบบเกลียวอัด น้ำมันปาล์มดิบที่สกัดได้จะถูกส่งเข้าถังกรองเพื่อแยกน้ำ เส้นใย และสิ่งสกปรกอื่นๆ ออก แล้วถูกนำเข้าเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อทำให้สะอาดขึ้น จากนั้นนำไปไล่ความชื้นและเก็บในถังเพื่อส่งจำหน่ายให้โรงงานกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์

2. การทำบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบ

เป็นกำจัดสิ่งเจือปนต่างๆ ออกจากน้ำมันปาล์มดิบให้ได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์หรือน้ำมันอาร์บีดี (Refined bleached deodorization: RBD) ที่มีสมบัติตามตารางที่ 2.4 สิ่งเจือปนในน้ำมันปาล์มดิบแบ่งได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

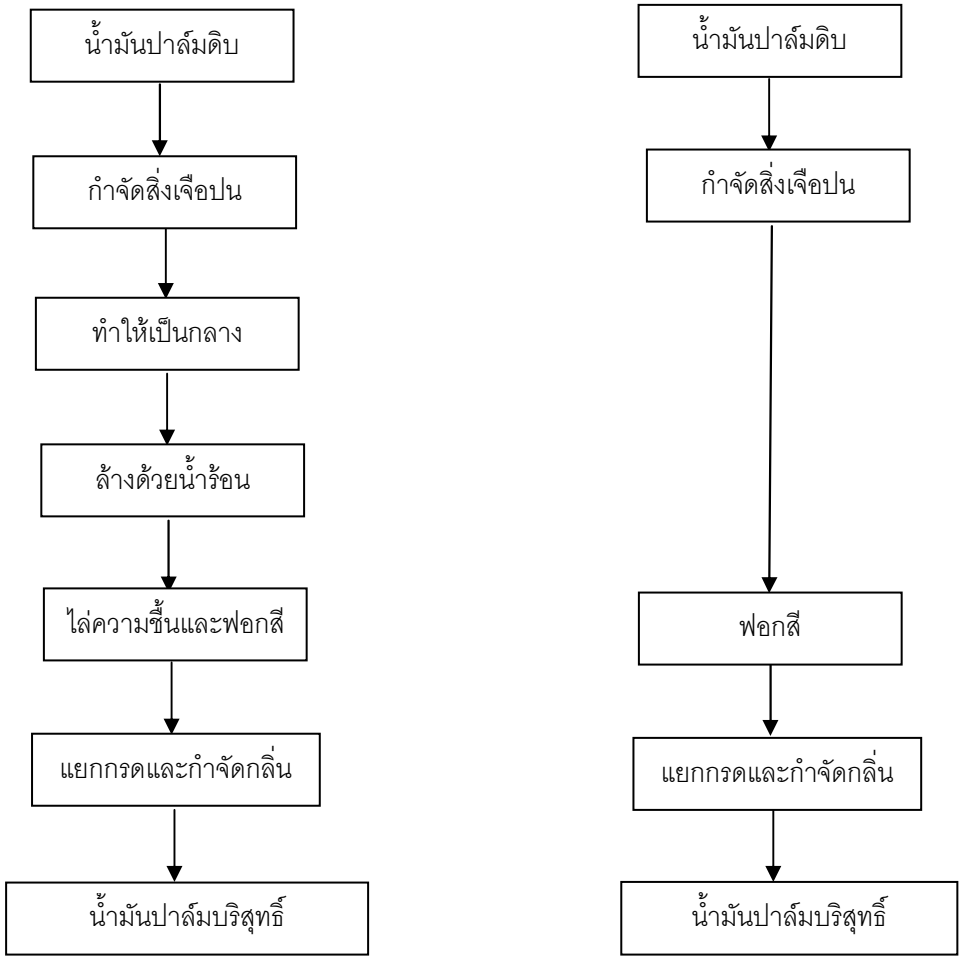
- กลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic) ได้แก่ ความชื้น สิ่งสกปรก กรดไขมันอิสระ กลีเซอไรด์ และเอนไซม์ต่างๆ
- กลุ่มออกซิเดทีฟ (Oxidative) ได้แก่ เศษผงโลหะ เม็ดสี สารโตโคเฟอรอล (Tocopherol) สารฟอสฟาไทด์ (Phosphatide) และสารออกซิเดชันต่างๆ
- กลุ่มที่เป็นตัวเร่งให้เกิดสารพิษ ได้แก่ สารประกอบไนโตรเจน กำมะถัน และฮาโลเจน

ตารางที่ 2.4 สมบัติทางการค้าของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ [20]

สมบัติ	ปริมาณสูงสุดที่อนุญาตให้มี
กรดไขมันอิสระ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	5
ความชื้น (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.5
สิ่งเจือปน (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.05
ค่าไอโอดีน (ใช้วัดปริมาณกรดไขมันไม่อิ่มตัว แสดงด้วยกรัมไอโอดีนที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับน้ำมัน 100 กรัม)	52-55
ค่าเปอร์ออกไซด์ (ใช้วัดความหืนในน้ำมันปาล์ม แสดงด้วยมิลลิกรัมสมดุลออกซิเจนต่อน้ำมัน 1 กิโลกรัม)	10
เหล็ก (ส่วนในล้านส่วน)	4
ทองแดง (ส่วนในล้านส่วน)	0.2
สารหนู (ส่วนในล้านส่วน)	0.2
ตะกั่ว (ส่วนในล้านส่วน)	0.2
สบู่ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก)	0.005

การทำน้ำมันปาล์มดิบให้บริสุทธิ์มี 2 กระบวนการ คือ กระบวนการทางเคมี (Chemical refining process) และกระบวนการทางกายภาพ (Physical refining process) ดังรูปที่ 2.2 ที่แสดงรายละเอียดของแต่ละกระบวนการ ดังนี้

ก. กระบวนการทางเคมี เป็นการทำบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบโดยใช้สารเคมี มีต้นทุนการผลิตต่อหน่วยค่อนข้างสูง และมักเกิดการสูญเสียน้ำมันปาล์มดิบในระหว่างกระบวนการ เริ่มต้นด้วยการกำจัดสิ่งเจือปน เช่น ยางเหนียว โลหะ และสิ่งเจือปนอื่นๆ ด้วยกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ต่อจากนั้นผ่านกระบวนการกำจัดกรดไขมันอิสระโดยทำให้เป็นกลาง (Neutralization) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันกลายเป็นสบู่ จากนั้นล้างด้วยน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง จนได้น้ำมันที่มีกรดไขมันอิสระเหลือไม่เกิน 0.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แล้วนำไปไล่ความชื้นและฟอกด้วยผงฟอกสี (Activated clay bleaching earth) และนำไปแยกกรดฟอสฟอริกที่เหลือรวมทั้งอัลดีไฮน์และคีโตนซึ่งเป็นตัวทำให้น้ำมันหืน และกำจัดกลิ่น (Deodorization) โดยการพ่นด้วยไอน้ำภายใต้ความดันสุญญากาศ สุดท้ายจะได้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์



กระบวนการทางเคมี **กระบวนการทางกายภาพ**

รูปที่ 2.2 การทำน้ำมันปาล์มดิบให้บริสุทธิ์โดยกระบวนการทางเคมีและกายภาพ [19]

ข. กระบวนการทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ต้นทุนต่ำ ใช้สารเคมีน้อย สามารถแยกกรดไขมันอิสระที่มีในน้ำมันปาล์มดิบได้ถึง 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การกำจัดสิ่งเจือปนด้วยกรดฟอสฟอริก การฟอกด้วยผงฟอกสี การแยกกรดฟอสฟอริกที่เหลือและการกำจัดกลิ่น รวมทั้งแยกสารออกซิเดชัน อัลดีไฮน์ และคีโตนออกโดยพ่นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 240-260 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสุญญากาศ 4 มิลลิเมตร เป็นเวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง วิธีนี้สูญเสียน้ำมันปาล์มดิบในระหว่างกระบวนการไม่มาก และไม่มีน้ำเสียจากการล้างไขสบู่จึงเป็นวิธีที่โรงงานส่วนใหญ่นิยมใช้

น้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันจากเมล็ดในปาล์มที่กลั่นให้บริสุทธิ์แล้วสามารถนำไปใช้แปรรูปในอุตสาหกรรมอุปโภคและบริโภคได้หลายประเภท ทั้งการแปรรูปโดยตรงและการนำไปเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น

1. น้ำมันสำหรับปรุงอาหาร โดยปกติน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่อุณหภูมิห้องจะแยกเป็น 2 ส่วน คือ น้ำมันส่วนใสหรือโอเลอีนซึ่งมีอยู่ประมาณ 65-70 เปอร์เซ็นต์ และน้ำมันส่วนข้นหรือสเตียรินซึ่งมีอยู่ 30-35 เปอร์เซ็นต์ น้ำมันสำหรับปรุงอาหารจะต้องแยกน้ำมันส่วนใสออกจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ด้วยกระบวนการแยกส่วน (Fractionation) ก่อนเพื่อป้องกันการเกิดไขของน้ำมันในอาหาร

2. มาการีนหรือเนยเทียม น้ำมันปาล์มบริสุทธ์และน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์มีสมบัติทางกายภาพเหมาะสมกับการทำมาการีน คือ เป็นของแข็งและละลายได้รวดเร็วเมื่อสัมผัสลิ้น มาการีนมีหลายแบบดังนั้นจึงมีสูตรในการทำต่างๆ สูตรการทำโดยทั่วไปมักใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ น้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธ์ และน้ำมันปาล์มสเตรียริน 60, 30 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

3. น้ำมันทอด (Frying fat) น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์มีบทบาทมากในอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำมันทอดเนื่องจากมีราคาถูก และอยู่ตัวดีกว่าน้ำมันพืชชนิดอื่นๆ ไม่มีกลิ่นหืนเพราะไม่ออกซิไดส์กับอากาศเมื่อถูกความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมมักใช้น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ที่เติมไฮโดรเจน เพราะมีความอยู่ตัวเป็นพิเศษและทำให้วัสดุที่นำมาทอดมีลักษณะกรอบ เช่น มันฝรั่งทอด โดนัท ข้าวเกรียบ และบะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เป็นต้น

4. เนยขาว (Shortening) น้ำมันปาล์มที่ฟอกบริสุทธิ์สามารถแปรรูปให้เป็นเนยขาวได้โดยทำให้เย็นตัวอย่างเร็วที่อุณหภูมิประมาณ -40 องศาเซลเซียส

5. น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เติมไฮโดรเจน (Hydrogenated palm oil) ทั้งน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์และน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์เมื่อนำมาเติมไฮโดรเจนจะทำให้พันธะคู่ในโมเลกุลของน้ำมันแตกตัวและไฮโดรเจนจะเข้าไปแทนที่ ทำให้น้ำมันแข็งและอยู่ตัว ไม่ออกซิไดส์กับอากาศ จึงนำมาใช้เป็นน้ำมันทอด ทำขนมปังกรอบหรือเวเฟอร์ (Wafers) และเครื่องสำอาง เป็นต้น ส่วนน้ำมันเมล็ดในปาล์มบริสุทธิ์เติมไฮโดรเจนมักนำมาใช้ทำขนมปังกรอบ ไอศกรีม และเคลือบแก้วกระดาษ เป็นต้น

6. กรดไขมัน (Palm fatty acid distilled: PFAD) เป็นส่วนที่ได้มาจากกระบวนการสุดท้ายของการทำบริสุทธิ์น้ำมันปาล์มดิบแบบกายภาพ โดยที่กรดไขมันนี้จะมีความบริสุทธิ์ประมาณ 95

เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก หากนำไปแยกส่วนกรดไขมันต่างๆ ออกมาจะสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมหลายชนิด เช่น กรดลอริกใช้ทำเรซินสำหรับอุตสาหกรรมสี กรดปาล์มมิติกนำไปเลี้ยงเชื้อราที่ใช้สกัดเป็นยาปฏิชีวนะ กรดโอเลอิกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ กรดสเตียริกนำไปผลิตเป็นเครื่องสำอางและสบู่ฟอกตัวเด็ก และกรดลิโนเลอิกนำไปใช้เป็นยาฉีดลดไขมันในเส้นเลือดเป็นต้น

7. สบู่ น้ำมันปาล์มสามารถนำไปใช้ในการผลิตสบู่ได้ดีทั้งสบู่ฟอกร่างกายและสบู่ซักล้าง ตัวอย่างสูตรทำสบู่ฟอกร่างกายสูตรหนึ่ง ใช้น้ำมันปาล์มสเตียริน น้ำมันปาล์ม และน้ำมันเมล็ดในปาล์มหรือน้ำมันมะพร้าว 40, 40 และ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นต้น

2.3 มะพร้าว (Coconut) [7, 15]

มะพร้าวมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Cocus nucifera เป็นพืชยืนต้น ขนาดของลำต้นมีความสูงประมาณ 20-30 เมตร สามารถให้ประโยชน์ได้ตั้งแต่รากถึงยอด ผลมะพร้าวเป็นส่วนที่ให้ประโยชน์มากที่สุด แบ่งได้ 2 ประเภท คือ ใช้บริโภคสด และอุตสาหกรรมแปรรูป มีการเพาะปลูกในเขตร้อนทั่วโลก ประเทศในแถบเอเชียและแปซิฟิก พื้นที่การเพาะปลูกมะพร้าวประมาณ 93 เปอร์เซ็นต์ของโลก ประเทศอินโดนีเซีย ฟิลิปปินส์ และอินเดีย เป็นประเทศผู้ผลิตรายใหญ่ 3 ลำดับแรกของโลก ส่วนประเทศไทยพื้นที่เพาะปลูกเป็นลำดับที่ 7 ของโลก แสดงดังตารางที่ 2.5 ส่งออกในรูปของมะพร้าวทั้งผลและน้ำมันมะพร้าว เพาะปลูกมากในพื้นที่มีฝนตกกระจายสม่ำเสมอแทบทุกเดือน อากาศอบอุ่นหรือค่อนข้างร้อนและมีแสงแดดมาก เช่น จังหวัดประจวบคีรีขันธ์ สุราษฎร์ธานี ปัตตานี สมุทรสงคราม และสมุทรสาคร เพาะปลูกได้ดีในดินร่วนหรือร่วนปนทราย มีการระบายน้ำดี มีสภาพเป็นกลางหรือเป็นกรดเล็กน้อย (pH 6-7) ให้ผลหลังจากปลูกแล้ว 5-6 ปี พันธุ์ที่ใช้ปลูกเป็นประเภทต้นเตี้ยและต้นสูง

1. ประเภทต้นเตี้ย มีการผสมพันธุ์ตัวเองค่อนข้างสูงจึงมักให้ผลดกและไม่ค่อยกลายพันธุ์ ส่วนใหญ่นิยมปลูกไว้เพื่อรับประทานผลอ่อน เพราะในขณะที่ผลยังไม่แก่อายุประมาณ 4 เดือน เนื้อมีลักษณะอ่อนนุ่มและน้ำมีรสหวาน บางพันธุ์มีกลิ่นหอม ต้นเตี้ย โตเต็มที่สูงประมาณ 12 เมตร ให้ผลเมื่ออายุ 3-4 ปี มะพร้าวประเภทนี้มีหลายพันธุ์แต่ละพันธุ์มีลักษณะแตกต่างกัน เช่น เปลือกสีเขียวเหลืองนวล น้ำตาลแดงหรือสีส้ม มะพร้าวต้นเตี้ยทุกพันธุ์มีผลขนาดเล็ก ผลที่แก่มีเนื้อบางและน้อย เช่น พันธุ์นกคุ่ม หมูสีเขียว หมูสีเหลือง นาฬิกา น้ำหอม มะพร้าวเตี้ย มะพร้าวไฟ

2. ประเภทต้นสูง มักผสมข้ามพันธุ์คือในแต่ละช่อดอกหนึ่งๆ ดอกตัวผู้จะค่อยๆ ทยอยบานและร่วงไปหมดก่อนที่ดอกตัวเมียจะเริ่มบาน จึงไม่มีโอกาสผสมตัวเอง มักใช้ผลแก่ประกอบอาหารหรือใช้ในอุตสาหกรรมน้ำมันพืชเพราะมีผลโต เนื้อหนา ปริมาณเนื้อมาก ต้นสูงโตเต็มที่ประมาณ 18 เมตร ให้ผลเมื่ออายุ 5-6 ปี อุตสาหกรรมมะพร้าวในปัจจุบันได้พัฒนาทางด้านคุณภาพโดยเฉพาะปริมาณเปอร์เซ็นต์น้ำมัน เนื้อมะพร้าวแห้งของพันธุ์สวีลูกผสม 1 และพันธุ์ชุมพรลูกผสม 60-1 มี

น้ำมัน 63-64 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จึงเหมาะสำหรับอุตสาหกรรมน้ำมันมะพร้าวเพื่อการบริโภคและอุตสาหกรรมมาก

การผลิตน้ำมันมะพร้าวในเชิงอุตสาหกรรมเป็นการสกัดน้ำมันจากเนื้อมะพร้าวแห้งโดยมีกรดไขมันลอริกที่มีคาร์บอน 12 เป็นองค์ประกอบหลัก น้ำมันมะพร้าวที่สกัดที่อุณหภูมิต่ำและไม่ผ่านความร้อนหรือที่เรียกว่าน้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นมีคุณค่าต่อสุขภาพสูง ประเทศไทยเพิ่มมูลค่าของน้ำมันมะพร้าวโดยใช้ประโยชน์น้ำมันมะพร้าวสกัดเย็นเพื่อสุขภาพและอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง

ตารางที่ 2.5 เนื้อที่ให้ผลผลิต ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ของมะพร้าวของประเทศผู้ผลิตที่สำคัญ ปี 2548-2550 [18, 21]

ประเทศ	เนื้อที่ให้ผลผลิต (พันไร่)			ผลผลิต (พันตัน)			ผลผลิตต่อไร่ (กก.)		
	2548	**2549**	**2550**	**2548**	**2549**	**2550**	**2548**	**2549**	**2550**
อินโดนีเซีย	16,938	16,563	16,375	18,250	16,375	17,000	1,077	989	1,038
ฟิลิปปินส์	20,270	20,859	21,563	14,825	14,958	15,580	731	717	723
อินเดีย	12,094	12,168	11,750	9,535	11,005	9,400	788	904	800
บราซิล	1,816	1,811	1,709	3,119	2,978	2,771	1,718	1,644	1,621
ไทย*	659	1,614	1,598	1,940	1,815	1,722	1,170	1,125	1,077
เวียดนาม	825	829	813	977	982	962	1,184	1,185	1,183
ศรีลังกา	2,468	2,468	2,468	1,912	913	954	775	370	387
ปาปัวนิวกินี	1,219	1,238	1,269	651	660	677	534	533	533
มาเลเซีย	1,094	1,081	1,075	584	570	568	534	527	528
พม่า	256	256	263	350	365	370	1,367	1,426	1,407
อื่นๆ	8,865	7,762	9,210	5,924	4,629	4,677	668	596	508
รวมทั้งโลก	67,504	66,649	68,093	58,067	55,250	54,681	860	829	803

2.4 ถั่วเหลือง (Soybean) [22]

ถั่วเหลืองมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Glycine max (L.) Merr. เป็นพืชล้มลุก ลำต้นสี่เหลี่ยม ปกคลุมด้วยขนสีเทาขาว สูงประมาณ 1-2 เมตร ดอกเป็นช่อสีขาวหรือม่วงแดง ออกดอกเมื่ออายุประมาณ 25-30 วัน เก็บเกี่ยวอายุประมาณ 90-100 วัน ฝักแบนขาวติดเป็นกระจุกที่ข้อของต้น และกิ่งในฝัก มีเมล็ด 3-5 เมล็ด เมล็ดถั่วเหลืองมีหลายขนาดและหลายสี เช่น ดำ น้ำตาล ฟ้า เหลือง เปลือกถั่วเหลืองที่แก่จะแข็งแรงทนต่อน้ำ ถั่วเหลืองมีน้ำมัน 20% และโปรตีน 40% โดยน้ำหนักของถั่วเหลือง ส่วนที่เหลือเป็นคาร์โบไฮเดรต 40% ประเทศสหรัฐอเมริกาปลูกถั่วเหลืองมากที่สุดของโลก ปี 2546 มีปริมาณการผลิต 75 ล้านตัน คิดเป็น 38 เปอร์เซ็นต์ของการผลิตทั่วโลก ประเทศไทยเพาะปลูกถั่วเหลืองเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ต่อมาจึงแปรรูปเป็นอาหารและน้ำมันพืชเพื่อการบริโภค ภาคเหนือมีพื้นที่การเพาะปลูกมากสุด รองลงมาคือภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาค

กลาง แต่ภูมิอากาศของประเทศไม่เหมาะสมจึงมีผลผลิตต่อไร่ต่ำ สามารถปลูกได้ทั้งปี ปีละ 3 ฤดู การปลูกต้องปรับสภาพดินให้เหมาะสมก่อน ค่าความเป็นกรด-เบสประมาณ 5.5-6.5 และเตรียมเมล็ดโดยการคลุกเชื้อไรโซเบียมที่ใช้กับถั่วเหลืองเท่านั้น ถั่วเหลืองต้องการน้ำประมาณ 300-400 มิลลิลิตร ตลอดฤดูปลูก ช่วงสำคัญที่ไม่ควรขาดน้ำคือช่วงการงอกและช่วงออกดอก อายุการเก็บเกี่ยวของถั่วเหลืองขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ ซึ่งอยู่ในช่วงประมาณ 60-110 วัน ประเทศไทยต้องนำเข้าถั่วเหลืองเพราะการปลูกในประเทศยังไม่เพียงพอต่อความต้องการในการบริโภค

2.5 สบู่ดำ (Physic nut) [23-25]

สบู่ดำมีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Jatropha curcas Linn. และชื่อสามัญว่า Physic nut สบู่ดำเป็นพืชน้ำมันที่อยู่ในวงศ์ไม้ยางพารา เป็นพืชพื้นเมืองของทวีปอเมริกาใต้ ในประเทศไทยพบได้ที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ เป็นไม้พุ่มยืนต้นขนาดกลาง สูงประมาณ 2-7 เมตร แต่อาจสูงได้ ถึง 10 เมตร อายุยืนไม่น้อยกว่า 20 ปี สามารถให้ผลผลิตตั้งแต่อายุ 8-12 เดือน ผลสบู่ดำอ่อนมีสีเขียว เมื่อสุกมีเหลืองและดำ ใน 1 ผลมี 2-4 เมล็ด โดยทั่วไปแล้วจะพบ 3 เมล็ด ผลสดของสบู่ดำ 1 กิโลกรัม เมื่อกะเทาะเปลือกออกจะมีเมล็ดสบู่ดำประมาณ 260-270 เมล็ด ในเมล็ดสบู่ดำมีน้ำมันประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก พันธุ์ที่มีในประเทศไทยมีหลายสายพันธุ์ มีชื่อเรียกตามแหล่งเพาะปลูก เช่น พันธุ์สตูล พันธุ์มุกดาหาร พันธุ์กาฬสินธุ์

สบู่ดำแตกต่างจากพืชน้ำมันอื่นเนื่องจากไม่สามารถที่จะนำมาบริโภคถ้าไม่ได้กำจัดสารพิษออกก่อน ปกติใช้สำหรับเป็นยารักษาโรคเท่านั้นแต่ก็ยังไม่ได้รับความสนใจอย่างแพร่หลาย มีบ้างที่นำสบู่ดำมาใช้ในทำเครื่องสำอางและน้ำมันหล่อลื่น ปัจจุบันมีการส่งเสริมปลูกสบู่ดำเพราะองค์กรในสังกัดกรมวิชาการเกษตร องค์กรของรัฐและภาคเอกชนได้เล็งเห็นความสำคัญในการนำมาใช้เป็นพลังงานทางการเกษตรสำหรับเครื่องกลการเกษตรระดับหมู่บ้าน และเครื่องยนต์ภายในครัวเรือน

การสกัดน้ำมันสบู่ดำ

1. การสกัดในห้องปฏิบัติการโดยบดให้ละเอียดแล้วสกัดด้วยตัวทำละลายปิโตรเลียมอีเทอร์ จะได้น้ำมัน 55 เปอร์เซ็นต์จากเนื้อเมล็ด และ 35 เปอร์เซ็นต์จากเมล็ดรวมเปลือก

2. การสกัดเมล็ดสบู่ดำด้วยระบบไฮดรอลิกและการสกัดด้วยระบบอัดเกลียว จะได้น้ำมันประมาณ 25-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของเมล็ด และมีน้ำมันตกค้างในกาก 10-15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยต้องนำเมล็ดสบู่ดำมาทุบพอแตกแล้วนำไปให้ความร้อนโดยการตากแดด นึ่ง หรือนำเข้าตู้อบ ก่อนนำเข้าเครื่องสกัดเพื่อให้การสกัดน้ำมันทำได้ง่ายขึ้น น้ำมันที่สกัดได้มีสีน้ำตาลเข้มและต้องนำไปกรองสิ่งสกปรกออกหรือทิ้งให้ตกตะกอนก่อนไปใช้งาน น้ำมันสบู่ดำในสภาพพร้อมใช้มีสีเหลืองอ่อนใส โดยทั่วไปเมล็ดสบู่ดำจะมีปริมาณน้ำมันร้อยละ 35 ของน้ำหนักของเมล็ด เมล็ดสบู่ดำจำนวน 4 กิโลกรัม สามารถสกัดน้ำมันได้ 1 ลิตร และเหลือเป็นกากจำนวน 3 กิโลกรัม

(ความหนาแน่นของน้ำมันสบู่ดำ 0.94 กิโลกรัมต่อลิตร) ผลผลิตที่ได้ขึ้นอยู่กับการดูแล ตารางที่ 2.6 แสดงชนิดและองค์ประกอบของกรดไขมันต่างๆ ในน้ำมันสบู่ดำ

ตารางที่ 2.6 ชนิดและองค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันสบู่ดำ [23]

องค์ประกอบของกรดไขมัน		**เปอร์เซ็นต์**
กรดไขมันอิ่มตัว		
Myristic	C 14:0	0-0.1
Palmitic	C 16:0	14.1-15.3
Stearic	C 18:0	3.7-9.8
Arachidic	C 20:0	0-0.3
Behenic	C 22:0	0-0.2
กรดไขมันไม่อิ่มตัว		
Palmitoleic	C 16:1	0-1.3
Oleic	C 18:1	34.3-45.8
Linoleic	C 18:2	29.0-44.2
Linolenic	C 18:3	0-0.3

หมายเหตุ C = อะตอมคาร์บอน

หมายเลขหน้าและหลังเครื่องหมาย : หมายถึง จำนวนอะตอมคาร์บอนและจำนวนพันธะคู่ตามลำดับ

น้ำมันสบู่ดำสามารถนำมาใช้กับเครื่องยนต์หมุนช้า ได้ แก่ เครื่องสูบน้ำ รถไถเดินตาม เครื่องยนต์ทางการเกษตรต่างๆ โดยไม่ต้องใช้น้ำมันชนิดอื่นผสม แต่หากใช้กับเครื่องยนต์หมุนเร็วจะทำให้เครื่องยนต์หนืดและเครื่องอาจรวนได้ น้ำมันสบู่ดำเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนมีคาร์บอน 16-18 อะตอม ขณะที่น้ำมันดีเซลมีคาร์บอน 8-10 อะตอม น้ำมันสบู่ดำมีสมบัติใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซล แต่มีความหนืดมากกว่า (36.9 เซนติพอยส์ เทียบกับความหนืดของน้ำมันดีเซล 3.8 เซนติพอยส์) ในปี 2525 มีการทดลองใช้น้ำมันสบู่ดำกับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็ว พบว่าเครื่องเดินปกติสม่ำเสมอและสิ้นเปลืองน้ำมันน้อยกว่าการใช้น้ำมันดีเซลหมุนเร็วเล็กน้อย ส่วนการเปรียบเทียบการทดสอบไอเสียพบว่าทั้งค่าควันดำและปริมาณแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ไม่แตกต่างกันและต่ำกว่าค่ามาตรฐานของทางการ รวมทั้งไม่พบแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ในไอเสียจากเครื่องยนต์ เมื่อเดินเครื่องยนต์จนครบ 1,000 ชั่วโมง แล้วถอดชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ออกมาตรวจสภาพ พบว่าชิ้นส่วนของเครื่องยนต์ไม่มียางเหนียวเกาะและยังมีสภาพดีเหมือนเดิม [25] จากรายงานของกรมวิชาการเกษตรในปี 2548 [23] ระบุว่ากรมส่งเสริมการเกษตรได้ทดลองผสมน้ำมันสบู่ดำกับน้ำมันเบนซินใช้กับรถจักรยานยนต์ และใช้น้ำมันสบู่ดำแทนน้ำมันดีเซลในเครื่องยนต์แบบต่างๆ เช่น เครื่องปั่นไฟ รถยนต์ดีเซล พบว่าสามารถเดินเครื่องยนต์ได้ตามปกติ และในปี

เดียวกันนักวิจัยอีกกลุ่มได้ศึกษาการใช้น้ำมันสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซลในอัตราส่วนต่างๆ กับเครื่องยนต์ดีเซลแบบหนึ่งลูกสูบ และทดสอบสมรรถนะของเครื่องยนต์ ได้แก่ แรงบิด กำลังของเบรก อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง และค่าควันดำ พบว่าเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันสบู่ดำผสมกับน้ำมันดีเซลมีสมรรถนะใกล้กับเครื่องยนต์ที่ใช้น้ำมันดีเซล มีปริมาณการปล่อยควันดำต่ำกว่ามาตรฐานที่ราชการกำหนด นอกจากนี้สมบัติทางกายภาพของเชื้อเพลิง ได้แก่ ดัชนีซีเทน ความถ่วงจำเพาะ ค่าความร้อน จุดวาบไฟ จุดติดไฟ และความหนืด ใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลเชิงพาณิชย์และสามารถผสมได้ดีกับน้ำมันดีเซล

ในแง่ของการลงทุน กรณีต้นกล้าสบู่ดำราคา 3 บาท ต้นทุนการผลิตอยู่ประมาณ 2,500 บาทต่อไร่ ถ้าได้ผลผลิต 800 กิโลกรัมต่อไร่ เกษตรกรผู้ผลิตจะมีรายได้ประมาณไร่ละ 2,400 บาท ต้นทุนการผลิตเมล็ดสบู่ดำจะอยู่ที่ 3.10 บาทต่อกิโลกรัม และต้นทุนน้ำมันสบู่ดำดิบประมาณ 12.50 บาทต่อลิตร จะเห็นว่าผลตอบแทนที่เกษตรกรได้รับไม่ค่อยคุ้มค่า และเมื่อนำน้ำมันสบู่ดำดิบไปผ่านกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิชันเพื่อทำเป็นไบโอดีเซลจะมีค่าใช้จ่ายเพิ่มขึ้นอีกประมาณลิตรละ 3 บาท รวมเป็นต้นทุนราคาน้ำมันไบโอดีเซลจากสบู่ดำ 15.50 บาทต่อลิตร

ปัจจุบันศักยภาพของสบู่ดำเชิงอุตสาหกรรมเพื่อผลิตไบโอดีเซลยังต่ำมากเมื่อเทียบกับปาล์มน้ำมัน ทั้งในเรื่องของพื้นที่ปลูก ผลผลิตต่อไร่ และต้นทุน จากการศึกษาเบื้องต้น [26] ยังบ่งชี้ว่าหากจะให้คุ้มทุน ผลผลิตสบู่ดำจะต้องไม่ต่ำกว่า 800 กิโลกรัมต่อไร่ ดังนั้นจะต้องใช้สบู่ดำการพันธุ์ที่ดีร่วมกับดูแลที่ดี ซึ่งอาจส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นอีก ทั้งนี้ต้องอาศัยการวิเคราะห์แผนในเชิงธุรกิจอย่างละเอียดเพื่อช่วยให้เห็นภาพชัดเจนขึ้นโดยเฉพาะต้นทุนผันแปร เช่น ค่าแรงงานในการเพาะปลูก การดูแลรักษา และค่าแรงในการเก็บเกี่ยวผลผลิต เป็นต้น ปัจจุบันบริษัทเอกชนร่วมกับกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีได้ส่งเสริมการปลูกสบู่ดำในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ทำให้ได้ข้อมูลและประสบการณ์ในการปลูกสบู่ดำเพิ่มมากขึ้น และช่วยให้เกษตรกรมีทางเลือกในการใช้น้ำมันสบู่ดำเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องจักรกลการเกษตรแทนน้ำมันดีเซลในยามที่เกิดวิกฤตพลังงานซึ่งเป็นการช่วยเหลือเกษตรกรอีกทางหนึ่ง ดังนั้นจะต้องมีการวิจัยต้นพันธุ์ของสบู่ดำที่ให้ผลผลิตอยู่ในระดับที่คุ้มทุนเพื่อดึงดูดเกษตรกรให้ปลูกสบู่ดำ

2.6 ศักยภาพของพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตไบโอดีเซลในประเทศ [8]

พืชน้ำมันที่สามารถใช้ผลิตไบโอดีเซล เช่น ปาล์มน้ำมัน มะพร้าว ถั่วเหลือง ถั่วลิสง ละหุ่ง และสบู่ดำ แต่เนื่องจากพืชน้ำมันแต่ละชนิดมีปริมาณการเพาะปลูกและความต้องการไม่เท่ากัน และส่วนใหญ่นำไปใช้ในการบริโภค จึงควรทราบความสามารถในการผลิตและปริมาณความต้องการภายในประเทศ ปัจจัยที่สำคัญในการพิจารณาว่าพืชน้ำมันชนิดใดมีศักยภาพและควรส่งเสริมให้มีการเพาะปลูกเพื่อใช้ผลิตไบโอดีเซลที่สำคัญคือความเพียงพอของปริมาณวัตถุดิบและการให้ปริมาณน้ำมันต่อหน่วยที่สูง

จากรายงานพืชน้ำมันที่เพาะปลูกในประเทศโดยสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ [8] ปาล์มน้ำมันเป็นพืชน้ำมันที่มีรายงานการผลิตสูงสุดในแต่ละปี รองลงมาคือ มะพร้าว ปาล์มน้ำมันให้ผลผลิตต่อไร่สูงกว่าพืชน้ำมันชนิดอื่นถึง 10 เท่า และยังสามารถเพิ่มศักยภาพการผลิตได้มาก เพราะยังมีพื้นที่เหมาะสมในภาคใต้และภาคตะวันออกอีกหลายล้านไร่ ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเป็นพืชน้ำมันที่มีศักยภาพในการผลิตไบโอดีเซลมากที่สุดของประเทศไทย สำหรับมะพร้าวไม่เหมาะเป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอดีเซล แม้จะสามารถปลูกได้จำนวนมาก แต่พื้นที่เพาะปลูกในประเทศค่อนข้างกระจัดกระจาย ปริมาณน้ำมันที่ให้น้อยกว่าปาล์มน้ำมัน รวมทั้งผลผลิตที่ได้ไม่เพียงพอต่อความต้องการบริโภคและใช้กับอุตสาหกรรมภายในประเทศ อีกทั้งพื้นที่เพาะปลูกมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากการใช้พื้นที่ปลูกไม้ผลอื่นเพราะราคามะพร้าวตกต่ำ ส่วนถั่วเหลือง ถั่วลิสง ละหุ่ง ปริมาณการเพาะปลูกมีไม่มากและไม่เพียงพอกับความต้องการภายในประเทศ ต้องนำเข้าจากต่างประเทศ จึงไม่สามารถใช้ผลิตไบโอดีเซลเพราะจะยิ่งทำให้ขาดแคลนมากขึ้น

อย่างไรก็ตามปริมาณน้ำมันปาล์มดิบที่ผลิตได้ในประเทศยังไม่เพียงพอกับความต้องการและไม่สามารถตอบสนองการผลิตไบโอดีเซลตามยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศที่กำหนดไว้ได้ ข้อมูลจากศูนย์วิจัยของธนาคารเพื่อการเกษตรและสหกรณ์การเกษตร กระทรวงการคลัง รายงานความต้องการปาล์มน้ำมันในปี พ.ศ. 2549 สำหรับการบริโภค 0.8 ล้านตัน และการผลิตไบโอดีเซล 0.34 ล้านตัน และระบุว่าเกษตรกรส่วนใหญ่จะตัดปาล์มน้ำมันเมื่อผลปาล์มมีน้ำมันร้อยละ 17 ของน้ำหนักผลปาล์ม แสดงว่าปาล์มน้ำมัน 1 กิโลกรัม สามารถผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ 0.17 กิโลกรัม ซึ่งจากตารางที่ 2.3 ผลผลิตปาล์มน้ำมัน 6,715,036 ตันในปี พ.ศ. 2549 จึงผลิตน้ำมันปาล์มดิบได้ 1.14 ล้านตัน ดังนั้นถ้าต้องการไบโอดีเซลเพิ่มขึ้นให้สามารถตอบสนองแผนปฏิบัติการไบโอดีเซลภายใต้ยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศตามประมาณการความต้องการน้ำมันปาล์มดิบสำหรับอุตสาหกรรมไบโอดีเซลในปี พ.ศ. 2555 จำนวน 0.87 ล้านตัน ดังตารางที่ 2.7 ที่รายงานโดยกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน ต้องเพิ่มผลผลิตปาล์มน้ำมันจาก 2.8 ตันต่อไร่ ในปี พ.ศ. 2549 เป็น 3.2 ตันต่อไร่ในปี พ.ศ. 2551 ตามแผนพัฒนาไบโอดีเซลปี 2551- 2565 โดยการขยายพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันเพิ่มอีก 2.5 ล้านไร่ (ส่วนต่างของความต้องการไบโอดีเซลที่เพิ่มขึ้นในปี พ.ศ. 2555 จากปี พ.ศ. 2549 หลังจากหักส่วนที่ใช้เพื่อการบริโภคแล้ว ประมาณ 0.53 ล้านตัน)

ตารางที่ 2.7 ประมาณการความต้องการน้ำมันปาล์มดิบในอุตสาหกรรมไบโอดีเซล [27]

รายการ	ปี 2551	ปี 2552	ปี 2553	ปี 2554	ปี 2555
1. ปริมาณความต้องการน้ำมันดีเซล กรณีมี NGV	55.6	57.3	58.7	60.3	62.7
2. แนวทางส่งเสริมการใช้	B2 และ B5			B5	
2.1 ปริมาณความต้องการ B100 สำหรับ B2 (ล้านลิตรต่อวัน)	0.92	0.92	0.92	0	0
2.2 ปริมาณความต้องการ B100 สำหรับ B5 (ล้านลิตรต่อวัน)	0.43	0.43	0.43	3.01	3.13
2.3 ปริมาณความต้องการ B100 สำหรับไบโอดีเซล (ล้านลิตรต่อวัน)	0	0	0	0.06	0.07
3. รวมความต้องการ B100 (ล้านลิตรต่อวัน)	1.35	1.35	1.35	3.07	3.20
4. ความต้องการ B100 (ล้านลิตรต่อปี)	336	336	336	0	0
5. ปริมาณความต้องการ B100 สำหรับ B5 (ล้านลิตรต่อปี)	156	156	156	1,099	1,143
6. ปริมาณความต้องการ B100 สำหรับการใช้ไบโอดีเซล 100 % (ล้านลิตรต่อปี)	0	0	0	22	24
7. รวมความต้องการ B100 (ล้านลิตรต่อปี)	492	492	492	1,121	1,167
8. คิดเป็นความต้องการน้ำมันปาล์มดิบ (ล้านตันต่อปี)	0.35	0.35	0.35	0.84	0.87

หมายเหตุ ความต้องการ B2 พิจารณาการใช้ B2 ตั้งแต่ กุมภาพันธ์ 2551

ที่มา กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (www.dede.go.th)

บทที่ 3
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

3.1 ไบโอดีเซล [28-35]

ไบโอดีเซลหรือน้ำมันดีเซลชีวภาพ ตามมาตรฐาน ASTM (American Society for Testing and Materials) และการใช้งานในต่างประเทศทั้งในสหรัฐอเมริกาและกลุ่มประเทศในแถบยุโรป หมายถึง สารประเภทโมโนอัลคิลเอสเทอร์ของกรดไขมันที่ผลิตได้จากการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์กับแอลกอฮอล์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ดีเซล ไบโอดีเซลมีสมบัติเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงเช่นเดียวกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม แต่สามารถเกิดการสันดาปได้สมบูรณ์กว่าน้ำมันดีเซล จึงเกิดแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์น้อยกว่า ไอเสียมีคุณภาพดีกว่า และมีเขม่าคาร์บอนน้อยจึงไม่ทำให้เกิดการอุดตันของระบบไอเสีย และเนื่องจากในไบโอดีเซลไม่มีกำมะถันจึงไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม และไม่มีปัญหาเรื่องการกัดกร่อนเครื่องยนต์

ไบโอดีเซล [29-33] แบ่งได้ 4 ประเภท คือ

1. ไบโอดีเซลแบบนำมาใช้โดยตรงหรือการผสม (Direct use and blending)

การนำมาใช้โดยตรง คือ การนำน้ำมันที่ได้จากไขมันสัตว์หรือน้ำมันจากพืช เช่น น้ำมันมะพร้าวดิบ น้ำมันปาล์มดิบ หรือการนำน้ำมันที่ได้จากพืชที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยการกำจัดกรดไขมันอิสระ สี กลิ่น และยางเหนียว เช่น น้ำมันปาล์ม น้ำมันถั่วเหลือง และน้ำมันมะพร้าวมาใช้กับเครื่องยนต์ดีเซลโดยตรง กรดไขมันอิสระในไขมันจากสัตว์หรือน้ำมันที่ได้จากพืชจะเกิดยางเหนียวของคาร์บอนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน หรือจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในระหว่างการเก็บรักษา หรือเมื่อเกิดการเผาไหม้

การผสม คือ การนำน้ำมันที่ได้จากไขมันสัตว์หรือน้ำมันจากพืชผสมกับน้ำมันดีเซลหรือน้ำมันก๊าดในอัตราส่วนโดยปริมาตรต่างๆ เพื่อทำให้ความหนืดลดลงและสะดวกในการใช้งาน

2. ไบโอดีเซลจากการทำเป็นไมโครอิมัลชัน (Microemulsion)

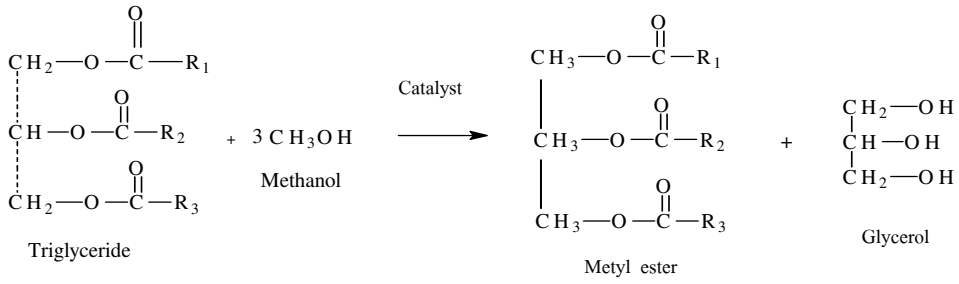
การทำไมโครอิมัลชันเป็นการกระจายอนุภาคของเหลวขนาด 1-150 นาโนเมตร ให้แขวนลอยในตัวกลางของเหลวอีกชนิดหนึ่งอย่างสมดุล [29] ซึ่งของเหลวทั้งสองชนิดจะต้องไม่ละลายเป็นเนื้อเดียวกัน อนุภาคของเหลวที่แขวนลอยสามารถกระจายตัวอยู่ได้ด้วยสารลดแรงตึงผิวชนิดที่มีประจุและไม่มีประจุ วิธีการนี้ใช้เพื่อลดความหนืดของน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์โดยใช้ตัวทำละลาย เช่น เมทานอล เอทานอล และ 1-บิวทานอล การทำเป็นไมโครอิมัลชันทำให้สามารถฉีดน้ำมันจากพืชหรือไขมันจากสัตว์ให้เป็นละอองฝอยด้วยหัวฉีดได้ดีขึ้น

3. ไบโอดีเซลจากการแยกสลายด้วยความร้อนหรือกระบวนการไพโรไลซิส (Thermal cracking or Pyrolysis)

กระบวนการนี้เป็นการสลายโครงสร้างโมเลกุลของน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์ด้วยความร้อนให้เป็นสารไฮโดรคาร์บอนอิ่มตัว สารไฮโดรคาร์บอนไม่อิ่มตัว และสารที่มีการเติมออกซิเจน บางกรณีอาจใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาช่วย

4. ไบโอดีเซลจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Transesterification)

ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน คือ ปฏิกิริยาระหว่างน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์กับแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยากรด เบส หรือเอนไซม์ และได้ผลิตภัณฑ์เป็นอัลคิลเอสเทอร์ มักเรียกผลิตภัณฑ์ไบโอดีเซลที่ได้ตามชนิดของแอลกอฮอล์ที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา เช่น เมทิลหรือเอทิลเอสเทอร์ ส่วนผลพลอยได้คือกลีเซอรอล มีหลายงานวิจัยพยายามหาวิธีใช้ประโยชน์จากกลีเซอรอล เอสเทอร์ของน้ำมันปาล์มดิบที่ได้จะมีสมบัติและความหนืดใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลแต่มีค่าซีเทนสูงกว่า เนื่องจากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นปฏิกิริยาผันกลับได้ การใช้แอลกอฮอล์มากเกินพอทำให้เกิดผลได้ (Yield) ของผลิตภัณฑ์สูง แต่จะต้องไม่มีน้ำระหว่างการทำปฏิกิริยาเพื่อไม่ให้เกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชัน (Sponification) ได้สบู่แทนอัลคิลเอสเทอร์ เพราะจะทำให้ปริมาณของผลได้ของผลิตภัณฑ์ลดลง และการแยกอัลคิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลยากและใช้เวลานานขึ้น แอลกอฮอล์ที่นิยมใช้มากที่สุดได้แก่ เมทานอล เอทานอล โพรพานอล และบิวทานอล [30] เนื่องจากมีสมบัติทางเคมีและกายภาพที่เหมาะสมคือมีความเป็นขั้วและสายโมเลกุลสั้น จึงทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์ได้ดี มีราคาถูก หาได้ง่าย และแอลกอฮอล์ละลายได้ดีกับตัวเร่งปฏิกิริยากรดหรือเบส นิยมใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสมากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยากรดและเอนไซม์เนื่องจากสามารถเร่งการเกิดปฏิกิริยาได้เร็วกว่าที่อุณหภูมิและความดันต่ำ ได้ผลิตภัณฑ์มาก และเกิดสารข้างเคียงน้อย [30] สมการที่ 3.1 แสดงตัวอย่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล ตารางที่ 3.1 แสดงวิธีการต่างๆ ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล และข้อดีและข้อจำกัดของวิธีการนั้นๆ



รูปที่ 3.1 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันระหว่างไตรกลีเซอไรด์กับเมทานอล [31]

ตารางที่ 3.1 ข้อดีและข้อจำกัดของวิธีการต่างๆ ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล [29, 34-35]

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อจำกัด	ข้อสังเกต
1. กระบวนการผลิตแบบพื้นฐานด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (Conventional process) [29]	• ระดับเทคโนโลยีพัฒนาได้เอง คุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์ ลงทุนต่ำ • ใช้อุณหภูมิต่ำ ความดันบรรยากาศ ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงและมีปริมาณอัลคิลเอสเทอร์สม่ำเสมอ	• มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมสูงกว่าเทคโนโลยีอื่นและมีค่าใช้ จ่ายในด้านสิ่งแวดล้อมสูง • ไม่เหมาะกับวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระมากกว่า 2 % โดยน้ำหนัก	• สามารถทำวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนากระบวนการได้ • ลงทุนต่ำและสามารถดัดแปลงเข้ากับเทคโนโลยีของประเทศไทยได้
2. กระบวนการเอสเทอริฟิเคชัน (Esterification) [34]	• เหมาะกับวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระเกิน 10 %โดยน้ำหนัก และตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่ใช้จะเปลี่ยนทั้งกรดไขมันอิสระและไตรกลีเซอไรด์เป็นอัลคิลเอสเทอร์ • ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูง • ไม่เกิดสบู่ในปฏิกิริยา เนื่องจากใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา	• วัตถุดิบที่ใช้ต้องมีกรดไขมันอิสระสูง • เนื่องจากระยะเวลาในการทำปฏิกิริยานานจึงต้องใช้ตัวทำละลายมาก • เป็นเทคโนโลยีที่ลงทุนสูง เพราะเป็นปฏิกิริยาแบบกรด ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ต้องทนกรดจึงมีราคาสูงกว่า	• ไม่เหมาะกับวัตถุดิบหลักประเทศไทย คือน้ำมันปาล์มดิบและน้ำมันสำหรับการปรุงอาหารที่ผ่านการใช้แล้วซึ่งมีกรดไขมันอิสระต่ำ (3-5 % โดยน้ำหนัก) • ข้อมูลที่ได้อยู่ในระดับงานวิจัย
3. กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน CD process (Continuous deglycerolization process) [29]	• ใช้พลังงานและอุณหภูมิต่ำ ความดันบรรยากาศ • ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงและมีปริมาณอัลคิลเอสเทอร์สม่ำเสมอ • เหมาะกับการผลิตในเชิงพาณิชย์	• ลงทุนสูง ระยะเวลาคุ้มทุนนาน • ไม่เหมาะกับวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระมากกว่า 2 % โดยน้ำหนัก	• ทำวิจัยต่อยอดเพื่อพัฒนากระบวนการทั้งสำหรับอุตสาหกรรมขนาดย่อมและขนาดใหญ่ได้เองในประเทศไทย • ความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีได้เองอยู่ในระดับสูงที่สุด

ตารางที่ 3.1 ข้อดีและข้อจำกัดของวิธีการต่างๆ ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล (ต่อ) [29, 34-35]

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อจำกัด	ข้อสังเกต
4. กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันภายใต้ภาวะเหนือวิกฤตหรือเมทานอลเหนือวิกฤต [29]	• ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเร็ว • ไม่มีข้อจำกัดเรื่องกรดไขมันอิสระ • แยกกลีเซอรอลได้ง่าย เนื่องจากไม่ได้ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจึงไม่เกิดสบู่ และไม่จำเป็นต้องล้างผลิตภัณฑ์ • มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมต่ำ	• มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูง ต้องการทักษะในการผลิตสูง มีระดับการพัฒนาได้เองในประเทศต่ำ • ต้องใช้ตัวทำละลายเมทานอลมาก • มีความเสี่ยงเพราะใช้ความดันสูง • เป็นเทคโนโลยีที่ลงทุนสูง อุปกรณ์ต้องทนความดันสูงได้ และต้องมีระบบความปลอดภัยที่ดี	• ความเป็นไปได้ด้านเศรษฐศาสตร์และความสามารถในการพัฒนาเทคโนโลยีได้เองอยู่ในระดับต่ำที่สุด
5. กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยใช้เอนไซม์ไลเปส [29]	• สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ในระบบที่มีและไม่มีน้ำ • มีความปลอดภัยสูง • แยกกลีเซอรอลได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องล้างผลิตภัณฑ์เนื่องจากไม่เกิดสบู่ • มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด	• กระบวนการผลิตยังอยู่ในระดับงานวิจัย การพัฒนาในเชิงพาณิชย์ต่ำมาก • เอนไซม์ไลเปสที่ใช้มีราคาสูง • ผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่ำ	• ประสิทธิภาพของกระบวนการต่ำที่สุด • ไม่เหมาะกับประเทศไทย เนื่องจากมีราคาลงทุนสูง และกระบวนการผลิตยังอยู่ในระดับงานวิจัยเท่านั้น

ตารางที่ 3.1 ข้อดีและข้อจำกัดของวิธีการต่างๆ ที่ใช้ผลิตไบโอดีเซล (ต่อ) [29, 34-35]

เทคโนโลยี	ข้อดี	ข้อจำกัด	ข้อสังเกต
6. กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันโดยเทคโนโลยีไมโครเวฟ [35]	• ระยะเวลาในการเกิดปฏิกิริยาเร็ว • ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูง • ใช้พลังงานต่ำ	• มีค่าใช้จ่ายในการลงทุนสูงจากราคาของหัวไมโครเวฟและระบบความปลอดภัย	• เป็นเทคโนโลยีล่าสุดที่มีความเป็นไปได้ในเชิงพาณิชย์ • ไม่เหมาะกับประเทศไทย เนื่องจากต้องนำเข้าเทคโนโลยีและอุปกรณ์การผลิตชุดไมโครเวฟ • ควรทำวิจัยเพื่อสร้างชุดไมโครเวฟใช้เอง
7. กระบวนการเอสเทอริฟิเคชันต่อด้วยกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน (กระบวนการสองปฏิกิริยา) [29]	• ใช้ได้ดีกับวัตถุดิบที่มีกรดไขมันอิสระน้อยกว่า 3 % โดยน้ำหนัก เช่น น้ำมันปาล์มดิบ • คาดว่าเหมาะสมกับประเทศไทยมากที่สุดในด้านของวัตถุดิบที่ใช้	• จำเป็นต้องทำการวิจัยเพิ่มเติม เนื่องจากใช้ตัวทำละลายเมทานอลมาก • มีปัญหาการแยกเกลือที่เกิดจากการทำให้เป็นกลางออก	• เหมาะกับประเทศไทย แต่ต้องศึกษาและวิจัยหาภาวะของการเกิดปฏิกิริยาที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์ผลได้ของอัลคิลเอสเทอร์ • สามารถใช้เทคโนโลยีนี้ได้กับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก

จากวิธีการผลิตไบโอดีเซลทั้งหมด กระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเป็นวิธีที่นิยม เนื่องจากเป็นการผลิตแบบต่อเนื่อง ใช้พลังงานและอุณหภูมิต่ำ ความดันบรรยากาศ ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงและปริมาณอัลคิลเอสเทอร์ในผลิตภัณฑ์สม่ำเสมอ มีความคุ้มค่าเชิงเศรษฐศาสตร์และลงทุนต่ำ

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่รวบรวมจากการศึกษาเอกสารทางวิชาการและผลงานวิจัยที่ผ่านมา ได้แก่

1. อัตราส่วนโดยโมลของแอลกอฮอล์ต่อน้ำมันในการสังเคราะห์ไบโอดีเซล

Freedman B. และคณะ [36] ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันที่ได้จากพืช ได้แก่ น้ำมันถั่วเหลือง น้ำมันเมล็ดทานตะวัน น้ำมันถั่วลิสง และน้ำมันเมล็ดฝ้าย พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 6 ต่อ 1 จะให้ค่าการเปลี่ยนไปเป็นเมทิลเอสเทอร์ (Conversion) สูงสุดประมาณ 93-98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันถั่วเหลือง

Gemma V. และคณะ [37] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมของการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดทานตะวันและเมทานอลโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดทานตะวัน 6 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1.3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดทานตะวัน ได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 98.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันทานตะวัน

เบญจพร เมืองสมบัติ และคณะ [38] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์สำหรับใช้บริโภคและเมทานอลโดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์ม 6 ต่อ 1 ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.7 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส ต่ำกว่า 8 เซนติสโตกส์ (มาตรฐานความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส ของไบโอดีเซล 3.5-5 เซนติสโตกส์)

2. ชนิดและความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ [31, 39-42]

อัตราการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะช้ากว่าตัวเร่งปฏิกิริยาเบส จึงต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน และปฏิกิริยาจะเกิดสมบูรณ์ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียส แต่จะไม่เกิดสบู่ในปฏิกิริยา [31] ถ้าน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์มีน้ำหรือกรดไขมันอิสระสูงกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก การใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดจะให้ผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส แต่ถ้าน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์ปราศจากหรือมีกรดไขมันอิสระน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบส เพราะปฏิกิริยาเกิดได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเอนไซม์ ทั้งนี้ในสารตั้งต้นต้องมีปริมาณน้ำน้อยกว่า 0.06 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพราะน้ำจะทำปฏิกิริยากับ

ไตรกลีเซอไรด์เกิดกรดไขมันอิสระ ซึ่งเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสจะเกิดปฏิกิริยาสปอนนิฟิเคชันได้สบู่ ทำให้ผลได้ของอัลคิลเอสเทอร์ลดลงและการล้างผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำยาก [39] ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ใช้ควรอยู่ระหว่าง 0.1-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยาจะเกิดได้สมบูรณ์ขึ้น ตัวเร่งปฏิกิริยากรดที่นิยมใช้ เช่น กรดซัลฟิวริก กรดฟอสฟอริก กรดไฮโดรคลอริก กรดซัลโฟนิกของสารอินทรีย์ ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสที่ใช้ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมเมทอกไซด์ โซเดียมเอไมด์ โพแทสเซียมเอไมด์ แต่ที่นิยมใช้มาก คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากมีราคาถูก [40] พนิดา ศิริบังเกิดผล และคณะ พบว่าเมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้นสูงกว่า 0.5-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ไบโอดีเซลที่ได้จะมีปริมาณกลีเซอรอลที่เป็นผลพลอยได้น้อยกว่า 0.24 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ [41]

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์มีข้อดีคือได้ผลิตภัณฑ์ที่มีความบริสุทธิ์สูงและสามารถแยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ได้ง่าย แต่ยังไม่เป็นที่แพร่หลาย เพราะผลได้ของอัลคิลเอสเทอร์ต่ำกว่าเมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเบส และใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน นอกจากนี้ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ยังมีราคาสูง ตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์ที่นิยมใช้ ได้แก่ เอนไซม์ไลเปส [42]

3. อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา

Freedman. B. และคณะ [43] ศึกษาปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันถั่วเหลืองและเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันถั่วเหลือง 6 ต่อ 1 พบว่าที่ผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เท่ากัน ถ้าอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเท่ากับ 60 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเพียง 1 ชั่วโมง ในขณะที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส จะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยา 4 ชั่วโมง

Anh N.P. และคณะ [6] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชสำหรับการบริโภคที่ใช้แล้วและเมทานอลที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 8 ต่อ 1 ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.75 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันพืช พบว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และเวลา 120 นาที ค่าการแปลงผันเท่ากับ 92 และผลได้ของเมทิลเอสเทอร์เท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

4. ปริมาณของน้ำและกรดไขมันอิสระในน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันสัตว์ [14-15]

ปริมาณของน้ำและกรดไขมันอิสระมีผลโดยตรงต่อการเลือกใช้ชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาและผลได้ของผลิตภัณฑ์ ถ้าในน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์มีปริมาณน้ำหรือกรดไขมันอิสระสูง ไม่ควรใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส เพราะจะทำให้เกิดสบู่และผลได้ของอัลคิลเอสเทอร์ต่ำ และการล้างผลิตภัณฑ์ด้วยน้ำยาก

5. ความเร็วรอบในการปั่นกวน

งานวิจัยของ Korus R.A. [44] รายงานว่าความเร็วรอบในการปั่นกวนสารตั้งต้นของเครื่องปฏิกรณ์ไม่มีผลต่อค่าการเปลี่ยนเป็นเอทิลเอสเทอร์ของน้ำมันเมล็ดเรพที่ทำปฏิกิริยากับเอทานอล

หลังจากที่สารตั้งต้นผสมเป็นเนื้อเดียวกันแล้ว อย่างไรก็ตามการผสมกันของสารตั้งต้นมีความสำคัญต่อการเกิดปฏิกิริยา ถ้าการผสมของสารตั้งต้นไม่ดีจะทำให้ปริมาณผลได้ลดลงและต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน

Sharma Y.C. และคณะ [45] ศึกษาการผลิตน้ำมันไบโอดีเซลจากน้ำมัน Karanja ซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นของอินเดียกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าเมื่อเปลี่ยนจากเครื่องปั่นกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้าที่ความเร็วรอบ 1,000 รอบต่อนาที เป็นเครื่องปั่นกวนแบบเชิงกลที่ความเร็วรอบ 1,100 รอบต่อนาที ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นจาก 85 เป็น 89.5 เปอร์เซ็นต์

เป็นที่ทราบดีว่ากลีเซอรอลเป็นผลพลอยได้จากการผลิตไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ กลีเซอรอลมีลักษณะใส ไม่มีสี ไม่มีพิษ และสามารถละลายได้ดีทั้งในน้ำและแอลกอฮอล์ จึงเป็นตัวทำละลายที่ดีสำหรับองค์ประกอบในอุตสาหกรรมต่างๆ กลีเซอรอลที่มีความเข้มข้น 55-75 เปอร์เซ็นต์ จะมีรสหวาน สามารถใช้เป็นสารให้ความหวานแทนน้ำตาลได้ ในทางการค้าใช้กลีเซอรอลเป็นสารรักษาความชุ่มชื้นในเครื่องสำอางและยาสูบ ส่วนใหญ่พบว่าการแยกกลีเซอรอลออกจากผลิตภัณฑ์ทำได้ยาก ต้องใช้เวลานาน ดังนั้นได้มีงานวิจัยที่พยายามสร้างมูลค่าเพิ่มของกลีเซอรอลโดยการแยกออกจากผลิตภัณฑ์และทำบริสุทธิ์ให้ได้กลีเซอรอลที่มีคุณภาพ เช่น ใช้วิธีการกลั่นลำดับส่วน [46] การแลกเปลี่ยนไอออน [47]

3.2 มาตรฐานและคุณภาพของไบโอดีเซล [48-49]

สมบัติของไบโอดีเซลตามมาตรฐานสากลโดยทั่วไป ได้แก่ มาตรฐาน DIN 51606 ของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี และมาตรฐาน US ASTM D6751-02 ของสหรัฐอเมริกา ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานของไบโอดีเซลของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีและสหรัฐอเมริกา [48]

สมบัติ	DIN 51606	ASTM D6751-02
1. จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่น้อยกว่า 100	ไม่น้อยกว่า 130
2. น้ำและตะกอน (ร้อยละโดยปริมาตร)	-	ไม่มากเกิน 0.05
3. กากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่มากเกิน 0.30	ไม่มากเกิน 0.05
4. เถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	-	ไม่มากเกิน 0.02
5. ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	3.5 - 5.0	1.9 - 6.0
6. ธาตุกำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่มากเกิน 0.01	ไม่มากเกิน 0.05
7. ดัชนีซีเทน	ไม่น้อยกว่า 49	ไม่น้อยกว่า 47
8. จุดหมอก (องศาเซลเซียส)	-	3
9. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (หมายเลข)	ไม่มากเกิน 1	ไม่มากเกิน 3

ตารางที่ 3.2 มาตรฐานของไบโอดีเซลของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนีและสหรัฐอเมริกา (ต่อ)[48]

สมบัติ	DIN 51606	ASTM D6751-02
10. ค่าความเป็นกรดทั้งหมด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน)	ไม่มากเกิน 0.50	ไม่มากเกิน 0.80
11. กลีเซอรีนอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่มากเกิน 0.02	ไม่มากเกิน 0.02
12. ปริมาณกลีเซอรีนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่มากเกิน 0.25	ไม่มากเกิน 0.24

ตารางที่ 3.3 สมบัติและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ [49]

ข้อกำหนด	อัตราสูง-ต่ำ		วิธีทดสอบ
1. เมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่ต่ำกว่า	96.5	EN 14103
2. ความหนาแน่น ที่อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	860 900	ASTM D 1298
3. ความหนืด ณ อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	3.5 5.0	ASTM D 445
4. จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า	120	ASTM D 93
5. ปริมาณกำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 2622
6. ปริมาณกากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.30	ASTM D 4530
7. จำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	51	ASTM D 613
8. ปริมาณเถ้าซัลเฟต (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.02	ASTM D 874
9. ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.05	ASTM D 2709
10. ปริมาณสิ่งปนเปื้อนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.0024	ASTM D 5452
11. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (หมายเลข)	ไม่สูงกว่า	1	ASTM D 130
12. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส (ชั่วโมง)	ไม่ต่ำกว่า	6	EN 14112
13. ค่าความเป็นกรดทั้งหมด (มิลลิกรัมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อกรัมน้ำมัน)	ไม่สูงกว่า	0.50	ASTM D 664
14. ค่าไอโอดีน (กรัมไอโอดีนต่อ 100 กรัม)	ไม่สูงกว่า	120	EN 14111
15. กรดลิโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	12.0	EN 14103
16. ปริมาณเมทานอล (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14110
17. โมโนกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.80	EN 14105
18. ไดกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105

ตารางที่ 3.3 สมบัติและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ (ต่อ) [49]

ข้อกำหนด	อัตราสูง-ต่ำ		วิธีทดสอบ
19. ไตรกลีเซอไรด์ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.20	EN 14105
20. กลีเซอรีนอิสระ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.02	EN 14105
21. กลีเซอรีนทั้งหมด (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.25	EN 14105
22. โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม) (มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	ไม่สูงกว่า ไม่สูงกว่า	5.0 5.0	EN 14108 และ EN 14109 prEN 14538
23. ปริมาณฟอสฟอรัส (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.0010	ASTM D 4951
24. สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	ให้เป็นไปตามที่ได้รับความเห็นชอบจากอธิบดีกรมธุรกิจพลังงาน		

ที่มา ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน (พ.ศ. 2550) www.dede.go.th
เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน

ไบโอดีเซลที่มีสมบัติบางประการไม่เป็นไปตามมาตรฐานข้างต้น อาจก่อให้เกิดผลเสียต่อเครื่องยนต์ดีเซลเมื่อใช้งานในระยะยาว สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์แสดงดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ [15]

สมบัติ	ผลต่อเครื่องยนต์
1. ปริมาณเมทิลเอสเทอร์	บ่งบอกถึงความบริสุทธิ์ของไบโอดีเซล และการเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์ ถ้าปริมาณต่ำกว่ากำหนดบอกได้ว่ายังมีโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ในไบโอดีเซลสูงกว่ากำหนด ส่งผลให้ความหนืดของไบโอดีเซลมีค่าสูง ซึ่งจะทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีดหรือกระบอกสูบของเครื่องยนต์
2. ความหนาแน่น ที่ อุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส	ความหนาแน่นเป็นตัวแปรที่สำคัญในการออกแบบระบบหัวฉีดจ่ายน้ำมันเชื้อเพลิงดีเซลและเป็นตัวบอกปริมาณของพลังงานเชื้อเพลิง ไบโอดีเซลมีความหนาแน่นมากกว่าน้ำมันดีเซล แต่ค่าปริมาณพลังงานโดยรวมต่ำกว่า ความหนาแน่นของไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน ปริมาณเมทานอลที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซลจะทำให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำลง

ตารางที่ 3.4 สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ (ต่อ) [15]

สมบัติ	ผลต่อเครื่องยนต์
3. ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ความหนืดมีผลต่อการไหลและการฉีดเป็นฝอยของหัวฉีด การฉีดเป็นฝอยขนาดเล็กช่วยให้การเผาไหม้เกิดสมบูรณ์ ความหนืดของไบโอดีเซลที่ผลิตได้ขึ้นกับชนิดของพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบและภาวะในการทำปฏิกิริยา ความหนืดยังเป็นดัชนีแสดงการเสื่อมสภาพของไบโอดีเซลเนื่องจากปฏิกิริยาออกซิเดชันเพราะความหนืดจะเพิ่มขึ้น
4. จุดวาบไฟ	จุดวาบไฟเป็นค่าอุณหภูมิที่ต่ำสุดเมื่อเปลวไฟผ่านเหนือไอของน้ำมันแล้วทำให้น้ำมันติดไฟ มาตรฐานกำหนดให้จุดวาบไฟมีค่ามากกว่า 120 องศาเซลเซียส จุดวาบไฟมีผลต่อการขนส่ง เคลื่อนย้าย และจัดเก็บ ถ้าปริมาณเมทานอลที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซลมากกว่า 0.2 เปอร์เซ็นต์จะทำให้จุดวาบไฟต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐาน
5. กำมะถัน	เชื้อเพลิงที่มีกำมะถันเมื่อถูกเผาไหม้จะเกิดแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ออกมากับไอเสียจากเครื่องยนต์และส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไบโอดีเซลเป็นเชื้อเพลิงที่มีปริมาณกำมะถันต่ำ เนื่องจากพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบมีองค์ประกอบของกำมะถันต่ำกว่า 15 ส่วนในล้านส่วน
6. กากถ่าน (ร้อยละ 10 ของกากที่เหลือจากการกลั่น)	ปริมาณกากถ่านสัมพันธ์กับปริมาณกลีเซอไรด์ กรดไขมันอิสระ ตัวเร่งปฏิกิริยา และสบู่ (เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส) ที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซล ถ้าปริมาณกากถ่านสูงกว่ามาตรฐานแสดงว่ามีสารข้างต้นเหลืออยู่ในไบโอดีเซล กากถ่านทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีดหรือลูกสูบและกำลังของเครื่องยนต์จะลดลง เครื่องยนต์สกปรก จึงต้องเปลี่ยนถ่ายน้ำมันเครื่องบ่อยขึ้น
7. เถ้าซัลเฟต	เกิดจากการเผาไหม้ของสารปนเปื้อนในไบโอดีเซล เช่น ตัวเร่งปฏิกิริยาและสบู่เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเบส เถ้าซัลเฟตทำให้เกิดการอุดตันในเครื่องยนต์
8. น้ำ	ปริมาณน้ำในไบโอดีเซลทำให้เกิดการเผาไหม้ไม่ดี และเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลติกระหว่างน้ำกับเอสเทอร์เป็นกรดไขมันอิสระซึ่งกัดกร่อนเครื่องยนต์ น้ำยังเป็นตัวเร่งให้เกิดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังเก็บน้ำมันซึ่งเป็นสาเหตุทำให้หัวฉีดอุดตัน

ตารางที่ 3.4 สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ (ต่อ) [15]

สมบัติ	ผลต่อเครื่องยนต์
9. สิ่งปนเปื้อนทั้งหมด	สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลส่วนใหญ่มาจากกระบวนการทรานส์เอสเทอริฟิเคชันและปฏิกิริยาข้างเคียง โดยทั่วไปจะถูกกำจัดออกในขั้นตอนการล้าง สิ่งปนเปื้อนในไบโอดีเซลจะลดความเสถียรระหว่างการเก็บรักษา
10. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง	แสดงการกัดกร่อนของน้ำมันต่อโลหะที่ใช้เป็นชิ้นส่วนในเครื่องยนต์ดีเซลเนื่องจากปริมาณกรด เช่น กรดไขมันอิสระ และสารประกอบซัลเฟอร์ในไบโอดีเซล
11. ค่าไอโอดีน	ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบมีค่าไอโอดีน 50-55 ค่าไอโอดีนแสดงถึงพันธะคู่ในน้ำมัน ซึ่งเป็นสมบัติเฉพาะของพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ ค่าไอโอดีนต่ำแสดงว่ามีสัดส่วนของกรดไขมันอิ่มตัวในโครงสร้างสูง ทำให้แนวโน้มของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันลดลง นอกจากนี้ยังมีความสัมพันธ์กับจุดขุ่นซึ่งคืออุณหภูมิที่น้ำมันเริ่มเกิดไขหรือจับตัวเป็นก้อนแข็ง ซึ่งมีผลต่อการใช้งานในสภาพอากาศเย็น ไบโอดีเซลที่มีค่าไอโอดีนต่ำจะมีอุณหภูมิจุดขุ่นสูง
12. กรดลินโนเลนิกเมทิลเอสเทอร์	แสดงถึงพันธะคู่หรือความไม่อิ่มตัวของไบโอดีเซลซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ กรดนี้ทำให้เกิดยางเหนียวอุดตันในเครื่องยนต์ และเกิดการเสื่อมสภาพของน้ำมันเครื่อง
13. ค่าความเป็นกรด	ความเป็นกรดในไบโอดีเซล มาจากปริมาณกรดไขมันอิสระในพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบและปริมาณกรดที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งมีผลต่อการกัดกร่อนในเครื่องยนต์ทำให้อายุการใช้งานของปั๊มและไส้กรองน้ำมันลดลง
14. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส	เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันขึ้นกับประเภทและสมบัติเฉพาะของพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบและกระบวนการผลิต โดยกระบวนการที่ให้ความร้อนแก่ไบโอดีเซลสูงเป็นระยะเวลานานอาจทำให้เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันต่ำกว่ามาตรฐาน (ปกติกำหนดให้มีค่าสูงกว่า 6 ชั่วโมง ที่ 110 องศาเซลเซียส)

ตารางที่ 3.4 สมบัติของไบโอดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ (ต่อ) [15]

สมบัติ	ผลต่อเครื่องยนต์
15. เมทานอล	เมทานอลเป็นสารตั้งต้นที่เหลือจากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล ซึ่งจำเป็นต้องกำจัดก่อนนำไปจำหน่าย ถ้ามีเมทานอลปนอยู่ในไบโอดีเซล จะทำให้จุดวาบไฟต่ำลง ซึ่งมีผลต่อความปลอดภัยในการเก็บรักษา การขนส่ง และการนำมาใช้ในเครื่องยนต์ ถ้ามีเมทานอลมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ค่าซีเทนและความสามารถในการหล่อลื่นลดลง
16. โมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์	แสดงความสมบูรณ์ของการเกิดปฏิกิริยาในการผลิตไบโอดีเซล ปริมาณโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ จะทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีด กระบอกสูบ และวาล์วภายในเครื่องยนต์
17. กลีเซอรีนอิสระ	ปริมาณกลีเซอรีนอิสระที่เหลืออยู่ในไบโอดีเซลเกิดจากการแยกกลีเซอรีนไม่สมบูรณ์ จะทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีดและระบบลำเลียงน้ำมัน
18. กลีเซอรีนทั้งหมด	กลีเซอรีนทั้งหมดคือปริมาณกลีเซอรีนอิสระและกลีเซอรีนในโมโนกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และไตรกลีเซอไรด์ที่อยู่ในไบโอดีเซลเป็นผลจากการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันที่ไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการอุดตันที่หัวฉีดและไส้กรอง และข้อจำกัดในการใช้งานในสภาพอากาศเย็น
19. โลหะกลุ่ม 1 (โซเดียมและโพแทสเซียม) โลหะกลุ่ม 2 (แคลเซียมและแมกนีเซียม)	เป็นการวัดสารปนเปื้อนในไบโอดีเซลจากน้ำที่ใช้ล้างไบโอดีเซลเช่น ปริมาณตัวเร่งปฏิกิริยาเบส สบู่ และโลหะหนักซึ่งอาจมีในพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ
20. ฟอสฟอรัส	เป็นสารที่อาจปนเปื้อนอยู่ในพืชน้ำมันที่ใช้เป็นวัตถุดิบ หากไม่กำจัดออก ไบโอดีเซลที่ได้จะทำความเสียหายให้กับอุปกรณ์ catalytic converter

3.3 น้ำมันดีเซลและเครื่องยนต์ดีเซล [50-51]

น้ำมันดีเซล คือ สารประกอบไฮโดรคาร์บอนในกลุ่มพาราฟิน เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการกลั่นน้ำมันดิบ มีสีน้ำตาลอ่อน มีการระเหยช้า มีจุดเดือดอยู่ในช่วง 150-360 องศาเซลเซียส สามารถจุดระเบิดได้ด้วยการอัด

3.3.1 ประเภทของน้ำมันดีเซล

1. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์หมุนช้า (Low speed diesel) หรือเรียกในชื่ออื่น เช่น Industrial Diesel Oil (IDO) หรือน้ำมันขี้โล้ ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบต่ำกว่า 300 รอบต่อนาที เช่น เครื่องยนต์ของเรือเดินสมุทร หรือเครื่องยนต์ที่ใช้ผลิตกระแสไฟฟ้า

2. น้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์หมุนเร็ว (High speed diesel) หรือเรียกในชื่ออื่นๆ เช่น Automotive diesel oil (ADO), Gas oil หรือน้ำมันโซล่า ใช้เป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดีเซลที่มีความเร็วรอบสูงกว่า 1,000 รอบต่อนาที เช่น เครื่องยนต์ของรถกระบะ รถบรรทุก และรถโดยสาร เป็นต้น

3.3.2 เครื่องยนต์ดีเซล

เครื่องยนต์ดีเซลเป็นเครื่องยนต์แรงอัดสูงและจุดระเบิดเอง (High compression and self ignition engine) การจุดระเบิดของเชื้อเพลิงเกิดจากความร้อนของแรงอัดของอากาศในกระบอกสูบโดยไม่ใช้หัวเทียน เครื่องยนต์ดีเซลมีหลายขนาดโดยมีความเร็วรอบเริ่มจาก 100-4,000 รอบต่อนาที ซึ่งเป็นเครื่องยนต์ที่พัฒนาแล้วอย่างสมบูรณ์สำหรับการขนส่ง การผลิตกำลังไฟฟ้าและอื่นๆ แบ่งได้ดังนี้

1. เครื่องยนต์ดีเซลชนิดความเร็วรอบต่ำ คือ น้อยกว่า 300 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานหนักต่อเนื่องโดยมีความเร็วรอบคงที่ เช่น การขับเคลื่อนเรือเดินทะเล การผลิตกำลังไฟฟ้า เป็นต้น

2. เครื่องยนต์ดีเซลชนิดความเร็วรอบปานกลาง คือ อยู่ระหว่าง 300-1,000 รอบต่อนาที ใช้สำหรับงานที่ความเร็วรอบค่อนข้างคงที่ เช่น สถานีผลิตไฟฟ้า และสถานีสูบน้ำ

3. เครื่องยนต์ดีเซลชนิดความเร็วรอบสูง คือ ความเร็วรอบตั้งแต่ 1,000 รอบต่อนาที ขึ้นไป ใช้สำหรับรถขนส่ง รถบรรทุก และรถไฟ

3.3.3 สมบัติที่สำคัญของน้ำมันดีเซล

1. ความหนืด เป็นค่าที่แสดงความต้านทานต่อการไหลของน้ำมัน น้ำมันที่มีความหนืดต่ำจะไหลเทได้ง่ายกว่าน้ำมันที่มีความหนืดสูง ความหนืดมีผลต่อระบบการฉีดน้ำมันและการหล่อลื่น ถ้าน้ำมันมีความหนืดสูงเกินไป การฉีดน้ำมันจะไม่กระจายเท่าที่ควร แต่หากน้ำมันมีความหนืดต่ำเกินไปก็ไม่เพียงพอต่อการหล่อลื่น

2. ค่าซีเทน (Cetane number) เป็นค่าที่แสดงความสามารถในการจุดระเบิดและการลุกติดไฟได้เร็วของน้ำมันดีเซล ซึ่งได้จากการทดสอบน้ำมันดีเซลตามมาตรฐาน ASTMD 613 ในเครื่องยนต์ที่ออกแบบมาโดยเฉพาะเพื่อประเมินความล่าช้าในการจุดระเบิด โดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิง

อ้างอิง 2 ชนิด คือนอร์มัลซีเทนซึ่งสามารถติดไฟได้ง่ายและถูกกำหนดให้มีค่าซีเทนเท่ากับ 100 และเฮปตะเมทิลโนเนนซึ่งติดไฟยากมีค่าซีเทนเท่ากับ 15 สามารถคำนวณค่าซีเทนได้จากสมการที่ 3.2

$$\text{ค่าซีเทน} = \text{เปอร์เซ็นต์นอร์มัลซีเทน} + 0.15\ (\%\ \text{เฮปตะเมทิลโนเนน}) \qquad (3.2)$$

น้ำมันดีเซลที่มีค่าซีเทนสูงจะมีช่วงเวลาความล่าช้าในการจุดระเบิดสั้น ปริมาณของเชื้อเพลิงในห้องเผาไหม้หลังจากเชื้อเพลิงเกิดการจุดระเบิดก่อนการลุกติดไฟจะน้อยลง ประสิทธิภาพของเครื่องยนต์ดีเซลที่มีค่าซีเทนสูงกว่าจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของความดันที่น้อยกว่า ทำให้สามารถควบคุมการเผาไหม้ได้ดีกว่า สามารถการต้านทานการน็อคของเครื่องยนต์ และยังลดการปล่อยสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และแก๊สไนโตรเจนออกไซด์

3. ค่าดัชนีซีเทน (Cetane index) เป็นค่าประมาณสำหรับค่าซีเทน เพราะการหาค่าซีเทนต้องใช้เครื่องยนต์ดีเซลชนิดพิเศษเพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการจุดระเบิดของน้ำมันดีเซลเทียบกับเชื้อเพลิงมาตรฐาน จึงต้องใช้ค่าใช้จ่ายสูงและใช้เวลาในการทดสอบนาน ดังนั้นจึงประมาณค่าซีเทนด้วยดัชนีซีเทนจากการคำนวณด้วยค่าความถ่วงจำเพาะเอพีไอ และอุณหภูมิของการกลั่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร จากสมการที่ 3.3

$$\begin{aligned} CCI = {} & 97.833\ (\log T) + 2.2088\ (G)(\log T) + 0.01247\ (G)^2 + 423.51\ (\log T) \\ & - 4.7808\ (G) + 119.59 \end{aligned} \qquad (3.3)$$

CCI คือ ค่าคำนวณดัชนีซีเทน

G คือ ความถ่วงจำเพาะเอพีไอ

T คือ อุณหภูมิของการกลั่นที่ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ที่ความดันบรรยากาศ หาได้ตามมาตรฐาน ASTM D86 หรือ D158

4. จุดวาบไฟ (Flash point) เป็นอุณหภูมิที่ผิวหน้าของน้ำมันเชื้อเพลิงที่ได้รับความร้อนและมีส่วนผสมระหว่างไอน้ำมันและอากาศที่เหมาะสมที่ทำให้น้ำมันเชื้อเพลิงสามารถติดไฟได้เมื่อมีประกายไฟและดับลง ดังนั้นในกรณีน้ำมันดีเซลที่มีจุดวาบไฟต่ำจะต้องระวังอันตรายจากอัคคีภัยระหว่างการขนส่งและการเก็บเชื้อเพลิง การใช้น้ำมันที่มีจุดวาบไฟต่ำยังสิ้นเปลืองเนื่องจากเกิดการระเหยของน้ำมันไปเกาะอยู่ตามผนังกระบอกสูบ

5. อุณหภูมิของการกลั่น แสดงความสามารถในการระเหยของน้ำมันเชื้อเพลิงซึ่งมีผลต่อเครื่องยนต์ ดังนี้

5.1 อุณหภูมิที่สามารถกลั่นน้ำมันออกมาได้ 10 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร แสดงความยากง่ายในการติดของเครื่องยนต์ ถ้าน้ำมันเชื้อเพลิงมีค่าอุณหภูมินี้สูงเครื่องยนต์จะยิ่งติดยาก

5.2 อุณหภูมิที่สามารถกลั่นน้ำมันออกมาได้ 50 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร เป็นอุณหภูมิที่แสดงความเร็วในการอุ่นเครื่องยนต์และการกระจายไอน้ำมันไปยังกระบอกสูบต่างๆ อย่าง

สม่ำเสมอ สามารถปรับส่วนผสมของน้ำมันเชื้อเพลิงกับอากาศได้ถูกต้องตลอดเวลาจึงสามารถเร่งเครื่องยนต์ได้ดี และเครื่องยนต์มีกำลังสูง

5.3 อุณหภูมิที่สามารถกลั่นน้ำมันออกมาได้ 90 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ต้องมีการกำหนดค่าสูงสุดไว้เพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งานให้ได้พลังงานสูงสุดและประหยัดเชื้อเพลิง

5.4 อุณหภูมิที่จุดสิ้นสุดและส่วนที่เหลือจากการกลั่น การกำหนดค่าสูงสุดไว้เพื่อป้องกันไม่ให้น้ำมันที่ไม่เผาไหม้ผสมกับน้ำมันเครื่องมากเกินไป

6. ปริมาณกำมะถัน กำมะถันในน้ำมันดีเซลที่อยู่ในรูปต่างๆ เช่น เมอร์แคปแทน ซัลไฟด์ และไดซัลไฟด์ เมื่อผ่านห้องเผาไหม้แล้วจะเปลี่ยนเป็นแก๊สซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ซึ่งถ้าทำปฏิกิริยากับน้ำหรือความชื้นจะกลายเป็นกรดกำมะถันกัดกร่อนชิ้นส่วนต่างๆ ในเครื่องยนต์

ตัวอย่างความสัมพันธ์ของสมบัติต่างๆ ของน้ำมันดีเซลและผลต่อการใช้งานกับเครื่องยนต์แสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 สมบัติของน้ำมันดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ [50]

สมบัติ	ผลต่อเครื่องยนต์
1. ความหนืด	เครื่องยนต์ความเร็วรอบต่ำสามารถใช้น้ำมันที่มีความหนืดสูงกว่าเครื่องยนต์ความเร็วรอบสูง
2. จุดไหลเท (Pour point)	มาตรฐานของจุดไหลเทของน้ำมันดีเซลมีผลต่อการใช้งานที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิที่กำหนด เพราะน้ำมันดีเซลจะแข็งตัวและมีผลต่อการทำงานของเครื่องยนต์
3. ดัชนีซีเทน	ดัชนีซีเทนเป็นค่าที่แสดงความสามารถในการจุดระเบิดและการลุกติดไฟ ซึ่งมีผลต่อการติดเครื่องยนต์ การเผาไหม้ และปริมาณมลพิษในไอเสีย น้ำมันดีเซลที่มีค่าดัชนีซีเทนสูงจะทำให้เครื่องยนต์ทำงานอย่างมีประสิทธิภาพดีขึ้น
4. จุดวาบไฟ	จุดวาบไฟมีความสัมพันธ์กับการระเหยและการติดไฟของน้ำมัน ถ้าจุดวาบไฟของน้ำมันดีเซลสูงกว่าค่ามาตรฐานจะมีความปลอดภัยในระหว่างการเก็บสำรองและการขนส่ง
5. อุณหภูมิของการกลั่น	ถ้าค่าอุณหภูมิของการกลั่นสูงเกินไปจะทำให้น้ำมันดีเซลมีจุดเดือดสูงเกินไป ทำให้เกิดควัน มีกลิ่นเหม็น และเกิดความสกปรกต่อเครื่องยนต์
6. ค่าความร้อน (Heating value)	ค่าความร้อนมีผลต่อกำลังของเครื่องยนต์

ตารางที่ 3.5 สมบัติของน้ำมันดีเซลที่มีผลต่อเครื่องยนต์ (ต่อ) [50]

สมบัติ	ผลต่อเครื่องยนต์

7. ปริมาณกำมะถัน (Sulfur content)	กำมะถันทำให้เกิดการกัดกร่อนเครื่องยนต์และทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศหลังการเผาไหม้
8. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (Copper strip corrosion)	ถ้าน้ำมันดีเซลมีค่ากัดกร่อนแผ่นทองแดงมากกว่าค่ามาตรฐานแสดงว่าจะกัดกร่อนชิ้นส่วนโลหะในเครื่องยนต์มากขึ้น
9. ปริมาณน้ำและกากตะกอน (Water and sediment)	น้ำและกากตะกอนที่มากกว่าค่ามาตรฐานจะทำให้อายุการใช้งานของไส้กรองและหัวฉีดสั้น
10. ปริมาณกากถ่าน (Carbon residue)	ปริมาณกากถ่านที่เหลือหลังจากการเผาไหม้ทำให้เครื่องยนต์สกปรก
11. ปริมาณเถ้า (Ash)	เถ้าเป็นสารอนินทรีย์ที่เหลืออยู่หลังจากการเผาไหม้ซึ่งเกาะผนังเครื่องยนต์ทำให้เครื่องยนต์สกปรก

ตารางที่ 3.6 ลักษณะเฉพาะของน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า [51]

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ
		หมุนเร็ว		หมุนช้า	
		ธรรมดา	บี 5		
1. ความถ่วงจำเพาะ ที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	0.81 0.87	0.81 0.87	- 0.92	ASTM D 1298
2. ดัชนีซีเทนหรือจำนวนซีเทน	ไม่ต่ำกว่า	47	47	45	ASTM D 613
3. ความหนืด (เซนติสโตกส์)					ASTM D 445
ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	1.8 4.1	1.8 4.1	- 8.0	
ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส	ไม่ต่ำกว่า ไม่สูงกว่า	- -	- -	- 6.0	
4. จุดไหลเท (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	10	10	16	ASTM D 97
5. ปริมาณกำมะถัน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					ASTM D 4294
ก่อนวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555	ไม่สูงกว่า	0.035	0.035	1.5	
ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป	ไม่สูงกว่า	0.005	0.005	1.5	

ตารางที่ 3.6 ลักษณะเฉพาะของน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า (ต่อ) [51]

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล	วิธีทดสอบ

		หมุนเร็ว		หมุนช้า	
		ธรรมดา	บี 5		
6. การกัดกร่อนแผ่นทองแดง (หมายเลข)	ไม่สูงกว่า	1	1	-	ASTM D 130
7. เสถียรภาพต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (กรัมต่อลูกบาศก์เมตร)	ไม่สูงกว่า	-	25	-	ASTM D 2274
8. ปริมาณกากถ่าน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	-	ASTM D 189
9. ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	ไม่สูงกว่า	0.01	0.01	0.02	ASTM D 482
10. ปริมาณน้ำและกากตะกอน (ร้อยละโดยปริมาตร)	ไม่สูงกว่า	0.05	0.05	0.3	ASTM D 2709
11. จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ไม่ต่ำกว่า	52	52	52	ASTM D 93
12. การกลั่น อุณหภูมิของส่วนที่กลั่นได้โดยปริมาตร ในอัตราร้อยละ 90 (องศาเซลเซียส)	ไม่สูงกว่า	357	357	-	ASTM D 86
13. พอลิไซคลิก แอโรแมติก ไฮโดรคาร์บอน (ร้อยละโดยน้ำหนัก)					ASTM D 2425
ก่อนวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555	-	-	-	-	
ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2555 เป็นต้นไป	ไม่สูงกว่า	11	11	-	
14. สี	ไม่ต่ำกว่า	-	4.5		ASTM D 1500
	ไม่สูงกว่า	4.0	4.7		
15. ไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน (ร้อยละโดยปริมาตร)	ไม่ต่ำกว่า	1.5	4	-	EN 14078
	ไม่สูงกว่า	2	5	-	

ตารางที่ 3.6 ลักษณะเฉพาะของน้ำมันดีเซลสำหรับเครื่องยนต์ดีเซลหมุนเร็วและหมุนช้า (ต่อ) [51]

ข้อกำหนด	อัตราสูงต่ำ	น้ำมันดีเซล			วิธีทดสอบ

		หมุนเร็ว		หมุนช้า	
		ธรรมดา	บี 5		
16. สมบัติการหล่อลื่น ทดสอบโดยเครื่องเอชเอฟอาร์อาร์ (ไมโครเมตร)	ไม่สูงกว่า	460	460	-	CEC F-06-A-96
17. สารเติมแต่ง (ถ้ามี)	-	-	-	-	-

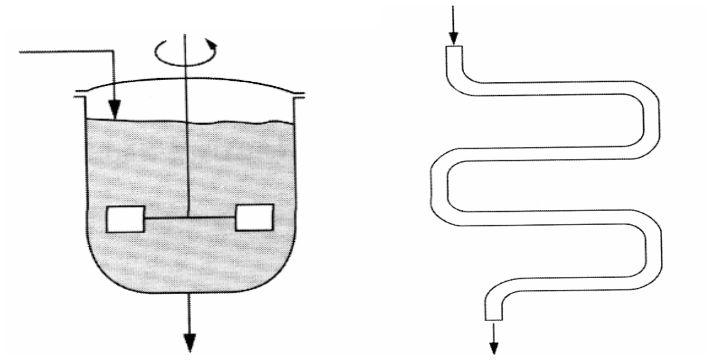
ที่มา ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน (www.doeb.go.th)
เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ 2) พ.ศ. 2550

3.4 เครื่องปฏิกรณ์ [40, 52-53]

ประเภทของเครื่องปฏิกรณ์ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1. เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ (Batch reactor) สารตั้งต้นทั้งหมดถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์และระหว่างการทำปฏิกิริยาจะไม่มีการป้อนสารเข้าและนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ จนเมื่อทำปฏิกิริยาตามเวลาที่กำหนดแล้ว ผลิตภัณฑ์และสารตั้งต้นที่เหลือจะถูกนำออกจากเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะเป็นแบบถังกวนซึ่งเหมาะกับปฏิกิริยาที่ต้องใช้ระยะเวลานานและระบบการผลิตขนาดเล็ก ข้อดีที่สำคัญของเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ คือ สามารถเพิ่มค่าการแปลงผันของสารตั้งต้นได้ด้วยการปล่อยให้สารตั้งต้นทำปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์นานขึ้น

2. เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่อง (Continuous reactor) สารตั้งต้นถูกป้อนเข้าเครื่องปฏิกรณ์และผลิตภัณฑ์ที่ได้ไหลออกที่ทางออกอย่างต่อเนื่อง เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องมีทั้งแบบถังกวนและแบบท่อ ดังรูปที่ 3.2



เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบถังกวน เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

รูปที่ 3.2 เครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องแบบถังกวนและแบบท่อ [52]

2.1 เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบถังกวน (Continuous stirred tank reactor: CSTR)

ภายในเครื่องปฏิกรณ์จะมีแผ่นกั้นและมีเครื่องปั่นกวนเพื่อผสมสารให้เป็นเนื้อเดียวกัน ความเข้มข้นของสารในเครื่องปฏิกรณ์มีค่าเท่ากัน อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารตั้งต้น ถ้าความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่ำจะทำให้เกิดปฏิกิริยาช้า แม้ว่าจะกำหนดค่าการแปลงผันสูง

2.2 เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ (Tubular reactor)

อาจเป็นแบบท่อเปล่าหรือท่อที่บรรจุสารที่ถ่ายเทความร้อนจากด้านนอกของท่อเพื่อช่วยเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารตั้งต้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องตามความยาวของท่อในแนวแกนไหล ส่วนความเข้มข้นของสารตั้งต้นตามแนวรัศมีของท่อสมมติให้คงที่ ค่าร้อยละการแปลงผันของสารตั้งต้นขึ้นกับความยาวของเครื่องปฏิกรณ์ โดยทั่วไปเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อมีขนาดเล็กกว่าเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบถังกวน

สมมติฐานในการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อในอุดมคติ คือ

- การไหลภายในเครื่องปฏิกรณ์เป็นแบบปั่นป่วน
- ไม่มีการกวนผสมในแนวรัศมี
- ไม่มีการเปลี่ยนแปลงสมบัติของของไหลในแนวรัศมี

สมการออกแบบรูปทั่วไปสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ [53] คือ

$$F_{A0}\frac{dX}{dV} = -r_A \tag{3.4}$$

$$V = F_{AO}\int_0^X \frac{dX}{-r_A} = C_{AO}v_0\int_0^X \frac{dX}{-r_A} \tag{3.5}$$

$$\tau = \frac{V}{v_o} = C_{A0}\int_0^X \frac{dX}{-r_A} \tag{3.6}$$

เมื่อ F_{A0} = อัตราการไหลเชิงโมลของสารที่ทางเข้า

X = ค่าการแปลงผันทางเคมี

V = ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

r_A = อัตราการเกิดปฏิกิริยา

C_{A0} = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้น A

v_o = อัตราการไหลเชิงปริมาตร

τ = เวลาที่สารตั้งต้นใช้ในการเคลื่อนที่จากทางเข้าไปยังทางออกของเครื่องปฏิกรณ์ (Space time)

3.5 การเหวี่ยงแยก (Centrifugation) [54]

การเหวี่ยงแยก คือ กระบวนการแยกสารผสมที่มีวัฏภาคต่างกันออกจากกันด้วยแรงเหวี่ยงแบบหนีศูนย์กลาง สารผสมอาจอยู่ในสภาพสารแขวนลอยหรือของเหลวสองชนิดที่แยกชั้นกัน

เนื่องจากการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลกเป็นกระบวนการที่ช้า ดังนั้นเพื่อเร่งให้การตกตะกอนเกิดได้เร็วขึ้น จึงต้องช่วยด้วยแรงเหวี่ยง ซึ่งอาจออกแบบแรงเหวี่ยงให้มีค่าเป็น 10^3-10^4 ของแรงโน้มถ่วงของโลก การเหวี่ยงแยกจึงเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาน้อยกว่าการตกตะกอนภายใต้แรงโน้มถ่วงของโลก เครื่องเหวี่ยงแยกถูกนำมาใช้ในการแยกของแข็งออกจากของเหลว หรือสารที่มีความถ่วงจำเพาะที่ต่างกัน หรือของผสมที่แยกออกจากกันได้ค่อนข้างยาก เครื่องเหวี่ยงแยกที่มีสมรรถนะสูงอาจให้แรงเหวี่ยงสูงถึง 3,000-6,200 เท่าของแรงโน้มถ่วงของโลก โดยทั่วไปจะให้อัตราการไหลในช่วง 1-1,000 แกลลอนต่อนาที และสามารถแยกอนุภาคที่มีขนาดเล็กมากถึง 0.06 ไมโครเมตรได้ เครื่องเหวี่ยงแยกสามารถนำไปใช้ได้ดีกับงานหลายด้าน เช่น งานทางด้านเคมี อาหาร เภสัชกรรม ชีวมวล และอาหารสัตว์ เป็นต้น

3.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Darnoko D. และคณะ [55] ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ โดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าอัตราเร็วของปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะจะสูงขึ้นจนถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิพบว่าไม่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา การเปลี่ยนไปของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์เกิดขึ้นใน 30 นาทีแรกของปฏิกิริยา ค่าคงที่ของอัตราเร็วปฏิกิริยาของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์ อยู่ระหว่าง 0.018-0.191 (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก·นาที $)^{-1}$ และมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ค่าพลังงานก่อกัมมันต์ของปฏิกิริยา (Activation energy) ของไตรกลีเซอไรด์ ไดกลีเซอไรด์ และโมโนกลีเซอไรด์เท่ากับ 14.7, 14.2 และ 6.4 กิโลแคลอรีต่อโมล ตามลำดับ

Leevijit T. และคณะ [56] ศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบถังกวน 6 ตัวที่ต่อกันแบบอนุกรมในการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็น 6 ต่อ 1 และอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ความเข้มข้นที่ศึกษาเท่ากับ 0.25-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ เวลาในการทำปฏิกิริยา 3-12 นาที ความเร็วรอบในการปั่นกวน 0-800 รอบต่อนาที พบว่าอัตราการเกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วรอบในการปั่นกวนจนถึงระดับที่เหมาะสม แต่ความเร็วรอบที่สูงเกินไปจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาลดลง และพบว่าที่ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ได้เมทิลเอสเทอร์ 97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ ที่เวลา 12 นาที และมีกำลังการผลิต 17.3 ลิตรต่อชั่วโมง

ศัลยเวศ เกตุแก้ว [57] ศึกษาการผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 5/8 นิ้ว ความยาว 75 เมตร ที่บรรจุวัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวในการทำปฏิกิริยา และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันที่ใช้แล้วเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันพืชที่ใช้แล้วต่อเมทานอล อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น อุณหภูมิ และเวลาในการทำปฏิกิริยา พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็น 6 ต่อ 1 อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น 120 ลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาที่ 60 องศาเซลเซียส และ 7.5 นาที ได้ปริมาณไบโอดีเซลเท่ากับ 97.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันพืชที่ใช้แล้ว

อนวัช ดุรงค์ภินนท์ [58] ศึกษาการสังเคราะห์ไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์กับเมทานอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อซึ่งภายในบรรจุด้วยเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ และใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักต่อปริมาตรของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ตัวแปรที่ศึกษา ได้แก่ อัตราส่วนโดยโมลของน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ต่อเมทานอล อุณหภูมิ และค่าเรซิเดนซ์ไทม์ในการทำปฏิกิริยา พบว่าภาวะการทดลองที่ได้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดตามมาตรฐานน้ำมันดีเซล ASTM D975 และปริมาณไบโอดีเซลมากกว่า 95 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืชที่ใช้แล้วเป็น 6 ต่อ 1 อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 110 และ 130 องศาเซลเซียส ค่าเรซิเดนซ์ไทม์ในการทำปฏิกิริยา 15 นาที ได้ผลิตภัณฑ์มีความหนืด 3.3 และ 3.1 เซนติสโตกส์ และปริมาณไบโอดีเซล 95 และ 98 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ ตามลำดับ

ธนาทิพย์ อัศวผดุงสิทธิ์ [59] สังเคราะห์เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดในปาล์มกับเอทานอลด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะโดยใช้โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา พบว่าที่อัตราส่วนโดยโมลของเอทานอลต่อน้ำมันเมล็ดในปาล์ม 15:1 ปริมาณโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 3 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ทำปฏิกิริยาเท่ากับ 80 องศาเซลเซียส และ 3 นาที ได้เอทิลเอสเทอร์ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดในปาล์ม แต่การแยกเอทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลใช้เวลานาน จึงใช้เวลาในการผลิตต่อครั้งนาน

Saka S. และคณะ [60] ศึกษาและออกแบบอุปกรณ์ผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดเรพโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชนิด OFM (Oscillatory flow mixing) ซึ่งสั่นสารตั้งต้นในช่องว่างภายในท่อด้วยความถี่ระหว่าง 0.5-1.5 เฮิร์ต และแอมพลิจูดระหว่าง 1-100 มิลลิเมตร อุณหภูมิที่ใช้ทำปฏิกิริยา 50-60 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 15-60 นาที ที่ความดันบรรยากาศ ให้ความร้อนด้วยการใช้น้ำร้อนไหลเวียนรอบนอกเครื่องปฏิกรณ์ และเมื่อนำเครื่องปฏิกรณ์ OFM ไปประกอบกับเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อจะสามารถเพิ่มปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ และได้ค่าการแปลงผันเท่ากับ 95-98 เปอร์เซ็นต์

สุกัญญา มากมี [61] ศึกษาภาวะที่เหมาะสมสำหรับผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มกับเมทานอลที่ภาวะเหนือวิกฤตด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบ plug flow โดยทดลองที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 6:1 ถึง 42:1 อุณหภูมิ 270, 300 และ 350 องศาเซลเซียส ความดัน 19 เมกะพาสคัล และศึกษาจลนพลศาสตร์ของปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพื่อหาค่าคงที่อัตรา พบว่าภาวะที่เหมาะสม คือ อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันพืช 24:1 อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา (Space time) 400 วินาที ในกรณีที่ใช้น้ำมันมะพร้าวเป็นสารตั้งต้นได้ร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ 90 และเมื่อใช้น้ำมันเมล็ดในปาล์มได้ 85 ปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันมะพร้าวและน้ำมันเมล็ดในปาล์มเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง ที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิและความเข้มข้นของไตรกลีเซอไรด์ในน้ำมันพืชที่ใช้ เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงตามข้อกำหนดของมาตรฐานไบโอดีเซลและน้ำมันดีเซลหมุนช้า

Berchmans H. J. และคณะ [62] ศึกษาการผลิตเมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันเมล็ดสบู่ดำที่มีกรดไขมันอิสระ 15 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ใช้กระบวนการผลิตแบบ 2 ขั้นตอน โดยขั้นตอนที่ 1 ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดสบู่ดำโดยใช้กรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดสบู่ดำเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และอุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดสบู่ดำเท่ากับ 0.6 สามารถลดปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันเมล็ดสบู่ดำเหลือน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ และความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมทานอลต่อน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ 24:1 ความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.4 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เวลาในการทำปฏิกิริยา 2 ชั่วโมง ความเร็วรอบในการปั่นกวน 400 รอบต่อนาที ได้เมทิลเอสเทอร์ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันเมล็ดสบู่ดำ

บทที่ 4

การทดลอง

4.1 สารเคมี

1. น้ำมันปาล์มดิบจากบริษัท ทักษิณปาล์ม (2521) จำกัด
2. เมทานอล (เกรดการค้า)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (เกรดการค้า)
4. กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 98 เปอร์เซ็นต์
5. น้ำกลั่น

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

6. เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ
7. เครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี
8. เครื่องเหวี่ยงแยกสาร
9. เครื่องวัดความหนืดแบบเซย์โบลต์
10. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้า
11. เครื่องปั่นกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า
12. เครื่องให้ความร้อน
13. เทอร์โมมิเตอร์
14. ขวดวัดปริมาตร
15. กระบอกตวง
16. บีกเกอร์
17. กรวยแยก
18. หลอดทดลอง
19. นาฬิกาจับเวลา

4.3 วิธีการทดลอง

4.3.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดไขมันและสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปาล์มดิบ

- ความหนาแน่น
- ความหนืด
- ปริมาณกรดไขมันอิสระ (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ก)

4.3.2 การกำจัดกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบ

ก่อนนำน้ำมันปาล์มดิบมาใช้กับตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ ต้องกำจัดน้ำและกรดไขมันอิสระ ปริมาณกรดไขมันอิสระต้องต่ำกว่าร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ เพื่อไม่ให้เกิดสบู่ขึ้นระหว่างปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันเพราะจะทำให้ผลได้ของเมทิลเอสเทอร์ลดลง โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. ให้ความร้อนแก่น้ำมันปาล์มดิบ 1 ลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องให้ความร้อนเป็นเวลา 1 ชั่วโมงเพื่อกำจัดน้ำออก แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง

2. ผสมสารละลายเมทานอล 20 เปอร์เซ็นต์ และกรดซัลฟิวริก 1 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์มดิบ

3. ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และปั่นกวนที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

4. เมื่อเกิดการแยกชั้นใช้กรวยแยก แยกส่วนที่อยู่ชั้นบน คือ เมทานอล กรดซัลฟิวริก และยางเหนียว ออกจากน้ำมันปาล์มดิบที่อยู่ส่วนชั้นล่าง

5. ล้างน้ำมันปาล์มดิบที่แยกได้ด้วยน้ำอุณหภูมิประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส และล้างซ้ำประมาณ 3-4 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำที่ล้างออกมามีค่าความเป็นกรด-เบส เป็นกลาง

6. น้ำมันปาล์มดิบที่แยกกรดไขมันอิสระออกแล้วนี้จะใช้เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันต่อไป

4.3.3 การสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

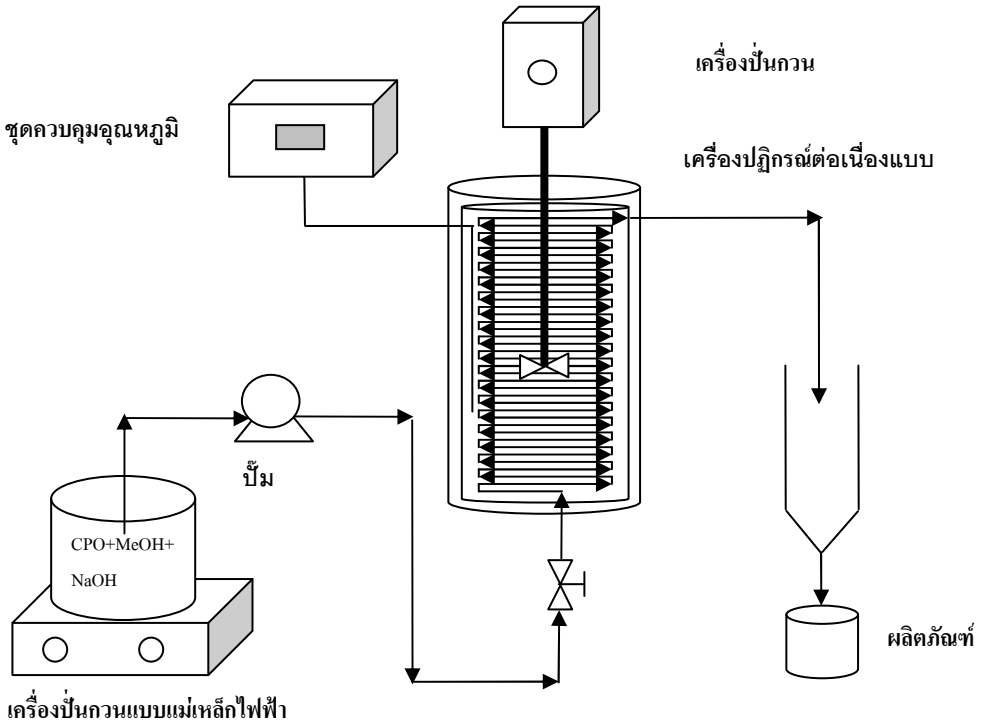
คำนวณความยาวท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.56 ซม. (OD 1/4 นิ้ว) ที่ใช้สร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อปริมาตร 0.59 ลิตร (5.9×10^{-4} $ม^3$) จากสูตร

$$V = \pi r^2 L$$

$$590 = 3.14 \times (0.28 \times 10^{-2})^2 \times L$$

$$L \sim 24 \text{ เมตร}$$

ขดท่อสแตนเลสเป็นวงกลมเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร ในถังอะลูมิเนียมหุ้มด้วยฉนวนกันความร้อน และให้ความร้อนด้วยขดลวดให้ความร้อนแบบจุ่มขนาด 1,500 วัตต์ ใช้น้ำมันเครื่องยนต์เป็นตัวกลางให้ความร้อนและควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมอุณหภูมิ ระบบของเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพแสดงเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

4.3.4 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

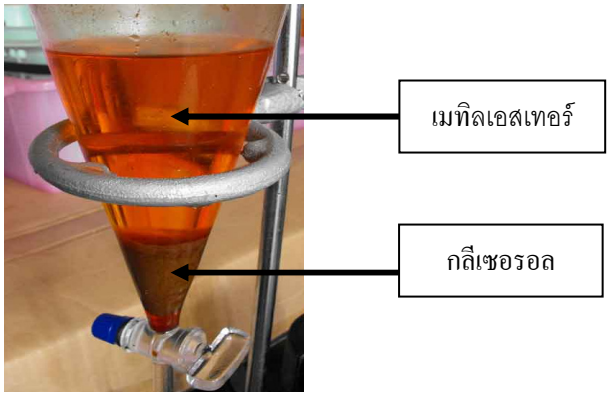
ใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะทดสอบค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ อุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันจากค่าที่ศึกษาจากงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา และทดลองต่อด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อที่มีปริมาตรเท่ากับเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ โดยใช้ค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ เพื่อหาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาในเทอมของอัตราการไหลรวมของสารตั้งต้นที่ได้เมทิลเอสเทอร์สูงสุด

การทดลองตอนที่ 1 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ: ศึกษาอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1. กำจัดน้ำออกจากน้ำมันปาล์มดิบ
2. จากค่าที่เหมาะสมที่สรุปจากงานวิจัยอื่น ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ (ละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 17.8 กรัม ในเมทานอล 500 มิลลิลิตร)

3. ควบคุมอุณหภูมิของน้ำมันปาล์มดิบที่กำจัดน้ำแล้วที่ 50 องศาเซลเซียส ผสมสารละลายตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ปริมาณ 50 มิลลิลิตร และปั่นกวนที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที

4. แยกกลีเซอรอลออกจากเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยกรวยแยกดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 การแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล

5. ล้างเมทิลเอสเทอร์ในกรวยแยก ด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วเขย่าเบาๆ ทิ้งให้แยกชั้น แยกน้ำที่ใช้ล้างออก แล้วล้างซ้ำด้วยน้ำอุ่นอีกอย่างน้อยประมาณ 3-4 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำที่ล้างออกมามีค่าความเป็นกรด–เบสเป็นกลาง

6. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการล้างแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง จากนั้นใช้ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี

7. ทำการทดลองซ้ำที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 และ 45 นาที

8. ทดลองทำปฏิกิริยาซ้ำที่อุณหภูมิ 60 และ 70 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 15, 30 และ 45 นาที (จุดเดือดของเมทานอล 64.6 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิที่ทำปฏิกิริยาสูงเมทานอลจะระเหยกลายเป็นไอและผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จะลดลง เพราะใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะระบบเปิด)

การทดลองตอนที่ 2 เครื่องปฏิกรณ์แบบกะ: ศึกษาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 1 โดยใช้อุณหภูมิและเวลาที่ได้ปริมาณเมทิลเอสเทอร์สูงสุดจากการทดลองตอนที่ 1 เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอลที่เหมาะสม จากความเข้มข้น 0.5, 1, 1.25 และ 1.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นต่างๆ ในเมทานอล 500 มิลลิลิตร

ปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ (กรัม)	**ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล 500 มิลลิลิตร (ร้อยละโดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ)**
8.90	0.50
17.80	1.00
22.25	1.25
26.70	1.50

การทดลองตอนที่ 3 เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ : ศึกษาอุณหภูมิและอัตราการไหลรวมของสารตั้งต้นที่ใช้ในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

1. ทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ ดังรูปที่ 4.3

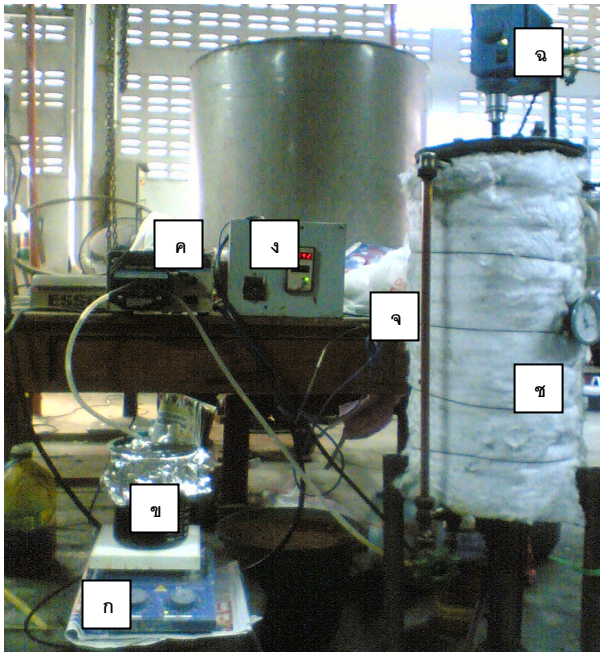
2. ใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์จากค่าที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบกะในตอนที่ 2 และเวลาในการทำปฏิกิริยา 10, 15 และ 30 นาที (τ : Space time = 10 นาที ดังนั้นจะทำการทดลองที่ τ, 1.5τ และ 3τ) ในเทอมของอัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น 20, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที ตามลำดับ (แสดงการคำนวณในภาคผนวก ข)

3. ควบคุมอุณหภูมิที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา 60, 70, 80, 90 และ 100 องศาเซลเซียส

4. รอจนระบบเข้าสู่ภาวะคงตัวประมาณ 5 นาที จึงเก็บผลิตภัณฑ์ประมาณ 250 มิลลิลิตร

5. แยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลด้วยกรวยแยก และล้างเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ด้วยน้ำอุ่นอุณหภูมิประมาณ 70-80 องศาเซลเซียส แล้วเขย่าเบาๆ ทิ้งให้แยกชั้น แยกเมทิลเอสเทอร์และล้างซ้ำด้วยน้ำอุ่นอีกอย่างน้อยประมาณ 3-4 ครั้ง หรือจนกระทั่งน้ำที่ล้างออกมามีค่าความเป็นกรด–เบสเป็นกลาง

6. นำเมทิลเอสเทอร์ที่ผ่านการล้างแล้วไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง บันทึกปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้ และใช้ปริมาณ 2 มิลลิลิตร ไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี



รูปที่ 4.3 ชุดอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง (ก) เครื่องปั่นกวนแบบแม่เหล็กไฟฟ้า (ข) น้ำมันปาล์มดิบ+เมทานอล+โซเดียมไฮดรอกไซด์ (ค) ปั๊ม (ง) ชุดควบคุมอุณหภูมิ (จ) เทอร์โมคัปเปิล (ฉ) เครื่องปั่นกวน (ช) เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

4.3.5 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก

1. หาเวลาและความเร็วรอบในการเหวี่ยงแยกที่เหมาะสมต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อในการทดลองตอนที่ 3 เวลาที่ศึกษา 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 นาที และความเร็วรอบในการเหวี่ยง 50, 150, 300 และ 450 รอบต่อนาที

2. คำนวณร้อยละโดยปริมาตรของเมทิลเอสเทอร์ กลีเซอรอล และน้ำของผลิตภัณฑ์ที่ได้

4.3.6 วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้

วิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้ (ขั้นตอนการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ค) ดังนี้

- ความหนืด ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 445
- ความถ่วงจำเพาะเอพีไอ (°API) ตามมาตรฐาน ASTM D 1298
- ความถ่วงจำเพาะ ที่อุณหภูมิ 15.6 องศาเซลเซียส ตามมาตรฐาน ASTM D 1298
- จุดวาบไฟ ตามมาตรฐาน ASTM D 93

บทที่ 5
ผลการทดลองและอภิปรายผล

5.1 องค์ประกอบของกรดไขมันและสมบัติเบื้องต้นของน้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 5.1 องค์ประกอบของกรดไขมันในน้ำมันปาล์มดิบ

องค์ประกอบของกรดไขมัน	PORIM* specification	งานวิจัยนี้ (% โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ)
กรดไขมันอิ่มตัว	45.3-55.4	49.06
Lauric	0-0.4	0.42
Myristic	0.6-1.6	1.26
Palmitic	41-47	42.78
Palmitoleic	0-0.6	0.34
Stearic	3.7-5.6	4.46
Arachidic	0-0.8	0.24
กรดไขมันไม่อิ่มตัว	44.8-57.3	50.94
Oleic	6.6-11.9	39.52
Linoleic	0-0.5	7.91
Linolenic	44.8-57.3	0.37

* Palm Oil Research Institute of Malaysia

จากตารางที่ 5.1 พบว่าน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้มีองค์ประกอบของกรดไขมันอิ่มตัวสูงซึ่งเป็นข้อดี สารเชื้อเพลิงที่ดีควรมีสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่อิ่มตัวเพื่อที่จะลดการเกิดยางเหนียวของคาร์บอนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้

ตารางที่ 5.2 สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบก่อนและหลังการกำจัดกรดไขมันอิสระ

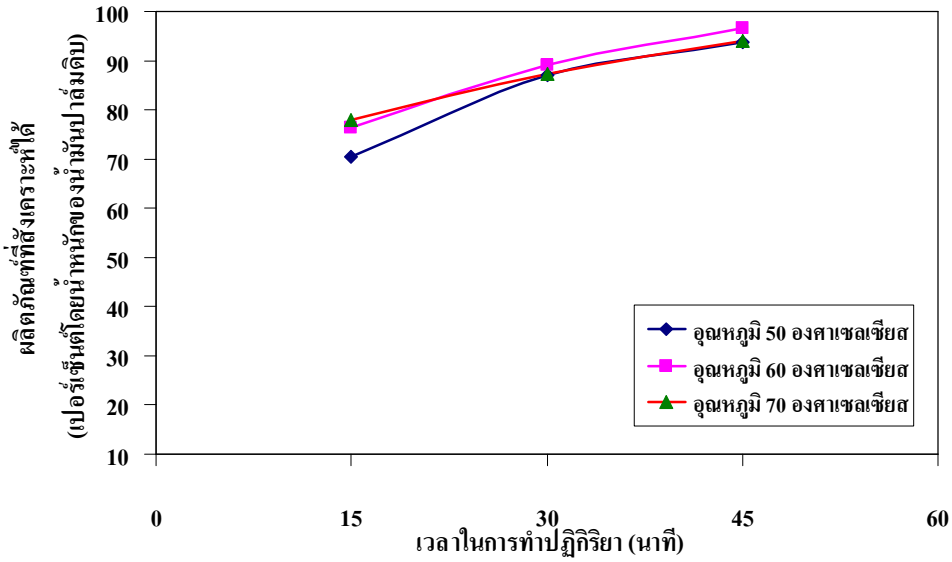
สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบ	ก่อนและหลังการกำจัดกรดไขมันอิสระ	
ค่าความหนาแน่น (กรัมต่อมิลลิลิตร)	0.89	0.63
ความหนืด ที่ 40 องศาเซลเซียส (เซนติสโตกส์)	36	17
ปริมาณกรดไขมันอิสระ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ)	1.56	0.38

หมายเหตุ น้ำมันปาล์มดิบที่รับจากโรงงานมีค่ากรดไขมันอิสระเริ่มต้น 0.2 % และเมื่อผ่านไป 6 เดือน มีค่าเพิ่มเป็น 1.56 %

จากตารางที่ 5.2 แม้ว่าปริมาณกรดไขมันอิสระของน้ำมันปาล์มดิบจะมีค่าไม่สูงมากนัก แต่ต้องกำจัดกรดไขมันอิสระออกก่อน ได้ทดลองนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นโดยไม่ได้กำจัดกรดไขมันอิสระออก พบว่าเกิดสบู่และไม่สามารถแยกเมทิลเอสเทอร์ได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ลดปริมาณกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบเหลือ 0.38 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ แล้วจึงนำไปทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชัน

5.2 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

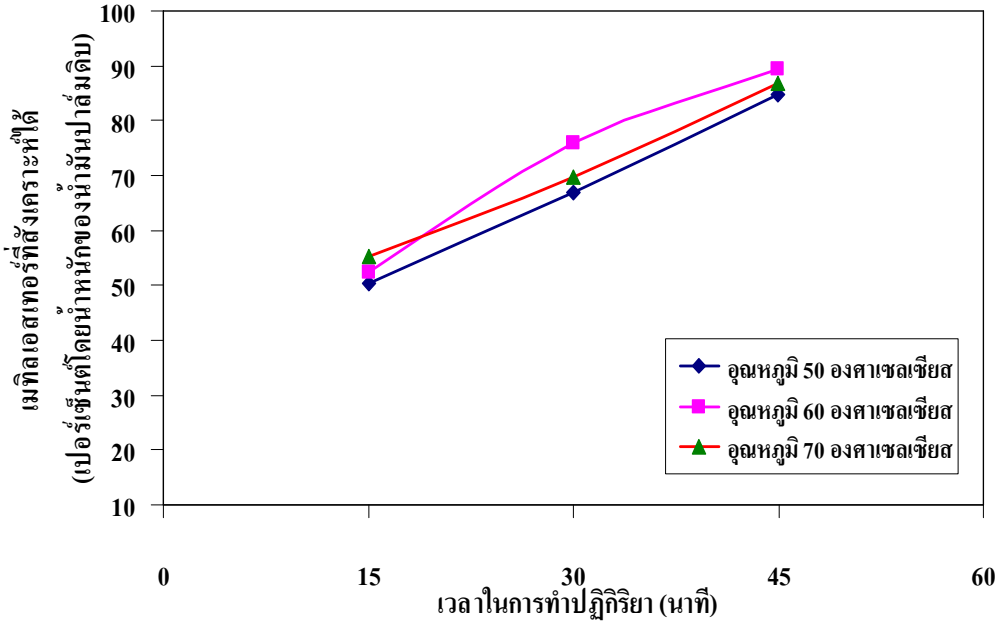
ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์และร้อยละของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์มดิบ ที่อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยาต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.1 และรูปที่ 5.2 ตามลำดับ



รูปที่ 5.1 ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ

จากรูปที่ 5.1 เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบจะลดลง น้ำมันปาล์มดิบและเมทานอลจึงผสมเป็นเนื้อเดียวดันได้มากขึ้น ดังนั้นอัตราการเกิดปฏิกิริยาจึงสูงขึ้น แต่ที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ซึ่งสูงกว่าจุดเดือดของเมทานอล ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะลดลง เพราะเมทานอลบางส่วนได้ระเหยกลายเป็นไอ และพบว่าที่เวลาในการทำ

ปฏิกิริยา 45 นาที และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์สูงสุดเท่ากับ 97 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ

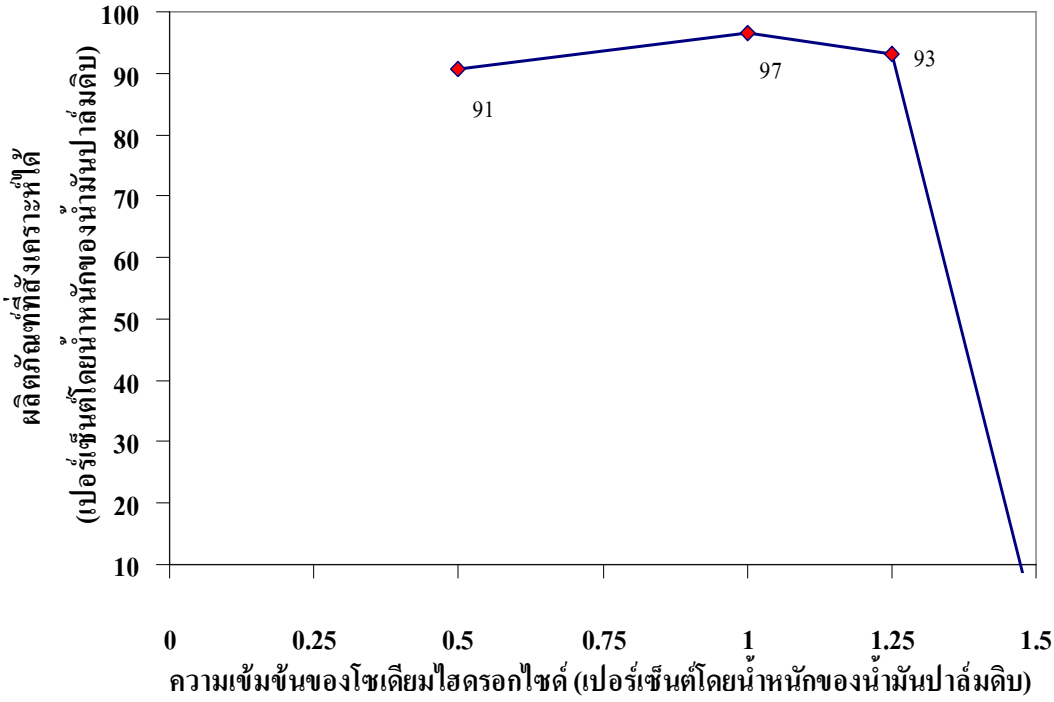


รูปที่ 5.2 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ

จากรูปที่ 5.2 พบว่าที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 45 นาที และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ได้เมทิลเอสเทอร์สูงสุดเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ และได้ใช้อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยานี้ในการหาค่าความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะซึ่งจะกล่าวต่อไป

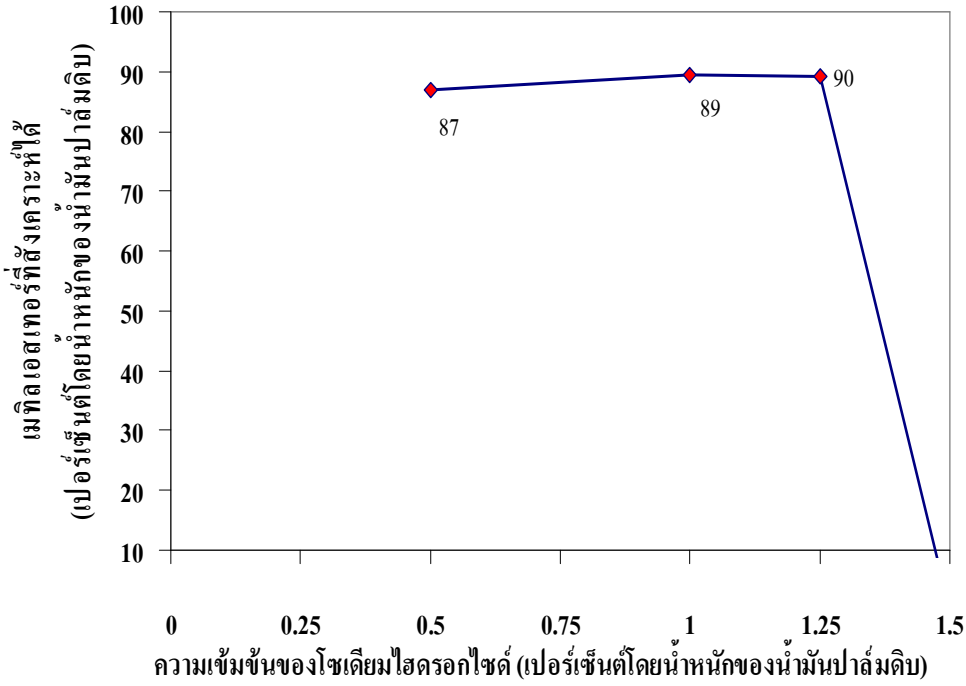
5.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แบบกะ

ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์และเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้คิดเป็นเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักเทียบกับน้ำมันปาล์มดิบ แสดงดังรูปที่ 5.3 และ 5.4 ตามลำดับ



รูปที่ 5.3 ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

จากรูปที่ 5.3 พบว่าร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ที่สังเคราะห์ได้เพิ่มขึ้นเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5-1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ และมีค่าสูงสุด 97 เปอร์เซ็นต์ ขั้นแรกโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันอิสระที่เหลืออยู่ในน้ำมันปาล์มดิบ จากนั้นจึงทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์ได้เมทิลเอสเทอร์ ถ้าใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะเหลือโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ทำปฏิกิริยากับไตรกลีเซอไรด์น้อย จึงได้ปริมาณผลิตภัณฑ์น้อย แต่เมื่อความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สูงกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะได้ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์ลดลงเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยาที่มากเกินไปจะทำให้เกิดเจลและสบู่จนไม่เกิดการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอลและไม่สามารถวิเคราะห์ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่เกิดขึ้นได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.5 เปอร์เซ็นต์



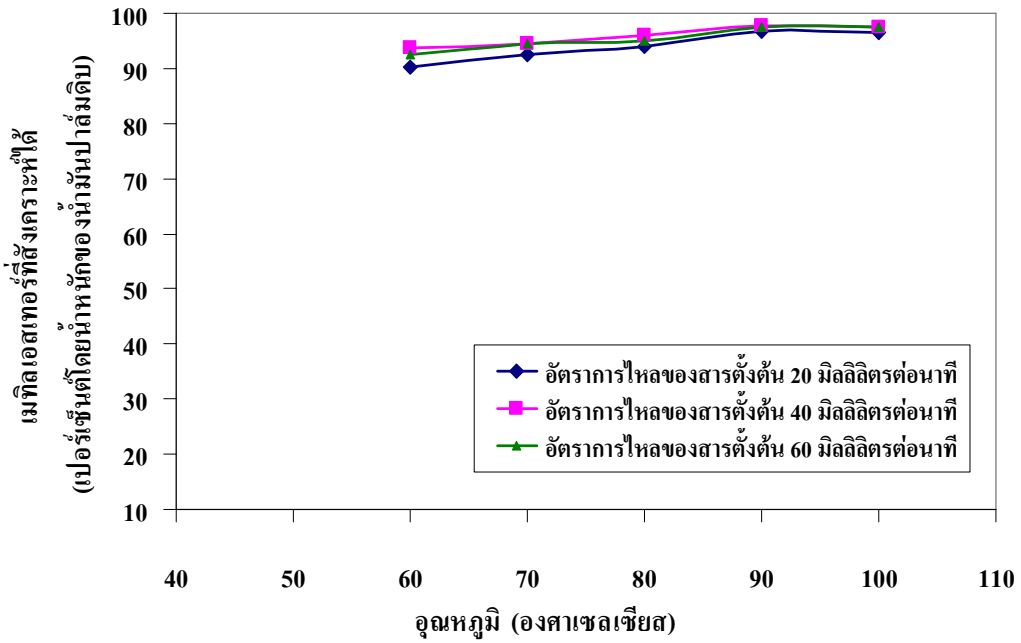
รูปที่ 5.4 ร้อยละโดยน้ำหนักของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ต่างๆ: อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที

จากรูปที่ 5.4 เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ที่ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ และได้ใช้ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เหมาะสมนี้ในการทดลองกับเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

5.4 ผลของอุณหภูมิและเวลาต่อปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ

รูปที่ 5.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเมทิลเอสเทอร์จากเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารตั้งต้น พบว่าปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่ได้สูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นเพราะความหนืดของน้ำมันปาล์มดิบจะลดลงและสามารถเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกับตัวเร่งปฏิกิริยาเมื่ออุณหภูมิสูง ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้ดีขึ้น ปฏิกิริยาจะเกิดเร็วในช่วง 5 นาทีแรกของการทำปฏิกิริยาหลังจากนั้นจะค่อนข้างคงที่ ส่วนอัตราการไหลของสารตั้งต้นแทบไม่มีผลต่อปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เนื่องจากการไหลของสารตั้งต้นเป็นแบบราบเรียบ (Re = 146, 292 และ 439 ที่อัตราการไหลของสารตั้งต้น 20, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที

ตามลำดับ) ปริมาณเมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีค่าสูงสุด 98 เปอร์เซ็นต์ ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารตั้งต้น 40 มิลลิลิตรต่อนาที หรือ 1.5τ (15 นาที)



รูปที่ 5.5 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อกับอุณหภูมิและอัตราการไหลของสารตั้งต้นที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ

จากการเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์แบบกะและเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ พบว่าปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จากเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อจะสูงกว่าและมีคุณภาพสม่ำเสมอที่ภาวะปฏิบัติการเดียวกัน เช่น อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส และเวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที สำหรับเครื่องปฏิกรณ์แบบต่อเนื่องจะได้เมทิลเอสเทอร์ 94 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ส่วนเครื่องปฏิกรณ์แบบกะได้เมทิลเอสเทอร์เพียง 53 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ซึ่งสอดคล้องกับสมการการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์ ที่ค่าผลได้เท่ากันเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อจะใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาเร็วกว่าเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่มีปริมาตรเท่ากัน ตารางที่ 5.3 แสดงการเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่น

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น

	การทดลองแบบกะ			การทดลองแบบต่อเนื่อง					
	ธนาทิพย์ [57]	**ยรรยง และคณะ [61]**	**Leevijit และคณะ [55]**	**บุญชู และคณะ [62]**	**เบญจพร และคณะ [37]**	**ศัลยเวช [55]**	**ธันยวรรณ และคณะ [63]**	**อนวัช [56]**	**งานวิจัยนี้**
ลักษณะของเครื่องปฏิกรณ์		เครื่องปฏิกรณ์แบบสวนทาง 2 เครื่อง	เครื่องปฏิกรณ์แบบถังกวน 6 ตัว ต่อแบบอนุกรมกัน	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ (ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว ยาว 25 เมตร)	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ บรรจุเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่ (ท่อทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว ยาว 15 เมตร และท่อพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ยาว 75 เมตร)	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อบรรจุ (สายยางพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ยาว 75 เมตร บรรจุวัสดุบรรจุและขดสแตนเลสยาว 1, 5, 10 และ 15 เมตร)	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อบรรจุ (สายยางพลาสติกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว ยาว 75 เมตร บรรจุวัสดุบรรจุและขดสแตนเลสยาว 1 เมตร)	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อบรรจุเครื่องผสมไร้การเคลื่อนที่	เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1/4 นิ้ว ยาว 24 เมตร)
วัตถุดิบ	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (ตรามรกต)	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	น้ำมันปาล์มโอเลอินบริสุทธิ์	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (ตรามรกต)	น้ำมันพืชใช้แล้ว	น้ำมันพืชใช้แล้ว	น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์	น้ำมันปาล์มดิบ
แอลกอฮอล์	เอทานอล	เมทานอล	เมทานอล	เมทานอล	เมทานอล	เมทานอล	เมทานอล	เมทานอล	เมทานอล
ตัวเร่งปฏิกิริยา	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 1, **3**, 5 และ 7 % โดยน้ำหนักของน้ำมัน	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.3 % โดยปริมาตรของน้ำมัน	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 % โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์ม	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 % โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มโอเลอิน	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.1, 0.3, 0.5 และ **0.7** % โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 % โดยน้ำหนักของน้ำมัน	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.5 % โดยน้ำหนักน้ำมัน	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 % โดยปริมาตรของน้ำมันปาล์ม	โซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 % โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ

ตารางที่ 5.3 เปรียบเทียบผลกับงานวิจัยอื่น (ต่อ)

	การทดลองแบบกะ		**การทดลองแบบต่อเนื่อง**						
	ธนาทิพย์ [57]	**ยรรยง และคณะ [61]**	**Leevijit และคณะ [55]**	**บุญชู และคณะ [62]**	**เบญจพร และคณะ [37]**	**ศัลยเวช [55]**	**ธันยวรรณ และคณะ [63]**	**อนวัช [56]**	**งานวิจัยนี้**
อัตราส่วนโดยโมลแอลกอฮอล์ต่อน้ำมัน	6:1, 9:1, 12:1 และ **15:1**	3:1, 4.5:1 และ **6:1**	6:1	1:5 โดยปริมาตร	6:1	4.5:1 และ **6:1**	6: 1	4.5:1 และ **6:1**	6: 1
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	30, 50 และ **80**	30, **45** และ 60	60	60, 70 และ **80**	35, 40, 45 และ **50**	50 และ **60**	50	90, 110 และ **130**	60, 70, 80, **90** และ 100
ความดัน	-	-	-	-		-	-	8 บาร์	-
เวลา (นาที)	60	120	6	-	15, 30 และ **45**	7.5	10, 20 และ **30**	7-42 **15 นาที**	15
อัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น	-	-	-	**20**, 40 และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที	-	30, 60 และ **120** ลิตรต่อชั่วโมง	30 ลิตรต่อชั่วโมง	17-98 **50 มิลลิลิตรต่อนาที**	20, **40** และ 60 มิลลิลิตรต่อนาที
ปริมาณผลได้ (%)	94	-	98	97	-	97	62	98	98
ความหนืด ที่ 40°ซ (เซนติสโตกส์)	3.6	4.36	-	4.88	ต่ำกว่า 8	-	-	3.1	3.5

5.5 การแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก

ความเร็วรอบของเครื่องเหวี่ยงแยกและเวลาที่สามารถแยกเมทิลเอสเทอร์จากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของสารตั้งต้น 40 มิลลิลิตรต่อนาที แสดงดังตารางที่ 5.4

ตารางที่ 5.4 ความเร็วรอบและเวลาในการเหวี่ยงที่สามารถแยกเมทิลเอสเทอร์

ความเร็วรอบ (รอบต่อนาที)	**เวลา (นาที)**					
	5	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**
50	X	X	X	X	X	X
150	X	X	√	√	√	√
300	√	√	√	√	√	√
450	√	√	√	√	√√	√√

หมายเหตุ X ไม่แยก √ แยก √√ แยกสมบูรณ์

จากตารางพบว่าความเร็วรอบของเครื่องเหวี่ยงแยก 50 รอบต่อนาที ต่ำเกินไปที่จะแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลได้เพราะไม่เกิดการแยกชั้น แต่เมื่อเพิ่มความเร็วรอบและเวลา จะเริ่มเกิดการแยกชั้นระหว่างเมทิลเอสเทอร์และกลีเซอรอล การแยกชั้นเกิดได้สมบูรณ์ที่ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที และเวลาในการเหวี่ยงแยก 25 และ 30 นาที

ตารางที่ 5.5 ร้อยละโดยปริมาตรของเมทิลเอสเทอร์ กลีเซอรอล น้ำ และอื่นๆ ที่ได้จากภาวะการทดลองต่างๆ เมื่อนำมาเหวี่ยงแยกที่ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที เวลา 25 นาที

อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	**อัตราการไหล (มิลลิลิตรต่อนาที)**	**(ร้อยละโดยปริมาตร)**		
		เมทิลเอสเทอร์	**กลีเซอรอล**	**น้ำและอื่นๆ**
90	20	92.7	5.3	2
	40	97	1.8	1.2
	60	94.5	4	1.5

จากตารางที่ 5.5 พบว่าเมื่อเหวี่ยงผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสและอัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น 40 มิลลิลิตรต่อนาที ด้วยความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที ที่เวลา 25 นาที จะได้เมทิลเอสเทอร์ 97 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร

5.6 สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้

ตารางที่ 5.6 สมบัติทางเชื้อเพลิงของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้เทียบกับมาตรฐานน้ำมันดีเซลหมุนช้า ดีเซลหมุนเร็ว และไบโอดีเซลตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน

สมบัติทางเชื้อเพลิง	วิธีทดสอบ	ดีเซลหมุนช้า	ดีเซลหมุนเร็ว	ไบโอดีเซล	เมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้
ความหนืดที่ 40 °ซ (เซนติสโตกส์)	ASTM D 445	8.0	1.8-4.1	3.5-5.0	3.5
ความถ่วงจำเพาะเอพีไอ (°API)	ASTM D 1298	-	-	-	38.9
ความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 °ซ	ASTM D 1298	0.92	0.81-0.87	-	0.83
จุดวาบไฟ (องศาเซลเซียส)	ASTM D 93	ไม่ต่ำกว่า 52	ไม่ต่ำกว่า 52	120	162

จากตารางที่ 5.6 พบว่าสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เป็นตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพตามประกาศของกรมธุรกิจพลังงาน

ความหนืดเป็นสมบัติทางเชื้อเพลิงที่สำคัญต่อการฉีดน้ำมันให้เป็นฝอย และการหล่อลื่นระบบเครื่องยนต์ ความหนืดของเมทิลเอสเทอร์ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส มีค่า 3.5 เซนติสโตกส์ อยู่ในช่วงมาตรฐานของไบโอดีเซล และใกล้เคียงกับความหนืดของน้ำมันดีเซลหมุนเร็ว

จุดวาบไฟของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้สูงกว่ามาตรฐานของน้ำมันดีเซลหมุนช้า ดีเซลหมุนเร็ว และไบโอดีเซล จึงมีความปลอดภัยในการใช้ การจัดเก็บ การเคลื่อนย้าย และการขนส่งกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม

บทที่ 6
สรุปผลการทดลอง

การใช้น้ำมันปาล์มดิบเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ไบโอดีเซลด้วยปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันมีข้อดีคือไม่ต้องผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์เหมือนน้ำมันเมล็ดในปาล์มและน้ำมันปาล์มสเตียริน และน้ำมันปาล์มดิบมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงจึงไม่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและ แต่ข้อจำกัดคือมีปริมาณกรดไขมันอิสระค่อนข้างสูงจึงต้องกำจัดกรดไขมันอิสระก่อนนำมาใช้

ตัวเร่งปฏิกิริยาเบสมีข้อดีคือสามารถเร่งปฏิกิริยาได้ที่อุณหภูมิและความดันต่ำ และเร่งได้เร็วกว่าตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดหรือเอนไซม์ แต่มีข้อจำกัดคือไม่เหมาะกับน้ำมันที่ได้จากพืชหรือไขมันจากสัตว์ที่มีปริมาณน้ำมากกว่า 0.06 และปริมาณกรดไขมันอิสระมากกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมัน

ในงานวิจัยนี้เมื่อใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบกะได้เมทิลเอสเทอร์ 90 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ที่อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบเท่ากับ 6 ต่อ 1 ด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ ที่อุณหภูมิและเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 องศาเซลเซียส และ 45 นาที และเมื่อสังเคราะห์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อที่มีปริมาตรเท่ากันจะได้เมทิลเอสเทอร์ 98 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 เปอร์เซ็นต์อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลรวมของสารตั้งต้น 40 มิลลิลิตรต่อนาที หรือ 1.5 เท่าของ space time ปริมาณผลได้ของเมทิลเอสเทอร์จากเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อจะสูงกว่าและมีคุณภาพสม่ำเสมอกว่าเมทิลเอสเทอร์จากเครื่องปฏิกรณ์แบบกะที่เวลาในการทำปฏิกิริยาเท่ากัน การใช้เครื่องเหวี่ยงแยกสามารถแยกเมทิลเอสเทอร์จากกลีเซอรอลได้สมบูรณ์ที่ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที เวลา 25 นาที ได้เมทิลเอสเทอร์ 97 กลีเซอรอล 1.8 น้ำ และสารอื่นๆ 1.2 เปอร์เซ็นต์โดยปริมาตร ตามลำดับ สำหรับสมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้เป็นตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพของกรมธุรกิจพลังงาน โดยมีความหนืดที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 3.5 เซนติสโตกส์ ความถ่วงจำเพาะเอพีไอ 38.9 ความถ่วงจำเพาะที่ 15.6 องศาเซลเซียส เท่ากับ 0.83 และจุดวาบไฟ 162 องศาเซลเซียส ไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้นี้มีความปลอดภัยในการใช้ การจัดเก็บ การเคลื่อนย้าย และการขนส่งกว่าน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียมซึ่งกำหนดจุดวาบไฟไม่ต่ำกว่า 52 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ราคาต้นทุนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบที่คิดจากค่าวัตถุดิบ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยไม่รวมค่าลงทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อประมาณลิตรละ 26.30 บาท

บรรณานุกรม

[1] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **แผนพัฒนาไบโอดีเซล 2551-2565**. กระทรวงพลังงาน. [Online]. Available: http://www.dede.go.th/dede/fileadmin/usr/bers/biodiesel/REDP_Biodiesel.mht!REDP_Biodiesel_files/slide0003.htm. 2551.

[2] มานิตย์ กู้ธนพัฒน์. **พลังงานทดแทน**. วิศวกรรมสาร. ปีที่ 59. ฉบับที่ 2. มีนาคม-เมษายน 2549.

[3] ไพบูลย์ เหล่าลดา. **ชีวิตไร้สารพิษ: ไบโอดีเซล**. [Online]. Available : http:// www.asoke.info/09Communication/ DharmaPublicize/Kid/k170/065.html. 2549.

[4] J. G. Van. **Biodiesel Processing and Production**. Fuel Processing Technology. Vol. 86. 2005. pp.1097-1107.

[5] พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล. **ไบโอดีเซลพลังงานทางเลือก**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). 2544.

[6] N. P. Anh and M. P. Tan. **Biodiesel Production from Waste Cooking Oils**. Fuel. Vol.87. 2008. pp.3490-3496.

[7] มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. **รายงานฉบับสมบูรณ์ การประเมินศักยภาพของชีวมวลเพื่อผลิตไบโอดีเซล**. บัณฑิตวิทยาลัยร่วมด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. 2549.

[8] สำนักงานวิจัยและพัฒนาปาล์มน้ำมัน. **ปัจจัยสู่ความสำเร็จของปาล์มน้ำมันไทย. ประชาคมวิจัย**. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย. ปีที่ 14. ฉบับที่ 82. พฤศจิกายน-ธันวาคม. 2551.

[9] วารี ช้วนรักธรรม. **นวัตกรรม "น้ำมันปาล์ม" จากอุตสาหกรรมอาหารสู่แหล่งพลังงานทดแทนของไทย**. Engineering Today. ปีที่ 3. ฉบับที่ 36. ธันวาคม 2548.

[10] ศูนย์วิจัยกสิกรไทย. **ปาล์มน้ำมัน : พืชเศรษฐกิจที่น่าจับตามอง**. ผู้จัดการออนไลน์. [Online]. Available: http://www.manager.co.th/Business. 2547.

[11] สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชน. **พืชน้ำมัน**. ฉบับที่ 19. [Online]. Available: http://kanchanapisek.or.th/kp6/BOOK19/chapter2/t19-2-l1.htm#sect3. 2551.

[12] โครงการเครือข่ายสารสนเทศด้านพลังงานและสิ่งแวดล้อมของประเทศไทย. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. **พลังงานทดแทน**. [Online]. Available : http://www.teenet.chula.ac.th/sustainable/detail8-2.asp?ID=754. 2552.

[13] สำนักประชาสัมพันธ์. **ทิศทางพลังงานไทย**. กระทรวงพลังงาน. 2549.

[14] M. Fangrui and A. H. Milford, **Biodiesel Production: A Review**. Bioresource Technology. Vol.70. 1999. pp.1-15.

[15] พิสมัย เจนวนิชปัญจกุล และลลิตา อัตนโถ. **รอบรู้เรื่องราวไบโอดีเซล**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). 2549.

[16] วิชณีย์ ออมทรัพย์สิน. **การแปรรูปปาล์มน้ำมันในปาล์มน้ำมัน**. สถาบันวิจัยพืชสวน. 2545.

[17] ศูนย์วิจัยปาล์มน้ำมันสุราษฎร์ธานี. **ปาล์มน้ำมัน**. สถิติปาล์มน้ำมัน. [Online]. Available: http://it.doa.go.th/palm/form-stat.html. 2551.

[18] องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ.**ปาล์มน้ำมัน**. สถิติปาล์มน้ำมันทั่วโลก. [Online]. Available: http://www.fao.org. 2551.

[19] ชมรมเพื่อการพัฒนามหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. **ปาล์มน้ำมันและอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน:คู่มือเกษตรกร**.โครงการส่งเสริมอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มขนาดเล็กตามพระราชดำริ. 2528.

[20] นคร สาระคุณ. **การจัดการการผลิตปาล์มน้ำมัน**. มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. 2545.

[21] กลุ่มส่งเสริมและพัฒนาการผลิต. **มะพร้าว**. สำนักส่งเสริมและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 5 จังหวัดสงขลา. [Online]. Available: http://sdoae.doae.go.th/coconut.php. 2551.

[22] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. **ถั่วเหลือง**. [Online]. Available:http://th.wikipedia.org/wiki/ถั่วเหลือง. 2551.

[23] นิสากร ปานประสงค์. **สบู่ดำ ความหวังแห่งพลังงานทดแทน**. สถาบันพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร [Online]. Available: http://www.kasetcity.com/Thaibioenergy. 2551.

[24] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. **สบู่ดำ**. [Online]. Available: http://th.wikipedia.org/wiki. 2551.

[25] ศูนย์ส่งเสริมวิศวกรรมเกษตรที่ 1 ชัยนาท. **สบู่ดำ**.
[Online]. Available: http://aopdm01.doae.go.th. 2551.

[26] สุรพงษ์ เจริญรัถ. **สบู่ดำ ต้นทุนการผลิตและราคาคุ้มทุนสบู่ดำ**. สถาบันพืชไร่ กรมวิชาการเกษตร. [Online]. Available: http://www.kasetcity.com/Thaibioenergy. 2551.

[27] กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. **ประมาณการความต้องการน้ำมันปาล์มดิบในอุตสาหกรรมไบโอดีเซล**. กระทรวงพลังงาน.[Online]. Available:
http:// www.dede.go.th/dede/.../510402_CPO_Demand_Supply.doc. 2551.

[28] โครงการเคยู-ไบโอดีเซล. **ความรู้เกี่ยวกับไบโอดีเซลไบโอดีเซล**. ภาควิชาเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
[Online]. Available: http://www.biodiesel.rdi.ku.ac.th. 2550.

[29] ศิริวรรณ บุรีคำ. **ไบโอดีเซลทางเลือกใหม่ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิง**. [Online]. Available: http://clgc.aid.ku.ac.th/newsletter/news 16_1/biodiesel/html. 2550.

[30] Y.C. Leung Dennis, Xuan Wu and M.K.H. Leung. **A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. Applied Energy**. Vol.87. 2010. pp.1083-1095.

[31] R. M. Praveen, C. B. Scott and H. Noureddini. **Improved Conversion of Plant Oils and Animals Fats into Biodiesel and Co-product.** Bioresource Technology. Vol.96. 1996. pp.19-24.

[32] A. W. Schwab and M. O. Bagay. **Preparation and Properties of Diesel Fuels from Vegetable Oils.** Fuel. Vol. 66. 1987. pp.1372-1378.

[33] Y. C. Sharma, B. Singh and S. N. Upadhyay. **Advancements in Development and Characterization of Biodiesel: A Review**. Fuel. Vol.87. 2008. pp.2355-2373.

[34] J. M. Marchetti and A. F. Errazu. **Esterification of Free Fatty Acids Using Sulfuric Acid as Catalyst in the Presence of Triglycerides**. Biomass and Bioenergy. Vol.32. 2008. pp.892-895.

[35] ภูธร เรืองยิ่ง. **การผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันมะพร้าวแบบต่อเนื่องโดยการเร่งปฏิกิริยาด้วยรังสีไมโครเวฟ**. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าธนบุรี. 2545. [Online]. Available: http://www.eppo.go.th/encon/abstract/049-Abs-KMUTT-Umarin.rtf. 2551.

[36] B. Freedman, E. H. Prude and T. L. Mounts. **Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils**. JAOCS. Vol.61. 1984. pp.1638-1643.

[37] V. Gemma, M. Mercedes and A. Jose. **Optimisation of Integrated Biodiesel Production. Part I. A Study of the Biodiesel Purity and Yield**. Bioresource Technology. Vol.98. 2007. pp.1724-1733.

[38] เบญจพร เมืองสมบัติ สาธิต ธัญญพฤกษานนท์ และอภิฤกษ์ อภิชนกิจ. **การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2546.

[39] M. Canakci and J. Van Gerpen. **Biodiesel Production from Oils and Fats with High Free Fatty Acids**. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. Vol.44 . 2001 . pp. 1429-1436.

[40] U. Schuchardt, R. Sercheli and R. M. Vargas. **Transesterification of Vegetable Oils: A Review**. J.Braz.Chem. Soc. 9. 1998. pp.199-210.

[41] พนิดา ศิริบังเกิดผล ลลิตา อัตนโถ ยุทธนา ฐานมงคล กษมา เพชรทับทิม อมรรัตน์ สื่อมโนธรรม และพิศมัย เจนวนิชปัญจกุล. **การวิจัยและพัฒนาเครื่องปฏิกรณ์เพื่อผลิตไบโอดีเซล**. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์ และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.). 2549.

[42] V. R. Srivathsan, L. N. Srinivasan and M. Karuppan. **An Overview of Enzymatic Production of Biodiesel**. Bioresource Technology. Vol.99. 2008. pp.3975-3981.

[43] B. Freedman, R. O. Butterfield and E. H. Pryde. **Transesterification Kinetics of Soybean**. J.Am.Oil Chem. Soc. 63. 1986. p.1380.

[44] R. A. Korus. **Transesterification Process to Manufacture Ethyl Ester of Rapeseed Oil**. Department of Chemical Engineering. University of Idaho. Moscow. 1993.

[45] Y. C. Sharma and B. Singh. **Development of Biodiesel from Karanja a Tree Found in Rural India**. Fuel. Vol. 87. 2008. pp.1740-1742.

[46] S. Chongkhong, C. Tongurai and P. Chetpattananondh. **Continuous Esterification for Biodiesel Production from Palm Fatty Acid Distillate using Economic Process**. Renewable Energy. Vol.34. 2009. pp. 1059-1063.

[47] A. Demirbas. **Comparison of Transesterification Methods for Production of Biodiesel from Vegetable Oils and Fats**. Energy Conversion and Management. Vol.49. 2008. pp.125-130.

[48] Pacific Biodiesel. **Biodiesel Fuel**. [Online]. Available:http://biodiesel.com/biodiesel_fuel.html#FUEL. 2549.

[49] พานิช พงศ์พิโรดม. **ประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง กำหนดลักษณะและคุณภาพของไบโอดีเซลประเภทเมทิลเอสเทอร์ของกรดไขมัน พ.ศ. 2550**. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 124. 2550.

[50] ประเสริฐ เทียนนิมิตร ขวัญชัย สินทรัพย์สมบูรณ์ ปานเพชร ชินินทร. **เชื้อเพลิงและสารหล่อลื่น**. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชัน. 2545.

[51] เมตตา บันเทิงสุข. **ประกาศกรมธุรกิจพลังงานเรื่องกำหนดลักษณะและคุณภาพของน้ำมันดีเซล (ฉบับที่ 3) พ.ศ. 2551**. ราชกิจจานุเบกษา. เล่มที่ 125. 2551.

[52] วิโรจน์ บุญอำนวยวิทยา. **จลนพลศาสตร์และการออกแบบเครื่องปฏิกรณ์เคมี**. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น). 2544.

[53] E. Bruce Nauman. **Chemical Reactor Design, Optimization and Scaleup**. McGraw-Hill. 2002.

[54] สาวิตรี จันทรานุรักษ์. **กระบวนการแยกเชิงกลในอุตสาหกรรม**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2546.

[55] D. Darnoko and M. Cheryan. **Kinetics of Palm Oil Transesterification in a Batch Reactor**. J.Am. Oil Chem Soc. 77. 2000. pp. 1263-1267.

[56] T. Leevijit, C. Tongurai, G. Prateepchaikul and W. Wisutmethangoon. **Performance Test of a 6-stage Continuous Reactor for Palm Methyl Ester Production**. Bioresource Technology. Vol.99. 2008. pp. 214-221.

[57] ศัลยเวศ เกตุแก้ว. **การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพจากน้ำมันพืชที่ใช้แล้วด้วยเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อที่มีสารบรรจุอยู่บางส่วน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.

[58] อนวัช ดุรงค์ภินนท์. **การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อ**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมปิโตรเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

[59] ธนาทิพย์ อัศวผดุงสิทธิ์. **การสังเคราะห์เอทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มเมล็ดในและเอทานอลด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด่าง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิคคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2547.

[60] S. Saka and D. Kusdiana. **Biodiesel Fuel from Rapeseed Oil as Prepared in Supercritical Methanol**. Fuel. Vol.80. 2001. pp.194-200.

[61] สุกัญญา มากมี. **การทดลองผลิตไบโอดีเซลจากน้ำมันพืชในเมทานอลภาวะเหนือวิกฤตโดยกระบวนการแบบต่อเนื่อง**. วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะวิทยาศาสตร์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. [Online]. Available:http://www.eppo.go.th/encon/abstract/021-Abs-CU-Sukanya.doc. 2552.

[62] H. J. Berchmans. and S. Hirata. **Biodiesel Production from Crude Jatropha Curcas L. Seed Oil with a High Content of Free Fatty Acids.** Bioresource Technology. Vol.99. 2008. pp.1716-1721.

[63] ยรรยง วารีนิล และวัฒนชัย เยาวรัตน์. **การสังเคราะห์น้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบสวนทาง 2 เครื่อง**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

[64] บุญชู ภัทรโสภาคย์ และเอกพิชญ์ ทรงคุณ. **การสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์จากน้ำมันปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์แบบท่อเล็ก**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

[65] ธันยวรรณ อนุรักษ์ภราดร พิมพ์ชนก ทุภะบุตร และเฉลิมพล นิตยสุทธิ. **การผลิตน้ำมันดีเซลชีวภาพในเครื่องปฏิกรณ์แบบท่อบรรจุ**. ปริญญานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

[66] AOCS. Ca. 5a-40. **Free Fatty Acid**. In Official Methods and Recommended Practices of the AOCS. 5th ed. lllinois. American Oil Chemists' Society Press. 1997.

[67] G.W.C. Kaye and T.H. Laby. **Tables of Physical and Chemical Constants**. 16th ed. Longman Group Ltd. 1995. p.357.

[68] J.M. Smith, H.C. Van Ness and M.M. Abbott. **Introduction to Chemical Engineering Thermodynamics**. 6th ed. McGraw-Hill. 2001.

[69] **ASTM D1298 Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products by Hydrometer Method**. [Online]. Available: http://www.astm.org/Standards/D1298.htm. 2550.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระ [66]

การคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้นตามวิธี AOCS. Ca 5a - 40

สารเคมีที่ใช้

1. เมทานอล 95 เปอร์เซ็นต์
2. สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล
3. สารมาตรฐานปฐมภูมิโพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต 0.1 นอร์มัล
4. ฟีนอล์ฟทาลีน

วิธีการทดลอง

1. หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์โดยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไฮโดรเจนพาทาเลต ($HOOCC_6H_4COOK$) 10 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-1 ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรตสารละลายมาตรฐาน

ครั้งที่	สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ (มิลลิลิตร)
1	11
2	12
3	11
เฉลี่ย	11.33

คำนวณความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์

จำนวนโมลของสารละลาย NaOH = จำนวนโมลของสารละลาย $HOOCC_6H_4COOK$

$$C_1V_1 = C_2V_2$$

$$C_1(11.33) = (0.1)(10)$$

$$C_1 = 0.088$$

ดังนั้นความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เท่ากับ 0.088 นอร์มัล

2. ทำเมทานอล 95 เปอร์เซ็นต์ ให้เป็นกลางด้วยการเติมฟีนอล์ฟทาลีนแล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.1 นอร์มัล จนสารละลายเป็นสีชมพู จากนั้นใส่เมทานอลที่เป็นกลาง 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ที่มีน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 60 มิลลิลิตร (52.36 กรัม) และเติมฟีนอล์ฟทาลีน 2 มิลลิลิตร แล้วไทเทรตด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.088 นอร์มัล จนสารละลายเป็นสีชมพู บันทึกปริมาณสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในตารางที่ ก-2

เนื่องจากน้ำมันปาล์มดิบที่ใช้มีกรดปาล์มมิติกเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง จึงคำนวณปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์ของกรดปาล์มมิติก

เปอร์เซ็นต์ของกรดปาล์มมิติก = (V x N x 25.6)/ M

เมื่อ V = ปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต

N = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.088 นอร์มัล

25.6 = ค่าคงที่สำหรับกรดปาล์มมิติก

M = น้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ (กรัม)

ตารางที่ ก-2 ปริมาณกรดไขมันอิสระจากน้ำมันปาล์มดิบในรูปเปอร์เซ็นต์ของกรดปาล์มมิติก

ครั้งที่	**น้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ (กรัม)**	**สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการไทเทรต (มิลลิลิตร)**	**ปริมาณกรดไขมันอิสระในรูปเปอร์เซ็นต์กรดปาล์มมิติก**
1	52.36	36	1.55
2	53.02	37	1.57
		ค่าเฉลี่ย	**1.56**

ภาคผนวก ข การคำนวณ

ข-1 การคำนวณปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ความหนาแน่นของน้ำมันปาล์มดิบ 0.89 กรัม/มิลลิลิตร

ความหนาแน่นของเมทานอล 0.79 กรัม/มิลลิลิตร

น้ำหนักโมเลกุลของน้ำมันปาล์มดิบ 850.1 กรัม

น้ำหนักโมเลกุลของเมทานอล 32.04 กรัม

อัตราส่วนโดยโมลของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1

เมทานอล 6 โมล มีปริมาตร $= \frac{32.04}{0.79} \times 6 =$ 243 มิลลิลิตร

น้ำมันปาล์มดิบ 1 โมล มีปริมาตร $= \frac{850.1}{0.89} =$ 955 มิลลิลิตร

คิดเทียบเท่าอัตราส่วนโดยปริมาตรของเมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบประมาณ 1 ต่อ 4

ข-2 การคำนวณขนาดของเครื่องทำความร้อน

สำหรับอัตราการไหลเชิงปริมาตรรวมของสารตั้งต้น 3,600 มิลลิลิตร/ชั่วโมง (น้ำมันปาล์มดิบต่อเมทานอล 4 ต่อ 1 โดยปริมาตร ดังนั้นน้ำมันปาล์มดิบ 2,880 มิลลิลิตร/ชั่วโมง และเมทานอล 720 มิลลิลิตร/ชั่วโมง)

อุณหภูมิสูงสุดที่ใช้ในการทดลอง คือ 100 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลอง คือ 30 องศาเซลเซียส

ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันปาล์มดิบ [57] = 2.1 จูล/กรัม . องศาเซลเซียส

ความจุความร้อนจำเพาะของเมทานอล [67-68] = 2.55 จูล/กรัม . องศาเซลเซียส

อัตราการไหลเชิงมวลของน้ำมันปาล์มดิบ = 2,880 x 0.89

= 2,563.2 กรัม/ชั่วโมง

อัตราการไหลเชิงมวลของเมทานอล = 720 x 0.79

= 568.8 กรัม/ชั่วโมง

ดังนั้นขนาดของเครื่องทำความร้อนที่ต้องการสำหรับน้ำมันปาล์มดิบและเมทานอล

= [2,563.2 x 2.1 x (100-30)]/3,600 +[568.8 x 2.55 x (100-30)]/3,600

= 104.7 + 28.2 วัตต์

= 133 วัตต์

ข-3 การคำนวณเวลาในการทำปฏิกิริยา (Space time) ในเทอมของอัตราการไหลรวมของสารตั้งต้นสำหรับเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อขนาด 0.59 ลิตร

จากสมการ

$$\tau = \frac{V}{v_o} \qquad \text{(ข-1)}$$

เมื่อ τ คือ เวลาในการทำปฏิกิริยา (Space time)

V คือ ปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์

v_o คือ อัตราการไหลเชิงปริมาตร

ดังนั้น อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 10 นาที = 590/10 = 59 มิลลิลิตร/นาที

อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 15 นาที = 590/15 = 40 มิลลิลิตร/นาที

อัตราการไหลเชิงปริมาตรที่เวลาในการทำปฏิกิริยา 30 นาที = 590/30 = 20 มิลลิลิตร/นาที

ข-4 การคำนวณร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์

$$\text{ร้อยละโดยน้ำหนักของผลิตภัณฑ์} = \frac{\text{น้ำหนักผลิตภัณฑ์ x 100}}{\text{น้ำหนักสารตั้งต้น}} \qquad \text{(ข-2)}$$

ข-5 การคำนวณค่าใช้จ่ายโดยประมาณในการผลิตไบโอดีเซล

คิดค่าวัตถุดิบ ค่าสารเคมี ค่าไฟฟ้า และค่าใช้จ่ายอื่นๆ โดยไม่รวมค่าลงทุนการสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ จาก ก-1 เมทานอลต่อน้ำมันปาล์มดิบ 6 ต่อ 1 โดยโมล หรือ 1 ต่อ 4 โดยปริมาตร ในการทดลองใช้น้ำมันปาล์มดิบ 1 ลิตร เมทานอล 250 มิลลิลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 8.9 กรัม (1 % โดยน้ำหนักของน้ำมันปาล์มดิบ) ได้ไบโอดีเซล 995 มิลลิลิตร

ตารางที่ ก-1 ค่าใช้จ่ายในการผลิตไบโอดีเซล 10 ลิตร จากน้ำมันปาล์มดิบ

รายการ	**ปริมาณที่ใช้**	**ราคา (บาท)**
1. น้ำมันปาล์มดิบ	10.04 ลิตร	181
2. ค่าสารเคมี		
- เมทานอล	2.5 ลิตร	50
-โซเดียมไฮดรอกไซด์	89 กรัม	12
3. ค่าไฟฟ้าและค่าใช้จ่ายอื่นๆ		~ 20
รวม		263

ราคาต้นทุนของไบโอดีเซลจากน้ำมันปาล์มดิบประมาณลิตรละ 26.30 บาท

ภาคผนวก ค การวิเคราะห์สมบัติทางเชื้อเพลิงของไบโอดีเซล

อุปกรณ์และสารเคมี

1. เครื่องวัดความหนืดแบบเซย์โบลต์
2. ไบโอดีเซลในรูปของเมทิลเอสเทอร์ที่สังเคราะห์ได้
3. ขวดวัดปริมาตรขนาด 60 มิลลิลิตร
4. กระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร
5. บีกเกอร์
6. นาฬิกาจับเวลา

ค-1 ความหนืด [64]

เครื่องวัดความหนืดที่ใช้คือแบบเซย์โบลต์ยูนิเวอร์แซล (Saybolt Universal) ของ Koehler รุ่น K21590 ซึ่งวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D88 โดยการจับเวลาการไหล (วินาที) ของน้ำมัน 60 มิลลิลิตรที่ไหลผ่านหลอดบรรจุของเหลวของเครื่องวัดความหนืดที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.0695 นิ้ว (1.77 มิลลิเมตร) ความยาว 0.4823 นิ้ว (12.25 มิลลิเมตร) จะได้ค่าความหนืดในหน่วยวินาที-เซย์โบลต์ (Saybolt Universal Second: SUS)

ขั้นตอนการวัดความหนืด

1. เปิดสวิตช์ของเครื่องวัดความหนืด
2. ปิดจุกคอร์กที่ปากทางออกของหลอดบรรจุของเหลวของเครื่องวัดความหนืด
3. ใส่เมทิลเอสเทอร์ลงในหลอดบรรจุของเหลวของเครื่องวัดความหนืดในระดับต่ำกว่าขอบเล็กน้อย ปรับอุณหภูมิของเครื่องวัดความหนืดให้คงที่ที่ 40 องศาเซลเซียส
4. นำขวดวัดปริมาตรขนาด 60 มิลลิลิตร วางใต้จุกคอร์กเพื่อให้เมทิลเอสเทอร์ที่ไหลจากหลอดบรรจุของเหลวของเครื่องวัดความหนืดสัมผัสผิวด้านในของขวดโดยไม่กระเด็นและเกิดฟอง
5. ดึงจุกคอร์กออกและเริ่มจับเวลา จนกระทั่งระดับของเมทิลเอสเทอร์ในขวดถึงขีดวัดปริมาตร บันทึกเวลาที่ได้เป็นวินาทีซึ่งคือวินาที-เซย์โบลต์
6. ทำการทดลองซ้ำเพื่อหาค่าเฉลี่ย

เปลี่ยนหน่วยเวลาวินาที-เซย์โบลต์ เป็นเซนติสโตกส์ (cSt) ด้วยสมการ (ค-1) และ (ค-2)

$$\nu = 0.226t - \frac{195}{t} \quad (\text{เมื่อ t อยู่ระหว่าง 32-100 วินาที}) \qquad (ค\text{-}1)$$

$$\nu = 0.220t - \frac{135}{t} \quad (\text{เมื่อ t มากกว่า 100 วินาที}) \qquad (ค\text{-}2)$$

ค-2 ความถ่วงจำเพาะเอพีไอ (°API : ASTM D 1298 Standard Test Method for API Gravity of Crude Petroleum and Petroleum Products by Hydrometer Method) [69]

1. ใส่เมทิลเอสเทอร์ 800 มิลลิลิตร ลงในกระบอกตวงขนาด 1,000 มิลลิลิตร

2. ลดอุณหภูมิเมทิลเอสเทอร์ในกระบอกตวงด้วยน้ำเย็นเป็น 60 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 15.6 องศาเซลเซียส

3. นำไฮโดรมิเตอร์หย่อนลงในเมทิลเอสเทอร์ช้าๆ โดยให้ไฮโดรมิเตอร์ลอยอยู่เหนือก้นของกระบอกตวง แล้วอ่านค่าความถ่วงจำเพาะที่ 60 องศาฟาเรนไฮต์ จากตัวเลขที่ก้านของไฮโดรมิเตอร์

4. คำนวณความถ่วงจำเพาะเอพีไอ (°API) จากความถ่วงจำเพาะที่ 60 องศาฟาเรนไฮต์ จากสมการที่ ค-3

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{Sp.Gr.60/60^{\circ}F} - 131.5 \qquad \text{(ค-3)}$$

5. ทำการทดลองซ้ำอย่างน้อย 2 ครั้ง ค่าที่ได้ต้องไม่แตกต่างกันเกิน 0.2°API

6. ถ้าไม่สามารถลดอุณหภูมิของเมทิลเอสเทอร์ได้ที่ 60 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 15.6 องศาเซลเซียส ให้ลดอุณหภูมิให้ต่ำสุดโดยที่เมทิลเอสเทอร์ยังไม่เกิดไข จากนั้นนำความถ่วงจำเพาะเอพีไอที่ได้มาคำนวณเพื่อเทียบเป็นค่าที่อุณหภูมิ 60 องศาฟาเรนไฮต์ หรือ 15. 6 องศาเซลเซียส ด้วยสมการที่ ค-4

$$\text{API}(60^{\circ}\text{F}) = (0.002\,(60 - T) + 1) \cdot \text{API}(T) \qquad \text{(ค-4)}$$

API (60°F) = ความถ่วงจำเพาะเอพีไอจากการคำนวณที่อุณหภูมิ 60 องศาฟาเรนไฮต์

API (T) = ความถ่วงจำเพาะเอพีไอที่อ่านได้ที่อุณหภูมิ T

T = อุณหภูมิต่ำสุดของเมทิลเอสเทอร์ที่ยังไม่เกิดไข (องศาฟาเรนไฮต์)

ภาคผนวก ง วิทยานิพนธ์และบทความสำหรับการเผยแพร่

1. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2553 (KMITL 2010-EN-M-220-097).

2. Anchaleeporn Waritswat Lothongkum, Keskanok Khumduang and Tharapong Vitidsant. “Transesterification of Crude Palm Oil and Methanol using Sodium Hydroxide Catalyst in a Continuous Tubular Reactor: I Reaction Parameters”.

Transesterification of Crude Palm Oil and Methanol using Sodium Hydroxide Catalyst in a Continuous Tubular Reactor: I Reaction Parameters

Anchaleeporn Waritswat Lothongkum[a*], Keskanok Khumduang [a], Tharapong Vitidsant[b]

[a] Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
[b] Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University
[a*] Corresponding author: kwanchal@kmitl.ac.th

Abstract

The production of biodiesel can either be in a batch process or continuous operation. This paper shows the production of biodiesel via transesterification of crude palm oil and methanol using sodium hydroxide catalyst in a continuous tubular reactor. The molar ratio of methanol and crude palm oil was fixed at 6:1 and the sodium hydroxide concentration was 1 % by weight of crude palm oil. The reaction temperature was varied from 60, 70, 80, 90 and 100°C at a reactant volumetric flow rate of 20, 40 and 60 ml/min. Methyl esters of 97.8 % (wt.% of crude palm oil) were obtained at the temperature of 90°C and the reactant volumetric flow rate of 40 ml/min.

Keywords: biodiesel, transesterification, crude palm oil, continuous tubular reactor, methyl ester

1. Introduction

Biodiesel is currently the most widely accepted alternative fuel for diesel engines due to its technical and environmental advantages. It reduces emissions from the combustion such as carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides, and improves lubricity in comparison with conventional diesel fuels [1]. Biodiesel is produced from vegetable oils such as palm oil, soy bean oil, sunflower oil, rapeseed oil or animal fats (usually tallow) as well as waste oils, i.e., used flying oils. Generally, biodiesel has higher density, viscosity, cloud point and cetane number, and lower volatility and heating value compared to commercial grades of diesel fuels [2–5].

Vegetable oils have too high viscosity for use in most existing diesel engine, therefore, four methods to solve the problems encountered with high fuel viscosity have been investigated by transesterification, pyrolysis, microemulsion and blending with petrodiesel. Transesterification is a chemical conversion of animal fats or mostly vegetable oils to corresponding fatty esters [6]. It is a reaction in which triglycerides (TG), the main component of vegetable oils or animal fats, reacts with short-chain alcohols, mainly methanol (MeOH) and proceeds well in the presence of some catalysts to form fatty acid methyl esters (FAME). Figure 1 shows transesterification reaction of triglycerides. There are three stepwise reactions with intermediate formation of monoglycerides (MG) and diglycerides (DG) resulting in the production of 3 mol of methyl esters (ME) and 1 mol glycerol (GL) [7]. Biodiesel in most cases is therefore termed as fatty acid methyl esters of vegetable oils or animal fats.

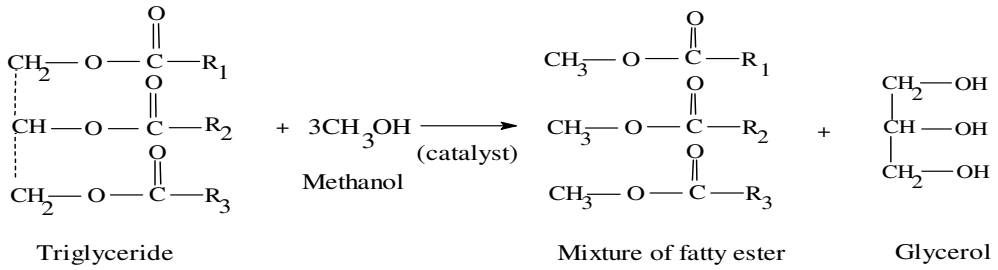


Figure 1: Transesterification reaction of triglycerides

The homogeneous catalysts such as potassium hydroxide (KOH), sodium hydroxide (NaOH) and sulfuric acid, or heterogeneous catalysts such as metal oxides or carbonates are used [8-10]. Alkali catalysts are recommended for transesterification of vegetable oils or animal fats in which free fatty acids (FFA) and water content less than 0.5 and 0.06 %, respectively [11-12]. In contrast, if vegetable oils or animal fats contain high free fatty acids and water content, acid catalysts are selected. Among alkali catalysts, sodium hydroxide is widely used because of its low cost and high product yield [6, 13].

Besides the type of catalyst, the molar ratio of alcohol to vegetable oil, temperature, reaction time, the effect of the presence of water content and free fatty acid are reaction parameters of interest to be investigated. Freedman et al. [14] studied transesterification of vegetable oil using sodium hydroxide catalyst. The best reaction conditions were found at 60°C and 1 h by using a molar ratio of methanol to oil at least 6:1. In case of ethanol and buthanol higher temperatures, i.e., 75 and 114°C, respectively were required to achieve the highest conversion.

Palm oil is one of the potential choices of raw material, particularly for the agricultural countries. Jitputti et al. [15] studied transesterification of crude palm kernel oil by sulfated zirconia solid catalyst. Crabbe et al. [16] used sulfuric acid catalyst to produce methyl ester from crude palm oil with the molar ratio of methanol and crude palm oil at 40:1.

. Therefore, in this work the reaction temperature and volumetric flow rate of the reactant on yields of methyl esters of transesterification of crude palm oil and methanol using sodium hydroxide catalyst in a continuous tubular reactor are investigated. The obtained conditions are expected for a study of the separation of methyl ester and glycerol.

2. Materials and Methods

2.1 Materials

The compositions of fatty acids in crude palm oil (CPO) were determined by gas chromatography. MeOH with purity of 95 %, H_2SO_4 and NaOH with purity of 98 % were used.

2.2 Methods

2.2.1 Acid pretreatment [14]

Before transesterification by alkali catalysts, the free fatty acids of CPO must be removed to less than 0.5% by weight of CPO. Because high FFA cause the saponification reaction parallels with transesterification [17]. FFA of CPO were first converted to esters in a pretreatment process using methanol and sulfuric acid. In the first step, CPO was preheated to 80°C for 1 h to remove water then kept at the ambient temperature. The second step, methanol 20% by weight of CPO and sulfuric acid at 1% by volume of CPO were added. The pretreatment process was carried out at 60°C for 1 h. FFA in the CPO moved into methanol layer, and the pretreated oil separated from the methanol layer. Subsequently, the pretreated oil was used for alkali-catalyzed transesterification.

2.2.2 Transesterification in a batch process and continuous process

The batch process was used to determine the preliminary conditions for the tubular continuous process**.** The molar ratio of methanol and crude palm oil was fixed at 6:1 based on the literature [14] as well as the sodium hydroxide concentration at 1% by weight of crude palm oil. The reaction was carried out in a 500-ml beaker equipped with a stirrer. The pretreated oil about 200 ml was heated to 50°C in a water bath at 250 rpm for 15 min. The

reaction temperature was also investigated at 60 and 70°C while the reaction time was varied to 30 and 45 min. After the reaction, the methyl ester layer was separated above the glycerol rich-phase in a decantation funnel. The methyl ester layer was purified. By using the same procedures, the sodium hydroxide concentration was checked by changing from 0.5, 1.25 and 1.5 % by weight of crude palm oil.

The reaction parameters that obtained from the batch process were used in the continuous tubular reactor. The reaction temperature of 60, 70, 80, 90 and 100°C and the reactant volumetric flow rate of 20, 40 and 60 ml/min were studied.

Figure 2 shows a schematic diagram of the continuous process built in this work for biodiesel production via transesterification of crude palm oil. It is a 24-m stainless steel tubular reactor with the outside diameter of ¼ inch. The products were kept at a steady state and the glycerol was separated from the methyl ester layer by a decantation funnel.

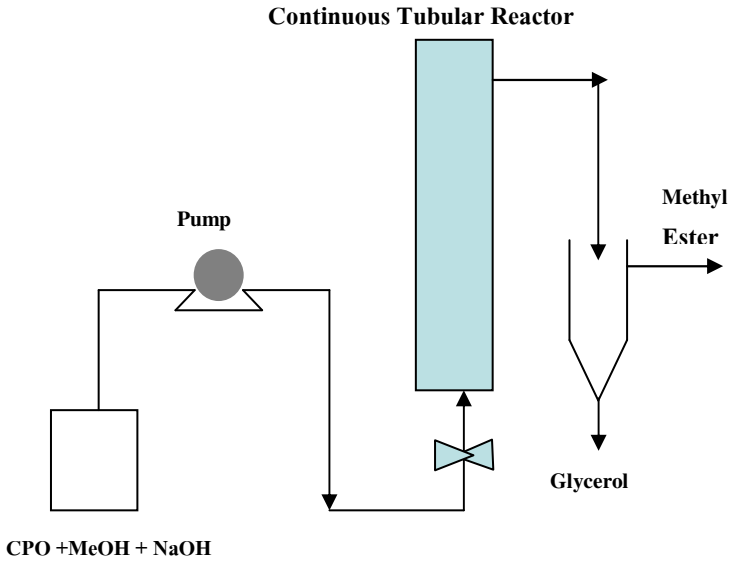


Figure 2: Schematic flow diagram of a continuous process for transesterification of crude palm oil

2.2.3 Purification of methyl ester phase

After separating the glycerol from the methyl ester layer, the methyl ester layer was purified by washing with hot water at 80°C to remove the excess methanol, sodium hydroxide catalyst and trace of glycerol until it was neutral. The residual water and methanol were removed from the methyl esters by heating at 120°C for 1 h.

2.2.4 Analytical method

The methyl esters were analyzed by the gas chromatography equipped with a flame ionization detector (FID). Helium was used as the carrier gas. The temperature of the injector and detector were maintained at 250 and 300°C, respectively. Methyl heptadecanoate 99% and heptane 99.5% were used as the analyzing reagents. The 1-µl of the mixture containing 0.25 g biodiesel and 5 ml of methyl heptadecanoate and heptane was injected into the gas chromatography. A peak identification was made by comparing the retention time of the sample and that of the standard compound. The content of fatty acid methyl esters was calculated from peak areas over the reference peak area by the following equation from EN ISO 5508.

$$C = \frac{\left(\sum A\right) - A_{IS}}{A_{IS}} \times \frac{C_{IS} \times V_{IS}}{W} \times 100 \qquad (1)$$

where $\sum A$ is the total peak area from the methyl esters in C_{14} to that in $C_{24:1}$; A_{IS} is the peak area corresponding to methyl heptadecanoate; C_{IS} is the concentration of the methyl heptadecanoate solution (mg/ml); V_{IS} is the volume of the methyl heptadecanoate solution (ml); W is the mass of sample (g).

3. Results and Discussion

3.1 Characteristics of crude palm oil

Table 1 shows the compositions of fatty acids in CPO by the gas chromatography. The free fatty acid value in the palmitic acid was obtained by the titration according to AOCS.Ca 5a-40 method. The free fatty acids of 1.56% by weight of crude palm oil was calculated using Eq.(2) [18]. In this work, it is necessary to pretreat CPO before the reaction because the alkali catalyst of transesterification is very sensitive to the purity of the reactant, and the efficiency of transesterification is decreased when the FFA content in the oil is greater than 0.5 wt.%.

$$\% \text{ palmitic acid} = \frac{(V \times N \times 25.6)}{M} \qquad (2)$$

where V is the volume of the titrated sodium hydroxide (ml); N is the concentration of sodium hydroxide (N); M is the mass of crude palm oil (g).

Table 1: Characteristics of crude palm oil

Fatty acid	PORIM* specification	This work (wt.% of crude palm oil)
Lauric	0-0.4	0.42
Myristic	0.6-1.6	1.26
Palmitic	41-47	42.78
Palmitoleic	0-0.6	0.34
Stearic	3.7-5.6	4.46
Arachidic	0-0.8	0.24
Saturated fatty acids (%)	45.3-55.4	49.06
Oleic	38.2-43.5	39.52
Linoleic	6.6-11.9	7.91
Linolenic	0-0.5	0.37
Unsaturated fatty acids (%)	44.8-57.3	50.94

* Palm Oil Research Institute of Malaysia [16]

3.2 Batch process

3.2.1 Effects of reaction temperature and reaction time

From Figure 3, the FAME of 89.5% was obtained at 60°C and 45 min.

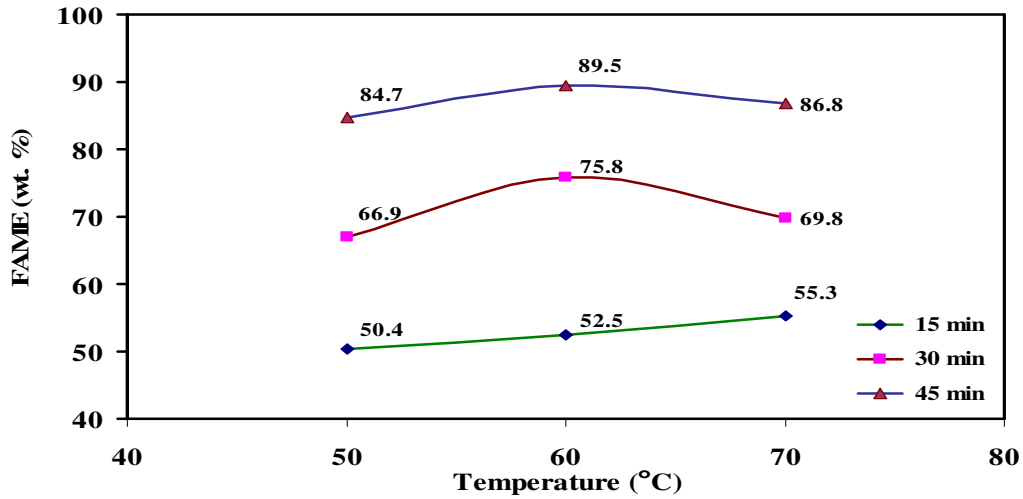


Figure 3: Effects of reaction temperature and time on FAME content at a molar ratio of methanol to CPO of 6:1 and 1 % NaOH

3.2.2 Effect of sodium hydroxide concentration

The concentration of sodium hydroxide was varied at 0.5, 1.0, 1.25 and 1.5% (wt.% of crude palm oil) at 60°C and 45 min. From Figure 4, it was found at sodium hydroxide concentration of 1.0% by weight of crude palm oil, the maximum amount of FAME of 89.5% was obtained. However, at sodium hydroxide concentration of 1.5%, the viscosity of product increased due to gel formation resulting in a decrease of methyl ester yield.

3.3 Continuous process

3.3.1 Effects of reaction temperature and volumetric flow rate of reactant

From Figure 5, the amount of FAME did not change much at different volumetric flow rates. The maximum FAME of 97.8 % was obtained at the reaction temperature of 90°C and the reactant volumetric flow rate of 40 ml/min.

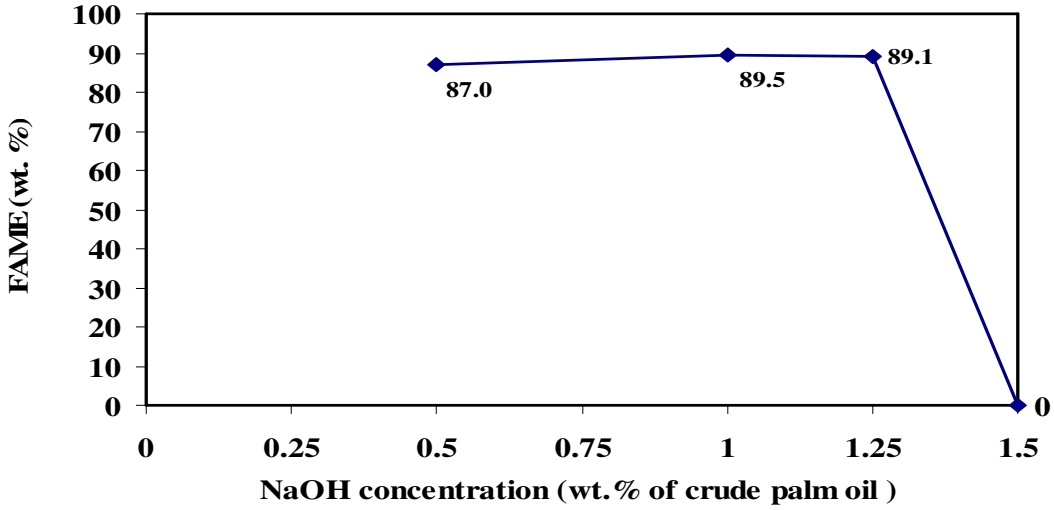


Figure 4: Effect of sodium hydroxide concentration on FAME content at a molar ratio of methanol to CPO of 6:1, reaction temperature of 60°C and reaction time 45 min

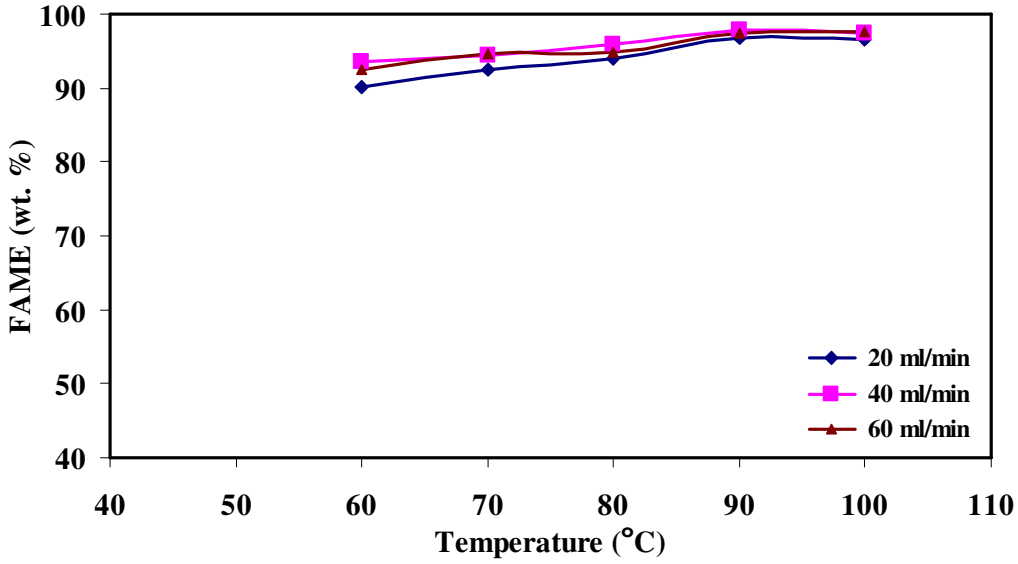


Figure 5: Effects of reaction temperature and reactant volumetric flow rate on FAME content at a molar ratio of methanol to CPO of 6:1 and 1 % NaOH

4. Conclusion

The optimum conditions of transesterification of crude palm oil and methanol (molar ratio 1:6) using sodium hydroxide catalyst in a continuous tubular reactor were at the reaction temperature of 90°C and the reactant volumetric flow rate of 40 ml/min. Methyl esters of 97.8 % by weight of crude palm oil were obtained. These conditions will further be used to find the effects of the speed of the centrifuge and time on the separation of methyl ester and glycerol.

Acknowledgements

The partial financial support from Thailand Research Fund (TRF) is deeply acknowledged. Sincere thanks also go to the Department of Chemical Technology, Faculty of Science, Chulalongkorn University, the Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and the School of Graduate Studies, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang.

References

[1] Benjumea, P., Agudelo, J. and Agudelo, A., Basic properties of palm oil biodiesel–diesel blends, Fuel, 2007.

[2] Sheehan, J., Cambreco, V., Duffield, J. Gabroski, M. and Shapouri, H., An overview of biodiesel and petroleum diesel life cycle, A joint study sponsored by U.S Department of Agriculture and Energy, pp.1-35, 1998.

[3] Jianbo, H., Zexue, D., Changxiu, L. and Enze, M., Study on the lubrication properties of biodiesel as fuel lubricity enhancers, Fuel, Vol.83, pp.1601-1606, 2005.

[4] Knothe, G., Gerpen, J.V. and Krahl, J.The Biodiesel Handbook, AOAC Press, 2005.

[5] Saka, S. and Kusdiana, D., Biodiesel fuel from rapeseed oil as prepared in supercritical methanol, Fuel, Vol. 80, pp.194 – 200, 2001.

[6] Demirbas, A., Biodiesel fuels from vegetable oils via catalytic and noncatalytic supercritical alcohol transesterifications and other methods: a survey, Energy Conversion Management, Vol.44, pp.2093–2109, 2003.

[7] Freedman, B., Butterfield, R.O. and Pryde, E.H., Transesterification kinetics of soybean oil, J. Am. Oil Chemists' Soc., Vol.63, pp.1375–1380, 1986.

[8] Ngamcharussrivichai, C., Wiwatnimit, W., and Wangnoi, S., Modified dolomites as catalysts for palm kernel oil transesterification, Journal of Molecular catalysis A: Chemical, Vol.276, pp.24–33, 2007.

[9] Demirbas, A., Comparison of transesterification methods for production of biodiesel from vegetable oils and fats, Energy Conversion and Management, Vol.49, pp.125–130, 2007.

[10] Antolin, G., Tinaut, F.V., Briceno, Y., Castano, V., Perez, C. and Ramirez, A.I., Optimisation of biodiesel production by sunflower oil transesterification, Bioresource Technology, Vol.83, pp.111-114, 2002.

[11] Fangrui, Ma and Milford, H.A., Biodiesel Production: A Review Bioresource Technology, Vol.70, pp.1-15, 1999.

[12] Kusdiana, D. and Saka, S., Effects of water on biodiesel fuel production by supercritical methanol treatment. Biores Technol, Vol.91, pp.289–295, 2004.

[13] Markolwitz, M., Consider Europe's most popular catalyst, Biodiesel Magazine, Vol.1, pp.20-22, 2004.

[14] Freedman, B., Prude, E.H. and Mounts, T.L., Variables Affecting the Yields of Fatty Esters from Transesterified Vegetable Oils. JAOCS, Vol.61, pp.1638-1643, 1984.

[15] Jitputti, J., Kitiyanan, B., Rangsunvigit, P., Bunyakiat, K., Attanatho, L. and Jenvanitpanjakul, P., Transesterification of crude palm kernel oil and crude coconut oil by different solid catalysts, Chemical Engineering Journal, Vol.116, pp.61–66, 2006.

[16] Crabbe, E., Nolasco-Hipolito, C., Kobayashi, G., Sonomoto, K. and Ishizaki, A., Biodiesel production from crude palm oil and evaluation of butanol extraction and fuel properties. Journal of Process Biochemistry, Vol.37, pp.65-71, 2001.

[17] Malaya, N., Meher, L.C., Naik, S.N. and Das, L.M., Production of biodiesel from high free fatty acid Karanja (Pongamia pinnata) oil, Biomass and Bioenergy, 2007.

[18] Zhang, Y., Dube, M.A., McLean, D.D. and Kates, M., Biodiesel production from waste cooking oil: 1. process design and technological assessment, Bioresource Technology, Vol.89, pp.1–16, 2003.

ภาคผนวก จ ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

ตารางที่ จ-1 เปรียบเทียบวัตถุประสงค์และผลที่ได้รับตลอดโครงการ

วัตถุประสงค์	ผลที่ได้รับตลอดโครงการ
1. ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ	ได้ภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์เมทิลเอสเทอร์ตามรายละเอียดในสรุปผลงานวิจัย เมทิลเอสเทอร์ที่ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพของกรมธุรกิจพลังงาน
2. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอล	สามารถลดเวลาในการแยกเมทิลเอสเทอร์จากกลีเซอรอลได้

ตารางที่ จ-2 เปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับจากการดำเนินการ

กิจกรรม	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ	ผลที่ได้รับจากการดำเนินการ
1. ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อเพื่อผลิตไบโอดีเซล	1. ออกแบบและสร้างเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อเพื่อผลิตไบโอดีเซล	1. ได้เครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อเพื่อผลิตไบโอดีเซล
2. วิเคราะห์สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบ	2. วิเคราะห์สมบัติของน้ำมันปาล์มดิบ	2. ทราบองค์ประกอบและสมบัติของน้ำมันปาล์มดิบ
3. หาภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยา	3. หาตัวแปรในการทำปฏิกิริยา ได้แก่ ความเข้มข้นของตัวเร่งปฏิกิริยา อุณหภูมิ และเวลาในเทอมของอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำมันปาล์มดิบที่ผสมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเมทานอล	3. ได้ภาวะที่เหมาะสมในการทำปฏิกิริยาทรานส์เอสเทอริฟิเคชันของน้ำมันปาล์มดิบกับเมทานอลโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาโซเดียมไฮดรอกไซด์ในเครื่องปฏิกรณ์ต่อเนื่องแบบท่อ และได้เมทิลเอสเทอร์ 98 %

ตารางที่ จ-2 เปรียบเทียบกิจกรรมที่วางแผนไว้ กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ และผลที่ได้รับจากการดำเนินการ (ต่อ)

กิจกรรม	กิจกรรมที่ได้ดำเนินการ	ผลที่ได้รับจากการดำเนินการ
4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์กับกลีเซอรอลจากการแยกด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก	4. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการแยกเมทิลเอสเทอร์จากกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก	4. ปัจจัยที่เหมาะสมสามารถลดเวลาในการแยกเมทิลเอสเทอร์ออกจากกลีเซอรอลด้วยเครื่องเหวี่ยงแยก คือ ความเร็วรอบ 450 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการเหวี่ยงแยก 25 นาที
5. วิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้	5. วิเคราะห์สมบัติของไบโอดีเซลที่สังเคราะห์ได้	5. ไบโอดีเซลที่ได้มีสมบัติทางเชื้อเพลิงเป็นตามมาตรฐานน้ำมันดีเซลชีวภาพของกรมธุรกิจพลังงานและตามมาตรฐาน DIN 51606 ของสหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี และมาตรฐาน US ASTM D6751-02 ของสหรัฐอเมริกา